

Maßnahmenkatalog zur Verminderung der elektromagnetischen Umweltbelastung



Maßnahmenkatalog zur Verminderung der elektromagnetischen Umweltbelastung

Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes NRW

Die stetig zunehmende Anwendung elektrischer Energie und die breite Einführung drahtloser Kommunikationstechniken führen zu einem Anstieg elektromagnetischer Strahlung in der Umwelt. Viele Menschen befürchten, dass sie bei dieser Einwirkung zunehmend gesundheitlichen Belastungen ausgesetzt werden.

Elektrische und magnetische Felder beeinflussen den menschlichen Organismus und können ihn bei hohen Feldstärken schädigen. Inwieweit auch bei geringen Feldstärken Gefahren auftreten, ist wissenschaftlich umstritten.

Das Land NRW hat sich zum Ziel gesetzt, schädliche Umwelteinwirkungen durch elektrische und magnetische Felder zu verhindern und insbesondere bei der Planung von Neuanlagen im Sinne einer vorsorgenden Umweltpolitik tätig zu werden.

Um dem Vorsorgegedanken weitgehend Rechnung zu tragen, muss systematisch nach Möglichkeiten gesucht werden, die Belastung der Bevölkerung durch alle Feldquellen zu vermeiden oder zu verringern. Das Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW hat deshalb 1997 eine Literaturstudie in Auftrag gegeben, die Maßnahmen zur Verminderung der elektromagnetischen Umweltbelastung aufzeigen soll. Der Maßnahmenkatalog stellt einen vollzugsunterstützenden Leitfaden für die Immissionsschutzbehörden in NRW dar, um im Rahmen ihrer Überwachungstätigkeit konkrete Maßnahmen an einer Anlage anordnen zu können.

März 1998

Auftrag und Koordination :

Dipl.-Phys. Rainer Kindel, Landesumweltamt NRW, neu: LANUV NRW, Wallneyer Str. 6, D-45133 Essen
Dr. Elke Stöcker-Meier, MURL NRW, neu: MUNLV NRW, Schwannstr. 3, 40476 Düsseldorf

**Abschlußbericht zum
Projekt
Nr. 96/5000/8041**

**"Erstellung eines
Maßnahmenkatalogs
zur Verminderung
der elektromagnetischen
Umweltbelastung"**

für das

**Landesumweltamt Nordrhein-
Westfalen, Essen**

17. September 1997

Projektkoordination am IMST und Teil 2

Dr. Christian Bomkessel, Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH,
Abteilung Elektromagnetische Verträglichkeit und Umweltaspekte (EMVU),
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2, 47475 Kamp-Lintfort

Biologische Beratung

Dr. Uwe Kullnick, Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH,
Abteilung Elektromagnetische Verträglichkeit und Umweltaspekte (EMVU),
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2, 47475 Kamp-Lintfort

Inhaltsverzeichnis

Einführung

Teil 1: "Darstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung der Belastungen durch elektrische und magnetische Felder im *Niederfrequenz-Bereich*"

vom ECOLOG-Institut für sozial-ökonomische Forschung und Bildung gGmbH

Teil 2: "Darstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung der Belastungen durch elektrische und magnetische Felder im *Hochfrequenz-Bereich* sowie für *statische Felder und Gleichfelder*"

vom Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik GmbH

Einführung

Das Land Nordrhein-Westfalen hat die Vergabe von Untersuchungsvorhaben zur Thematik "Elektrosmog" begonnen. Das Gesamtuntersuchungsvorhaben setzt sich dabei aus mehreren Teilvorhaben zusammen, die separat abgearbeitet werden.

Der vorliegende Abschlußbericht umfaßt die Erstellung eines Maßnahmenkatalogs zur Verminderung der elektromagnetischen Umweltbelastung nach Teilvorhaben 3 des Gesamtuntersuchungsvorhabens. Hierbei sollen in einem Maßnahmenkatalog die Maßnahmen dargestellt werden, die zur Verminderung der Feldstärken bzw. zur Vermeidung weiterer Belastungen möglich sind. Im Rahmen einer Literaturstudie werden die in ihren Grundprinzipien bekannten Minderungsmaßnahmen praxisorientiert und systematisch dargestellt. Es wird sich dabei auf bezüglich Art und Frequenz der Anlage relevante und in der Bevölkerung besonders diskutierte Quellen, wie z.B. Hochspannungsfreileitungen oder Mobilfunksendeanlagen, konzentriert. Die Maßnahmen werden auf ihre Anwendbarkeit auch im Hinblick der Nachrüstung bestehender und der präventiven Ausrüstung neuer Anlagen untersucht. Die Ergebnisse spiegeln den derzeitigen Kenntnisstand wider und zeigen mögliche Kenntnislücken im Bereich der Abschirmmaßnahmen auf, die aber nicht weiter untersucht werden.

Der Abschlußbericht ist wie folgt gegliedert: Teil I beschäftigt sich mit der Darstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung der Belastungen durch elektrische und magnetische Felder im *Niederfrequenz-Bereich*. Dieser Teil wurde vom ECOLOG-Institut für sozial-ökonomische Forschung und Bildung gGmbH, Hannover bearbeitet. Teil 2 umfasst den *Hochfrequenzbereich* sowie *statische Felder und Gleichfelder*. Verfasser dieses Teils ist das Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik IMST GmbH, Kamp-Lintfort.

Alle in diesem Bericht enthaltenen Angaben, Daten, Ergebnisse usw. wurden von den Bearbeitern nach bestem Wissen erstellt mit größtmöglicher Sorgfalt überprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht völlig auszuschließen. Daher erfolgen die Angaben usw. ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie des Auftragnehmers. Der Auftragnehmer übernimmt deshalb keine Verantwortung und Haftung für etwa vorhandene inhaltliche Unrichtigkeiten. Insbesondere übernimmt die IMST GmbH keine Verantwortung für die Richtigkeit der Angaben, Darstellungen und Bewertungen von Minderungsmaßnahmen durch das ECOLOG-Institut.

Teil 1

Darstellung und Bewertung von
Maßnahmen zur Vermeidung und
Verminderung der Belastungen
durch
elektrische und magnetische Felder
im
Niederfrequenz-Bereich

ausgearbeitet vom

ECOLOG-Institut für
sozial-ökonomische Forschung und
Bildung gGmbH, Hannover

ECOLOG

INSTITUT FÜR SOZIAL - ÖKOLOGISCHE FORSCHUNG UND BILDUNG gGmbH

Darstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung der Belastungen durch elektrische und magnetische Felder im Niederfrequenzbereich-Bereich

Bearbeitet von

H.-Peter Neitzke

Hartmut Voigt

für

Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik Kamp-
Lintfort

Darstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung der Belastungen durch elektrische und magnetische Felder im Niederfrequenzbereich-Bereich

Zusammenfassung

Mit zunehmendem Einsatz elektrischer Energie nehmen auch die netzfrequenten elektrischen und magnetischen Felder in der Umwelt zu. Insbesondere niederfrequente Magnetfelder verursachen Störungen empfindlicher technischer Geräte schon bei magnetischen Flussdichten von 0,5 bis 1 μT . Im medizinischen Bereich kann dies mit Risiken für Patienten verbunden sein. Gerätebeeinflussungen durch niederfrequente Magnetfelder im betrieblichen Bereich, z.B. von Computermonitoren und Messgeräten, und deren Beseitigung können zu erheblichen Kosten führen. Nicht zuletzt gibt es zunehmende Befürchtungen, dass niederfrequente elektrische und magnetische Expositionen möglicherweise mit Gesundheitsrisiken verbunden sind. Biologische Wirkungen wurden in experimentellen Untersuchungen teilweise schon für Magnetfelder deutlich unter 1 μT beobachtet, also weit unterhalb der Grenzwerte nach 26. BImSchV und DIN VDE 0848. Epidemiologische Untersuchungen ergaben Hinweise auf erhöhte Risiken insbesondere für verschiedene Tumorerkrankungen bei Magnetfeldern ab 0,2 μT .

Vor diesem Hintergrund wurde das ECOLOG-Institut, Hannover, beauftragt, Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung der Belastungen durch elektrische und magnetische Felder im Niederfrequenzbereich darzustellen und zu bewerten. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf Maßnahmen zur Verminderung der Exposition durch Stromversorgungs- und Bahnstromanlagen gelegt, da diese großflächig zu erhöhten elektrischen und magnetischen Belastungen führen können:

- elektrische Transport- und Verteilungsleitungen von der Höchst- bis zur Niederspannungsebene,
- Niederspannungsanschlussleitungen und -installationen,
- Umspannwerke,
- Transformatorenstationen,
- Bahnstrom-Übertragungsleitungen sowie
- Oberleitungen und Schienen.

Außerdem werden Ansätze zur Verminderung der elektrischen und magnetischen Emissionen elektrischer Geräte und Maschinen aufgezeigt.

Die Minderungsmaßnahmen sind vier Maßnahmenbereichen zuzuordnen:

1. raumplanerische Maßnahmen, das bedeutet: die Erstellung von Emissions- und Immissionskatastern, die Berücksichtigung elektromagnetischer Felder in der Umweltverträglichkeitsprüfung und die Einhaltung von Schutzabständen zwischen emittierenden Anlagen und empfindlichen Flächennutzungen auf der Basis von Vorsorgegrenzwerten oder Planungsrichtwerten;
2. emissionsseitige konstruktive und betriebliche Maßnahmen, zu denen bauliche Maßnahmen gehören, die zu Abstandsvergrößerungen führen, angepasste Leitungs-, System- und Phasenkonfigurationen, die die wechselseitige Kompensation verschiedener Feldbeiträge unterstützen, und emissionsseitige Abschirmungen;
3. immissionsseitige Abschirmungen, das heißt die Ausnutzung der abschirmenden Wirkung von Baumaterialien und Pflanzen auf das elektrische Feld;
4. Maßnahmen zur Aufklärung und zur Änderung des Nutzungsverhaltens, zu denen die weder Panik schürende noch verharmlosende Information der Öffentlichkeit gehört, sowie die Produktkennzeichnung und Empfehlungen zur Änderung des Nutzungsverhaltens im Sinne einer Minimierung der elektrischen und magnetischen Belastungen.

Konstruktive und betriebliche Maßnahmen zur Minderung der elektrischen und magnetischen Expositionen insbesondere in der Umgebung von Stromversorgungsanlagen werden anhand von Beispielen diskutiert, die überwiegend auf analytischen oder numerischen Berechnungen und Laborexperimenten beruhen. Praxiserfahrungen liegen nur vereinzelt vor. Dies hat unter anderem

zur Konsequenz, dass verlässliche Kostenabschätzungen für konstruktive und betriebliche Maßnahmen weder von Anlagenherstellern noch von Anlagenbetreibern zu erhalten sind. In die Bewertung der Maßnahmen geht der Kostenfaktor deshalb nur über eine qualitative Einschätzungen (hohe, mittlere, niedrige Kosten) ein, die auf Angaben der Hersteller und Betreiber von Anlagen basieren, soweit solche verfügbar waren. Weitere Bewertungskriterien sind der Entwicklungsstand der Maßnahmen, ihre Wirksamkeit bei der Abschirmung elektrischer und magnetischer Felder sowie besondere Voraussetzungen, die erfüllt sein müssen, um die Maßnahme einsetzen zu können, bzw. Probleme, die bei ihrer Realisierung auftreten können.

Als einfachste und kostengünstigste Maßnahmen zur Minderung der Belastungen durch elektrische und magnetische Felder von Stromversorgungs- und Bahnanlagen erweisen sich generell planerische Maßnahmen, die auf die Einhaltung hinreichender Schutzabstände zwischen emittierenden Anlagen und empfindlichen Nutzungen, wie Wohnungen, Schulen und Kindergärten, sowohl bei der Anlagenplanung wie bei der Ausweisung von Flächen für empfindliche Nutzungen in der Nähe bestehender Anlagen abzielen. Voraussetzung für die Festlegung von Schutzabständen sind Vorsorgegrenzwerte oder Planungsrichtwerte, die den Anforderungen eines vorsorgenden Gesundheitsschutzes gerecht werden.

Die Verpflichtung zur Einhaltung von Schutzabständen kann zu erheblichen Beschränkungen bei der Flächennutzung führen. Wo diese nicht vertretbar sind oder wenn es um die Minderung der Belastungen durch Altanlagen, z.B. in bestehenden Wohngebieten, geht, eine Verlegung der Anlage aber nicht in Frage kommt, können konstruktive und betriebliche Maßnahmen zur Minderung der Emissionen herangezogen werden. Bei elektrischen Übertragungsleitungen ist insbesondere der Ersatz von Freileitungen durch Erdkabel eine wirksame Maßnahme. In der Erprobung sind auch Maßnahmen, die auf eine Optimierung der Leitungs-, System- und Phasenkonfigurationen von Freileitungen abzielen. Soweit bisher Praxiserfahrungen vorliegen, zeigen sie, dass diese Maßnahmen zwar im Einzelfall sinnvoll sein können, dass der Minderungseffekt aber geringer ist als bei der Verkabelung, wenn die Fläche, auf der eine Minderung der elektrischen und magnetischen Felder erreicht wird, als Bewertungskriterium dient. Abschirmmaßnahmen durch Kompensationsseile können bei Freileitungen einen Beitrag vor allem zur Verminderung der elektrischen Felder leisten, ebenso wie immissionsseitige Abschirmungen durch Gebäude und Bepflanzungen.

Bei kompakten Quellen, wie z.B. Transformatorenstationen, kann durch Abschirmungen aus hoch-leitfähigen oder/und hoch-permeablen Materialien eine starke Schwächung auch der niederfrequenten Magnetfelder erreicht werden. Vor der Anbringung von Abschirmungen sollten allerdings alle Möglichkeiten genutzt werden, um die magnetischen Felder durch eine geeignete Leitungsführung insbesondere im Bereich der Sammelschienen zu vermindern, da diese Maßnahmen in der Regel weniger aufwendig sind. Die effektivste Maßnahme zur Verminderung der elektrischen und magnetischen Immissionen ist auch bei Transformatoranlagen die Einhaltung eines hinreichenden Schutzabstandes. Es sollte generell darauf verzichtet werden, Transformatoren in Gebäuden unterzubringen, in denen sich dauerhaft Menschen aufhalten, bzw. es sollten erhöhte Dauerexpositionen durch die Nutzungart der an den Transformator angrenzenden Räume, z.B. ausschließlich als Lagerräume, verhindert werden.

Bedingt durch die Art der Energieübertragung durch ein Ein-Phasensystem und die Art der Stromzuführung über Oberleitungen sind die Möglichkeiten zur Minderung insbesondere magnetischer Felder von Bahnanlagen durch konstruktive und betriebliche Maßnahmen gering. Wie im Falle der Übertragungsleitungen der allgemeinen Stromversorgung, kann zwar bei den Bahnstrom-Übertragungsleitungen durch Verkabelung eine deutliche Verminderung der durch elektrische und magnetische Felder belasteten Flächen erreicht werden, für die eigentlichen Bahntrassen mit den Magnetfeldern, die von Oberleitungen und Schienen ausgehen, gibt es bisher allerdings keine erprobten Minderungskonzepte.

Inhalt	Seite
0 Einleitung	1
1 Niederfrequente elektrische und magnetische Felder	3
2 Stromversorgungsanlagen	5
2.1 Verbundnetz	5
2.2 Höchst- und Hochspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 kV, 220 kV und 110 kV)	7
2.3 Mittelspannungsleitungen (Nennspannungen: 30 kV, 20 kV, 10 kV und 6 kV)	12
2.4 Niederspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 V und 220 V)	12
2.5 Umspannwerke und Transformatorenstationen	12
3 Bahnstromanlagen	15
3.1 Stromübertragungsleitungen	15
3.2 Oberleitungen und Schienen	15
4 Ansätze zur Minderung elektrischer und magnetischer Expositionen im Niederfrequenz-Bereich	16
4.1 Raumplanung	17
4.1.1 Emissions- und Immissionskataster	18
4.1.2 Umweltverträglichkeitsprüfung	19
4.1.3 Schutzabstände	19
4.2 Konstruktion und Betrieb	19
4.2.1 Expositionsminderung durch Abstandsvergrößerung	20
4.2.2 Feldkompensation durch angepasste Leitungs-, System- und Phasenkonfigurationen	21
4.2.3 Emissionsseitige Abschirmung	24
4.3 Immissionsseitige Abschirmungen	28
4.4 Aufklärung	28
4.4.1 Risikokommunikation	30
4.4.2 Produktkennzeichnung und Gütesiegel	32
4.4.3 Empfehlungen für Änderungen des Nutzungsverhaltens	33

5	Konstruktive und betriebliche Maßnahmen zur Minderung der elektrischen und magnetischen Expositionen in der Umgebung von elektrischen Anlagen, Maschinen und Geräten	34
5.1	Höchst-und Hochspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 kV, 220 kV und 110 kV)	34
5.1.1	Abstandsvergrößerung, Mastkonstruktion	34
5.1.2	Leitungs-und Systemkonfiguration	35
5.1.3	Mastbilder und Phasenkonfiguration	39
5.1.4	Abschirmung	43
5.1.5	Aktive Kompensation	43
5.2	Mittelspannungsleitungen (Nennspannungen: 30 kV, 20 kV, 10 kV und 6 kV)	44
5.3	Niederspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 V und 220 V)	45
5.3.1	Gebäudeanschlußleitungen	45
5.3.2	Elektroinstallationen in Gebäuden	45
5.4	Umspannwerke und Transformatorenstationen	46
5.5	Elektrische Geräte und Maschinen	48
5.6	Bahnstromanlagen	50
6	Zusammenfassung und Bewertung der Maßnahmen zur Minderung der elektrischen und magnetischen Expositionen in der Umgebung von elektrischen Anlagen, Maschinen und Geräten	51

0 Einleitung

Mit zunehmendem Einsatz elektrischer Energie nehmen auch die netzfrequenten elektrischen und magnetischen Felder in der Umwelt zu. Insbesondere die niederfrequenten Magnetfelder von Stromversorgungs- und Bahnanlagen, von elektrischen Maschinen und Anlagen bereiten vielfach schon Probleme: Monitore von Computern, Videoanlagen, Fernsehgeräten usw. werden gestört, empfindliche Messgeräte, wie Elektronenmikroskope und Oszillographen, werden beeinflusst, medizinische Geräte zur Diagnostik aber auch zur Versorgung und Therapie müssen gegen die Einwirkung von Magnetfeldern geschützt werden. Vor dem Hintergrund sich verdichtender wissenschaftlicher Hinweise auf vielfältige biologische Wirkungen niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder auf den Organismus gebieten nicht zuletzt die zunehmenden Befürchtungen vor möglicherweise negativen gesundheitlichen Folgen die Nutzung aller Möglichkeiten zur Minderung der elektromagnetischen Exposition.

Bisher fehlt ein konsistentes Modell für die Wirkungen niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder im Organismus. Die Mehrzahl der epidemiologischen Untersuchungen von Bevölkerungsgruppen, die

- in der Nähe von Stromversorgungsanlagen leben,
- bestimmte elektrische Geräte häufig benutzen oder
- beruflich exponiert sind,

geben jedoch ernstzunehmende Hinweise auf gesundheitliche Schäden, bei denen magnetische Felder eine vielleicht nicht auslösende aber sehr wahrscheinlich verstärkende Wirkung zeigen. Dies gilt insbesondere für Krebserkrankungen von Kindern (Leukämie, Gehirntumoren, Lymphome) und einige Tumoren bei Erwachsenen (Leukämie, Gehirntumoren, Brustkrebs). Befunde zu Zusammenhängen zwischen erhöhten elektromagnetischen Expositionen und dem Auftreten von psychischen und neurovegetativen Störungen, irregulären Schwangerschaftsverläufen und Alzheimer-Erkrankungen liegen nur vereinzelt vor.

In experimentellen Untersuchungen wurden Effekte elektrischer und magnetischer Felder auf Organismen und Zellen nachgewiesen, insbesondere Einflüsse auf

- die Zellkommunikation,
- das Hormonsystem (Melatonin),
- das Immunsystem und
- das Nervensystem.

(Für eine Zusammenfassung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes zu den Wirkungen niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder auf den Menschen s. z.B. NEITZKE et al. 1994, EDELER 1995, EMF-MONITOR 1995a, DEPNER 1996 a,b, EDELER 1996, NEITZKE 1996, EMF MONITOR 1997)

Störungen von Computermonitoren durch netzfrequente Felder treten bei magnetischen Flussdichten von 0,5 bis 1 μ T auf. Die gleiche Empfindlichkeit zeigen Messgeräte und einige Geräte für die medizinische Diagnostik.

Sowohl die Werte für Störungen technischer Geräte wie auch für biologische Wirkungen liegen weit unterhalb der Grenzwerte nach 26. BImSchV und DIN VDE 0848. Die derzeit gültigen Grenzwerte werden in den für die Allgemeinbevölkerung zugänglichen Bereichen bis auf relativ wenige Ausnahmen eingehalten. Die Ausnahmen sind:

- 380 kV-Freileitungen, unter denen Überschreitungen des Grenzwertes für das elektrische Feld von 5 kV/m vorkommen, und
- Transformatoren, in deren Umgebung Überschreitungen des Grenzwertes für die magnetische Flussdichte von 100 μ T auftreten können.

An Arbeitsplätzen wurden sogar Überschreitungen der hohen Grenzwerte der DIN VDE 0848 für

den Expositionsbereich I festgestellt (Expositionsbereich 1: kontrollierte Bereiche, z.B. Betriebsstätten und vom Betreiber überprüfbare Bereiche, sowie allgemein zugängliche Bereiche, in denen aufgrund der Betriebsweise der Anlagen oder aufgrund der Aufenthaltsdauer sichergestellt ist, dass eine Exposition nur kurzzeitig erfolgt).

Der vorsorgende Umwelt- und Gesundheitsschutz, die Verminderung von Risiken durch Störfelder im medizinischen Bereich und die Vermeidung wirtschaftlicher Belastungen durch Störungen elektronischer Geräte erfordern Anstrengungen zur Minderung elektrischer und magnetischer Expositionen, die weit über das hinausgehen, was zur Einhaltung der derzeit gültigen Grenzwerte erforderlich ist.

Aufgabe dieser Untersuchung war es, Maßnahmen zu identifizieren, zu beschreiben und zu bewerten, die einen Beitrag zur Minderung elektrischer und magnetischer Expositionen im Niederfrequenz- (NF-) Bereich leisten können. Die grundlegenden Prinzipien zur Vermeidung elektrischer und magnetischer Emissionen sowie der Verminderung der Immissionen werden im Kapitel 4 beschrieben:

- raumplanerische Maßnahmen,
- emissionsseitige konstruktive und betriebliche Maßnahmen,
- immissionsseitige Abschirmungen und
- Maßnahmen zur Aufklärung und zur Änderung des Nutzungsverhaltens.

In den vorausgehenden Kapiteln werden die physikalischen Eigenschaften elektrischer und magnetischer Felder dargestellt (Kapitel 1) und zwei Quellen großflächiger elektrischer und magnetischer Immissionen beschrieben: das öffentliche Stromnetz (Kapitel 2) und Bahnstromanlagen (Kapitel 3). Der Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt auftragsgemäß bei der Darstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Reduzierung der Expositionen durch Anlagen, die niederfrequente Felder emittieren. Die Probleme im Zusammenhang mit dem Betrieb elektrischer Maschinen und Geräte werden deshalb nur kurz gestreift.

Im Kapitel 5 werden die Möglichkeiten der konstruktiven und betrieblichen Minderung elektrischer und magnetischer Emissionen im Bereich der öffentlichen Stromversorgung und für Bahnstromanlagen beschrieben. Im Kapitel 6 werden dann Maßnahmen aller Maßnahmenbereiche anlagenbezogen dargestellt und bewertet.

Diese Untersuchung basiert auf einer umfassenden Literaturrecherche sowie auf Befragungen von Expertinnen und Experten in Forschungseinrichtungen, Stromversorgungsunternehmen und Überwachungsbehörden. Zu erwähnen ist insbesondere die Unterstützung durch:

- Dr. G. Anger (Statens Stralskyddsinstitut, Solna, Schweden)
- Dr. H. Brüggemeyer (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie)
- Prof. Dr. Y. Hamnerius (Chalmers University of Technology, Department of Microwave Technology, Göteborg, Schweden)
- Prof. Dr. M. Hartje (Hochschule Bremen, Labor Hochspannungstechnik, Bremen)
- Prof. Dr. G. G. Karady (Arizona State University, Department of Electrical Engineering, Tempe, USA)
- Prof. Dr. R. Kegel (Fachhochschule Lübeck)
- Dr. Nilges (RWE Energie, Essen)

Wiederholt trafen die Autoren bei ihren Anfragen bei wissenschaftlichen Einrichtungen, Anlagenherstellern und -betreibern zwar auf eine prinzipielle Kooperationsbereitschaft, jedoch waren detaillierte Informationen insbesondere zu betrieblichen und konstruktiven Maßnahmen mit Hinweis auf noch nicht abgeschlossene Untersuchungen oder schwebende Patent-Verfahren nicht zu erhalten. Dies hat zwar einerseits die Recherche-Arbeiten erschwert, weil die Beschaffung der notwendigen Informationen oft nur über ausländische Quellen möglich war und sich sehr aufwendig gestaltete, zeigt aber andererseits auch, dass die Notwendigkeit der Minderung technogener elektrischer und magnetischer Expositionen auch in Deutschland erkannt wurde, und dass an Hochschulen und in den Entwicklungsabteilungen von Anlagenherstellern und Stromversorgungsunternehmen an geeigneten Maßnahmen gearbeitet wird.

I Niederfrequente elektrische und magnetische Felder

Der Niederfrequenzbereich umfaßt elektrische und magnetische Felder mit Frequenzen von einigen wenigen Hertz bis 30 kHz. In diesem Frequenzbereich spielt die Kopplung elektrischer und magnetischer Felder, die im Hochfrequenzbereich zu elektromagnetischen Feldern führt, praktisch keine Rolle, so dass die elektrischen Wechselfelder allein auf zeitlich veränderliche Unterschiede in der Verteilung elektrischer Ladungen bzw. die Existenz elektrischer Wechselspannungen zurückzuführen sind, und das Auftreten magnetischer Wechselfelder an das Vorhandensein elektrischer Wechselströme gebunden ist.

Als Messgröße für die Stärke elektrischer Felder wird im folgenden die elektrische Feldstärke E verwendet mit der Einheit Volt/Meter (V/m) bzw. Kilovolt/Meter (kV/m, $1 \text{ kV/m} = 1.000 \text{ V/m}$). Als Meßgröße für die Stärke magnetischer Felder dient die magnetische Flussdichte B , auch magnetische Induktion genannt, mit der Einheit Tesla (T) bzw. Mikrottesla (μT , $1 \text{ uT} = 10^{-6} \text{ T}$). Die magnetische Flussdichte B ist mit der magnetischen Feldstärke H gemäß $B = \mu H$ verknüpft, wobei die Permeabilität μ das Produkt aus der absoluten Permeabilität μ_0 und der relativen Permeabilität μ_r , einer Materialkonstanten, ist: $\mu = \mu_0 \mu_r$. Die magnetische Feldstärke wird in der Einheit Ampere/Meter (A/m) gemessen, 1 A/m entspricht in Luft $1,257 \text{ uT}$.

Hauptquellen elektrischer und magnetischer Felder im Niederfrequenzbereich sind Stromversorgungsanlagen, elektrische Maschinen und Geräte, die vor allem zu 50 Hz-Feldern führen. In geringerem Maße treten Magnetfelder insbesondere bei ungeradzahligem Vielfachen der Grundfrequenz auf. Durch Schalt- und Entladungsvorgänge kann es zudem zur Entstehung von Transienten und Frequenzgemischen kommen.

Eine zweite Quelle großflächiger Emissionen niederfrequenter Felder sind Bahn- und Bahnstromanlagen. Diese verursachen hauptsächlich Felder von $16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$. Neben den großflächig auftretenden 50 und $16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ -Feldern können örtlich begrenzt auch Felder anderer Frequenzen, z.B. verursacht durch elektrische Maschinen, Warensicherungsanlagen oder Computer von Bedeutung sein.

Die Stärke der natürlicherweise vorhandenen elektrischen und magnetischen Wechselfelder, die vor allem durch die weltweite Gwitteraktivität erzeugt werden, ist im Niederfrequenzbereich um mehrere Größenordnungen geringer als die der technisch verursachten Felder. Bei Magnetfeldern von 50 Hz ist der allgemeine, technisch bedingte Untergrund in Ballungsgebieten im Mittel um mehr als einen Faktor 10^5 größer als der natürliche Untergrund.

In Tabelle I sind einige wichtige Eigenschaften niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder zusammengestellt.

Tabelle 1
Eigenschaften niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder.

elektrisches Feld	magnetisches Feld
elektrische Felder entstehen durch elektrische Ladungen bzw. elektrische Spannungen	magnetische Felder entstehen durch bewegte elektrische Ladungen d.h. durch elektrische Ströme
das Gesamtfeld ergibt sich durch die Superposition der Teilfelder	das Gesamtfeld ergibt sich durch die Superposition der Teilfelder
die Stärke und der Verlauf elektrischer Felder ist abhängig von <ul style="list-style-type: none"> - den Polaritäten der erzeugenden Ladungen - den Ladungsstärken bzw. Spannungen - der Geometrie der Ladungsverteilung und - Randbedingungen 	die Stärke und der Verlauf magnetischer Felder ist abhängig von <ul style="list-style-type: none"> - den Richtungen der erzeugenden Ströme - der Stärke der Ströme - der Geometrie der Stromverteilung und - Randbedingungen
elektrische Felder üben Kraftwirkungen auf elektrische Ladungen aus; in elektrisch leitenden Gegenständen verursachen sie Ladungsverschiebungen (Influenz); die Oberfläche der Gegenstände wirkt wie eine Äquipotentialfläche; im Innern wird das ursprüngliche Feld durch ein influenziertes Feld genau aufgehoben	magnetische Felder üben Kraftwirkungen auf bewegte elektrische Ladungen sowie auf para-, dia- und ferromagnetische Substanzen aus
Elektrische Wechselfelder erzeugen in elektrisch leitenden Materialien durch wechselnde Polarisierung Verschiebungsströme	magnetische Wechselfelder erzeugen in elektrisch leitenden Materialien elektrische Wirbelströme
in Nichtleitern (Dielektrika) führen elektrische Felder durch Ladungsverschiebungen zu Polarisierungen	
elektrische Felder können durch geerdete elektrisch leitende Materialien leicht abgeschirmt werden	magnetische Felder können nur schwer abgeschirmt werden; sie durchdringen nicht-ferromagnetische Materialien nahezu ungestört

2 Stromversorgungsanlagen

2.1 Verbundnetz

Das elektrische Versorgungsnetz ist neben elektrischen Maschinen und Geräten die Hauptquelle von niederfrequenten elektrischen und magnetischen 50 Hz-Feldern. Elektrische Versorgungsnetze bestehen aus drei Hauptkomponenten: den Anlagen zur Erzeugung elektrischer Energie, den Leitungen und Anlagen zur Übertragung elektrischer Energie und den Leitungen und Anlagen zur Verteilung an die Verbraucher. Die erste Komponente soll hier nicht weiter betrachtet werden, da Maßnahmen zur Minderung elektrischer und magnetischer Felder im Bereich der elektrischen Energieerzeugung in der Regel nur unter Arbeitsschutzgesichtspunkten von Bedeutung sind. Die ausführliche Diskussion von erhöhten Belastungen auf der Verbrauchsseite durch den Betrieb elektrischer Maschinen und Geräte liegt ebenfalls außerhalb der Aufgabenstellung dieses Berichts. Hier gibt es aber erhebliche Minderungspotentiale im Hinblick auf die Exposition der Allgemeinbevölkerung, weshalb Ansätze zur Expositionsminderung in den Kapiteln 4 und 5 zumindest andiskutiert werden.

Die Standorte von Kraftwerken richten sich zum einen nach den Lastschwerpunkten, zum anderen aber auch nach dem Primärenergieangebot. Letzteres gilt insbesondere für (Braun-) Kohle-, Wasser- und Windkraftwerke. Oft ist auch der Zugang zu anderen Betriebsmitteln (z.B. Kühlwasser) ausschlaggebend. Für den Transport der elektrischen Energie zwischen den Kraftwerksstandorten und den Bedarfsschwerpunkten sind elektrische Leitungen notwendig. Von den Standorten großer Kraftwerke wird die elektrische Energie überwiegend durch die 380 kV- und 220 kV-Leitungen der Höchstspannungsebene transportiert (zu den Nennspannungen von 380 bzw. 220 kV gehören Betriebsspannungen von 420 bzw. 245 kV). Die Zusammenschaltung der Übertragungsleitungen zu einem Verbundsystem dient dem Ausgleich von Angebot und Nachfrage und ist Voraussetzung einer gesicherten Versorgung mit elektrischer Energie auch im Falle erhöhten regionalen Bedarfs oder von Störungen an Kraftwerken oder Übertragungsleitungen.

Kleinere Kraftwerke werden über 110 kV-Hochspannungsleitungen, seltener durch 60 kV-Leitungen an das Verbundnetz angeschlossen (Betriebsspannungen 123 kV bzw. 72,5 kV). Leitungen dieser Spannungsebene dienen auf der Verbrauchsseite außerdem dem Anschluss von großen Ortschaften und Industriebetrieben.

Die Leitungen der Mittelspannungsnetze mit Nennspannungen von zumeist 10 oder 20 kV, gelegentlich auch 30 oder 6 kV, können Energie aus mittleren Blockheizkraftwerken und Windkraftanlagen aufnehmen (Betriebsspannungen: 12, 24, 36 bzw. 7,2 kV). Die Mittelspannungsnetze übernehmen auch Energie aus dem Übertragungsnetz und dienen der Regionalverteilung. Aus ihnen werden Siedlungen, Ortsteile von größeren Gemeinden und größere Abnehmer in Industrie, Handel und Gewerbe sowie in der Landwirtschaft versorgt.

Die örtliche Verteilung elektrischer Energie erfolgt durch die Niederspannungsnetze, über die die Verbrauchergruppen Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft versorgt werden. Die übliche Spannung ist 400 V (220 und 380 V). Die Niederspannungsnetze können nur in begrenztem Umfang Energie aus Erzeugungsanlagen (kleine Wasserkraftwerke, kleine Windkraftanlagen) aufnehmen.

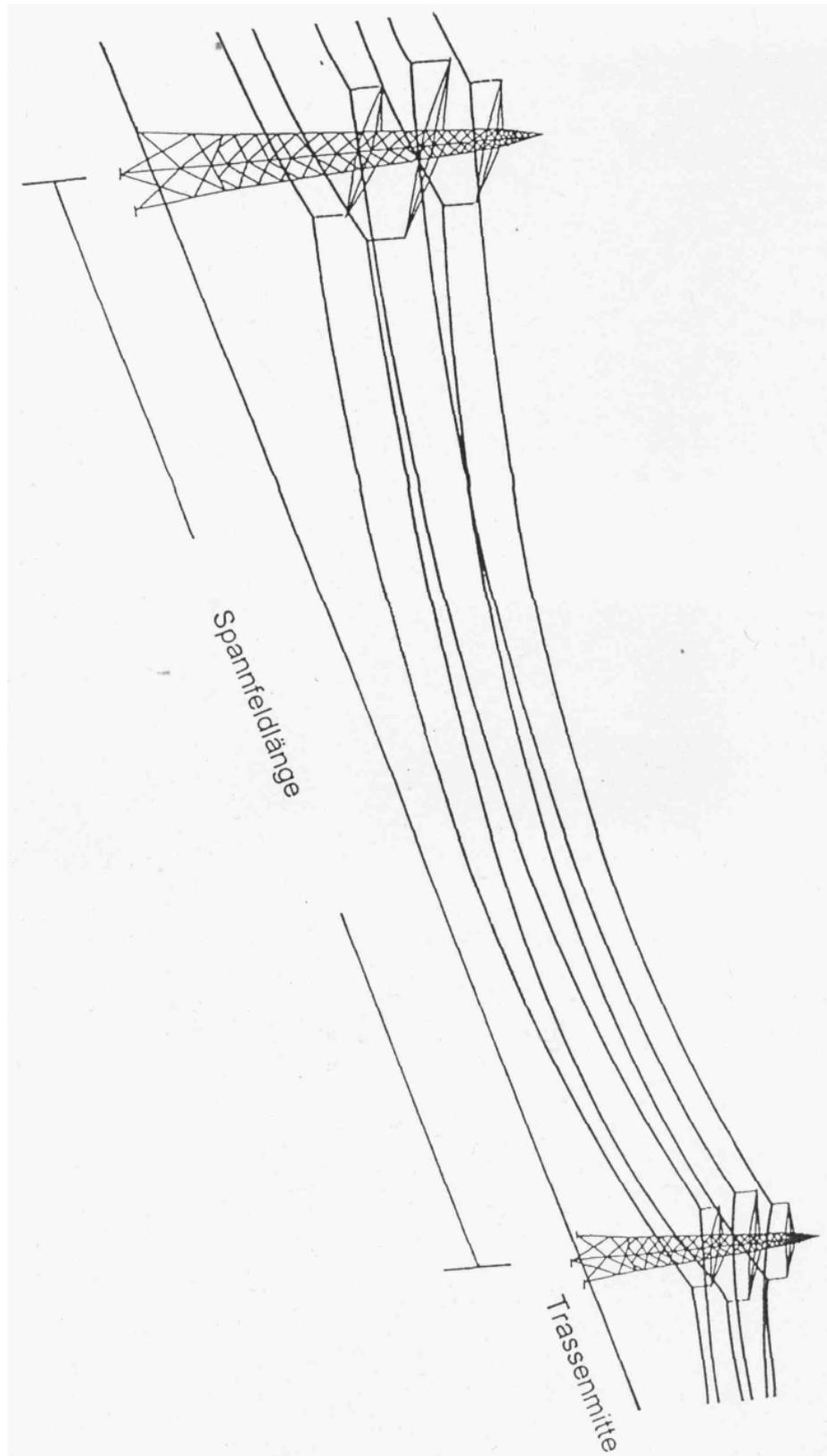


Abb. 2.1
Elektrische Hochspannungsfreileitung

Die Netze der verschiedenen Spannungsebenen sind miteinander durch Transformatoren in Umspannwerken oder Transformatorenstationen verbunden. Um Verluste durch den ohm-schen Widerstand der Übertragungsleitungen möglichst gering zu halten, erfolgt die Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen durch hohe Spannungen und relativ kleine Ströme. Vor der Einspeisung in das Übertragungsnetz wird die Spannung deshalb herauftransformiert. Verbraucherseitig muss sie dann später wieder aufwerte heruntertransformiert werden, wie sie zum Betrieb von elektrischen Maschinen und Anlagen benötigt werden.

Bezogen auf die betroffene Fläche stellen die elektrischen Leitungssysteme die Hauptexpositionsquellen dar, wobei es erhebliche Unterschiede zwischen Freileitungen und Erdkabeln gibt. Die Felder, die von Umspannwerken und Transformatorenstationen ausgehen, führen lediglich in räumlich eng begrenzten Bereichen zu erhöhten Expositionen.

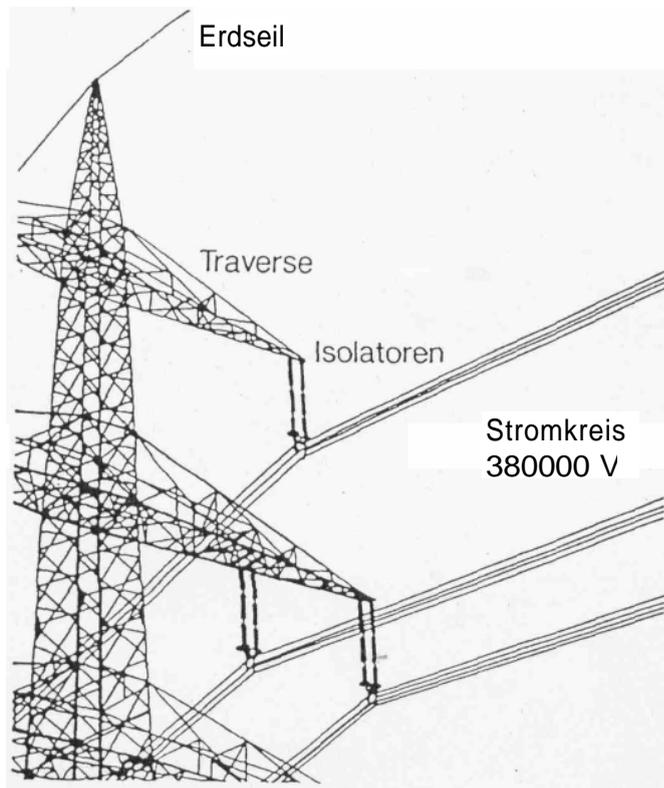
Die Leitungen der öffentlichen Stromversorgung bestehen auf den Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsebenen generell und auf der Niederspannungsebene bei den Hausanschlußleitungen überwiegend aus drei Leitungen (Phasen). Die Spannungen auf diesen Leitungen sind im Idealfall jeweils 120 Grad gegeneinander phasenverschoben. Wäre es möglich, die drei Phasenleitungen ohne Abstand in einer Leitung zusammenzufassen, und wären Ströme und Spannungen auf den drei Phasenleitungen exakt gleich groß (Phasenbalance), so würden sich die von den einzelnen Phasenleitungen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder im Fall exakter Phasenverschiebungen um 120 Grad gegenseitig kompensieren. Unter realen Bedingungen ist dies allenfalls näherungsweise zu erreichen, da eine elektrische Isolation zwischen den Phasenleitern notwendig ist und diese gewisse Mindestabstände erfordert. Diese können im Falle von Erdkabeln mit geeigneten Isolationsmaterialien sehr gering gehalten werden. Im Falle elektrischer Freileitungen, wo Luft das isolierende Medium darstellt, sind dagegen große Abstände erforderlich, die durch die Durchschlagsfestigkeit der Luft bei den jeweiligen Spannungen vorgegeben sind.

2.2 Höchst- und Hochspannungsleitungen (Nennspannungen: 380, 220 und 110 kV)

Die Leitungen der Spannungsebenen 380, 220 und 110 kV sind in Deutschland überwiegend als Freileitungen auf Stahlgittermasten ausgeführt. Lediglich auf der 110 kV-Ebene gibt es mit 6,9 % einen nennenswerten Anteil Erdkabel vor allem in Belastungsschwerpunkten, z.B. Stadtgebieten mit enger Bebauung und hoher Lastdichte (KUHNER 1993). Die Gründe für den geringen Anteil von Kabeln liegen zum einen in den - zumindest in den Spannungsgruppen 380 kV und 220 kV - deutlich höheren Kosten für Kabel im Vergleich zu denen für Freileitungen. Zum anderen gibt es physikalische und betriebliche Gründe. Kabel haben eine viel größere Kapazität als Freileitungen. Da der Ladestrom proportional zur Kapazität und zur Betriebsspannung ist, wird die Übertragungsfähigkeit von Kabeln für hohe Spannungen stark vermindert (KUHNER 1993). Auf der betrieblichen Seite steht der Verkabelung aus Sicht der Betreiber der elektrischen Übertragungsnetze zudem der höhere Aufwand beim Auffinden und Reparieren von Defekten entgegen.

Die Abbildungen 2.1 und 2.2 geben einen Überblick über den Aufbau und die wesentlichen Komponenten einer elektrischen Freileitung.

Die Stärke der von elektrischen Leitungssystemen ausgehenden elektrischen Felder hängt zuerst einmal von der Spannungsebene ab, wird aber auch von weiteren Faktoren beeinflusst, die insbesondere die räumliche Verteilung und damit die Reichweite der Felder bestimmen. Auch die Stärke der magnetischen Felder ist nicht allein eine Funktion der Stromstärke, sondern hängt ebenfalls von konstruktiven Parametern ab.



Freileitungsmast

Abbildung 2.2
Mastbild einer 380 kV-Freileitung.

In Tabelle 2.1 sind physikalische und technische Parameter aufgeführt, die einen Einfluss auf Stärke und Verteilung elektrischer und magnetischer Felder in der Umgebung von elektrischen Freileitungen haben.

Erläuterungen zu den in Tabelle 2.1 aufgeführten technischen Parametern:

Masthöhe, Mastkonstruktion

Nach DIN VDE 0210 sind aus Gründen der elektrischen Sicherheit bestimmte Mindestabstände innerhalb der Freileitung sowie zwischen den Leiterseilen und dem Erdboden, Gebäuden, Verkehrswegen usw. einzuhalten (DIN VDE 0210 1985). Diese Mindestabstände müssen bei der Festlegung der Masthöhe und der Aufhängung der Leiterseile berücksichtigt werden. Die Auswahl der Masttypen folgte in der Vergangenheit vielfach regionale "Traditionen". Besondere Anforderungen werden an Masten mit Sonderfunktionen gestellt, z.B. bei Winkeltrag- und Winkelmasten, Abspann- und Winkelabspannmasten, Endmasten, sowie im Zusammenhang mit der Parallelführung von Leitungen aufgetrenntem oder gemeinsamem Gestänge und mit Leitungskreuzungen (DIN VDE 0210 1985).

Anzahl der aufgelegten Systeme

Oft werden Leitungen verschiedener Systeme, auch unterschiedlicher Spannungsebenen gemeinsam auf einem Gestänge geführt, wobei das System mit der niedrigsten Spannung in der geringsten Höhe aufgehängt wird (zur Abschirmwirkung s. Abschnitte 5.1 und 5.2).

Phasenfolge in den einzelnen Systemen

Die drei Phasenleitungen eines Systems können in unterschiedlicher Folge angeordnet werden, was Auswirkungen auf die Feldverteilung hat (s. Abschnitte 4.2.4 und 5.1).

Abstand zu den Leiterseilen

Der Abstand von den Leiterseilen zu einem Aufbürdet hängt von mehreren Parametern ab: Lage des Aufpunkts im Spannungsfeld (d.h. Abstand zur Trassenmitte und Abstand vom Ort des größten Durchhangs), Durchhang der Leiterseile, Ausschwingwinkel der Leiterseile unter Windlast (s. Abschnitte 4.2.1 und 5.1).

Durchhang der Leiterseile

Der Durchhang der Leiterseile ist einerseits konstruktionsbedingt (Mastabstand/ Spannungsfeldlänge, Material der Leiterseile usw.) andererseits ist er temperaturabhängig, d.h. abhängig vom Wetter und von der Stromlast.

Erdseilbelegung

Erd- und Blitzschutzseile werden oberhalb der Leitungssysteme geführt (s. Abschnitt 5.1).

Amplitudensymmetrie

Im Gegensatz zur Spannung, die von Seiten der Netzbetreiber relativ leicht kontrolliert werden kann, ist die Kontrolle des Stromes und seiner symmetrischen Verteilung auf die Phasen nur mit erheblichem Aufwand möglich, da er durch die aktuelle Nachfrage nach elektrischer Energie zu jeder gegebenen Zeit bestimmt wird. Insbesondere auf den Nieder- und Mittelspannungsleitungen sind große Asymmetrien der Stromverteilung auf die Phasen möglich (s. Abschnitt 5.2).

Phasensymmetrie

Durch nichtlinear wirkende Netzkomponenten und Verbraucher kann es zu Verschiebungen in der Phasenlage der Ströme kommen (s. Abschnitt 5.1).

In den Abbildungen 2.3 und 2.4 sind für 380 kV-, 220 kV- und 110 kV-Freileitungen exemplarisch die Stärken der elektrischen und der magnetischen Felder als Funktion des Abstandes von der Trassenmitte dargestellt. Eine ausführliche Darstellung der Einflüsse der verschiedenen in Tabelle 2.1 aufgeführten Parameter auf die Stärke und die räumliche Verteilung der von den Leitungen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder erfolgt in den Abschnitten 4.2 und 5.1.

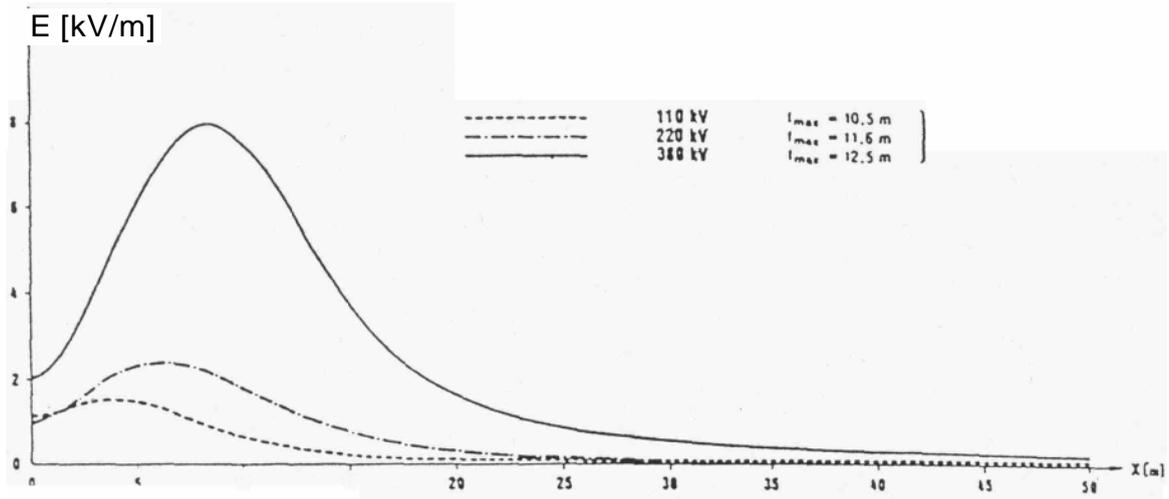


Abbildung 2.3

Elektrische Feldstärke E (kV/m) in der Spannfeldmitte von Höchst- und Hochspannungsfreileitungen als Funktion des Abstandes x (m) von der Trassenmitte (typischer Verlauf, RIPPAN 1990).

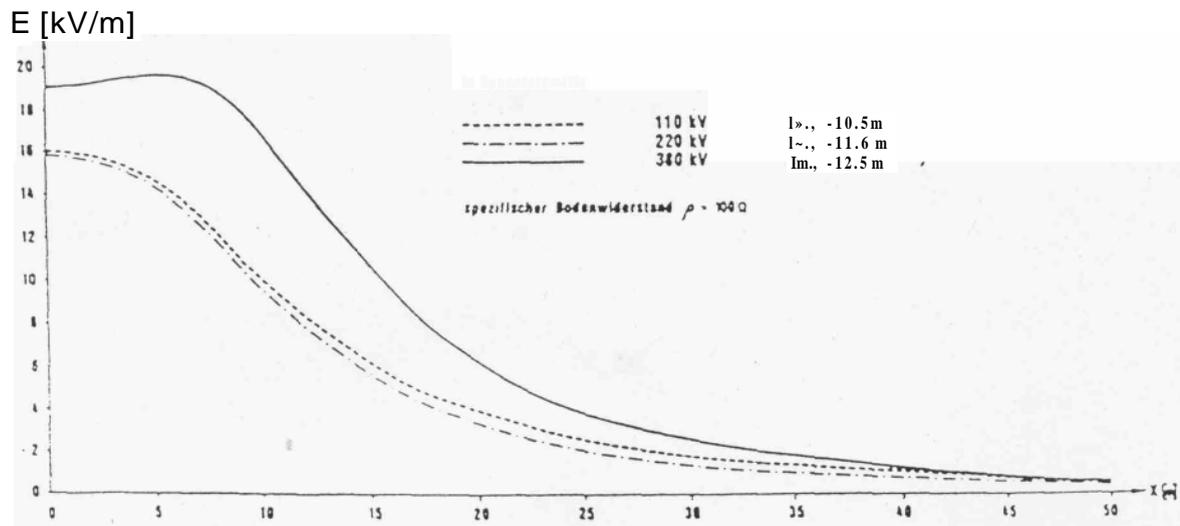


Abbildung 2.4

Magnetische Induktion pro kA Strom B/I ($\mu\text{T}/\text{kA}$) in der Spannfeldmitte von Höchst- und Hochspannungsfreileitungen als Funktion des Abstandes x (m) von der Trassenmitte (typischer Verlauf, RIPPAN 1990).

Tabelle 2.1

Faktoren, die die Stärke und die räumliche Verteilung elektrischer und magnetischer Felder in der Umgebung von elektrischen Freileitungen beeinflussen.

	elektrisches Feld	magnetisches Feld
feldverursachende Größe	Betriebsspannung	Betriebsstrom (beeinflusst auch den Durchhang)
Masten	Verzerrung des elektrischen Feldes	Induktion elektrischer Ströme
Masthöhe, Mastkonstruktion	beeinflusst den Abstand der einzelnen Leiterseile und den Abstand vom Aufpunkt zu den Leiterseilen	beeinflusst den Abstand der einzelnen Leiterseile und den Abstand vom Aufpunkt zu den Leiterseilen
Anzahl der aufgelegten Systeme	Superposition der Teilfelder; Verzerrung des elektrischen Feldes	Superposition der Teilfelder; Induktion elektrischer Ströme
Dhasenfolge in den einzelnen Systemen	Superposition der Teilfelder	Superposition der Teilfelder
Abstand zu den Leiterseilen	Felder nehmen für Abstände, die groß sind im Verhältnis zu den Abständen zwischen den Leiterseilen, näherungsweise quadratisch mit dem Abstand	Felder nehmen für Abstände, die groß sind im Verhältnis zu den Abständen zwischen den Leiterseilen, näherungsweise quadratisch mit dem Abstand ab
Durchhang der Leiterseile	beeinflusst den Abstand vom Aufpunkt zu den Leiterseilen	beeinflusst den Abstand vom Aufpunkt zu den Leiterseilen
Erdseilbelegung	Verzerrung des elektrischen Feldes	Induktion elektrischer Ströme
Amplitudensymmetrie	in den Spannungen Superposition der Teilfelder	in den Strömen Superposition der Teilfelder
Phasensymmetrie	in den Spannungen Superposition der Teilfelder	in den Strömen Superposition der Teilfelder
Bodentopologie	beeinflusst den Abstand vom Aufpunkt zu den Leiterseilen	beeinflusst den Abstand vom Aufpunkt zu den Leiterseilen
Bodenbeschaffenheit	elektrische Leitfähigkeit (u.a. abhängig von der Feuchte)	elektrische Leitfähigkeit des Bodens und im Boden verlegte Rohrleitungen
Fremdobjekte	z.B. Häuser, Bäume, Zäune	metallische (ferromagnetische) Objekte
Witterung (Temperatur, Windstärke, Niederschlag, Eisbehang)	beeinflusst den Durchhang und die Auslenkung der Leiterseile und damit den Abstand vom Aufpunkt zu den Leiterseilen; beeinflusst die elektrische Leitfähigkeit des Erdbodens und der Luft	beeinflusst den Durchhang und die Auslenkung der Leiterseile und damit den Abstand vom Aufpunkt zu den Leiterseilen; beeinflusst die elektrische Leitfähigkeit des Erdbodens

2.3 Mittelspannungsleitungen (Nennspannungen: 30 kV, 20 kV, 10 kV und 6 kV)

Auf der Mittelspannungsebene beträgt der Verkabelungsgrad in Deutschland 48,0 % (20 kV-Leitungen) bis 80,2 % (10 kV-Leitungen). Als Abspannstützpunkte für Freileitungen kommen Stahlgitter-, Beton- oder Holzmaste zum Einsatz.

Auf den Leitungen der Mittelspannungsebene sind die Amplitudenasymmetrien durch unterschiedliche Lasten auf den einzelnen Phasen zwar oft größer als auf den Leitungen der höheren Spannungsebenen, doch sind sie in der Regel immer noch relativ gering.

2.4 Niederspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 V und 220 V)

In Ballungsgebieten sind die Anschlussleitungen der Niederspannungsebene überwiegend als Erdkabel ausgeführt. In ländlichen Gebieten werden diese Leitungen zum Teil noch über Masten oder Dachständer geführt. Insbesondere Leitungen, die über Dachständer geführt werden, können in den Obergeschossen der Gebäude zu erhöhten Magnetfeldern führen (HANISCH und NEITZKE 1995).

Der Hausanschluss (Sicherungskasten), von dem die Leitungen innerhalb des Gebäudes abgehen, liegt bei Erdkabelanschlüssen in der Regel im Keller oder im Erdgeschoß. Bei Anschlüssen über Freileitungen (Masten, Dachständer) zumeist in den oberen Stockwerken. In Gebäuden für Wohn- und Gewerbezwecke treten, abgesehen von den Bereichen in unmittelbarer Nähe zu einzelnen Geräten und Maschinen, die stärksten magnetischen Felder in der Umgebung des Hausanschlusses und der zu- bzw. abführenden Leitungen auf.

Auf den Anschlussleitungen der Niederspannungsebene können große Amplitudenasymmetrien auftreten.

2.5 Umspannwerke und Transformatorstationen

Transformatoren dienen dazu, elektrische Leistung von einer Spannungsebene auf die andere zu übertragen. Die Transformatoren zur Übertragung der Leistung von der Mittel- auf die Niederspannungsebene befinden sich in der Regel in dem zu versorgenden Gebiet, um Leistungsverluste durch lange Niederspannungsleitungen zu vermeiden. Sie sind entweder in eigenen Gebäuden, Beton- oder Stahlcontainern untergebracht oder sind in Gebäude eingebaut, die Gewerbe- oder (seltener) Wohnzwecken dienen.

Die zu übertragende Leistung ist durch das Produkt aus Strom und Spannung gegeben. Bei der Transformation bleibt diese Leistung (bis auf geringe Verluste) erhalten. Wenn sich die Spannung ändert, muss sich also auch der Strom entsprechend ändern, damit das Produkt konstant ist. An jedem Transformator gibt es eine Hochspannungs/Niederstrom- und eine Nieder bzw. Unterspannungs-/ Hochstrom-Seite (die Bezeichnungen sind hier nur relativ zu verstehen). Da die Stärke eines stromerzeugten Magnetfeldes proportional zur Stromstärke ist, muss insbesondere auf der Hochstrom-Seite mit starken Magnetfeldern gerechnet werden. Die elektrischen Felder sind naturgemäß auf der Hochspannungsseite stärker. Bei Transformatoren, die in Kessel oder Zellen aus elektrisch leitfähigem Material eingeschlossen sind, wirken diese als Faradaysche Käfige und schirmen das elektrische Feld fast vollständig ab.

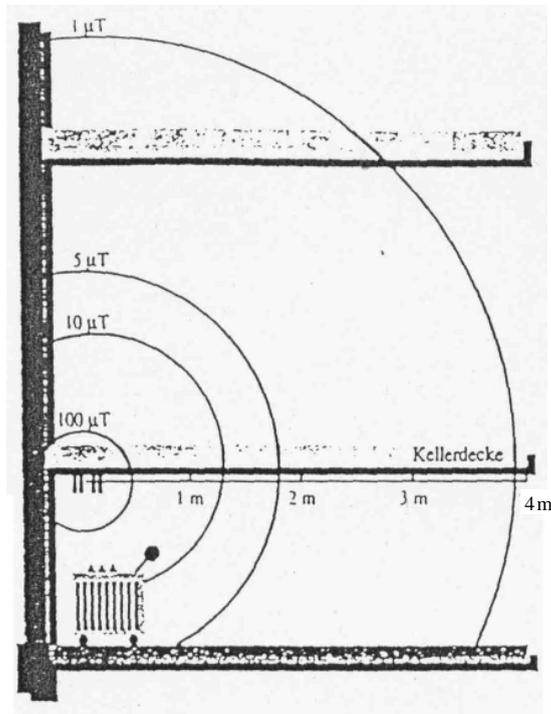


Abbildung 2.5
Magnetische Induktion in einem Gebäude mit einer 10/0,4 kV Transformatorstation im Keller bei Belastung mit 315 kVA (NEWI 1995).

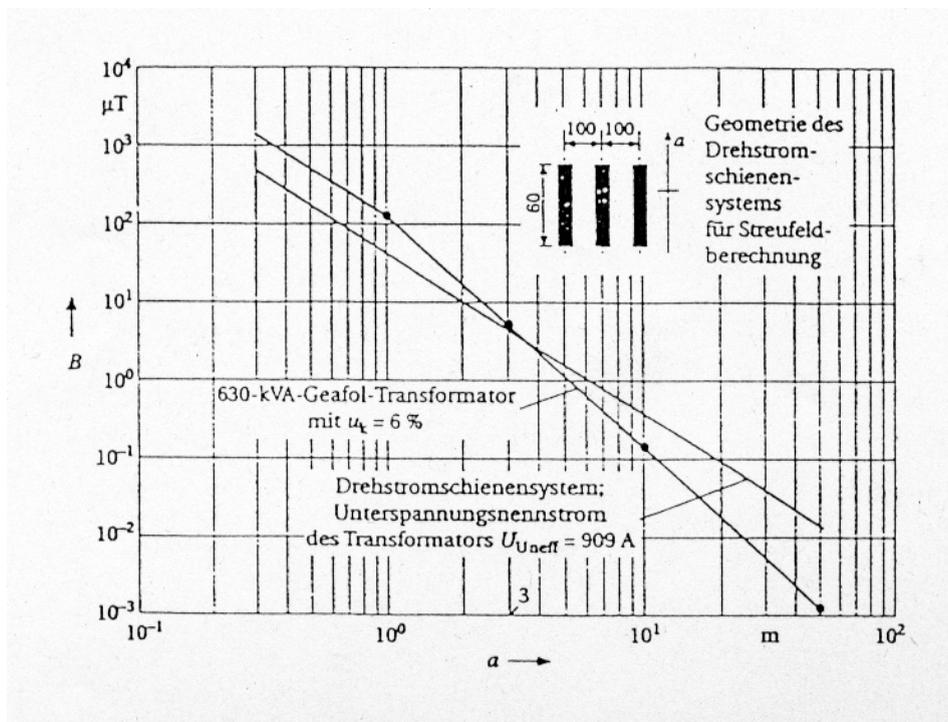


Abbildung 2.6
Gemessene Streufelder an einem 630 kVA-Geafol-Transformator und berechnete Streufelder für ein Sammelschienensystem (ALBER 1994).

Im Hinblick auf die Verminderung der Exposition der Allgemeinbevölkerung durch magnetische Felder verdienen Transformatorstationen, die in Gebäude integriert sind, in denen sich auf Dauer Menschen aufhalten, besondere Beachtung. Hierzu gehören Wohnhäuser, öffentliche Gebäude (Schulen, Kindergärten und -tagesstätten usw.) sowie gewerblich genutzte Gebäude, wenn sich die Transformatoren in der Nähe* von Räumen mit Dauerarbeitsplätzen befinden. In Einzelfällen haben sich auch Transformatorstationen, die zwar in eigenen Gebäuden, aber in unmittelbarer Nähe der o.a. Gebäude untergebracht sind, als problematisch erwiesen. Dabei können entweder die Transformatoren selbst, die Ableitungen oder die Sammelschienen die Hauptemittenden sein.

Die Höhe des durch den Strom auf der Niederspannungsseite erzeugten Magnetfeldes ist proportional zum Strom, die räumliche Verteilung hängt aber zusätzlich von der Transformatorgeometrie und der Leitungsführung in der Umgebung des Transformators ab. Mit zunehmendem Abstand von der Transformatoranlage nehmen die direkt durch den Transformator erzeugten Magnetfelder in der Regel schnell ab. Ab einer Entfernung R von ca. 10m ist die Abnahme in etwa proportional zu $1/R^3$. Die Streufeldinduktion der Sammelschienensysteme ändert sich dagegen nur quadratisch mit dem Abstand. Die Stärke dieser Felder und ihre räumliche Verteilung hängen aber sehr stark von der Leitungsführung in diesem Bereich ab (ALBER 1994).

Transformatoren, die mit Leistungen an der oberen Grenze ihres Auslegungsbereiches betrieben werden, können wegen der Nichtlinearität der Magnetisierung hohe Oberwellenanteile auf den Leitungen (und damit höherfrequente Magnetfelder) erzeugen. Elektromagnetische Felder mit Frequenzen bis in den MHz-Bereich können bei Teilentladungsvorgängen (Glimmen) im und am Transformator entstehen. Verteilungstransformatoren sind bei Betriebsspannung aber meist teilentladungsfrei, so dass hochfrequente elektromagnetische Felder bei Transformatoren nur untergeordnete Bedeutung haben.

Eine systematische Übersicht über die Magnetfeldbelastungen in der Umgebung von Transformatoranlagen liegt bisher nicht vor. Es gibt allenfalls vereinzelte Daten bei einigen Stromversorgungsunternehmen und Herstellern von Transformatoren (SILNY 1985, KRAUSE 1988, KTEBACK 1990, ALBER 1994, NEWI 1995). Das Niedersächsische Umweltministerium hat einige exemplarische Messungen an Niederspannungskompaktstationen in Wohngebieten durchführen lassen (HANISCH et al. 1993 b), außerdem wurden vom ECOLOG-Institut im Auftrage von Kommunen, Gewerbetreibenden oder einzelnen Bürgern Messungen an verschiedenen Anlagen durchgeführt. Da selbst schon im Versorgungsbereich eines einzelnen Stromversorgers in der Regel viele verschiedene Transformatortypen mit unterschiedlichen Leiteranordnungen im Einsatz sind, reichen die vorliegenden Daten nicht aus, um generelle Aussagen zur Belastungssituation in der Umgebung von Transformatorstationen zu machen. Die in den Abbildungen 2.5 und 2.6 dargestellten Mess- und Rechenergebnisse sind deshalb nicht zu verallgemeinern.

Die Übertragung elektrischer Leistung zwischen den verschiedenen Spannungsgruppen der Höchst- und Hochspannungs- sowie der Mittelspannungsebene erfolgt in Umspannwerken. Diese befinden sich zumeist außerhalb oder am Rande von Ortschaften oder in Gewerbegebieten. Messungen elektrischer und magnetischer Felder in der Umgebung von Umspannwerken haben gezeigt, dass diese in der Regel nur im Bereich der zu- und abführenden Leitungen erhöht sind (HANISCH et al. 1993a,b).

3 Bahnstromanlagen

3.1 Stromübertragungsleitungen

Im Unterschied zum öffentlichen Stromnetz, in dem eine Frequenz von 50 Hz verwendet wird, arbeitet die Stromversorgung der Eisenbahn mit einer Frequenz von $16 \frac{2}{3}$ Hz. Die Deutsche Bahn muss deshalb auch ein eigenes 110 kV-Stromversorgungsnetz unterhalten, einschließlich eigener Umspannwerke zur Übertragung der elektrischen Leistung von der 110 kV-Übertragungsebene auf die zum Betrieb der Lokomotiven notwendige Spannung von 15 kV.

Während die allgemeine Stromversorgung dreiphasig mit drei Leitern aufgebaut ist, wird bei der Bahnstromversorgung nur eine Phase verwendet, das heißt, dass auf den Masten pro System zwei Leitungen (Phase und Null-Leiter) geführt werden.

Systematische Messungen an Bahnstromübertragungsleitungen liegen nicht vor.

Die Versorgung von Straßen-, Stadt- und U-Bahnen erfolgt überwiegend mit Fahrdraht-Gleichspannungen (bzw. gleichgerichteter Wechselspannung) von 600 bis 1200 V.

3.2 Oberleitungen und Schienen

Über die als Oberleitung ausgeführte Phase werden die Züge der Deutschen Bahn mit der Betriebsspannung von 15 kV versorgt. Der Rückstrom fließt über die Schienen. Dies hat zwei Auswirkungen: Zum einen verhindert der große Abstand zwischen der Oberleitung und der Schiene weitestgehend eine mögliche gegenseitige Kompensation der Magnetfelder, die durch die Ströme in der Oberleitung und in den Schienen erzeugt werden. Zum anderen sind die Schienen über die Schwellen nicht vollständig von der Umgebung isoliert, so dass sich die Rückströme z.T. andere Wege im Erdreich suchen können, vorzugsweise dort, wo wegen einer hohen Bodenfeuchtigkeit oder durch metallische Gas- oder Wasserleitungen die elektrische Leitfähigkeit relativ hoch ist. Diese 'Vagabundierenden Ströme' erzeugen ihre eigenen Magnetfelder, z.T. auch noch in großem Abstand von der Bahntrasse. Da die Stärke der magnetischen Felder an elektrifizierten Eisenbahnstrecken von mehreren konstruktions- und betriebsbedingten Parametern abhängt, ist eine allgemeine Klassifizierung schwierig.

Magnetfelder treten an elektrifizierten Eisenbahnstrecken nicht nur bei unmittelbarer Durchfahrt von Zügen auf, sondern schon dann, wenn irgendwo auf dem Streckenabschnitt zwischen zwei Stromeinspeisepunkten, an dem sich der Messort befindet, ein Zug fährt. Da die Leistungsanforderung in einem Streckenabschnitt zwischen zwei Stromeinspeisepunkten sehr stark und schnell schwanken kann, in Abhängigkeit von der Zahl der in diesem Abschnitt fahrenden Züge und deren Betriebszustand (Anfahren, Beschleunigen, Dauerfahrt, Abbremsen), zeigen die magnetischen Feldstärken in der Nähe von Bahntrassen sehr starke zeitliche Schwankungen. Messungen in 50 m Abstand von elektrifizierten Eisenbahnstrecken ergaben Werte für das $16 \frac{2}{3}$ Hz-Magnetfeld zwischen 0,05 und 0,6 Mikrottesla, wobei die Zeiten für die Übergänge zwischen Minimal- und Maximalwerten teilweise weniger als eine Minute betragen (CAPELLE u.a. 1993, s.a. NEITZKE u.a. 1994 S. 352 ff). Neben den raschen Feldstärkeschwankungen sind für die Magnetfelder an Bahnstrecken große Feldanteile mit höheren Frequenzen (Oberwellen) charakteristisch, deren Ursache die elektronische Steuerung der Motoren der Lokomotiven (Phasenanschnittsteuerung) ist.

Die Einspeisung des Betriebsstroms erfolgt bei Straßenbahnen ebenfalls über Oberleitungen, bei U-Bahnen auch über seitlich des Gleises in weniger als 1 m Höhe über der Schienenoberkante angebrachte Stromschienen. Der Abstand zwischen Hin- und Rückleiter ist bei seitlich angebrachten Stromschienen relativ gering/weshalb eine bessere Kompensationswirkung als bei Oberleitungen zu erwarten ist. Messungen an einer U-Bahnstrecke in Hamburg ergaben sehr starke zeitliche Variationen der Stärke des Magnetfeldes in der Umgebung der Trasse (NEITZKE und HANISCH 1993).

4 Ansätze zur Minderung elektrischer und magnetischer Expositionen im Niederfrequenz-Bereich

Die Einhaltung der gültigen Sicherheitsgrenzwerte (26. BImSchV, D IN VDE 0848) bereitet im Niederfrequenzbereich nur im Hinblick auf elektrische Felder unter Hochspannungsfreileitungen der 380 kV-Ebene und (in relativ seltenen Fällen) in bezug auf die Magnetfelder in der unmittelbaren Umgebung von Transformatoranlagen Probleme (NEWI 1995).

Aufgrund der vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse kann nicht ausgeschlossen werden, dass elektrische und magnetische Felder auch bei Feldstärken, wie sie in der Nähe von elektrischen Anlagen, Maschinen und Geräten als Dauerbelastungen auftreten können, ein Gesundheitsrisiko darstellen und zu Belästigungen führen können.

In Schweden haben die nationalen Behörden und Ausschüsse für Berufliche Sicherheit und Gesundheit, für Wohnungswesen, Bauen und Planung, für elektrische Sicherheit und für Gesundheit und Wohlfahrt in Zusammenarbeit mit dem Strahlenschutz-Institut Richtlinien für Entscheidungsträger zur Anwendung des Vorsorge-Prinzips bei niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern erarbeitet (SSI 1996):

"Wenn Maßnahmen zur allgemeinen Reduzierung der Exposition mit vertretbarem Aufwand und mit vertretbaren Folgen in jeder Hinsicht durchgeführt werden können, sollten Anstrengungen unternommen werden, um Felder zu reduzieren, die deutlich von dem abweichen, was als normal in der jeweiligen Umgebung angesehen werden kann. Wo neue elektrische Installationen und Gebäude betroffen sind, sollten bereits in der Planungsphase Anstrengungen unternommen werden, sie so zu entwerfen und zu positionieren, dass die Exposition begrenzt wird."

Diese Richtlinien zielen, vor dem Hintergrund eines wissenschaftlich begründeten Verdachts auf schädliche Wirkungen niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder und im Sinne des Vorsorgeprinzips, auf eine generelle Minimierung elektrischer und magnetischer Felder, wobei durchaus Kostenaspekte in die Entscheidung über Maßnahmen eingehen. In den schwedischen Richtlinien werden daher nicht nur die zugrundeliegenden naturwissenschaftlich-medizinischen Befunde, sondern ebenfalls Kosten für verschiedene Vermeidungsmaßnahmen diskutiert.

Eine Strategie der 'umsichtigen Vermeidung' (prudent avoidance), wie sie in Schweden verfolgt wird, wird auch in Australien, Neuseeland und den USA diskutiert und zum Teil bereits angewandt.

Im Prinzip gibt es vier Ansätze zur Verminderung der Exposition durch elektrische und magnetische Felder:

1. Vermeidung erhöhter Expositionen durch vorsorgende raumplanerische Maßnahmen;
2. Verminderung der Emissionen durch konstruktive und betriebliche technische Maßnahmen an der Quelle;
3. Verminderung der Immissionen durch immissionsseitige Abschirmungen;
4. Verminderung der Exposition durch Verhaltensänderungen.

Physikalisch-technische wie wirtschaftliche Gründe sprechen dafür, vorsorgenden raumplanerischen Maßnahmen dabei den Vorzug zu geben, weil:

- konstruktiven und betrieblichen Maßnahmen Grenzen gesetzt sind, da die Erzeugung, Übertragung und Nutzung elektrischer Energie prinzipiell immer mit der Emission elektrischer und magnetischer Felder verbunden sind, denn diese sind die eigentlichen Träger der elektrischen Energie;
- die Abschirmung niederfrequenter magnetischer Felder auf kompakte Anlagen beschränkt ist;
- Verhaltens- und Nutzungsänderungen nur im Zusammenhang mit der Nutzung von elektrischen Maschinen und Geräten in Frage kommen;
- technische Minderungsmaßnahmen, insbesondere wenn sie nachträglich durchgeführt werden, in der Regel sehr teuer sind.

4.1 Raumplanung

Vermeidung erhöhter Expositionen durch vorsorgende raumplanerische Maßnahmen heißt eine vorausschauende Standortwahl für emittierende Anlagen, eine umsichtige Trassen- und Leitungsführung und die Einhaltung von Vorsorgeabständen zwischen emittierenden Anlagen und empfindlichen Nutzungen, wie Kindertagesstätten, Schulen, Wohnungen und Dauerarbeitsplätze entsprechend dem Expositionsbereich 2 der DIN VDE 0848 Teil 4. Dies kann durch die folgenden Maßnahmen unterstützt und erreicht werden.

4.1.1 Emissions- und Immissionskataster

Die Erstellung von Immissionskatastern kann dabei helfen, mögliche Zielkonflikte von vornherein zu vermeiden, indem belastete Flächen erkannt und ihre Nutzungen auf die Expositionsbedingungen abgestimmt werden, bzw. indem Zusatzbelastungen, die zu kritischen Gesamtbelastungen führen können, vermieden werden. Ähnliches lässt sich durch die Anlage von Emittenden-Katastern in Verbindung mit anlagenbezogenen Emissionsdaten erreichen.

Emissions- und Immissionskataster sollten auf Messungen an typischen Stromversorgungsanlagen in Verbindung mit der exemplarischen Vermessung des Umfeldes der Anlagen basieren, wie sie unter anderem im Auftrag des niedersächsischen Umweltministeriums und des Ministeriums für Arbeit, Gesundheit und Sozialordnung des Landes Baden-Württemberg durchgeführt wurden. In Anbetracht der Schwierigkeiten bei der numerischen Modellierung realer Anlagen und den Problemen bei der Nachbildung realer Expositionssituationen (KEGEL 1997) können Feldberechnungen allenfalls der groben Orientierung und der Extrapolation auf Maximallast-Zustände dienen.

Mit wachsender Empfindlichkeit elektronischer Geräte sind Emissions- und Immissionskataster nicht nur im Hinblick auf den Gesundheitsschutz, sondern auch bezüglich der technischen elektromagnetischen Verträglichkeit von Bedeutung.

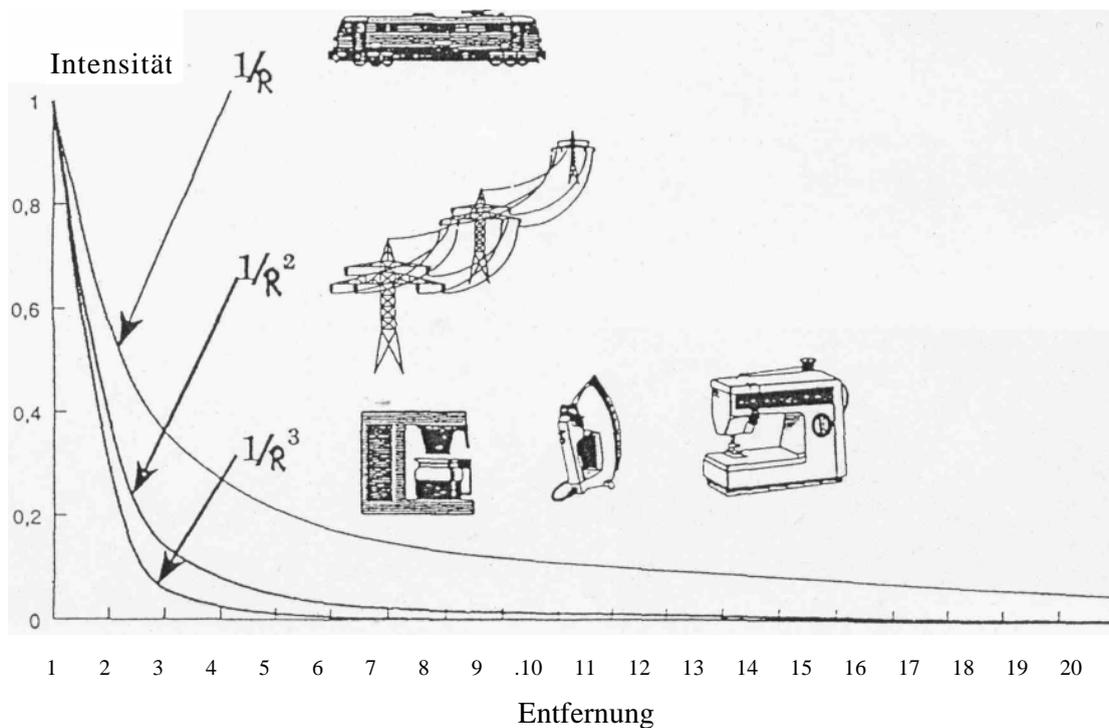


Abbildung 4.1

Abnahme der Feldstärken mit der Entfernung von der Quelle (BRUGGEMEYER 1993)

$1/R$: Feld eines geraden langen Leiters

$1/R^2$: Feld durch Überlagerung mehrerer Leiter mit Strom- bzw. Spannungssumme Null

$1/R^3$: magnetische Feld einer Spule

4.1.2 Umweltverträglichkeitsprüfung

Die Überprüfung möglicher Belastungen durch elektromagnetische Felder sollte nicht nur Bestandteil von Umweltverträglichkeitsprüfungen im Rahmen von Planungsverfahren sein, sondern ebenso im Rahmen von Beschaffungsvorhaben für Anlagen, Maschinen und Geräte erfolgen.

4.1.3 Schutzabstände

Aus Gründen des vorsorgenden Gesundheitsschutzes sollten die Abstände zwischen emittierenden Anlagen und Wohnungen, Krankenhäusern, Schulen, Kindergärten, Kinderhorten, Spielplätzen oder ähnlichen Einrichtungen so groß gewählt werden, dass die Expositionen durch die Anlagen 0,1 Mikrottesla für das magnetische Feld und 60 Volt/Meter für das elektrische Feld nicht übersteigen, um die Gesamtbelastung auf 0,2 Mikrottesla bzw. 120 Volt/Meter zu begrenzen.

Für elektrische Leitungen der verschiedenen Spannungsebenen können anhand der in den Kapiteln 4 und 5 zusammengestellten Daten und Diagramme die notwendigen Schutzabstände zur Einhaltung der Vorsorgegrenzwerte abgelesen werden.

4.2 Konstruktion und Betrieb

Bezogen auf Anlagen der Stromversorgung lassen sich bei den konstruktiven und betrieblichen Maßnahmen drei prinzipielle Ansätze unterscheiden:

1. die Vergrößerung des Abstandes zwischen der Quelle und dem Expositionsort durch konstruktive Maßnahmen;
2. angepasste Leitungs-, System- und Phasenkonfigurationen sowie aktive Maßnahmen, die zu einer Feldkompensation führen;
3. emissionsseitige Abschirmungen durch geeignete Materialien und Strukturen.

In den Abschnitten 5.1 bis 5.4 wird dargestellt, ob und welche Minderungseffekte sich mit diesen Maßnahmen bei Stromversorgungsleitungen und Transformatorstationen erzielen lassen. Die für Anlagen der allgemeinen Stromversorgung anwendbaren Minderungsmaßnahmen können prinzipiell auch bei Bahnstromanlagen angewandt werden (s. 5.6). Ansatzmöglichkeiten zur Verminderung der Streufelder von elektrischen Geräten und Maschinen bestehen bei der Auswahl feldarmer Baukomponenten, insbesondere bei Gerätetransformatoren, einer (unter Gesichtspunkten der Feldminimierung) sorgfältigen Führung elektrischer Leitungen innerhalb der Geräte und zum Teil auch beim Einbau von Abschirmungen (s. Abschnitt 5.5).

4.2.1 Expositionsminderung durch Abstandsvergrößerung

Die elektrischen und magnetischen Felder eines Einzelleiters nehmen mit dem Abstand R von ihm ab ($\sim 1/R$), die Felder von zwei (oder mehr) Leitern, deren Spannungs- bzw. Stromsumme sich zu Null überlagert, werden mit dem Quadrat des Abstandes ($\sim 1/R^2$) kleiner, das Magnetfeld einer Spule nimmt sogar mit der dritten Potenz des Abstandes ab ($\sim 1/R^3$). Daraus ergibt sich die einfachste und meist kostengünstigste Möglichkeit der Expositionsminderung: Abstand halten (vgl. Abbildung 4.1).

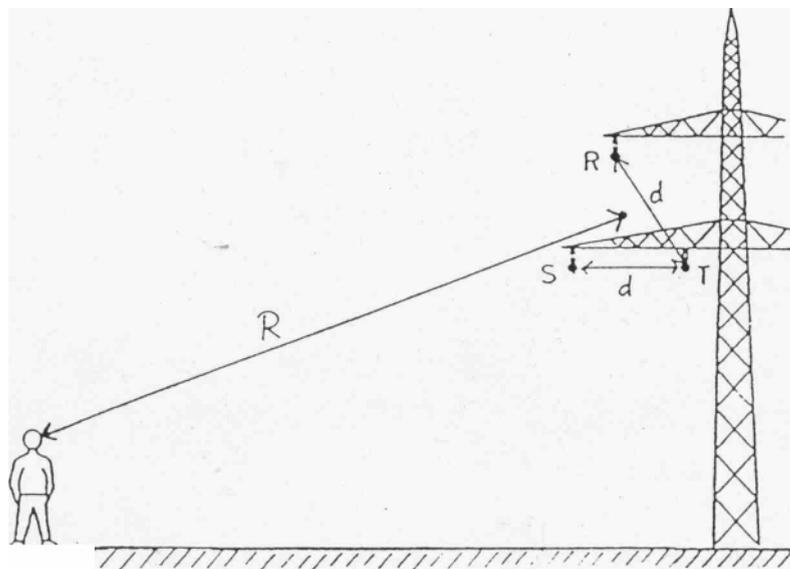


Abbildung 4.2

Der gemeinsame Einfluss der drei Phasen R, S, und T wird bei symmetrischem Betrieb in erster Näherung durch den effektiven Abstand der Einzelleiter zueinander (d) und durch den Kehrwert des Quadrates der (mittleren) Entfernung ($1/R^2$) zum Aufpunkt bestimmt.
Systemkonfiguration

Dies gilt bei allen möglichen Feldquellen, seien es Freileitungen, Transformatorstationen oder elektrische Geräte und ist nur durch die räumliche Situation begrenzt. Wenn ein horizontales Ausweichen nicht möglich ist, kann eine vertikale Abstandsvergrößerung die Exposition vermindern, z.B. durch eine Erhöhung der Masten einer Freileitung, das tiefere Vergraben eines Erdkabels oder die Verlagerung der Transformatorstation in den Keller eines Gebäudes.

4.2.2 Feldkompensation durch angepasste System-, Leitungs- und Phasenkonfiguration

Die elektrischen und magnetischen Felder an einem Aufpunkt ergeben sich durch Superposition der Einzelfelder von den verschiedenen Quellen, z.B. den drei Phasenleitern einer Drehstromübertragungsleitung (bezeichnet mit R, S und T). Da die Ursachen der Felder, die Spannungen (U) und Ströme (I), in den drei Einzelleitern gegeneinander phasenverschoben sind, kompensieren sich die Einzelfelder zum Teil gegenseitig. Das Restfeld hat zwei Anteile: der eine ist proportional zur Strom- bzw. Spannungssumme und nimmt mit dem (mittleren) Abstand wie $1/R$ ab, bei symmetrischem Betrieb sind beide Summen Null und damit auch diese weitreichenden Feldanteile;

der andere Anteil ist proportional zu den (mittleren) Ursachen pro Leiter (U bzw. I), im zeitlichen Mittel sind diese Restfeldanteile umgekehrt proportional zum Quadrat der (mittleren) Entfernung des Aufpunktes von den Leitern, sowie in erster Näherung proportional zum effektiven Abstand zwischen den verschiedenen Phasenleitern (d), einem Maß für die Entfernungsunterschiede vom Aufpunkt zu den Einzelleitern (siehe Abbildung 4.2.):

$$B \sim I \times d / R^2 \qquad E \sim U \times d / R^2$$

Dieses gilt, wenn die Entfernung zu den Leitern deutlich größer ist als der Abstand zwischen ihnen ($R \gg d$), z.B. außerhalb der Breite einer Hochspannungsstrasse. In dieser vereinfachten Beziehung sind die wesentlichen Möglichkeiten zur Expositionsminimierung erkennbar: eine Verminderung der Felder ist möglich

- (i) durch Verkleinerung der Ursachen,
- (ii) durch Verkleinerung der Abstände zwischenden Einzelleitern und damit möglichst kleine Entfernungsunterschiede zu diesen und
- (iii) durch Vergrößerung der Entfernung zu den Quellen.

Diese Maßnahmen lassen sich nicht immer gleichzeitig und z.T. nur getrennt für das elektrische und magnetische Feld realisieren.

Eine Reduzierung der Felder von elektrischen Übertragungsleitungen durch Verkleinerung der Ursachen kann für beide Feldarten gleichzeitig nur durch eine geringere Leistungsübertragung erreicht werden. Da die übertragene Leistung das Produkt aus Strom und Spannung ist ($P = U \times I$), kann bei gleichem Leistungstransport z.B. der Strom nur auf Kosten einer Vergrößerung der Spannung verkleinert werden. Damit wird zwangsläufig die elektrische Feldstärke erhöht, wenn auf diese Weise die magnetische Feldstärke reduziert werden soll (und vice versa). Da sich die elektrische Feldstärke gut abschirmen lässt (vgl. 4.3), kann es nicht nur aus Gründen der Minimierung der Leitungsverluste sondern auch zur Reduktion der Magnetfeldexposition sinnvoll sein, die gleiche Leistung auf höherem Spannungsniveau zu übertragen.

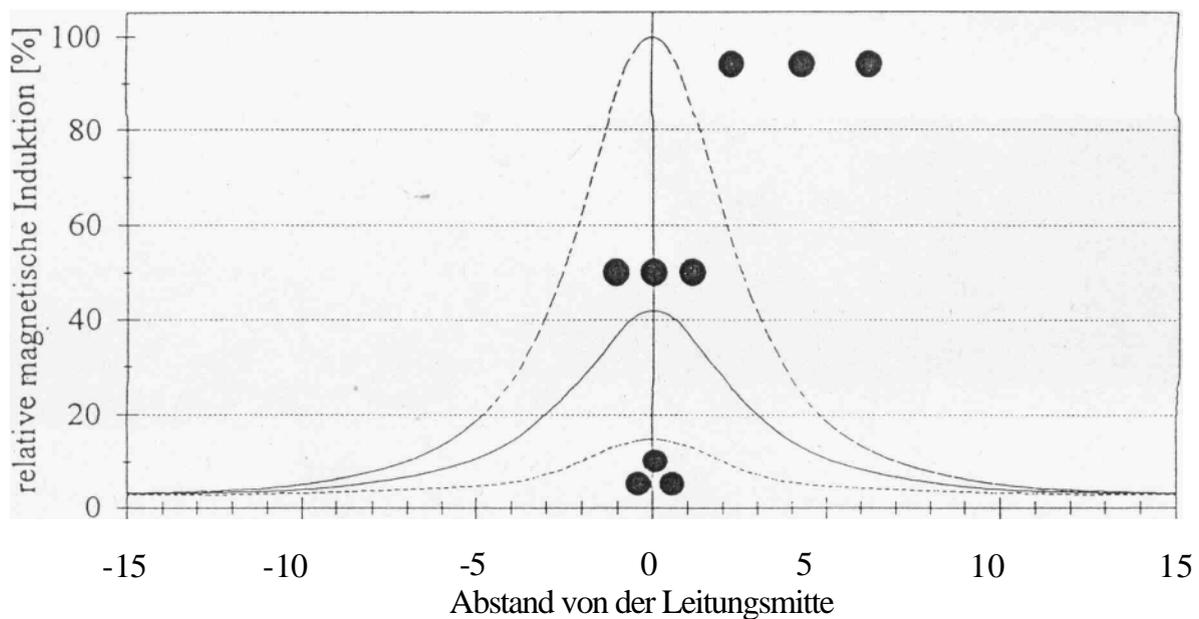


Abbildung 4.3

Die relative magnetische Induktion eines 110 kV-Erdkabels bei den drei Leitungskonfigurationen (NEWI 1995) :

- Einebenenordnung mit 40 cm Leiterabstand (Max. = 100%, gestrichelt),
- Einebenenordnung mit 16 cm Leiterabstand (durchgezogen),
- Dreiecksanordnung (gepunktet).

Das gleichzeitige Aufbringen von mehreren Systemen verschiedener Spannung auf einem Kombinationsgestänge verringert den nötigen Platzbedarf im Vergleich mit zwei Einzelgestängen. Neben dem Vorteil des geringeren Landschaftsverbrauches kann hierdurch die Feldexposition verringert werden, denn zum einen ergibt sich so die Möglichkeit, den horizontalen Abstand zur Leitungstrasse zu vergrößern, zum anderen ist das Kombinationsgestänge höher, so dass der vertikale Abstand für das System, das die höheren Felder erzeugt, größer ist. Da dies [immer das System des höheren Spannungsniveaus ist, wird durch die abschirmende Wirkung] der Leiter des unteren Systems mit kleinerer Spannung eine Verringerung der elektrischen | Feldstärke unterhalb der Höchstspannungsleitung erreicht.

Leitungskonfiguration

Bei unterschiedlichen geometrischen Anordnungen der Phasenleiter zueinander sind mit dem effektiven Abstand (d) zwischen ihnen auch die Entfernungsdifferenzen der Einzelleiter zum \ Aufpunkt verschieden. Dies bewirkt eine unterschiedlich gute Kompensation der Einzelfeld stärke und kann am Aufpunkt zu unterschiedlich großen Feldstärken führen. In der Abbildung 4.3 ist als Beispiel der Einfluss der Konfiguration bei einem 110 kV-Erdkabel dargestellt.

Ebenso lässt sich in einer Transformatorenstation durch eine günstigere Geometrie der Niederspannungsverteilerschiene (z.B. als Dreieck statt einer langen Schiene) eine Reduktion des magnetischen Feldes durch Kompensation erreichen.

Eine weitere Möglichkeit der Feldreduktion ergibt sich durch eine Verdrillung der Leiter um einander, was eine bessere Kompensation und einen schnelleren Feldstärkeabfall mit dem Abstand vom Leitungssystem bewirkt. Dies könnte nicht nur bei den einphasigen Leitungen der Hausversorgung sondern auch bei den dreiphasigen Erdkabeln, ja sogar - wenn auch mit höherem Aufwand - bei Freileitungen realisiert werden (KEGEL 1997b).

Als Folge der Induktionswirkung der Betriebsströme fließen in den Erdseilen (Blitzschutzseile,

Kompensationsseile) und zurück über die Masten und das Erdreich eines Spannungsfeldes die Erdseilstrome. Verschiedene Berechnungen haben gezeigt, dass sie bis zu 10% der Betriebsströme erreichen können (BAUHOFER 1993). Das von den Erdseilstromen erzeugte Magnetfeld überlagert sich dem Feld der Betriebsströme. Ob sich die Feldstärke an einem Aufpunkt dadurch erhöht oder reduziert, hängt von der Lage der Erdseile ab. Blitzschutzseile verursachen in der üblichen Ausführung am Erdboden eine 2 bis 5 % -ige Erhöhung der magnetischen Induktion gegenüber einem blitzseilfreien System. Kompensationsseile können bei entsprechender Anordnung zu einer drastischen Reduzierung sowohl der elektrischen als auch der magnetischen Feldstärke in Leitungsnähe führen (BAUHOFER 1993). Ähnliche Feldreduktionseffekte zeigen auch Zusatzleiter in Erdkabeln (siehe Abschnitt.5.1.4).

Phasenkonfiguration

Neben der üblichen Dreiphasenkonfiguration mit drei Leitern oder Leiterbündeln werden auch Mehrphasenkonfigurationen (multi phase) oder doppelte Dreiphasenkonfigurationen (split phase) getestet, bei denen sich zwei mal drei gegeneinander phasenversetzte Phasenleiter den Strom teilen. In beiden Fällen kann der das Magnetfeld erzeugende Strom pro Leiter stärker verkleinert werden als der effektive Abstand zwischen den verschiedenen Phasenleitern aus Sicherheitsgründen vergrößert werden muss, so dass das Produkt $I \times d$ und damit das Magnetfeld am Aufpunkt kleiner wird (vgl. Abschnitt. 5.1.2).

Eine spezielle Form der doppelten Phasenkonfiguration ist die übliche zweisystemige Übertragungsleitung, wenn die beiden Systeme galvanisch gekoppelt sind und damit in je zwei Leitern die Ströme und Spannungen gleichphasig vorhanden sind. In diesem Fall spielt nicht nur die geometrische Anordnung der drei Phasenleiter innerhalb eines Systems eine Rolle, sondern auch die relative Phasenordnung zwischen den beiden System hat einen entscheidenden Einfluss auf Größe der elektrischen und magnetischen Feldstärke. Dabei ist die feldoptimale Phasenordnung von Mastbild zu Mastbild unterschiedlich (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Im allgemeinen Fall des Betriebes von zwei längsgetrennten Systemen mit zwei unterschiedlichen Bezugskraftwerken ist die Phasenbeziehung zwischen den beiden Systemen zufällig. Dann ergeben sich bei unterschiedlichen Phasenbeziehungen zwischen den Systemen unterschiedliche Feldstärken. Für ein bestimmtes Mastbild kann jetzt die bei der Phasendifferenz von Null feldminimale Anordnung bei anderen Phasendifferenzen schlechter sein als eine andere Anordnung, die vorher (bei der Phasendifferenz von Null) ungünstiger war (BAUHOFER 1993). Die Unterschiede zwischen den relativen Phasenordnungen heben sich im Mittel über alle möglichen Phasendifferenzen weitestgehend auf (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Wenn durch unterschiedlich starke Verbraucher an den verschiedenen Phasen eines Systems die Stromsumme aller drei Phasen nicht mehr gleich Null ist, oder wenn durch induktive oder kapazitive Verbraucher die Phasenbeziehung zwischen den drei Leitern (normal Phasendifferenz = 120°) gestört wird, muss ein zusätzlicher Rückstrom, z.B. im Blitzschutzleiter aber u.U. auch als Erdstrom, diese Asymmetrie ausgleichen. Dies verändert natürlich auch die magnetische Feldstärke in der Umgebung der Leitung, besonders, wenn ein merklicher Teil des Rückstromes im Erdreich erfolgt (siehe Abschnitt 5.2).

Eine ähnliche Situation kann auch bei den einphasigen Leitungen der Niederspannungsversorgung auftreten, wenn durch ungeschickte Erdung und durch leitende Verbindungen zwischen den Potentialausgleichsschienen in verschiedenen Wohnungen ein Teil des Rückstromes nicht durch den Null-Leiter sondern über andere Wege, wie z.B. metallische Wasserleitungen, zurückfließt. Dies kann zu ganz erheblichen Magnetfeldexpositionen im Wohnbereich führen (WERTHEIMER et al. 1995).

Wo eine Vermeidung von solchen Erdströmen durch die Auslegung der Erdung im Niederspannungsnetz (vgl. z.B. EMF-Monitor 1995c oder STAMM 1993) oder durch Unterbrechung der

metallischen Verbindungen zu Nachbargebäuden nicht möglich ist, kann durch den Einbau eines speziellen Transformators, der den Null-Leiter induktiv an die Phase koppelt und so den Rückstrom an den Null-Leiter bindet, eine erzwungene Kompensation erreicht werden. In einer Testleitung konnte die magnetische Induktion 2 Meter über dem Stromkabel von 0,65-1,5 μT ohne Transformator auf die Umgebungsflussdichte von 0,02 μT (ohne Stromfluss durch das Kabel) durch den Einbau eines solchen Stromtransformators abgesenkt werden (HOFMANetal. 1995).

Aktive Kompensation

In Simulationsrechnungen konnte auch für höhere Spannungsebenen gezeigt werden, dass durch eine aktive Kompensation die Magnetfeldexposition selbst für größere Gebiete drastisch reduziert werden könnte. Dabei werden elektronisch gesteuert zusätzliche Kompensationsströme in extra Leiter eingespeist, (vgl. Abschnitt 5.1.5).

4.2.3 Emissionsseitige Abschirmungen

Emissionsseitige Abschirmung, d.h. Abschirmung an der Quelle, bedeutet entweder räumlichen Einschluss der Felder an der Quelle oder Beeinflussung des Feldverlaufs an der Quelle derart, dass der abzuschirmende Raum nicht erreicht wird, sich das Feld ansonsten aber im Raum ausbreiten kann. Bei niederfrequenten elektrischen Feldern sind beide Fälle leicht zu realisieren:

Die Umhüllung der Quelle mit einem elektrisch leitfähigen Material, z.B. mit Metallblechen, verhindert die Ausbreitung der Felder außerhalb des so gebildeten Faradayschen Käfigs. Normale Baumaterialien (Stein, Beton usw.) haben ebenfalls eine gewisse abschirmende Wirkung. Die Anbringung zusätzlicher elektrischer Leiter führt zu einer Verzerrung des Feldes, die durch geeignete geometrische Anordnung so gestaltet werden kann, dass die elektrische Feldstärke in bestimmten Raumbereichen deutlich reduziert wird.

Bei kompakten Quellen, wie z.B. Transformatoren, ist das erste Verfahren anwendbar (s. Abschnitt 5.4). Bei ausgedehnten Quellen, wie z.B. Freileitungen, ist ein vollständiger Einschluss der Quelle in einen Faradayschen Käfig dagegen praktisch unmöglich und es bleibt nur die Möglichkeit, die Ausbreitung des Feldes durch die Anbringung zusätzlicher Leiter so zu beeinflussen, dass das elektrische Feld in dem abzuschirmenden Raumbereich reduziert wird (s. 5.1).

Die Abschirmung niederfrequenter magnetischer Felder ist dagegen nicht so einfach möglich. Prinzipiell können aber zwei Verfahren, die auf unterschiedlichen physikalischen Effekten beruhen, angewandt werden:

- Bei der Abschirmung durch induzierte Ströme wird ausgenutzt, dass zeitlich veränderliche Magnetfelder in elektrisch leitfähigen Materialien Wirbelströme induzieren. Diese Ströme erzeugen ein Feld, das dem ursprünglichen Feld entgegengerichtet ist. Das Magnetfeld wird dadurch von der Abschirmung abgestoßen und zu einem Verlauf parallel zur abschirmenden Oberfläche gezwungen. Innerhalb des Abschirmmaterials und hinter der Abschirmung wird hierdurch der magnetische Fluss reduziert. Durch die Induktion von Wirbelströmen wird Energie des magnetischen Wechselfeldes in Wärmeenergie umgewandelt. Das Magnetfeld wird also tatsächlich geschwächt.
- Eine Umlenkung des Magnetfeldes kann durch ferromagnetische Materialien hoher Permeabilität erreicht werden. Das Magnetfeld wird in diesen Materialien konzentriert und kann somit von der abzuschirmenden Region abgelenkt werden.

Abbildung 4.4 zeigt den Verlauf der Magnetfeldlinien für Abschirmungen hoher Leitfähigkeit bzw. hoher Permeabilität.

In Tabelle 4.1 sind für vier Materialien, die häufig zur Abschirmung eingesetzt werden, jeweils der spezifische Widerstand und die relative Permeabilität aufgeführt. Kupfer und Aluminium

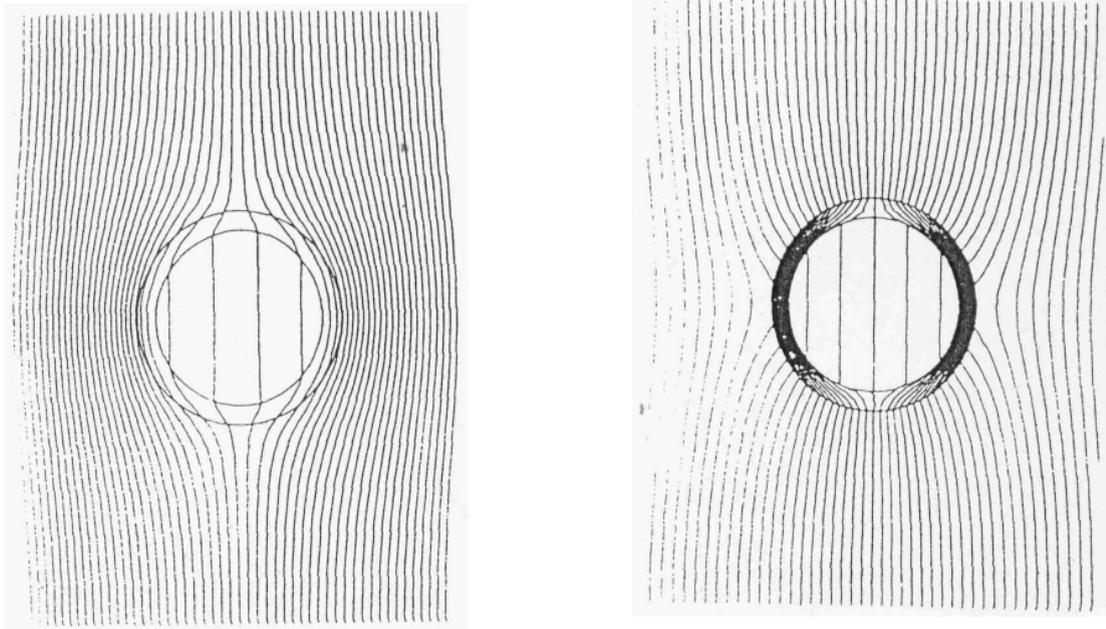


Abbildung 4.4

Verlauf der Magnetfeldlinien für eine sphärische Abschirmung in einem homogenen Feld (HASSELGREN u. LUOMI 1995).

- a) Schirmmaterial hoher Leitfähigkeit (links)
- b) Schirmmaterial hoher Permeabilität (rechts)

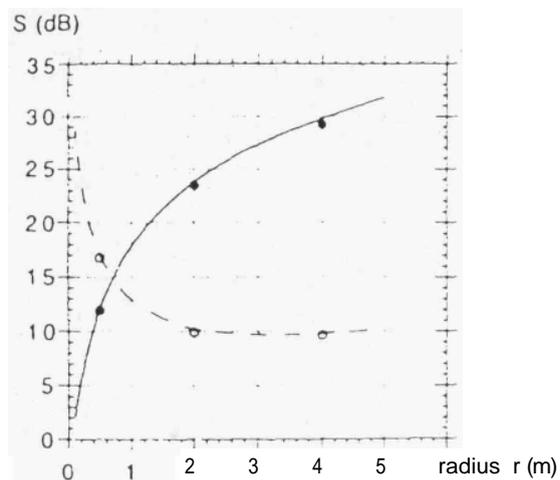


Abbildung 4.5

Wirksamkeit S einer sphärischen Abschirmung der Dicke 1 mm als Funktion des Radius r für Kupfer (durchgezogene Kurve) und Transformatorstahl CK-37 (gestrichelte Kurve) (HASSELGREN und LUOMI 1995).

haben beide nur eine relative Permeabilität, die der von Luft entspricht. Ihr geringer spezifischer Widerstand erlaubt aber die Ausnutzung des Effekts der Magnetfeldschwächung durch Induktion elektrischer Wirbelströme. Bei den beiden Stahlsorten ist die relative Permeabilität vergleichsweise hoch, so dass diese Materialien auch zur Konzentration und Umlenkung von Magnetfeldern genutzt werden können. Aufgrund des relativ geringen spezifischen Widerstandes von Stahl, kommt es aber zusätzlich zur Induktion elektrischer Wirbelströme.

Tabelle 4.1
Materialkonstanten von Abschirmmaterialien (HASSELGREN und LUOMI 1995).

Material	spez. Widerstand (Ohm/Meter)	rel. Permeabilität
Aluminium (Al)	$2,8 \cdot 10^{-8}$	1
Baustahl (Fe)	$1,4 \cdot 10^{-7}$	700
Transformator- stahl (CK-37)	$4,6 \cdot 10^{-7}$	4.000
Kupfer (Cu)	$1,7 \cdot 10^{-8}$	1

Exemplarische Ergebnisse von Berechnungen für einfache Quellen- und Schirmgeometrien sind in den Abbildungen 4.5 bis 4.7 dargestellt (HASSELGREN und LUOMI 1995). Auf der Ordinate ist jeweils die Wirksamkeit der Abschirmung S aufgetragen, die folgendermaßen definiert ist:

$$S = B_0/B_S$$

bzw. bei Angabe in dB:

$$S_{dB} = 20 \log(B_0/B_S),$$

dabei steht B_0 für die magnetische Induktion ohne Abschirmung und B_S für den Fall mit Abschirmung.

Für weitere Beispiele zur Abschirmung netzfrequenter Felder s. z.B. RIKITAKE 1987, HASSELGREN 1993, FUGATE et al. 1995, NEWMAN und KRAGALOTT 1995, DU et al. 1996. OLSEN und MORENO 1996, TEKIN und NEWMAN 1996, FRIX und KARADY 1997. Für höhere Frequenzen s. z.B. KISTENMACHER et al. 1995, KISTENMACHER und SCHWAB 1996. Zur Abschirmwirkung verschiedener Materialien als Funktion der Frequenz s. z.B. HEMMING 1992.

Beim Aufbau von Abschirmungen können, wie die Materialdaten in Tabelle 4.1 zeigen, die beiden Abschirmmechanismen jeweils für sich oder gemeinsam wirksam werden. Bei geeigneter geometrischer Anordnung können durch Mehrschichten-Abschirmungen aus abwechselnden Lagen von Materialien hoher Permeabilität bzw. hoher elektrischer Leitfähigkeit höhere Abschirmeffekte erreicht werden als durch Abschirmungen gleicher Dicke aus nur einem Material (FUGATE et al. 1994).

($S = 10 \dots$ typisch $22 \dots 32$ dB abhängig von Abstand und Orientierung (Winkel))

Abbildung 4.6

Zylindrische magnetische Abschirmung um einen elektrischen Doppelleiter
(HASSELGREN und LUOMI 1995)

a) Geometrische Anordnung im Querschnitt

b) Wirksamkeit S der Abschirmung als Funktion des Abstandes zur Abschirmung
(Leiterabstand $2a=1,5\text{m}$, Radius der Schirmhülle $r=1\text{m}$, Wandstärke der Schirmung 1mm)
für Kupfer (durchgezogene Kurve) und Transformatorstahl CK-37 (gestrichelte Kurve)

In der Praxis basiert der Entwurf von Abschirmungen meist auf Erkenntnissen aus Laborexperimenten oder vorhandener Erfahrung mit Abschirmungen. Vielfach können die Erkenntnisse und Erfahrungen jedoch nicht einfach auf andere Situationen übertragen werden, da die erzielbare Feldreduktion nicht nur von dem verwendeten Material und der Dicke der Abschirmung abhängt, sondern auch stark durch die Art der Quelle oder der Quellen, die Anordnung der Abschirmung relativ zu den Quellen und zum abzuschirmenden Raum bestimmt wird. Nicht zuletzt wird die erzielbare Feldreduktion durch die Geometrie und die Abmessungen der Abschirmung beeinflusst. Aus diesen Gründen und in Anbetracht der Tatsache, dass die Forschung zur Abschirmung netzfrequenter Felder noch im Fluss ist, müssen in jedem einzelnen Fall die Möglichkeiten der Anbringung von Abschirmungen und ihre Wirksamkeit untersucht werden. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass die Anwesenheit leitfähiger Strukturen z.B. in der Nähe einer elektrischen Leitung aufgrund der Induktion eine zusätzliche Last darstellt (FRIX und KARADY 1997)

4.3 Immissionsseitige Abschirmungen

Theoretisch sind auf der Immissionsseite die gleichen Abschirmverfahren anwendbar wie auf der Emissionsseite an der Quelle. In der Praxis würde dies jedoch bedeuten, die feldfrei zu haltenden Raumbereiche mit Abschirmungen aus elektrisch leitfähigem oder hoch-permeablem Material zu umgeben. Dies dürfte allein schon aus Kostengründen nur in seltenen Fällen durchführbar sein. Bei der Abschirmung kleiner Raumbereiche, insbesondere von empfindlichen Geräten, wie Computerbildschirme, gegen störende Magnetfelder kann durch eine Verkleidung mit Abschirmblechen, z.B. aus μ -Metall, eine hinreichende Verminderung der Magnetfelder erreicht werden (KOHLING und ZIMMER 1993, KEGEL und RTEDINGER 1995). Entsprechendes Zubehör wird im Handel angeboten.

Für großflächige Abschirmungen, z.B. von Wohnhäusern, gegen die magnetischen Felder von externen Stromversorgungsanlagen gibt es keine geeigneten Verfahren. Elektrische Felder werden allein schon durch normale Baumaterialien geschwächt. Eigene Erfahrungen aus der Messpraxis zeigen, dass normale Ziegel- und Betonwände elektrische Felder auf wenige Prozent des Ausgangswertes reduzieren. Die zusätzliche Anbringung elektrisch leitfähiger Tapeten oder Metallpulver-Beimengungen im Verputz oder Fußbodenbelag des zu schirmenden Raumes sind in der Regel überflüssig. Produkte, die eigentlich zur Abschirmung hochfrequenter elektromagnetischer Felder entwickelt wurden, die aber natürlich auch niederfrequente elektrische Felder abschirmen, werden mittlerweile von zahlreichen Herstellern zur Abschirmung von EKG- und EEG-Bereichen in Krankenhäusern und Arztpraxen, von Labors und Rechenzentren, zur Erhöhung der Abhörsicherheit in Industrie und Behörden und zur Konfektionierung von Schutzkleidung angeboten. Neuerdings sind auch abgeschirmte Fenster und Fensterscheiben verfügbar, bei denen die Abschirmung durch metallisches Bedampfen oder durch Einlagen aus Drahtgeflecht erreicht wird. Eine abschirmende Wirkung gegenüber elektrischen Feldern kann auch durch die Anpflanzung von Bäumen und Büschen erreicht werden.

4.4 Aufklärung

Die Gesamtexposition der Bevölkerung durch niederfrequente elektrische und magnetische Felder rührt einerseits von Stromversorgungs- und Bahnanlagen her, deren Beiträge zur Exposition durch den Einzelnen nicht zu beeinflussen sind, und zu deren Reduktion Maßnahmen notwendig sind, wie sie in den Abschnitten 4.1 bis 4.4 beschrieben wurden. Andererseits

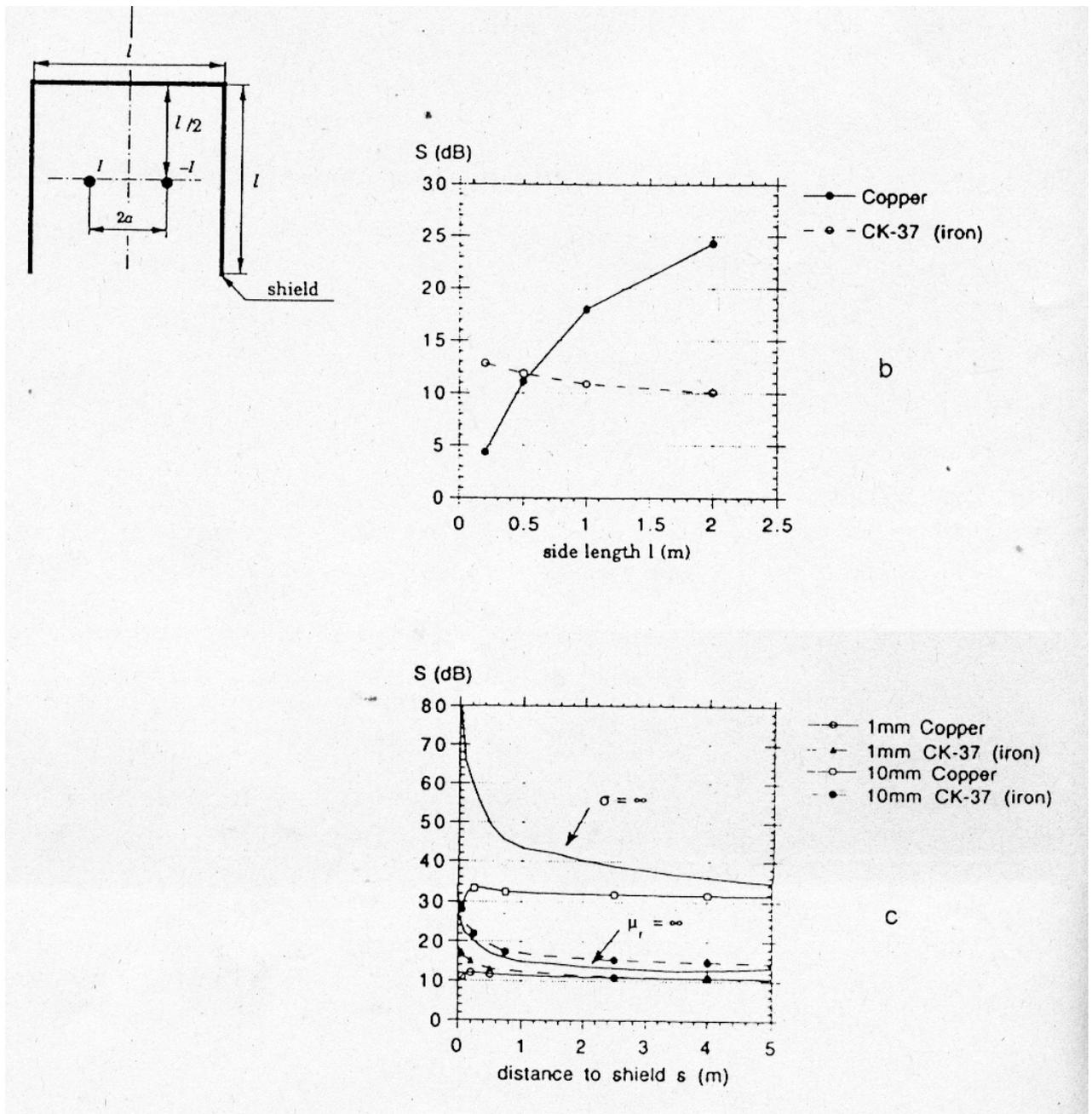


Abbildung 4.7

Unendlich lange dreiseitige Abschirmung um einen elektrischen Doppelleiter (HASSELGREN und LUOMI 1995).

a) Geometrische Anordnung im Querschnitt.

b) Wirksamkeit S der Abschirmung als Funktion der Seitenlänge l ($2a = 10$ cm, $s = 1$ m, Wandstärke der Schirmung 1 mm) für Kupfer (durchgezogene Kurve) und Transformatorstahl CK-37 (gestrichelte Kurve).

c) Wirksamkeit S der Abschirmung als Funktion des Abstands s ($2a = 10$ cm, $l = 0,5$ m, Wandstärke der Schirmung 1 mm) für Kupfer (durchgezogene Kurve) und Transformatorstahl CK-37 (gestrichelte Kurve) jeweils in den Dicken 1 mm und 10 mm.

können lokale Quellen in Wohnungen und an Arbeitsplätzen zu erheblichen Zusatzbelastungen führen, die in vielen Fällen durch einfache Maßnahmen, insbesondere durch Änderungen des Nutzungsverhaltens, verringert werden können. Eine notwendige, wenn auch nicht hinreichende Voraussetzung jeder Verhaltensänderung ist die Bereitstellung verlässlicher und verständlicher Informationen.

4.4.1 Risikokommunikation

Die als Reaktion auf den immer breiter werdenden Protest insbesondere gegen den Aufbau der Mobilfunknetze nach GSM-Standard aber auch gegen den Bau von Hochspannungsfreileitungen von Parlamentsausschüssen, Ministerien und politischen Parteien auf Bundesebene sowie in etlichen Bundesländern durchgeführten Anhörungen stießen in der Öffentlichkeit auf starkes Interesse. Einige Bundesländer, wie Hamburg, Schleswig-Holstein und Bayern, haben grundlegende Studien zur "Elektrosmog"-Problematik in Auftrag gegeben. Andere Bundesländer ließen Studien zu speziellen Fragestellungen erstellen, wie Niedersachsen, Baden-Württemberg und Sachsen-Anhalt. Informationsbroschüren unterschiedlichster Herausgeber und Qualitäten sind stark gefragt.

Die Anhörungen, mit starker Beteiligung von Bürgerinitiativen, Vertretern von Kommunen, Landesbehörden und Betreibern von Sendeanlagen und die öffentliche Debatte über die Studien haben nicht nur das starke öffentliche Interesse an der Thematik sondern auch die Brisanz der Kontroverse um die möglichen Gesundheitsgefahren elektromagnetischer Felder deutlich gemacht. Die Flut von einigen tausend Anfragen, die das Bundesamt für Strahlenschutz, die zuständigen Landesbehörden, Verbraucher- und Umweltverbände mittlerweile jährlich zum Thema "Elektrosmog" erreichen, deuten auf eine tiefgreifende Verunsicherung über dieses Thema hin.

Kontroversen um technisch bedingte Risiken weisen oftmals eine zeitliche Struktur auf, die bei aller Verschiedenheit der Risiken sehr ähnlich ist (WIEDEMANN 1992):

- in der Latenzphase werden die möglicherweise vorhandenen Risiken einer bestimmten Technologie meist nur von einer relativ kleinen Zahl von (kritischen) Wissenschaftlerinnen und von Aktiven in der Umweltschutz-Szene erkannt und diskutiert;
- in der Emergenzphase wird das Risikothema von Bürgerinitiativen, Umwelt- und Verbraucherschutzverbänden und, durch diese vermittelt, von den Medien und Teilen der Öffentlichkeit aufgegriffen;
- das Eintreten eines Störfalls mit Gesundheits- oder Umweltschäden, aber auch neue wissenschaftliche Erkenntnisse, die das Gefährdungspotential des betreffenden Risikofaktors belegen, können zur Krise führen, bei der das Risikothema in den Blickpunkt der Öffentlichkeit gerät;
- in der Regel reagieren Politik und Verwaltung jetzt, es folgt eine Phase der politischen und rechtlichen Regulation des Risikos mit Maßnahmen zur Kontrolle und zur Reduzierung des Risikos.

Das Risikothema "Elektrosmog" ist in Deutschland innerhalb von ca. 10 Jahren von einem Thema für Spezialisten zu einem der am stärksten beachteten und am heißesten umstrittenen Umweltthemen avanciert, ausgelöst durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse über die biologische Wirksamkeit elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder sowie die bereits früher angelaufene Diskussion besonders in den USA. Das Thema 'Elektrosmog' ist somit in die Emergenz-Phase eingetreten - mit dem Potential eines schnellen Übergangs in die Phase

der Krise, wenn sich die Hinweise auf mögliche gesundheitliche Beeinträchtigungen auch durch relativ schwache Felder bestätigen sollten.

Ein Faktor, der das Ausmaß der Kontroverse um eine Technologie, ein Produkt oder einen Stoff stark beeinflusst und der auch mit darüber entscheidet, ob Maßnahmen zur Eindämmung möglicher oder tatsächlich vorhandener Gefahren für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt von der Bevölkerung als ausreichend angesehen werden, ist das Risiko, nach Form und Umfang, das mit der betreffenden Technologie, dem Produkt oder dem Stoff in Verbindung gebracht wird. Von Seiten der politisch Verantwortlichen wie auch der für die Genehmigung zuständigen Behördenvertreter wird meist nicht hinreichend berücksichtigt, dass die Risikowahrnehmung durch "Laien" erheblich von der durch "Experten" abweicht. Während Experten versuchen, jedes Risiko nach einem stark vereinfachten Kriterium, nämlich dem Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit für den Schadensfall und dem Schadensumfang (Zahl der Todesopfer, der Verletzten, Kosten), quantitativ zu bewerten, ist das Muster, nach dem Laien Risiken beurteilen ungleich komplexer (COVELLO 1989, BOBIS-SEIDENSCHWANZ und WIEDEMANN 1993). In die Risikobewertung durch Laien findet eine große Zahl qualitativer Risikokriterien Eingang. Es ist z.B. von Bedeutung, ob das Risiko persönlich kontrolliert werden kann, ob Kinder betroffen sind, wie hoch das Katastrophenpotential ist und ob das Risiko naturgegeben oder menschengemacht ist. Während Experten als Schäden in der Regel nur Todesfälle, Gesundheits- und Vermögensschäden berücksichtigen, umfassen der Risiko- und der Schadensbegriff der Laien ein wesentlich breiteres Spektrum nachteiliger Auswirkungen, z.B. Beeinträchtigungen des Wohlbefindens durch Schmerzen, Schlaflosigkeit oder Nervosität.

Aber auch die Risikobewertung durch Experten ist nicht frei von subjektiven und qualitativen Momenten:

- Personen, die aufgrund ihrer Ausbildung oder ihres Arbeitsalltages gewohnt sind, mit bestimmten Technologien, Geräten oder Stoffen umzugehen, neigen dazu, die mit diesen verbundenen Risiken zu unterschätzen;
- die wirtschaftliche Abhängigkeit von Auftrags- und Arbeitgebern engen den Meinungs- und Entscheidungsspielraum ein;
- das Gleiche gilt auch für kollektive Werthaltungen und Einstellungen, wie sie sich in Betrieben, Behörden oder Berufsverbänden finden oder die Teil eines ganzen beruflichen Selbstbildnisses sind, ein Abweichen von der Kollektivmeinung ist nur um den Preis des Verlustes der 'beruflichen Nestwärme' möglich;
- Berufsgruppen mit einem idealistischen Selbstbild fühlen sich, sobald Widerstand gegen die von ihnen mitgetragenen Ziele aufkommt, in ihren Bemühungen für das Wohl der Gesellschaft, für den technisch-wissenschaftlichen Fortschritt usw. verkannt, sie schotten sich gegen die Kritik ab und verweigern sich einer rationalen Diskussion (Wagenburg-Verhalten);
- in der Ausbildung und im frühen Berufsleben erworbenes Wissen und das hieraus resultierende fachliche Weltbild werden nur widerstrebend einer Aktualitäts- oder Realitätskontrolle unterworfen.

Gegenüber einer Öffentlichkeit, die, gewitzt durch die Erfahrungen einer ganzen Reihe von Umweltskandalen, dem Expertentum als solchem zunehmend kritisch gegenübersteht, fällt es auch den Experten aus der Wissenschaft und den für die Genehmigung zuständigen Behörden schwer, den Anschein ungetrübter Objektivität aufrecht zu erhalten. Ihnen wird vorgeworfen, den kommerziellen Interessen der betroffenen Industriebranchen Vorrang zu geben vor den Schutzbedürfnissen der Bevölkerung. Informationen von Seiten der Betreiber der Anlagen oder der Behörden, die jegliche Gefährdung verneinen, werden aus den gleichen Gründen als Verharmlosung und Abwiegelung empfunden.

Insbesondere die für die Genehmigung von emittierenden Anlagen und für die Umwelt- und Gesundheitsüberwachung zuständigen Behörden müssen sich überlegen, wie sie das Vertrauen der Bevölkerung wiedergewinnen können. Dabei sind einige Maßnahmen unverzichtbar:

- Die Entscheidungsfindung und die Beteiligung von Interessengruppen an ihr müssen transparenter gemacht werden.
- Die für die Genehmigung einer Anlage zuständige Behörde muss die Öffentlichkeit frühzeitig und umfassend über die Planungen informieren.
- Die mit dem Bau und dem Betrieb der Anlage möglicherweise verbundenen Probleme müssen klar und offen dargestellt werden.
- Die Informationen müssen so aufbereitet sein, dass sie dem Informationsbedürfnis der Bevölkerung genügen und für einen "Durchschnittsbürger" verständlich sind.
- Die unterschiedlichen (wissenschaftlichen) Standpunkte zu den Auswirkungen des Betriebs der Anlage auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt sollten dargestellt werden (am besten durch Sachverständige, die den jeweiligen Standpunkt teilen).
- Die Notwendigkeit der Anlage an sich, die vorgesehene Technologie und der geplante Standort sowie mögliche Alternativen müssen öffentlich diskutiert werden.
- Verträge mit den künftigen Betreibern sollten so gestaltet sein, dass sie bei veränderter Erkenntnislage zur Schädlichkeit der Emissionen Änderungen an der Anlage oder deren Verlegung vorsehen, mit dem Ziel der Vermeidung überhöhter Belastungen der betroffenen Bevölkerung.

Ein erster Schritt einer ausgewogenen Risikokommunikation jenseits von Panikmache und Verharmlosung könnte eine Broschüre zur Aufklärung der Bevölkerung über tatsächliche und mögliche Gesundheitsrisiken im Zusammenhang mit niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern sein, wie sie beispielsweise vom Department of Engineering and Public Policy der Carnegie Mellon University in Pittsburgh herausgegeben wurden (MORGAN 1989, MORGAN 1992). Auch die US-amerikanische Umweltbehörde und das schwedische Strahlenschutzinstitut haben brauchbare Informationschriften zu dem Thema herausgegeben (EPA 1992). Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft der Schweiz lässt zur Zeit eine Informationsbroschüre für die Öffentlichkeit durch ein unabhängiges Institut erarbeiten (BUWAL 1997).

4.4.2 Produktkennzeichnung und Gütesiegel

Von Seiten des Verbraucherschutzes aber auch aus dem politischen Raum werden schon seit längerem Angaben der Hersteller zu den elektromagnetischen Emissionen von elektrischen Geräten gefordert (GRIEFAHN 1993, VZN 1996). Hierüber hinaus werden zur Zeit Vorschläge für Gütesiegel diskutiert, in Anlehnung an das Siegel 'strahlungsarm nach MPR II'. Voraussetzung für die Einführung eines solchen Gütesiegels ist natürlich die Festlegung der einzuhaltenden Standards und Prüfvorschriften. Die Standards nach MPR, TCO oder SSI für strahlungsarme Computerbildschirme basieren auf dem Stand der Technik und werden mit diesem fortentwickelt. Die Zertifizierung erfolgt auf freiwilliger Basis. Eine analoge Vorgehensweise bietet sich auch für andere elektrische Geräte an. Der Aufwand für die Zertifizierung normaler Elektrogeräte wäre allerdings deutlich geringer als bei Computermonitoren, da bei der Mehrzahl der Geräte lediglich mit netzfrequenten Feldern und ggf. Oberwellen zu rechnen ist, während Computermonitore elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder mit

Frequenzen vom Hz- bis in den MHz-Bereich emittieren und zusätzlich statische Felder und ionisierende Strahlung zu prüfen sind.

Die Einführung von Gütesiegeln wird nicht nur für den Bereich Elektrogeräte diskutiert, sondern es gibt auch Vorschläge z.B. von Seiten der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute, Wohnhäuser bei Einhaltung von Obergrenzen für die elektrische und magnetische Exposition durch die Elektroinstallation durch ein Zertifikat auszuzeichnen.

4.4.3 Empfehlungen für Änderungen des Nutzungsverhaltens

Da Möglichkeiten zur Verminderung der elektrischen und magnetischen Belastung durch Änderungen des Nutzungsverhaltens im Zusammenhang dieser Untersuchung von nachgeordneter Bedeutung sind, seien lediglich einige exemplarische Maßnahmen genannt:

- Bereits 1992 hat das Bundesgesundheitsamt in einer Pressemitteilung davor gewarnt, Zimmer für Kinder und Jugendliche in der Nähe der Hauptversorgungsleitungen in Wohnungen (Sicherungskasten) einzurichten.
- Ausreichende Abstände (0, l u T) sollten von Geräten gehalten werden, die im Dauerbetrieb oder in Dauerbereitschaft sind (elektrische Heizungen, elektrische Warmwasserbereiter, Radiowecker).
- Die Benutzung körpernah betriebener elektrischer Geräte sollte zeitlich begrenzt werden (elektrische Heizkissen und -decken).
- In Büroräumen kann die elektromagnetische Belastung durch Computer und Bildschirm durch geeignete Anordnung der Arbeitsplätze und Verlegung der Kabel deutlich verringert werden.

Sowohl für den häuslichen Bereich wie für Arbeitsplätze könnte die Zusammenstellung geeigneter Maßnahmen in einem Leitfaden, z.B. in Verbindung mit der o.a. Broschüre sinnvoll sein.

5 Technische und betriebliche Maßnahmen zur Minderung der elektrischen und magnetischen Exposition in der Umgebung von elektrischen Anlagen, Maschinen und Geräten

In diesem Kapitel sollen die zuvor angesprochenen Maßnahmen zur Expositions-minderung anhand von konkreten Beispielen dargestellt werden.

5.1 Höchst- und Hochspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 kV, 220 kV und 110 kV)

5.1.1 Abstandsvergrößerung, Mastkonstruktion

Da bei Freileitungen eine Abschirmung der Felder nur teilweise und mit größerem Aufwand möglich ist (siehe Abschnitt 5.1.4), ist hier das Abstandhalten die wirksamste und günstigste Methode der Expositions-minderung, bei der wegen der $1/R^2$ -Abhängigkeit schon relativ kleine Abstandsvergrößerungen viel bewirken können. Beispiele von Messergebnissen zeigt die Abbildung 5.1. Während in einer Entfernung von 41 Meter von der Mitte einer 380 kV-Freileitungstrasse noch eine magnetische Induktion von $1 \mu\text{T}$ gemessen wurde, sank diese auf $0,25 \mu\text{T}$ in 83 m und auf deutlich unter $0,2 \mu\text{T}$ in 100 m Abstand. Die entsprechenden Abstände zur Mitte der vermessenen 110 kV-Freileitung lauten 16 m (für $1 \mu\text{T}$), 34 m (für $0,25 \mu\text{T}$) und ab 40m sind $0,2 \mu\text{T}$ unterschritten. Bei dem vermessenen 110 kV-Erdkabel wurden $0,2 \mu\text{T}$ schon nach 5 m von der Mitte unterschritten (vgl. Abbildung 5.1) (NEITZKE et al. 1994, S. 334, 335).

Auch direkt unterhalb von Freileitungen können die Feldstärken durch Abstandsvergrößerung, d.h. in diesem Fall durch Masterrhöhung, deutlich verringert werden (vgl. Abbildung 5.7).

Tabelle 5.1
Feldreduktion durch Masterrhöhung (BAUHOFER 1993).

	Höhe der Leitenseile	Trassenmitte	Abstand zur Trassenmitte		
			10 m	30 m	50 m
elektrisches Feld	8 m	1340 V/m	590 V/m	81 V/m	45 V/m
	24 m	300 V/m	235 V/m	30 V/m	13 V/m
magnetische Induktion	8 m	$16,9 \mu\text{T}$	$11,3 \mu\text{T}$	$2,5 \mu\text{T}$	$1,1 \mu\text{T}$
	24 m	$3,5 \mu\text{T}$	$3,1 \mu\text{T}$	$1,7 \mu\text{T}$	$0,9 \mu\text{T}$

Wie die Zahlen der Tabelle zeigen, werden durch eine Masterrhöhung vor allem die Feldstärken direkt unter der Leitung verringert, weiter außerhalb macht sie sich nur noch geringfügig bemerkbar.

5.1.2 Leitungs- und Systemkonfiguration

Systemkonfiguration

Auch die Wahl der Spannungsebene für die „Übertragung einer bestimmten Leistung durch ein System hat einen entscheidenden Einfluss auf die Feldstärken. Wie die folgende Tabelle zeigt, wird bei gleicher übertragener Leistung die Reduktion der einen Feldstärke durch eine Erhöhung der anderen erkauft:

Tabelle 5.2

Übertragung von 69 MVA mit Einsystemfreileitungen (WSDH 1992).

Spannung (U); Strom (I)	Maximum unter dem System	2 m von Trassenmitte	61 m von Trassenmitte
(Maximalleistung 125 MW)	magnetische Induktion (B)		
115kV;600A	9,15 μ T	3,44 μ T	0,19 μ T
230 kV; 300 A	5,96 μ T	2,97 μ T	0,16 μ T
500 kV; 138 A	2,44 μ T	1,89 μ T	0,12 μ T
	elektrische Feldstärke (E)		
115kV;600A	1,0 kV/m	0,6 kV/m	0,01 kV/m
230 kV; 300 A	2,6 kV/m	1,9 kV/m	0,04 kV/m
500 kV; 138 A	5,5 kV/m	5,3 kV/m	0,1 kV/m

Dass die Feldstärken (B,E) sich nicht direkt proportional zu den Ursachen (I,U) verhalten, liegt daran, dass aus Sicherheitsgründen bei den höheren Spannungen die Abstände zwischen den Einzelleitern größer werden müssen, was die Kompensation zwischen den einzelnen Phasen verschlechtert.

Wenn Systeme verschiedener Spannungsebenen parallel verlaufen, lässt sich durch Wahl eines Kombinationsgestänges die elektrische Feldstärke innerhalb der Trasse der höheren Spannungsebene reduzieren. Z.B. kann die abschirmende Wirkung der Leiterseile eines untergespannten 110 kV-Systems die elektrische Feldstärke unter einer 380 kV-Leitung von 6 k V/m auf ca. 3 kV/m halbieren (BAUHOFER 1993).

Leitungskonfiguration

Die Wahl der Leitungskonfiguration, d.h. die geometrische Anordnung der drei oder mehr Einzelleiter eines Systems und/oder die Entscheidung für Freileitung oder Kabel hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Feldstärken.

Die folgende Tabelle führt die Feldstärkewerte für die Konfigurationen der Abbildung 5.2 a-g auf.

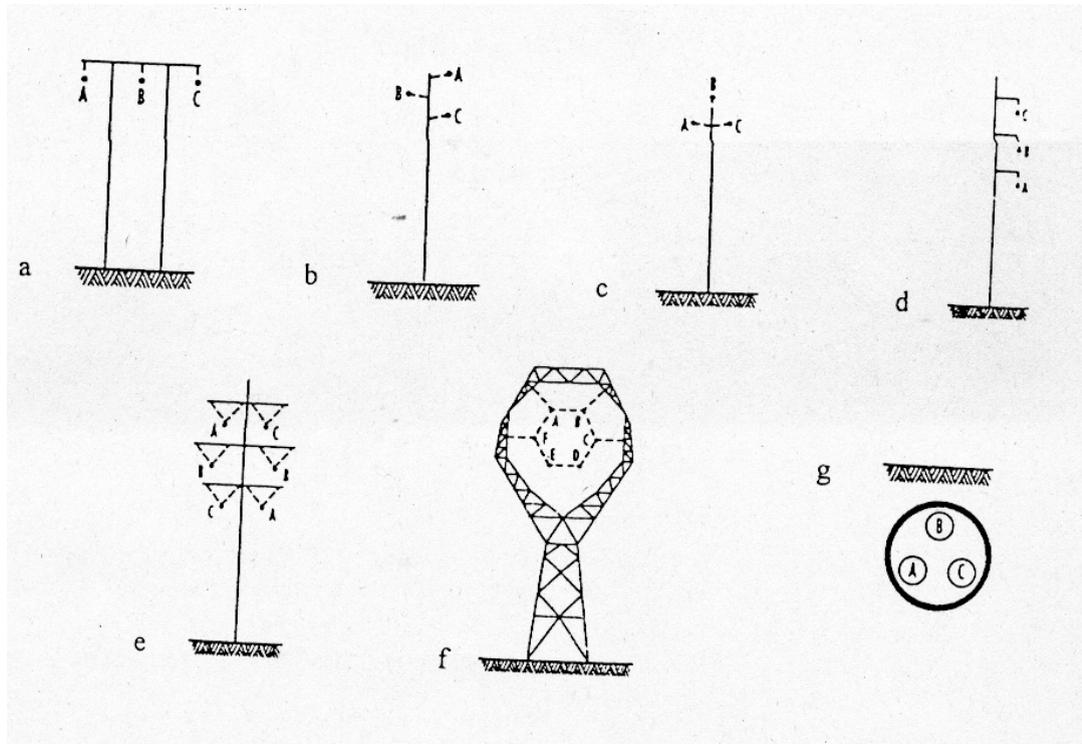


Abbildung 5.2

Leitungskonfigurationen mit a) - d), g) 300 A / Leiter und e), f) 150 A / Leiter

- a) Einebene,
- b) vertikale Dreiecksanordnung,
- c) horizontale Dreiecksanordnung,
- d) vertikale Einreihenfolge,
- e) Doppelsystem (split phase),
- f) Sechssystem (multi phase),
- g) Kabel (1,5 m tief), (g1: Stahlrohr, g2: nicht-magnetisches Rohr).

Tabelle 5.3
Feldstärken einiger 230 kV-Systeme (ausgelegt für 125 MV A, WSDH 1992).

vgl. Abb. 5.2	magnetische Induktion [μT]			elektrische Feldstärke [kV/m]		
	Maximum	Abstand von der Mitte		Maximum	Abstand von der Mitte	
	in der Trasse	6 m	61 m	in der Trasse	6 m	61 m
a	5,96	2,97	0,16	2,60	1,90	0,04
b	2,70	1,10	0,06	1,90	0,70	0,04
c	2,89	0,98	0,05	1,60	0,70	0,03
d	3,62	2,21	0,15	2,70	0,80	0,10
e	1,45	0,48	0,01	1,70	0,60	0,02
f	1,67	0,67	0,04	2,50	0,90	0,05
g1	0,49	0,02	0,001	0,00	0,00	0,00
g2	1,47	0,06	0,003	0,00	0,00	0,00

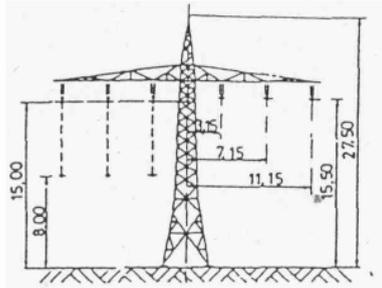
Die geringsten Feldstärken erzeugen die abgeschirmten Kabelsysteme. Für das elektrische Feld ist das trivial, da die Umhüllung und das über dem Kabel liegende Erdreich das elektrische Feld vollständig abschirmen. Aber auch die Magnetfeldexposition ist bei Erdkabeln gleicher Spannungsebene oft geringer, da durch die dichtere Anordnung der Einzelleiter die Kompensation am Aufpunkt besser ist. Vor allem ist die räumliche Ausdehnung des Gebietes mit erhöhter Exposition deutlich geringer als bei Freileitungen. Ein weiteres Beispiel für die Vorteile von Erdkabeln gegenüber Freileitungen findet sich bei GRAMER (1996), dort wird gezeigt, dass bei 138-kV-Doppelsystemen sowohl die Trassenbreite, als auch das maximale Magnetfeld und das Feld am Trassenrand für ein Kabelsystem (zwei Dreiecksanordnungen jeweils im Rohr) nur etwa ein Drittel der entsprechenden Werte für eine Freileitung (zwei senkrechte Phasenarrangierungen) beträgt. Zusätzlich kann bei Erdkabeln durch Rohre aus geeigneten Materialien auch das Magnetfeld abgeschirmt und am Aufpunkt erheblich reduziert werden (vgl. die Abschnitte 4.2.3, 5.1.4, 5.3).

Neben den Kabeln erzeugen die Systeme mit mehr als drei Einzelleitern die geringsten Feldstärken. Dabei ist das Doppelsystem (split phase) noch etwas günstiger als das 6-Phasen-System, vor allem in größerem Abstand zur Trasse. Von den konventionellen Konfigurationen erzeugen die Dreiecksanordnungen die geringsten Felder, da hier die Kompensation am günstigsten ist.

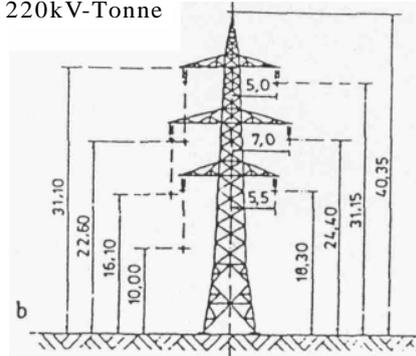
Weitere Rechnungen und Testmessungen zu verschiedenen mehrphasigen Leitungskonfigurationen bei unterschiedlichen Masthöhen werden in STEWART et al. (1993) beschrieben. Es zeigt sich, dass sowohl mehrphasige wie auch doppelsystemige Konfigurationen geringere magnetische Felder erzeugen als 'normale' dreiphasige Systeme. Welche der neuartigen Konfigurationen die günstigere darstellt, hängt von den Details ab, wie z.B. der Masthöhe, der zu übertragenen Last oder der kritischen Aufpunktentfernung (unter der Leitung oder in größerem Abstand zur Trasse).

Rechnerisch konnte gezeigt werden, dass auch bei Hochspannungsleitungen eine Verdrillung der drei Phasenleiter alle 40 m das Maximum der magnetischen Induktion unterhalb der Leitung von über 4 μT auf ca. 2 μT halbiert und dass sich der Abstand, ab dem 0,5 μT unterschritten werden, von gut 55 m auf ca. 30 (± 10) m verkleinert (KEGEL 1997).

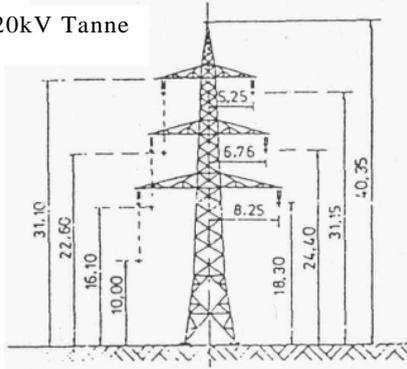
110kV-Einebene



220kV-Tonne



220kV Tanne



380kV-Donau

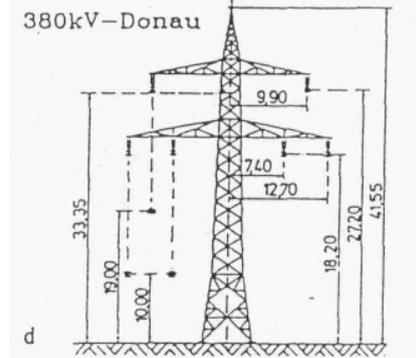


Abbildung 5.3

Die wichtigsten Mastbilder mit den geometrischen Angaben für jeweils eine Spannungsebene

- a) Einebene, b) Tonne, c) Tanne, d) Donau
(BAUMHOFER 1993).

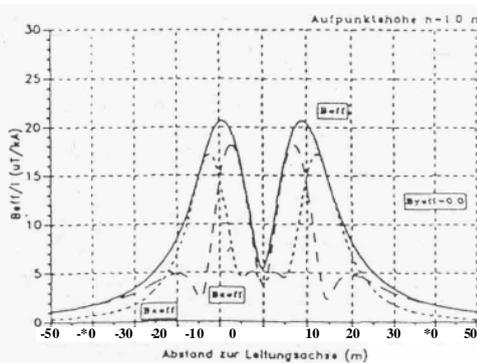
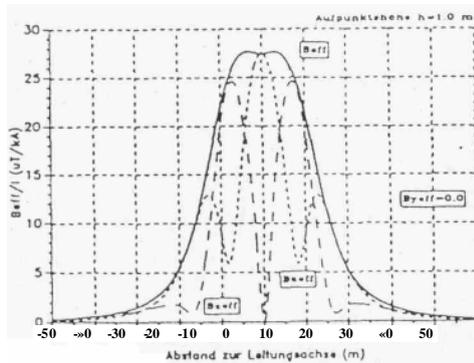
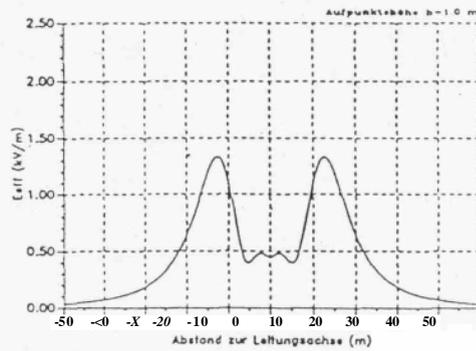
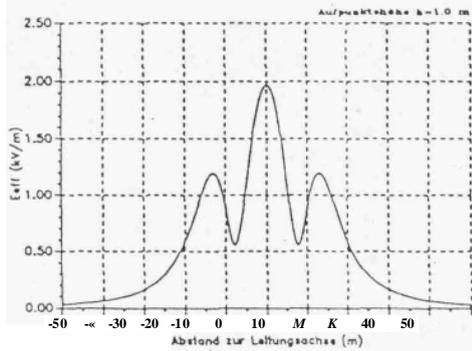


Abbildung 5.4

Querprofile (oben) des elektrischen Feldes und (unten) der magnetischen Induktion für die Einebenenanordnung einer 110-kV-Leitung der Phasenkonfigurationen jeweils links: RST -- T¹S¹R' rechts: RST -l- R' S' T'
(BAUHOFER 1993).

5.1.3 Mastbilder und Phasenkonfiguration

Wenn zwei Systeme auf einem Gestänge angebracht sind, hängen die Feldstärken nicht nur von der Leitungskonfiguration der Systeme ab, die das Mastbild bestimmen, sondern auch von der relativen Anordnung der Phasen zwischen beiden Systemen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dem Parallelbetrieb von zwei galvanisch gekoppelten Systemen, zwischen denen eine feste Phasendifferenz (im Normalfall gleich Null) herrscht, und dem Betrieb zweier völlig unabhängiger Systeme, die von getrennten Kraftwerken gespeist werden und deren Phasenbeziehung zufällig ist.

Phasengekoppelter Parallelbetrieb

Es soll zunächst der Parallelbetrieb von zwei phasengekoppelten Systemen behandelt werden, der (bei Phasendifferenz Null und gleichen Strömen auf beiden Systemen) im Prinzip der Doppelsystemkonfiguration (split phase) entspricht. Im normalen Doppelbetrieb werden zwei Systeme gleicher Konfiguration - mit einer nicht allgemein feststehenden relativen Phasenlage - nebeneinander her geführt. Bei 'split phase' handelt es sich um ein System, bei dem die sechs Leitungen (meist) im Sechseck angeordnet sind, wobei die jeweils gleichen Phasen sich gegenüber liegen.

Die wichtigsten Mastbilder sind in der Abbildung 5.3 wiedergegeben.

Welche relative Phasenkonfiguration bei gegebenem Mastbild die günstigste ist, hängt im Allgemeinen von der Position des Aufpunktes ab. Die jeweils günstigste Konfiguration ist diejenige, bei der die mittleren Abstände der korrespondierenden Phasen von beiden Systemen zum Aufpunkt für alle drei Phasen möglichst gleich sind.

Am deutlichsten wird dies für die Einebenenordnung (vgl. Abbildung 5.4): Für einen Aufpunkt in Trassenmitte ergibt sich die geringste Feldstärke bei einer Phasenordnung [R S T -| R' S' T'] und die höchste bei [R S T -| T' S' R'], weil im ersten Fall die gemittelten Abstände zu den Leitern A und A' für alle drei Phasen in etwa gleich sind, während im zweiten Fall der Abstand zur Phase R/R' deutlich größer ist als zu S/S', dessen Abstand ist nochmals größer als der zu T/T'. Für Aufpunkte außerhalb der Trassenbreite sind die Abstand sbeziehungen genau umgekehrt und dort liefert die Anordnung [R S T -| R' S¹ T'] jetzt deutlich größere Feldstärken als [R S T -| T¹ S' R'].

Tabelle 5.4
relative Phasenordnung und magnetische Induktion (BAUHOFER 1993).

1 10 k V, Einebene	magnetische Induktion in [μT/kA]		
	Trassenmitte	Maximum (~... m zur Mitte)	50 m zur Mitte
R S T - P S' R'	27	28 (bei ~ 5 m)	0,3
R S T - R S ¹ T'	5	21 (bei ~ 10 m)	1,1

Bei BAUHOFER (1993) finden sich Querprofile für alle gängigen Mastbilder der drei Spannungsebenen (110 kV, 220 kV und 380 kV) und alle möglichen Phasenkonfigurationen sowohl für das elektrische Feld als auch für die magnetische Induktion. Das minimale Magnetfeld unterhalb der Leitung ergibt die Anordnung [RST -| STR] für das Mastbild Donau..

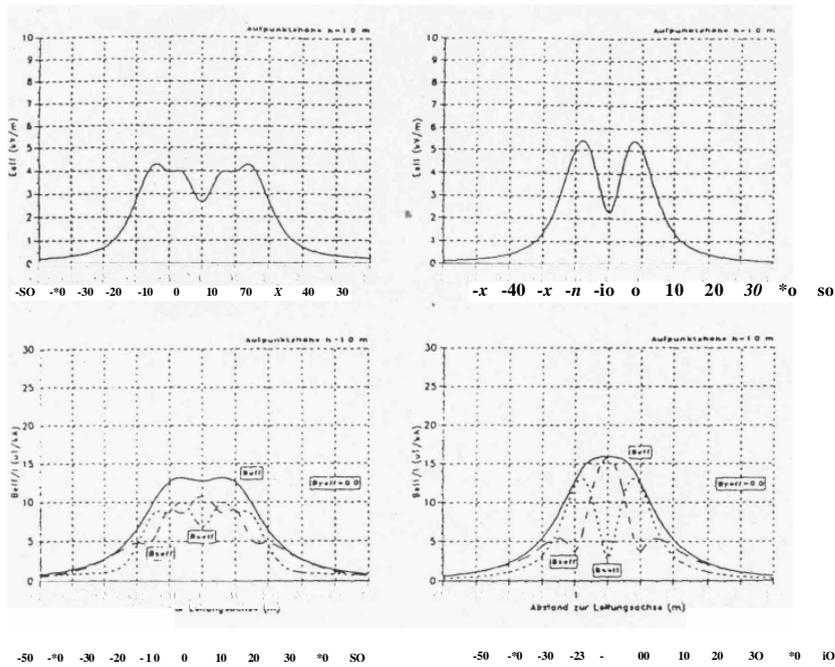


Abbildung. 5.5

Querprofile (oben) des elektrischen Feldes und (unten) der magnetischen Induktion für ausgewählte Mastbilder (links: Donau, rechts: Tonne) und Phasenkonfigurationen [RST - | - STR] bzw. [RST - | - STR] einer 380 kV-Leitung (BAUHOFER 1993).

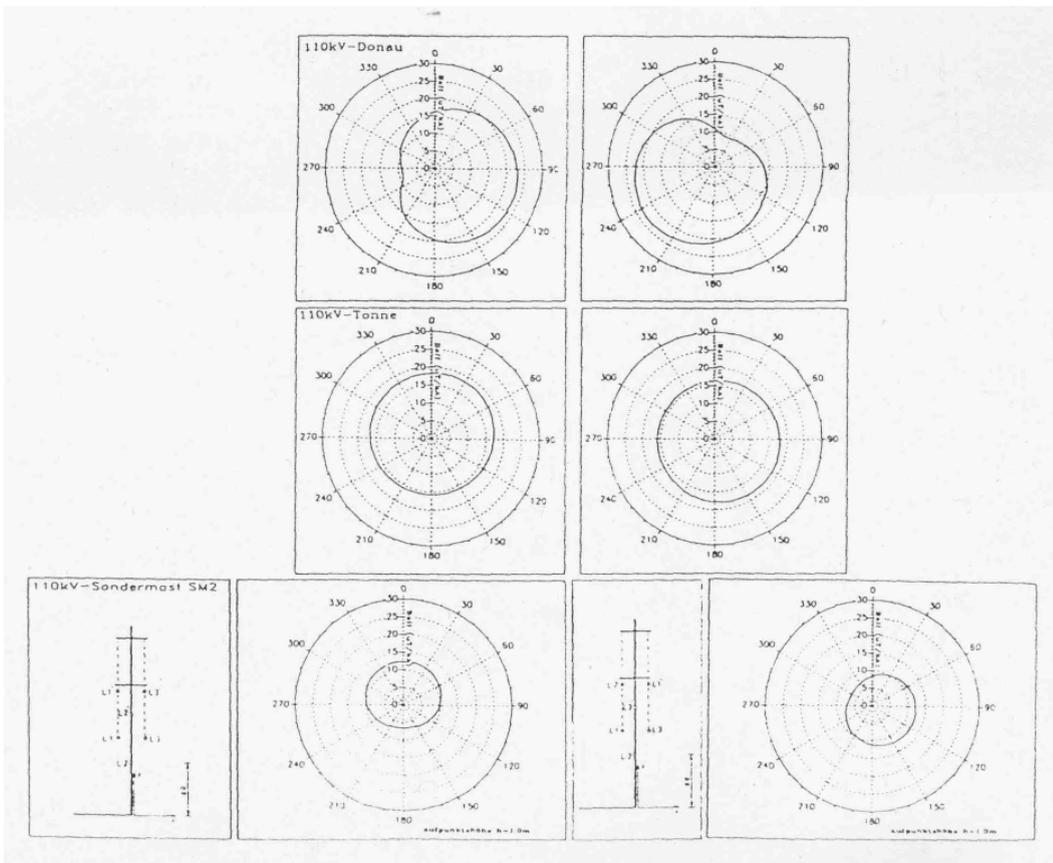


Abbildung 5.6

Änderung der maximalen magnetischen Induktion unter einer 110 kV-Leitung bei Variation der Phasendifferenz zwischen den beiden Systemen für die Mastbilder (oben) Donau, (mitte) Tonne, jeweils für die Phasenarrangierungen [RST - | - STR], [STR - | - RST] bzw. [RST - | - STR], [RST - | - RST] und (unten) für einen Sondermast (SM2) (BAUHOFER 1993)

Außerhalb der Trassenbreite liefert die analoge Phasenordnung im Mastbild Tonne $[R_S^T - |^S_T R']$ die kleinste magnetische Induktion (vgl. Abbildung 5.5). Mit dieser Phasenordnung und gleichen Stromstärken in beiden Systemen entspricht das Mastbild Tonne in etwa dem Sechseck der Doppelsystemkonfiguration (split phase).

Längsgetrennte, phasenkoppelte Systemführung

Im allgemeinen Fall der Parallelführung von zwei längsgetrenten Systemen mit unterschiedlichen Bezugskraftwerken ist die Phasenbeziehung zwischen den beiden Systemen zufällig. Für unterschiedliche Phasendifferenzen ergeben sich bei sonst gleichen Bedingungen unterschiedliche Feldstärken. BAUHOFER (1993) berechnete die Änderung der maximalen Induktion unter der Leitung mit der Variation der Phasendifferenz zwischen den Systemen. Dies führt dazu, dass die Konfiguration, die für die Phasendifferenz Null die geringste magnetische Induktion ergibt, bei einer anderen Differenz größere Felder liefert als die vorher ungünstigeren Konfigurationen. Bei Phasendifferenzen von 120° (und 240°) zwischen den Systemen entspricht eine Phasenordnung der entsprechend gedrehten Anordnung bei einer Differenz von Null. Die Abbildung 5.6 soll dies verdeutlichen. Bis auf geringe Unterschiede durch den relativen Drehsinn der Phasenordnungen verschwinden die Unterschiede in den erzeugten Feldstärken bei Mitteilung über alle möglichen Phasendifferenzen.

BAUHOFER (1993) behandelt noch einige Sondermastbilder. Es zeigt sich, dass für die meisten Betriebszustände der Sondermast SM2, eine Leiteranordnung mit zwei übereinander angebrachten Dreiecken (beide mit der Spitze nach unten, siehe Abbildung 5.6), am günstigsten abschneidet. Ähnlich geringe Feldstärken erzeugt der Sondermast SM4, eine ähnliche Anordnung bei der die Spitze des oberen Dreiecks nach oben weist, was für eine bestimmte relative Phasenlage einem auf einer Ecke stehenden Doppelsystem (split phase) entspricht. Beim Neubau von Freileitungen können die später im Betrieb erzeugten Magnetfelder durch den Einsatz von solchen feldoptimierten Mastbildern (zumindest unter den Leitungen) im Vergleich zu konventionellen Mastbildern deutlich reduziert werden. Welches Mastbild und welche Phasenordnung für einen Einzelfall am günstigsten ist, hängt davon ab, ob die Magnetfelder unter der Leitung oder abseits der Trasse von besonderem Interesse sind und welche Phasendifferenz zwischen den beiden Systemen im Betrieb zu erwarten ist.

Asymmetrischer Betrieb

Wenn durch die Art der Verbraucher die Stromsumme der drei Phasen eines Systems nicht mehr Null ergibt, muss ein zusätzlicher Rückstrom auf anderem Wege (durch das Blitzschutzseil oder durch den Erdboden) dieses ausgleichen. Da dieser Rückstrom meist in größerem Abstand von den Phasenseilen fließt, verschlechtert sich die Kompensation am Aufpunkt und die Feldstärken nehmen zu (vgl. Tabelle 5.5).

Bei STEWART et al. (1993) wird gezeigt, dass auch bei mehrphasigen Konfigurationen weiter außerhalb der Trasse die Magnetfeldstärke von den Asymmetrien dominiert wird.

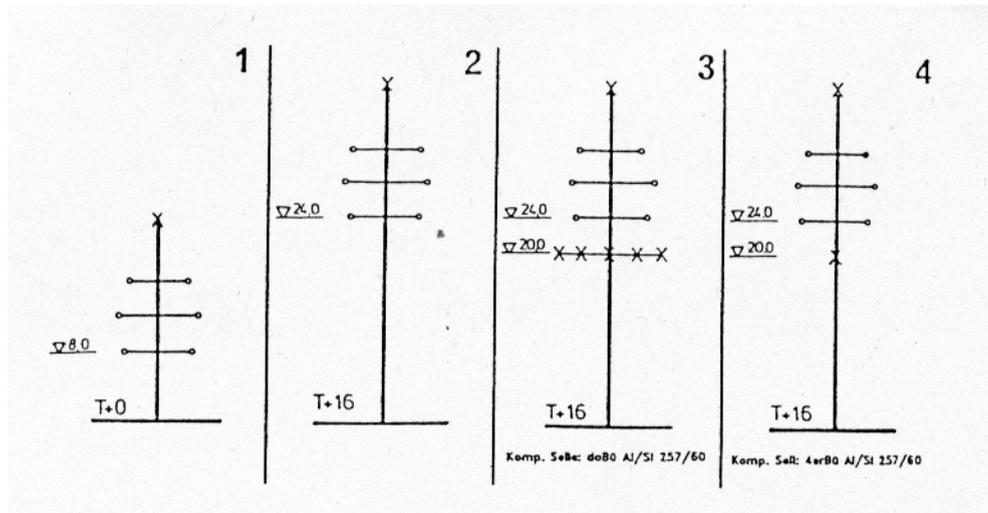


Abbildung 5.7a
Schirmwirkung von Kompensationsseilen, Masthöhe und Anordnung

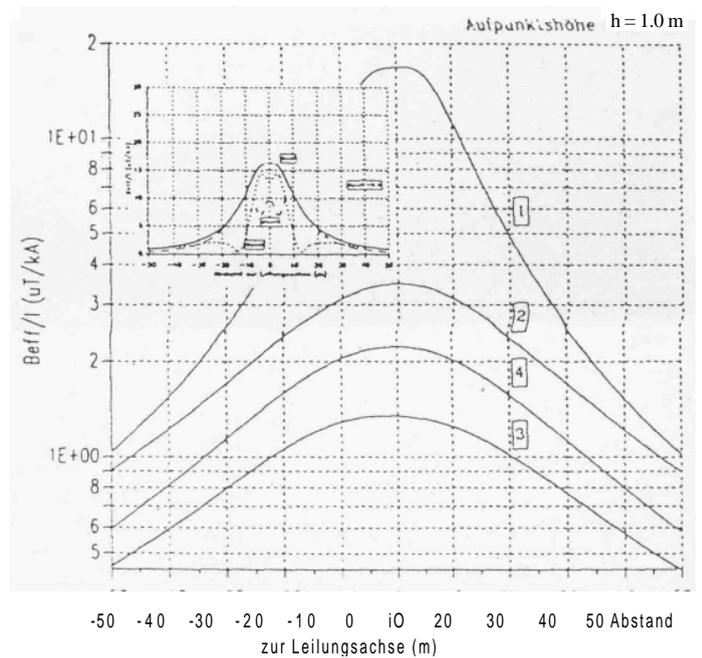
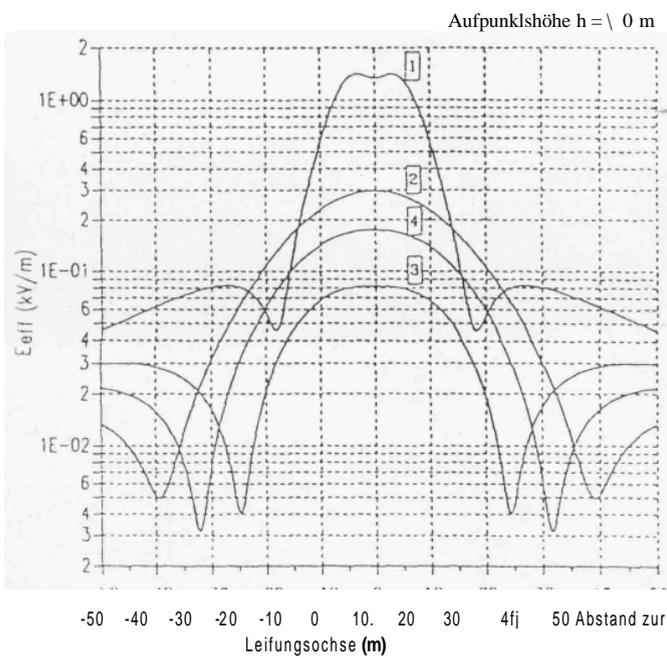


Abbildung 5.7 b, c
Querprofile (b, links) der elektrischen Feldstärke und (c, rechts) der magnetischen Induktion einer 110 kV-Freileitung für verschiedene Masthöhen und mit zusätzlichen Kompensationsseilen (BAUHOFER 1993).

5.1.4 Abschirmung

Zusatzleiter

Auch wenn sich Hochspannungsleitungen nicht vollständig abschirmen lassen, können durch das Aufhängen von zusätzlichen Erdseilen unter die Systemleitungen die Feldstärken signifikant reduziert werden. Mit der Zahl solcher Kompensationsseile steigt natürlich die Abschirmwirkung. Bei BAUHOFER (1993) wird gezeigt, dass (abhängig von der Phasenkonfiguration) schon mit ein oder zwei zusätzlichen Erdseilen eine deutliche Feldreduzierung um ca. ein Drittel erzielt werden kann (vgl. Abbildungen 5.7 a, b, c).

Auch bei Erdkabeln lässt sich die Magnetfeldexposition durch zusätzliche Erdleiter reduzieren. Von BRAKELMANN (1996) wurden mehrere verschiedene Kombinationen von bis zu drei Kompensationsleitern für jede Kabelader in einer Einebenenordnung untersucht und die Rechnungen mit Messungen verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch die zusätzlichen Kompensationsleiter die magnetische Induktion auf unter 10 % der ursprünglichen Werte ohne Kompensationsleiter gesenkt werden kann: von 90,0 μT auf 8,1 μT , bei 12 Kompensationsleitern. Allerdings wird in den zusätzlichen Leitern eine Verlustleistung von fast 60 W/m verbraucht. Aber auch mit nur fünf Kompensationsleitern konnte die magnetische Induktion auf 18,9 μT (~ 21 %) gesenkt werden. In diesem Fall lag die Verlustleistung bei 22,5 W/m. Es ist leicht möglich, die Expositionsreduzierung durch Kompensationsleiter auf empfindliche Trassenabschnitte zu beschränken und so die Erzeugung der zusätzlichen Verluste zu begrenzen.

Ummantelung der Erdkabel

Bei Erdkabeln kann auch durch das Material der Mantelrohre nicht nur das elektrische Feld, sondern auch das magnetische zum Teil abgeschirmt werden. Weiter oben in Tabelle 5.1 wurden als Beispiele zwei Kabelsysteme mit unterschiedlichen Rohren aufgeführt. Dabei *reduziert* das Stahlrohr das Magnetfeld gegenüber dem nichtmagnetischen Rohr auf etwas ein Drittel. Es gibt mehrere Untersuchungen zu den magnetischen Abschirmwirkungen von verschiedenen Metallrohren (vor allem für die Gebäudeversorgungsleitungen der Niederspannungsebene), in denen gezeigt wird, dass eine Reduktion des Magnetfeldes von mehr als 90 % möglich ist (vgl. Abschnitt 5.3).

5.1.5 Aktive Kompensation

KEGEL (1997 und private Mitteilung) hat rechnerisch nachgewiesen, dass es möglich sein sollte, durch eine aktive Drei-Draht-Kompensation die magnetische Induktion (von maximal 11 μT bei einem Strom von 600 A) über die gesamte Trassenfläche einer 110-kV-Freileitung aufwerte unter 0,22 μT zu reduzieren. Welches die günstigsten Konfigurationen sind und wie dies realisiert werden könnte, ist zur Zeit noch Gegenstand der Forschung.

Elektronische Systeme, die es erlauben, auch für größere Räume durch aktive Kompensation das Magnetfeld deutlich zu verringern, werden zur Zeit entwickelt. Rechnerisch konnte gezeigt werden, dass in einem Raum von bis zu 25.000 m^3 die magnetische Induktion auf Werte um 0,2 μT und darunter gesenkt werden kann. Dazu ist allerdings eine Kompensationsleistung von 250-600 Watt nötig (DUNNAM et al. 1995).

5.2 Mittelspannungsleitungen
(Nennspannungen: 30 kV, 20 kV, 10 kV und 6 kV)

Auf der Mittelspannungsebene gibt es prinzipiell die gleichen Möglichkeiten der Feldreduktion wie auf der Hochspannungsebene. Insbesondere ist hier der Einsatz von Erdkabeln mit allen seinen Feldreduktionspotentialen zu nennen: die gute Feldkompensation durch dichte Führung der drei Einzelleiter, die Möglichkeit der abschirmenden Wirkung von Rohrmaterial und der Einsatz von Kompensationsleitern.

Ein zusätzliches Erdseil kann auch den u.U. auftretenden Ausgleichsrückstrom in unmittelbarer Nähe zu den Phasenleitern führen, wodurch die gegenseitige Kompensationswirkung nicht so stark verringert wird. Solche durch asymmetrischen Betrieb verursachten Rückströme treten im Mittelspannungsnetz durch ungleiche Last an den einzelnen Phasen häufiger auf als im Hoch- und Höchstspannungsnetz.

Die folgende Tabelle zeigt die mögliche Größe dieses Effektes.

Tabelle 5.5
 Auswirkung von Stromasymmetrien und von Erdrückströmen auf die magnetische Induktion einer Verteilungsleitung (12,5 kV, 6,5 MW, 12 m Masthöhe und 3 m Mastarmbreite), die Variation der Phasenbeziehungen wird zu $\pm 5\%$ angenommen (WSDH 1992).

Asymmetrie in der Stromstärke in %	Rückstrom davon in der Erde in %	magnetische Induktion - Mittelwert und Variation (5% / 95%)			
		Trassenmitte	6 m	12 m	30 m
0,00	0,00	2,23 \pm 0,08 μ T	1,44 \pm 0,05 μ T	0,69 \pm 0,02 μ T	0,14 \pm 0,01 μ T
0,00	50,00	2,22 \pm 0,08 μ T	1,45 \pm 0,17 μ T	0,70 \pm 0,16 μ T	0,16 \pm 0,08 μ T
10,00	0,00	2,25 \pm 0,17 μ T	1,44 \pm 0,11 μ T	0,69 \pm 0,05 μ T	0,15 \pm 0,01 μ T
10,00	50,00	2,24 \pm 0,16 μ T	1,48 \pm 0,29 μ T	0,70 \pm 0,28 μ T	0,19 \pm 0,12 μ T
20,00	0,00	2,25 \pm 0,31 μ T	1,45 \pm 0,21 μ T	0,69 \pm 0,09 μ T	0,16 \pm 0,03 μ T
20,00	50,00	2,24 \pm 0,31 μ T	1,52 \pm 0,49 μ T	0,77 \pm 0,42 μ T	0,24 \pm 0,16 μ T

5.3 Niederspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 kV, 220 kV und 110 kV)

Bei der Planung und Ausführung von Hausanschlussleitungen und von Elektroanlagen in oder an Gebäuden sowie bei der Nutzungsplanung in Gebäuden sollten Dauerbelastungen der Bewohner und Nutzer durch geeignete Standorte von emittierenden Anlagen, durch emissionsmindernde Installationsmaterialien und Leitungsführungen auf die im Abschnitt 4.1.3 genannten Vorsorgewerte begrenzt werden. Als besonderes Problem stellen sich vielfach Transformatoranlagen in Gebäuden heraus, wobei die Hauptbelastung meist von den Leitungen der Niederspannungsseite ausgeht.

5.3.1 Gebäudeanschlussleitungen

Da Erdkabel praktisch keine elektrischen und bei geeigneter Bauweise (s. Abschnitt 5.1) deutlich geringere magnetische Felder erzeugen als elektrische Leitungen, die als Freileitungen über Masten oder Dachständer geführt werden, können die Belastungen durch elektrische und magnetische Felder sowohl im Freien wie in den Häusern, durch den Übergang von Freileitungen auf Erdkabel deutlich reduziert werden.

5.3.2 Elektroinstallationen in Gebäuden

Belastungen durch niederfrequente Magnetfelder können bereits bei der Gebäude- und Elektroinstallationsplanung weitestgehend vermieden werden, wenn die folgenden Empfehlungen beachtet werden:

- Elektrische Leitungen und Geräte sollten um so weiter von Wohn- und Arbeitsbereichen entfernt sein, je mehr Aufenthaltszeit darin zu erwarten ist und je größer bei den einzelnen Leitungen die jeweilige Stromlast ist.
- Elektrische Leitungen, die hohe Ströme führen, sollten nicht in den Wänden von Räumen verlegt werden, in denen sich auf Dauer Personen aufhalten (Kinderzimmer, Schlafzimmer, Wohnzimmer, Büros). Es ist insbesondere für einen ausreichenden Abstand zwischen diesen Räumen und den Hausanschlussleitungen nebst den Sicherungsanlagen zu achten.
- Bei Neuanlagen lassen sich in der Regel für jedes Zimmer getrennt meist verhältnismäßig leicht besondere Installationswände festlegen, an denen alle erforderlichen elektrischen Leitungen des Raumes verlegt sind. Die jeweils verbleibenden Wände können dann frei von jeglichen Elektroinstallationen gehalten werden. Bei benachbarten Räumen sollten dabei möglichst gemeinsame Wände als Installationswände dienen.
- Hin- und Rückstrom, die in derselben Leitung (mit verdrehten Adern) oder im selben Kabel fließen, ergeben ein reduziertes Magnetfeld.
- Transformatoren sollten in Gebäuden, die für Wohnzwecke genutzt werden oder in denen sich Dauerarbeitsplätze befinden, nicht eingebaut werden. Wo dies zwingend notwendig ist, sollte dafür Sorge getragen werden, dass die an den Transformatorraum anschließenden Räume nur als Lagerräume oder für kurzfristige Aufenthalte genutzt werden. Besonderes Augenmerk ist auch auf die Führung der von der Niederspannungsseite des Transformators abgehenden Versorgungsleitungen zu richten.
- Elektrische Leitungen sollten auf möglichst kurzen Wegen verlegt werden (sternförmige statt ringförmiger Anschlussleitungen).
- Der wesentliche Nachteil der allgemein verwendeten Schutzkontakt-Steckvorrichtung besteht darin, dass eine Unverwechselbarkeit der den Betriebsstrom führenden Leiter nicht gegeben ist. Da die meisten elektrischen Geräte und Maschinen mit ortsveränderlichen

Anschlussleitungen nur einpolig geschaltet werden, ergeben sich im ausgeschalteten Zustand Unterschiede in der Ausbreitung des elektrischen Feldes, je nachdem ob die geschaltete Ader der Leitung mit dem Phasen- oder dem Null-Leiter der Steckdose verbunden ist. Abhilfe könnte hier eine "genormte" Montage aller Schutzkontaktsteckdosen in waagerechter Lage der Buchsen und der generelle Anschluss des gegen Erde Spannung führenden Phasenleiters z.B. an die linke Buchse der Schutzkontaktsteckdose in Verbindung mit einer Markierung der Stecker bringen.

- Bei der Verwendung von Geräten und Betriebsmitteln, die mit Niederspannung betrieben werden, z.B. im Bereich der Beleuchtung, ist zu beachten, dass durch die Herabsetzung der Spannung zwar die elektrischen Felder reduziert werden, der elektrische Strom bei gleicher Leistung jedoch entsprechend steigt, und mit ihm das Magnetfeld.

Für die Abschirmung elektrischer Felder stehen eine größere Zahl geschirmter mehradriger Leitungen zur Verfügung, sowohl für die Festinstallation wie für den beweglichen Anschluss leichter Elektrogeräte. Auch Installationsdosen, wie Schalterdosen für die Unterputz- oder Hohlwandmontage und Abzweigkästen, mit einer elektrisch leitfähigen Beschichtung (z.B. Graphit) werden angeboten. Über einen gesonderten Erdungsanschluss (ggf. einen zweiten für den Deckel) wird das Gehäuse mit den Abschirmungen der ankommenden und abgehenden Leitungen verbunden.

Richtig angeordnete und geerdete Abschirmungen können zwar elektrische Felder vollständig unterdrücken, gegen niederfrequente magnetische Felder sind sie aber praktisch wirkungslos. Bei den für normale Elektroinstallationen möglichen Kabel- und Materialstärken gilt dies auch wenn als Abschirmungen Materialien hoher Permeabilität (Stahlgeflechte) eingesetzt werden. Allerdings ergibt sich bei Rundleitungen, wie sie bei der feldarmen Elektroinstallation in der Regel eingesetzt werden, eine gewisse Kompensationswirkung beim Magnetfeld verglichen mit den üblicherweise verwendeten Unterputz- Stegleitungen. Wenn mehr Platz zur Verfügung steht, ist eine weitergehende Abschirmung magnetischer Felder möglich, indem elektrische Leitungen beispielsweise in Kabelkanälen aus (Transformator-) Stahl verlegt werden (MAJOR und MARCH 1993).

Da die im Haushalt üblicherweise verwendeten Elektrogeräte in der Regel keine Abschirmung besitzen, ist mit abgeschirmten Leitungen auch bezüglich des elektrischen Feldes immer nur eine begrenzte Wirkung zu erzielen. Leitungsabschirmungen sind aber immerhin bei allen Vorrichtungen wirksam, die ständig unter Spannung stehen, aber häufig keinen Strom führen, wie z.B. Steckdosen-Stromkreise und Teile von Lichtstromkreisen, wenn die Leuchten nicht eingeschaltet sind.

Als besondere Schutzmaßnahme gegen elektrische Felder, z.B. für elektrosensible Personen, können u. U. Netzfreischalter sinnvoll sein (s. hierzu z.B. KÖNIG und FOLKERTS 1992, S. 126ff).

5.4 Umspannwerke und Transformatorenstationen

Die elektrischen Felder von Transformatoren spielen nur eine nachgeordnete Rolle, da sie durch die Transformatorgehäuse und Gebäudewände in der Regel hinreichend abgeschirmt werden. Bei Umspannwerken kann eine zusätzliche Abschirmung durch geerdete Metallgitter oder durch eine Bepflanzung an der Grundstücksgrenze erreicht werden. Mögliche Maßnahmen zum Schutz vor Magnetfeldern aus Transformatoranlagen können von einer

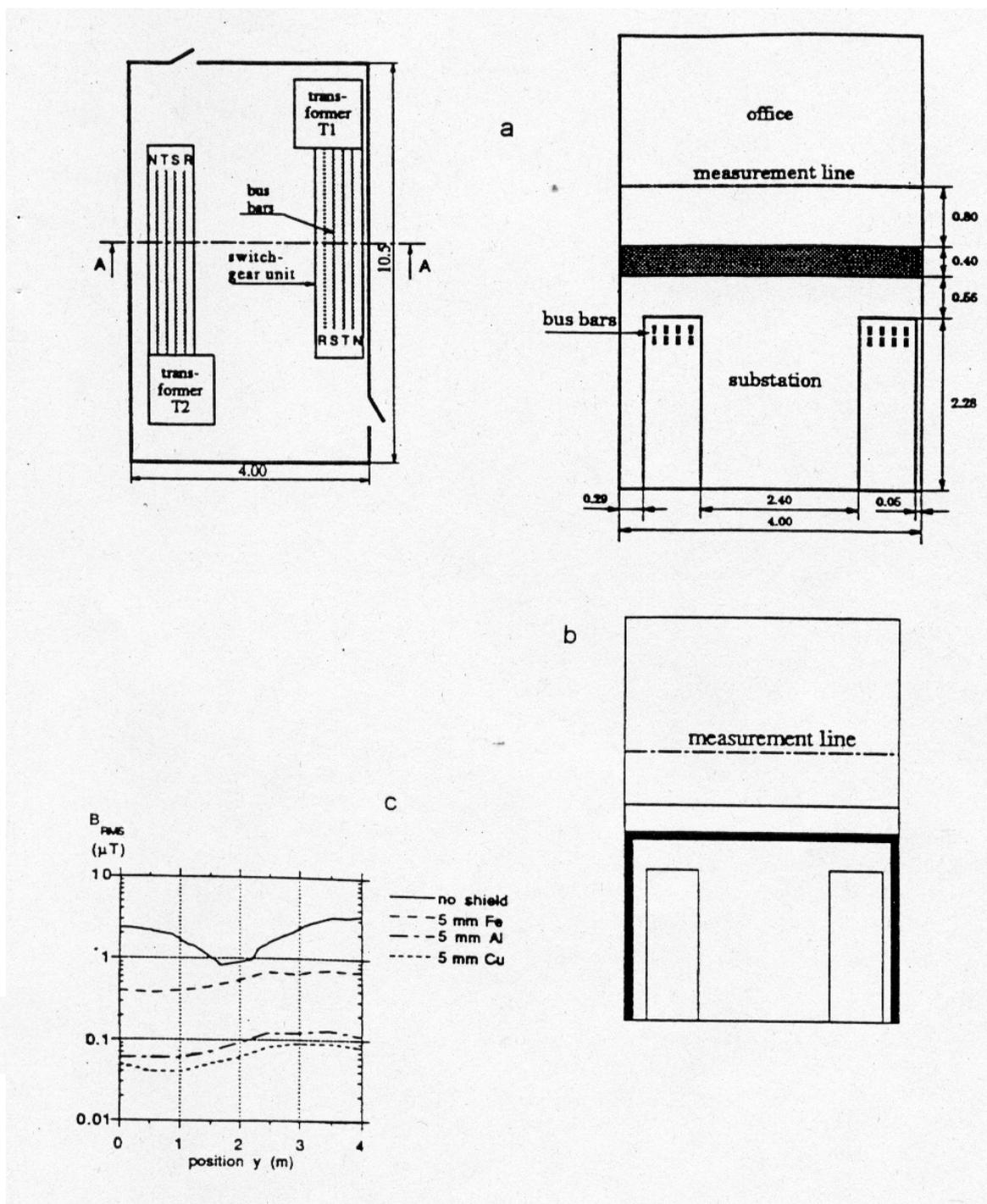


Abbildung 5.8

Abschirmung der Magnetfelder einer Transformatoranlage (2 Transformatoren 10/0,4 kV 800 kVA) (HASSELGREN 1993).

a) Draufsicht und Seitenansicht der Anlage (Abmessungen in m).

b) Geometrie der Abschirmung.

c) Berechnete magnetische Flussdichte B^{\wedge} entlang der Vermessungslinie (0,8 m über dem Fußboden des darüberliegenden Stockwerks) für drei verschiedene Abschirmmaterialien der Dicke 5 mm: Eisen (Fe), Aluminium (Al) und Kupfer (Cu)

Neuverlegung der Leitungen, insbesondere im Bereich der Sammelschiene, mit dem Ziel der Minimierung der Magnetfelder (s. Abschnitt 4.2.2), über den Einbau von Schutzschilden aus abschirmenden Materialien (s. Abschnitt 4.2.3) bis hin zur Auslagerung bzw. einer Verlegung der Transformatoren reichen.

Die einfachste und kostengünstigste Maßnahme zum Schutz vor den direkt vom Transformator ausgehenden Feldern ist die Einhaltung eines ausreichenden Sicherheitsabstandes, da das Feld mit der dritten Potenz des Abstandes abnimmt. Da es sich bei Transformatoren um relativ kompakte Quellen magnetischer Felder handelt, ist auch eine Abschirmung durch ferromagnetische Materialien, wie Eisen, oder Materialien hoher elektrischer Leitfähigkeit, wie Aluminium und Kupfer, prinzipiell möglich (s. Abschnitt 4.2.3). Ein Beispiel für die Wirksamkeit eines Abschirmschildes ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine Anlage mit zwei Dreiphasen-Transformatoren (10/0,4 kV, 800 kVA). Abbildung 5.8c zeigt, dass mit der Kupferabschirmung in diesem Fall die stärkste Verminderung des magnetischen Feldes in dem Stockwerk oberhalb der Anlage erreicht wird.

Die Felder in der Umgebung der Sammelschiene nehmen nur quadratisch mit dem Abstand ab, so dass hier meist zusätzliche Maßnahmen, wie eine geeignete Leitungsführung zur Unterstützung der wechselseitigen Kompensation verschiedener Beiträge zum Magnetfeld oder die Anbringung von Abschirmhauben, notwendig werden. In Abbildung 5.9 sind die prinzipielle Ausführung einer Abschirmung im Bereich der Sammelschiene und die Abschirmwirksamkeit dargestellt.

Konstruktive, insbesondere nachträgliche Dämpfungsmaßnahmen, wie die gebündelte Verlegung von Unterspannungsableitungen oder die Anwendung von Abschirmhauben, erweisen sich allerdings meist als sehr aufwendig und verlangen intensive Untersuchungen. Zudem ist es schwierig alle zu- und abgehenden Leitungen in die Maßnahmen einzubeziehen. Deshalb sollte von vorneherein auf die Installation von Transformatoren in oder unmittelbar an Gebäuden für empfindliche Nutzungen verzichtet werden. In Schweden ist es seit 1991 generell untersagt, Transformatoren in Gebäude einzubauen, in denen sich auf Dauer Menschen aufhalten (ANGER 1992, 1993 a,b).

5.5 Elektrische Geräte und Maschinen

Bei der Konstruktion von elektrischen Geräten, Maschinen und Anlagen sollte, solange es hinreichende gesetzliche Vorsorgegrenzwerte nicht gibt, eine Strategie verfolgt werden, wie sie sich bei der Verminderung der Belastung durch elektromagnetische Felder und ionisierende Strahlung von Computermonitoren ('strahlungsarme' Monitore) bewährt hat, nämlich die Orientierung an dem, was an Emissionsminderung nach dem Stand der Technik unter Beachtung wirtschaftlicher Gesichtspunkte möglich ist. Wie das Beispiel der strahlungsarmen Monitore und der Unternehmen, die solche Monitore als erste anboten, zeigt, kann eine solche Strategie erhebliche wirtschaftliche Vorteile haben.

Vereinzelte Untersuchungen von Elektrohaushaltsgeräten und elektrischen Spielzeugen zeigen, dass es konstruktions- und materialbedingt erhebliche Unterschiede zwischen den Emissionen gleichartiger Geräte verschiedener Hersteller oder Bautypen gibt (NEITZKE und VO-IGT 1995, 1996). Der technische Aufwand und die Materialkosten zur Reduzierung der elektromagnetischen Emissionen sind zumeist gering. Einfache aber wirkungsvolle Maßnahmen wären:

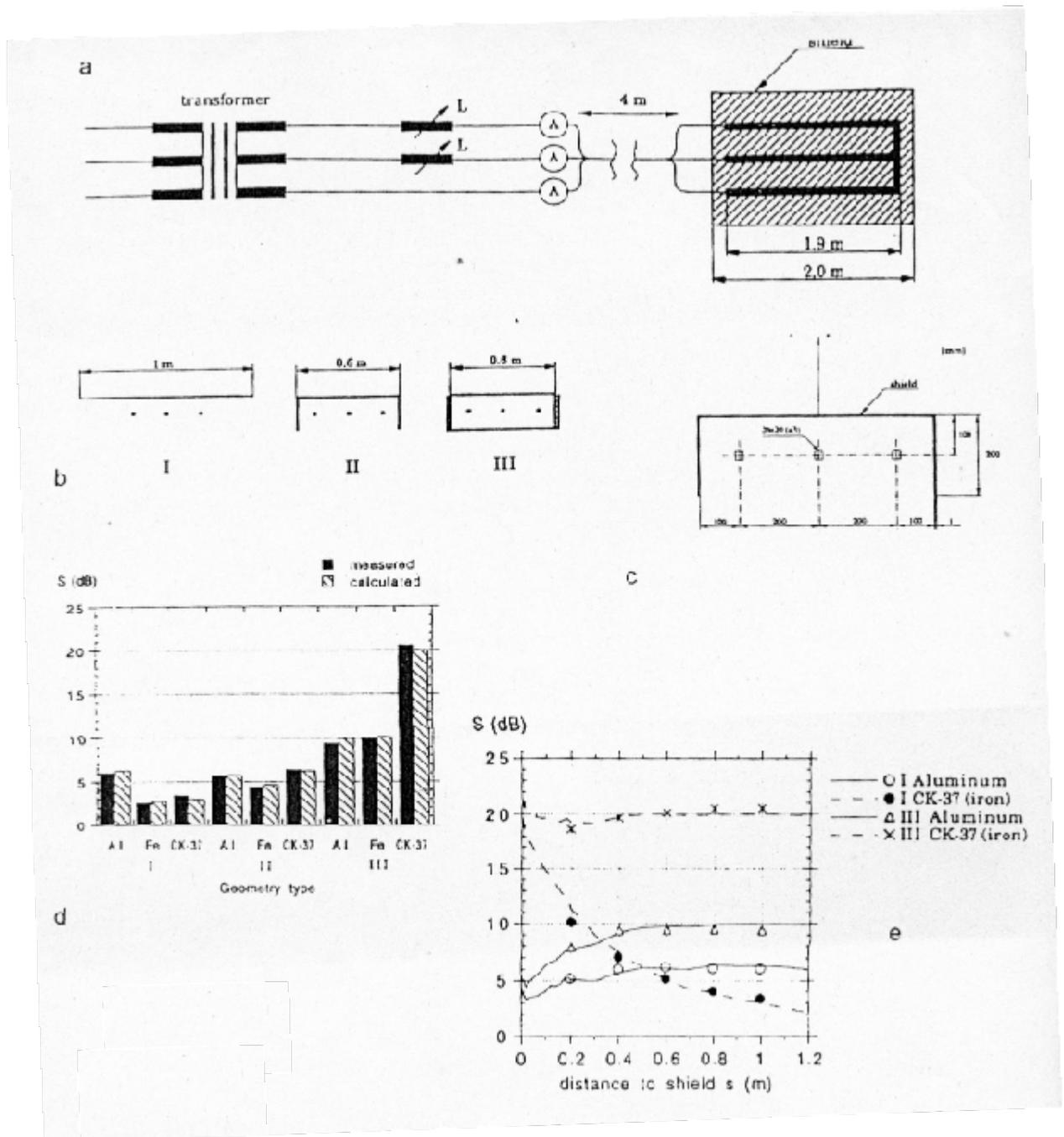


Abbildung 5.9

Abschirmung des Magnetfeldes im Bereich der Sammelschiene eines Transformators (HASSELGREN und LUOMI 1995).

a) Anordnung der Abschirmung.

b) Verschiedene Ausführungsformen der Abschirmung (vertikaler Abstand zwischen der Abschirmung und den Leitern jeweils 10 cm): I) ebene Platte, II) dreiseitige Abschirmung, III) zwei überlappende dreiseitige Abschirmungen.

c) Abmessungen der dreiseitigen Abschirmung.

d) Wirksamkeit S der Abschirmung in s - 1 m Abstand für 1 mm dicke Abschirmungen in den Ausführungsformen I, II und III jeweils aus den Materialien Aluminium (Al), Eisen (Fe) und Transformatorstahl (CK 37).

e) Wirksamkeit S der Abschirmung auf der Symmetrieachse für die Ausführungsformen I und III jeweils aus Aluminium (Al) bzw. Transformatorstahl (CK 37) als Funktion des Abstandes s von der Abschirmung.

- der Einbau von Transformatoren mit geringeren magnetischen Streufeldern,
- die geänderte Anordnung der Bauteile, eine sorgfältige Leitungsführungen und bifilare Heizwicklungen um Kompensationseffekte auszunutzen,
- der Einbau von Ein- Aus-Schaltern im Primär- und im Sekundärkreis, um Leerlaufströme durch die Primärseite von Transformatoren zu unterbinden.

Dem geringen Mehraufwand steht bei wachsendem Problembewusstsein der Verbraucherinnen und Verbraucher eine steigende Nachfrage nach emissionsgeminderten Geräten gegenüber.

5.6 Bahnstromanlagen

Bei den Stromübertragungsleitungen bieten sich die gleichen Verfahren an wie für die Höchst- und Hochspannungsleitungen des allgemeinen Stromversorgungsnetzes (s. Abschnitt 5.1), mit Ausnahme der Maßnahmen, die auf der wechselseitigen Kompensation der Felder der drei Phasen des allgemeinen Stromversorgungsnetzes beruhen.

Als konstruktive Maßnahme zur Verminderungen der Belastungen durch die elektrischen und magnetischen Felder, die von den Bahn Oberleitungen und den Schienen ausgehen, kommt bei der gegenwärtig verwendeten Technologie für elektrisch betriebene Schienenfahrzeuge nur die Anbringung von zusätzlichen Schirmleitungen im Bereich der Oberleitungen in Frage (GOURDON 1993). Diese Maßnahme ist aber noch nicht erprobt und ihre Wirksamkeit fraglich.

6 Zusammenfassung und Bewertung der Maßnahmen zur Minderung der elektrischen und magnetischen Expositionen in der Umgebung von elektrischen Anlagen, Maschinen und Geräten

Im Folgenden werden aus den vier im Kapitel 4 beschriebenen Maßnahmenbereichen

1. raumplanerische Maßnahmen,
2. emissionsseitige konstruktive und betriebliche Maßnahmen,
3. immissionsseitige Abschirmungen und
4. Maßnahmen zur Aufklärung und zur Änderung des Nutzungsverhaltens

Einzelmaßnahmen zur Minderung der elektrischen und magnetischen Expositionen von

- Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsleitungen (Tabelle 6.1),
- Niederspannungsleitungen als Gebäudeanschlussleitungen (Tabelle 6.2),
- Niederspannungsleitungen als Teil der Elektroinstallation in Gebäuden (Tabelle 6.3),
- Umspannwerke (Tabelle 6.4),
- Transformatorenstationen (Tabelle 6.5),
- elektrischen Geräten und Maschinen (Tabelle 6.6),
- Bahnstrom-Übertragungsleitungen (Tabelle 6.7),
- Oberleitungen und Schienen (Tabelle 6.8)

dargestellt und bewertet.

Die Bewertung der Maßnahmen erfolgt nach den folgenden Kriterien:

- Entwicklungsstand,
- Aufwand und Kosten,
- Wirksamkeit bei der Abschirmung elektrischer und magnetischer Felder,
- evtl. besondere Voraussetzungen, die erfüllt sein müssen, um die jeweilige Maßnahme einsetzen zu können, bzw. Probleme, die bei ihrer Realisierung auftreten.

Der Kostenfaktor geht dabei nur über eine qualitative Einschätzung ein (hohe, mittlere, niedrige Kosten), da verlässliche Kostenabschätzungen für konstruktive und betriebliche Maßnahmen weder von Anlagenherstellern noch von Anlagenbetreibern zu erhalten sind. Dies liegt unter anderem daran, dass gerade bei konstruktiven und betrieblichen Maßnahmen, bei denen die Kosten ein wesentlicher Faktor sind, Praxiserfahrungen nur vereinzelt vorliegen.

Tabelle 6.1

Quelle	Höchst- und Hochspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 kV, 220 kV, 110 kV) Mittelspannungsleitungen (Nennspannungen: 30 kV, 20 kV, 10 kV, 6 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Raumplanung					
Emissions- und [mmissionskataster	Vorgehensweise erprobt	Kenntnis bestehender Belastungen ist Vor- aussetzung für planeri- sche und technische Maßnahmen zur Be- grenzung künftiger Gesamtb elastu ngen	(Planungsbehörden)	Vermessung der elek- trischen und magneti- schen Felder unter realen Bedingungen, ggf. ergänzt um numerische Simulationen für Höchstlastzustände	sinnvoll zur Unterstüt- zung von Planungen
Umweltverträglich- keitsprüfung	Verfahren bekannt	Minimierung elektrischer und magnetischer Belastungen als ein Ziel der UVP	(EVU)	ggf. Abwägung der Minderung elektr. und magnet. Felder gegen andere Belange des Natur-, Umwelt- und Gesundheitsschutzes	Voraussetzung für Planung
Schutzabstände	in der Diskussion	E,B: Feldabnahme bei Freileitungen außerhalb der Trasse prop. $1/R^2$, Feldabnahme bei Kabeln prop. $1/R^2$	evt. Mindereinnahmen aus Grundstücksver- käufen (Grundstückseigner)	Vorsorgegrenzwerte oder Planungsrichtwerte	oft wirksamste Maßnahme

Quelle	Höchst- und Hochspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 kV, 220 kV, 110 kV) Mittelspannungsleitungen (Nennspannungen: 30 kV, 20 kV, 10 kV, 6 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Konstruktion und Betrieb					
Abstandsvergrößerung					
<i>Masterhöhung</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E,B: Feldabnahme bei Freileitungen prop. l/R bis l/R^2 , Feldabnahme bei Kabeln prop. l/R^2	mittel (EVU, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen)	optische Beeinträchtigung	wirksam nur in Trassennähe
angepaßte Leitungs-, System- und Phasenkonfigurationen					
<i>Erhöhung der Betriebsspannung, Absenkung des Betriebsstroms</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: Erhöhung B: Verminderung	hoch bei Umbau bestehender Anlagen (EVU, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen)	andere Masten und Leitungen, Anpassung von Umspannwerken und Transformatoren	u.U. sinnvoll bei Neuplanung

Quelle	Höchst- und Hochspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 kV, 220 kV, 110 kV) Mittelspannungsleitungen (Nennspannungen: 30 kV, 20 kV, 10 kV, 6 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
<i>Kombinations- gestänge</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: abschirmende Wir- kung durch unterge- spannte Leitungen ge- ringerer Betriebsspan- nungen B: Verminderung durch Masterhöhung	hoch bei Umbau beste- hender Anlagen (EVU, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen) u.U. Kostensparnis bei Neubau gegenüber getrennten Trassen	optische Beeinträchtigung	sinnvoll bei Neuplanung
<i>Leiteranordnung</i> ^	Verfahren bekannt und erprobt	E, B: Dreiecksanord- nung günstiger als Ein- Ebenenanordnung i	mittel bei Umbau be- stehender Anlagen (EVU, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen)		sinnvoll bei Neuplanung
<i>Split-Phase</i>	Verfahren in der Er- probung (USA, Schweden)	E, B: bessere Kompen- sation der Einzelfelder der Phasen	hoch bei Umbau beste- hender Anlagen, mittel bei Neubau (EVU, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen)	Anpassung der Um- spannwerke, optische Beeinträchtigung	sinnvoll bei Neuplanung
<i>Mitti-Phase</i>	Verfahren in der Test- phase (USA)	E, B: bessere Kompen- sation der Einzelfelder der Phasen, jedoch u.U. geringer als bei Split- Phase	hoch (EVU, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen)	Anpassung der Um- spannwerke, optische Beeinträchtigung jedoch kleiner als bei Split- Phase	unter Umständen sinnvoll

Quelle	Höchst- und Hochspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 kV, 220 kV, 110 kV) Mittelspannungsleitungen (Nennspannungen: 30 kV, 20 kV, 10 kV, 6 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
<i>Erdkabel statt Freileitung</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: vollständige Abschirmung durch Erdreich B: Kompensationseffekt vermindert Felder vor allem außerhalb der Trasse, Möglichkeit der Abschirmung durch Mantelrohre	hoch bei Umbau bestehender Anlagen, bei Neubau von 380kV- und 220kV-Leitungen: Kosten für Erdkabel deutlich höher als für Freileitungen, 10 kV-Leitungen: Kosten für Erdkabel etwas höher als für Freileitungen, Mittelspannungsleitungen: Kosten für Erdkabel und Freileitungen gleich (EVU, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen)	Höchst- und Hochspannung: Reparaturanfälligkeit und Zugänglichkeit der Erdkabel, Erwärmung des Erdreichs	sinnvoll in Ballungsräumen und Stadtgebieten, geringerer Flächenverbrauch, keine optische Beeinträchtigung
<i>Verdrillung der Phasen</i>	theoretisches Konzept	E, B: rechnerisch nachgewiesen	?, eher niedrig		wahrscheinlich sinnvoll, Vorteil: Anwendung auch auf Teilabschnitten möglich

Quelle	Höchst- und Hochspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 kV, 220 kV, 110 kV) Mittelspannungsleitungen (Nennspannungen: 30 kV, 20 kV, 10 kV, 6 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
<i>Phasenkonfiguration bei Mehrfachsystemen</i>	einige Verfahren bekannt und erprobt, neue Konzepte in der Entwicklung	E, B: abhängig vom Abstand von der Leitung	niedrig (EVU, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen)	Verminderungseffekt abhängig von Phasendifferenz und Stromlasten der Teilsysteme	sinnvoll, Betrachtung des Einzelfalls notwendig
emissionsseitige Abschirmung					
<i>Kompensationsseile bei Freileitungen</i>	theoretisches Konzept, erste Tests	E, B: rechnerisch nachgewiesen	?, eher niedrig	zusätzliche Verlustleistung	wahrscheinlich sinnvoll, Vorteil: Anwendung auch auf Teilabschnitten möglich
<i>Kompensationsleiter bei Erdkabeln</i>	theoretisches Konzept, erste Tests	E, B: rechnerisch und in Tests nachgewiesen	?, eher niedrig	zusätzliche Verlustleistung	wahrscheinlich sinnvoll, Vorteil: Anwendung auch auf Teilabschnitten möglich
<i>Ummantelung von Erdkabeln</i>	Verfahren in der Erprobung	E: vollständige Abschirmung B: Abschirmeffekt ca. 30 % bei Tests	?, wahrscheinlich mittlere Zusatzkosten zu normalem Erdkabel	zusätzliche Verlustleistung	wahrscheinlich sinnvoll, Vorteil: Anwendung auch auf Teilabschnitten möglich
aktive Kompensation	theoretisches Konzept	E, B: rechnerisch nachgewiesen	?	zusätzlicher Energieeinsatz	praktische Durchführbarkeit fraglich

Quelle	Höchst- und Hochspannungsleitungen (Nennspannungen: 380 kV, 220 kV, 110 kV) Mittelspannungsleitungen (Nennspannungen: 30 kV, 20 kV, 10 kV, 6 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
immissionsseitige Abschirmung					
<i>Baumaterialien</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: hoher Abschirmeffekt durch normale Baumaterialien B: kein Abschirmeffekt	entfallen, bzw. gering	witterungsabhängig	für elektr. Feld einfach durchführbar
<i>Bepflanzung ME</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: hoher Abschirmeffekt durch Bäume und Büsche B: kein Abschirmeffekt	entfallen, bzw. gering	witterungsabhängig	für elektr. Feld einfach durchführbar
Aufklärung	-	-	-	-	-

Tabelle 6.2					
Quelle	Niederspannungsleitungen/ Gebäudeanschlussleitungen (Nennspannungen: 380 V, 220 V)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Raumplanung					
Emissions- und Immissionskataster	Vorgehensweise erprobt	Kenntnis bestehender Belastungen ist Voraussetzung für planerische und technische Maßnahmen zur Begrenzung künftiger Gesamtbelastungen	(Planungsbehörden)	Vermessung der elektrischen und magnetischen Felder unter realen Bedingungen, ggf. ergänzt um numerische Simulationen für Höchstlastzustände	sinnvoll zur Unterstützung von Planungen
Umweltverträglichkeitsprüfung	Verfahren bekannt	Minimierung elektrischer und magnetischer Belastungen als ein Ziel der UVP	(EVU)	ggf. Abwägung der Minderung elektr. und magnet. Felder gegen andere Belange des Natur-, Umwelt- und Gesundheitsschutzes	Voraussetzung für Planung
Schutzabstände	in der Diskussion	E,B: Feldabnahme bei Freileitungen außerhalb der Trasse prop. $1/R^2$, Feldabnahme bei Kabeln prop. $1/R^2$		Vorsorgegrenzwerte oder Planungsrichtwerte	oft wirksamste Maßnahme

Quelle	Niederspannungsleitungen/ Gebäudeanschlussleitungen (Nennspannungen: 380 V, 220 V)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Konstruktion und Betrieb					
angepaßte Leitungs-, System- und Phasenkonfigurationen					
<i>Erdkabel statt Freileitung (Abbau von Freileitungen auf Masten und Dachständern)</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: vollständige Ab- schirmung durch Erdreich B: Kompensationseffekt vermindert Felder vor allem außerhalb der Trasse, Möglichkeit der Abschirmung durch Mantelrohre	hoch bei Umbau beste- hender Anlagen, (EVU, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen oder Anlieger)		wichtigste technische Maßnahme
emissionsseitige Abschirmung					
<i>Ummantelung von Leitungen</i>	Verfahren erprobt	E: vollständige Ab- schirmung B: Abschirmung über 90%	?, wahrscheinlich mittlere Zusatzkosten zu normalem Erdkabel (EVU, evt. Kostenver- lagerung auf Kommunen oder Anlieger)	zusätzliche Verlustleistung	sinnvoll, Vorteil: Anwendung auch auf Teilabschnitten möglich

Quelle	Niederspannungsleitungen/ Gebäudeanschlussleitungen (Nennspannungen: 380 V, 220 V)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
immissionsseitige Abschirmung					
<i>Baumaterialien</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: hoher Abschirmeffekt durch normale Baumaterialien B: kein Abschirmeffekt	entfallen, bzw. gering		für elektr. Feld einfach durchführbar
Aufklärung					
Risikokommunikation					Voraussetzung für individuelle Maßnahmen
Produktkennzeichnung und Gütesiegel	-	-	-	-	-
Empfehlungen für Änderungen des Nutzungsverhaltens	-	-	-	-	-
<i>Empfehlungen für einzuhalten- de Abstände zwischen Hauptversorgungsleitungen und Hauptaufenthaltsbereichen</i>					wichtig
<i>Stromsparempfehlungen</i>					sinnvoll, auch aus Klimaschutzgründen

Tabelle 6.3					
Quelle	Niederspannungsleitungen/ Elektroinstallationen in Gebäuden (Nennspannungen 380 V, 220 V)				
Maßnahmengrupp e Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Raumplanung					
Immissions- und Immissionskataster	-	-	-	-	-
Umweltverträglichkeitsprüfung	Verfahren bekannt, Planungs-UVP entfällt, jedoch Berücksichtigung der elektr. und magnet. Belastung im Rahmen der Produkt-UVP	Minimierung elektrischer und magnetischer Belastungen als ein Ziel der UVP		ggf. Abwägung der Vminderung elektr. und magnet. Felder gegen andere Belange des Natur-, Umwelt- und Gesundheitsschutzes	Voraussetzung für Planung
Schutzabstände	-	-	-	-	-
Konstruktion und Betrieb					
Abstandsvergrößerun					
<i>hinreichender Abstand von Hauptversorgungsleitungen zu Hauptaufenthaltsbereichen</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E,B: Feldabnahme prop. $1/R^2$	keine	Vorsorgegrenzwerte, evt. Platzprobleme, Problembewusstsein bei Architekten und Elektroinstallateuren	wichtig

Quelle	Niederspannungsleitungen/ Elektroinstallationen in Gebäuden (Nennspannungen 380 V, 220 V)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
angepaßte Leitungs-, System und Phasenkonfigurationen					
<i>emissionsarme Leitungsführung</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E, B: große potentielle Minderungseffekte	keine	Problembewusstsein bei Elektroinstallateuren	wichtig
emissionsseitige Abschirmung					
<i>abgeschirmte Leitungen</i>	Verfahren bekannt und erprobt, Leitungen im Handel	E: vollständige Ab- schirmung möglich B: keine Abschirmung	Kosten ca. 30 % höher als bei normalem Leitungsmaterial (Eigentümer)	keine Abschirmung des magnetischen Feldes	sinnvoll, wo durch nor- male Baumaterialien (Putz usw.) keine hinreichende Abschirmwirkung erreicht wird
<i>Verlegung in Kabelka- nälen ans magnetisch abschirmendem Material</i>	Wirksamkeit nachgewiesen	E: vollständige Ab- schirmung B: Abschirmung über 90%	?, wahrscheinlich hoch (Eigentümer)	Platzbedarf für Kabelkanäle	in sensiblen Bereichen sinnvoll, wenn hinrei- chende Abstände nicht eingehalten werden können
immissionsseitige Abschirmung					
<i>elektrisch leitfähige Baumaterialien</i>	Verfahren bekannt und erprobt, Produkte im Handel	E: vollständige Ab- schirmung B: keine Abschirmung	mittel	keine Abschirmung des magnetischen Feldes, Abschirmung auch der natürlichen elektrischen Felder	sinnvoll bei starken elektrischen Feldern

Quelle	Niederspannungsleitungen/ Elektroinstallationen in Gebäuden (Nennspannungen 380 V, 220 V)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
<i>Magnetfeld- abschirmungen</i>	Verfahren bekannt und erprobt, Produkte im Handel	E: vollständige Ab- schirmung B: Abschirmung über 90%	relativ geringe Kosten für Abschirmungen elektronischer Geräte	nur für eng begrenzte Raumbereiche	sinnvoll zur Abschir- mung empfindlicher elektronischer Geräte
Aufklärung					
Risikokommunikation					Voraussetzung für in- dividuelle Maßnahmen
Produktkennzeichnung und Gütesiegel					
<i>Gütesiegel für emissionsarme Elektroinstallation</i>	in der Diskussion	E, B: große pot. Minderungseffekte	keine		sinnvoll, auch um das Problembewußtsein des Elektrohandwerks zu stärken
Empfehlungen für Än- derungen des Nutzungsverhaltens					
<i>Empfehlungen für ein- zuhaltende Abstände zwischen Hauptversor- gungsleitungen und Hauptaufenthalts- bereichen</i>		E, B: große pot. Minderungseffekte	keine	Vorsorgegrenzwerte	wichtig
<i>Stromsparempfehlungen</i>					sinnvoll, auch aus Klimaschutzgründen

Tabelle 6.4

Quelle	Umspannwerke				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Raumplanung					
Emissions- und Immissionskataster	Vorgehensweise erprobt	Kenntnis bestehender Belastungen ist Vor- aussetzung für planeri- sche und technische Maßnahmen zur Be- grenzung künftiger Gesamtbelastungen	(Planungsbehörden)	Vermessung der elek- trischen und magneti- schen Felder unter realen Bedingungen, ggf. ergänzt um numerische Simulationen für Höchstlastzustände	sinnvoll zur Unterstüt- zung von Planungen
Umweltverträglich- keitsprüfung	Verfahren bekannt	Minimierung elektrischer und magnetischer Belastungen als ein Ziel der UVP	(Anlagenbetreiber)	ggf. Abwägung der Minderung elektr. und magnet. Felder gegen andere Belange des Natur-, Umwelt- und Gesundheitsschutzes	Voraussetzung für Planung
Schutzabstände	in der Diskussion	E,B: Feldabnahme für Transformator prop. $1/R^3$ Feldabnahme für Lei- tungen prop. $1/R^2$	evt. Mindereinnahmen aus Grundstücksver- käufen (Grundstückseigner)	Vorsorgegrenzwerte oder Planungsrichtwerte zur Festlegung von Vorsorgeabständen	oft wirksamste Maßnahme

Quelle	Umspannwerke				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
<i>Einhaltung von Schutzabständen bei der Neuplanung von Anlagen</i>	Verfahren bekannt	s.o.	vergleichsweise gering, aber abhängig von Lei- tungsverlauf und Ver- brauchsschwerpunkten (EVU)	s.o.	sinnvoll
<i>nachträgliche Verlegung von Umspannwerken</i>	Verfahren bekannt	s.o.	sehr hoher Aufwand (Kommunen, u.U. EVU)	s.o.	in Ausnahmefällen sinnvoll
<i>Verzicht auf Bebauung innerhalb des Schutz- abstandes von beste- henden Anlagen</i>	Verfahren bekannt	s.o.	Verluste durch Verzicht auf Verkauf von Bauland (Kommunen, Grundstückseigentümer)	s.o.	sinnvoll
Konstruktion und Betrieb					
Abstandsvergrößerung		E,B: Feldabnahme für Transformator prop. $1/R^3$, Feldabnahme für Lei- tungen prop. $1/R^2$			sinnvoll im Bereich der zu- und abführenden Leitungstrassen (s. Höchst-, Hoch- und Mittelspannungs- leitungen)

Quelle	Umspannwerke				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
angepasste Leitungs-, System und Phasenkonfigurationen					sinnvoll im Bereich der zu- und abführenden Leitungstrassen (s. Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsleitungen)
emissionsseitige Abschirmung					allenfalls für elektrisches Feld durchführbar
<i>Abschirmung der Transformatoren</i>	Verfahren bekannt	E: Abschirmung durch Metallbleche und -netze, Mauerwerk, Pflanzen B: s. Transformatoren	mittlere (Anlagenbetreiber)		in Ausnahmefällen sinnvoll
<i>Abschirmung der 211- und abführenden Leitungen</i>	s. Freileitungen, Erdkabel	s. Freileitungen, Erdkabel			s. Freileitungen, Erdkabel
immissionsseitige Abschirmung					
<i>Baumaterialien</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: hoher Abschirmeffekt durch normale Baumaterialien B: kein Abschirmeffekt	entfallen, bzw. gering	witterungsabhängig	für elektr. Feld einfach durchführbar

Quelle	Umspannwerke				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
<i>Bepflanzung</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: hoher Abschirmeffekt durch Bäume und Büsche B: kein Abschirmeffekt	entfallen, bzw. gering	witterungsabhängig	für elektr. Feld einfach durchführbar
Aufklärung	-	-	-	-	-

Tabelle 6.5

Quelle	Transformatorstationen				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Raumplanung					
Emissions- und Immissionkataster	Vorgehensweise erprobt	Kenntnis bestehender Belastungen ist Vor- aussetzung für planeri- sche und technische Maßnahmen zur Be- grenzung künftiger Gesamtbelastungen	(Planungsbehörden)	Vermessung der elek- trischen und magneti- schen Felder unter realen Bedingungen, ggf. ergänzt um numerische Simulationen für Höchstlastzustände	sinnvoll zur Unterstüt- zung von Planungen
Umweltverträglich- keitsprüfung	Verfahren bekannt	Minimierung elektrischer und magnetischer Belastungen als ein Ziel der UVP	(EVU)	ggf. Abwägung der Minderung elektr. und magnet. Felder gegen andere Belange des Natur-, Umwelt- und Gesundheitsschutzes	Voraussetzung für Planung
Schutzabstände	in der Diskussion	E,B: Feldabnahme für Transformator prop. $1/R^3$ Feldabnahme für Lei- tungen prop. $1/R^2$	evt. Mindereinnahmen aus Grundstücksver- käufen (Grundstückseigner)	Vorsorgegrenzwerte oder Planungsrichtwerte	oft wirksamste Maßnahme

Quelle	Transformatorstationen				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Konstruktion und Betrieb					
Abstandsvergrößerung					
<i>Vergrößerung des Ab- standes zwischen Transformator bzw. Sammelschiene und zu schützendem Raum</i>	Verfahren bekannt	E,B: Feldabnahme für Transformator prop. $1/R^3$, Feldabnahme für Sam- melschiene prop. $1/R^2$	sehr stark abhängig vom Einzel Fall	Platzbedarf	sinnvoll, aber nur in Einzelfällen machbar
angepaßte Leitungs-, System und Phasenkonfigurationen					
<i>angepaßte Leitungs- führung im Bereich der Sammelschiene</i>	Verfahren bekannt	E, B: starke Minderung durch Kompensationseffekte	mittlerer Aufwand zur Ermittlung der optimalen Konfiguration im Einzel Fall (EVU)		sehr sinnvoll, wenn die S ammel schiene die Hauptquelle darstellt

Quelle	Transformatorstationen				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
emissionsseitige Abschirmung					
<i>Abschirmung durch hoch-leitfähige und/ oder hoch-permeable Materialien</i>	Verfahren in der Er- probung, in wenigen Fällen angewandt	E: vollständige Abschirmung, B: Abschirmeffekt u.a. abhängig von Art, Dicke und Kombination der Materialien, Anordnung der Abschirmung	bei einfachen Geometrien relativ geringer Aufwand		oft einzige Möglichkeit, wenn eine Verlegung oder Abstandsvergrößerungen nicht möglich sind und Än- derungen der Leitungs- konfiguration nicht zu einer hinreichenden Minderung führen
irnmissionsseitige Abschirmung	Verfahren bekannt	E: Abschirmung durch Gebäude und Bepflanzung B: großflächig nicht durchführbar	Aufwand für elektrisches Feld gering		für elektrisches Feld leicht durchführbar, aber selten notwendig
Aufklärung					
Risikokommunikation					Voraussetzung für in- dividuelle Maßnahmen
Produktkennzeichnung und Gütesiegel	-	-	-	-	-

Quelle	Transformatorstationen				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Empfehlungen für Änderungen des Nutzungsverhaltens					
<i>Empfehlungen hinsichtlich der Nutzung von Räumen, die an Transformatorstationen grenzen</i>					wichtig

Tabelle 6.6					
Quelle	Elektrische Geräte und Maschinen				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Raumplanung					
Emissions- und Immissionkataster	-	-	-	-	-
Umweltverträglich- keitsprüfling	Planungs-UVP entfällt, jedoch Berücksichtigung der elektr. und magnet. Belastung im Rahmen der Produkt-UVP	Minimierung elektrischer und magnetischer Belastungen als ein Ziel der UVP		ggf. Abwägung der Minderung elektr. und magnet. Felder gegen andere Belange des Natur-, Umwelt- und Gesundheitsschutzes	sinnvoll
Schutzabstände	-	-	-	-	-
Konstruktion und Betrieb					
<i>Einbau emissionsarmer Komponenten</i>	Verfahren bekannt, Komponenten verfügbar	B: hohes Minderungspotential	gering (Käufer)	Problembewusstsein der Hersteller und Entwickler	sinnvolle, einfach zu realisierende Maßnahme
Abstandsvergrößerung					

Quelle	Elektrische Geräte und Maschinen				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
angepasste Leitungs-, System und Phasenkonfigurationen					
<i>angepasste Leitungsführung innerhalb von Geräten und Maschinen</i>	Verfahren bekannt	E, B: starke Minderung durch Kompensationseffekte	Mehrkosten bei Entwicklung und Herstellung, die zu geringfügigen Preiserhöhungen führen könnten (Käufer)	Problembewusstsein der Hersteller und Entwickler	sinnvolle, einfach zu realisierende Maßnahme
emissionsseitige Abschirmung					
<i>Einbau in geerdetes Abschirmgehäuse</i>	Verfahren bekannt	E: vollständige Abschirmung möglich B: Abschirmung nicht möglich	gering (Käufer)	Gewichtserhöhung problematisch bei handgehaltenen Geräten	bei Maschinen u.U. sinnvoll
immissionsseitige Abschirmung	-	-	-	-	nicht durchführbar
Änderungen des Nutzungsverhaltens					
Risikokommunikation	•				Voraussetzung für individuelle Maßnahmen

Quelle	Elektrische Geräte und Maschinen				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
Produktkennzeichnung und Gütesiegel					
<i>Produktdeklaration</i>	Verfahren bekannt, von Verbraucherverbänden gefordert	E, B: hohes Potential zur Minderung der Belastungen	keine	Problembewusstsein der Hersteller, fehlende politische Vorgaben	sinnvolle, einfach zu realisierende Maßnahme
<i>Gütesiegel für emissionsarme elektri- sche Geräte und Maschinen</i>	in der Diskussion,	E, B: hohes Potential zur Minderung der Belastungen	keine		sehr sinnvoll, auch um das Problembewusstsein der Hersteller von elektrischen Geräten und Maschinen zu stärken
Empfehlungen für Än- derungen des Nutzungsverhaltens					
<i>Empfehlungen für ein- zuhaltende Abstände zu elektrischen Geräten und Maschinen im Dauerbetrieb</i>	Vorgehensweise bekannt	E, B: Abnahme prop. lR^3 , große pot. Minderungseffekte	keine	Vorsorgegrenzwerte	wichtige, einfache Maßnahme

Quelle	Elektrische Geräte und Maschinen				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung
<i>Empfehlungen zur Nutzungseinschränkung insbesondere körpernah betriebener elektrischer Geräte</i>	Vorgehensweise bekannt	offensichtlich	keine		einfache Maßnahme

Tabelle 6.7					
Quelle	Bahnstromanlagen/ Übertragungsleitungen (Nennspannung: 110 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung Rangfolge
Raumplanung					
Emissions- und [missionkataster	Vorgehensweise erprobt	Kenntnis bestehender Belastungen ist Vor- aussetzung für planerische und technische Maßnahmen zur Be- grenzung künftiger Gesamtbelastungen	(Planungsbehörden)	Vermessung der elek- trischen und magneti- schen Felder unter realen Bedingungen, ggf. ergänzt um numerische Simulationen für Lichtbelastungswerte	sinnvoll zur Unterstüt- zung von Planungen
Umweltverträglich- keitsprüfung	Verfahren bekannt	Minimierung elektri- scher und magnetischer Belastungen als ein Ziel der UVP	(Anlagenbetreiber)	ggf. Abwägung der Minderung elektr. und magnet. Felder gegen andere Belange des Natur-, Umwelt- und Gesundheitsschutzes	Voraussetzung für Planung
Schutzabstände	in der Diskussion	E, B: Abnahme prop. I/R	evt. Mindereinnahmen aus Grundstücksver- käufen (Grundstückseigner)	Vorsorgegrenzwerte oder Planungsrichtwerte	oft wirksamste Maßnahme

Quelle	Bahnstromanlagen/ Übertragungsleitungen (Nennspannung: 110 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung Rangfolge
Konstruktion und Betrieb					
Abstandsvergrößerung					
<i>Masterhöhung</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E,B: Feldabnahme bei Freileitungen prop. l/R	mittel (Anlagenbetreiber, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen)	optische Beeinträchtigung	wirksam nur in Trassennähe
angepasste Leitungs-, System und Phasenkonfigurationen					
<i>Kombinationsgestänge, Kombination mit Leitungen der allgemeinen Stromversorgung</i>	Verfahren in wenigen Fällen bereits angewandt	E: abschirmende Wirkung durch untergespannte Leitungen geringerer Betriebsspannungen B: Verminderung durch Masterhöhung	hoch bei Umbau bestehender Anlagen (EVU, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen) u.U. Kostenersparnis bei Neubau gegenüber getrennten Trassen	Reparatur erschwert, da Abstimmung verschiedener Betreiber wegen Abschaltung notwendig, optische Beeinträchtigung	sinnvoll bei Neuplanung

Quelle	Bahnstromanlagen/ Übertragungsleitungen (Nennspannung: 110 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung Rangfolge
<i>Erdkabel statt Freileitung</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: vollständige Abschirmung durch Erdreich B: Kompensationseffekt vermindert Felder vor allem außerhalb der Trasse, Möglichkeit der Abschirmung durch Mantelrohre	hoch bei Umbau bestehender Anlagen, (Anlagenbetreiber, evt. Kostenverlagerung auf Kommunen)	Reparaturanfälligkeit und Zugänglichkeit der Erdkabel, Erwärmung des Erdreichs	sinnvoll in Ballungsräumen und Stadtgebieten, geringerer Flächenverbrauch, keine optische Beeinträchtigung
emissionsseitige Abschirmung					
<i>Kompensationsseile bei Freileitungen</i>	theoretisches Konzept, erste Tests	E, B: rechnerisch nachgewiesen	?, eher niedrig	zusätzliche Verlustleistung	wahrscheinlich sinnvoll, Vorteil: Anwendung auch auf Teilabschnitten möglich
<i>Kompensationsleiter bei Erdkabeln</i>	theoretisches Konzept, erste Tests	E, B: rechnerisch und in Tests nachgewiesen	?, eher niedrig	zusätzliche Verlustleistung	wahrscheinlich sinnvoll, Vorteil: Anwendung auch auf Teilabschnitten möglich

Quelle	Bahnstromanlagen/ Übertragungsleitungen (Nennspannung: 110 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung Rangfolge
<i>Ummantelung von Erdkabeln</i>	Verfahren in der Er- probung für Mehrphasenleitungen	E: vollständige Ab- schirmung B: Abschirmeffekt ca., 30 % bei Tests bei 3 - Phasenleitungen	?, wahrscheinlich mittlere Zusatzkosten zu normalem Erdkabel	zusätzliche Verlustleistung	wahrscheinlich sinnvoll, Vorteil: Anwendung auch auf Teilabschnitten möglich
immissionsseitige Abschirmung					
<i>Baumaterialien</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: hoher Abschirmeffekt durch normale Baumaterialien B: kein Abschirmeffekt	entfallen, bzw. gering	witterungsabhängig	für elektr. Feld einfach durchführbar
<i>Bepflanzung</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: hoher Abschirmeffekt durch Bäume und Büsche B: kein Abschirmeffekt	entfallen, bzw. gering	witterungsabhängig	für elektr. Feld einfach durchführbar
Aufklärung	-	-	-	-	-

Tabelle 6.8					
Quelle	Bahnstromanlagen/ Oberleitungen und Schienen (Nennspannung: 15 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung Rangfolge
Raumplanung					
Emissions- und Immissionkataster	Vorgehensweise erprobt	Kenntnis bestehender Belastungen ist Vor- aussetzung für planerische und technische Maßnahmen zur Be- grenzung künftiger Gesamtbelastungen	(Planungsbehörden)	Vermessung der elek- trischen und magnetischen Felder unter realen Bedingungen, ggf. ergänzt um numerische Simulationen für Höchstlastzustände	sinnvoll zur Unterstützung von Planungen
Umweltyerträg- lichkeitsprüfung	Verfahren bekannt	Minimierung elektrischer und magnetischer Belastungen als ein Ziel der UVP	(Anlagenbetreiber)	ggf. Abwägung der Minderung elektr. und magnet. Felder gegen andere Belange des Natur-, Umwelt- und Gesundheitsschutzes	Voraussetzung für Planung
Schutzabstände	in der Diskussion		evt. Mindereinnahmen aus Grundstücksverkäufen (Grundstückseigner)	Vorsorgegrenzwerte oder Planungsrichtwerte	oft wirksamste Maßnahme

Quelle	Bahnstromanlagen/ Oberleitungen und Schienen (Nennspannung: 15 kV)				
Maßnahmengruppe Maßnahme	Entwicklungsstand	Wirksamkeit bei der Minderung elektr. Felder (E) magnet. Felder (B)	Aufwand Kosten (Kostenträger)	Voraussetzungen Probleme	Bewertung Rangfolge
Konstruktion und Betrieb					
Abstandsvergrößerung	-	-	-	-	-
angepasste Leitungs-, System und Phasenkonfigurationen	-	-	~	""	~
emissionsseitige Abschirmung					
<i>Kompensationsseile</i>	theoretisches Konzept, erste Tests	E, B: rechnerisch nachgewiesen	?, eher niedrig	zusätzliche Verlustleistung	wahrscheinlich sinnvoll, Vorteil: Anwendung auch auf Teilabschnitten möglich
immissionsseitige Abschirmung					
<i>Baumaterialien</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: hoher Abschirmeffekt durch normale Baumaterialien B: kein Abschirmeffekt	entfallen, bzw. gering	witterungsabhängig	für elektr. Feld einfach durchführbar
<i>Bepflanzung</i>	Verfahren bekannt und erprobt	E: hoher Abschirmeffekt durch Bäume und Büsche B: kein Abschirmeffekt	entfallen, bzw. gering	witterungsabhängig	für elektr. Feld einfach durchführbar
Aufklärung	-	-	-	-	-

Literatur

Kap. 1

- Depner K. 1996a,
Deutsche epidemiologische Studie findet erhöhte Risiken für Krebserkrankungen bei Kindern,
EMF-Monitor 1/1996, 1-2
- Depner K. 1996b,
18. Jahrestagung der Bioelectromagnetics Society in Victoria, Kanada,
EMF-Monitor 3/1996, 1-5
- Edeler K. 1995,
Einflüsse elektromagnetischer Felder auf den Organismus - Ergebnisse experimenteller Untersuchungen,
EMF-Monitor, 2/1995, 6-8
- Edeler K. 1996,
Einflüsse elektromagnetischer Felder auf den Organismus - Ergebnisse experimenteller Untersuchungen, II,
Niederfrequente Wechselfelder,
EMF-Monitor, 1/1996, 7-9
- EMF-Monitor 1995a,
Krebsgefahr für Kinder durch Magnetfelder in der Nähe von Hochspannungsleitungen,
EMF-Monitor 1/1995, 1-2
- EMF-Monitor 1997,
Elektromagnetische Felder und Alzheimer-Krankheit,
EMF-Monitor 1/1997, 9-10
- Neitzke H.-P. 1996,
Vorsorgender Umwelt- und Gesundheitsschutz durch umsichtige Vermeidung elektromagnetischer
Expositionen,
in: Weingarten J., Probleme mit Elektromog? Gesundheit, Sicherheit und Gesetzgebung in der Diskussion
über elektromagnetische Felder, Fachtagung der Zukunftsinitiative Rheinland-Pfalz, 6. Dezember 1996
- Neitzke H.-P., Capelle J.v., Depner K., Ede/er K. und Hanisch T. 1994,
Risiko Elektromog? Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Gesundheit und Umwelt, Birkhäuser
Verlag Basel/Boston/Berlin

Kap. 2

- Alber F. 1994,
Verteilungstransformatoren und EMV,
etz Bd. 115, Heft 20, 1174
- Hanisch T., Loh C., Neitzke H.-P. und Voigt H. 1993 a,
Messung und Bewertung der elektrischen und magnetischen Felder in der Umgebung von
Stromversorgungseinrichtungen in Gifhorn-West,
Untersuchung im Auftrag der Stadt Gifhorn
- Hanisch T., Münchenhagen R., Neitzke H.-P. und Voigt H. 1993 b, Elektrische und
magnetische Felder von Stromversorgungsanlagen, Untersuchung im Auftra ge des
Niedersächsischen Umweltministeriums, Hannover
- Hanisch T. und Neitzke H.-P. 1995,
Messungen niederfrequenter magnetischer Felder in Wohnungen in der Nähe von Hochspannungsleitungen,
im Auftrage des Ministeriums für Arbeit, Gesundheit und Sozialordnung, Baden-Württemberg

Kieback D. 1990,
Wirkungen elektromagnetischer Felder auf den Menschen,
Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Information 1/90, Köln

Krause N. 1988,
Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder,
Der Elektromeister, Hefte 9, 17, 18, 19

Kuhnert E. 1993,
Sind Hochspannungsleitungen notwendig?
in: FTBA Kongresse (Hrsg.), 3. Internationale Fachtagung zur elektromagnetischen Umweltverträglichkeit,
Köln 2.-3. November 1993

Neitzke H.-P. 1996,
Vorsorgender Umwelt- und Gesundheitsschutz durch umsichtige Vermeidung elektromagnetischer
Expositionen,
in: Weingarten J., Probleme mit Elektromog? Gesundheit, Sicherheit und Gesetzgebung in der Diskussion
über elektromagnetische Felder, Fachtagung der Zukunftsinitiative Rheinland-Pfalz, 6. Dezember 1996

Newi G. 1995,
Konsequenzen der Festlegung von Feld-Grenzwerten auf die Praxis der Stromversorgung,
Elektrizitätswirtschaft Jg. 94, Heft 21, 1336-1341

Rippar G. 1990,
Elektrische und magnetische Felder technischer Frequenzen - elektrotechnische Grundlagen,
in: Österreichisches Institut für Baubiologie (Hrsg.), Elektromagnetische Felder - Einflüsse auf Mensch und
Umwelt, Kongreß 4.- 6. Oktober 1990

Silny J. 1985,
Der Mensch in energietechnischen Feldern,
Elektrizitätswirtschaft Jg. 84, Heft 7

Kap. 3

Capelle J.v., Hanisch T., Loh C, Neitzke H.-P. und Voigt H. 1993,
Elektromagnetische Belastung in der Umgebung der DB -Strecke Hannover-Berlin nach der *geplanten*
Elektrifizierung,
im Auftrage des Landkreises Gifhorn

Neitzke H.-P., Capelle J.v., Depner K., Edeler K. und Hanisch T. 1994,
Risiko Elektromog? Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Gesundheit und Umwelt, Birkhäuser
Verlag Basel/Boston/Berlin

Neitzke H.-P. und Hanisch T. 1993,
Messungen der magnetischen Felder in der Umgebung des Unterwerkes Legienstraße und oberhalb der
U-Bahn-Gleise im Bereich der Legienbrücke in Hamburg-Billstedt,
im Auftrage der Stadtentwicklungsbehörde, Freie und Hansestadt Hamburg

Kap. 4

Bauhofer P. 1993,
Handbuch für Hochspannungsleitungen,
Verband der Elektrizitätswerke Österreichs, Wien

Bobis-Seidenschwanz A. und Wiedemann P. 1993,
Gesundheitsrisiken nieder- und hochfrequenter elektromagnetischer Felder - Bestandsaufnahme der
öffentlichen Kontroverse,
Arbeiten zur Risikokommunikation Heft 39, Forschungszentrum Jülich

BUWAL - Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft - 1997,
Elektromagnetische Felder in unserer Umwelt (Arbeitstitel),
Erstellung der Informationsbroschüre durch ECOLOG-Institut, Hannover

Brüggemeyer H. 1993,
Elektrosmog,
Niedersächsisches Umweltministerium

Covello V.T., McCallum D.B. und Pavlova M.T. 1989,
Risk Communication. The Role of Responsibility of Government and Nongovernment Organizations,
Plenum Press, New York

Depner K. 1996a,
Deutsche epidemiologische Studie findet erhöhte Risiken für Krebserkrankungen bei Kindern,
EMF-Monitor 1/1996, 1-2

Depner K. 1996b,
18. Jahrestagung der Bioelectromagnetics Society in Victoria, Kanada,
EMF-Monitor 3/1996, 1-5

Du Y., Cheng T.C. und Farag A.S. 1996,
Principles of Power-Frequency Magnetic Field Shielding with Flat Sheets in a Source of Long Conductors,
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Vol. 38, No. 3, 450-459

Edeler K. 1995,
Einflüsse elektromagnetischer Felder auf den Organismus - Ergebnisse experimenteller Untersuchungen,
EMF-Monitor, 2/1995, 6-8

Edeler K. 1996,
Einflüsse elektromagnetischer Felder auf den Organismus - Ergebnisse experimenteller Untersuchungen, II.
Niederfrequente Wechselfelder,
EMF-Monitor, 1/1996, 7-9

EMF-Monitor 1995a,
Krebsgefahr für Kinder durch Magnetfelder in der Nähe von Hochspannungsleitungen,
EMF-Monitor 1/1995, 1-2

EMF-MONITOR 1995b,
US-Rat für Strahlenschutz dringt auf Maßnahmen zur Begrenzung elektromagnetischer Felder,
EMF-Monitor 1/1995, 1-2

EMF-MONITOR 1995c,
Magnetfelder durch Erdungsströme in Häusern,,
EMF-Monitor 2/1995, 11-12

EMF-Monitor 1997,
Elektromagnetische Felder und Alzheimer-Krankheit,
EMF-Monitor 1/1997, 9-10
EPA - United States Environmental Protection Agency -1992,
Questions and Answers about Electric and Magnetic Fields (EMFs),
Radiation and Indoor Air Studies Division (6603J)

Frix W.M. und Karady G.G. 1997,
A Circuital Approach to Estimate the Magnetic Field Reduction of Nonferrous Metal Shields,
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Vol. 39, No. 1, 24-32

Fugate D.W., Hoburg J.F. und Lordan R.J. 1994,
Materials-Based Multilayer Shielding of Power Frequency Magnetic Fields,
The Annual Review of Research on Biological Effects of Electric and Magnetic Fields From the Generation,
Delivery and Use of Electricity,
U.S. Department of Energy, U.S.Environmental Protection Agency, Electric Power Research Institute und New
York State Department of Public Service, Albuquerque, New Mexico, 6.-10. November 1994

Fugate D.W., Hoburg J.F., Lordan R.J. und Rauch G.B. 1995,
Design and Application of ELF Magnetic Field Shielding Using Analytical Tools,
The Annual Review of Research on Biological Effects of Electric and Magnetic Fields From the Generation,
Delivery and Use of Electricity,
U.S. Department of Energy, U.S.Environmental Protection Agency, Electric Power Research Institute und New
York State Department of Public Service, Palm Springs, California, 12.-16. November 1995

Griefahn M. 1993,
Internationales Elektromog-Hearing, Hannover, 16. September 1993

Hasseigren L. 1993,
Magnetic Shielding at Extremely Low Frequency and Optical Fiber End Diffusers,
Technical report No. 156L, Department of Microwave Technology, Chalmers University of Technology,
Göteborg

x

Hasseigren L. und Luomi J. 1995,
Geometrical Aspects of Magnetic Shielding at Extremely Low Frequencies,
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Vol. 37, No. 3, 409-420

Hemming L.H. 1992,
Architectural Electromagnetic Shielding Handbook,
IEEE Press, New York

Hofmann H., Preston G. 1995,
Reduction of Stray Currents and Magnetic Fields From Single-Phase Distribution Systems,
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995: 1112-1118

Kegel R. 1997a,
Messung und Berechnung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder,
Vortrag im Rahmen der Tagung "Schutz vor elektromagnetischen Feldern - eine gesetzliche Lücke wird
geschlossen", Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales, Kiel, 23. April 1997

Kegel R. 1997b,
Berechnungs- und Ausgabebeispiele aus dem Bereich der Hochspannungsnetze und des Freileitungsbaues
(VisualEMFP 4.5 / 2D und 3D-Vollversion),
Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit GmbH (IEV), Lübeck

Kegel R. und Riedinger D. 1995,
Monitorbeeinflussung durch niederfrequente Magnetfelder im Gebäudebereich der Kreissparkasse Herzogtum
Lauenburg, Eine Studie zur Störunterdrückung magnetisch beeinflusster EDV-Monitore durch Schirmung,
Symmetrierung und weitere schaltungs- und bautechnische Maßnahmen, Lübeck, März 1995

Kistenmacher P., Kimmel M. und Schwab A. 1995,
Schindämpfung inhomogener Metallgehäuse beliebiger Kontur in quasistationären Magnetfeldern,
Electrical Engineering 78, 339-344

Kistenmacher P. und Schwab A. 1996,
Schindämpfung mehrschichtiger und mehrwandiger Schirmgehäuse im quasistationären Magnetfeld,
Electrical Engineering 79, 417-427

Kohling A. und Zimmer G. 1993, •
Beeinflussung von Bildschirmarbeitsplätzen durch Magnetfelder,
etz Bd. 114, Heft 12, 758-763

- Morgan G. M. 1989,
Electric and Magnetic Fields from 60 Hertz Power: What do we know about possible health risks?,
Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA
- Morgan G. M. 1992,
(1) Measuring Power-Frequency Fields
(2) What Can We Conclude from Measurements of Power-Frequency Fields?
Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA
- Neitzke H.-P. 1996,
Vorsorgender Umwelt- und Gesundheitsschutz durch umsichtige Vermeidung elektromagnetischer Expositionen,
in: Weingarten J., Probleme mit Elektromog? Gesundheit, Sicherheit und Gesetzgebung in der Diskussion über elektromagnetische Felder, Fachtagung der Zukunftsinitiative Rheinland-Pfalz, 6. Dezember 1996
- Neitzke H.-P., van Capelle J., Depner K., Edeler K. und Hanisch T. 1994,
Risiko Elektromog? Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Gesundheit und Umwelt, Birkhäuser, Basel
- Newi G. 1995,
Konsequenzen der Festlegung von Feld-Grenzwerten auf die Praxis der Stromversorgung,
Elektrizitätswirtschaft Jg. 94, Heft 21, 1336-1341
- Newman E.H. und Kragalott M. 1995,
Moment Method Analysis of the Electric Shielding Factor of a Conducting TM Shield at ELF,
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Vol. 37, No. 3, 400-408
- Olsen R. G. und Moreno P. 1996,
Some Observations About Shielding Extremely Low-Frequency Magnetic Fields by Finite Width Shields,
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Vol. 38, No. 3, 460-468
- Rikitake T. 1987,
Magnetic and Electromagnetic Shielding,
Terra Scientific Publishing Company, Tokio
- Stamm A. 1993,
Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme, Band 3: Untersuchungen zur Magnetfeldexposition der Bevölkerung im Niederfrequenzbereich,
vde-verlag, Berlin
- Tekin I. und Newman E.H. 1996,
Moment Method Analysis of the Magnetic Shielding Factor of a Conducting TM Shield at ELF,
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Vol. 38, No. 4, 585-590
- VZN - Verbraucherzentrale Niedersachsen - (Hrsg.) 1996,
Wir reden von Elektromog,
Informationsbroschüre, Reihe Gesundheit und Umwelt
- Wertheimer N., Savitz D., Leeper E. 1995,
Childhood Cancer in Relation to Indicators of Magnetic Fields From Ground Current Sources,
Bioelectromagnetics 1995, 16:86-96
- Wiedemann P. 1992,
Risikokommunikation von Unternehmen: Kontexte, Rahmen und Abwehrmechanismen,
Arbeiten zur Risikokommunikation Heft 35, Forschungszentrum Jülich

Kap. 5

Anger G. 1992

Gesetzgeberische Möglichkeiten am Beispiel der skandinavischen Länder,
BfS/SSK-Symposium "Wirkungen niederfrequenter Felder", München-Neuherberg, 3. u. 4. Dezember 1992

Anger G. 1993a

50 Hz Magnetfelder. Gesetzgeberische Möglichkeiten auf dem Gebiet der nichtionisierenden Strahlung und Handlungsprogramm in Schweden,
Statens Stralskyddsinstitut, Stockholm

Anger G. 1993b

50 Hz Magnetfelder: Handlungsprogramm in Schweden,
"Internationales Elektromog-Hearing", Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover, 16. September 1993

Bauhofer P. 1993,

Handbuch für Hochspannungsleitungen,
Verband der Elektrizitätswerke Österreichs, Wien

Brakelmann H. 1996,

Magnetfeldreduktion durch Zusatzleiter in Energiekabeltrassen,
Elektrizitätswirtschaft, Jg.95 (1996), Heft 5:274-279

Gramer B. S. 1996,

Which Transmission Line Emits the Lowest EMF?

Transmission and Distribution World, November 1996: 46-52

Dunnam C.R., Coffman D.M., Crepeau R.-H., Henderson C.P., Winter D.M., Hall L.D. 1995,
Progress Report Describing Large-Volume E.L.F. Magnetic Field Compensation Research & Development Project,

The Annual Review of Research on Biological Effects of Electric and Magnetic Fields From the Generation, Delivery and Use of Electricity,

U.S. Department of Energy, U.S. Environmental Protection Agency, Electric Power Research Institute und New York State Department of Public Service, Palm Springs, California, 12.-16. November 1995

Gourdon C.G. 1993,

Efforts of French Railroads to Reduce Traction Electromagnetic Fields, in:

Blank M.: Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, San Francisco Press, San Francisco

König H. L. und Folkerts E. 1992,

Elektrischer Strom als Umweltfaktor,
Pflaum Verlag, München

Kegel R. 1997,

Berechnungs- und Ausgabebeispiele aus dem Bereich der Hochspannungsnetze und des Freileitungsbaues (Visual-EMFP 4.5 / 2D und 3D-Vollversion),
Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit GmbH (IEV), Lübeck

Major M. und March D. 1993,

The Magnetic Fields from Current Carrying Wires Can Be Reduced by Putting Them in Conduit,

The Annual Review of Research on Biological Effects of Electric and Magnetic Fields From the Generation, Delivery and Use of Electricity,

U.S. Department of Energy, U.S. Environmental Protection Agency, Electric Power Research Institute und New York State Department of Public Service, Savannah, Georgia, 3. Oktober - 4. November 1993

Neitzke H.-P., van Capelle J., Depner K., Edeler K. und Hanisch T. 1994,

Risiko Elektromog? Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Gesundheit und Umwelt, Birkhäuser, Basel

Neitzke H.-P. und Voigt H. 1995,
Vermessung der magnetischen Felder von elektrischen Geräten,
ECOLOG-Institut, Hannover

Neitzke H.-P. und Voigt H. 1996,
Vermessung der magnetischen Felder von elektrischen Geräten,
ECOLOG-Institut, Hannover, in Zusammenarbeit mit der Verbraucherzentrale Niedersachsen

Stewart J.R., Dale S.J., Klein K.W. 1993
Magnetic Field Reduction Using High Phase Order Lines,
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No.2, April 1993: 628-636

WSDH 1992,
Washington State Department of Health, The Electric Transmission Research Needs Task Force,
Electric and Magnetic Field Reduction: Research Needs,
WSDH; Seattle

Teil 2

Darstellung und Bewertung von
Maßnahmen zur Vermeidung und
Verminderung der Belastungen
durch
elektrische und magnetische Felder
im
Hochfrequenz-Bereich sowie für
statische Felder und Gleichfelder

ausgearbeitet vom

Institut für Mobil- und
Satellitenfunktechnik IMST GmbH,
Kamp-Lintfort

Projektkoordination am IMST

Dr. Christian Bornkessel
Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH
Abteilung Elektromagnetische Verträglichkeit und Umweltaspekte (EMVU)
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2
47475 Kamp-Lintfort
Tel: 02842-981.383
Fax: 02842-981.398 E-
Mail:
bornkessel@imst.de

Inhaltsverzeichnis

1 Minderungsmaßnahmen im Hochfrequenzbereich.....	2
1.1 Einleitung.....	2
1.2 Abgrenzung und Merkmale des HF-Bereichs.....	2
1.3 Strahlungsquellen im Hochfrequenzbereich.....	3
1.4 Prinzipielle Minderungsmaßnahmen.....	6
1.4.1 Abschirmung.....	6
1.4.2 Dämpfung.....	7
1.4.3 Einhaltung von Sicherheitsabständen.....	11
1.4.4 Lageveränderungen/ konstruktive Veränderungen.....	11
1.4.5 Kennzeichnung / Aufklärung.....	11
1.5 Demonstration von Maßnahmen an Beispielen.....	12
1.5.1 Computermonitore und Fernseher.....	12
1.5.2 Rundfunk- und Fernsehsendeanlagen.....	13
1.5.3 Mobilfunkbasisstationen und Handies	15
1.5.4 Sonstiges.....	18
1.5.5 Wundermittel gegen Elektrosmog.....	20
2 Minderungsmaßnahmen für statische Felder und Gleichfelder	21
2.1 Statische und Gleichfeldquellen.....	21
2.2 Prinzipielle Minderungsmaßnahmen.....	22
2.3 Minderungsmaßnahmen für elektrostatische Felder	24
3 Zusammenfassung.....	25
Literatur	26

I Minderungsmaßnahmen im Hochfrequenzbereich

1.1 Einleitung

Im Gegensatz zu den zahlreich vorhandenen, praxisorientierten Minderungsmaßnahmen im Niederfrequenzbereich (Teil 1) sind in der Literatur Minderungsmaßnahmen für den Hochfrequenzbereich nur sehr allgemeingültig und zahlenmäßig eher schwach zu finden. Das liegt zum einen daran, dass die diesbezügliche Forschung im NF-Bereich sehr viel älter als im HF-Bereich ist und das damit verbundene Problembewusstsein im HF-Bereich sich noch nicht so stark ausgebildet hat. Dieses hat erst in den letzten Jahren aufgrund der Diskussionen um Mobilfunkanlagen einen erheblichen Aufschwung erfahren. Zum anderen werden Hochfrequenzanlagen überwiegend dazu verwendet, durch zielgerichtete *Abstrahlung* von elektromagnetischen Wellen Informationen zu übertragen. Beispiele hierfür sind Rundfunk-, Fernseh- und Mobilfunkanlagen. D.h., dass hier eine Abstrahlung von elektromagnetischer Energie in die Umgebung ein gewollter Effekt ist und nicht, wie z.B. bei Hochspannungsleitungen oder Transformatoren im Niederfrequenzbereich, eine störende und ungewollte Nebenwirkung. Insofern macht es im HF-Bereich meist wenig Sinn, die Emission direkt an der Quelle durch Reduzierung der Sendeleistung, Abschirmung oder konstruktive Veränderung zu minimieren. Damit können viele der im NF-Bereich erprobten Minderungsmaßnahmen hier von vornherein keine Anwendung finden.

Trotzdem sind auch im Hochfrequenzbereich Maßnahmen zur Minderung der elektromagnetischen Belastung notwendig und sinnvoll. Da aber, wie eingangs erwähnt, nur vergleichsweise wenig Angaben in der relevanten Literatur zu finden sind, werden in diesem Berichtsteil auch eigene Entwicklungen und Berechnungen des Instituts für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH präsentiert.

1.2 Abgrenzung und Merkmale des HF-Bereichs

Die Abgrenzung des hochfrequenten elektromagnetischen Strahlungsbereiches ist in der Literatur nicht einheitlich. In diesem Bericht soll darunter der Frequenzbereich zwischen 30 kHz und 300 GHz verstanden und im weiteren untersucht werden. Oft wird der Teilbereich von 30 kHz bis 300 MHz als eigentlicher *Hochfrequenzbereich* bezeichnet und der Frequenzbereich zwischen 300 MHz und 300 GHz als *Mikrowellenbereich*. Im folgenden ist aber mit der Bezeichnung *HF-Bereich* der beide Teilbereiche umfassende Frequenzbereich gemeint. Grundsätzlich handelt es sich dabei um nichtionisierende Strahlung.

Bezüglich der Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Energie unterscheidet sich der HF-Bereich vom NF-Bereich vor allem dadurch, dass ab einer gewissen Frequenzschwelle, die oft mit 30 MHz angegeben wird, elektrische Felder nicht mehr losgelöst von magnetischen Feldern existieren. Beide sind miteinander verkoppelt und bilden eine elektromagnetische Welle, die sich im Raum ausbreitet. Dämpft man eine Feldkomponente, so verringert sich in der Regel auch die Größe der anderen Feldkomponente. Das ist der Grund, dass man im HF-Bereich durch metallische, aber niederpermeable Materialien nicht nur die elektrische, sondern auch die magnetische Feldkomponente wirksam abschirmen kann.

Durch elektromagnetische Wellen wird Energie transportiert. Ein Maß für die Intensität der elektromagnetischen Energie ist die Leistungsflussdichte S . Diese setzt sich aus den elektrischen (E) und magnetischen (H) Feldkomponenten zusammen und bezeichnet die durch eine Flächeneinheit hindurch tretende Strahlungsleistung:

$$S = E \times H . \quad (1.1)$$

Die Leistungsflussdichte wird in der Literatur mit den Einheiten W/m^2 und mW/cm^2 angegeben. Es ist

$$1 \text{ mW/cm}^2 = 10 \text{ W/m}^2 . \quad (1.2)$$

Die Abstrahlung einer elektromagnetischen Welle von einem Gerät erfolgt i.a. von einer Antenne, wobei auch Geräteschlitze und Öffnungen als solche aufgefasst werden können. Je kleiner die Wellenlänge im Verhältnis zu der Antennengröße wird (d.h. bei steigender Frequenz), desto mehr wird die Energie nicht mehr gleichmäßig, sondern in einzelne Raumrichtungen bevorzugt bzw. gebündelt abgestrahlt. Man spricht hier von einer Richtwirkung. Beispiele für stark bündelnde Antennen sind Parabolantennen für Richtfunkstrecken oder auch Sendeantennen für Mobilfunkbasisstationen.

Die Stärke der Bündelfähigkeit einer Antenne wird als Gewinn G bezeichnet und oft als logarithmisches Maß in dB angegeben. In Richtung der stärksten Bündelung (Hauptstrahlrichtung) ist die von einer stark bündelnden Antenne erzeugte Leistungsflussdichte größer als die von einer schwach bündelnden. Insofern ist die alleinige Angabe der Sendeleistung einer Antenne zur Beurteilung der von ihr erzeugten Leistungsflussdichte nicht mehr hinreichend. Man bedient sich hier einer bewerteten Größe, der äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP). Die EIRP gibt an, mit welcher Sendeleistung man eine in alle Raumrichtungen gleichmäßig abstrahlende Antenne (isotroper oder Kugelstrahler) speisen müsste, um im Fernfeld dieselbe Leistungsflussdichte zu erzeugen wie in Hauptstrahlrichtung einer bündelnden Antenne. Die EIRP berechnet sich aus der Sendeleistung P und dem (isotropen) Gewinn G_i :

$$EIRP = P \cdot G_i . \quad (1.3)$$

Oft wird in der Literatur auch die äquivalente Strahlungsleistung ERP angegeben. Hierbei wird die bündelnde Antenne nicht mit dem Kugelstrahler, sondern mit einem schwach bündelnden Halbwellendipol bewertet. Der isotrope Gewinn des Halbwellendipols ist

$$G_i = 1,64 = 2,15 \text{ dBi} . \quad (1.4)$$

Somit lassen sich äquivalente isotrope und effektive Strahlungsleistung ineinander umrechnen:

$$ERP = EIRP - 1,64 . \quad (1.5)$$

Die Eigenschaften des abgestrahlten Feldes hängen darüber hinaus auch von der Entfernung des Betrachters von der Antenne ab. Als Fernfeld wird jener Bereich bezeichnet, in dem der

Abstand zur Antenne groß gegenüber der Wellenlänge der Strahlung ist. Hier stehen elektrische und magnetische Feldstärke senkrecht aufeinander und transversal zur Ausbreitungsrichtung der Welle. E und H schwingen gleichphasig und sind über den Feldwellenwiderstand Z ineinander umrechenbar. Im Nahfeld ist das Strahlungsfeld sehr inhomogen und stark von der genauen Entfernung zur Antenne abhängig. Die elektrischen und magnetischen Feldstärkekomponenten sind nicht in Phase, stehen nicht senkrecht aufeinander und sind nicht durch einen an jedem Ort gleichen Feldwellenwiderstand miteinander verbunden. Im Nahfeld nehmen E und H mit steigendem Abstand zur Antenne sehr viel schneller ab als im Fernfeld. Die Feldabnahme ist im Fernfeld umgekehrt proportional zum Abstand zur Antenne $1/r$, im Nahfeld hingegen proportional $1/r^2$ und $1/r^3$. Die unterschiedliche Feldabnahme erklärt die verschiedene Wirksamkeit möglicher Immissionsminderungsmaßnahmen durch Einhaltung von Schutzabständen zur Strahlungsquelle.

1.3 Strahlungsquellen im Hochfrequenzbereich

Im HF-Bereich existiert eine Vielzahl von natürlichen und künstlichen Strahlungsquellen. Tabelle 1.1 gibt einen (nicht vollständigen) Überblick.

Relevante Strahlungsquellen in Bezug auf die Stärke der Abstrahlung und die Nähe zu Personen sind Quellen an industriellen Arbeitsplätzen (Trocknungsanlagen, HF-Schweißanlagen, Induktionsöfen und Funkerosionsanlagen), Radar-, Fernseh- und Rundfunksender und wegen ihres extrem geringen Abstands zum menschlichen Körper auch mobile Funkanlagen wie Mobilfunkhandies. In der Bevölkerung besonders stark diskutiert werden, wahrscheinlich wegen ihrer weithin sichtbaren Antennen, vor allem Rundfunk- und Fernsehsender sowie Basisstationen für die Mobilfunksysteme C-, D- und E-Netz und weitere mobile Kommunikationsdienste. Letztere verfügen zwar über sehr viel geringere Leistungspegel als Rundfunk- und TV-Sender, sind aber sehr viel zahlreicher und systembedingt meistens mitten in bevölkerungsreichen Wohngebieten errichtet.

Tabelle 1.2 [1-5] gibt einen Überblick über typische Sendeleistungen und typische Immissionswerte (Leistungsflussdichten) in möglichen Aufenthaltsbereichen von Personen. Grundsätzlich kann man bei vorausgesetzter Kenntnis der Sendeleistung und dem Antennengewinn G , (bzw. bei Kenntnis von EIRP oder ERP) die Leistungsflussdichte S im Abstand r von der Antenne selber abschätzen:

$$S = PG / 4\pi r^2 \quad (1.6)$$

Diese Beziehung gilt streng genommen nur für das in Hauptstrahlrichtung maximale Feld bei Freiraumausbreitung. Soll die Leistungsflussdichte in einer nicht in Hauptstrahlrichtung liegenden Richtung ermittelt werden, muss aus dem Richtdiagramm der Antenne der Gewinn der Sendeantenne in dieser gewünschten Richtung entnommen und in Gl. (1.6) eingesetzt werden. Diese Gleichung liefert brauchbare Anhaltspunkte für die zu erwartenden Leistungsflussdichten, wobei die in der Realität auftretenden Werte sowohl durch Reflexion an Objekten in der Nähe des Übertragungsweges (Häuser, Erdboden) größer, als auch durch Dämpfung von im Ausbreitungsweg zwischen Sender und Empfänger liegenden Objekten (Wald, Häuser) kleiner sein können.

Die im Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion stehenden Rundfunk- und TV-Sender, Mobilfunkbasisstationen sowie Mobilfunkhandies werden bei der Vorstellung der Minderungsmaßnahmen in Abschnitt 1.5 besonders untersucht.

Einteilung	Anlage / Quelle	Bemerkung
natürlich	atmosphärische Entladungen	Langwellenbereich
	Temperaturstrahlung warmer Körper (Sonnenstrahlung, Sonneneruption, Mondstrahlung, thermisches Rauschen von Planeten und Materie im Weltall)	vergleichsweise sehr geringe Emissionen
künstlich		
Industrie / Arbeitsplatz	Trocknungsanlagen	hohe Emissionen
	HF-Schweißanlagen	hohe Emissionen
	Induktionsöfen	hohe Emissionen
	Funkerosionsanlagen	hohe Emissionen
	Diathermiegeräte	Medizin; hohe Emissionen, 1.5.4
	Diebstahlsicherungsanlagen	
	Türöffnungsanlagen	
	Computerbildschirme	1.5.1
	Funkgeräte	1.5.3
	Abstandswarnradar	Kfz
	Hochspannungsleitungen	Koronaentladungen
Haushalt	Mikrowellengeräte	Strahlung nur innerhalb, 1.5.4
	Walkie-Talkies	
	drahtlose Wechselsprechanlagen	
	Alarmanlagen	
	Handies	in Kopfnähe betrieben, 1.5.3
	schnurlose Telefone / DECT	- .. - , aber geringe Leistung
	Fernseher	1.5.1
	Computermonitore	1.5.1
Funkanlagen	Rundfunksender	hohe Emissionen, 1.5.2
außerhalb des Haushalts	Fernsehsender	hohe Emissionen, 1.5.2
	Sendeanlagen von Funkamateuren	1.5.4
	Radaranlagen	sehr hohe Emissionen
	Satellitenfunkanlagen	starke Emissionen, aber weit entfernt
	Flughafenfunk und Instrumentenlandesystem	
	Richtfunkanlagen	stark gebündelter Strahl
	Mobi 1 funkbasisstationen	besonders stark diskutiert, 1.5.3
	Basisstationen weiterer mobiler Funkdienste	Funkruf, Datenfunk, Bündelfunk, schnurlose Telekommunikationsanl.

Tabelle 1.1 Übersicht über Strahlungsquellen im Hochfrequenzbereich

Anlage	Frequenz	Leistung	Leistungsflussdichte bei		
			Abstand	W/m ²	Bemerkung
Rundfunk LW	148 kHz-255 kHz	bis 2 MW			
Rundfunk MW	526kHz-1,6MHz	bis 1,2 MW	500m 100m	0,1 10 10	100 kW 400 kW
Rundfunk KW	3,4 MHz-26 MHz	bis 500 kW	900m	0,014	3x150 kW
Rundfunk UKW	88MHz-108MHz	bis 100 kW	1,5 km	<0,05 10 ⁻¹³	Durchschnitt
TV Band I	47 MHz-68 MHz	bis 100 kW	1,5 km	<0,05	
TV Band III	174MHz-223MHz	bis 100 kW	1,5 km	<0,05	
TV Band IV/V	470 MHz-790 MHz	bis 500 kW			
Mobilfunk					
C Netz Basisst.	460 MHz-465 MHz	bis 25 W EIRP			
C-Netz Mobilteil	451 MHz-455MHz	0,75-15 W EIRP			
D-Netz Basisst.	935 MHz-960 MHz	20-50 W			
D-Netz Mobilteil	890MHz-915MHz	0,8-8 W, Handy typ. < 2 W			
D-Netz Richtfunk	26GHz	5 mW, 35 dBi		0,25 2,5x10 ⁻⁷	vor Sender Empfänger
E-Netz Basisst.	1,805-1,88 GHz	10-20 W			
E-Netz Mobilteil	1,71-1,785 GHz	0,25-1 W			
Schnurl. Telefon	800 MHz-1 GHz	typ. 10 mW			CT1/2, CTR
- ,, - DECT	1,88 GHz- 1,9 GHz	typ. 10 mW			
Bündelfunk	4 10-430 MHz	typ. <10 W			Chekker, TETRA (dig.)
Betriebsfunk	27 MHz-...	1-10W			
Funkamateure	1,8 15- 1300 MHz	max 750 W, typ. 100 W	10m	0,4	14 MHz, 100 W
Flugüber- wachungs- und Militärradar	1 GHz- 10 GHz	bis 16GW ERP (Spitze), bis 33 MW ERP	einige m vor Ant.	bis 10000 n* 10	in Haupt- strahlrichtung in Umgebung
Diathermie	27, 12 MHz			n* 1000 250	Patient Personal und unbehandelte
Dielektrische Erwärmung	11 MHz-50 MHz			bis 2000	am Ort der Bediennerson
Plastikschweißen	27, 12 MHz	bis 200 kW, typ. 10 kW		300 800	Körper Hände

Tabelle 1.2 Typische Sendeleistungen und Immissionswerte von Hochfrequenzanlagen

1.4 Prinzipielle Minderungsmaßnahmen

Grundsätzlich kommen zur Immissionsminderung folgende Maßnahmen in Betracht, die in Abschnitt 1.2 aus den spezifischen Eigenschaften hochfrequenter Felder herausgearbeitet wurden:

- Abschirmung,
- Dämpfung,
- Einhaltung von Sicherheitsabständen,
- Lageveränderungen / konstruktive Veränderungen,
- Kennzeichnung / Aufklärung.

1.4.1 Abschirmung

Anders als im Niederfrequenzbereich lassen sich im Hochfrequenzbereich durch gut leitende, metallische Anordnungen elektrische und magnetische Felder wirksam abschirmen. Anwendung findet diese Technik vor allem bei der Gehäuseschirmung elektrischer und elektronischer Geräte oder bei abhörsicheren Räumen.

Abschirmungen sind von ihrer Wirksamkeit her sinnvoller an der Strahlungsquelle anzusetzen als am Empfänger. Dies macht jedoch nur Sinn bei Anlagen, bei denen die Abstrahlung hochfrequenter Energie in die Umgebung eine ungewollte, störende Nebenwirkung ist, und nicht, wie z.B. bei Funkanlagen zur Informationsübertragung, der eigentliche Zweck der Einrichtung. Für Funkanlagen ist es deswegen sinnvoller, den u.U. stark belasteten Empfänger zu schirmen.

Eine von ihren Ausdehnungen im Verhältnis zur Wellenlänge der Strahlung große Metallplatte leistet nur bedingt gute Abschirmwirkungen (Teilabschirmung). Durch Beugung an den Rändern der Platte und durch umlaufende Wellen ist der optisch im Schatten liegende Rückraum der Platte nicht völlig feldfrei. Eine wirkungsvolle Abschirmung wird erst dadurch erreicht, dass der abzuschirmende Bereich völlig mit einer Metallschicht umgeben wird (Vollabschirmung). Alle Teile dieser u.U. aus einzelnen Metallplatten bestehenden Schirmhülle müssen elektrisch gut miteinander verbunden sein. Schlitze (an Türen) und Löcher (z.B. für Belüftung) sind potentielle Schwachstellen und müssen in ihren Abmaßen klein gegenüber der Wellenlänge sein, um die Schirmwirkung nicht merklich zu degradieren. So führen z.B. Löcher in einer Schirmanordnung, die wesentlich größer als 1 cm sind, zur einer deutlichen Verringerung der Schirmwirkung bezüglich der Abschirmung einer E-Netz-Mobilfunkanlage bei der Frequenz 1,9 GHz (Wellenlänge 16 cm).

Neben einer guten elektrischen Kontaktierung und der Vermeidung von Störstellen wie Löcher und Schlitze ist auch die Leitfähigkeit des Schirmmaterials von Bedeutung. Je höher die elektrische Leitfähigkeit, desto besser ist i.A. die Schirmwirkung; mit einer Aluminiumfolie wird man weniger effektiv schirmen können als mit hochwertigem Stahl, Kupfer oder sogar Goldschichten. Wichtig ist weiterhin eine fachmännisch vom Elektriker ausgeführte Erdung. Fehlt diese oder ist sie unfachmännisch ausgeführt, können durch Wirken der Metallteile als Antenne sogar feldverstärkende Effekte auftreten. Beispiel für eine Abschirmung im Wohnbereich sind alukaschierte Dämmsysteme im Dachbereich, deren Alufolien untereinander elektrisch leitend verbunden und an einer Stelle sachgerecht geerdet werden müssen [2].

Professionelle Abschirmungen werden sowohl in massiver Bauform (Stahlblechkabinen), als auch als Folien und Tapeten angeboten. Gerade letztere eignen sich hervorragend bei der nachträglichen Auskleidung bestehender Gebäude und finden heutzutage Einsatz in elektronischen Laboren oder medizinischen Sicherheitsbereichen, bei denen eine Störung komplizierter, u.U. lebenserhaltender, elektronisch gesteuerter Systeme durch äußere elektromagnetische Felder fatale Wirkungen hätte.

Die Wirksamkeit von Schirmeinrichtungen wird durch die Schirmdämpfung angegeben. So bedeuten 40 dB Schirmdämpfung, dass die Schirmung eine Effizienz von 10^4 hat, dass also die Leistungsflussdichte im geschirmten Bereich nur 1 Promille derjenigen beträgt, die an gleicher Stelle ohne Vorhandensein der Schirmhülle vorhanden wäre. Typische Schirmdämpfungswerte von massiven Schirmungen (Schirmkabine aus 2 mm dicken, verzinkten Stahlblechen inkl. Türen) und Schirmungsfolien (Kupfervlies "Flectron") sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Frequenz	Feldkomponente	Dämpfung in dB bei	
		Stahlblech	Folie
10 kHz	magnetisch	80	keine Angabe
100 kHz	magnetisch	100	keine Angabe
1 MHz	magnetisch	110	keine Angabe
100 MHz	elektrisch	100	80
1 GHz	ebene Welle	100	100
10 GHz	ebene Welle	100	100
20 GHz	ebene Welle	100	100

Tabelle 1.3 Typische Schirmdämpfungswerte für Stahlblech- und Folienschirmungen

Folien- bzw. Gewebeabschirmungen werden in Deutschland unter dem Namen "Flectron" von der Fa. EMC-Technik&Consulting GmbH, Stuttgart und unter dem Namen "Shieldex" von der Fa. Siemens AG Bereich Anlagentechnik vertrieben. Für massive Stahlblechkabinen existieren eine Reihe von Anbietern, vorrangig aus der klassischen EMV-Technik. Massive Stahlschirmungen kosten 350 DM/m², Kupferschirmfolien zwischen 100 und 150 DM/m² (jeweils verlegt). Kostenintensiv sind Spezialelemente wie geschirmte Türen und Fenster. Hinzu kommen noch Filter, Durchführungen und ggf. Anschlüsse für Klimaanlage.

1.4.2 Dämpfung

Eine Vielzahl von Baustoffen hat die Eigenschaft, elektromagnetische Strahlung beim Durchgang zu dämpfen bzw. zu reflektieren. Dieses ist insbesondere bei der Reduzierung der Belastung von außerhalb des Haushaltes installierten Strahlungsquellen wie Rundfunk- oder Fernsehsendern von Interesse.

Zuverlässige Dämpfungswerte sind in der Literatur allerdings so gut wie nicht zu finden. Das liegt zum einen daran, dass erst in jüngster Vergangenheit diese Problematik in Zusammenhang mit der Sicherstellung von Mobilfunkverbindungen in Gebäuden (in-house Versorgung) untersucht wurde. Andererseits sind Dämpfungen erst bei sehr hohen Frequenzen unter Verwendung von stark

bündelnden Antennen mit zufriedenstellender Genauigkeit zu messen. Für den relevanten Rundfunk-, TV- und Mobilfunkbereich finden sich lediglich einige Werte der dielektrischen Eigenschaften von Baustoffen [6-9], die aber aufgrund von Messunsicherheiten auch mit Fehlern behaftet sind. Diese sind in Tabelle 1.4 zusammengefasst.

	Dielektrische Eigenschaften	
Baustoff	ϵ_r / $\tan \delta$	
Beton	8	0,1
Gasbeton	1,7	0,2
Leichtbeton	2	0,25
Rigips	6	0,1
Holz	2,5	0,02
Fensterglas	6	0,008
Mineralfaserwolle	1,1	0,01
Schaumglaswolle	1,2	0,08
Kunststoff	4	0,1
Polyester	3,2	0,003
GFK	1,6	0,006

Tabelle 1.4 Dielektrische Parameter von Baumaterialien

Aus den dielektrischen Parametern wurden, mangels Vorhandensein der Dämpfungswerte in der Literatur, extra für vorliegendes Projekt die Dämpfungswerte für verschiedene Baumaterialien nach [10] errechnet. Die berechneten Werte können trotz der Unsicherheit der Ausgangsparameter gut als Anhaltspunkte für praktische Minderungsmaßnahmen verwendet werden. In den Tabellen 1.5-1.8 sind für die Frequenzbereiche Rundfunk, TV, Mobilfunk C-, D- und E-Netz die berechneten Dämpfungswerte aufgelistet. Hierbei wird jeweils zwischen senkrechtem und schrägem Einfall (45°) unterschieden. Bei schrägem Einfall lassen sich in der Regel größere Dämpfungen erreichen als bei senkrechtem Einfall. Für alle Berechnungen wurden die dielektrischen Parameter nach Tabelle 1.4 als konstant über der Frequenz angesehen; eventuell vorhandene Frequenzdispersionen durch Relaxationsvorgänge im gegebenen Frequenzbereich wurden nicht berücksichtigt.

Wie aus den Ergebnissen ersichtlich ist, führen dickere Wände nicht automatisch zu erhöhten Dämpfungen. Wechselwirkungen bei Resonanz der Wellenlänge der durchdringenden elektromagnetischen Welle mit der Wanddicke können die Verhältnisse teilweise umkehren.

Größere Dämpfungen als angegeben lassen sich mit Materialien erreichen, die Metall beinhalten. Beispiele hierfür sind metallbeschichtete Fenster oder Armierungsgeflechte von Stahlbeton. Sind die Maschen des Geflechtes klein genug im Vergleich zur Wellenlänge, liegen die Dämpfungswerte im Bereich größer 10 dB. Dünne, nichtmetallische Zusatzvorrichtungen wie Plastikjalousien hingegen haben keinen meßbaren Dämpfungseinfluss.

Frequenz 100 MHz (UKW-Rundfunk)								
Baustoff	Dämpfung in dB bei senkrechtem Einfall (0°) auf Wand der Dicke				Dämpfung in dB bei schrägem Einfall (45°) auf Wand der Dicke			
	1 cm	5 cm	10cm	20cm	1 cm	5 cm	10cm	20cm
Beton	0	1	2	4	0	1	3	6
Gasbeton	0	0	0	0	0	0	0	1
Leichtbeton	0	0	0	1	0	0	0	1
Rigips	0	0	1	3	0	1	2	4
Holz	0	0	0	0	0	0	0	1
Fensterglas	0	0	1	2	0	0	2	4
Mineralfaserwolle	0	0	0	0	0	0	0	0
Schaumglaswolle	0	0	0	0	0	0	0	0
Kunststoff	0	0	0	1	0	0	1	2
Polyester	0	0	0	0	0	0	0	1
GFK	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 1.5 Dämpfungswerte unterschiedlicher Baustoffe, Frequenz 100 MHz

Frequenz 500 MHz (TV, Mobilfunk C-Netz, Bündelfunk)								
Baustoff	Dämpfung in dB bei senkrechtem Einfall (0°) auf Wand der Dicke				Dämpfung in dB bei schrägem Einfall (45°) auf Wand der Dicke			
	1 cm	5 cm	10cm	20cm	1 cm	5 cm	10cm	20cm
Beton	1	4	2	4	1	6	3	5
Gasbeton	0	1	1	2	0	1	2	3
Leichtbeton	0	1	2	3	0	1	3	4
Rigips	0	3	2	4	1	5	4	6
Holz	0	0	1	0	0	1	2	0
Fensterglas	0	3	1	3	0	5	3	5
Mineralfaserwolle	0	0	0	0	0	0	0	0
Schaumglaswolle	0	0	0	1	0	0	0	1
Kunststoff	0	2	2	3	0	3	4	4
Polyester	0	1	1	0	0	2	3	0
GFK	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 1.6 Dämpfungswerte unterschiedlicher Baustoffe, Frequenz 500 MHz

Frequenz 900 MHz (Mobilfunk D-Netz)								
Baustoff	Dämpfung in dB bei senkrechtem Einfall (0°) auf Wand der Dicke				Dämpfung in dB bei schrägem Einfall (45°) auf Wand der Dicke			
	1 cm	5 cm	10cm	20cm	1 cm	5 cm	10cm	20cm
Beton	2	2	5	7	3	4	7	9
Gasbeton	0	1	2	4	0	2	>	5
Leichtbeton	0	2	3	6	0	3	4	7
Rigips	1	3	4	5	2	4	6	6
Holz	0	1	0	0	0	2	1	2
Fensterglas	1	2	3	0	1	4	5	2
Mineralfaserwolle	0	0	0	0	0	0	0	0
Schaumglaswolle	0	0	0	1	0	0	1	2
Kunststoff	0	2	2	4	1	4	>	5
Polyester	0	1	0	0	0	3	0	0
GFK	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 1.7 Dämpfungswerte unterschiedlicher Baustoffe, Frequenz 900 MHz

Frequenz 1800 MHz (Mobilfunk E-Netz)								
Baustoff	Dämpfung in dB bei senkrechtem Einfall (0°) auf Wand der Dicke				Dämpfung in dB bei schrägem Einfall (45°) auf Wand der Dicke			
	1 cm	5 cm	10cm	20cm	1 cm	5 cm	10cm	20cm
Beton	4	5	7	11	5	7	9	13
Gasbeton	0	2	4	8	1	3	5	10
Leichtbeton	1	3	6	12	1	4	7	14
Rigips	2	4	5	9	4	6	6	11
Holz	0	0	0	1	0	1	2	3
Fensterglas	2	3	0	1	4	5	2	5
Mineralfaserwolle	0	0	0	0	0	0	0	0
Schaumglaswolle	0	0	1	3	0	1	2	4
Kunststoff	1	2	4	7	2	3	5	9
Polyester	0	0	0	1	1	0	0	0
GFK	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabelle 1.8 Dämpfungswerte unterschiedlicher Baustoffe, Frequenz 1800 MHz

1.4.3 Einhaltung von Sicherheitsabständen

In den Abschnitten 1.2 und 1.3 wurden bereits Abschätzungen erläutert, wie sich bei vorgegebenen Parametern der Sendeanlage die zu erwartenden Immissionswerte berechnen lassen. Da die Feldstärken bzw. die Leistungsflussdichten bei zunehmendem Abstand von der Quelle stetig abnehmen, ist eine Vergrößerung des Abstandes von der Quelle bzw. das Einhalten vorgegebener Sicherheitsabstände eine mögliche Minderungsmaßnahme. Als einfache Regel der Expositionsminderung im Fernfeld einer Strahlungsquelle kann dienen, dass sich bei Verdopplung des Abstands die Feldstärke halbiert bzw. die Leistungsflussdichte nur noch ein Viertel des ursprünglichen Wertes beträgt. Inwiefern eine Abstandsvergrößerung einfach zu realisieren bzw. sinnvoll ist (Beispiel Mobilfunkhandy), hängt dabei vom konkreten Fall ab.

1.4.4 Lageveränderungen / konstruktive Veränderungen

Im HF-Bereich besteht im Gegensatz zum NF-Bereich die Möglichkeit, den bei höheren Frequenzen zunehmenden Bündelungseffekt von Antennen bei der Abstrahlung elektromagnetischer Wellen zu nutzen. Hierdurch ist zumindest theoretisch die Möglichkeit gegeben, durch Lageänderung der Antenne die Hauptstrahlrichtung so zu drehen bzw. zu verschieben, dass der Hauptstrahl nicht durch Häuser bzw. bewohnte Gebiete verläuft. Bei Richtfunkstrecken wird dies von vornherein bei der Planung der Anlage berücksichtigt, da jedes Hindernis zwischen Sende- und Empfangsantenne den Pegel der zu übertragenden Information mindert (s. Abschnitt 1.4.2). Gerade bei stärker bündelnden Antennen werden die Bereiche größer, in die nahezu keine Energie mehr abgestrahlt wird. Bei Parabolantennen sind dies vorrangig die rückwärtigen Bereiche. In diesen Richtungen werden messbare Expositionen nur noch in direkter Nähe der Antenne, d.h. im Nahfeld, auftauchen, da sich hier die Richtcharakteristik der Antenne noch nicht voll ausgeprägt hat.

Grundsätzlich gilt, dass in Bereichen außerhalb der Hauptstrahlrichtung mit einer starken Expositionsabnahme zu rechnen ist. Inwieweit eine solche Lageveränderung der Quelle bzw. der exponierten Personen jedoch zu realisieren ist, muss im Einzelfall untersucht werden.

1.4.5 Kennzeichnung / Aufklärung

Aus Tabelle 1.2 ist ersichtlich, dass beispielsweise an bestimmten Arbeitsplätzen mit signifikanten Expositionen gerechnet werden muss. Oftmals sind sich die Arbeiter dieser Exposition nicht bewusst. Hier sind Aufklärung über die von den Geräten ausgehende Strahlungsbelastung und Hinweise zum sachgerechten Umgang (u.U. Schirmanzüge) vonnöten. Für Herzschrittmacherpatienten können diese Feldstärken durchaus lebensgefährlich werden. Deswegen müssen solche Bereiche besonders gekennzeichnet und damit auf ein Gefahrenpotential hingewiesen werden.

Auch außerhalb des Arbeitsplatzes ist mit dem Auftreten von hochfrequenten Strahlungsquellen signifikanter Intensität zu rechnen. Das KATALYSE-Institut für angewandte Umweltforschung stellt deswegen folgenden politischen Forderungskatalog auf [2]:

- Ähnlich wie bei Bildschirmen sollten Richtwerte für die Feldabgaben von Elektrogeräten eingeführt werden, die die Feldstärke im Nutzungsabstand und die Aufenthaltsdauer im Nahfeld der Geräte berücksichtigen.
- Für alle Geräte mit mittleren oder hohen Feldstärken sollte eine Kennzeichnungspflicht eingeführt werden, aus der hervorgeht, in welchem Abstand welche Feldstärken zu erwarten und welche Mindestabstände demgemäß bei Dauerbetrieb einzuhalten sind.
- Elektrische Geräte, die bei bestimmungsgemäßem Gebrauch zu einer langfristigen Belastung mit hohen Feldstärken führen (...), sind als solche zu kennzeichnen.
- Es ist zu diskutieren, ob verbindliche Grenzwerte ausgesprochen werden sollen, in welchem Fall bestimmte Geräte vom Markt genommen werden müssten, oder ob es ausreicht, dem Verbraucher durch obengenannte Maßnahmen die Informationen zur Verfügung zu stellen, auf deren Basis er über seine eigene elektromagnetische Belastung durch Elektrogeräte entscheiden kann (...).

Die IMST GmbH ist seit längerem in die Umsetzung dieser Forderungen eingebunden. Mit dem Arbeitsgebiet "EMVU technischer Systeme" werden neue, hochfrequenztechnische Anlagen auf ihre Emissionen hin untersucht und bezüglich nationaler und internationaler Grenzwerte zum Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern bewertet [11,12]. Diesbezüglich wird auch an der Entwicklung neuer, verbindlicher Normen mitgearbeitet, so z.B. bei der Strahlenbelastungsmessung an Mobilfunkhandies. Ebenfalls vom IMST durchgeführt werden Messungen der HF-Belastungen in Wohnungen, beispielsweise in Zusammenhang mit in der Nachbarschaft errichteten Mobilfunksendeanlagen. Vor einer Diskussion über die gesundheitliche Relevanz ist eine Kenntnis über die tatsächlich auftretenden Felder dringend angebracht.

1.5 Demonstration von Maßnahmen an Beispielen

1.5.1 Computermonitore und Fernseher

Die elektromagnetischen Emissionen eines Computermonitors reichen von elektrostatischen Feldern bis zu elektrischen und magnetischen Wechselfeldern von 5 Hz bis 400 kHz, bei Fernsehern sogar bis 10 MHz [2]. Bezüglich Computermonitoren haben die Grenzwertempfehlungen des schwedischen MPR-Gremiums und der schwedischen Gewerkschaft TCO eine besondere Bedeutung erhalten, die sich heutzutage weltweit als Standard durchgesetzt hat. Danach sind für das hochfrequente elektrische Wechselfeld (2-400 kHz) 2,5 V/m (MPR II 1990:8) bzw. 1 V/m (TCO 1991) und für das hochfrequente magnetische Wechselfeld (2-400 kHz) 0,025 μ T (MPR II 1990:8 und TCO 1991) zugelassen. MPR und TCO ließen sich dabei von der Frage leiten, wieweit Strahlungsarmut technisch machbar ist. Hersteller dürfen ihre Geräte mit der TCO-Plakette schmücken, wenn (1) die abgegebene elektromagnetische Strahlung unter den TCO-Richtwerten liegt, (2) der Monitor über eine Power-down-Automatik verfügt und (3) die maximale Energieaufnahme während des normalen Betriebs, im Wartezustand und im Power-down-Modus deklariert wird [2].

Ein neuer Monitor sollte deswegen der MPR II oder sogar der TCO-Empfehlung (Kennzeichnung bzw. Plakette am Gehäuse) genügen. Bei nicht strahlungsarmen Geräten

kann ein großer Teil der elektrischen Felder mit geerdeten Bildschirmfiltern abgeleitet werden, die vor dem eigentlichen Bildschirm befestigt werden. Wer längere Zeit vor einem in Betrieb befindlichen Bildschirm sitzt, ohne diesen zu benutzen, kann bei vielen Rechnern einfach den Bildschirm abschalten, ohne den gesamten Rechner abschalten zu müssen. Dadurch werden alle Felder außer den elektrostatischen Restfeldern abgeschaltet. TCO-Bildschirme mit Power-down-Automatik machen dies automatisch.

Bei nicht strahlungsarmen Bildschirmen empfiehlt KATALYSE einen Abstand von 75 cm in alle Richtungen vom Bildschirm [2]. Dieses ist realisierbar für hintereinanderliegende Arbeitsplätze bezüglich des Abstands zum Vordermann. Es erscheint aber fraglich, ob ein Abstand des Nutzers vom eigenen Bildschirm in dieser Weise eingehalten werden kann.

Von Fernsehern gehen ähnliche Felder aus wie von Computerbildschirmen. Da für Fernseher jedoch bislang keine mit MPR oder TCO vergleichbaren Empfehlungen existieren, sind die emittierten Felder in der Regel höher. Bei normalem Betrachtungsabstand zwischen 2 und 4 m ist man allerdings aufgrund des im Vergleich zum Monitor sehr viel größeren Abstandes und der damit verbundenen Strahlungsabnahme insgesamt geringeren Feldern ausgesetzt als beim strahlungsarmen Monitor in bestimmungsgemäßem Abstand.

1.5.2 Rundfunk- und Fernsehsehdanlagen

Rundfunk- und Fernsehanlagen zählen ohne Frage zu den leistungsstärksten Emittenten im Hochfrequenzbereich. Vor allem die Arbeiter an der Anlage selbst, aber in Einzelfällen auch die Bewohner angrenzender Wohngebiete sind zum Teil signifikanten Immissionen durch solche Anlagen ausgesetzt.

Eine Verringerung der Belastung durch Schirmung an der Quelle macht hier jedoch wenig Sinn, da die abgestrahlte Leistung, im Gegensatz z.B. zum undichten Mikrowellenherd, keine Leckstrahlung ist, sondern der eigentliche Hauptzweck. Mit Sendeanlagen werden strahlungsgebunden Informationen übertragen, die nachher durch Rundfunkempfänger oder Fernseher hör- bzw. sichtbar gemacht werden.

Eine mögliche Minderungsmaßnahme ist hier die Einhaltung eines Sicherheitsabstandes. Das Bundesamt für Strahlenschutz empfiehlt für TV-Sender (Band IV/V) mit 100 kW Sendeleistung einen Sicherheitsabstand von 45 m und für einen UKW-Hörfunksender mit 500 W einen Abstand von 9,5 m. Bei leistungsstärkeren Sendern (s. Tabelle 1.2) sind entsprechend größere Entfernungen anzusetzen. Eine weitere Vergrößerung des Abstands führt dabei schnell zu geringeren Belastungswerten, da die Leistungsflussdichte im Fernfeld solcher Sendeanlagen quadratisch mit wachsender Entfernung abnimmt.

Die Abstandsvergrößerung mag im Falle dicht an Sendeanlagen liegender Arbeitsstätten oder Wohnungen nicht praktikabel erscheinen. Hier lassen sich durch zusätzliche Abschirmung der Räumlichkeiten, im Extremfall sogar mit vollständiger Metallauskleidung, die Immissionen wirksam verringern. In Abschnitt 1.4.1 sind hierzu praxisorientierte Angaben enthalten.

Ein völlig anderer Ansatz besteht darin, in Ballungsgebieten Rundfunk- und Fernsehprogramme nicht mehr abzustrahlen, sondern leitungsgebunden, vorrangig mit Glasfaserkabeln, in die Haushalte zu übertragen [3]. Dieses wird zunehmend durch Breitbandverteilnetze auf Kupfer-Koaxial-Kabel- oder Glasfaserkabel-Basis realisiert ("Kabelanschluss").

Prinzipiell ist auch bei der Abstrahlung senderseitig eine Reduzierung der Leistung möglich. Die Entwicklungen der letzten Jahre hat zu einer immer größeren Empfindlichkeit von Rundfunk- und Fernsehempfangsanlagen geführt, die auch mit geringerer Empfangsfeldstärke (und geringerer Leistung der Sendeanlage) einen sauberen Empfang gewährleisten würde. Die Leistung der Sendeanlagen wurde jedoch demgegenüber beibehalten. Grund dafür ist, dass für eine Verringerung der Sendeleistung Anlagenveränderungen durch den Betreiber verbunden sein können. Anlagenveränderungen müssen dem Bundesamt für Post und Telekommunikation gemeldet werden, die daraufhin eine neue Standortbescheinigung für den Betrieb der Anlage ausstellt. Das Erteilen einer Standortbescheinigung erfordert seit einigen Jahren die Überprüfung der Emissionen der Anlage bzw. Festlegung von Sicherheitsabständen zum Schutz der Bevölkerung (bislang nach DIN VDE 0848 Teil 2). Eine solche Bescheinigung war beim meist schon einige Jahrzehnte zurückliegenden Bau der Anlage nicht erforderlich. Da selbst nach Reduzierung der Sendeleistung bei vielen Sendeanlagen gegenüber bisher weitergehende Maßnahmen wie Erhöhung von Sicherheitsabständen, Einzäunung gesperrter Bereiche usw. erforderlich werden würden, lassen viele Betreiber die Anlage lieber unverändert in Betrieb. Hier sollte unabhängig von geplanten Anlagenveränderungen über eine generelle Überprüfung dieser Sendeanlagen diskutiert werden.

In dieselbe Richtung gehen Konzepte über verteilte Sendeanlagen. Hierbei wird ein Empfangsbereich nicht von einer leistungsstarken Sendeanlage versorgt, sondern durch mehrere kleinere, leistungsschwächere Anlagen. Damit ist die jeweilige Belastung in der Nähe der Sendeanlage stark reduziert. Dieses Konzept bringt jedoch zusätzlich zu den oben genannten Schwierigkeiten noch das Problem einer vollständigen Neuplanung der Sendernetze mit entsprechend neuen Sendefrequenzverteilungen mit sich (zwei benachbarte, kleinere Sender dürfen wegen möglicher Interferenzerscheinungen nicht auf

derselben Frequenz senden).

Zu einer Verringerung der Hochfrequenzbelastung kann auch die Tendenz nach zunehmender Digitalisierung von Rundfunk- und Fernsehprogrammen führen. Die bislang analog übertragenen Rundfunk- und Fernsehsender müssen mit einer gewissen Intensität am Empfangsgerät ankommen, damit sie störungsfrei empfangen bzw. sicher aus dem Rauschen dekodiert werden können. Digitale Signale sind weitaus störungsempfindlicher, da der Empfänger statt des möglichst genauen Empfangs eines analogen Wertes beim digitalen Signal lediglich zwischen "0" (Signal nicht vorhanden) und "1" (Signal vorhanden) entscheiden muss. Sie können deswegen mit weitaus geringerer Leistung übertragen werden. Digitale Signale lassen sich zudem auch mit Fehlerkodierungen effektiv gegen Verluste oder Störungen auf dem Übertragungsweg schützen. Die Entwicklungen bei der Übertragung digitaler Hörfunk- und Fernsehprogramme per Satellit, Kabel oder terrestrisch schreiten zügig voran (Digital Video Broadcasting DVB, Digital Audio Broadcasting DAB, Digitales Satellitenradio DSR). Nach Einigung auf eine gemeinsame Norm ist hier bald mit der Vorstellung von Produkten für den Massenmarkt zu rechnen [13].

1.5.3 Mobilfunkbasisstationen und Handies

Obschon Mobilfunkbasisstationen mit sehr viel geringeren Sendeleistungen betrieben werden als beispielsweise Rundfunk- und Fernsehsendeanlagen, werden sie in der Öffentlichkeit doch sehr viel kontroverser diskutiert. Mit dem Ausbau des G-, D- und E-Mobilfunknetzes haben sich zahlreiche Mobilfunkgegner in Bürgerinitiativen zusammengeschlossen, die den weiteren Ausbau der Netze stoppen und sämtliche Anlagen abbauen oder zumindest bis zur endgültigen Klärung der gesundheitlichen Auswirkungen der dabei erzeugten Strahlung stilllegen möchten.

Entgegen der allgemeinen Auffassung in der Bevölkerung sind die von den Basisstationen hervorgerufenen Immissionen beim Mobilfunk-Telefonierenden sehr viel geringer als diejenigen, die durch das in unmittelbarer Nähe zum Kopf betriebene Handy hervorgerufen werden. Bei eigenen Untersuchungen wurde in Dachwohnungen, auf deren unmittelbar über der Decke gelegenen Dach Basisstationen betrieben wurden, Leistungsflussdichten von maximal $0,001 \text{ W/m}^2$, in der Regel sogar noch geringere Werte, gemessen. Diese Werte stammen mehrheitlich vom Nahfeld der Antennen, da Basisstationsantennen gerichtet in einen Kreissektor vor das Haus abstrahlen, aber nicht zielgerichtet in das Hausinnere. In direkter Hauptstrahlrichtung sind sicherlich höhere Expositionen zu erwarten. Diese sind aber bereits in einigen Metern Entfernung von den Sendeantennen auf Werte abgeklungen, die sich innerhalb der zulässigen Grenzwerte der 26. BImSchV bewegen. Das Bundesamt für Strahlenschutz hat diesbezüglich Mindestabstände von den Antennen wie folgt empfohlen [2]: D-Netz Basisstation (8 Kanäle a 50 W): 4,76 m, C-Netz Funkstation (23 Kanäle a 8 W): 1,78 m. Da die meisten Basisstationen auf den Dächern

möglichst hoher Häuser installiert sind, ist ein Aufenthalt von Personen innerhalb des Schutzabstandes von vornherein unwahrscheinlich. Eine zusätzliche Immissionsminderung kann durch Abschirmungen, wie sie in den Abschnitten 1.4.1 und 1.5.2 beschrieben wurden, erreicht werden. Es gibt derzeit jedoch *auch senderseitig Überlegungen zur Emissionsminderung*. Ein Beispiel hierfür ist das adaptive Basisstationskonzept, bei dem der von der Basisstation ausgehende Strahl dem mobilen Teilnehmer nachgeführt wird. Hierbei ist die Belastung für die Bewohner in unmittelbarer Nähe des Senders im Mittel geringer als bislang, da keine gleichmäßige Ausleuchtung eines gesamten Sektors mehr vorliegt, sondern die (sehr viel schmalere) Strahlungskeule in Richtung des mobilen Teilnehmers geschwenkt wird. Darüber hinaus planen die Mobilfunknetzbetreiber eine Erhöhung ihrer Anschlusskapazitäten, um mehr Teilnehmer bedienen zu können. Dieses wird zu einer kleineren Zellgröße und einer entsprechenden Verdichtung der Basisstationen führen, die dann, ähnlich wie im Abschnitt 1.5.2 empfohlen, mit geringeren Sendeleistungen operieren werden. Auch hier ist für die Bewohner in unmittelbarer Nähe der Basisstation eine Verringerung der HF-Belastung zu erwarten.

Mobilfunkhandies werden mehrheitlich in unmittelbarer Nähe des Kopfes betrieben (geringer Abstand zum Sender - potentiell hohe Immissionswerte). Die Abstrahlungswerte der meisten Handies liegen zwar ebenfalls mehr oder weniger deutlich unter den Grenzwerten, allerdings nicht um die Größenordnungen entfernt, wie die der Basisstationen. Grund dafür ist, dass viele Handyhersteller zwar der Funktionalität und dem Design des Handies viel Bedeutung beimessen, der Konstruktion der Antenne aber eher geringe Beachtung schenken. So konnte das IMST bei eigenen Untersuchungen feststellen, dass bei einigen Handies die Abstrahlung der elektromagnetischen Energie nicht unbedingt nur von der Antenne ausgeht, sondern auch zu einem großen Teil vom Gehäuse. Das kann dann dazu führen, dass über 60 % der von solchen Geräten abgestrahlten Leistung im Kopf in Wärme umgesetzt wird [11]. Aufbauend auf dieser Analyse sind am IMST Optimalantennen für Mobilfunkgeräte, die am Kopf betrieben werden, entwickelt worden. Grundgedanke dabei war, das Gerät elektromagnetisch von der Antenne zu entkoppeln, so dass die Energie nunmehr tatsächlich von der Antenne und damit nicht in den Kopf, sondern über den Kopf abgestrahlt wird. Zusätzlich wurde die Anwendung einer integrierten Antenne an der Gehäuserückseite untersucht; die Antenne ist dabei durch das metallische Hochfrequenzteil des Handies vom Kopf abgeschirmt und strahlt vorrangig in die kopfabgewandte Seite. Der für herkömmliche Antennen bei 40 % liegende Wirkungsgrad konnte damit auf 70-80 % angehoben und gleichzeitig die Belastung des Kopfes um den Faktor 10 verringert werden. Eine Einbeziehung dieser Ideen sowohl bei der Entwicklung neuer Handies, als auch als Nachrüstatz für ältere Geräte ist zu empfehlen. Lediglich bei zwei derzeit auf dem Markt befindlichen Handies sind diese konzeptionellen Veränderungen in das Produkt eingeflossen. Generell muss aber eingeschätzt werden, dass die Handyhersteller bezüglich der Optimierung der Abstrahlung noch nicht das tun, was technisch möglich wäre.

Die Belastung des Kopfes, d.h. die pro Gramm Gewebemasse absorbierte

elektromagnetische Energie (Spezifische Absorptionsrate SAR), kann mit einem speziell dafür entwickelten Meßsystem bestimmt werden. Mit Hilfe eines sechsachsigen Roboters werden dabei miniaturisierte elektrische und magnetische Feldsonden am Handy oder innerhalb eines mit nachgebildeter Gewebsflüssigkeit gefüllten Phantommodell des menschlichen Kopfes positioniert. Das IMST nutzt dieses Meßsystem seit längerem für die Charakterisierung von Handfunkgeräten unter besonderer Berücksichtigung von Umweltverträglichkeitsaspekten dieser Geräte [12]. Dabei wird aktiv an der Einbringung neuer Normenvorschläge im Sinne einer Typenzulassung für Mobilfunkhandies gearbeitet. Diesbezügliche Normen befinden sich derzeit in Vorbereitung. Die Einführung einer Typenzulassung wird dabei vor allem von Seiten der Verbraucherverbände gefordert.

Frequenz / Netz	Spitzenleistung	Mindestabstände
450 MHz (C-Netz)	bis 0,5 W	kein Mindestabstand
	bis 1 W	ca. 4 cm
	bis 5 W	ca. 20cm
	bis 20 W	ca. 40 cm
900 MHz (D-Netz)	bis 2 W	kein Mindestabstand
	bis 4 W	ca. 3 cm
	bis 8 W	ca. 5 cm
	bis 20 W	ca. 8 cm
1800 MHz (E-Netz)	bis 1 W	kein Mindestabstand

Tabelle 1.9 Mindestabstände bei Mobilfunktelefonen (aus [3])

Solange diesbezügliche Typenzulassungen mit Angabe von einzuhaltenen Sicherheitsabständen noch nicht existieren, sollten die von der deutschen Strahlenschutzkommission empfohlenen Mindestabstände (Antenne - Körper) angewendet werden (Tabelle 1.9). Inwieweit jedoch beispielsweise beim C-Netz-Kompakthandy bis 1 W ein Abstand von 4 cm praktikabel ist, erscheint fraglich. Die Abstände lassen sich nur dann sinnvoll realisieren, wenn Hörerteil und Sendeteil voneinander getrennt sind. Eine größere Distanz des Senderteils vom Kopf durch Trennung von Hörerteil und Senderteil ist aus Immissionsgesichtspunkten sicherlich sinnvoll, schränkt aber natürlich die Mobilität des Nutzers stark ein.

Bezüglich der maximalen Sendeleistung sind bei Handgeräten Leistungsbegrenzungen bis max. 1 W mit automatische Leistungsminimierung bei guter Verbindung zur Basisstation zu empfehlen. Handies sollten nicht im Auto betrieben werden, da durch Resonanzen aufgrund der leitfähigen Autokarosserie Feldüberhöhungen, sog. hot-spots, auftauchen können. Hier sind car-kits mit Freisprecheinrichtung erhältlich; die Handyantenne wird abgeschaltet und dafür eine auf dem Autodach montierte Antenne zugeschaltet. Personen mit Herzschrittmachern oder anderen elektronischen Implantaten sollen laut BfS auch von leistungsschwachen Handies einen Abstand von 30 cm (D-Netz) bzw. 1 m (C-Netz) einhalten. Grundsätzlich sollte der Betrieb von

Mobilfunktelefonen in der Nähe empfindlicher elektronischer Anlagen, deren Funktionsstörung schwere Folgen für die Gesundheit von Menschen haben kann, grundsätzlich untersagt werden. Im Krankenhausbereich ist dies teilweise schon der Fall.

1.5.4 Sonstiges

Funkbabyphone: Die Zeitung Ökotest veröffentlichte im Oktober 1993 einen Testbericht, in dem 21 netzgebundene und Funkbabyphone auf ihre elektrischen und magnetischen Felder untersucht wurden. Bei den Funkbabyphonen traten in 10 cm Abstand Leistungsflussdichten bis zu 11 W/m^2 auf. KATALYSE empfiehlt, Funkbabyphone mindestens 1 m entfernt vom Baby zu betreiben [2].

Mikrowellenherde: Laut DIN-Norm 57720 dürfen Mikrowellenherde im Betrieb in einem Abstand von 5 cm nicht mehr als 50 W/m^2 als Leckstrahlung durch undichte Türen/Türkontakte aufweisen. Der laut 26. BImSchV zulässige Grenzwert (umgerechnet auf die Leistungsflussdichte) beträgt demgegenüber 10 W/m^2 , der bei einem solchen Mikrowellenherd erst in ca. 15 cm erreicht werden würde [2]. Die meisten modernen Geräte sind jedoch wesentlich besser, als die Norm es verlangt. Das Bundesamt für Strahlenschutz untersuchte 1991 130 Mikrowellenherde und stellte fest, dass der Grenzwert von 50 W/m^2 bei fast allen Geräten deutlich unterboten wurde. Im Mittel wurden Werte von $0,62 \text{ W/m}^2$ gemessen. Aufgrund der langen Lebensdauer der strahlungserzeugenden Magnetrons (bis ca. 30 Jahre) bei gleichzeitiger Alterung der restlichen Teile kann es jedoch zu Abnutzungserscheinungen der Türkontakte kommen [1]. Stichproben bei älteren Geräten zeigten in 10 % der Fälle erhebliche Leckagen vor allem im Türbereich. In keinem Falle sollten deswegen die Nutzer mit dem Gesicht am Sichtfenster des Mikrowellenherdes "kleben". In der Regel genügt bei modernen Geräten ein Sicherheitsabstand von 5 cm. Bei älteren Geräten ist, vor allem bei längerem Aufenthalt in der Nähe des Gerätes, der Abstand auf ca. 1 m zu vergrößern. Die austretende Leckstrahlung kann dabei mit einem Leckmeßgerät ermittelt werden. Das Bundesamt für Strahlen-Schutz empfiehlt für Personen mit Herzschrittmachern grundsätzlich einen Sicherheitsabstand von 30 cm.

Anmteurfunkanlagen: Oft merken Nachbarn von Funkamateuren erst etwas von deren Hobby, wenn es bei ihnen aufgrund des Betriebs der Anlage zu Störungen von Rundfunk- und Fernsehempfang, von Videorecorder und Phonogeräten kommt oder wenn Fernbedienungen durch Direkteinstrahlung von der Sendeantenne der benachbarten Amateurfunkanlage beeinflusst werden [3]. Bei zu naher Verlegung der Sendeantennen vor Fenster benachbarter Wohnungen oder bei ungünstigen Aufstellungsbedingungen können in Einzelfällen sogar die Grenzwerte der 26. BImSchV überschritten werden. In [3] wird deswegen für Funkamateuranlagen, die in Wohngebieten betrieben werden, generell ein behördliches Genehmigungsverfahren gefordert, das mit einer Vermessung des Funkfeldes in der Umgebung der Sendeantenne verbunden ist. Überlegungen von behördlicher Seite sind hierzu derzeit im Gange.

Explosive Stoffe [1]: Alle im Strahlungsfeld befindlichen, leitfähigen Teile wirken als Empfangsantenne und können bei ausreichender Strahlungsintensität und Größe in explosiver Atmosphäre Zündungen verursachen, wenn z.B. induzierte Ströme dünne Drähte zum Glühen bringen oder bei Trennung oder Annäherung leitfähiger Teile Funken auftreten. Bei besonders starken HF-Feldern, z.B. in unmittelbarer Nähe von leistungsstarken industriellen Hochfrequenzgeneratoren, können sich sogar nichtleitende Teile stark erwärmen und zur Zündquelle werden. Zum Schutz vor Zündwirkungen muß daher ein Sicherheitsabstand zwischen den Strahlungsquellen und explosionsgefährdeten Bereichen eingehalten werden. Die Größe und Form der Sicherheitszone hängt von der Stärke und Abstrahlcharakteristik der Strahlungsquelle und der Art des brennbaren Stoffes, der Art der zu berücksichtigten Empfangsgebilde und der Wahrscheinlichkeit der Zündwirkung ab. In Zweifelsfällen ist der Sicherheitsabstand durch Messungen zu ermitteln. Die Leistung der Funken, die noch zu keiner Entzündung führt, beträgt für Gase 250 mW für die Explosionsklasse IIC, 500 mW für die Klasse IIB und 750 mW für die Klassen IIA und I.

Gerüste und Baukräne [7]: Befinden sich gut leitende Objekte in einem elektromagnetischen Strahlungsfeld, können zwischen einzelnen Punkten dieser Teile (z.B. Baugerüst) oder zwischen einem Punkt und dem Erdboden (z.B. Kranhaken) hochfrequente Spannungen auftreten, die gefährlich hohe Werte annehmen können. Die Höhe der Spannungen hängt dabei von der Feldstärke bzw. der Intensität, den Abmessungen und der Form des Objektes und seiner Orientierung zur Ausbreitungsrichtung der Strahlung ab. An der Trennstelle eines leitfähigen Gebildes, wie sie z.B. bei einem Kran zwischen Haken und Erdboden auftritt, kann eine Spannung anliegen, die vom Verhältnis Rahmenfläche zur Wellenlänge und der elektrischen Feldstärke abhängt. Eine wesentliche Erhöhung dieser Spannung um mehr als das 10-fache ist bei beweglichen Objekten möglich, wenn sie durch Lage- bzw. Formänderung in Resonanz mit der Sendefrequenz kommen. Dies ist besonders beim Arbeiten mit Baukränen der Fall, wenn sie durch Drehen, Heben und Senken der East ihre Resonanzbedingung ändern. Die wichtigste Minderungsmaßnahme ist die Aufklärung der Arbeiter über die Möglichkeit spürbarer elektrischer Spannungen. Darüber hinaus ist bei Arbeiten in der Nähe von leistungsstarken Sendeanlagen das Tragen isolierender Arbeitshandschuhe empfehlenswert. In Ausnahmefällen kann es erforderlich sein, die East am Kranhaken mit einem Draht zu erden.

Diathermiegeräte [7]: Bezüglich der Störungen empfindlicher elektronischer Geräte in der Nähe von Diathermiegeräten kann Abhilfe durch Veränderung der Bestrahlungsbedingungen wie etwa Orts- und Richtungsänderung der Elektroden geschaffen werden. Ein weiterer Schritt wäre die Aufstellung von leitfähigen Stellwänden (Teilabschirmung) oder eine komplette Vollabschirmung des Behandlungsraumes. Störungen in den Geräten können durch Gehäuseabschirmungen und den Einsatz von Entstörfiltern behoben werden.

Störung von elektronischen Geräten: Die Verringerung der Störwirkung elektromagnetischer Strahlung auf empfindliche, elektronische Geräte ist ein typisches Anwendungsgebiet der Ingenieurdisziplin Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Entsprechende Entstörmaßnahmen sind unter fachkundiger Anleitung in einem EMV-Prüflabor zu realisieren. Grundsätzlich kommen als Abhilfemaßnahmen Schirmung, Filterung, EMV-gerechte Massekonzeption und insgesamt eine EMV-gerechte Schaltungsentwicklung zur Anwendung. Abstands- bzw. Dämpfungsmaßnahmen können dadurch berücksichtigt werden, dass man hochempfindliche Geräte in tiefergelegenen Stockwerken (bzw. Keller) installiert (dort sind die Störfeldstärken geringer) und die Verkabelung unterirdisch bzw. im Mauerwerk ausführt [1].

Besondere Maßnahmen bei Herzschrittmacherpatienten [1]: Herzschrittmacherpatienten gehören zu einer bezüglich elektromagnetischer Strahlung besonders gefährdeten Gruppe. Zur vorbeugenden Vermeidung von Störungen sind bestimmte Vorsichtsmaßnahmen erforderlich, die nachfolgend aufgelistet sind: Besuchergruppen in Betrieben mit potentiellen Störquellen sollten auf spezifische Gefahrenquellen für Herzschrittmacherträger hingewiesen werden, denen gegebenenfalls von einer Besichtigung abgeraten werden sollte. Elektrogeräte sollten noch vor dem Kauf durch einen Probetrieb auf eine mögliche Störbeeinflussung getestet werden. Geräte mit Sensortasten sind dabei besonders kritisch zu beurteilen. Zu leistungsstarken Strahlungsquellen (Rundfunk- und Fernsehsender, Radaranlagen) und zu Strahlungsquellen, die in unmittelbarer Nähe angewendet werden (Funkgeräte), sollte ein ausreichender Sicherheitsabstand eingehalten werden. Der behandelnde Arzt (auch Zahnarzt) sollte wegen möglicher Behandlung mit HF-Medizingeräten vor der Behandlung auf den Schrittmacher hingewiesen werden. Bei einer auftretenden Störung sollte sofort die Störzone verlassen bzw. das gerade benutzte Elektrogerät ausgeschaltet werden; der Schrittmacher kehrt dann normalerweise selbständig in den normalen Betriebszustand zurück. Eine kritische Störsituation kündigt sich dabei meistens vorher durch Schwindelanfälle (bei Demand-Schrittmachern) oder Herzklopfen (bei Standby-Schrittmachern) an.

1.5.5 Wundermittel gegen Elektrosmog

Aufgrund der zunehmenden Verunsicherung der Bevölkerung in Bezug auf hochfrequenztechnische Belastungen ist es nicht verwunderlich, dass immer mehr Geräte auf dem Markt angeboten werden, die eine Leben ohne Elektrostress versprechen. Die Gerätepalette reicht dabei von Metallarmbändern über Kupferpyramiden und "Smogfresserchen" zu aufwendigen Anlagen mit Netzleitung und Antenne. Meistens sind die Netzanschlusskabel im Inneren der Geräte nicht weiter angeschlossen. Eine tatsächliche physikalische Wirkung haben diese Geräte nicht, allenfalls ist mit viel gutem Willen ein gewisser Placebo-Effekt nicht auszuschließen. In der Regel rechtfertigt dieser jedoch nicht die hohen Anschaffungskosten für derartige Geräte. Elektromagnetische Belastungen können damit nicht reduziert werden, vom Kauf muss deswegen dringend abgeraten werden. Lediglich die Belastung für den Geldbeutel des Käufers solcher Geräte steigt deutlich an.

2 Minderungsmaßnahme für statische Felder und Gleichfelder

2.1 Statische und Gleichfeldquellen

Im Gegensatz zu nieder- und hochfrequenten Feldern ändert sich bei statischen und Gleichfeldern die Stärke des elektrischen oder magnetischen Feldes nicht mit der Zeit; die Felder sind zeitkonstant. Tabelle 2.1 enthält eine Aufstellung statischer und Gleichfeldquellen [1-3].

Quelle	E-Feld	H-Feld	Bemerkung
natürlich			
Schönwetterfeld	100-5 00 V/m		sehr stark schwankend
Gewitterfeld	3-20 kV/m		
Erdmagnetfeld		30-50 nT	
künstlich			
Haushalt			
Fernsehgeräte	300-700 V/m		in 30 cm Abstand
Lautsprecher (Dauermagnete)			
elektrostatische Aufladungen	bis 20 kV/m		
Industrie und Arbeitsplatz			
Computermonitor, Kopiergerät			hohe statische Felder
Elektrolyse (Aluminium)		bis 50 mT	
Lichtbog.- u. Plasmaschmelzen		bis 50 mT	
Herstellg. v. Permanentmagn.		bis 5 mT bis 0,5 mT	an den Händen gesamter Körper
Trennung fester Stoffe (Förderbänder, Druck, ...)			hohes elektrostatisches Feld
Verfüllg. staubförm. Produkte			hohes elektrostatisches Feld
Dehnung, Stauchung, Bruch schlecht leitender Stoffe			hohes elektrostatisches Feld
Strömen, Rühren, Mischen, Vernebeln flüssiger Stoffe			hohes elektrostatisches Feld
Energietechnologie			
Hochspannungs- Gleichspannungs-	21 kV/m - 16kV/m		pos. Pol neg. Pol unter 500 kV HGÜ
Fusionsreaktor		bis 50 mT 10 mT	kurzzeitig sonst
Magnetohydrodyn. Generator		bis 10 mT	
Forschung			
supraleitende Magnete		bis 50 mT	
Blasenkammer		bis 1,5 T	kurzzeitig, Hände
Transport			
Straßen-, S- und U-Bahnen		100 μ T	im Führerstand
Transrapid		50-100 nT	
Medizin			
Kernspintomographie		bis 100 mT bis 4 T	Bedienpersonal Patienten

Tabelle 2.1 Übersicht über statische und Gleichfeldquellen

2.2 Prinzipielle Minderungsmaßnahmen

Praxisorientierte, anlagenspezifische Minderungsmaßnahmen für statische Felder und Gleichfelder sind in der Literatur nur sehr wenig zu finden. Lediglich für elektrostatische Felder werden im Abschnitt 2.3 einige Hinweise gegeben. Prinzipiell kommen hier aber folgende, vor allem im Teil 1 "Darstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung der Belastungen durch elektrische und magnetische Felder im Niederfrequenz-Bereich" ausführlich erläuterte Techniken und Maßnahmen zum Einsatz. Für eine ausführliche Darstellung sei auf die entsprechenden Unterabschnitte von Teil 1 und Teil 2 verwiesen. Es sind dies:

- *Abschirmung:* Elektrische Felder können wirkungsvoll mit leitfähigen Metallplatten oder Metallumhüllungen abgeschirmt werden. Eine Metallabschirmung wirkt, wie im NF-Bereich, nicht auf magnetische Felder. Diese können nur sehr kostenintensiv mit hochpermeablen Magnetwerkstoffen (Permalloy) effektiv geschirmt werden. Baumaterialien und Pflanzen haben ebenfalls eine abschirmende bzw. dämpfende Wirkung, jedoch nur auf das elektrische Feld.
- *Sicherheitsabstände:* Hierbei wird die Verminderung der Stärke der von einer Quelle ausgehenden Felder mit dem Abstand ausgenutzt. Die Einhaltung hinreichender Schutzabstände zwischen emittierenden Anlagen und Nutzungen sollte bei größeren Anlagen schon in die Raumplanungsphase berücksichtigt werden. Für kleinere Anlagen (z.B. Hausgebrauch) ist eine Angabe der vom Gerät emittierten Felder und dementsprechender Schutzabstände auf dem Gerät bzw. in der Bedienungsanleitung wünschenswert.
- *Konstruktive Maßnahmen:* Hier kommt vor allem eine dichte Beieinanderführung bzw. Verdrillung stromführender Leiter (Hin- und Rückleiter) zur Kompensation der Magnetfelder in Betracht. Die Ausnutzung von unterschiedlichen Phasenbeziehungen, wie im NF-Bereich bei Mehrphasensystemen, kann jedoch bei Gleichgrößen keine Anwendung finden. Weitere konstruktive Maßnahmen, die z.B. zu einem größeren Abstand zum Nutzer führen, sind ebenfalls denkbar.
- *Aufklärung:* Oftmals sind sich Nutzer von stark emittierenden Anlagen über deren Emissionen nicht bewusst. Maßnahmen zur Aufklärung und ggf. Änderung des Nutzungsverhaltens sind hier vonnöten. Dazu gehört ebenfalls die Kennzeichnung von Sicherheitsbereichen durch Schilder und Absperrungen unter besonderer Berücksichtigung von Herzschrittmacherträgern. Für elektrische und elektronische Geräte sollte das Konzept der Typzulassung überprüft werden.

- *Ermittlung der Immission:* Durch Mangel an verlässlichen Angaben zu den Parametern von emittierenden Anlagen bzw. durch starken Einfluss des Ausbreitungsmediums auf die Feldverteilung begründet ist es oftmals notwendig, die an besonders sensiblen Bereichen vorherrschenden elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Immissionen zu ermitteln. Dies kann je nach Frequenz und konkretem Fall entweder rechentechnisch oder messtechnisch erfolgen.

2.3 Minderungsmaßnahmen für elektrostatische Felder

Elektrostatische Aufladungen entstehen durch Ladungstrennungen vor allem an synthetischen Textilien, Teppichen, Möbeln, Tapeten oder auch Gardinen. Aufgeladene Personen, die einen geerdeten Gegenstand anfassen (Heizung, Wasserrohr,...), können durch die nachfolgende Funkenentladung einen "elektrischen Schlag" bekommen, den man subjektiv als unangenehm empfindet. Darüber hinaus besteht für hochempfindliche elektrische und elektronische Geräte und Bauelemente eine Gefahr der Zerstörung durch elektrostatische Entladungen von Personen oder aufgeladenen Gegenständen. Eine Hauptgefahr von elektrostatischen Aufladungen liegt in Entladungsvorgängen, die explosionsfähige Gemische von Gasen, Dämpfen, Nebeln und Stäuben mit Luft entzünden können. Zur Vermeidung von Auf- bzw. Entladungen sind deswegen Vorsichtsmaßnahmen erforderlich, die nachfolgend aufgelistet sind:

- Für die Wohnräume sollten keine Materialien verwendet werden, die zu statischen Aufladungen neigen. Zu empfehlen sind natürliche Materialien, die in der Regel geringere Aufladungen verursachen, wie Stein, Terrazzo, Holz, Kork, Linoleum, Baumwolle usw. Vorhänge, die mit Reisstärke behandelt wurden, neigen weniger zur Aufladung [2].
- Die Bekleidung sollte nicht aus reinen Kunstfasern oder reiner Schurwolle bestehen. Der Baumwollanteil sollte mind. 30 % betragen. Schlecht leitende Schuhe mit Gummisohlen sollten zugunsten von Schuhen mit Ledersohlen oder Filzpantoffeln vermieden werden [1].
- Es sollte für ausreichende Luftfeuchtigkeit gesorgt werden (z.B. durch Luftbefeuchter), da elektrostatische Felder dann infolge der erhöhten Leitfähigkeit der Luft rasch wieder abgebaut werden [2]. Eine Verbesserung der Leitfähigkeit der Luft wird auch durch regelmäßiges Lüften erreicht; dies ist insbesondere in verrauchten Räumen nötig [1].
- Außer Wechselfeldern (vgl. Abschn. 1.5.1) erzeugen Computermonitore und Fernseher im Betrieb auch elektrostatische Felder, die nach dem Abschalten nur langsam über 24-48 Stunden abfallen. Abhilfe schaffen geerdete Bildschirmfilter oder der Kauf von TCO bzw. MPR II Bildschirmen. Diese müssen ein äquivalentes Oberflächenpotential von ± 500 V bzgl. der elektrostatischen Felder einhalten [2,3]. Oberflächen von älteren, nicht antistatischen Bildschirmen können mit einem antistatischen Spray behandelt werden [1].
- Generell können Aufladungen durch konsequente Erdung leitfähiger Teile verhindert werden. Beispiel dafür sind o.g. Computermonitore oder Autos, die durch Erdungslaschen aus leitfähigem Gummi geerdet werden, um die während der Fahrt durch Reibung entstandenen Ladungen abzuführen. In besonders gefährdeten Bereichen (Medizintechnik, Computerräume) können die Fußböden leitfähig ausgeführt werden. Hierfür müssen dann allerdings auch leitfähige Bodenpflegemittel verwendet werden [1].
- Eine weitere Maßnahme ist die Begrenzung der Aufladung durch konstruktive Maßnahmen wie die Verringerung der Abmessungen aufladbarer Gegenstände [1]. Damit wird die Kapazität, also das Vermögen zur Speicherung elektrischer Ladungen, begrenzt.

- Zum Schutz von empfindlichen elektronischen Geräten vor Zerstörungen durch elektrostatische Entladungen werden Maßnahmen wie Überspannungsschutz, Potentialausgleich und Schirmung verwendet. Seit einiger Zeit ist die Prüfung auf elektrostatische Entladungsvorgänge in einer obligatorischen EMV-Norm (IEC 1000-4-2 bzw. DIN EN 61000-4-2) verankert, der sich alle elektrischen Geräte unterziehen müssen.

3 Zusammenfassung

Der Teil 2 vorliegenden Abschlußberichtes beschäftigt sich mit der Darstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Belastungen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Hochfrequenzbereich, für statische Felder und für Gleichfelder.

Ausgehend von einer Zusammenstellung emittierender Anlagenarten werden typische Emissionswerte und Immissionswerte in möglichen Aufenthaltsbereichen von Personen aufgelistet. Aus den typischen Ausbreitungsmerkmalen im jeweiligen Frequenzbereich ergeben sich die möglichen technischen Minderungsmaßnahmen:

- *Abschirmung:* Hierbei sind grundsätzliche Unterschiede bezüglich der Abschirmwirkung von Metallen auf elektrische und magnetische Felder unterschiedlicher Frequenz vorhanden.
- *Dämpfung:* Es werden frequenzabhängige Dämpfungswerte für gängige Baustoffe abgeleitet.
- *Einhaltung von Sicherheitsabständen:* Grundsätzlich vermindert sich die Stärke der emittierten elektrischen und magnetischen Felder mit dem Abstand von der Quelle. Die Feldabnahme erfolgt dabei im Nahfeld schneller als im Fernfeld. Die Einhaltung von Schutzabständen ist oftmals die effektivste bzw. kostengünstigste Minderungsmaßnahme.
- *Lageveränderungen/konstruktive Veränderungen:* Hier können abgeschattete Bereiche bei gebündelter Strahlung oder Feldkompensationswirkungen ausgenutzt werden.

Diese Maßnahmen werden technisch erläutert und praxisorientiert bewertet. Da die Datenlage zu praktisch umsetzbaren Werten in der Literatur teilweise große Lücken aufweist, werden die Aussagen durch eigene Berechnungen ergänzt.

Darüber hinaus werden mit Fragen der Typzulassung bzw. Kennzeichnung der Geräte und Aufklärung über mögliche Gefahrenquellen auch politische Minderungsmaßnahmen diskutiert.

Die prinzipiellen Minderungsmaßnahmen werden anschließend an konkreten Beispielen demonstriert. Für Hochfrequenzanlagen wird sich dabei wegen des starken öffentlichen Interesses besonders auf Rundfunk- und Fernsehanlagen sowie Mobilfunksender konzentriert. Gerade bei Mobilfunkbasisstationen und Mobilfunkhandies werden die Literaturangaben durch eigene Untersuchungen des Auftraggebers konkretisiert.

Literatur

- [1] N, Leitgeb, *Strahlen, Wellen, Felder. Ursachen und Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag und München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1991.
- [2] Katalyse e.V., *Elektrosmog. Gesundheitsrisiken, Grenzwerte, Verbraucherschutz*. Heidelberg: C.F. Müller Verlag GmbH, 1994.
- [3] H.-P. Neitzke et al., *Risiko Elektrosmog? Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Gesundheit und Umwelt*. Basel: Birkhäuser Verlag, 1994.
- [4] O. Petrowicz, *Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder*. Vorlesungsmanuskript TU München, 1994.
- [5] *Funkwelt 2000plus*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Post und Telekommunikation. Bonn, 1994-1996.
- [6] M. Leberherz und W. Wiesbeck, "Beurteilung des Reflexions- und Schirmungsverhaltens von Baustoffen," *Bauphysik*, vol. 12, pp. 85-92, 1990.
- [7] D. J. Cichon, *Strahlenoptische Modellierung der Wellenausbreitung in urbanen Mikro- und Pikofunkzellen*. Promotionsarbeit, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1994.
- [8] A. von Hippel, *Dielectric materials and applications*. Boston, London: Artech House, 1995.
- [9] L. Nagy et al., "Urban wave propagation models," *MIOP '97 9. Kongreßmesse für Hochfrequenztechnik, Funkkommunikation und EMV*, Sindelfingen, 1997, pp. 215-215.
- [10] H.-U. Nickel und M. Thumm, "Plane transverse waveguide Windows - Survey of formulas for reflection, transmission and absorption," *16th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves*, Lausanne, Switzerland, 1991, pp. 444-445.
- [II] T. Becks et al., "Optimale Planar- und Monopolantennen für Mobilfunksysteme," *VDE/ITG Fachtagung Antennen*, Starnberg, 1996, pp. 53-56.
- [12] T. Becks, "EMVU von technischen Systemen," in *EMC-Kompendium 1997*, München: KM Verlag & Kongreß, 1997, pp. 319-322.
- [13] *Projektleitung 3000. Technische Perspektiven für die Multimedia-Zukunft in Deutschland*. Studie des Bundesministeriums für Post und Telekommunikation.

