

Zu diesem Buch

Mit vermehrter Anwendung elektromagnetischer Felder nimmt auch deren Schirmung an Bedeutung zu. Daher widmet sich dieses Buch diesem Thema, als erstes Werk im deutschsprachigen Raum. Es wendet sich nicht nur an Entwickler der Elektro- und Elektronikindustrie, sondern auch an Anlagen- und Gebäudeplaner sowie Sicherheitsbeauftragte kritischer Infrastrukturen, wie Rechenzentren, Anlagen der Energie- und Wasserversorgung, Produktionsanlagen etc. Eine weitere Zielgruppe sind Verantwortliche im Bereich Informationssicherheit und Geheimschutz.

Dieses Buch so aufgebaut, dass man es von vorn nach hinten komplett lesen kann, vom Allgemeinen hin zum Speziellen. Allerdings werden dies nur die wenigsten Leser tun. Die meisten werden sich diejenigen Abschnitte heraus suchen, die sie interessieren. Dies ist auch durchaus legitim und ich habe versucht, dieser Art der Anwendung entgegen zu kommen, selbst wenn sich dadurch gelegentlich Wiederholungen ergeben.

Da sich dieses Buch an einen breiten Anwenderkreis wendet, der auch Leser mit geringem elektrotechnischem Vorwissen einschließt, sind im Kapitel 2 Grundlagen und Begriffe der elektrotechnischen Welt erklärt. Dies mag einen Feldtheoretiker langweilen. Er mag daher gleich ins Theoriekapitel 3 springen, ohne dass er deshalb aus dem Zusammenhang gerissen würde. Umgekehrt ist es für die Praxis, die in den Kapiteln 4 bis 6 beschrieben ist, nicht unbedingt erforderlich, das Theoriekapitel „durchzuackern“. Um dem Leser das Hin- und Herblättern zu ersparen, wurden Tabellen und Schaubilder an der passenden Stelle eingefügt und auf einen

VIII Zu diesem Buch

Anhang verzichtet. Ebenso werden Formelzeichen und Abkürzungen am Ort des ersten Auftretens erklärt.

Im Theoriekapitel sind sehr viele mathematische Beziehungen aufgeführt, die zur Berechnung von Feldern oder der Dimensionierung von Schirmen erforderlich sind. Dafür wurde versucht, den Praxisteil weitgehend frei von Mathematik zu halten.

Für die Schreibweise in Formeln gilt:

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \text{Vektor}$$

$$\vec{A}(x, y, z) \quad \text{Vektorfeld}$$

A skalare (auch komplexe) Variable bzw. Betrag des Vektors \vec{A}

a skalare (auch komplexe) Variable, auch Pegelmaß einer Größe A in dB

Zeitveränderliche Größen vom Typ $a(t)$ sind als zeitabhängige Funktionen entsprechend gekennzeichnet. Sinusförmige Größen werden – wenn nicht anders angegeben – als komplexe Variable mit abgespaltener Zeitfunktion $e^{j\omega t}$ angegeben.

Einheitsvektoren sind mit \vec{e} benannt, wobei die Richtung meist durch einen Index bezeichnet ist, z. B. \vec{e}_x : Einheitsvektor in x-Richtung.

Normaleneinheitsvektoren werden mit \vec{n} bezeichnet.

Auch Linien (S), Flächen (A) oder Volumen (V) werden mit Großbuchstaben bezeichnet. Damit sind keine skalaren oder vektoriellen Größen gemeint. Diese Bezeichnungen sind vielmehr als Abkürzungen für diese Gebilde zu verstehen.

Hervorhebungen, Begriffe, Eigennamen und Zitate sind in kursiven Buchstaben gedruckt.

Besonders wichtige Tatsachen und Merksätze sind eingerahmt.

Anmerkungen und die Biographien einiger wichtiger Persönlichkeiten sind in einem kleineren Schriftgrad gesetzt.

Dieses Buch entstand innerhalb eines Zeitraums von 5 Jahren. In dieser langen Zeit kamen ständig neue Erfahrungen hinzu, die hauptsächlich in die Praxiskapitel 4 – 6 eingeflossen sind.

In dieser langen Zeit war ich viele Abende zuhause nur körperlich anwesend. An allererster Stelle gebührt mein Dank daher meiner Familie: Nur durch ihre Geduld und Fürsorge war es mir möglich, dieses Buch zu schreiben.

Besonderer Dank gebührt auch meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Adolf Schwab.

Weiter danke ich:

Für fachliche Beiträge und / oder Korrektur: Herrn WIng. Dietmar Gieselbrecht, Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Kürner, Herrn Dipl.-Ing. Peter Reiser.

Meinen Diplomanden und Mitarbeitern, Herrn Dipl.-Ing. Dietmar Jordan, Herrn Dipl.-Ing. Heiko Strehlow und Herrn Dipl.-Ing. Uwe Tschan.

Den Kollegen der emscreen GmbH, namentlich Herrn Dipl.-Ing. Johan de Schacht, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Fritz, Herrn Mangstl, Herrn Müller, Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Wahrmann, Herrn Dipl.-Ing. Gerd Witzmann.

Außerdem danke ich Herrn Dr.-Ing. Jürgen Bernauer und Herrn Prof. Johan Catryse.

Bad Aibling, im November 2007

Hans A. Wolfspurger

6 **Anwendungen elektromagnetischer Schirme**

Die Anwendungsmöglichkeiten elektromagnetischer Schirme sind zahlreich. Sie lassen sich jedoch grundsätzlich auf zwei Fälle zurückführen: Der Schirm soll das elektrische, magnetische oder elektromagnetische Feld in einem bestimmten räumlichen Bereich dämpfen, damit dort

- keine Störungen, Schäden oder Zerstörungen verursacht werden oder
- kein unerwünschter Empfang von elektromagnetischen Signalen mit Informationsgehalt möglich ist.

Je nach praktischem Anwendungsfall sowie je nach Frequenz und Feldstärke des zu schwächenden Feldes kommen die unterschiedlichen Schirmungskonzepte zum Einsatz, die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellt wurden. Dabei werden die Anforderungen an die Schirmung meist durch Normen oder behördliche Vorgaben festgelegt.

Nachdem im Kapitel 1 bereits die Anwendungen elektromagnetischer Schirme aus einer eher abstrakten Ebene betrachtet wurden, wird im Folgenden konkreter auf die einzelnen Anwendungsgebiete eingegangen.

6.1 Der Schirm als EMV-Entstörmittel

Elektromagnetische Verträglichkeit kann als „friedliche Koexistenz von Sendern und Empfängern elektromagnetischer Energie“ bezeichnet werden [Schw 07].

Wie im Abschnitt 1.1.2 bereits erwähnt, dämpft ein Schirm die elektromagnetische Kopplung zwischen Sendern und Empfängern und sorgt so als *Entstörmittel* zur Erhöhung der Verträglichkeit.

Es gibt zur Sicherstellung der EMV von Komponenten, Geräten oder Sys-

temen grundsätzlich drei Möglichkeiten:

- Erhöhung der Störfestigkeit der Störsenke
- Verringerung der Störaussendung der Störquelle
- Unterbrechung bzw. Bedämpfung des Kopplungspfad.

Bei allen drei Möglichkeiten kann – muss aber nicht – die Schirmung eine Lösungsmöglichkeit sein. Außer dem gesunden Menschenverstand schreiben Normen vor, welcher dieser drei Wege gewählt werden muss. Deshalb beschäftigen sich die nächsten Abschnitte mit der EMV-Normung.

6.1.1 EMV-Normung

In der Europäischen Union sind die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit durch eine europäische Richtlinie geregelt, so wie beispielsweise auch die Ungefährlichkeit von Kinderspielzeug oder die elektrische Sicherheit von Geräten. Die europäische EMV-Richtlinie [Eur 336 89] ist in Deutschland durch ein Bundesgesetz in geltendes Recht umgesetzt [EMVG 98].

Die neue europäische Richtlinie [Eur 108 04] ist zum Zeitpunkt der Drucklegung noch nicht in nationales Recht umgesetzt. Die wesentliche Änderung ist die Erweiterung auf Anlagen. Für diese muss keine Konformität erklärt werden, auch eine CE-Kennzeichnung ist nicht nötig. Sie müssen aber nach „den Regeln der Kunst“ installiert werden, um elektromagnetische Beeinflussung auszuschließen.

Das Gesetz legt keine Messverfahren und Grenzwerte fest. Dies wird den nationalen und Internationalen Normungsgremien überlassen, deren Normen damit quasi Gesetzeskraft erhalten. Die für die (quasi gesetzliche) EMV-Normung zuständigen Institutionen sind

- auf internationaler Ebene die **International Electrotechnical Commission IEC**
- deren Unterorganisation, das **Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques CISPR**
- auf europäischer Ebene das *Comité Européen de Normalisation CENELEC*

- sowie auf nationaler Ebene die *Deutsche Kommission Elektrotechnik*, ein Organ des VDE und des DIN. In Österreich der *Österreichische Verband für Elektrotechnik OVE*, in der Schweiz die *Electrosuisse*.

Die Einhaltung der Normen überwacht in Deutschland die Bundesnetzagentur BNetzA, vormals RegTP.

Die technische Komplexität, die unterschiedlichsten kommerziellen und (industrie-) politischen Interessen, die Verschiedenheit der Normungsgremien und vor allem die vielen höchst unterschiedlichen Produkte haben zu einer großen Vielfalt von EMV-Normen geführt. Umso erfreulicher ist, dass man sich im Rahmen der IEC weltweit für privat und industriell genutzte Geräte auf einheitliche Prüf- und Messmethoden festgelegt hat, auch wenn die Grenzwerte und Prüfschärfegrade für unterschiedliche Produkte und Wirtschaftsräume variieren. Diese Prüf- und Messverfahren sind als IEC-Normen verabschiedet und in die europäische bzw. nationale Normung übernommen worden. Einige IEC-Normen zur Messung der Wirksamkeit elektromagnetischer Schirme wurden im vorangegangenen Kapitel vorgestellt.

Die konkreten Anforderungen (Grenzwerte) sind in der EU vereinheitlicht. Die in das deutsche Normenwerk übernommenen Euro-Normen tragen die Bezeichnung DIN EN (mit der entsprechenden Europäischen Normennummer) und besitzen zusätzlich noch eine VDE-Nummer. In Österreich heißen die Normen OEVE/OENORM EN, in der Schweiz SN EN.

Gesonderte Normen gelten naturgemäß für Sendefunkanlagen (R&TTE-Richtlinie, geregelt im Gesetz über Funkanlagen und Telekommunikationseinrichtungen [FTGE 01]).

Neben diesem europäischen Normensystem für industrielle und privat genutzte Produkte gibt es gesonderte Normen für die Kfz-Industrie, die Luft- und Raumfahrtindustrie sowie für den militärischen Bereich. Außerdem gelten in anderen Wirtschaftsräumen zum Teil andere Normen.

Die EMV-Normenlandschaft ist sehr weitläufig. Eine Übersicht über alle Normen ist nicht beabsichtigt; sie sprengt den Rahmen dieses Buchs. Um dennoch eine Vorstellung über die Größenordnung geforderter Werte für Störfestigkeit und Emission zu erhalten, werden im Folgenden einige EU-Normen kurz angesprochen.

6.1.1.1 Störfestigkeit gegen Störfelder

Die Prüfung der Störfestigkeit erfolgt im zivilen Bereich nach IEC-Grundnormen der Reihe 61000-4. Durch Schirmung kann naturgemäß nur die Störfestigkeit gegen *feldgekoppelte* oder *gestrahlte* Störgrößen erhöht werden.

Die feldgebundenen Störfestigkeits-Prüfverfahren, die in diesen Fällen zum Einsatz kommen, sind

- Beaufschlagung mit elektrostatischen Entladungen nach [DIN EN 61000-4-2 01]. Die elektrostatische Entladung verursacht einen Strom mit kurzer Anstiegszeit, der ein magnetisches Feld induziert.
- Beaufschlagung mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Absorberhalle gemäß [DIN EN 61000-4-3 06].
- Beaufschlagung mit quasistatischen Magnetfeldern in der Helmholtz-Spule nach [DIN EN 61000-4-8 01], [DIN EN 61000-4-9 01] und [DIN EN 61000-4-12 07].
- Beaufschlagung mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in TEM-Wellenleitern gemäß [DIN EN 61000-4-20 03].
- Beaufschlagung mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Modenverwirbelungskammer gemäß [DIN EN 61000-4-21 03].

Besonders hervorzuheben ist dabei die Prüfung in der Absorberhalle; nach wie vor die Standardprüfung für alle Haushalts- und ISM-Geräte.

Neben diesen feldgekoppelten Störfestigkeitsprüfungen gibt es zahlreiche leitungsgebundene Prüfverfahren. Diese sind ebenfalls in der Normenreihe DIN EN 61000-4 beschrieben, aber hier nicht aufgeführt.

Welche dieser Prüfnormen mit welchen Prüfschärfen anzuwenden sind, regeln die Fachgrund-, Produktfamilien und Produktnormen. Die Prüfschärfegrade einiger häufig angewandter Normen sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Besondere Anforderungen gibt es militärischen sowie im KFZ- und Luftfahrtbereich. Hier wird oft eine Störfestigkeit im HF-Bereich von 100 V/m und darüber gefordert, [DO 160E 04], [MIL 461E 99]. In jedem Fall muss zur Feststellung der Prüfschärfe die gültige Norm oder Hersteller-Spezifikation herangezogen werden.

Die Störfestigkeitsanforderungen für leitungsgebundene Störgrößen auf Netz-, Daten- und Signalleitungen sind ebenfalls in den Fachgrund-, Produktfamilien- und Produktnormen enthalten. Diese Anforderungen gehören nicht zur Thematik „Schirmung“ und sind hier nicht aufgeführt.

Tabelle 6.1 Störfestigkeitsanforderungen gegen feldgebundene Störgrößen. Eine Erweiterung des Frequenzbereichs nach oben ist in Vorbereitung.

	Fachgrundnorm Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe Fachgrundnorm DIN EN 61000-6-1	Industriebereich Fachgrundnorm DIN EN 61000-6-2	Haushaltsgeräte, Elektrowerkzeuge und ähnliche Elektrogeräte Produktfamiliennorm DIN EN 55014-2	Einrichtungen der Informationstechnik Produktfamiliennorm DIN EN 55024
Magnetfeld mit energietechnischer Frequenz	3 A/m bei 50/60 Hz $\cong 3,77 \mu\text{T}$	30 A/m bei 50/60 Hz $\cong 37,7 \mu\text{T}$	-	1 A/m bei 50/60 Hz $\cong 1,26 \mu\text{T}$
Elektromagnetisches HF-Feld, amplitudenmoduliert	3 V/m von 80 MHz bis 1 GHz, 80% AM, 1 kHz	10 V/m von 80 MHz bis 1 GHz, 80% AM, 1 kHz	3 V/m von 80 MHz bis 1 GHz, 80% AM, 1 kHz	3 V/m von 80 MHz bis 1 GHz, 80% AM, 1 kHz
ESD, Kontaktentladung	4 kV	4 kV	4 kV	4 kV
ESD, Luftentladung	8 kV	8 kV	8 kV	8 kV
Anmerkung				Besondere Prüfungen an ausgewählten Einzel-frequenzen

6.1.1.2 Ausendung feldgebundener Störgrößen

Die Messung feldgebundener oder gestrahlter Störgrößen auf ziviler Ebene erfolgt ebenfalls mit weltweit genormten Messverfahren die u. a. in Grundnormen wie

- [CISPR 11 04] „Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment - Electromagnetic disturbance characteristics - Limits and methods of measurement“
- [CISPR 16-2-3 06] „Radiated disturbance measurements“
- [CISPR 22 06] „Information technology equipment - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement“

beschrieben sind.

Tabelle 6.2 Grenzwerte für die Funkstör-Feldstärke.

	Fachgrundnorm Wohnbereich, Geschäftsbereich und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe Fachgrundnorm DIN EN 61000-6-3	Industriebereich Fachgrundnorm DIN EN 61000-6-4	Haushaltsgeräte, Elektrowerkzeuge und ähnliche Elektrogeräte Produktfamiliennorm DIN EN 55014-1	Einrichtungen der Informationstechnik Produktfamiliennorm DIN EN 55022	
				Klasse A Industriebereich	Klasse B Wohnbereich
Gestrahlte Störaussendung 30 bis 230 MHz	30 dB(µV/m) in 10 m	30 dB(µV/m) in 30 m	30 dB(µV/m) in 10 m	40 dB(µV/m) in 10 m	30 dB(µV/m) in 10 m
Gestrahlte Störaussendung 230 bis 1000 MHz	37 dB(µV/m) in 10 m	37 dB(µV/m) in 30 m	37 dB(µV/m) in 10 m	47 dB(µV/m) in 10 m	37 dB(µV/m) in 10 m
Anmerkung		Quasipeak-Detektor	Quasipeak-Detektor	Quasipeak-Detektor	Quasipeak-Detektor

Die deutschen Fassungen dieser Normen heißen [DIN EN 55011 03],

[DIN EN 55016-2-3 07], [DIN EN 55022 07]. Als Prüfverfahren sind Messungen in Absorberhallen, auf Freifeldern, mittels Rahmenantennen sowie in-situ-Messungen vorgesehen.

Die Grenzwerte für feldgebundene Emissionen werden von Fachgrund-, Produktfamilien- oder Produktnormen vorgeschrieben. Einige der wichtigsten Grenzwerte sind in Tabelle 6.2 aufgeführt

Die Emissionsgrenzwerte für leitungsgebundene Störgrößen auf Netz-, Daten- und Signalleitungen sind ebenfalls in den Fachgrund-, Produktfamilien- und Produktnormen enthalten. Diese Anforderungen gehören nicht zur Thematik „Schirmung“ und sind hier nicht aufgeführt.

Für die Emissionen von KFZ- und Flugzeugkomponenten sowie im militärischen Bereich gelten ebenfalls wieder besondere Normen oder Hersteller-Spezifikationen. Besondere Bedeutung besitzen hier ebenfalls die [DO 160E 04] und der [MIL 461E 99].

Zur Verringerung quasistatischer, magnetischer Störfelder vgl. 6.1.3, zur Verringerung der HF-Störaussendung vgl. 6.1.2.

6.1.2 HF-Schirmung zur Verbesserung des EMV-Verhaltens

Ein elektromagnetischer Schirm dient naturgemäß zur Verringerung *feldgebundener* Emissionen und zur Erhöhung der Störfestigkeit gegen *feldgebundene* Störgrößen. Leitungsgebundene Störungen werden durch einen Schirm nur deshalb gedämpft, weil er gegebenenfalls mit Filtern ausgestattet ist. Dies ist wichtiger Gesichtspunkt, denn wenn eine rein leitungsgebundene Kopplung vorliegt – und das ist bei Frequenzen bis ca. 80 MHz oft der Fall – ist der Schirm unnötig.

Ist als Ursache für zu hohe Emissionen oder zu geringe Störfestigkeit allerdings ein feld- bzw. strahlungsgebundener Koppelpfad identifiziert, so gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verbesserung des EMV-Verhaltens, siehe [Schw 07]:

- EMV-gerechtes Platinendesign: niederinduktive Leitungsführung, Masseflächen auf der Leiterplatte,
- Verwendung von Bausteinen mit höherer Störfestigkeit / geringeren Emissionen,

- geringere Flankensteilheit von Impulsen,
- Änderung von Betriebsfrequenzen / Takten, insbesondere langsamere Taktung,
- geringere oder höhere Betriebsspannungen,
- Einsatz anderer Technologien (z. B. TTL statt CMOS oder umgekehrt),
- geänderte Schaltung; Schaltungsentwurf nach EMV-Gesichtspunkten,
- niederohmige / niederinduktive Masseführung innerhalb eines Gehäuses bzw. Schaltschranks, zusätzliche Masseverbindungen,
- Einsatz von Filtern oder Filterschaltungen,
- Einsatz von Ferriten,
- Entfernung / Änderung von Strukturen, die eine Antennenwirkung besitzen,
- bei Anlagen: Betrieb kritischer Komponenten an anderem Ort, Vergrößerung der Distanz zwischen Störquelle und Störsenke
- etc.

Diese Maßnahmen sind meist wesentlich preiswerter als Schirmungsmaßnahmen. Ihre Anwendung sollte daher zuerst geprüft werden.

Maßnahmen zur HF-Schirmung sind im Allgemeinen mechanischer Natur (Entlacken einer Kontaktfläche, Einsatz einer HF-Dichtung, Verwendung eines geschirmten Displays etc.). Verglichen mit Maßnahmen auf schaltungstechnischer Ebene (Änderung der Schaltung oder des Schaltungs-Layouts, Hinzufügen von Entstörkomponenten etc.) sind sie teurer und in der Umsetzung zeitaufwändiger. Auch deshalb ist eine sorgfältige Prüfung sinnvoll, ob Schirmungsmaßnahmen wirklich erforderlich sind.

Wenn die Notwendigkeit von Schirmungsmaßnahmen geklärt ist, sollten diese konsequent durchgeführt werden. Als Maßnahmen bieten sich an:

- Schirmung kritischer Bauteile / Baugruppen / Module durch Kapselung, siehe Bild 4.29.
- Verwendung von geschirmten Gehäusen / Baugruppenträgern, die

kommerziell erhältlich sind, vgl. Bild 4.27 und Bild 4.28.

- Verwendung geschirmter Schränke / Racks, die kommerziell verfügbar sind, vgl. Bild 6.1.
- Ertüchtigung bestehender Gehäuse zu Schirmgehäusen.
- Neuentwicklung von Schirmgehäusen.
- Betrieb von Geräten, Einrichtungen, Anlagen in geschirmten Räumen.



Bild 6.1 19“-Schrack (Rack) zur Aufnahme von Einbaueinheiten und Baugruppenträgern. Foto: Schroff GmbH.

Die Kosten für diese Maßnahmen liegen in einem Bereich zwischen einigen Cent und einigen 10.000 Euro, also innerhalb einer gewaltigen Spanne. Daher ist besonders bei großen Stückzahlen die Suche nach der wirtschaftlichsten Lösung lohnend.

Generell gilt die Aussage: Die Kosten sind umso niedriger, je früher geeignete Maßnahmen bei der Produktentwicklung oder Projektplanung berücksichtigt werden.

Leider senkt ein Schirm mit einer Schirmdämpfung von x dB die Emissionen nicht in jedem Fall um x dB. Dies liegt an den Unsicherheiten bei der Bestimmung der Schirmdämpfung, am Aufbau in der Anwendung (der von der bei der Schirmdämpfungsmessung abweicht) und nicht zuletzt an den Streuungen in der Serienproduktion von Schirmgehäusen und -schränken. Ob, und wenn ja wie effektiv der Einsatz eines Schirms ist, zeigt sich daher erst im Versuch bzw. in der HF-Prüfung.

6.1.3 Schirmung quasistatischer Magnetfelder zur Verbesserung des EMV-Verhaltens

Als Ursache quasistatischer Magnetfelder und damit als Störquelle treten all diejenigen Anwendungen elektrischer Energie in Erscheinung, bei denen hohe Ströme auftreten:

- Komponenten der elektrischen Energieversorgung: Starkstromkabel, Freileitungen, Transformatoren, Sammelschienen, Schaltanlagen,
- Bahnstromanlagen und deren Komponenten, insbesondere auch Fahrdrähte,
- Antriebe hoher Leistung,
- Induktionsöfen oder
- supraleitende Magneten, z. B. in Magnetresonanztomographen, siehe 6.3.

Störsenken sind vor allem diejenigen Geräte, deren Funktion auf Magnetfeldern basiert, z. B.:

- Magnetische Datenspeicher wie Festplatten,
- Magnetstreifen und Magnetstreifenlesegeräte,
- Kathodenstrahlröhren, beispielsweise in Monitoren.

Ein vom Strom I durchflossener Leiter bewirkt in einer Entfernung r zur Leitermitte ein Magnetfeld der Stärke

$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (6.1)$$

Ein einphasiger Leiter beispielsweise, der einen Strom von $100 A_{\text{eff}}$ führt,

erzeugt in einem Meter Abstand ein Magnetfeld von $15,9 \text{ A/m}_{\text{eff}}$. Dieser Wert liegt oberhalb der Störfestigkeitsanforderungen für den privaten Bereich, aber noch unterhalb des Wertes für industrielle Umgebungen, vgl. Tabelle 6.1. Die Problematik wird dadurch entschärft, dass sich im Allgemeinen der Neutralleiter in unmittelbarer Nähe der Phase befindet und aufgrund seiner entgegengesetzten Stromrichtung das resultierende Magnetfeld schwächt. Bei einem Dreiphasen-System mit symmetrischer Last superponieren sich die Ströme ebenfalls zu Null.

Im Umkehrschluss bedeutet dies aber, dass die Fahrdrähte von *Bahnstromanlagen*, die aufgrund der vergleichsweise niedrigen Betriebsspannung zudem noch hohe Ströme führen, bedeutsame Störquellen darstellen. In 3 m Abstand können Feldstärken von ca. 50 A/m auftreten. Eine Schirmung der Störquelle ist im Allgemeinen nicht möglich, oft aber auch nicht nötig, da die an Bahnlängen angrenzende Bebauung meist einen ausreichenden Abstand hat. Bei U-Bahnen, in Bahnhöfen etc. kann eine Schirmung benachbarter Gebäudebereiche je nach Nutzung erforderlich sein.

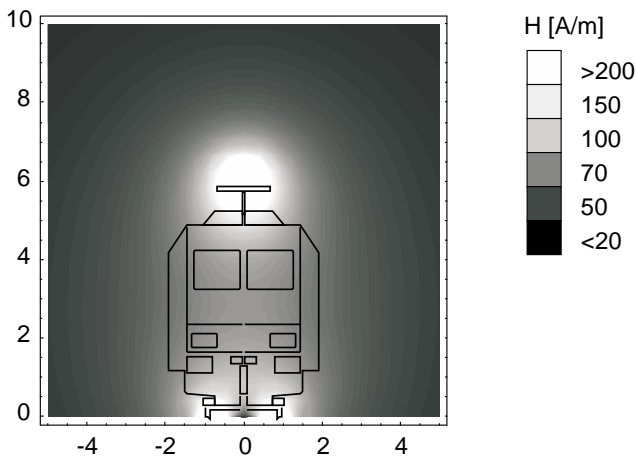


Bild 6.2 Magnetische Feldstärke in der Umgebung einer Bahnüberleitung, Bemaßung in m. Stromstärke im Fahrdraht 1000 A .

Den Verlauf von *Kabeltrassen* wird man üblicher Weise so wählen, dass ein ausreichender Abstand zu möglichen Störquellen gegeben ist. Ähnliches gilt auch für die Standorte von Transformatoren, deren Streufelder in der kritischen Größenordnung liegen können.

Wenn allerdings die Schaffung eines ausreichend großen Abstandes durch

bauliche Maßnahmen nicht möglich ist, bleibt nur die Schirmung von Kabeltrassen oder Räumen mit hochpermeablem Material, vgl. 4.4.7. Die Hersteller der Schirmungsprodukte machen entweder Angaben zur Permeabilität, so dass man die Feldschwächung ausrechnen kann, vgl. 3.1.2.1 oder geben Mindestabstände in Abhängigkeit von der Stromstärke an.

Im Gegensatz zur HF-Schirmung, wo mit zunehmender Frequenz Inhomogenitäten im Schirm eine größere Rolle spielen, sind bei der Schirmung langsamveränderlicher Magnetfelder Öffnungen im Schirm erlaubt. Es kann durchaus sinnvoll sein, nur eine Wand eines Raumes oder nur einen kritischen Abschnitt einer Kabeltrasse zu schirmen. Auch wird bei der Installation der Magnetfeldschirmung weniger fachliches Know-how benötigt.

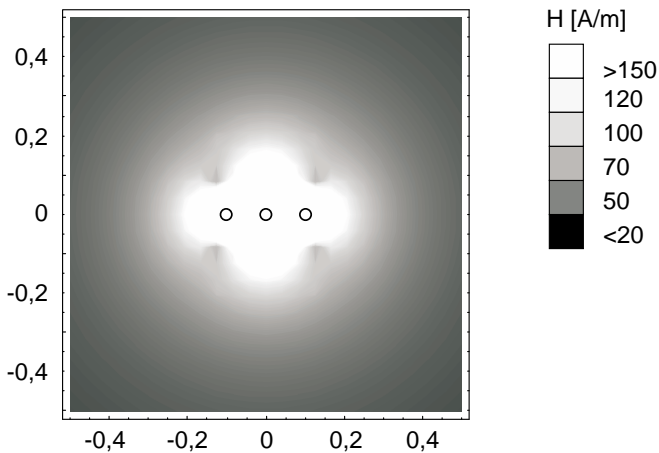


Bild 6.3 Magnetische Feldstärke in der Umgebung eines Drehstromsystems aus drei Einzelkabeln, Bemaßung in m. Stromstärke 100 A

6.1.4 Schirmung und Blitzschutz

Blitze sind Entladungen atmosphärischer Elektrizität. Bei Gewittern kommt es zu starken vertikalen Luftströmungen bei gleichzeitig hohen Temperaturunterschieden. Die Reibung von Eiskristallen führt zur Ladungstrennung und zur Ansammlung von Ladungswolken. So entstehen hohe elektrische Feldstärken zwischen den Wolken und zur Erde hin. Durch Ionisation – z. B. in Folge kosmischer Strahlung – wird eine Entladung in Form eines langen Plasmakanals ausgelöst: Der Blitz. Der Licht-

bogen, der sich ausbildet, ist elektrisch leitfähig. Sein Auftreten entspricht dem Schließen eines Schalters. Im leitfähigen Kanal des Lichtbogens kommt es zu mehreren Stromstößen mit Anstiegszeiten im μ -Sekundenbereich und maximalen Stromstärken von ca. 20 kA. Als Maximalparameter werden Stromamplituden von 200 kA bei einer Ladung von 500 As und einer maximalen Stromänderung von 300 kA/ μ s angenommen. Ein Blitz kann auf dreifache Weise Schaden verursachen:

Galvanische Kopplung: Der direkte Blitzeinschlag führt mit seinem hohen Strom zur thermischen Belastung oder Zerstörung des Opfers. An hohen Impedanzen (z. B. Erdboden) treten hohe Spannungen auf, die ebenfalls gefährlich für Lebewesen und Technik sind.

Induktive Kopplung: Der hohe Strom erzeugt ein starkes Magnetfeld, das außerdem kurze Anstiegszeiten besitzt (ca. 1 μ s). Das Magnetfeld und vor allem seine induzierende Wirkung kann Schäden verursachen, insbesondere durch Überspannungen. So wirkt sich der Blitz auch auf Störsenken aus, die vom direkten Blitzeinschlag nicht betroffen sind. Die Überspannungen können sich auf elektrischen Leitungen als Wanderwellen ausbreiten und so auch weiter entfernt zu Störungen führen.

Strahlungskopplung: Aufgrund der kurzen Anstiegszeit löst der Stromimpuls eine elektromagnetische Stosswelle aus (**L**ightning **E**lectro**M**agnetic **P**ulse, LEMP), die sich weiter auswirken kann, als dies dem magnetischen (Nah-) Feld des Stromes möglich ist. Diese Welle erzeugt HF-Störungen in weiter entfernten Störsenken. Wir nehmen sie z. B. als Knackgeräusch im Radio wahr.

Schirmungsmaßnahmen dienen der Reduzierung der induktiven Kopplung sowie der Strahlungskopplung.

Beim Blitzschutz unterscheidet man zwischen *äußeren Blitzschutz* (Blitzableiter, Erdung etc.), der Gebäude und Personen vor Blitzen schützen soll und dem *inneren Blitzschutz* auf Geräte-, System- und Anlagenebene. Standardisiert sind innere und äußere Blitzschutzmaßnahmen sowie das Blitzschutzmanagement in der Normenreihe [DIN EN 62305 07].

Der Bau von geschirmten Räumen wird im Allgemeinen dem inneren Blitzschutz zugeordnet. Alle Schirmungsmaßnahmen auf Komponenten-, Geräte- oder Systemebene sind ebenfalls innere Blitzschutzmaßnahmen.

Die erforderliche Wirksamkeit eines Blitzschutzsystems wird nach DIN

EN 62305-4 je nach äußerer Gefährdung in vier Schutzklassen eingeteilt. Welche Schutzklasse zur Anwendung kommt, ergibt sich durch eine Risikobewertung, die in Teil 2 der Norm beschrieben ist. Je nach Schutzklasse ist das Blitzschutzsystem für unterschiedliche Gefährdungsparameter ausgelegt, d. h. Leiterquerschnitte, Maschenweiten, Schirmung und andere konstruktive Eigenschaften der Blitzschutzeinrichtungen werden entsprechend vorgegeben. Die für die Blitzschutzklassen angenommenen Blitzparameter sind in Tabelle 6.3 aufgelistet.

Tabelle 6.3 Schutzklassen und zugrundegelegte Parameter. Die Wirksamkeit eines Blitzschutzsystems nimmt von Klasse I zu Klasse IV ab. Innerhalb der (gedachten) Blitzkugel sind Direkteinschläge eines Blitzes möglich. Die Blitzkugel wird gedanklich an so nahe die Fangeinrichtungen (Blitzableiter) herangebracht, dass sie diese berührt. Schützenswerte Gebäude- oder Anlagenteile müssen außerhalb der Blitzkugel liegen.

Gefährdungspegel / Schutzklasse	Radius der Blitzkugel [m]	Maximaler Scheitelwert des Blitzstroms [kA]	Minimaler Scheitelwert des Blitzstroms [kA]	Einfangwahrscheinlichkeit [%]
I	20	200	2,9	99
II	30	150	5,4	97
III	45	100	10,1	91
IV	60	100	15,7	84

Die Festlegung der inneren und äußeren Blitzschutzmaßnahmen erfolgt üblicher Weise mit dem Blitzschutz-Zonenkonzept gemäß DIN EN 62305-4. Dabei wird eine zu schützende bauliche Anlage entsprechend der Gefährdung in räumliche *Blitzschutzzonen* (BSZ, englisch *Lightning Protection Zone*, LPZ) unterteilt, siehe Tabelle 6.4.

Bei der Festlegung der Zonen müssen die Anforderungen an die Blitzschutzkomponenten (Erdungssystem, Überspannungsableiter, Schirmung) entsprechend der Störfestigkeit der zu schützenden Geräte oder Anlagen definiert werden.

Das Magnetfeld, das ohne einen Schirm bei einem Blitzeinschlag in der Entfernung r_0 zum Blitzkanal auftritt, besitzt die Feldstärke $H_0 = i/2\pi r_0$,

vgl. 2.2.4. Dieses Feld muss durch Schirmungsmaßnahmen zu weit gedämpft werden, dass die EMV-Störfestigkeitsanforderungen aus der Normenreihe DIN EN 61000-4 nicht überschritten werden. Je nach Prüfschärfegrad ist eine Störfestigkeit gegen (induzierte) Stoßspannungen von 0,5 kV – 4 kV vorgeschrieben [DIN EN 61000-4-5 07]. Die Störfestigkeit gegen impulsförmige Magnetfelder muss – ebenfalls je nach Prüfschärfe – 100 A/m bis 1000 A/m betragen [DIN EN 61000-4-9 01]. Welcher Prüfschärfegrad zur Anwendung kommt, ist in Fachgrund- oder Produkt(familien) normen festgelegt.

Tabelle 6.4 Blitzschutzzonen nach DIN EN 62305-4.

Blitzschutzzone		Beschreibung	Beispiel
äußere Blitzschutz-zonen	LPZ 0 _A	Gefährdet durch direkte Blitzeinschläge, den vollen Blitzstrom und das volle elektromagnetische Feld des Blitzes.	Antennen außerhalb des Schutzbereiches von Blitzfangeinrichtungen, Freileitungs- und Beleuchtungsmasten.
	LPZ 0 _B	Geschützt vor direkten Blitzeinschlägen, aber gefährdet durch das volle elektromagnetische Feld des Blitzes.	Antennen, Beleuchtungseinrichtungen, Anlagenteile im Freien innerhalb des Schutzbereiches von Blitzfangeinrichtungen
innere Blitzschutz-zonen	LPZ 1	Gefährdet durch anteilige Blitzströme, die durch die Stromaufteilung auf das Erdungssystem und durch Überspannungsschutzgeräte an den Zonengrenzen begrenzt sind. Eine Schirmung kann vorhanden sein.	Gebäudeinneres mit geerdeter Betonarmierung. Blitzstromableiter an den Eintrittsstellen von Netz- und Kommunikationsleitungen.
	LPZ 2...n	Weitere innenliegende Zonen, in denen der Blitzstrom weiter begrenzt wird. Eine Schirmung ist im Allgemeinen vorhanden.	Geschirmter Raum innerhalb eines Gebäudes. Überspannungsableiter an den Eintrittsstellen von Netz- und Kommunikationsleitungen.

Die Schirmung von Gebäuden oder Gebäudeteilen gegen das Magnetfeld von Blitzen wird oft durch die Vermaschung von Baustahlarmierungen realisiert. Das ist natürlich nur bei Neubauten möglich. Für die nachträgliche Ertüchtigung von bestehenden Bauten muss mit erhöhtem Aufwand gerechnet werden. Die gitterförmige Struktur der Baustahlmatten ist mit der Fangeinrichtung verbunden und geerdet. Bei einem direkten Blitzschlag fließen anteilig Blitzströme über die Leiter des Gitters. So sind die Stromdichten und damit das Magnetfeld deutlich niedriger als bei einem einzelnen Ableiter. Außerdem wirkt das Gitter als elektrodynamischer Schirm. Beide Effekte sind bei einer geringeren Maschenweite des Gitters besser ausgeprägt. DIN EN 62305-4 gibt Näherungsformeln für die Schirmdämpfung gitterförmiger Schirmstrukturen an, siehe Tabelle 6.5. Sie wurden numerisch bestimmt und berücksichtigen den Strom in den einzelnen Leitern und im Blitzkanal sowie die Wechselwirkung aufgrund von Gegeninduktion.

Tabelle 6.5 Magnetische Schirmdämpfung von gitterförmigen Schirmen nach DIN EN 62305-4. Die angegebenen Werte gelten für ein Volumen innerhalb des Schirms, in dem mindestens der Sicherheitsabstand w von den Wänden eingehalten ist (w : Maschenweite des Schirms).

Material	Schirmdämpfung [dB]*	
	25 kHz erster Teilblitz	1 MHz Folgeblitze
unmagnetisches Material	$20 \log \frac{8,5}{w / m}$	$20 \log \frac{8,5}{w / m}$
Stahl mit $\mu_r \approx 200$	$20 \log \frac{8,5}{w / m \sqrt{1 + \frac{18 \cdot 10^6}{(r / m)^2}}}$	$20 \log \frac{8,5}{w / m}$
w : Maschenweite [m], $w \leq 5m$ r : Radius der Leiter [m]		

*in der Norm als Schirmfaktor bezeichnet.

Dazu ein Beispiel: Die Risikobewertung ergibt die Notwendigkeit der Schutzklasse I. Das bedeutet, mit einem Blitz mit der maximalen Strom-

amplitude von 200 kA und einer maximalen Stromänderung von 300 kA/ μ s muss gerechnet werden. In der LPZ 0_B sind Geräte und Anlagen dem vollen elektromagnetischen Feld des Blitzes ausgesetzt. Bei einem einzelnen Ableiter im Abstand von 5 m beträgt der Maximalwert des Magnetfeldes $H_{\max} = 200 \text{ kA}/(2\pi \cdot 5 \text{ m}) = 6,37 \text{ kA/m}$. Um diesen Wert auf 100 A/m zu reduzieren, muss das Magnetfeld um den Faktor 64, also um 36 dB gedämpft werden. Dies erreicht man mit einer geschirmten Blitzschutzzone LPZ 1. Deren Schirmgitter müsste nach Tabelle 6.5 eine Maschenweite von 13,3 cm besitzen. Analoge Überlegungen gelten für die induzierten Stoßspannungen, die allerdings von der Induktivität des gestörten Stromkreises abhängen.

Da die Schirmung eines Gebäudes durch verschweißte Baustahlmatten mit einer Maschenweite von 13,3 cm sehr aufwändig ist, wird man für die LPZ 1 ein gröber vermaschtes Erdungssystem, ein sogenanntes Potenzial-Ausgleichsnetzwerk vorsehen. Bei einer Maschenweite von 5 m vermindert dieses die Feldstärke um ca. 5 bis 6 dB. Innerhalb der LPZ 1 kann durch Schaffung einer oder mehrerer LPZ 2 für die besonders empfindlichen Anlagen oder Anlagenteile (z. B. Rechnerraum) der notwendige Schutz erreicht werden. [Dehn 07].

Kabel sind insbesondere dann kritisch, wenn sie die Grenzen von Blitzschutzzonen durchdringen. Da die verbundenen Anlagenteile ohnehin geerdet sind, muss auch der Schirm aufgelegt und geerdet werden. Ist das nicht der Fall, induziert das Magnetfeld des Blitzes hohe Spannungen in den Signaladern, vgl. 4.5.5.

Wenn ein Kabel nicht mit Überspannungsableitern versehen ist, fließt beim Blitzeinschlag ein Stoßstrom über den Kabelschirm. Kabel müssen deshalb eine ausreichende Spannungsfestigkeit der Isolierung sowie eine ausreichende Stromtragfähigkeit des Kabelschirms aufweisen. Der Blitzstrom (im kA-Bereich, Ermittlung nach DIN EN 62305-1) wird in den Kabelschirm eingeprägt. Dabei darf die Spannungsfestigkeit der Isolierung nicht überschritten werden. Die Kopplungsimpedanz beschreibt das längenbezogene Verhältnis von Störspannung zu (eingepägtem) Störstrom. Sie darf somit im relevanten Frequenzbereich (25 kHz – 1 MHz) nicht höher liegen, als $Z_{k,\max} = U_{\max}/(I \cdot l)$.

6.2 Einsatz elektromagnetischer Schirme zum Schutz des Menschen

Der Einfluss elektromagnetischer Felder auf Lebewesen, insbesondere auf Menschen, wird nach wie vor kontrovers diskutiert. Unbestritten ist die Tatsache, dass elektromagnetische Felder bzw. Wellen sehr hoher Intensität aufgrund ihrer thermischen Wirkung im Körper Schäden verursachen können (dieser Effekt wird bei Mikrowellenöfen ausgenutzt). Zur Klärung der Frage, ob auch nicht-thermische Effekte, die schon bei geringerer Feldstärke auftreten könnten, Organismen schädigen, wurden bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, die aber keine abschließende Klärung bringen konnten. Gleiches gilt für Magnetfelder geringerer Frequenz.

Dieses Buch beschäftigt sich ausschließlich mit den technischen Maßnahmen, die zur Verringerung von Feldstärken getroffen werden können. Zu den Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf den Menschen und zur Höhe von Grenzwerten werden keine Aussagen getroffen.

Die Bewertung aller Erkenntnisse, die Schaffung von Rechtsvorschriften und die Festlegung von Grenzwerten zum Schutz der Bevölkerung ist letztlich ein politischer Prozess.

Um elektromagnetische Schirmung als Mittel zur Einhaltung von Grenzwerten einordnen zu können, müssen wir in den folgenden Abschnitten einen Blick auf die EMVU-Normung werfen.

6.2.1 EMVU-Normung

Für die Schaffung von Richtlinien zum Schutz des Menschen bzw. der Umwelt vor elektromagnetischen Feldern ist interdisziplinäre wissenschaftliche Zusammenarbeit von Biologen, Medizinern, Physikern und Elektrotechnikern nötig. Viele Gruppen an Universitäten und Laboratorien weltweit beschäftigen sich mit dem Themenbereich. Die Ergebnisse einzelner Studien müssen gesichtet und bewertet werden, um ein Gesamtbild zu erhalten, das Grundlage zur Festlegung von Grenzwerten ist. Diese Aufgabe erfüllen im internationalen Bereich die **World Health Organisation**, WHO, und die **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP**. Die ICNIRP - Empfehlungen finden weltweite Beachtung als Grundlage für nationale bzw. europäische Vorschriften.

Basierend auf den ICNIRP-Richtlinien gelten in der EU:

- Die Empfehlung des Rates 1999/519/EG [Eur 519 99]. Sie gilt für die gesamte Bevölkerung.
- Die Richtlinie 2004/40/EG [Eur 40 04]. Sie gilt für berufliche Exposition.

Es bestehen auch einige europäische Normen zum Thema EMVU, [DIN EN 50360 03], [DIN EN 50383 03], [DIN EN 50384 03], [DIN EN 50385 03], [DIN EN 50392 04], [DIN EN 50401 07], [DIN EN 50421 07]. Dazu kommen Normentwürfe.

Die Richtlinien der EU wurden durch Gesetze und Verordnungen in nationales Recht umgewandelt, in Deutschland bereits zum Teil 1996 durch die 26. BImSchV [BImSchV 96]. Dazu kommen Verordnungen der Berufsgenossenschaften zum Arbeitsschutz. Die Grenzwerte der nationalen Verordnungen sind für Gerätehersteller und Errichter oder Betreiber von Anlagen bindend.

Die Richtlinie 2004/40/EG [Eur 40 04] wurde bisher noch nicht in nationales Recht der EU-Mitgliedsstaaten umgesetzt. Die Frist dazu wurde bis zum 30. 4. 2012 verlängert, da die Umsetzung den Betrieb von Magnetresonanztomographen behindern würde.

Neben den in diesem Buch bereits behandelten Größen *Stromdichte*, *elektrische / magnetische Feldstärke*, *Leistung* und *Leistungsdichte* werden zur Bewertung der Strahlungsexposition in den Vorschriften noch weitere Größen heran gezogen. In der Ratsempfehlung [Eur 519 99] werden folgende Begriffe definiert:

Als *Kontaktstrom* (I_C) in [A] wird der Strom zwischen einer Person und einem Gegenstand bezeichnet. Ein leitfähiger Gegenstand in einem elektrischen Feld kann durch das Feld aufgeladen werden.

Die *spezifische Energieabsorption* (SA) in [J/kg] ist die je Masseneinheit biologischen Gewebes absorbierte Energie. In der Ratsempfehlung wird sie zur Begrenzung der nichtthermischen Wirkungen gepulster Mikrowellenstrahlung benutzt.

Die *spezifische Energieabsorptionsrate* (SAR) in [W/kg], gemittelt über den ganzen Körper oder Teile davon, ist die Rate, mit der Energie je Masseneinheit des Körpergewebes absorbiert wird. Die Ganzkörper-SAR ist

ein weithin akzeptiertes Maß, um schädliche Wärmewirkungen zu einer HF-Exposition in Beziehung zu setzen. Neben der mittleren Ganzkörper-SAR sind lokale SAR-Werte notwendig, um übermäßige Energiekonzentrationen in kleineren Körperbereichen infolge besonderer Expositionsbedingungen zu bewerten und zu begrenzen.

Von diesen Größen lassen sich magnetische Flussdichte, Kontaktstrom, elektrische und magnetische Feldstärke und die Leistungsdichte direkt messen.

Bei den Grenzwerten unterscheidet die Ratsempfehlung [Eur 519 99] zwischen *Basisgrenzwerten* und *Referenzwerten*.

Basisgrenzwerte gelten für Größen, deren physiologische Auswirkungen unmittelbar nachgewiesen wurden. In der EU-Richtlinie [Eur 40 04] wird (praktisch synonym) die Bezeichnung *Expositionsgrenzwerte* verwendet. Diese Größen lassen sich aber in der Praxis nur schwer bestimmen.

Deshalb dienen *Referenzwerte* der praktischen Beurteilung einer Expositionssituation durch Rechnung oder Messung. Die Einhaltung der Referenzwerte gewährleistet die Einhaltung der entsprechenden Basisgrenzwerte. Eine Überschreitung der Referenzwerte bedeutet allerdings nicht zwangsläufig, dass auch die Basisgrenzwerte überschritten sind, denn bei der Festlegung wurden hohe Sicherheitszuschläge berücksichtigt. In der EU-Richtlinie [Eur 40 04] wird für die Referenzwerte (praktisch synonym) die Bezeichnung *Auslösewerte* verwendet.

Die Basisgrenzwerte nach [Eur 519 99] und die Expositionsgrenzwerte nach [Eur 40 04] sind in Tabelle 6.6 gegenüber gestellt.

Es fällt auf, dass im HF-Bereich ab 1 kHz die Grenzwerte nach beiden Richtlinien gleich sind. Bei den langsamveränderlichen Feldern im darunterliegenden Frequenzbereich gibt es Unterschiede. [Eur 519 99] das begrenzt das magnetische Gleichfeld auf 40 mT, während [Eur 40 04] keine die Begrenzung vorsieht. (Zum Vergleich: Erdmagnetfeld 30 μ T bis 60 μ T). Allerdings müssen die Auslösewerte für sehr langsam veränderliche Magnetfelder nach Tabelle 6.9 beachtet werden.

Bei den sehr hohen Frequenzen, oberhalb von 10 GHz, lässt [Eur 40 04] die fünffache Leistungsdichte zu.

Tabelle 6.6 Basisgrenzwerte entsprechend [Eur 519 99] und [Eur 40 04].

Frequenzbereich	Magnetische Flussdichte [mT]		Stromdichte J für Kopf und Rumpf [mA/m ²], Effektivwert		Mittlere Ganzkörper SAR [W/kg]		Lokale SAR (Kopf und Rumpf) [W/kg]		Lokale SAR (Gliedermaßen) [W/kg]		Leistungsdichte S [W/m ²]	
	1999/519/EG	2004/40/EU	1999/519/EG	2004/40/EU	1999/519/EG	2004/40/EU	1999/519/EG	2004/40/EU	1999/519/EG	2004/40/EU	1999/519/EG	2004/40/EU
0 Hz	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
>0 Hz – 1 Hz	-	-	8	4	-	-	-	-	-	-	-	-
1 Hz – 4 Hz	-	-	8/f	40/f	-	-	-	-	-	-	-	-
4 Hz – 1000 Hz	-	-	2	10	-	-	-	-	-	-	-	-
1000 Hz – 100 kHz	-	-	f/500	f/100	-	-	-	-	-	-	-	-
100 kHz – 10 MHz	-	-	f/500	f/100	0,08	0,4	2	10	4	20	-	-
10 MHz – 10 GHz	-	-	-	-	0,08	0,4	2	10	4	20	-	-
10 GHz- 300 GHz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	50

Zu den Grenzwerten gibt Richtlinie [Eur 519 99] folgende Hinweise:

f ist die Frequenz in Hertz.

Der Basisgrenzwert für die Stromdichte soll vor akuten Expositionswirkungen auf ZNS-Gewebe (ZNS: **Z**entrales **N**erven**S**ystem) in Kopf und Rumpf schützen und enthält einen Sicherheitsfaktor. Die Basisgrenzwerte für ELF-Felder (ELF: **E**xtrêmement **L**ow **F**requency) beruhen auf nachgewiesenen schädlichen Wirkungen auf das Zentralnervensystem. Solche akuten Wirkungen sind im wesentlichen momentan, und es besteht keine wissenschaftliche Begründung für eine Änderung der Basisgrenzwerte für eine kurzzeitige Exposition. Da der Basisgrenzwert jedoch für schädliche Wirkungen auf das Zentralnervensystem gilt, können in anderen Körpergeweben als dem zentralen Nervensystem unter den gleichen Expositionsbedingungen höhere Stromdichten zulässig sein.

Aufgrund der elektrischen Inhomogenität des menschlichen Körpers sollten die Stromdichten über einen Querschnitt von 1 cm² senkrecht zur Stromrichtung gemittelt werden.

Für Frequenzen bis 100 kHz können die Spitzenwerte für die Stromdichten erhalten werden, indem der Effektivwert mit $\sqrt{2}$ ($=1,414$) multipliziert wird. Für Pulse der Dauer t_p sollte die auf die Basisgrenzwerte anzuwendende Frequenz über $f = 1/(2t_p)$ ermittelt werden.

Für Frequenzen bis 100 kHz und für gepulste Magnetfelder können die mit den Pulsen verbundenen maximalen Stromdichten aus den Anstiegs- und Abfallzeiten sowie der maximalen Änderungsrate der magnetischen Flussdichte berechnet werden. Die induzierte Stromdichte lässt sich dann mit den entsprechenden Basisgrenzwerten vergleichen.

Sämtliche SAR-Werte sind über 6-Minuten-Intervalle zu mitteln.

Die zu mittelnde Gewebemasse für lokale SAR-Werte beträgt 10 g eines beliebigen zusammenhängenden Körpergewebes; die so ermittelten SAR-Maximalwerte sollten für die Expositionsermittlung verwendet werden. Diese 10 g Gewebe sollen eine Masse von benachbartem Gewebe mit nahezu gleichen elektrischen Eigenschaften sein. Hinsichtlich der Bestimmung einer Masse von zusammenhängendem Gewebe wird anerkannt, dass dieses Konzept bei der Computerdosimetrie angewandt werden kann, bei direkten physikalischen Messungen jedoch zu Schwierigkeiten führen kann. Es kann eine einfache geometrische Form, beispielsweise eine kubische Gewebemasse verwendet werden, sofern die berechneten dosimetrischen Größen konservative Werte in bezug auf die Expositionsleitlinien aufweisen.

Für Pulse der Dauer t_p sollte die äquivalente, auf die Basisgrenzwerte anzuwendende Frequenz über $f = 1/(2t_p)$ ermittelt werden. Darüber hinaus wird bei gepulsten Expositionen für den Frequenzbereich von 0,3 bis 10 GHz und für die lokale Exposition des Kopfes ein zusätzlicher Basisgrenzwert empfohlen, um durch thermoelastische Expansion bedingte Höreffekte einzuschränken oder zu vermeiden. Danach sollte die SA 2mJ kg^{-1} nicht überschreiten, gemittelt über je 10 g Gewebe.

Tabelle 6.7 Referenzwerte entsprechend [Eur 519 99] und [BImSchV 96]. Für die Auslösewerte nach [Eur 40 04] siehe Tabelle 6.9.

Frequenzbereich	Stärke des E-Felds [V/m]		Stärke des H-Felds [A/m]		B-Feld [μ T]		Entsprechende Leistungsdichte ebener Wellen, S_{eq} [W/m^2]	
	1999/519/EG	26. BImSchV	1999/519/EG	26. BImSchV	1999/519/EG	26. BImSchV	1999/519/EG	26. BImSchV
>0 – 1 Hz	-	-	$3,2 \cdot 10^4$	-	$4 \cdot 10^4$	-	-	-
1 Hz – 8 Hz	10000	-	$3,2 \cdot 10^4$ /f ²	-	$4 \cdot 10^4$ /f ²	-	-	-
8 Hz – 25 Hz	10000	10.000 (gilt nur für 16 2/3 Hz)	4000/f	-	5000/f	100 (gilt nur für 16 2/3 Hz)	-	-
25 Hz – 800 Hz	250/ f [kHz]	5.000 (gilt nur für 50 Hz)	4/f[kHz]	-	5/f[kHz]	300 (gilt nur für 50 Hz)	-	-
800 Hz – 3 kHz	250/ f [kHz]	-	5	-	6,25	-	-	-
3 kHz – 65 kHz	87	-	5	-	6,25	-	-	-
65 kHz – 150 kHz	87	-	5	-	6,25	-	-	-
150 kHz – 1 MHz	87	-	0,73/ \sqrt{f} [MHz]	-	0,92/ \sqrt{f} [MHz]	-	-	-
1 MHz - 10 MHz	87/ \sqrt{f} [MHz]	-	0,73/ \sqrt{f} [MHz]	-	0,92/ \sqrt{f} [MHz]	-	-	-
10 MHz - 400 MHz	28	27,5	0,073	-	0,092	-	2	-
400 MHz – 2 GHz	1,375· \sqrt{f} [MHz]	1,375· \sqrt{f} [MHz]	0,0037· \sqrt{f} [MHz]	-	0,0046· \sqrt{f} [MHz]	-	f/200	-
2 GHz – 300 GHz	61	61	0,16	-	0,20	-	10	-

Alle weiteren Hinweise in den Dokumenten [Eur 519 99], [Eur 40 04] und [BImSchV 96] zur Messung und Interpretation der Grenzwerte sind zu beachten. Eine Übersicht über die Referenzwerte von [Eur 519 99] und [BImSchV 96] gewährt Tabelle 6.7.

Zu den Grenzwerten gehören laut Richtlinie [Eur 519 99] folgende Hinweise:

f ist die Frequenz in Hertz. (In der Vorschrift wird oft die Frequenz aus der 1. Spalte ohne Einheit eingesetzt). Die Darstellung hier ist eindeutig.

Bei Frequenzen zwischen 100 kHz und 10 GHz sind S_{eq} , E^2 , H^2 und B^2 über beliebige 6-Minuten-Intervalle zu mitteln.

Bei Frequenzen über 10 GHz sind S_{eq} , E^2 , H^2 und B^2 über beliebige $68/f^{1,05}$ -Minuten-Intervalle zu mitteln (f in GHz).

Kein E-Feld-Wert wird für Frequenzen <1 Hz angegeben, bei denen es sich um statische elektrische Felder handelt. Bei den meisten Menschen sind elektrische Oberflächenladungen bei Feldstärken unter 25 kV/m nicht störend wahrnehmbar. Belastende bzw. störende Funkenentladungen sollten vermieden werden.

Es gelten außerdem nach [Eur 519 99] die Grenzwerte für Kontaktströme nach Tabelle 6.8.

Tabelle 6.8 Referenzwerte für Kontaktströme [Eur 519 99] und [Eur 40 04].

Frequenzbereich	Maximaler Kontaktstrom [mA]	
	1999/519/EG	2004/40/EU
$>0 - 2,5$ kHz	0,5	1
$2,5$ kHz – 100 kHz	$0,5 \cdot f$ [kHz]	$0,4 f$ [kHz]
100 kHz – 110 MHz	20	40

Leider konnten die Referenzwerte für Feldstärken aus [Eur 40 04] nicht in Tabelle 6.7 übernommen werden, da die Frequenzbereiche nicht deckungsgleich sind. Für diese Werte (in [Eur 40 04] als Auslösewerte bezeichnet) siehe Tabelle 6.9.

Tabelle 6.9 Auslösewerte entsprechend [Eur 40 04].

Frequenzbereich	Stärke des E-Felds [V/m]	Stärke des H-Felds [A/m]	B-Feld [μ T]	Entsprechende Leistungsdichte ebener Wellen, S_{eq} [W/m^2]	Kontaktstrom I_C [mA]	Strom durch die Gliedmaßen I_L [mA]
>0 – 1 Hz	-	$1,63 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	-	1,0	-
1 Hz – 8 Hz	20000	$1,63 \cdot 10^5 / f$	$2 \cdot 10^5 / f$	-	1,0	-
8 Hz – 25 Hz	20000	$2 \cdot 10^4 / f$	$2,5 \cdot 10^4 / f$	-	1,0	-
25 Hz – 820 Hz	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$	-	1,0	-
820 Hz – 2,5 kHz	610	24,4	30,7	-	1,0	-
2,5 kHz – 65 kHz	610	24,4	30,7	-	0,4 f[kHz]	-
65 kHz – 100 kHz	610	$1600 / f$ [kHz]	$2000 / f$ [kHz]	-	0,4 f[kHz]	-
100 kHz – 1 MHz	610	$1,6 / f$ [MHz]	$2 / f$ [MHz]	-	40	-
1 MHz - 10 MHz	$610 / f$ [MHz]	$1,6 / f$ [MHz]	$2 / f$ [MHz]	-	40	-
10 MHz - 110 MHz	61	0,16	0,2	10	40	100
110 MHz - 400 MHz	61	0,16	0,2	10	-	-
400 MHz – 2 GHz	$3 \sqrt{f}$ [MHz]	$0,08 \sqrt{f}$ [MHz]	$0,01 \sqrt{f}$ [MHz]	$f / 40$	-	-
2 GHz – 300 GHz	137	0,36	0,45	50	-	-

Alle weiteren Hinweise in den Dokumenten [Eur 519 99], [Eur 40 04] und [BImSchV 96] zur Messung und Interpretation der Grenzwerte sind zu beachten, des Weiteren auch die Bewertungsvorschriften für multispektrale Feldursachen.

6.2.2 Maßnahmen zur Einhaltung von EMVU-Grenzwerten

Für *herkömmliche Geräte* und Anlagen im Sinne des EMVG [EMVG 98] bietet die Einhaltung der zur CE-Kennzeichnung erforderlichen Emissionsgrenzwerte meist die Gewähr der Einhaltung der EMVU-Grenzwerte der 26. BImSchV. Allerdings ist zu Bedenken, dass die EMV-Emissionsgrenzwerte für eine Messentfernung von 10 m bzw. 30 m gelten, während die EMVU-Grenzwerte jederzeit und überall eingehalten werden müssen. Elektromagnetische Schirmung kann dabei zur Einhaltung der Grenzwerte beitragen.

Bei *Sendefunkanlagen* treten naturgemäß höhere Feldstärken auf, welche die EMVU-Grenzwerte übersteigen können. Eine Schirmung von Antennen (die ja die elektromagnetische Energie absichtlich aussenden) ist nicht sinnvoll. Der Überschreitung von Grenzwerten in unmittelbarer Umgebung von Sendeantennen kann durch die Einhaltung von Schutzabständen gewährleistet werden.

Auch wenn die gesetzlichen Grenzwerte durch Gerätehersteller und Anlagenbetreiber eingehalten werden, fühlen sich viele Menschen durch elektromagnetische Felder beeinflusst. Unabhängig davon, ob dieses Empfinden physiologischen oder psychologischen Ursprungs ist, können im *privaten Bereich* Maßnahmen getroffen werden, um die Feldexposition zu senken:

- Quasistatische Magnetfelder werden durch hohe Ströme im 50 Hz *Stromnetz* und im $16 \frac{2}{3}$ Hz *Bahnstromnetz* hervorgerufen. Die Feldwirkung ist proportional zu $1/r^2$, nimmt also mit dem Abstand stark ab. Das Meiden der unmittelbaren Nähe stromführender Leiter reduziert daher die Feldexposition. Hohe Ströme fließen z. B. bei allen elektrischen Heizgeräten (Heizkissen!), Backöfen und leistungsstarken elektrischen Maschinen. Beim Abschalten fließen keine Ströme mehr; ein trennen vom Netz ist nicht notwendig.
- *Transformatoren* bzw. *Netzteile* verursachen quasistatische magnetische Streufelder. Diese Komponenten müssen vom Netz getrennt werden, damit die Streufelder verschwinden. Praktisches Beispiel: Ausstecken von Steckernetzteilen am Kopfende von Betten.
- *Hochspannungsleitungen* erzeugen starke quasistatische elektrische

Felder. Sie werden allerdings durch die Stahlarmierung von Wohngebäuden zuverlässig abgeschirmt, da diese als *Faraday'scher Käfig* wirkt. Selbst die Überspannung von Wohngebäuden ist unproblematisch. Das Magnetfeld der Hochspannungsleitungen hängt vom Strom ab. Da der Abstand zu den Leitern aus Sicherheitsgründen recht groß sein muss, ist damit auch eine starke Abnahme des Magnetfeldes verbunden.

- Anders verhält es sich mit den Magnetfeldern von *Stromversorgungskabeln*. Unabhängig von der Betriebsspannung können hohe Ströme fließen, bis in den kA-Bereich. Während das elektrische Feld durch den Kabelmantel vollständig abgeschirmt ist, kann das Magnetfeld die Umgebung fast ungehindert durchdringen. Abhilfe ist durch die Erhöhung des Abstandes oder durch eine Magnetfeldschirmung möglich, vgl. 4.4.7.
- *Mobilfunk-Basisstationen* senden elektromagnetische Wellen mit vergleichsweise hoher Leistung aus (50 W). Leistung der Endgeräte ist niedriger (1 – 2 W). Diese werden allerdings in der unmittelbaren Nähe des Kopfes betrieben, was wesentlich höhere Leistungsdichten entstehen lässt. Wer eine Gesundheitsbeeinträchtigung durch elektromagnetische Wellen fürchtet, kann seine Exposition deutlich verringern, indem er auf häufige Nutzung von Mobilfunkgeräten verzichtet. Ähnliches gilt auch für Schnurlos-Telefone und WLAN-Anwendungen.
- Bei Heimanwendung können *WLAN-Strecken* und *Schnurlostelefone* durch kabelgebundene Systeme ersetzt werden, wenn die Bereitschaft zum Komfortverzicht in ausreichendem Maße vorhanden ist.
- Eine *HF-Schirmung privater Räume* ist in der Praxis nicht sinnvoll. Ein einfaches Bekleben von Wänden mit „Abschirmtapete“ oder das Streichen von Wänden mit „Abschirmfarbe“ bringt keinen Erfolg, selbst wenn die verwendeten Materialien die vom Hersteller angegebene Schirmdämpfung tatsächlich besitzen. Die elektromagnetischen Wellen dringen nämlich nahezu ungehindert über eine Vielzahl von Schwachstellen (Fenster, Türen, elektrische Leitungen, Wasserleitungen etc.) in den Raum ein, wo sie von den leitfähigen Wänden auch noch reflektiert (statt absorbiert) werden. Die Kosten für eine wirklich funktionsfähiges architektonisches Schirmungssystem sind für Privat-

leute meist zu hoch. Außerdem wird die Funktionalität der Räume eingeschränkt.

- Während des Betriebs von *Mikrowellenöfen* sollte man sich nicht in deren unmittelbaren Nähe aufhalten. Öfen im Standby-Betrieb senden keine Strahlung aus, man muss sie also nicht vom Netz trennen.
- In der unmittelbaren Nähe von *Radio- und Fernsehsendern*, Radarstationen und anderen Hochfrequenzanlagen treten naturgemäß höhere elektromagnetische Leistungsdichten auf.

Die aufgezählten Maßnahmen sind *keine* Empfehlung des Autors, sondern lediglich Möglichkeiten zur Senkung der Feldexposition.

6.3 Einsatz elektromagnetischer Schirme in der Medizintechnik

Bei der Messung von Hirnströmen (EEG), der elektrischen Aktivität von Muskeln (EMG) bzw. Nerven (ENG) und bei anderen elektrodiagnostischen Verfahren werden elektrische Signale gemessen, die oftmals nur geringe Amplituden besitzen. Eine elektromagnetisch „ruhige“ Umgebung ist daher für diese Diagnoseverfahren wünschenswert, denn Geräte oder Systeme aus der Umgebung machen eine zuverlässige Diagnose oft unmöglich. Als Abhilfemaßnahme kommen vorzugsweise architektonisch geschirmte Räume zum Einsatz.

Haupteinsatzgebiet geschirmter Räume ist die *Magnetresonanztomographie* (MRT). Bei diesem Diagnoseverfahren wird mit einem supraleitenden Magneten ein sehr starkes magnetisches Gleichfeld erzeugt. Dessen Feldstärke beträgt bis zu 10 Tesla. (Zum Vergleich: Das Erdmagnetfeld besitzt eine Feldstärke von $30 \mu\text{T}$ - $60 \mu\text{T}$). Atomkerne besitzen ein magnetisches Moment. Mit dem Magnetfeld werden sie aus ihrer Ruhelage ausgelenkt. Die Abschirmung dieses statischen Feldes ist kaum möglich und auch nicht nötig. Allerdings wird es von hochfrequenten Feldern überlagert, die von magnetischen Sendeantennen erzeugt werden. So wird die Eigenfrequenz der Atomkerne (*Lamorffrequenz*) angeregt. Die in Resonanz versetzten Atomkerne verhalten sich wiederum wie kleine HF-Sender. Ihre Ausstrahlung wird mit Empfangsantennen gemessen. Je nach Art des untersuchten Gewebes klingt nach Abschaltung der Anregung die Eigenschwingung der Atomkerne unterschiedlich schnell ab, was bildgebend

dargestellt und zur Diagnose genutzt werden kann. Die Lamorfrequenz ist um so höher, je stärker das magnetische Gleichfeld ist. Bei einem 4 Tesla MRT beträgt sie beispielsweise 170,4 MHz. Der Trend in der MRT-Entwicklung geht hin zu immer stärkeren Gleichfeldern, die höhere Lamor-Frequenzen und somit höhere Auflösungen ermöglichen. Die Umgebung von Magnetspinresonanztomographen sollte vor Beeinflussung der HF-Felder geschützt werden, ebenso sollten äußere Beeinflussungen des MRT-Systems verhindert werden. Die dazu verwendeten geschirmten Räume müssen nur bei der Lamorfrequenz, also schmalbandig wirken, was die Konstruktion vereinfacht. Häufig wird ein Schirmdämpfungswert von 100 dB spezifiziert.

6.4 Elektromagnetische Schirmung zum Informationsschutz

Oft wird die Gegenwart als das *Informationszeitalter* bezeichnet. In der Tat nimmt der Stellenwert der Information aufgrund des *Technologiewandels* (EDV-Nutzung, Daten- und Kommunikationsnetze, verteiltes Wissen) und der *Globalisierung* zu. Während es bisher vor allem im politisch / militärischen Bereich ein großes Interesse gab, Informationen nur einem definierten Personenkreis zugänglich zu machen, ist dies mittlerweile auch für Wirtschaftsbetriebe aller Art zur Notwendigkeit geworden.

Die Problematik des *Informations-* oder *Geheimsschutzes* ist vielschichtig. Organisatorische Maßnahmen, Aufklärung und Schulung der Mitarbeiter, Dokumentenmanagement und –vernichtung, IT-Sicherheit (mit allen ihren Facetten), Zugangskontrolle etc.: Dies sind nur einige Beispiele für Themen, mit denen sich die Sicherheitsbeauftragten der Unternehmen beschäftigen müssen.

Ein Teilbereich des Geheimsschutzes ist die Verhinderung ungewünschter Informationsübertragung. Das Übertragungsmodell dazu ist in Abschnitt 1.1.4 erläutert. Die Übertragung von Information vom Sender hin zum Empfänger ist stets mit einem Energiefluss verknüpft. Dieser Energiefluss kann z. B. durch die Ausbreitung mechanischer Wellen (Schall) oder elektromagnetische Wellen auf Leitungen oder im freien Raum erfolgen.

Durch elektromagnetische Schirmung können Räume geschaffen werden, aus denen elektromagnetische Wellen nur stark gedämpft oder in kontrollierter Weise austreten können. Gegebenenfalls zusammen mit einer akus-

tischen Isolierung kann so ein Abfluss von Information verhindert werden, denn die stark gedämpften Wellen lassen keine Rekonstruktion (Demodulierung) ihres Informationsgehaltes mehr zu. Der akustische wie der elektromagnetische Kopplungspfad ist dann blockiert. Auf diese Weise wird ein (räumlicher) Bereich geschaffen, der den Nutzern ein hohes Maß an Vertraulichkeit bietet.

Eine Informationsübertragung aus einem solchen Raum zu einem (berechtigten) Empfänger außerhalb muss verschlüsselt erfolgen, um die Integrität des Schutzes sicher zu stellen.

Man unterscheidet bei geschirmten Räumen zum Informationsschutz zwischen *Abhörschutz* und *Abstrahlenschutz*, vgl. 4.4.1.5 und 4.4.2.9.

6.4.1 **Abhörschutz**

Beim Abhörschutz wird davon ausgegangen, dass sich ein Angreifer mit dem Ziel unberechtigter Informationsgewinnung durch technische Maßnahmen unbemerkt einen Übertragungskanal aus einem (räumlichen) Bereich zu einem Standort außerhalb aufbaut. Die Vertraulichkeit innerhalb des Bereichs ist dann nicht mehr gegeben. Diese Sichtweise setzt voraus, dass zumindest zeitweise Personen Zugang besitzen, die nicht zu 100% vertrauenswürdig sind. Dies ist in der Praxis bei fast allen Unternehmen oder Institutionen der Fall.

Tabelle 6.10 gewährt eine Übersicht über Abhörmittel und Gegenmaßnahmen. Es fällt auf, dass keine einzelne Gegenmaßnahme gegen alle Abhörmittel zu schützen vermag. Das „Non-Plus-Ultra“ ist ein fensterloser Raum mit elektromagnetischer Schirmung und akustischer Isolierung, vgl. 4.4.1.5. Derartige Räume werden vor allem von Regierungsorganisationen und von Firmen genutzt, denen Zugang zu hoheitlich geschützten Verschlussachen erlaubt gewährt wird (geheimschutzbetreute Wirtschaft).

Abhörgeschützte Räume mit geringer Schirmdämpfung bieten einen etwas niedrigeren Sicherheitsstandard, dafür aber mehr Komfort (Fenster!) und somit bessere Akzeptanz beim Nutzer, was sich insbesondere bei Schutz von Vorstandsbüros und Konzernzentralen auszahlt.

Tabelle 6.10 Technische Abhörmittel und Gegenmaßnahmen.

Abhörmittel	Übertragung	mögliche Gegenmaßnahmen
Richtmikrofone	akustisch	akustische Isolierung, Verrauschung mittels Rauschgeneratoren, Nutzung von Räumen im Gebäudeinneren
Lauschen	akustisch	akustische Isolierung, Zutrittskontrolle
Körperschallmikrofone	akustisch / elektronisch	akustische Isolierung und / oder elektromagnetische Schirmung, Sweeping (Planmäßige Suche nach Abhörmittel mit spezieller Ausrüstung)
Video- / Fotoüberwachung, ggf. mit Lippenlesen	optisch	Verdunkelung von Scheiben (Jalousien), Nutzung von Räumen im Gebäudeinneren
<p>Laserangriff: Beim Sprechen werden in einem Raum Glasscheiben oder Spiegel in Schwingungen versetzt. Bei Sichtkontakt in den Raum (z. B. vom Nachbargebäude) kann ein Laserstrahl auf diese spiegelnden Flächen gerichtet und der reflektierte Strahl wieder empfangen werden. Der reflektierte Strahl ist durch die Schwingungen moduliert. Durch Demodulation kann das Gespräch hörbar gemacht werden.</p>	optisch	Verdunkelung von Scheiben (Jalousien außenliegend), Nutzung von Räumen im Gebäudeinneren
<p>Minisender Audio, Video</p>	elektronisch	elektromagnetische Schirmung, Sweeping
<p>Mikrofone mit Übertragung über fest verlegte Leitungen Kommunikationskabel, Antennenkabel etc. Auch Wasserleitungen kommen in Betracht!</p>	elektronisch	elektromagnetische Schirmung (inkl. Filterung), Sweeping

Tabelle 6.10 (Fortgesetzt) Technische Abhörmittel und Gegenmaßnahmen.

Abhörmittel	Übertragung	mögliche Gegenmaßnahmen
Mikrofone mit Übertragung über das Stromnetz	elektronisch	elektromagnetische Schirmung (inkl. Filterung), Sweeping
manipulierte Festnetz-Telefone, Faxgeräte oder Telefonanlagen	elektronisch	Entfernen von TK-Einrichtungen bei sicherheitsrelevanten Gesprächen, Überprüfung der TK-Einrichtungen auf Manipulation
manipulierte Mobiltelefone oder Schnurlostelefone (letztere müssen u. U. nicht einmal zu Abhörzwecken manipuliert werden)	elektronisch	Entfernen von TK-Einrichtungen bei sicherheitsrelevanten Gesprächen, elektromagnetische Schirmung
drahtlose Sprech- oder Mikrofonanlagen (auch hier ist oft keine Manipulation nötig)	elektronisch	Entfernen der Einrichtungen bei sicherheitsrelevanten Gesprächen, elektromagnetische Schirmung
kompromittierende Abstrahlung	elektronisch	elektromagnetische Schirmung, Verwendung von speziellem strahlungsarmen Gerät

Ein anderer Ansatz ist, auf bauliche Maßnahmen komplett zu verzichten und nur durch Sweepings, also durch planvolles Suchen nach Abhöreinrichtungen mit dem nötigen Spezialgerät, die Vertraulichkeit einer Umgebung sicher zu stellen. Damit kann aber nur ein kurzzeitiger Schutz erzielt werden.

Für die geheimschutzbetreute Wirtschaft ist das Bundeswirtschaftsministerium der Ansprechpartner in Sachen Geheimschutz. Unterstützt wird es dabei vom **Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, BSI**. Diese Bundesbehörde hat eine Vielzahl von Aufgaben, insbesondere aus dem Themenbereich IT-Sicherheit. Die Beratung in Sachen Abhörschutz sowie die Überprüfung umgesetzter Maßnahmen gehören ebenfalls dazu. Neben der Privatwirtschaft werden auch nationale und europäische Behörden vom BSI beraten. Das BSI hat Abhörschutz-Richtlinien erstellt, die für die geheimschutzbetreute Industrie bindend sind. Diese Richtlinien basieren im

Wesentlichen auf NATO-Standards. Darin werden Eigenschaften abhörsicherer oder abhörgeschützter Räume wie Schirmdämpfung, akustische Dämpfung, Leitungsführung, bauliche Maßnahmen etc. spezifiziert. Auch Unternehmen, die nicht zum Schutz hoheitlicher Geheimnisse verpflichtet sind, ihren Sicherheitsstandard aber erhöhen wollen, können sich vom BSI beraten lassen.

Im militärischen Bereich gibt es ebenfalls Dienststellen, die nach NATO-Standards die Abhör- und Abstrahlsicherheit militärisch genutzter Räumlichkeiten prüfen.

6.4.2 Abstrahlschutz (TEMPEST)

EDV-Geräte und Netzwerke strahlen unbeabsichtigt elektromagnetischer Wellen aus. Militärische und zivile Behörden befürchten, dass Unbefugte diese Aussendungen empfangen und deren vertraulichen Informationsgehalt rekonstruieren können. Man spricht daher von *bloßstellender* oder *kompromittierender Abstrahlung*.

Eine Möglichkeit zu deren Vermeidung ist die Verwendung *abstrahlarmer Hardware*, also beispielsweise Rechner, die durch Einsatz von geschirmten Gehäusen und Filtern reduzierte Emissionen aufweisen. Diese Geräte müssen von den zuständigen Behörden (z. B. dem BSI) geprüft und zugelassen werden. Sie sind vergleichsweise teuer und nicht immer auf dem letzten Stand der Technik. Dafür sind sie ohne baulichen Aufwand sofort einsetzbar.

Eine andere Möglichkeit ist der Bau abstrahlsicherer, elektromagnetisch geschirmter Räume, die nach militärischer oder behördlicher Vermessung den Einsatz handelsüblicher Hardware erlauben. Auch für diese abstrahlsicheren Räume, 4.4.2.9, existieren Vorgaben des BSI bzw. NATO-Standards.

Bei der Festlegung der Abstrahlschutzanforderungen durch das BSI oder durch militärische Dienststellen wird maßgeblich die Lage der Räumlichkeiten berücksichtigt. Befindet sich ein Raum in einem Gebäude, das auch von nicht überprüften Personen ohne Zutrittskontrolle betreten werden darf (z. B. Bürohochhaus), so werden wesentlich höhere Anforderungen an den Abstrahlschutz gestellt, als bei Gebäuden, die sich innerhalb eines Sicherheitsbereichs befinden (z. B. Kaserne oder gesichertes Firmengelände mit

Zutrittskontrolle). Im letzteren Fall wird die Liegenschaft in Zonen unterteilt. Die Abstrahlschutzanforderungen für die einzelnen Zonen werden in Abhängigkeit zum Abstand der Bereichsgrenze festgelegt (*Zonenmodell* des BSI, NATO *Tempest-Zoning*).

6.4.3 Funktionsüberwachung der Raumschirmung

Die Achillesferse geschirmter Räume zum Informationsschutz ist ihre Anfälligkeit für Sabotage. Ihre Überprüfung kann nur durch eine Schirmdämpfungsmessung zuverlässig erfolgen. Diese ist aber mit einem recht hohen materiellen und personellen Aufwand verbunden und wird daher oft nur einmal pro Jahr oder noch seltener durchgeführt. Daher wäre ein System zur permanenten Funktionsüberwachung geschirmter Räume hilfreich. Ein derartiges System, das allerdings gegenwärtig noch nicht kommerziell verfügbar ist, könnte folgendermaßen funktionieren:

Vom HF-Ausgang eines Spektrumanalysators wird, gegebenenfalls unter Verwendung eines Verstärkers, eine fest im Raum angebrachte Breitband-Sendeantenne gespeist, Bild 6.4. Auf der Außenseite des Raumes befindet sich, ebenfalls fest installiert, eine Empfangsantenne, z. B. eine Leckleitung. Diese ist mit dem Eingang des Spektrumanalysators verbunden. Bei nachgewiesenermaßen intakter Schirmung wird mit dem Spektrumanalysator der Frequenzgang der Übertragungsfunktion erstmalig bestimmt und abgespeichert. Bei der Überprüfung der Schirmung wird das Spektrum erneut bestimmt und mit dem abgespeicherten verglichen. Weist es eine deutliche Abweichung (vor allem nach oben) von der Referenz auf, muss die Schirmung auf Fehler hin untersucht werden.

Um den Raum vollständig zu erfassen, sollten mehrere Leckleitungen verlegt und für jede eine Referenz abgespeichert werden. Bei der Funktionsüberprüfung könnte dann anhand der Lage der Leitung mögliche Fehlerstellen lokalisiert werden.

Mit entsprechender Software und ggf. einer selbsttätigen Umschaltung zwischen den Leckleitungen mittels Koaxialrelais könnte der Messvorgang weitgehend automatisiert und evt. sogar ferngesteuert werden. Somit müsste sich zur Sicherstellung der Integrität der Raumschirmung nicht zwangsläufig geschultes Personal vor Ort befinden.

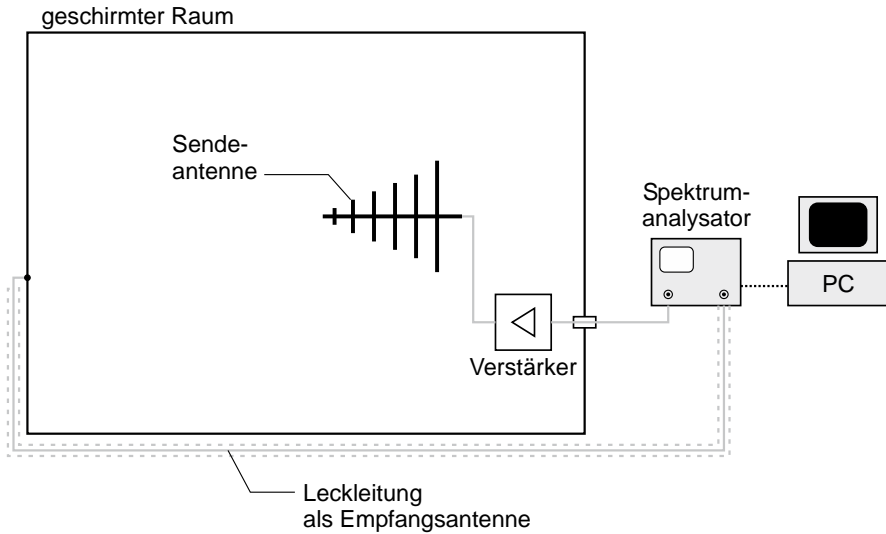


Bild 6.4 System zur Funktionsüberwachung von geschirmten Räumen.

6.5 Schutz gegen EMP und vorsätzliche elektromagnetische Beeinflussung

Elektromagnetische Pulse, die sich in Form von Stosswellen im freien Raum oder in Form von Wanderwellen auf Leitungen ausbreiten, können in besonderem Maße zu elektromagnetischer Beeinflussung führen. Diese Pulse besitzen unterschiedliche Ursachen. Besondere Beachtung verdient allerdings ihre absichtliche Erzeugung zur vorsätzlichen Störung von Geräten oder Anlagen. Schutz vor dieser Form der Sabotage erlangt zunehmende Relevanz im Bereich Anlagensicherheit / Objektschutz. Die zur Störung eingesetzten Störgrößen müssen allerdings nicht immer impulsförmig sein. Daher bietet es sich an, diesen Themenkomplex unter dem Oberbegriff *vorsätzliche Elektromagnetische Beeinflussung* oder *Intentional EMI* zusammenzufassen und zu betrachten.

6.5.1 Elektromagnetische Pulse (EMP)

Ein *elektromagnetischer Puls* (EMP) ist eine sprunghafte Änderung einer elektrischen oder magnetischen Größe, z. B. der Stromstärke, der Spannung oder der Feldstärke. Der Maximalwert, den die Größe erreicht, wird als Amplitude bezeichnet.

Von demjenigen Zeitpunkt, an dem der Impuls 10% seines Maximalwertes erreicht hat bis zum Erreichen der 90%-Marke vergeht eine Zeitspanne, die als *Anstiegszeit* bezeichnet wird, Bild 6.5. Um einen Impuls zu erzeugen, muss eine gewisse Energie in gespeicherter Form „vorrätig“ sein, z. B. in einem geladenen Kondensator. Durch einen Schaltvorgang wird der Energiespeicher schlagartig entladen, so dass trotz begrenzter Energie eine sehr hohe Leistung auftritt.

Die Energie der Impulse lässt sich – gedanklich – auf unendlich viele Einzel Frequenzen verteilen, vgl. 2.4. Man erhält so die spektrale Leistungsdichte eines Impulses oder einer Impulsfolge. Je kürzer die Anstiegszeit eines Impulses ist, um so stärker sind höherfrequente Anteile in ihm enthalten.

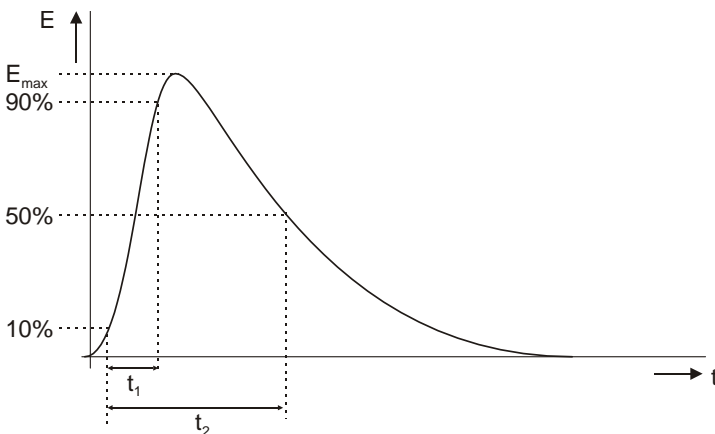


Bild 6.5 Impuls mit der Amplitude E_{\max} und der Anstiegszeit t_1 und der Rückzeit t_2 .

Ursachen für elektromagnetische Pulse

Impulse in der Energieversorgung: Prinzipiell führt schon das Betätigen eines Lichtschalters zu einem elektromagnetischen Impuls: Das Schließen des Stromkreises führt zu einem sprunghaften Ansteigen des Stromes. In größerem Maßstab tritt dies in Elektroenergiesystemen beim Schalten hoher Ströme auf. Die sprunghafte Stromänderung führt an Induktivitäten (z. B. von Transformatoren) zu „Spannungsspitzen“, die als Überspannungen bezeichnet werden. Diese breiten sich in Form von Wanderwellen auf den Leitungen aus. Diese Impulse stammen aus dem System selbst und werden von den Netzbetreibern beherrscht. Ihre Auswirkungen werden

durch Gegenmaßnahmen, z. B. durch Filterung begrenzt.

Blitze (LEMP): Siehe 6.1.4.

Kernwaffendetonation (NEMP): Bei der Zündung von Kernwaffen wird schlagartig Gammastrahlung in hoher Intensität freigesetzt. Diese ionisiert Teilchen in der Atmosphäre, so dass es zur Ladungstrennung kommt. Der Ausgleichsvorgang dieser Ladungen erzeugt ebenfalls eine elektromagnetische Schockwelle mit einer Anstiegszeit von ca. 4 ns, also wesentlich kürzer als beim LEMP-Impuls. Herkömmliche Blitzschutzsysteme sprechen daher oft auf den NEMP nicht an. Der NEMP ist Begleiterscheinung bei jeder oberirdischen Kerndetonation. Es bestehen auch Pläne, nukleare Sprengsätze in der Atmosphäre (Endo-NEMP) und im Weltraum (Exo-NEMP) zu zünden, um deren elektromagnetische Wirkung als Waffe nutzen zu können und große Bereiche elektromagnetisch „lahm zu legen“. Diese Atomdetonationen in großer Höhe zum Zwecke der elektromagnetischen (Zer-) Störung werden zusammenfassend auch als *HEMP* (**H**igh **A**ltitude **E**lectro**M**agnetic **P**ulse) bezeichnet. Militärische Gerätschaften wurden daher in der Vergangenheit gehärtet, um dem Einfluss des NEMP zu widerstehen. Zivile Geräte und Anlagen besitzen im Allgemeinen keinen NEMP-Schutz.

High Power Microwave – (HPM) Waffen: Wie erwähnt, lässt sich die Energieverteilung eines Pulses auf das elektromagnetische Spektrum verteilen. Je kürzer die Anstiegszeit ist, umso höhere Frequenzen treten auf und umso kürzer ist die Wellenlänge der sich ausbreitenden Stoßwelle. Kurzwelligere elektromagnetische Strahlung kann aber leichter durch Öffnungen in Gebäude, Fahrzeuge und Gehäuse eindringen. Außerdem sind in elektronischen Geräten Kabel und Leiterbahnen vorhanden, die für hochfrequente elektromagnetische Felder als Antenne wirken. Diese Verwundbarkeit elektronischer Geräte und Systeme machen sich sogenannte HPM-Waffen zu nutze. Man unterscheidet EMP-Generatoren, die Impulse mit Anstiegszeiten von 1 – 4 ns erzeugen und **Ultra-Wide-Band-** (UWB) Generatoren mit Anstiegszeiten < 1 ns. Letztere strahlen ihre Energie im Frequenzbereich zwischen 100 MHz und 1 GHz ab, genau in dem Bereich, in dem die meisten elektronischen Geräte besonders empfindlich sind. Zu den HPM-Waffen werden aber auch Generatoren gezählt, die kontinuierliche hochenergetische Störungen mit sinusförmigen Zeitverlauf erzeugen (CW-Sender).

Welche Wirkungen hat ein EMP?

Ein elektromagnetischer Impuls kann elektronische Geräte stören (z. B. einen Rechner zum Absturz bringen) oder gar zerstören. Letzteres geschieht, indem z. B. Spannungsüberschläge in Sperrschichten von Halbleitern herbeigeführt oder sogar Bauelemente und Leiterbahnen durch thermische Auswirkungen des Impulses zerstört werden. Abhängig ist die zerstörende Wirkung vor allem von der oben bereits erwähnten Anstiegszeit und von der maximalen elektrischen Feldstärke. Bei UWB-Pulsen (Anstiegszeit ca. 100 ps) sind elektrische Feldstärken $> 15 \text{ kV/m}$ ausreichend, um z.B. einen Rechner zuverlässig zum Ausfall zu bringen. Bei längeren Anstiegszeiten wie sie herkömmliche EMP-Generatoren erzeugen, werden höhere Feldstärken im Bereich 50 kV/m notwendig. Erst zweiter Linie hängt die Gefährlichkeit eines EMPs von dessen Gesamtenergie – also von der Dauer eines Einzelimpulses - ab.

Bemerkenswert bei Schädigungen durch einen EMP ist die Tatsache, dass dessen Auftreten nicht direkt wahrgenommen werden kann. Von sprengstoffbetriebenen EMP-Generatoren abgesehen, ist seine Erzeugung lautlos und unsichtbar. Die Schäden auf den Leiterbahnen können nur Fachleute von Blitzschäden unterscheiden.

6.5.2 HPM- / EMP-Bedrohungsszenarien

Der Bau von HPM-Waffen wurde in der Vergangenheit hauptsächlich durch das Militär vorangetrieben. Es gibt Berichte über deren Einsatz durch US-Truppen auf dem Balkan und im Irakkrieg. Als Energiequelle kommen neben elektrischen Energiespeichern (z. B. Kondensatoren) auch Sprengstoffe in Frage, deren Explosionsenergie in elektromagnetische Energie umgewandelt wird („Flux-Compression-Bomb“).

Aufgrund der leichten Verfügbarkeit schneller Halbleiterschalter und der allgemein zugänglichen Erkenntnisse über Impulsleistungstechnik - das Studienfach kann an vielen Hochschulen von jedem Elektrotechnikstudenten gehört werden – ist damit zu rechnen, dass auch die terroristische Szene in Kürze in der Lage sein wird, HPM-Generatoren zu bauen und einzusetzen. Prinzipzeichnungen und Funktionsschemata von EMP-Waffen sind im Internet zugänglich. Damit tritt ein neues, bisher weitgehend unberücksichtigtes Bedrohungspotential in Erscheinung.

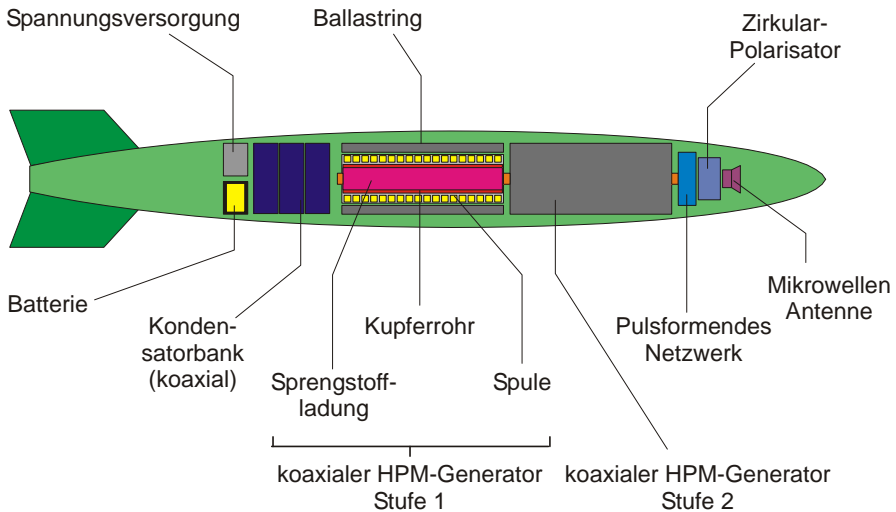


Bild 6.6 Zweistufige HPM-Bombe wie sie laut unterschiedlicher Quellen vom US-Militär eingesetzt wird: Aus der Batterie wird über eine geregelte Spannungsversorgung eine koaxiale Kondensator-Bank aufgeladen. Unmittelbar vor der Zündung wird diese auf eine Spule geschaltet, in der so ein sehr hoher Strom fließt. In der Spule befindet sich ein Kupferrohr mit der Sprengladung. Diese weitet bei der Zündung schlagartig das Kupferrohr auf, welches die Spulenwindungen kurzschließt. So kommt es zu einer schnellen Änderung des magnetischen Flusses in der Spule und somit zu einer sehr hohen Induktionsspannung. Mit dieser wird die zweite Stufe betrieben. An deren Ausgang befindet sich ein pulsformendes Netzwerk, mit dem sich der zeitliche Verlauf des Impulses einstellen lässt. Der Zirkular-Polarisator sorgt dafür, dass der mit einer Mikrowellen-Antenne abgestrahlte Impuls E-Feld-Komponenten in alle Richtungen besitzt. Prinzipzeichnungen und Funktionsbeschreibungen derartiger HPM-Waffen kursieren im Internet.

Denkbar ist beispielsweise ein HPM-Generator, der samt Energiespeicher (z. B. Kondensatoren) in einem Kraftfahrzeug installiert ist. Die Abstrahlung kann durch eine Antenne außerhalb der Karosserie in gerichteter Form erfolgen. Der Angreifer kann so den Generator unbemerkt in unmittelbare Nähe seines Ziels, z. B. einem Rechenzentrum oder einer leittechnischen Anlage eines Energie-, Gas- oder Wasserversorgungsnetzes bringen.

Die Folgen können verheerend sein: Von der Betriebsstörung bis hin zur physikalischen Zerstörung der Anlage.

6.5.3 HPM- / EMP-Schutz

Kritische Infrastrukturen wie Kraftwerke, leittechnische Anlagen oder Rechenzentren werden mit hohem Aufwand gegen Brand, Einbruch und Wasser geschützt. Die Bedrohung durch elektromagnetische Beeinflussung kommt als ein weiteres Szenario hinzu, wobei die Schirmung eines Gebäudes oder eines Raumes eine wirkungsvolle Schutzmaßnahme darstellt.



Bild 6.7 Geplantes Rechenzentrum mit EMP-Schutz im Wiener Augarten. Grafik: DCV GmbH.

Ein elektromagnetischer Impuls breitet sich im leeren Raum aus und trifft in einer bestimmten Entfernung sein Ziel. Von Behörden und Militärs wird eine zu erwartende elektrische Feldstärke von ca. 100 kV/m angenommen, die durch HPM-Waffen erzeugt werden kann. Die Störfestigkeit informationstechnischer Geräte liegt üblicher Weise bei ca. 10 V/m. Dies bedeutet, dass eine Dämpfung der Feldstärke um den Faktor 10.000 also 80 dB erforderlich ist. Diese Dämpfung sollte im Frequenzbereich 100 kHz – 4 GHz vorhanden sein, um alle Bedrohungsszenarien abzudecken.

Da die Feldstärke entsprechend der Entfernung abnimmt, kann hieraus schon eine erste Schutzmöglichkeit abgeleitet werden: Durch *organisatorische Maßnahmen* kann verhindert werden, dass Angreifer in die Nähe des verwundbaren Ziels gelangen. Wie groß der Schutzbereich sein muss, hängt von der angenommenen Stärke der Bedrohung ab und lässt sich nicht pauschal beantworten. Militärs gehen von einigen 100 m aus. Bei dichter Bebauung (z. B. in Städten) dürfte es schwierig werden, ausreichend große Schutzzonen zu bilden. Gegen einen Angriff aus der Luft ist ein Schutz durch organisatorische Maßnahmen ohnehin nur schwer möglich.

Gebäude dämpfen elektromagnetische Wellen. Im gefährlichen Frequenzbereich ist die Dämpfung herkömmlicher Gebäude allerdings eher gering. Die kurzwellige elektromagnetische Strahlung kann durch Fenster und andere Gebäudeöffnungen nahezu ungehindert eindringen. Aber auch die Schirmwirkung von Mauerwerk und Beton liegt nur in der Größenordnung von ca. 20 dB. Anlagen unter der Erde versprechen schon einen etwas besseren Schutz, sind aber im Allgemeinen nicht verfügbar. Über die Dämpfung zwischen einem (angenommenen) Angriffspunkt und dem Ort, an dem sich die zu schützenden Anlagen befinden, kann nur eine Schirmdämpfungsmessung eine zuverlässige Aussage liefern.

Den zuverlässigsten Schutz bieten *elektromagnetisch geschirmte Räume* mit gefilterter und EMP-geschützter Stromversorgung. Derartige Räume sollten idealer Weise folgende Merkmale aufweisen.

- Elektromagnetische Schirmdämpfung >80 dB nach IEEE Std. 299 im Frequenzbereich 100 kHz – 3 GHz.
- Netzspannungsversorgung über spezielle Filter mit EMP-Schutz: Das sind hochwertige HF-Filter mit integriertem Überspannungsableiter.
- Die Schirmung muss eine bestimmte Mindest-Stromtragfähigkeit besitzen. Bei Beaufschlagung einer homogenen Kupferschirmung mit einem 100 kV/m - Impuls treten beispielsweise Leistungsdichten von ca. 5 kW/m² auf. Im Allgemeinen besitzen alle wirksamen Schirmungsmaterialien eine ausreichende Stromtragfähigkeit.

Der Anbieter von EMP-geschützten Räumen sollte die Einhaltung der Schirmdämpfung für das gesamte System garantieren. Elektromagnetisch geschirmte Räume bieten neben dem EMP-Schutz zusätzlich den Vorteil der Abstrahlsicherheit. Beispielsweise können die meisten Anforderungen

des BSI ohne zusätzlichen Aufwand erfüllt werden.

6.5.4 Normung des EMP-Schutz

Neben zahlreichen militärischen Normen, die sich mit dem Thema (H)EMP beschäftigen (z. B. die Normenreihe VG 95371) gibt es auch europäische Normen: [DIN EN 61000-2-9 96], [DIN EN 61000-2-10 99], [DIN EN 61000-2-11 99]. Diese Normen basieren ihrerseits auf IEC-Normen des IEC-Gremiums SC 77C „High power transient phenomena“.

Dies gilt auch für die Normen [DIN EN 61000-4-23 01] und [DIN EN 61000-4-24 97] für den HEMP-Schutz. Darin werden eher Entstörmittel-Prüfungen als Störfestigkeitsprüfungen im eigentlichen Sinne beschrieben. Dennoch hat die IEC diese Normen in der „Störfestigkeits-Normenfamilie 61000-4-x untergebracht. Diese Zuordnung wurde auf europäischer Ebene übernommen.

Die Norm [DIN EN 61000-4-23 01] beschreibt ausführlich *Prüf- und Messverfahren zum Schutz gegen HEMP und andere gestrahlte Störgrößen*. Sie deckt also nicht nur den HEMP-Schutz, sondern auch den Schutz von anderen HPM-Waffen ab.

Die in der Norm vorgestellten Verfahren wurden in diesem Buch zum größten Teil schon beschrieben. Es handelt sich dabei um Verfahren zur Bestimmung der Schirmdämpfung von

- Gebäuden,
- Schirmkabinen und -räumen,
- Geräteschränken, Gerätegestellen und Schirmgehäusen,
- Kabel und Steckverbindern,
- leitfähigen Dichtungen,
- leitfähigen Abschirmblechen,
- Hohlleitern und Aperturen.

Als Messverfahren – in der Norm als Prüfverfahren bezeichnet - werden vorgeschlagen:

- Prüfung mit Impulsförmigen Feldern in HF-Wellenleitern – diese Messgelände werden häufig zur Prüfung der EMP-Störfestigkeit ver-

wendet. Die Norm beschreibt jedoch die Anwendung zur Bestimmung der Schirmdämpfung.

- Prüfung mit gestrahlten Dauerfeldern (CW-Bestrahlung) wie bei den gängigen Schirmdämpfungs-Messverfahren, vgl. 5.2 und 5.3.
- Prüfung mit CW-Feldern in TEM- und GTEM-Zellen.
- Prüfung durch Stromeinspeisung in Gehäuse, vgl. 5.6.4.
- Bestimmung der Kopplungsimpedanz und –admittanz, vgl. 5.5.
- Messung des spezifischen (Gleichstrom-) Widerstands.

Außerdem beinhaltet die Norm im umfangreichen Anhang

- Prüfkonzepte für Systeme bzw. Anlagen,
- Eigenschaften von Schirmkabeln,
- Einrichtungen für HEMP-Impulsmessungen,
- Geräte für CW-Prüfungen,
- Charakterisierung eines ebenen Schirms für HEMP-Schutz.

Die Norm ist also eine Sammlung von Messverfahren, Konzepten und Verfahrensanweisungen zur Messung, Messdatenverarbeitung und –bewertung. Außerdem enthält sie Beschreibungen von Messmitteln sowie theoretisch- / begriffliche Grundlagen.

Die **[DIN EN 61000-4-24 97]** beschäftigt sich mit *Prüfverfahren für Geräte zum Schutz gegen leitungsgeführte HEMP-Störgrößen*. Damit sind Überspannungsableiter oder ähnliche Bauelemente gemeint. Dieser Bereich gehört nicht zum Thema „Elektromagnetische Schirmung“.