



MESSUNG NICHTIONISIERENDER ELEKTROMAGNETISCHER STRAHLUNG

1. Teil: Frequenzbereich 100 kHz bis 300 GHz

Bericht der Arbeitsgruppe "Messung nichtionisierender
elektromagnetischer Strahlung in der Umwelt"

**Herausgegeben vom
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
Bern, Mai 1992**

**Bezugsquelle: Dokumentationsdienst
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
3003 Bern**

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
2 Begriffe und Definitionen	4
3 Immissionsgrenzwerte	8
4 Messempfehlung	11
4.1 Allgemeines	11
4.2 Angaben über die Quelle und das Untersuchungsgebiet	14
4.3 Beurteilungsgrößen	14
4.4 Abschätzen der Feldstärke(n)	18
4.5 Beurteilung der Messnotwendigkeit	19
4.6 Orientierende Messung	19
4.7 Messstandorte und Messzeit	20
4.8 Messeinrichtung	20
4.9 Kalibrierung	23
4.10 Durchführung der Messung	23
4.11 Messunsicherheit	25
4.12 Auswertung und Beurteilung	30
Zusammenfassung	33
Résumé	33
Riassunto	34
Abstract	34
Anhang 1: Checklisten für die Planung und Durchführung von Messungen	35
Anhang 2: Immissionsmessungen bei Radaranlagen	38
Literaturverzeichnis	42

1 Einleitung

Mit dem weit verbreiteten und immer noch zunehmenden Einsatz von elektrischen Anlagen hat sich die elektromagnetische Umwelt des Menschen wesentlich verändert. Verglichen mit den natürlicherweise seit jeher vorhandenen elektrischen und magnetischen Feldern hat die Stärke der vom Menschen erzeugten Felder in der Umwelt, im Wohnbereich und am Arbeitsplatz innerhalb weniger Jahrzehnte stark zugenommen, und immer neue Frequenzen werden nutzbar gemacht.

Mit Inkraftsetzung des Umweltschutzgesetzes (USG) auf den 1. Januar 1985 wurden unter anderem auch die nichtionisierenden elektromagnetischen Strahlen als Einwirkungen definiert, die so begrenzt werden müssen, dass sie die Umwelt weder schädigen noch erheblich belästigen können. Für die Beurteilung der schädlichen oder lästigen Einwirkungen dienen Immissionsgrenzwerte. Um die notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen für die Festsetzung solcher Grenzwerte zu erhalten, hat das BUWAL 1989 eine Arbeitsgruppe "Auswirkungen nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung auf die Umwelt", bestehend aus Medizinern, Toxikologen und Biologen einberufen. Diese Arbeitsgruppe hat in einem ersten Schritt die wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Reaktion von biologischen Organismen auf nichtionisierende elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich 100 kHz - 300 GHz ausgewertet und beurteilt (BUWAL 1990). Sie wird in absehbarer Zeit ebenfalls eine Stellungnahme zum niederfrequenten Bereich unter 100 kHz abgeben.

Um Immissionen nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung in der Umwelt mit Immissionsgrenzwerten vergleichen zu können, müssen diese Immissionen mit genügender Genauigkeit und repräsentativ gemessen werden können. Das BUWAL hat daher eine weitere Arbeitsgruppe von Messfachleuten einberufen, welche folgendes Mandat erhielt:

Die Arbeitsgruppe gibt eine Empfehlung ab, wie nach dem heutigen Stand der Technik elektrische und magnetische Felder in der Umwelt gemessen werden sollen. Es soll der Frequenzbereich von 0 - 300 GHz abgedeckt werden, mit Schwergewicht auf den häufig verwendeten Frequenzbändern.

Prof. F. Gardiol	Laboratoire d'Electromagnétisme et d'Acoustique, EPFL, Lausanne
H. Jossen	SUVA Luzern
E. Joye	Eidg. Starkstrominspektorat, Lausanne
Ch. Patry	Gruppe für Rüstungsdienste
Y. Rollier	SA l'Energie de l'Ouest Suisse, Lausanne
J. Siegenthaler	Generaldirektion PTT

Sekretariat:

Dr. J. Baumann	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
----------------	---

2 Begriffe und Definitionen

Im folgenden werden in alphabetischer Reihenfolge diejenigen Begriffe definiert und erläutert, welche in diesem Bericht verwendet werden. Für weitergehende Angaben konsultiere man die Lehrbücher der Elektrotechnik.

Äquivalente Leistungsdichte $S_E; S_H$ (W/m^2): Das Konzept der äquivalenten Leistungsdichte (NCRP 1981) ist nur im Nahfeld von Bedeutung (im Fernfeld stimmen tatsächliche Leistungsdichte und äquivalente Leistungsdichte überein). Im Nahfeld müsste zur Bestimmung der tatsächlichen Leistungsdichte das Vektorprodukt der elektrischen und magnetischen Feldstärke gebildet und zeitgemittelt werden; dies setzt voraus, dass beide Feldgrößen nach Betrag, Richtung und Phase gemessen werden können, was zurzeit noch mit grossen Schwierigkeiten verbunden ist. Als Vereinfachung behandelt man daher im folgenden ein Nahfeld wie ein Fernfeld und berechnet die äquivalente Leistungsdichte wie folgt:

$$S_E = E^2/377$$

$$S_H = 377 \cdot H^2,$$

wobei E und H die Effektivwerte der elektrischen (V/m) und magnetischen (A/m) Feldstärken sind.

Da die elektrische und magnetische Feldstärke im Nahfeld nicht über die Impedanz von 377 Ohm verknüpft sind, werden die äquivalenten Leistungsdichten S_E und S_H in der Regel verschieden. Massgeblich für die Beurteilung einer Immission ist der höhere der beiden Werte; dieser ist immer gleich gross oder grösser als die tatsächliche Leistungsdichte.

Englische Bezeichnung: Plane wave equivalent power density.

Elektrische Feldstärke E (V/m): In diesem Bericht bedeutet E durchwegs den Effektivwert des Betrags des elektrischen Feldvektors,

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2},$$

wobei E_x , E_y , E_z die Effektivwerte der elektrischen Feldstärke in den orthogonalen Raumrichtungen x, y, z bezeichnen.

Fernfeld: Räumlicher Bereich, in dem sich das elektromagnetische Feld als ebene Welle ausbreitet. Elektrischer und magnetischer Feldvektor stehen senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Sie weisen keine Phasenverschiebung auf, und ihre Beträge stehen in konstanter Beziehung:

$$E/H = 377 \text{ Ohm}$$

Für die Messpraxis gilt, dass die obige Beziehung ab einem Abstand von einigen Wellenlängen von der Quelle in guter Näherung erfüllt ist. Es genügt unter diesen Umständen, entweder die elektrische oder magnetische Feldstärke oder die Leistungsdichte zu messen.

Immissionen, Immissionsgrenzwerte: Gemäss Artikel 7 Umweltschutzgesetz werden Einwirkungen (darunter fällt nichtionisierende elektromagnetische Strahlung) beim Austritt aus einer Anlage als Emissionen, am Ort ihres Einwirkens als Immissionen bezeichnet. Die Immissionsgrenzwerte (IGW) bezeichnen die Höhe der Immissionen, welche während einer bestimmten Beurteilungszeit nicht überschritten werden darf.

Englische Bezeichnung für Immissionsgrenzwert: exposure limit.

Leistungsdichte S (W/m²): Die Strahlungsleistung einer elektromagnetischen Welle, die durch eine Fläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung durchtritt. Sofern nichts anderes vermerkt ist, handelt es sich in diesem Bericht immer um den zeitlichen Mittel-

wert der Leistungsdichte. Im Fernfeld bestehen folgende Zusammenhänge:

$$S = E \cdot H$$

$$S = E^2/377 = 377 \cdot H^2,$$

wobei E und H die Effektivwerte der elektrischen (V/m) und magnetischen (A/m) Feldstärken sind.

Andere Bezeichnungen: Leistungsflussdichte (DIN/VDE 1982); Energieflussdichte (IRPA 1985).

Magnetische Feldstärke H (A/m): In diesem Bericht bedeutet H durchwegs den Effektivwert des Betrags des magnetischen Feldvektors,

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2},$$

wobei H_x , H_y , H_z die Effektivwerte der magnetischen Feldstärke in den orthogonalen Raumrichtungen x, y, z bezeichnen.

Nahfeld: Räumlicher Bereich in der Nähe der Strahlungsquelle, in dem komplexere Feldverhältnisse vorliegen als im Fernfeld. Das reaktive Nahfeld, auch als Induktionsfeld bezeichnet, erstreckt sich von der Quelle bis zu einem Abstand von einigen Wellenlängen. Nach der australischen Messanleitung (Australien 1988) trägt die reaktive Komponente im Abstand von 3 Wellenlängen von einem idealen Dipol nur noch 10% zur Feldstärke bei. Dieser Abstand kann als grobe Regel für die Ausdehnung des reaktiven Nahfeldes betrachtet werden. Im reaktiven Nahfeld sind elektrisches und magnetisches Feld entkoppelt und müssen separat gemessen werden. Ab einem Abstand von einigen Wellenlängen von der Quelle genügt es hingegen, entweder die elektrische oder magnetische Feldstärke oder die Leistungsdichte zu messen.

Pulsleistungsdichte S_p (W/m^2): Mittelwert der Leistungsdichte während der Pulsdauer (nur bei gepulsten Signalen von Bedeutung).

Sekundärstrahler: Ein metallisches oder nichtmetallisches Objekt, welches einem Strahlungsfeld Leistung entzieht und diese seinerseits wieder abstrahlt. Dabei kann insbesondere in der Nähe von resonanten metallischen Objekten eine ausgeprägte örtliche Konzentration und Überhöhung der Feldstärken auftreten (Tell 1989). Solche Felder haben Nahfeldcharakter und sind in der Regel nur in kleinem Abstand vom Strahler von Bedeutung.

Spezifische Absorptionsrate SAR (W/kg): Die Strahlungsleistung, die von einem Organismus pro kg Körpergewicht absorbiert wird. Es handelt sich um die primäre dosimetrische Grösse zur Beschreibung der Wechselwirkung hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung mit Lebewesen. Die SAR ist proportional zur Leistungsdichte und unter anderem abhängig von der Grösse des absorbierenden Körpers, der Frequenz und der Beschaffenheit des Gewebes. Da die SAR unter Praxisbedingungen nicht gemessen werden kann, wurden die Immissionsgrenzwerte für die elektrische und magnetische Feldstärke bzw. die äquivalente Leistungsdichte in Abwesenheit von Personen oder Objekten festgelegt.

Ungestörte Feldstärke: Die elektrische oder magnetische Feldstärke in Abwesenheit von Personen oder feldverzerrenden Objekten. Die Immissionsgrenzwerte (Kapitel 3) beziehen sich auf die ungestörten Feldstärken.

3 Immissionsgrenzwerte

Die vom BUWAL einberufene Arbeitsgruppe "Auswirkungen nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung auf die Umwelt" hat zusammen mit einer Beurteilung der wissenschaftlichen Forschungsergebnisse auch Empfehlungen für Immissionsgrenzwerte abgegeben (BUWAL 1990). Diese sind für die gesamte Bevölkerung anwendbar. Ausnahmen bilden Expositionen am Arbeitsplatz und bei medizinischer Behandlung.

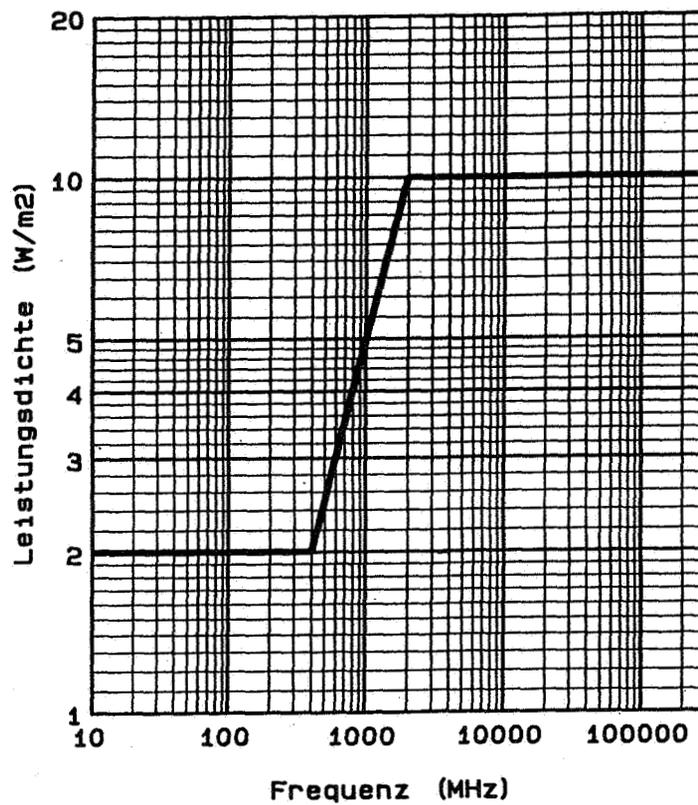
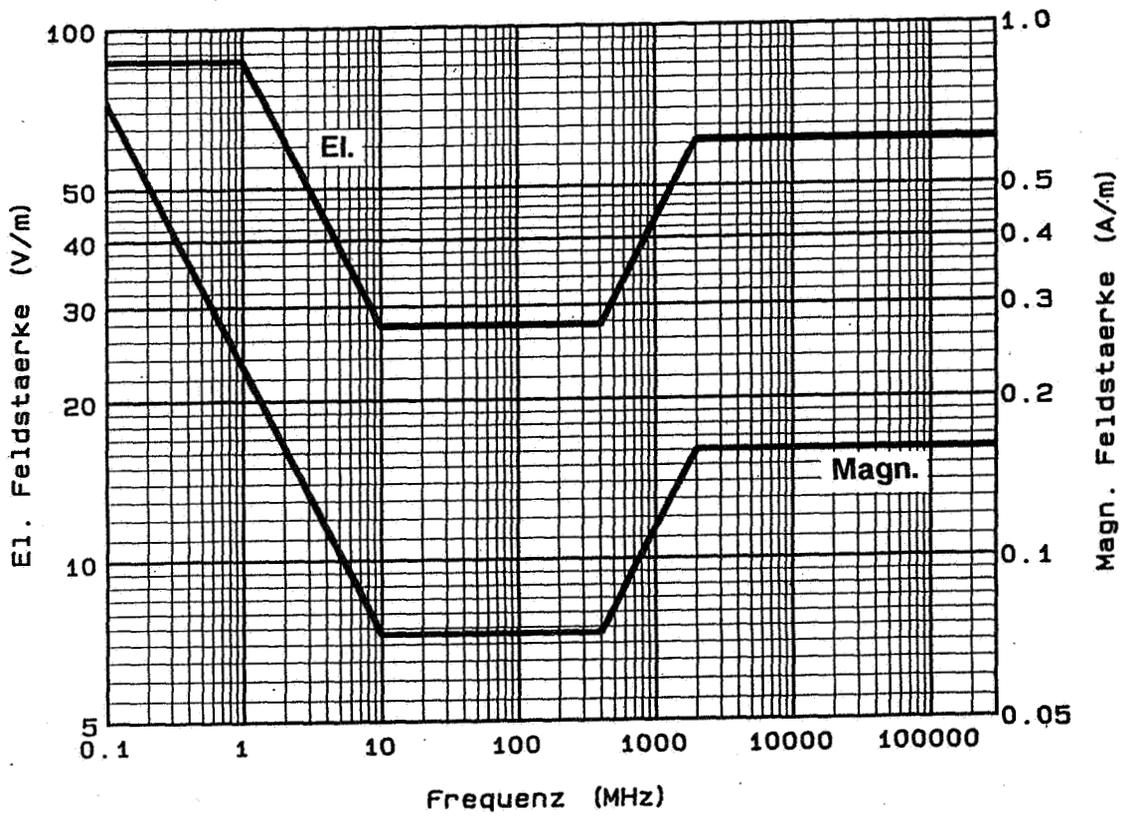
Bei der Exposition des ganzen Körpers soll der Effektivwert der ungestörten Feldstärke bzw. die äquivalente Leistungsdichte die Grenzwerte von Tabelle 1 nicht überschreiten. Eine graphische Darstellung findet sich in Figur 1. Für Frequenzen oberhalb 10 MHz gelten diese Grenzwerte für den 6-Minuten-Mittelwert der Leistungsdichte bzw. für die Wurzel aus dem 6-Minuten-Mittelwert der quadrierten Feldstärke.

Bei gepulster Strahlung wird zusätzlich die während der Pulsdauer gemittelte Leistungsdichte begrenzt: Während der Pulsdauer sollen die Leistungsdichte das 1000-fache, die Feldstärken das 32-fache des Grenzwertes von Tabelle 1 nicht überschreiten.

Frequenz f (MHz)	F e l d s t ä r k e		äquivalente Leistungsdichte S (W/m ²)
	Elektrisch E (V/m)	Magnetisch H (A/m)	
0.1-1	87	$0.23/\sqrt{f}$	---1)
1-10	$87/\sqrt{f}$	$0.23/\sqrt{f}$	---1)
10-400	27.5	0.073	2
400-2000	$1.375\sqrt{f}$	$0.0037\sqrt{f}$	f/200
2000-300000	61	0.16	10

Tabelle 1: Immissionsgrenzwerte für die Feldstärken und Leistungsdichten nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung (IRPA 1988). Frequenz f in MHz.

1) Unterhalb von 10 MHz sind indirekte Effekte (Berührungsspannungen oder Störungen von Herzschrittmachern) massgeblich für die Höhe der Grenzwerte. Da diese Effekte in direktem Zusammenhang zur Feldstärke stehen, wird auf die Angabe der äquivalenten Leistungsdichte verzichtet.



Figur 1: Immissionsgrenzwerte für die Feldstärken und Leistungsdichte nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung (IRPA 1988)

Sind mehrere Frequenzen gleichzeitig vorhanden, so gilt folgendes:

- Liegt mindestens eine der Frequenzen höher als 10 MHz, dann ist der Grenzwert eingehalten, wenn keine der folgenden Summen, gemittelt während 6 Minuten, den Wert 1 überschreitet:

$$\sum_i (E_i/E_{Gi})^2 ; \quad \sum_i (H_i/H_{Gi})^2 ; \quad \sum_i S_i/S_{Gi}. \quad (3.1)$$

- Liegen alle Frequenzen tiefer als 10 MHz, dann ist der Grenzwert eingehalten, wenn keine der folgenden Summen den Wert 1 überschreitet:

$$\sum_i E_i/E_{Gi} ; \quad \sum_i H_i/H_{Gi} . \quad (3.2)$$

Dabei bedeuten i die i -te Frequenz und G_i den jeweiligen Grenzwert bei der i -ten Frequenz gemäss Tabelle 1.

4 Messempfehlung

4.1 Allgemeines

Das Ziel der Untersuchung ist es zu überprüfen, ob Immissionsgrenzwerte für elektrische oder magnetische Felder eingehalten oder überschritten werden. Einer solchen Untersuchung liegt in der Regel eine präzise Fragestellung zugrunde, welche das Untersuchungsgebiet, die Schutzobjekte und den Frequenzbereich eingrenzt. Als Schutzobjekte kommen laut Umweltschutzgesetz Mensch, Tiere und Pflanzen in Frage, wobei nach bisheriger Erfahrung Fragen des Personenschutzes im Vordergrund stehen. Das Untersuchungsgebiet kann bereits zu Beginn klar definiert (z.B. ein bestimmter Raum in einem Gebäude) oder eher offen formuliert sein (z.B. Umgebung eines Senders, wo sich Personen aufhalten können). Im zweiten Fall lässt sich das Untersuchungsgebiet erst im Verlauf der Untersuchung eindeutig begrenzen.

Nach heutiger Erfahrung erreichen Immissionen nur in unmittelbarer Umgebung von Quellen die Immissionsgrenzwerte. Mit zunehmendem Abstand von der Quelle nimmt in der Regel auch die Stärke der Immissionen ab. Es muss bereits an dieser Stelle erwähnt werden, dass gerade im Nahfeld einer Quelle, dort, wo die höchsten Immissionen vorliegen, die messtechnischen Schwierigkeiten und auch die Messunsicherheit am grössten sind. Sofern aufgrund von Vorabklärungen zweifelsfrei feststeht, dass in einem vorgegebenen Untersuchungsgebiet die Immissionen wesentlich unter den Immissionsgrenzwerten liegen, dann ist es zulässig, auf eine Messung zu verzichten (siehe Abschnitt 4.5).

Immissionen können örtlich und zeitlich erheblich schwanken. Grundsätzlich gilt, dass die Untersuchung so angelegt werden soll, dass die örtlichen und zeitlichen Maximalwerte der Immissionen erfasst werden. Dabei sind je nach Situation bestimmte Mittelungszeiten vorgesehen.

Als Resultat der Untersuchung werden Beurteilungsgrössen ermittelt, welche mit den Immissionsgrenzwerten verglichen werden kön-

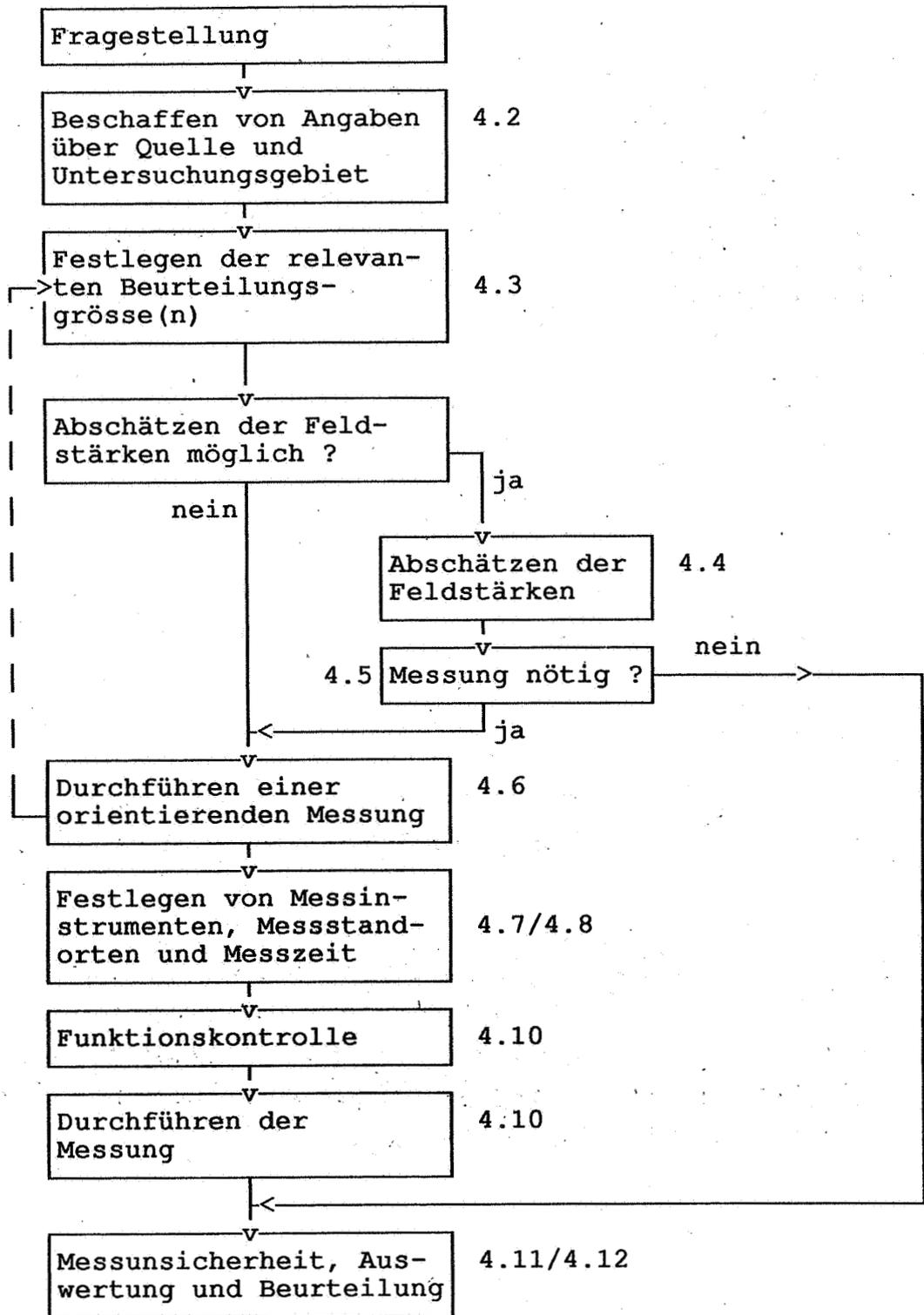
nen. Diese Beurteilungsgrößen sind je nach Frequenz und Typ der Immission verschieden definiert (z.B. 6-Minuten-Mittelwert der Leistungsdichte, Effektivwert der Feldstärke gemittelt über die Pulsdauer, gewichtete Summe der quadrierten Feldstärken bei mehreren Frequenzen); sie sind durch die Definition der Immissionsgrenzwerte (Kap. 3) vorgegeben.

In dieser Messempfehlung kann nicht auf jeden Einzelfall im Detail eingegangen werden. Vielmehr wird ein Rahmen abgesteckt, der ein in den wesentlichen Aspekten einheitliches Vorgehen bei der Untersuchung von Immissionen ermöglichen soll. Wegen der Vielzahl verschiedenartiger Quellen und Situationen ist es allerdings unerlässlich, dass im Einzelfall die Untersuchungsmethodik und Messtechnik dem zu untersuchenden Problem angepasst werden. Daraus ergibt sich, dass derartige Untersuchungen von qualifiziertem Personal durchgeführt werden sollen.

Figur 2 zeigt den Ablauf der Planung, Durchführung und Auswertung einer Untersuchung in Form eines Flussdiagramms. Die einzelnen Schritte werden im folgenden näher ausgeführt.

Die Arbeitsgruppe hat eine Reihe von Messanleitungen ausländischer Körperschaften gesichtet (ANSI 1981, DIN/VDE 1982, Önorm 1986, Seibersdorf 1988, Australien 1988, Tell 1983, Stuchly et al. 1986, 1987, Joyner 1988); als Vorlage für diese Empfehlung wurde vor allem die australische Anleitung (Australien 1988) verwendet, welche sich ihrerseits stark an ANSI 1981 anlehnt. Im Verlauf ihrer Arbeit hat die Arbeitsgruppe auch vom Entwurf der revidierten Messanleitung von ANSI (ANSI 1991) Kenntnis erhalten.

Für die Messung der Leckstrahlung von Mikrowellenkochgeräten gelten in der Schweiz die Vorschriften des SEV/CEI (SEV 1983).



Figur 2: Ablauf einer Immissionsmessung elektromagnetischer Felder

4.2 Angaben über die Quelle und das Untersuchungsgebiet

Zu Beginn der Messplanung sollen folgende Informationen über die Quelle und das Untersuchungsgebiet beschafft werden:

- Betriebszeiten
- Trägerfrequenz(en)
- Sendeleistung
- Polarisierung
- Art der Modulation
- Pulsbreite, Tastverhältnis, Pulsrepetitionsfrequenz (bei gepulsten Signalen)
- Antennentyp
- Höhe der Antenne über Boden
- Orientierung und Rotation der Antenne
- Antennendiagramm, Antennengewinn
- Messresultate von vergleichbaren Quellen
- Andere Quellen in der Nähe des Untersuchungsgebiets, welche die Messung beeinflussen könnten
- Zugänglichkeit des Untersuchungsgebietes für die Bevölkerung
- Topographie des Untersuchungsgebietes
- Leitende Objekte im Untersuchungsgebiet, die als Sekundärstrahler wirken können
- Temperatur, Feuchtigkeit, Bodenbeschaffenheit (feucht, trocken, schneebedeckt), Vegetation

In Anhang 1 findet sich eine Checkliste, welche für die Planung einer Untersuchung nützlich sein kann.

4.3 Beurteilungsgrößen

Aufgrund der in 4.2 erhobenen Angaben über die Quelle kann in der Regel die für die betrachtete Situation zutreffende Beurteilungsgröße festgelegt werden. Reichen die Angaben hierzu nicht aus, dann müssen die fehlenden Elemente in der orientierenden Messung (siehe 4.6) ermittelt werden.

Die Definition der Beurteilungsgrössen enthält 3 Elemente:

- die zu messende physikalische Grösse
- die Vorschrift für die zeitliche Mittelung
- ev. weitere Rechenoperationen (Summenbildung, Gewichtung)

Im folgenden werden drei Typen von Immissionen unterschieden:

- dauernd: kontinuierliche Immission während mindestens 6 Minuten. Bsp.: Radio-, Fernsehsignale
- unregelmässig: während 6 Minuten schwankend und/oder mit Einschaltdauern unterhalb 6 Minuten. Bsp.: Mobilfunk, bewegte Quellen
- gepulst: Bsp.: Radar

Bei allen drei Typen ist es möglich, dass nur eine Frequenz oder dass mehrere Frequenzen gleichzeitig vorhanden sind.

Gemäss der Richtlinie von IRPA (IRPA 1988, siehe Kapitel 3) soll bei Frequenzen oberhalb 10 MHz grundsätzlich die von einem Menschen absorbierte Leistung, ausgedrückt durch die spezifische Absorptionsrate SAR in W/kg Körpergewicht, begrenzt werden. Als Mittelungszeit werden 6 Minuten vorgegeben, was der thermischen Zeitkonstanten des Menschen entspricht. Es wird damit sichergestellt, dass während 6 Minuten nicht mehr als eine bestimmte Energie absorbiert wird. Da die SAR bei gegebener Frequenz proportional zur Leistungsdichte ansteigt, muss die **Leistungsdichte**, bzw. die **quadrierte** elektrische oder magnetische **Feldstärke** gemittelt werden. Bei gepulsten Signalen müssen zwei Grössen gleichzeitig beurteilt werden: die während 6 Minuten und die während der Pulsdauer gemittelte Leistungsdichte.

Bei Frequenzen unterhalb 10 MHz werden die Immissionsgrenzwerte nicht mehr aufgrund der Energieabsorption bestimmt, sondern durch Effekte, die direkt mit der Feldstärke im Zusammenhang stehen. Es werden aus diesem Grund in Tabelle 1 nur Immissionsgrenzwerte für die Feldstärken, nicht jedoch für die Leistungsdichte angegeben.

IRPA empfiehlt in der Beantwortung einer diesbezüglichen Anfrage (IRPA 1990), in diesem Frequenzbereich ebenfalls eine Mittelungszeit von 6 Minuten anzuwenden und den Effektivwert der Feldstärke zu mitteln.

Eine Zusammenfassung der Beurteilungsgrößen für den Fall, dass die Immission bei einer Frequenz eindeutig überwiegt, findet sich in Tabelle 2. Diese Beurteilungsgrößen sind mit den Immissionsgrenzwerten für die Feldstärken bzw. Leistungsdichten von Tabelle 1 bei der jeweiligen Frequenz zu vergleichen.

Frequenz	Signaltyp	Mittelungszeit	Beurteilungsgrösse		
			Leistungs- dichte	Feldstärke	
> 10 MHz	dauernd	6 Minuten	<S>	$\sqrt{\langle A^2 \rangle}$ oder <A>	
	unregelmässig	6 Minuten	<S>	$\sqrt{\langle A^2 \rangle}$	
	gepulst	{	6 Minuten	<S>	$\sqrt{\langle A^2 \rangle}$
Pulsdauer			<S>/1000	<A>/32	
< 10 MHz	dauernd oder unregelmässig	6 Minuten	---	<A>	
	gepulst	{	6 Minuten	---	<A>
			Pulsdauer	---	<A>/32

Tabelle 2: Beurteilungsgrößen für den Fall, dass nur eine einzige Frequenz vorhanden ist. Diese Beurteilungsgrößen sind mit den Immissionsgrenzwerten von Tabelle 1 für die Leistungsdichte bzw. die Feldstärken zu vergleichen.

- S: Aequivalente Leistungsdichte.
- A: Effektivwert der ungestörten elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke.
- < >: Die Größen zwischen < > sind während der bezeichneten Mittelungszeit zu mitteln.

Frequenz	Signaltyp	Mittelungszeit	Beurteilungsgrösse	
			Leistungsdichte	Feldstärke
mind. eine Frequenz > 10 MHz	dauernd	6 Minuten	$\sum_i \langle S_i \rangle / S_{Gi}$	$\sqrt{\sum_i \langle A_i^2 \rangle / A_{Gi}^2}$ oder $\sqrt{\sum_i \langle A_i \rangle^2 / A_{Gi}^2}$
	unregelmässig	6 Minuten	$\sum_i \langle S_i \rangle / S_{Gi}$	$\sqrt{\sum_i \langle A_i^2 \rangle / A_{Gi}^2}$
	gepulst	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 3em; margin-right: 10px;">{</div> <div style="margin-right: 10px;">6 Minuten</div> <div style="margin-right: 10px;">$\sum_i \langle S_i \rangle / S_{Gi}$</div> <div style="margin-right: 10px;">$\sqrt{\sum_i \langle A_i^2 \rangle / A_{Gi}^2}$</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 3em; margin-right: 10px;">}</div> <div style="margin-right: 10px;">Pulsdauer</div> <div style="margin-right: 10px;">$\frac{1}{1000} \sum_i \langle S_i \rangle / S_{Gi}$</div> <div>$\frac{1}{32} \sqrt{\sum_i \langle A_i^2 \rangle / A_{Gi}^2}$ #</div> </div>		
alle Frequenzen < 10 MHz	dauernd oder unregelmässig	6 Minuten	---	$\sum_i \langle A_i \rangle / A_{Gi}$
	gepulst	6 Minuten	---	$\sum_i \langle A_i \rangle / A_{Gi}$
		Pulsdauer	---	$\frac{1}{32} \sum_i \langle A_i \rangle / A_{Gi}$ #

Tabelle 3: Beurteilungsgrössen für den Fall, dass mehrere Frequenzen vorhanden sind. Diese Beurteilungsgrössen sind mit dem Wert 1 zu vergleichen.

- S_i : Äquivalente Leistungsdichte bei der Frequenz i .
- S_{Gi} : Immissionsgrenzwert für die äquivalente Leistungsdichte bei der Frequenz i gemäss Tabelle 1.
- A_i : Effektivwert der ungestörten elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke bei der Frequenz i .
- A_{Gi} : Immissionsgrenzwert für die elektrische bzw. magnetische Feldstärke bei der Frequenz i gemäss Tabelle 1.
- < >: Die Grössen zwischen < > sind während der bezeichneten Mittelungszeit zu mitteln.
- #: Die Summation erfolgt über diejenigen Frequenzen i , bei welchen Pulse gleichzeitig vorhanden sein können.

Sind nennenswerte Signale bei mehreren Frequenzen gleichzeitig vorhanden, dann werden die Einzelbeiträge aller Frequenzen zu gewichteten Summen zusammengefasst (siehe Gl. 3.1 und 3.2). Diese Summen sollen den Zahlenwert 1 nicht überschreiten. Eine Zusammenstellung der Beurteilungsgrößen für die Situation mit mehreren Frequenzen findet sich in Tabelle 3.

4.4 Abschätzen der Feldstärke (n)

Falls sich das Untersuchungsgebiet im Fernfeld der Quelle befindet, lassen sich die zu erwartenden Feldstärken rechnerisch abschätzen. Für die Abgrenzung zwischen Nah- und Fernfeld siehe die Ausführungen in Kapitel 2. Für die Berechnung geht man zunächst vom Normalbetrieb und der maximal spezifizierten Leistung der Quelle aus. Die Informationen über die Quelle und die Abschätzung der Feldstärken werden neben der Messplanung auch für die Beurteilung einer möglichen Gefährdung des im Feld exponierten Messpersonals benötigt.

Im Fernfeld lässt sich die Leistungsdichte S in Hauptstrahlrichtung gemäss

$$S = \frac{PG}{4\pi d^2} ,$$

mit einer Unsicherheit von ca. ± 5 dB abschätzen,

wobei

- S: Leistungsdichte (W/m^2)
- P: Sendeleistung (W)
- G: Antennengewinn (gegenüber einem Isotropstrahler)
- d: Abstand von der Antenne (m).

Die entsprechenden Feldstärken ergeben sich aus

$$E = \sqrt{377 \cdot S} \quad (V/m) ,$$

$$H = \sqrt{S/377} \quad (A/m) .$$

Das Nahfeld einer Quelle ist im allgemeinen so komplex, dass die Abschätzung der Feldstärken dort in den meisten Fällen nicht sinnvoll erscheint.

4.5 Beurteilung der Messnotwendigkeit

Wenn die obige Abschätzung ergibt, dass die Beurteilungsgrösse für die Feldstärke (siehe Tabellen 2 und 3) den zugehörigen Immissionsgrenzwert für die Feldstärke (Tabelle 1) bzw. den Wert 1 für die Summenausdrücke im ganzen Untersuchungsgebiet um mehr als einen Faktor 10 unterschreitet und systembedingt keine höheren Immissionen auftreten können, dann kann auf eine Messung verzichtet werden. Verwendet man als Beurteilungsgrösse die Leistungsdichte, dann gilt analog, dass der zugehörige Immissionsgrenzwert um den Faktor 100 unterschritten sein muss. Ebenso erübrigt sich eine Messung, wenn von einer in allen Belangen vergleichbaren Situation bereits Messresultate vorliegen. Bevor dieser Entscheid getroffen wird, sollen auch mögliche Störzustände der Quelle, z.B. Undichtigkeiten, welche höhere Immissionen als bei Normalbetrieb zur Folge haben könnten, in Betracht gezogen werden. Lassen sich solche nicht mit Sicherheit ausschliessen, ist eine orientierende Messung angezeigt.

4.6 Orientierende Messung

Nach der Auswertung der technischen Angaben über die Quelle und einer Abschätzung der zu erwartenden Feldstärken ist es von Vorteil, eine orientierende Messung durchzuführen, welche die folgenden Informationen liefern sollte:

- Alle Parameter, welche für die definitive Festlegung der Beurteilungsgrösse (siehe 4.3) benötigt werden
- Verifikation und Verfeinerung der Feldstärkeabschätzung
- Ermittlung derjenigen Zeiten, Orte und Betriebszustände der Quelle, wo höchste Immissionen auftreten
- Erkennen, Analysieren und Beheben von Messproblemen

4.7 Messstandorte und Messzeit

Das Untersuchungsgebiet umfasst in der Regel denjenigen Bereich, innerhalb dessen die Beurteilungsgrösse für die Feldstärke mindestens 10 %, diejenige für die Leistungsdichte mindestens 1 % des zugehörigen Immissionsgrenzwerts beträgt. Innerhalb des Untersuchungsgebiets werden die Messstandorte so verteilt, dass eine repräsentative Aussage über die Immissionssituation resultiert. Dabei sind insbesondere die Aufenthaltsorte und -zeiten der zu schützenden Lebewesen zu berücksichtigen. Bei inhomogenen Feldverhältnissen (z.B. infolge von Reflexionen) sollen die örtlichen Maxima der Beurteilungsgrössen erfasst werden. Auf potentielle Sekundärstrahler soll besonders geachtet werden. Es ist zudem empfehlenswert, die Verteilung der Standorte so zu konzipieren, dass die Ergebnisse in Form einer Feldstärkekarte dargestellt werden können.

Messzeiten und -dauer werden aufgrund der Betriebsdaten, der Erfahrung und der Ergebnisse der orientierenden Messungen so angesetzt, dass die zeitlichen Maxima der Beurteilungsgrössen erfasst werden. Lassen sich die Zeiten maximaler Immissionen nicht zum voraus festlegen, dann ist eine kontinuierliche Messung über längere Zeit notwendig. Sofern die Beurteilungsgrösse in eindeutiger Weise und nur vom Betriebszustand der Anlage abhängt (z.B. Feldstärke von der Sendeleistung), dann braucht man mit der Messung nicht zu warten, bis sich die höchsten Immissionen einstellen; es genügt in diesem Fall, die bei einem bestimmten Betriebszustand gemessene Feldstärke auf den maximal spezifizierten Zustand der Anlage umzurechnen.

4.8 Messeinrichtung

Die Messeinrichtung besteht in der Regel aus Sonde, Verbindungsleitung und Messgerät.

Die Messeinrichtung soll den Effektivwert der elektrischen oder magnetischen Feldstärke oder die äquivalente Leistungsdichte anzeigen. Im letzteren Fall soll bekannt sein, ob die Sonde auf das

elektrische oder magnetische Feld anspricht. Es ist empfehlenswert und insbesondere bei breitbandigen Messungen unumgänglich, den wahren Effektivwert (true rms) zu messen.

Im Fernfeld genügt die Messung entweder der elektrischen oder der magnetischen Feldstärke oder der Leistungsdichte. Im Nahfeld ist eine Messeinrichtung zu wählen, mit welcher elektrisches und magnetisches Feld separat gemessen werden können. Dies gilt auch für den Nahbereich von Sekundärstrahlern.

Es ist darauf zu achten, dass bei jeder einzelnen Frequenz die Signale aus allen Raumrichtungen und jeglicher Polarisation erfasst werden. Dies ist insbesondere in Nahfeldern und bei der Anwesenheit von Reflexionen von Bedeutung. Zu diesem Zweck wird die Verwendung von isotrop messenden Instrumenten empfohlen. Diese messen drei senkrecht zueinander stehende Komponenten des Feldvektors und summieren diese zum Effektivwert der Gesamtfeldstärke wie folgt:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2},$$

wobei A_x , A_y und A_z die Effektivwerte der elektrischen oder magnetischen Feldkomponenten in der jeweiligen Raumrichtung sind.

Damit sind die Signale aus sämtlichen Raumrichtungen und jeder Polarisation erfasst.

Die zeitliche Mittelung während des Beurteilungsintervalls (siehe Tabellen 2 und 3) soll wenn möglich bereits durch das Gerät ausgeführt werden.

Bei gepulsten Signalen muss auch der Effektivwert der Feldstärke, gemittelt während der Pulsdauer, bestimmt werden. Falls dieser Wert zeitlich variiert (z.B. wegen Rotation der Antenne), dann soll sein Maximalwert erfasst werden. Bei der Verwendung von diodenbasierenden und thermischen Breitband-Sonden muss besonders darauf geachtet werden, dass die Sonde durch die kurzen, aber intensiven Pulse nicht übersteuert wird. Eine ausführliche Darstellung der speziellen Verhältnisse bei der Messung von Radar-Immissionen findet sich in Anhang 2.

Sind nennenswerte Feldstärken bei mehreren Frequenzen gleichzeitig vorhanden, dann sind solche Messsysteme einzusetzen, welche die Bestimmung der zutreffenden Summenausdrücke in Tabelle 3 erlauben. Ist der Immissionsgrenzwert für alle vorkommenden Frequenzen gleich hoch, dann kann breitbandig gemessen werden. In diesem Fall ist sicherzustellen, dass das Messsystem den wahren Effektivwert ermittelt. Dies ist vom Konstruktionsprinzip her bei diodenbasierenden und thermischen Breitband-Sonden gewährleistet, solange sie im Bereich der quadratischen Kennlinie betrieben werden (Tell 1983). Sind die Immissionsgrenzwerte für die einzelnen Frequenzen verschieden, dann ist entweder eine frequenzselektive Messung notwendig, oder es sind breitbandige Sonden einzusetzen, welche bereits eine frequenzabhängige Gewichtung entsprechend der Grenzwertkurve vornehmen. Solche Sonden sind für den amerikanischen ANSI-Grenzwert C95.1-1982 (Aslan 1983; NARDA) und für den deutschen Grenzwert DIN/VDE 084.8 Teil 2 (Bossert et al. 1988) erhältlich. Allerdings unterscheiden sich beide der genannten Grenzwertkurven von derjenigen von IRPA (IRPA 1988), so dass diese gewichtenden Breitbandsonden für eine Messung und Beurteilung nach dem IRPA-Grenzwert in der Regel nicht eingesetzt werden können. Solange keine Sonde mit Gewichtung gemäss IRPA-Grenzwert erhältlich ist, muss frequenzselektiv gemessen werden, was den Einsatz von Spektrum-Analysatoren oder Messempfängern erfordert. Wenn allerdings die Feldstärke bei einer einzelnen Frequenz stark überwiegt, dann ist es zulässig, breitbandig zu messen und auf eine Gewichtung mit den Grenzwerten zu verzichten. Der dadurch bedingte systematische Fehler der Beurteilungsgrösse ist abzuschätzen und bei der Beurteilung der Immissionen (4.12) zu berücksichtigen.

Die Messung darf durch Signale, die ausserhalb des spezifizierten Frequenzbereichs des Messinstruments liegen, nicht beeinträchtigt werden (out of band response).

Sonden für das elektrische Feld sollen für das Magnetfeld unempfindlich sein und umgekehrt. Dies ist besonders für Messungen im Nahfeld zu beachten.

Die Abmessung von Sonden für Messungen im Nahfeld soll weniger als ein Viertel der Wellenlänge bei der höchsten Frequenz betragen, für welche die Sonde spezifiziert ist (Australien 1988).

Das Messgerät und die Verbindungsleitung sollen bis zum Maximum der zu erwartenden Feldstärken und für alle Frequenzen auch ausserhalb des spezifizierten Frequenzbereiches einstrahlungsfest sein. Beispielsweise tragen eine optische Verbindungsleitung zwischen Sonde und Messgerät, eine geeignete Geräteabschirmung und eine vom Netz unabhängige Stromversorgung dieser Forderung Rechnung.

4.9 Kalibrierung

Für die Messung sollen nur kalibrierte Messeinrichtungen verwendet werden. Die Kalibrierung soll von entsprechend akkreditierten Laboratorien (Verordnung über das schweizerische Akkreditierungssystem vom 30. Oktober 1991) durchgeführt werden.

4.10 Durchführung der Messung

Vor der Messung soll anhand einer bekannten Testquelle eine Funktionskontrolle durchgeführt werden. Diese Testquelle soll soweit möglich dieselben Eigenschaften aufweisen wie die im Untersuchungsgebiet zu messenden Felder, insbesondere bezüglich Frequenz, Feldstärkebereich und Modulationsparametern.

Der Betriebszustand der Quelle während der Messung ist zu dokumentieren.

Sonde, Messgeräte, Verbindungskabel und Messpersonen können zu signifikanten Verzerrungen des elektromagnetischen Feldes führen. Aufstellung und Bedienung der Messeinrichtung sind so vorzunehmen, dass das Messresultat davon minimal beeinflusst wird. Beispielsweise kann die Sonde auf einem Stativ mit niedriger Dielektrizitätskonstante (z.B. Schaumstoff, trockenes Holz) befestigt und die Ablesung aus genügender Entfernung vorgenommen werden.

Die Sonde soll genügend weit von metallischen Oberflächen entfernt sein, so dass eine direkte Ankopplung (kapazitiv oder induktiv) ausgeschlossen werden kann (siehe hierzu auch Abschnitt 4.11). Dieser Aspekt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Feldstärken im Nahfeld eines Sekundärstrahlers gemessen werden sollen.

Im Freien soll auf einer Höhe von 1.5 m über Boden gemessen werden, sofern sich nicht von der Fragestellung her eine andere Höhe aufdrängt. Im Innern von Gebäuden richtet sich die Messhöhe nach der Fragestellung.

Bei isotropen Sonden soll die Isotropie durch Rotation der Sonde überprüft werden. Der minimale und maximale Messwert sollen notiert werden. Dieser einfach durchzuführende Test liefert die Angaben über die Abweichungen vom idealen isotropen Verhalten unter den realen Bedingungen im Untersuchungsgebiet.

Bei der Verwendung von Richtantennen müssen nacheinander so viele Raumrichtungen abgetastet werden, dass alle relevanten Signale erfasst werden. Es ist darauf zu achten, dass von jedem Signal das zeitliche Maximum der Beurteilungsgrösse erfasst wird.

Die Messdauer an einem gegebenen Standort richtet sich nach der jeweiligen Beurteilungsgrösse (Tabellen 2 und 3). Wenn von Immissionen, welche zeitlich stabil sind, 6-Minuten-Mittelwerte gebildet werden müssen, dann ist es zulässig, während weniger als 6 Minuten zu messen.

Im Nahfeld einer Quelle müssen elektrisches und magnetisches Feld getrennt gemessen werden. Dies gilt auch im Nahbereich von Sekundärstrahlern.

Im Nahfeld und beim Vorhandensein von Reflexionen sind die Felder in der Regel im Bereich eines Bruchteils der Wellenlänge bis hin zu mehreren Wellenlängen inhomogen. Es sollen daher an einem gegebenen Standort die Feldstärkemaxima in der unmittelbaren Umgebung aufgesucht werden. Dabei können sich diese für das elektrische und magnetische Feld an verschiedenen Stellen befinden.

Eine Checkliste für die Protokollierung während der Messung findet sich in Anhang 1.

4.11 Messunsicherheit

Jede Immissionsmessung ist mit einer Unsicherheit behaftet. Diese muss bei jeder Messung abgeschätzt und zusammen mit dem Messresultat angegeben werden. Bei der Verwendung isotroper Breitbandmesssysteme können insbesondere folgende Faktoren zur Messunsicherheit beitragen:

- Unsicherheit der Kalibrierfeldstärke
- Frequenzgang der Sonde
- Anisotropie der Sonde
- Einkopplung in die Verbindungsleitung
- Einstrahlung ins Messgerät
- Nichtlinearität des Messsystems
- Nahfeldbedingungen
- Temperatureffekte
- Feldbeeinflussung durch die Messperson
- Wechselwirkung der Sonde mit metallischen Objekten
- weitere Faktoren wie elektrostatische Felder oder ionisierende Strahlung

Soweit dies möglich ist, werden diese Faktoren im folgenden quantifiziert. Für den Praktiker sind überdies einige Hinweise gegeben, wie solche Effekte, die ein Messresultat verfälschen, erkannt und eliminiert werden können.

Unsicherheit der Kalibrierfeldstärke

Aufgrund von übereinstimmenden Angaben mehrerer ausländischer Labors lassen sich solche Feldstärken im Labor zwischen 0.1 MHz-35 GHz mit einer Unsicherheit von höchstens ± 1 dB oder weniger erzeugen. (Kanda et al. 1986, Tofani und Kanda 1989, ANSI 1981, Australien 1988, Bossert und Dinter 1988, Seibersdorf 1988). Die meisten Hersteller von Breitbandmesssystemen geben in ihren Spezifikationen für einzelne Frequenzen sogar eine maximale Unsicherheit ihrer Kalibrierfelder von nur ± 0.5 dB an.

Frequenzgang der Sonde

Dieser beträgt für isotrope Breitbandsonden je nach Frequenzbereich ± 0.5 bis ± 3 dB. Diese Unsicherheit entfällt, wenn eine Kalibrierung genau bei derjenigen Frequenz vorliegt, welche in der Umwelt gemessen werden soll (dies trifft nur dann zu, wenn das Signal einer einzelnen Frequenz dominant ist).

Anisotropie der Sonde

Isotrope Sonden sollten idealerweise bei jeder Orientierung im Raum dasselbe Messresultat ergeben. Die Abweichung von diesem idealen Verhalten, also unterschiedliche Anzeige bei verschiedener Orientierung der Sonde in einem gleichbleibenden Feld, wird als Anisotropie bezeichnet. Sie wird von den Herstellern spezifiziert und beträgt im allgemeinen ± 0.5 bis ± 1.5 dB. Insbesondere bei Sonden, welche an einem Handgriff befestigt sind, ist sie grösser, wenn der Griff parallel zum elektrischen Feldvektor ausgerichtet wird. Die Anisotropie lässt sich auch im Untersuchungsgebiet überprüfen, sofern das Feld innerhalb der Ausdehnung der Sonde homogen ist.

Einkopplung in die Verbindungsleitung

Die direkte Einkopplung des elektrischen Feldes in nicht-optische Verbindungsleitungen kann eine Abweichung von bis zu 10 dB zur Folge haben, dann nämlich, wenn die Leitung parallel zum elektrischen Feldvektor ausgerichtet ist. Die Hersteller empfehlen daher, die Verbindungsleitung sowohl bei der Kalibrierung wie bei der Messung möglichst senkrecht zum elektrischen Feldvektor anzuordnen. Bei Messungen in der Umwelt, insbesondere im Nahfeld, ist jedoch die Richtung des elektrischen Feldvektors vielfach nicht bekannt. Bei Frequenzen unterhalb von 1 GHz kann diese Einkopplung erkannt und reduziert werden, indem die Verbindungsleitung mit Ferritringen umhüllt wird. Das Problem lässt sich durch den Einsatz einer optischen Übertragungsleitung zwischen Sonde und Messgerät vollständig ausschalten.

Einstrahlung ins Messgerät

Ein Messgerät, welches bei den im Untersuchungsgebiet vorliegenden Immissionen nicht einstrahlungsfest ist, soll grundsätzlich nicht verwendet werden. Einstrahlprobleme lassen sich unter Umständen erkennen, indem die Sonde und die Verbindungsleitung abgeschirmt werden.

Nichtlinearität des Messsystems

Hierzu sind die Angaben des Herstellers über den kalibrierten dynamischen Bereich zu beachten. Dieser Aspekt ist vor allem bei Messungen gepulster Signale von Bedeutung.

Nahfeldbedingungen

In Abschnitt 4.8 ist gefordert worden, dass E-Feld-Sonden für das Magnetfeld unempfindlich sind und umgekehrt. Bossert und Dinter (1988) empfehlen, bei Sonden, die im Nahfeld eingesetzt werden sollen, diesen Sachverhalt in reinen elektrischen (Plattenkondensator) bzw. magnetischen (Helmholtzspule) Feldern zu überprüfen (dieses Verfahren ist bei Frequenzen unterhalb ca. 100 MHz durchführbar). Stellt sich dabei eine unerwünschte Querempfindlichkeit heraus, dann sind die Kalibrierdaten für Messungen im Nahfeld nur bedingt brauchbar. Die Kalibrierung erfolgt nämlich in der Regel in einem homogenen Feld unter Fernfeldbedingungen (z.B. in einer TEM-Zelle). In Nahfeldern kann die Impedanz (Verhältnis von elektrischer und magnetischer Feldstärke) jedoch in unvorhersehbarer Weise von derjenigen des Fernfeldes (377 Ohm) abweichen. Damit besteht die Möglichkeit, dass die unerwünschte Empfindlichkeit einer E-Feld Sonde auf das Magnetfeld (oder umgekehrt) zu einer Verfälschung des Messresultats führt. Diese kann abgeschätzt werden, sofern die Querempfindlichkeit wie oben beschrieben ermittelt wurde und die Impedanz des zu messenden Nahfelds bekannt ist.

Temperatureffekte

Die Sonden werden in der Regel bei Raumtemperatur kalibriert. Der in den Spezifikationen angegebene Temperaturbereich garantiert in der Regel nur, dass das Messsystem in diesem Bereich funktioniert, nicht jedoch, dass die Kalibrierdaten für den ganzen Bereich gültig sind. Im Zweifelsfall sollen beim Hersteller die Temperaturkoeffizienten erfragt werden. Temperaturbedingte Abweichungen der Messresultate lassen sich auf zwei Arten erkennen:

- Eine bekannte Quelle wird nacheinander in Umgebungen mit verschiedener Temperatur gebracht und mit dem zu testenden Messsystem nach Einstellung des thermischen Gleichgewichts auf genau reproduzierbare Weise gemessen.
- Das zu testende Messsystem wird bei der interessierenden Temperatur vorkonditioniert und anschliessend sehr schnell zur Testquelle gebracht, welche sich auf Raumtemperatur befindet. Die Testmessung muss sofort erfolgen, bevor die Temperatur des Messsystems sich wesentlich derjenigen der neuen Umgebung angleicht.

Bei der Messung im Untersuchungsgebiet ist darauf zu achten, dass sich das Messsystem im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung befindet.

Feldbeeinflussung durch die Messperson

Insbesondere elektrische Felder können in der Nähe von Personen verzerrt werden. Gewünscht ist jedoch eine Messung des ungestörten Feldes. Die Messperson soll sich daher so weit von der Sonde entfernen, dass eine noch grössere Entfernung keine Änderung des Messresultats mehr zur Folge hätte. Notfalls ist die Ablesung mit einem Feldstecher vorzunehmen. Es wird empfohlen, die Sonde auf ein nichtleitendes Stativ zu montieren.

Wechselwirkung der Sonde mit metallischen Objekten

In unmittelbarer Nähe von metallischen Objekten kann eine direkte Wechselwirkung (kapazitiv oder induktiv) der Sonde mit solchen Metallteilen stattfinden. Für eine Sonde von 10' cm Ausdehnung wird das Messresultat um weniger als 1 dB verfälscht, wenn folgende Mindestabstände zu metallischen Objekten eingehalten werden (Australien 1988):

- 10 cm für Frequenzen oberhalb 10 MHz
- 15 cm für Frequenzen zwischen 3 und 10 MHz
- 25 cm für Frequenzen zwischen 0.5 und 3 MHz.

Eine empirische Feststellung eines geeigneten Mindestabstandes im Einzelfall (z.B. durch Wegbewegen der Sonde) ist oft nicht möglich, da metallische Objekte als Sekundärstrahler wirken, in deren nächster Umgebung die Feldstärke mit dem Abstand ohnehin sehr schnell abfällt.

Weitere Faktoren

Nichtionisierende elektromagnetische Strahlung tritt in Einzelfällen gemeinsam mit elektrostatischen Feldern oder Röntgenstrahlung auf. Ueber die mögliche Beeinflussung der Messgenauigkeit durch solche Einflüsse sind die Angaben des Herstellers zu konsultieren.

Einen Ueberblick über die Schwierigkeiten und Messunsicherheiten bei der Verwendung kommerziell erhältlicher isotroper Breitbandmesssysteme gibt eine Studie von Glimm und Münter (1989):

Für 126 isotrope Breitbandmessgeräte verschiedener Herkunft und Bauart wurde eine Vergleichskalibrierung in einer TEM-Zelle bei

verschiedenen Frequenzen im Bereich von einigen kHz bis 30 MHz vorgenommen. Neben sehr gut bewerteten Messgeräten wurden auch solche gefunden, deren Verhalten von den Spezifikationen erheblich abwich. Die hauptsächlichen Fehlerquellen waren:

- Einkopplung in das Verbindungskabel
- nicht ohne weiteres erkennbare Defekte
- Fehler in den Kalibrierdaten
- ausgeprägte Abweichung von der Isotropie

Es ist aufgrund dieser Befunde zu empfehlen, sich bei der Verwendung isotroper Messsysteme nicht nur auf die Spezifikationen zu verlassen, sondern das Verhalten dieser Geräte in geeigneten Testfeldern zu überprüfen.

Alle obgenannten Einzelunsicherheiten müssen zur Gesamtunsicherheit des Messresultats zusammengefasst werden. Hierfür ist das von der Western European Calibration Cooperation (WECC 1990) empfohlene Verfahren anzuwenden. Demnach sollen die einzelnen relativen Unsicherheiten u_i wie folgt zur Gesamtunsicherheit u zusammengefasst werden:

$$u = 2 \sqrt{\sum_i u_i^2 / 3} \quad (4.1)$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass die Werte $\pm u_i$ die obere und untere Grenze des möglichen Fehlers wiedergeben, der durch die Einflussgrösse i verursacht wird. Die in den Gerätespezifikationen angegebenen Unsicherheitsbereiche haben in der Regel genau diese Bedeutung. Mit dem Faktor 2 erhält das Intervall $\pm u$ eine vergleichbare Bedeutung wie der Bereich $\pm 2\sigma$ bei normalverteilten Einflussgrössen. Falls einer der Beiträge u_i deutlich überwiegt, dann soll die Gesamtunsicherheit nicht gemäss der obenstehenden Formel berechnet, sondern dem dominierenden Beitrag gleichgesetzt werden. Im Hochfrequenzbereich werden Messunsicherheiten häufig in Dezibel (dB) angegeben. Vor der Addition zur Gesamtunsicherheit müssen diese logarithmischen Grössen linearisiert werden. Dabei resultieren für die Unsicherheit mit positivem und negativem Vorzeichen verschiedene Beträge. Für die Beurteilung einer Immissionsmessung ist allerdings nur die Messunsicherheit in positiver Richtung

relevant. Die Linearisierung geschieht nach den folgenden Formeln:

$$u_i = 100 \cdot (10^{(\alpha_i/20)} - 1) \quad \text{bei Feldstärken}$$

$$u_i = 100 \cdot (10^{(\alpha_i/10)} - 1) \quad \text{bei Leistungsdichten,}$$

wobei α_i : Messunsicherheit aufgrund der Einflussgrösse i, in dB
 u_i : Messunsicherheit aufgrund der Einflussgrösse i, in %

Zur Illustration sei folgendes Beispiel betrachtet:

Bei einer Immissionsmessung sind folgende Unsicherheiten α_i aus den Spezifikationen bekannt oder wurden aufgrund von Tests abgeschätzt:

Einflussgrösse	α_i (dB)	Feldstärke		Leistungsdichte	
		+ u_i (%)	u_i^2	+ u_i (%)	u_i^2
Kalibrierung	± 1	12.2	149	25.9	670
Frequenzgang	± 1	12.2	149	25.9	670
Anisotropie	± 0.5	5.9	35	12.2	149
Kabeleinkopplung	± 2	25.9	670	58.5	3421
Quadratsumme			1003		4910
Gesamtunsicherheit (Gl.4.1)		37		81	

Die gesamte Messunsicherheit in Richtung höherer Werte beträgt somit +37% bezogen auf Feldstärke bzw. +81% bezogen auf Leistungsdichte. Könnte man die durch den Frequenzgang bedingte Unsicherheit eliminieren (durch einen Kalibrierpunkt bei der zu messenden Frequenz), dann würde sich die gesamte Messunsicherheit auf +34% für Feldstärke bzw. auf +75% für Leistungsdichte reduzieren. Könnte hingegen die Kabeleinkopplung vollständig verhindert werden (durch eine fiberoptische Verbindung), dann liesse sich die gesamte Messunsicherheit auf +21% für Feldstärke bzw. auf +45% für Leistungsdichte verringern.

Grundsätzlich sollen alle Massnahmen getroffen werden, welche dazu beitragen, die Messunsicherheit zu verringern. Die Arbeitsgruppe ist der Auffassung, dass beim heutigen Stand der Technik und bei sorgfältigem Arbeiten selbst unter optimalen Bedingungen mit einer Messunsicherheit von ± 3 dB zu rechnen ist (entsprechend +41% für Feldstärke bzw. +100% für Leistungsdichte). Insbesondere in Nahfeldern kann sie noch höher liegen.

Nicht als Messunsicherheit gelten die örtlichen und zeitlichen Variationen der Immissionen. Diesbezüglich wurde bereits festgehalten, dass grundsätzlich die höchste Immission (örtlich und zeitlich) im Untersuchungsgebiet für die Beurteilung massgebend ist (siehe 4.7).

4.12 Auswertung und Beurteilung

Massgeblich für den Vergleich mit Immissionsgrenzwerten ist der zeitliche und örtliche Höchstwert der Beurteilungsgrösse. Zur Auswahl der Messstandorte siehe Abschnitt 4.7.

Es ist anzustreben, die örtliche Abhängigkeit der jeweiligen Beurteilungsgrösse in Form einer Feldstärkekarte darzustellen.

Wurden Signale aus verschiedenen Richtungen oder verschiedener Polarisation nacheinander gemessen, dann sind die Leistungsdichten bzw. Feldstärken aller relevanten Signale, die gleichzeitig vorhanden sein können, zu addieren. Die Addition erfolgt gemäss den Formeln in Tabelle 3, wobei über Frequenzen und Raumrichtungen bzw. Polarisierungen summiert wird. Falls die Zeitverläufe der einzelnen Signale ungenügend bekannt sind, soll für die Summation die maximale Beurteilungsgrösse jedes Einzelsignals (gemäss Tabelle 2) eingesetzt werden. Damit ist der ungünstigste Fall berücksichtigt.

In Nahfeldsituationen muss die Beurteilungsgrösse sowohl für das elektrische wie das magnetische Feld mit dem entsprechenden Immissionsgrenzwert verglichen werden. Die Immission ist übermässig, wenn eine oder beide Beurteilungsgrössen den IGW überschreiten. In Fernfeldsituationen genügt die Beurteilung einer der beiden Feldkomponenten oder der Leistungsdichte.

Bei der Beurteilung einer Immission muss die Messunsicherheit +u in Richtung höherer Werte (siehe 4.11) berücksichtigt werden. Bei der Festlegung des Immissionsgrenzwerts (IGW) wurde ein Sicherheitsfaktor eingebaut, welcher die unvollkommenen medizinischen Kenntnisse (Langzeitwirkungen; empfindliche Personengruppen; Übertragbarkeit von Ergebnissen aus dem Tierversuch auf den Menschen; mögliche synergistische Wirkungen mit anderen Umweltbelastungen; nicht gesicherte Ergebnisse) berücksichtigt, nicht jedoch die Unsicherheit der Immissionsmessung. Es ist somit nicht zulässig, diesen Sicherheitsfaktor durch grosse Messunsicherheiten

zu verringern. Aus diesem Grund ist eine Immission dann nicht übermässig, wenn

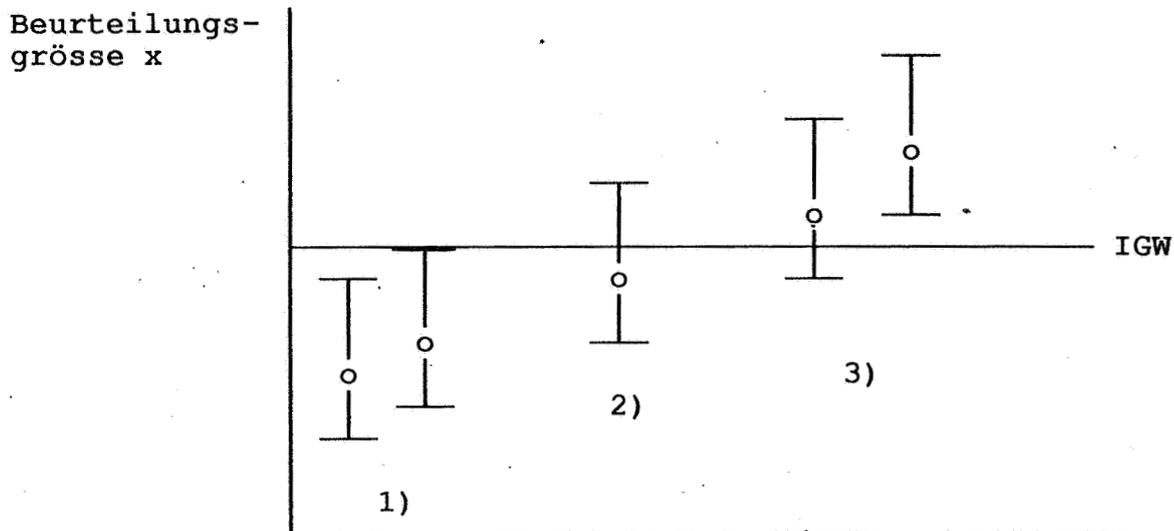
$$x(1 + u/100) \leq \text{IGW} \text{ (siehe Figur 3, Fall 1),}$$

wobei

x: Beurteilungsgrösse (Messung)

u: Messunsicherheit in Richtung höherer Werte, in %
(Abschnitt 4.11)

Mit der Definition der Messunsicherheit in Gleichung 4.1 ist sichergestellt, dass der IGW tatsächlich mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 5 % überschritten sein wird. Dieses Risiko kann in Kauf genommen werden. Vorausgesetzt ist selbstredend, dass die Messunsicherheit korrekt ermittelt wird.



Figur 3: Beurteilung von Immissionen.

o: Messwert

Obere Grenze des dargestellten Intervalls: $(x+u)$

1): Immissionen nicht übermässig.

2) und 3): Immissionen übermässig.

Liegt eine Immission nahe beim IGW, dann muss ein entsprechend grosser technischer Aufwand betrieben werden, um eine möglichst kleine Messunsicherheit zu erhalten. Durch diese Anforderung wird gleichzeitig verhindert, dass durch unqualifizierte Messungen missbräuchliche Forderungen an die Betreiber von Sendeanlagen gestellt werden können. Messresultate des Typs 2 von Figur 3, welche infolge grosser Messunsicherheit eine Ueberschreitung des IGW anzeigen, brauchen daher nicht akzeptiert zu werden, wenn durch bessere Ausrüstung und Messpraxis die Messunsicherheit offensichtlich verkleinert werden kann.

Zusammenfassung

Eine vom BUWAL einberufene Arbeitsgruppe von Messfachleuten gibt mit diesem Bericht ihre Empfehlung für die Messung nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung in der Umwelt im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz ab. Das Schwergewicht liegt auf der messtechnischen Erfassung und Beurteilung von Immissionen im Bereich der Immissionsgrenzwerte von IRPA¹⁾. Die Empfehlung enthält allgemeingültige Grundsätze und Mindestanforderungen, ohne im Detail auf konkrete Immissionssituationen einzutreten. Behandelt werden die Messplanung, die Festlegung von Messstandort, -zeit und -dauer, Mindestanforderungen an die Messeinrichtung, die eigentliche Durchführung der Messung und mögliche Fehlerquellen. Ausführlich beschrieben werden die Abschätzung der Messunsicherheit und die Beurteilung einer Immission unter Berücksichtigung der Messunsicherheit. Dem Bericht liegen Checklisten für die Vorbereitung und die Durchführung einer Immissionsmessung bei.

Résumé

On trouvera ici les résultats des travaux d'un groupe de spécialistes auquel l'OFEFP a confié la tâche de formuler des recommandations pour la mesure dans l'environnement du rayonnement électromagnétique non ionisant situé dans la gamme de fréquences comprise entre 100 kHz et 300 GHz. L'accent a surtout été mis sur la mesure et l'appréciation des rayonnements dont l'intensité est approchante des valeurs limites d'immission déterminées par l'IRPA¹⁾. Ces recommandations, qui rappellent des principes et des conditions de portée générale sans entrer dans des détails pratiques forcément variables selon le cas particulier, traitent les questions suivantes: organisation des mesures, et notamment définition du lieu, de la période et de la durée, exigences techniques minimales applicables aux appareils, réalisation proprement dite des mesures et sources d'erreur possibles. L'estimation de l'incertitude des mesures et l'appréciation des immissions compte tenu de cette incertitude ont été commentées de manière circonstanciée. Enfin, le présent document contient des listes de contrôle pour la préparation et la réalisation de mesures des immissions.

1) International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 100 kHz to 300 GHz. Health Phys. 54, 115-123, 1988

Riassunto

Il presente rapporto contiene i risultati dei lavori di un gruppo di esperti al quale l'UFAFP ha affidato il compito di elaborare raccomandazioni per misurare nell'ambiente le radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti situate nella gamma di frequenze compresa fra 100 kHz e 300 GHz. L'accento è stato posto soprattutto sulla misurazione e la valutazione delle radiazioni la cui intensità è vicina ai valori limite d'immissione fissati dall'IRPA¹⁾. Le raccomandazioni, che si rifanno a principi e a condizioni di portata generale senza entrare in particolari pratici variabili a seconda di ogni singolo caso, trattano i punti seguenti: organizzazione delle misurazioni, segnatamente definizione del luogo, del periodo e della durata, esigenze tecniche minime applicabili agli apparecchi, realizzazione vera e propria delle misurazioni e fonti possibili di errore. La valutazione del margine di incertezza legato a tali misurazioni e la valutazione stessa delle immissioni, conto tenuto di tale margine di incertezza, sono commentate in modo approfondito. Infine il presente rapporto contiene elenchi di controllo utili per la preparazione e la realizzazione di dette misurazioni.

Abstract

A working group consisting of measurement specialists which was set up by the Federal Office of Environment, Forests and Landscape presents a recommendation for the measurement of nonionizing electromagnetic radiation in the environment within the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. Emphasis is given to the measurement and assessment of those exposures which are close to the exposure limit values recommended by IRPA¹⁾. The recommendation contains general measurement principles and minimum requirements for instruments; actual examples of exposure situations are not discussed in detail. The measurement preparation, considerations concerning site, time and duration of the measurement, minimum requirements for measuring instruments are discussed as well as the actual measurement procedure and possible errors. The estimation of the measurement uncertainty and the assessment of an exposure situation, taking into account the measurement uncertainty, are presented in detail. Two checklists for the preparation and realization of an exposure measurement are included.

1) International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 100 kHz to 300 GHz. Health Phys. 54, 115-123, 1988

Anhang 1: Checklisten für die Planung und Durchführung von Messungen

Die beiden folgenden Checklisten sind als Gedächtnishilfen zu verstehen, damit bei der Planung und Durchführung von Messungen nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung die wichtigen Informationen frühzeitig beschafft und vollständig festgehalten werden.

Checkliste I: Vorbereitung

Die folgenden Abklärungen sollten im Rahmen der Messplanung durchgeführt werden. Unter Umständen ist hierzu bereits eine orientierende Messung im Untersuchungsgebiet notwendig.

1. Quelle

- Frequenzbereich
- Einzelne oder mehrere Frequenzen
- Oberwellen, Nebenwellen
- Modulation: keine, gepulst, AM, FM, SSB, usw.
- Polarisierung: horizontal, vertikal, zirkular
- Abstrahlcharakteristik
- Ausgangsleistung: nominal, real; zeitliche Variationen
- Betriebsparameter (z.B. Sendezeiten, Senderichtung)
- Messresultate von vergleichbaren Quellen
- Andere Quellen in der Nähe, welche die Messung beeinflussen könnten
- Starke statische elektrische oder magnetische Felder (Speiseeinrichtungen)
- Zustand der Anlage: Vorschriftsgemäßes Funktionieren; Schäden; undichte Stellen

2. Untersuchungsgebiet

- Zutrittsberechtigung
- Zugänglichkeit für die Bevölkerung
- Nutzungsarten
- typische Aufenthaltsdauer von Personen
- Abschätzung der Feldstärken
- Inhomogene Felder: Reflexionen, Resonanzen, Mehrwegausbreitung
- Nahfeld/Fernfeld
- Relevante Grenzwerte und Beurteilungsgrößen
- Störende Objekte im Untersuchungsgebiet (Sekundärstrahler, Absorber)
- Stabile oder wechselnde Verhältnisse im Untersuchungsgebiet
- Festlegen der Messorte und -zeiten
- Festlegen der Messhöhe
- Arbeitssicherheit der Messpersonen

3. Messausrüstung

- Sonde/Antenne: Breitband oder Schmalband; isotrop oder gerichtet; E- oder H-empfindlich; zirkular oder linear polarisiert
- Verbindungsleitung zwischen Sonde und Messgerät
- Messgerät: Spektrum Analysator, Messempfänger, Anzeigegerät für Feldstärken usw.
- Befestigung der Sonde/Antenne
- Mittelwertbildung
- Geeignete Substitutionsquelle für Funktionstest
- Funktionstest, ev. orientierende Messung; Eignung der Messeinrichtung für die vorgesehene Messung
- Kalibrierung
- Messunsicherheit

Checkliste II: Messprotokoll

Die folgenden Informationen sollen, soweit möglich, während der Messung protokolliert werden.

- Beschreibung der Messeinrichtung
- Zustand und Betriebsparameter der Quelle
- Skizze und Beschreibung von Messstandort, näherer Umgebung und Anordnung der Messeinrichtung
- Zeitpunkt und Dauer der Messung
- Höhe der Sonde/Antenne über Boden
- Abstand der Sonde/Antenne von unmittelbar benachbarten leitenden Objekten
- Polarisation und Ausrichtung der Sonde/Antenne
- Einstellungen der Messinstrumente
- Mittelungsverfahren und -zeit
- Messwerte
- Beobachtungen zu zeitlichen Schwankungen der Messwerte
- Wetterbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit)
- Bodenbeschaffenheit und -bedeckung

Anhang 2: Immissionsmessungen bei Radaranlagen

Von Radaranlagen gehen in der Regel pulsformig modulierte Hochfrequenzsignale aus. Kurze Pulse folgen sich dabei in regelmässigen Zeitabständen. Im folgenden werden einige Abkürzungen und Definitionen verwendet:

f_0	Trägerfrequenz (Hz)
τ	Pulsdauer (s)
PRF	Pulsrepetitionsfrequenz (Hz)
PRI	Pulsrepetitionsintervall. $PRI=1/PRF$ (s)
V	Tastverhältnis (duty factor). $V=\tau/PRI$
t_s	Absuchzeit (scan time; bei bewegten Antennen) (s)
Hüllkurve:	Die Umhüllende der Pulsfolge, welche sich an einem festen Messstandort infolge der Rotation oder sonstigen Bewegung der Antenne ergibt (siehe Figur 4c).
$S(t)$	Momentanwert der Leistungsdichte (W/m^2)
S_p	Pulsleistungsdichte: Mittelwert der Leistungsdichte während eines Pulses (W/m^2)
$S_{p, max}$	Pulsleistungsdichte im Maximum der Hüllkurve
$\langle S \rangle$	Mittelwert der Leistungsdichte, gemittelt während $t \gg PRI$ (W/m^2)

Die Verhältnisse bei Radarimmissionen sind in Figur 4 schematisch dargestellt. Es sind im kompliziertesten Fall periodische Abläufe in 4 verschiedenen Zeitbereichen vorhanden:

- Schwingung der Trägerfrequenz $1/f_0$ (typisch ps bis ns)
- Pulsdauer τ (typisch ps)
- Pulsrepetitionsintervall PRI (typisch ms)
- Absuchzeit t_s bei bewegten Antennen (typisch s)

Figur 4a zeigt die Pulsmodulation der Trägerfrequenz. Figur 4b gibt eine Serie von gleichstarken aufeinanderfolgenden Pulsen wieder, wie sie bei nichtbewegter Antenne auftreten. Der Zeitmassstab ist hier bereits soweit komprimiert, dass die einzelnen

Pulse nur noch als Nadeln erscheinen. In Figur 4c schliesslich sind die Verhältnisse für eine bewegte Antenne dargestellt. In diesem Fall sind am Ort des Beobachters nur in dem Augenblick nennenswerte Immissionen vorhanden, wo die Antenne gerade in seine Richtung sendet.

Gemäss Tabelle 2 sind bei gepulsten Immissionen zwei Grössen zu beurteilen:

a) Die während 6 Minuten gemittelte Leistungsdichte $\langle S \rangle$ soll den IGW von Tabelle 1 nicht überschreiten.

b) Die Pulsleistungsdichte S_p soll das Tausendfache des IGWs von Tabelle 1 nicht überschreiten.

Bei bewegter Antenne ist die Pulsleistungsdichte $S_{p, \max}$ im Maximum der durch die Bewegung bedingten Hüllkurve massgeblich (siehe Figur 4c).

Je nach den Signalcharakteristiken ist eines der beiden Kriterien massgeblich:

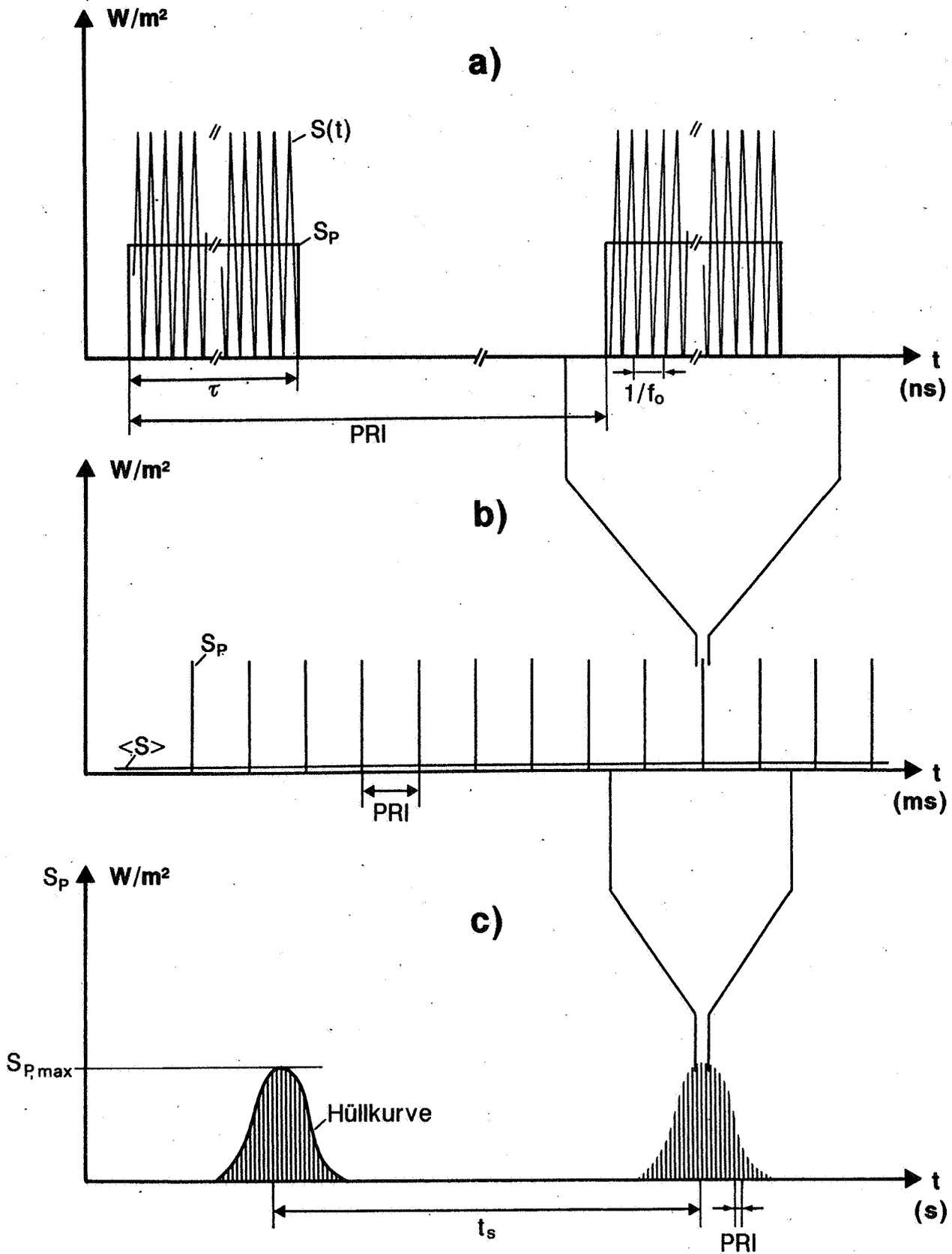
Bei nicht bewegter Antenne (Figur 4b):

Tastverhältnis $V \geq 0.001$: Falls Kriterium a) erfüllt ist, ist zwingend auch b) eingehalten. Es genügt somit die Messung der mittleren Leistungsdichte $\langle S \rangle$.

Tastverhältnis $V < 0.001$: Falls Kriterium b) erfüllt ist, ist zwingend auch a) eingehalten. Es genügt somit die Messung der Pulsleistungsdichte S_p .

Bei bewegter Antenne (Figur 4c):

In der Regel ist für alle in der Praxis vorkommenden Tastverhältnisse Kriterium b) massgeblich. Es muss somit die Pulsleistungsdichte $S_{p, \max}$ im Maximum der Hüllkurve gemessen werden.



Figur 4: Radarimmissionen

a) Zwei Pulse

b) Eine Folge von gleich intensiven Pulsen (nichtbewegte Sendeantenne)

c) Variation der Pulsleistungsdichte bei bewegter Sendeantenne

Für die Messung der mittleren Leistungsdichte $\langle S \rangle$ können isotrope Breitband-Messsysteme eingesetzt werden, sofern sie für diesen Zweck konzipiert sind. Vorsicht ist geboten, dass die Sonde durch die im Vergleich zur mittleren Leistungsdichte sehr hohe Pulsleistungsdichte nicht übersteuert wird. Eine Ueberprüfung der Linearität in einem bekannten Testfeld mit vergleichbaren Signalparametern wird empfohlen. Bei bewegter Antenne soll die Zeitkonstante des Messsystems so klein gewählt werden, dass die Hüllkurve ohne Dämpfung erfasst wird. Der 6-Minuten-Mittelwert bei einer bewegten Antenne muss in der Regel extern (ab Schreibernaufzeichnung oder mit Hilfe eines Messcomputers) ermittelt werden. Die Pulsleistungsdichte S_p ergibt sich aus der mittleren Leistungsdichte $\langle S \rangle$ gemäss

$$S_p = \langle S \rangle / V.$$

Für die direkte Messung der Pulsleistungsdichte S_p kommen Spektrum Analysatoren in Kombination mit geeigneten Antennen in Frage. Die Pulsleistungsdichte $S_{p, \max}$ im Maximum der Hüllkurve kann mit Hilfe der "maximum hold" Funktion des Spektrum Analysators zuverlässig erfasst werden. Wegen der für Radarpulse meist ungenügenden ZF-Bandbreite des Spektrum Analysators muss dessen Empfindlichkeit mit einem gleichartigen Testsignal überprüft werden. Es empfiehlt sich, die diesbezüglichen Publikationen (application notes, z.B. von Hewlett Packard 1971) der Gerätehersteller zu konsultieren.

Literaturverzeichnis

- ANSI (1981): American National Standard ANSI C95.5-1981: Recommended Practice for the Measurement of Hazardous Electromagnetic Fields -- RF and Microwave.
The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 345 East 47th Street, New York 10017
- ANSI (1991): American National Standard, C95.3-1991: Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields -- RF and Microwave.
The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 345 East 47th Street, New York 10017
- Aslan E. (1983): An ANSI Radiation Protection Guide Conformal Probe.
Microwave Journal, April 1983, 87-91
- Australien (1988): Australian Standard 2772.2-1988: Radiofrequency Radiation, Part 2 - Principles and Methods of Measurement, 300 kHz to 100 GHz.
Standards Association of Australia.
- Bossert Th. und Dinter H. (1988): Beurteilung der Gefährlichkeit starker elektromagnetischer Felder - Kalibrierung und Messgenauigkeit von Nahfeldsonden im Bereich 30 kHz-30 MHz.
ITG-Fachbericht 106: Hörrundfunk. Vorträge der ITG-Fachtagung vom 14.-16.11.1988, Mainz. S. 57-62
VDE-Verlag, Berlin
- BUWAL (1990): Biologische Auswirkungen nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung auf den Menschen und seine Umwelt. 1. Teil: Frequenzbereich 100 kHz bis 300 GHz.
Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 121, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, Juni 1990.
- DIN/VDE (1982): DIN/VDE 0848, Teil 1: Gefährdung durch elektromagnetische Felder. Mess- und Berechnungsverfahren.
- Glimm J. und Münter K. (1989): Feldmesssonden. Monitore für elektromagnetische Strahlung.
Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz Fb 585, Dortmund
- Hewlett Packard (1971). Spectrum Analysis. Pulsed RF.
Application Note 150-2, Nov. 1971
- IRPA (1985). International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Review of Concepts, Quantities, Units and Terminology for Non-Ionizing Radiation Protection.
Health Phys. 49, 1329-62

IRPA (1988). International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 100 kHz to 300 GHz. Health Phys. 54, 115-123

IRPA (1990): Persönliche Mitteilung

Joyner K.H. (1988): Measurement of Electromagnetic Radiation below 100 GHz. in: "Non-Ionizing Radiations. Physical Characteristics, Biological Effects and Health Hazard Assessment", Proc. International Non-Ionizing Radiation Workshop, Melbourne, 5.-9. April 1988; ed. M.H. Repacholi, p. 373-393. IRPA/INIRC

Kanda M. et al. (1986): Standards for Electromagnetic Field Measurements. Proc. IEEE 74, 120-128

NARDA Model 8682: ANSI C95.1-1982 RF Protection Guide Conformal Probe. Technical data.

NCRP 1981: Radiofrequency Electromagnetic Fields. Properties, Quantities and Units, Biophysical Interaction, and Measurements. National Council on Radiation Protection, and Measurements. NCRP Report No. 67, Washington D.C., p. 12

Önorm (1986): Önorm S 1120: Mikrowellen und Hochfrequenzbereich. Begriffsbestimmungen, zulässige Werte, Messungen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Seibersdorf (1988): Schutz vor nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung. Teil 1: Hochfrequenz- und Mikrowellenstrahlung im Frequenzbereich 10 kHz-3000 GHz. S. 49-75. Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf, OEFZS--4436.

SEV (1983): Sicherheitsvorschriften des SEV, 1054-25.1983/CEI 335-25. Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke. Teil 2: Besondere Anforderungen für Mikrowellen-Kochgeräte.

Stuchly M.A. and Stuchly St.S. (1986): Experimental Radio and Microwave Dosimetry. in: "CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields", ed. C.P. Polk, E. Postow. CRC Press, Boca Raton, p. 229-249.

Stuchly M.A. and Stuchly St.S. (1987): Measurements of Electromagnetic Fields in Biomedical Applications. CRC Crit. Rev. in Biomed. Eng. 14, 241-255.

Tell R.A. (1983): Instrumentation for Measurement of Electromagnetic Fields: Equipment, Calibrations and Selected Applications. Part 1: Radiofrequency Fields. in: "Biological Effects and Dosimetry of Nonionizing Radiation", ed. M. Grandolfo, S.M. Michaelson, A. Rindi. Plenum Press, New York, p. 95-162.

Tell R.A. (1989): An Investigation of RF Induced Hot Spots and their Significance Relative to Determining Compliance with the ANSI Radiofrequency Protection Guide. p. 44 ff.
Report Prepared for the National Association of Broadcasters, 1771 N Street, N.W., Washington, D.C. 20036

Tofani S. and Kanda M. (1989): Instrumentation for Electromagnetic Fields Exposure Evaluation and its Accuracy.
in: "Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides", ed. G. Franceschetti, O.P.Gandhi, M.Grandolfo.
Plenum Press, New York, p. 175-191

WECC (1990): Western European Calibration Cooperation: Guidelines for the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations.
Entwurf WECC Doc. 19-1990