

**Messempfehlung
für
GSM-Basisstationen**
Entwurf vom 20. März 2001

m | | e | t | a | s

metrologie und akkreditierung schweiz



**Bundesamt für Umwelt, Wald und
Landschaft (BUWAL)**

Bezugsquellen:

Internet: Das Dokument kann als pdf-Datei aus dem Internet heruntergeladen werden. Adresse:
http://www.buwal.ch/luft/d/pdf/n_megsme_d.pdf

Papierkopien: Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL)
Abteilung Luftreinhaltung und NIS
Sektion Nichtionisierende Strahlung
CH-3003 Bern

Inhaltsverzeichnis

1	Zweck und Geltungsbereich	3
2	GSM-Technik	5
2.1	Das GSM-Mobilfunksystem.....	5
2.2	Die Funkschnittstelle.....	5
2.3	Steuerkanal und Gesprächskanäle.....	6
2.4	Zusätzliche Spezialfunktionen auf der Funkschnittstelle.....	6
2.4.1	Leistungsregelung (Power control).....	6
2.4.2	Frequenzhüpfen (Slow frequency hopping).....	7
2.4.3	Sprachtaustastung (Discontinuous transmission).....	7
3	Anforderungen der NISV	8
4	Grundsätzliches zur Messung	10
4.1	Messwert, Beurteilungswert und Anlagegrenzwert.....	10
4.1.1	Messwert.....	10
4.1.2	Beurteilungswert.....	10
4.1.3	Anlagegrenzwert.....	10
4.2	Anforderungen an Messfirmen und Messpersonen.....	11
4.3	Angaben des Auftraggebers und der Netzbetreiber.....	11
4.4	Ort der Messung.....	12
4.5	Zeitpunkt und Dauer der Messung.....	13
4.6	Breitbandige und selektive Messung.....	13
4.7	Messunsicherheit und Kalibrierung.....	13
4.8	Messbericht.....	14
5	Breitbandige Messung	15
5.1	Messmethode.....	15
5.2	Messeinrichtung.....	15
5.3	Berechnung des Beurteilungswertes.....	15
6	Selektive Messung	17
6.1	Messmethode.....	17
6.1.1	Schwenkmethode.....	17
6.1.2	Drehmethode.....	18
6.1.3	Punkterastermethode.....	18

6.2	Messeinrichtung	18
6.2.1	Antennen	18
6.2.2	Spektrumanalysator / Messempfänger	19
6.3	Berechnung des Beurteilungswertes	19
6.3.1	Schwenk- und Drehmethode	20
6.3.2	Punkterastermethode	20
7	Spezialfälle.....	21
7.1	Überdeckung eines BCCH durch Frequenzhüpfen (Frequency hopping)	21
7.2	Abstrahlung von BCCH und TCH über räumlich getrennte Antennen	21
Anhang 1	Abkürzungsverzeichnis	22
Anhang 2	Berechnung der erweiterten Messunsicherheit U	23

1 Zweck und Geltungsbereich

Die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) verlangt, dass die Strahlung von Mobilfunksendeanlagen an Orten mit empfindlicher Nutzung den Anlagegrenzwert einhalten muss. Bevor eine Sendeanlage neu errichtet wird, gibt der Netzbetreiber der zuständigen Behörde auf einem Standortdatenblatt die technischen Daten der Anlage bekannt, macht Angaben über die nähere Umgebung der Anlage und deren Nutzung und berechnet die zu erwartende NIS-Belastung. Die gleichen Angaben liefert er, bevor bei einer bestehenden Sendeanlage die Sendeleistung über den bewilligten Wert hinaus erhöht wird oder die Senderichtungen geändert werden.

Zuständige Behörde ist in den meisten Fällen die Baubehörde der Gemeinde oder des Kantons. Für Sendeanlagen auf Masten von Hochspannungsleitungen ist es das Eidg. Starkstrominspektorat.

Es ist die Aufgabe der zuständigen Behörde zu kontrollieren, ob die Angaben und Berechnungen des Betreibers zutreffen und ob der Anlagegrenzwert eingehalten ist. Artikel 12 der NISV präzisiert diese Aufgabe wie folgt:

Art. 12 Kontrolle

¹ Die Behörde überwacht die Einhaltung der Emissionsbegrenzungen.

² Zur Kontrolle der Einhaltung des Anlagegrenzwertes nach Anhang 1 führt sie Messungen oder Berechnungen durch, lässt solche durchführen oder stützt sich auf die Ermittlungen Dritter. Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) empfiehlt geeignete Mess- und Berechnungsmethoden.

³ ...

Erfahrungsgemäss kann eine Berechnung die reale Immissions-Situation nicht in allen Feinheiten wiedergeben. Eine abschliessende Aussage über die Intensität der Strahlung kann nur eine Messung liefern. Insbesondere wenn die rechnerische Prognose ergibt, dass die zu erwartende Belastung nahe beim Anlagegrenzwert liegt, sollte nach Inbetriebnahme der Anlage eine Messung durchgeführt werden. Mit der vorliegenden Empfehlung kommt das BUWAL seinem Auftrag nach, geeignete Messmethoden zu empfehlen. Sie ist in enger Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS) und dem Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) entstanden.

Diese Empfehlung behandelt NIS-Messungen in der Umgebung von Basisstationen der GSM-Netze, welche in den Frequenzbändern 900 und 1800 MHz arbeiten. In der Schweiz sind dies zur Zeit ca. 5000 Anlagen (technische Details der GSM-Technologie finden sich in Kapitel 2). Messungen von Mobiltelefonen, von WLL- oder UMTS-Sendeanlagen sind nicht abgedeckt.

NIS-Messungen im Hochfrequenzbereich sind anspruchsvoll und bedingen ein grosses Fachwissen. Die vorliegende Empfehlung richtet sich daher in erster Linie an Fachleute, die mit Hochfrequenzmessungen vertraut sind. Sie dient gleichzeitig auch als Grundlage für die Akkreditierung von Messlabors in diesem Bereich.

Die hier empfohlenen Messverfahren konnten aus Zeitgründen noch nicht abschliessend validiert werden. Die Empfehlung wird daher vorerst als Entwurf herausgegeben. Messfirmen und Behörden sind eingeladen, nach dieser Messempfehlung vorzugehen und ihre Erfahrungen und Verbesserungsvorschläge dem Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung mitzuteilen¹.

¹ Kontaktadresse: METAS; Sektion Hochfrequenz, EMV, Verkehr; Lindenweg 50; 3003 Bern-Wabern

Die vorliegende Messempfehlung befasst sich ausschliesslich mit Messungen zur Überprüfung der Einhaltung des Anlagegrenzwertes bei GSM-Anlagen. Der Anlagegrenzwert ist eine Emissionsbegrenzung für die von einer Anlage allein erzeugte Strahlung (Art. 3 Abs. 6 NISV).

Messungen zur Überprüfung der Einhaltung des Immissionsgrenzwertes sind hingegen nach der Empfehlung „Messung nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung – 1. Teil: Frequenzbereich 100 kHz bis 300 GHz“² durchzuführen. Für den Immissionsgrenzwert ist nicht nur die Strahlung von GSM-Antennen, sondern die gesamte Hochfrequenzstrahlung zu erfassen, soweit sie relevant zu den Immissionen beiträgt.

² Schriftenreihe Umwelt Nr. 164, BUWAL, Bern 1992

2 GSM-Technik

2.1 Das GSM-Mobilfunksystem

GSM (Global System for Mobile Communication) ist die Bezeichnung für die Mobilfunktechnik der 2. Generation, wie sie heute in der Schweiz in Betrieb ist. GSM ist ein zellulares Mobilfunksystem. Das Versorgungsgebiet eines Betreibers ist in Funkzellen eingeteilt, die jeweils von einer Basisstation aus versorgt werden. Einer Funkzelle sind eine oder mehrere Sendefrequenzen (Kanäle) zugeordnet, welche erst in einer weit entfernten Zelle wieder gebraucht werden dürfen, damit keine gegenseitigen Störungen auftreten.

Für ein Gespräch baut das Mobiltelefon eine Funkverbindung zur nächstgelegenen Basisstation auf. Von der Basisstation geht das Gespräch dann über Leitungen oder über Richtstrahlverbindungen zur Mobilfunkvermittlungszentrale.

An einem Antennenmast oder auf einem Hausdach können die Antennen eines oder mehrerer Mobilfunk-Netzbetreiber montiert sein. Ein Antennenstandort eines Netzbetreibers bedient eine oder mehrere Funkzellen (normalerweise nicht mehr als 3 Zellen).

Die Einteilung der Funkzellen und die Zuteilung der Frequenzen zu den Funkzellen eines Netzbetreibers wird regelmässig (nach einigen Monaten) wieder neu optimiert, so dass mit den gegebenen Antennenstandorten und Frequenzen ein möglichst grosses Gebiet abgedeckt werden kann und die Zellen das erwartete Gesprächsaufkommen möglichst optimal verarbeiten können.

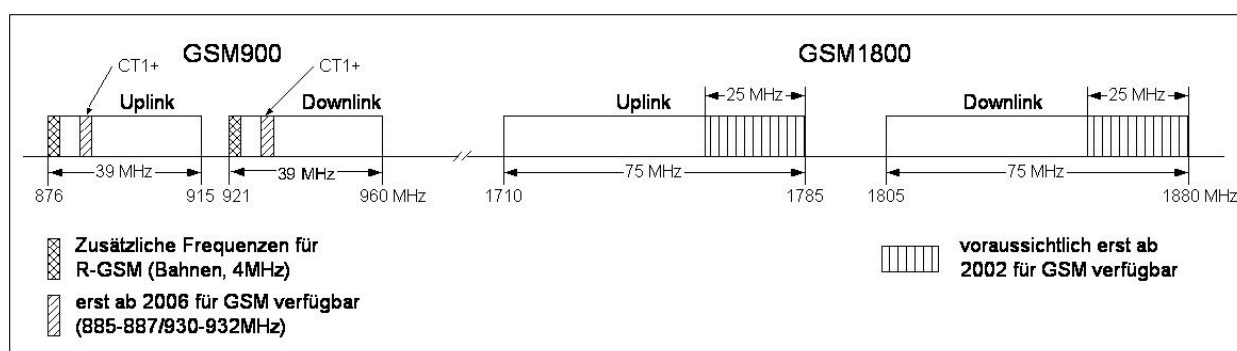
2.2 Die Funkschnittstelle

Die Verbindung auf der Funkschnittstelle zwischen dem Mobiltelefon und der Basisstation funktioniert nach einem kombinierten Frequenzmultiplex- und Zeitmultiplex-Verfahren.

In der Schweiz sind zurzeit folgende Frequenzen GSM zugewiesen oder dafür geplant (vgl. Figur 1):

GSM 900:	Sendefrequenz der Mobilgeräte:	876 MHz – 915 MHz (Uplink)
	Sendefrequenz der Basisstationen:	921 MHz – 960 MHz (Downlink)
GSM 1800:	Sendefrequenz der Mobilgeräte:	1710 MHz – 1785 MHz (Uplink)
	Sendefrequenz der Basisstationen:	1805 MHz – 1880 MHz (Downlink)

Die vorliegende Messempfehlung befasst sich nur mit der Strahlung der GSM-Basisstationen. Massgebend sind demnach die Downlink-Frequenzen.



Figur 1: Für GSM reservierte Frequenzbänder in der Schweiz.

2.3 Steuerkanal und Gesprächskanäle

Eine Basisstation sendet in der Regel auf mehreren, fest zugeordneten Frequenzen. Jede Frequenz bildet einen (physikalischen) Kanal. Jeder Kanal organisiert die zu übertragende Information in acht Zeitschlitzten mit einem Zeitbereich-Mehrfachzugriff (TDMA, time domain multiple access). Die Zeitschlitzte von 0.58 ms Länge werden alle 4.615 ms (217 Hz) wiederholt. Über jeden dieser Zeitschlitzte können unabhängig voneinander Informationen übertragen werden. Auf einer Sendefrequenz, d.h. auf einem Kanal, sind somit gleichzeitig maximal acht Gespräche (oder andere Informationsübertragungen) möglich.

Für jede Funkzelle der Basisstation gibt es mindestens einen Kanal, welcher immer mit konstanter Leistung ausgesendet wird. Es handelt sich um den sog. BCCH (Steuerkanal, Broadcast Control Channel). Dieser dient unter anderem dazu, dem Mobiltelefon anzuzeigen, welche Basisstationen in der Nähe aktiv sind. Der BCCH wird für den Verbindungsaufbau gebraucht. Das Mobiltelefon kann aus dem Empfangspegel der verschiedenen BCCH-Frequenzen beurteilen, welche Funkzelle für den aktuellen Standort am günstigsten ist. Die Steuer-signale belegen allerdings nicht alle acht Zeitschlitzte, so dass auf der BCCH-Frequenz auch Gespräche übertragen werden können. Sind nicht alle Zeitschlitzte des BCCH mit Steuer-signalen oder Gesprächen belegt, so werden die noch freien Zeitschlitzte durch Leerinfor-mationen aufgefüllt. Auf der Frequenz des Steuerkanals wird somit immer mit der vollen Lei-stung gesendet. Diese Tatsache wird beim selektiven Messverfahren (s. Kapitel 6) ausgenützt.

Zum BCCH kommen im Normalfall eine bis mehrere weitere Frequenzen hinzu, über die vorwiegend Gespräche übertragen werden. Auf einem solchen sog. TCH (Gesprächskanal, traffic channel) wird – im Gegensatz zum BCCH – nur dann Leistung abgestrahlt, wenn Gespräche zu übertragen sind. Die Sendeleistung der TCH ist daher nicht konstant, sondern schwankt kurzfristig parallel zur Auslastung des Netzes. Dazu kommt, dass die Sendeleistung für jeden Zeitschlitz dynamisch reguliert werden kann (s. Abschnitt 2.4).

2.4 Zusätzliche Spezialfunktionen auf der Funkschnittstelle

Moderne Netzkonfigurationen benützen weitere Spezialfunktionen, um die Qualität des Netzes zu verbessern.

2.4.1 Leistungsregelung (Power control)

Mit der Leistungsregelung wird die Sendeleistung individuell für jede Verbindung so weit reduziert, wie dies ohne Verschlechterung der Verbindungsqualität möglich ist. Dadurch wird die Batterie des Mobiltelefons weniger belastet, und im ganzen Netz wird die Interferenz zwischen den Funkzellen reduziert. Diese Funktion ist bei den Mobiltelefonen standardmässig und bei der Basisstation in der Regel implementiert. Dabei wird die Sendeleistung der Basisstation für jeden Zeitschlitz separat geregelt. Die gesamte Sendeleistung einer Basisstation wird damit nicht nur abhängig von der Anzahl aktueller Gespräche, sondern auch vom aktuellen Standort der beteiligten Mobiltelefone. Eine Ausnahme macht bei GSM-Basisstationen der BCCH, welcher immer mit der maximalen Leistung betrieben wird.

2.4.2 Frequenzhüpfen (Slow frequency hopping)

Bei jedem neuen GSM-Zeitschlitz hüpfen Sender und Empfänger auf einen anderen der zur Verfügung stehenden Kanäle (Frequenzen). Dadurch wird die Störempfindlichkeit der Verbindung bei Mehrwegausbreitung reduziert. Die Anzahl der dabei benützten Frequenzen kann höher sein als bei einem System ohne Frequenzhüpfen mit gleicher Sendeleistung. Für die Hochrechnung auf Vollbetrieb ist bei Systemen mit Frequenzhüpfen jedoch nicht die Anzahl effektiv benützter Frequenzen massgebend, sondern die maximal nötige Anzahl Frequenzen bei abgeschaltetem Frequenzhüpfen und gleicher maximaler Übertragungskapazität.

2.4.3 Sprachtaustattung (Discontinuous transmission)

Falls diese Funktion eingeschaltet ist, so stellt das System laufend fest, ob ein Sprachsignal vorhanden ist. In den Sprechpausen wird die Datenübertragungsrate reduziert und so Batteriekapazität gespart. Anstelle des Gesprächssignals wird ein synthetisches Rauschen aufgeschaltet (Comfort noise), damit der Gesprächspartner nicht den Eindruck bekommt, das Gespräch sei abgebrochen. Diese Funktion ist in beiden Übertragungsrichtungen (Uplink und Downlink) möglich.

3 Anforderungen der NISV

Die für GSM-Basisstationen relevanten Bestimmungen finden sich in Anhang 1 Ziffer 6 der NIS-Verordnung:

6 Sendeanlagen für Mobilfunk und drahtlose Teilnehmeranschlüsse

61 Geltungsbereich

¹ Die Bestimmungen dieser Ziffer gelten für Sendeanlagen von zellularen Mobilfunknetzen und von Sendeanlagen für drahtlose Teilnehmeranschlüsse mit einer gesamten äquivalenten Strahlungsleistung (ERP) von mindestens 6 W.

² Sie gelten nicht für Richtfunkanlagen.

62 Begriffe

¹ Als Anlage gelten alle Sendeantennen für die Funkdienste nach Ziffer 61, die auf demselben Mast angebracht sind oder die in einem engen räumlichen Zusammenhang, namentlich auf dem Dach des gleichen Gebäudes, stehen.

² Als Änderung gilt die Erhöhung der maximalen äquivalenten Strahlungsleistung (ERP) oder die Änderung von Senderichtungen.

63 Massgebender Betriebszustand

Als massgebender Betriebszustand gilt der maximale Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung.

64 Anlagegrenzwert

Der Anlagegrenzwert für den Effektivwert der elektrischen Feldstärke beträgt:

- a. für Anlagen, die ausschliesslich im Frequenzbereich um 900 MHz senden: 4.0 V/m;
- b. für Anlagen, die ausschliesslich im Frequenzbereich um 1800 MHz oder in einem höheren Frequenzbereich senden: 6.0 V/m;
- c. für Anlagen, die sowohl in Frequenzbereichen nach Buchstabe a als auch nach Buchstabe b senden: 5.0 V/m.

65 Neue und alte Anlagen

Neue und alte Anlagen müssen im massgebenden Betriebszustand an Orten mit empfindlicher Nutzung den Anlagegrenzwert einhalten.

Bei der Messung ist die Strahlung aller GSM-Sendeantennen zu erfassen, welche zusammen eine Anlage bilden. Häufig ist dies klar (Antennen auf demselben Mast; Antennen auf dem Dach des gleichen Gebäudes). In Zweifelsfällen muss die Behörde festlegen, welche Antennen gemeinsam zu beurteilen sind. In der Regel hat sie dies bereits bei der Beurteilung des Baugesuchs getan.

Der massgebende Betriebszustand (maximaler Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung) wird eher selten vorliegen. Es ist auch nicht ohne weiteres möglich, diesen Betriebszustand während der Zeit der Messung gezielt herzustellen. In der Regel wird die Messung daher beim realen Betrieb der Anlage durchgeführt, und das Messergebnis wird anschliessend auf den massgebenden Betriebszustand hochgerechnet.

Der Anlagegrenzwert ist nur an Orten mit empfindlicher Nutzung einzuhalten. Diese Orte sind in Artikel 3 Absatz 3 NISV abschliessend festgelegt. In der Regel legt der Auftraggeber fest, an welchen Orten zu messen ist.

Art. 3 Begriffe

.....

³ Als Orte mit empfindlicher Nutzung gelten:

- a. Räume in Gebäuden, in denen sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten;
- b. öffentliche oder private, raumplanungsrechtlich festgesetzte Kinderspielplätze;
- c. diejenigen Flächen von unüberbauten Grundstücken, auf denen Nutzungen nach den Buchstaben a und b zugelassen sind.

Die NISV ist eine Verordnung zum Schutz des Menschen. Wo die Verordnung einen Ermessensspielraum offenlässt, ist dieser daher zum Schutz des Menschen auszulegen. Daraus ergeben sich zwei Forderungen an die Durchführung von Messungen und an die Beurteilung der Ergebnisse:

- Die Intensität der Strahlung schwankt örtlich beträchtlich. Massgebend muss die höchste Intensität der Strahlung sein, die an einem gegebenen Ort mit empfindlicher Nutzung (z.B. in einem Zimmer) vorkommt. Das Messverfahren muss in der Lage sein, dieses örtliche Maximum reproduzierbar zu finden.
- Die NISV verlangt, dass der Anlagegrenzwert einzuhalten ist. Nun sind Messungen immer mit einer Unsicherheit verbunden, welche im Fall von Mobilfunkstrahlung beträchtlich ist. Die wahre Belastung kann somit höher oder niedriger sein, als der Messwert anzeigt. Diese unvermeidliche Messunsicherheit ist bei der Beurteilung zu Gunsten der zu schützenden Menschen zu berücksichtigen. Die Behörde soll sicher sein, dass die tatsächliche Belastung unterhalb des Anlagegrenzwertes liegt. Eine statistische Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95% gilt in diesem Zusammenhang als ausreichend.

4 Grundsätzliches zur Messung

4.1 Messwert, Beurteilungswert und Anlagegrenzwert

4.1.1 Messwert

Zu messen ist der Effektivwert der elektrischen Feldstärke für die GSM-Strahlung aller Sendantennen, die zur Anlage gehören. Durch geeignetes Abtasten des Raumes wird sichergestellt, dass man die örtlich höchste Feldstärke erfasst.

Man erhält einen oder mehrere Messwerte, je nachdem, welches Messverfahren verwendet wird (Kapitel 5 und 6) und ob die Anlage mit einem oder mehreren BCCH betrieben wird.

Jeder Messwert ist mit einer Standard-Messunsicherheit u behaftet.

4.1.2 Beurteilungswert

Die Messwerte werden anschliessend auf den massgebenden Betriebszustand hochgerechnet und gegebenenfalls summiert. Als Ergebnis resultiert der sog. Beurteilungswert E_B . Der Beurteilungswert ist diejenige Intensität von GSM-Strahlung, die man – als örtliches Maximum – messen würde, wenn die Anlage im massgebenden Betriebszustand, d.h. auf Volllast, betrieben würde.

Die Messunsicherheit der einzelnen Messwerte pflanzt sich bei dieser Hochrechnung fort und führt zu einer Unsicherheit U_B der Beurteilungsgrösse.

4.1.3 Anlagegrenzwert

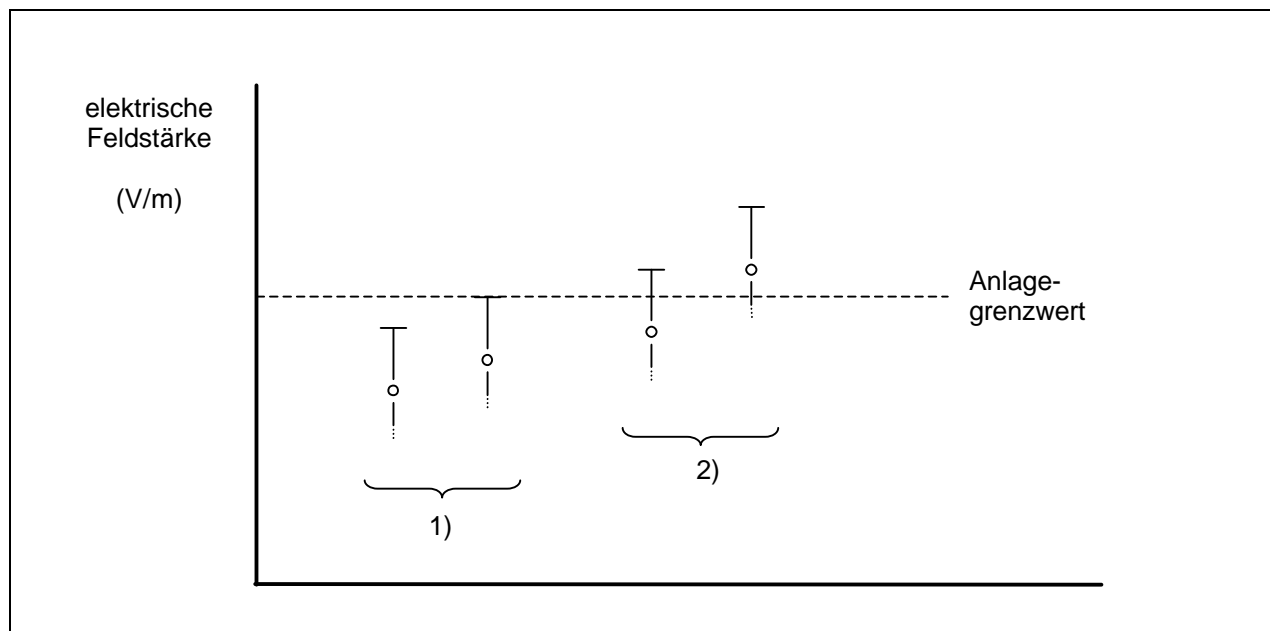
Der Beurteilungswert ist mit dem Anlagegrenzwert der NISV zu vergleichen, wobei die Unsicherheit des Beurteilungswertes zu berücksichtigen ist.

Der Anlagegrenzwert gilt als eingehalten, wenn der Beurteilungswert einschliesslich seiner Unsicherheit kleiner oder gleich dem Anlagegrenzwert ist, d.h. wenn

$$E_B + U_B \leq \text{Anlagegrenzwert} \quad (1)$$

Dies ist in Figur 2 dargestellt.

U_B wird als Vertrauensbereich mit einer einseitigen Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95 % festgelegt (s. Abschnitt 4.7). Wenn die Bedingung (1) erfüllt ist, dann ist der Anlagegrenzwert mit 95% Sicherheit eingehalten.



Figur 2: Einhaltung und Überschreitung des Anlagegrenzwertes. Legende:

- : Beurteilungswert E_B
- ┌: erweiterte Unsicherheit U_B des Beurteilungswerts
- 1): Anlagegrenzwert eingehalten
- 2): Anlagegrenzwert überschritten

4.2 Anforderungen an Messfirmen und Messpersonen

Messungen nach dieser Empfehlungen sollen von fachkundigen Personen durchgeführt werden.

Eine Akkreditierung des Messlabors für Messungen nach dieser Empfehlung ist von Vorteil, aber nicht Voraussetzung. Dem Auftraggeber und der Behörde ist es freigestellt, auch Messungen von nicht akkreditierten Firmen zu akzeptieren, sofern diese die geforderte Qualität der Messausrüstung und der Messdurchführung gewährleisten. Im Falle einer Akkreditierung bestätigt die Schweiz. Akkreditierungsstelle, dass in einer Firma die benötigte Fachkompetenz und Qualitätssicherung vorhanden sind. Bei einer nicht akkreditierten Firma liegt dieser Nachweis nicht extern beglaubigt vor, und der Auftraggeber ist für die Sicherstellung der Qualität selber verantwortlich.

4.3 Angaben des Auftraggebers und der Netzbetreiber

Vom Auftraggeber der Messung müssen die folgenden Angaben vorhanden sein:

- Standortdatenblatt mit Situationsplan
- Vorgabe, welche Antennen für die Messung gemeinsam als eine Anlage zu betrachten sind
- Angabe über alle Betreiber der verschiedenen Antennen der zu messenden Anlage
- Vorgabe, in welchen Räumen und an welchen Messorten die Messung durchgeführt werden soll. Dabei sind die Anforderungen an Messort und Messvolumen (Abschnitt 4.4) zu berücksichtigen.

- Adresse der Personen, die für den Zugang zu den Räumen zuständig sind

Die Netzbetreiber müssen folgende technischen Daten, die für den Zeitpunkt der Messung gültig sind, zur Verfügung stellen:

- Zugelassene maximale Sendeleistung der Anlage (entspricht den Angaben im Standortdatenblatt)
- Aufteilung der maximalen Sendeleistung auf die einzelnen Zellen
- Aktuelle Zuteilung der BCCH- und TCH-Frequenzen zu den einzelnen Zellen
- Kennzeichnung der Zellen mit Frequenzhüpfen und aktuelle Zuteilung der Frequenzen für den Betrieb mit Frequenzhüpfen
- Aktuelle Aufteilung der Frequenzen auf die einzelnen Antennen und Polarisationen
- Aktuelle Sendeleistung auf den BCCH-Frequenzen
- Aktuelle (maximale) Sendeleistung auf den TCH-Frequenzen

4.4 Ort der Messung

Es ist an Orten mit empfindlicher Nutzung (s. Kapitel 3) zu messen. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Innenräume. Falls die Fenster geöffnet werden können, so ist bei offenen Fenstern zu messen.

Der Verlauf der Feldstärke in Innenräumen ist sehr variabel und schwankt relativ kleinräumig infolge von Reflexionen und Stehwellen im Raum. Bei 900 MHz wiederholen sich die Maxima im Abstand von ca. 15 cm. Bei mehreren BCCH-Frequenzen überlagern sich die Stehwellen der verschiedenen Frequenzen im Raum zu einem komplizierteren Bild. Zudem wird der Feldverlauf auch durch die Anwesenheit von Personen und Mobiliar im Raum verändert. Dabei wird zwar der Wert der Maxima wenig geändert, aber deren Position im Raum verschoben.

Mit der Messung soll grundsätzlich die höchste im Raum vorkommende Feldstärke ermittelt werden. Diese Anforderung ist allerdings nur mit sehr grossem Aufwand absolut sicher zu erfüllen. Es müsste das ganze Raumvolumen systematisch in einem feinen, dreidimensionalen Raster abgetastet werden. Um den Aufwand in Grenzen zu halten, kann folgendermassen vorgegangen werden:

- Es werden in einem Innenraum ein oder mehrere Messorte festgelegt, an denen auf Grund der Erfahrung mit den höchsten GSM-Feldstärken zu rechnen ist. Diese Messorte sollen vom Auftraggeber und der Messfirma gemeinsam festgelegt werden.
In einfachen Situationen genügt ein einziger Messort, beispielsweise wenn die Anlage nur einen Antennenmast in Direktsicht umfasst. In diesem Fall ist der Messort in der Regel bei jenem Fenster zu wählen, das der Sendeanlage am nächsten liegt.
In komplizierteren Fällen kann es notwendig sein, an mehreren Stellen im Raum zu messen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Basisstation auf dem Gebäude montiert ist, in dem die Messung stattfindet, oder wenn die Anlage mehrere, örtliche getrennte Antennen umfasst.
- Um jeden festgelegten Messort wird anschliessend (gedanklich) ein bestimmtes Volumen aufgespannt, in welchem das lokale Maximum der elektrischen Feldstärke zu suchen und zu messen ist. Dieses Volumen hat typischerweise eine kreisförmige Grundfläche mit einem Durchmesser von mindestens 1.0 m und erstreckt sich in der Höhe von 0.75 bis 1.75 m über den Fussboden. Die äussere Begrenzung des Messvolumen soll zu Wänden, Boden, Decke und Mobiliar einen Abstand von mindestens 0.5 m haben. Bei der Messung

muss die Antenne so geführt werden, dass sie immer vollständig innerhalb des Messvolumens bleibt.

Die Auswahl der Messorte erfordert grosse Erfahrung der Messperson. Im Zweifelsfall sind mehrere Messorte festzulegen. Die Begründung für die getroffene Wahl der Messorte und die Ausdehnung der Messvolumina sollen im Messbericht dokumentiert werden (Skizze und/oder Photos).

4.5 Zeitpunkt und Dauer der Messung

Der Zeitpunkt der Messung ist unkritisch. Einzige Voraussetzung ist, dass die BCCH während der Messung aktiv sind und mit der vom Betreiber angegebenen Leistung betrieben werden. Bei breitbandigen Messungen wird der Beurteilungswert allerdings am ehesten dann die wahre GSM-Feldstärke wiedergeben, wenn während der Messung nur die BCCH aktiv sind. Wenn während der Messung auch ein oder mehrere TCH aktiv sind, dann wird die wahre Feldstärke bei der breitbandigen Messung eher überschätzt.

Die Messdauer ist ebenfalls unkritisch. Es ist insbesondere nicht notwendig, eine Mittelung während 6 Minuten durchzuführen.

4.6 Breitbandige und selektive Messung

Die breitbandige Messung (Kapitel 5) dient als orientierende Messung. Es wird mit einer Breitbandsonde gemessen, welche die Strahlung in einem breiten Frequenzbereich erfasst und keine Identifikation der Anteile der zu messenden Anlage erlaubt.

Wenn der Beurteilungswert, der sich aus einer breitbandigen Messung ergibt, einschliesslich seiner Unsicherheit den Anlagegrenzwert nicht überschreitet, dann gilt der Anlagegrenzwert als eingehalten. Wenn der Beurteilungswert einschliesslich seiner Unsicherheit hingegen höher ist als der Anlagegrenzwert, dann bedeutet dies nicht zwingend, dass der Anlagegrenzwert tatsächlich überschritten ist. In diesem Fall muss eine selektive Messung durchgeführt werden.

Mit einer selektiven Messung (Kapitel 6) wird gezielt nur die GSM-Strahlung der zu messenden Anlage erfasst. Wenn der Beurteilungswert, der sich aus einer selektiven Messung ergibt, einschliesslich seiner Unsicherheit den Anlagegrenzwert nicht überschreitet, dann gilt der Anlagegrenzwert als eingehalten. Andernfalls gilt der Anlagegrenzwert als überschritten. (Formel 1).

4.7 Messunsicherheit und Kalibrierung

Die Messunsicherheit der verwendeten Messgeräte muss bekannt sein (Beispiele siehe Anhang 2).

Die sog. erweiterte Messunsicherheit U wird als Vertrauensbereich mit einer einseitigen Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95% festgelegt. Sie wird aus der Standard-Messunsicherheit u nach folgender Formel berechnet:

$$U = 1.64 u \quad (2)$$

Dabei bedeuten:

u Standard-Messunsicherheit eines Messresultates

U Erweiterte Messunsicherheit eines Messresultates

Aus der erweiterten Messunsicherheit U wird nach den Formeln (5), (8) oder (11) die erweiterte Messunsicherheit U_B der Beurteilungsgrösse berechnet.

Die erweiterte Messunsicherheit U der ganzen Messeinrichtung soll kleiner als 3 dB (bzw. 40%) sein. Bei Breitbandsonden muss darauf geachtet werden, dass der gemessene Wert im spezifizierten Messbereich der Sonde (Pegel und Frequenz) liegt.

Die Messgeräte sollen im Abstand von 1 Jahr bei einer anerkannten Kalibrierstelle kalibriert werden.

4.8 Messbericht

Der Messbericht soll mindestens die folgenden Angaben enthalten:

- Bezug auf das Standortdatenblatt
- Angaben des Auftraggebers
- Angaben der Betreiber
- Angaben über Messzeit und beteiligte Personen
- Angaben zu den Messorten (Skizze, Photos, Begründung)
- Angaben über die verwendeten Messgeräte und deren Messunsicherheit
- Bei selektiven Messungen: Angaben über die angewendete Maximum-Suchmethode
- Messergebnisse und Beurteilungswerte (detailliert, mit Berechnung der Beurteilungswerte)

5 Breitbandige Messung

5.1 Messmethode

Mit einer isotropen Breitbandsonde wird die elektrische Feldstärke an einem Punkt im Raum in einem relativ breiten Frequenzbereich nicht-selektiv gemessen. Das Ergebnis ist die Summenfeldstärke am gegebenen Punkt, wobei alle Frequenzen im spezifizierten Frequenzbereich der Sonde und alle Polarisationen automatisch aufsummiert werden. Diese Methode ergibt zwar einen physikalisch sauber definierten Messwert an einem Raumpunkt, erfasst aber nicht auf Anhieb den höchsten Feldstärkewert im Messvolumen.

Es muss daher das ganze Messvolumen mit der handgeführten Breitbandsonde abgetastet und dabei das Feldstärke-Maximum gesucht werden. Das Abtasten muss genügend langsam erfolgen, damit sich das Messinstrument auf die Maximalwerte einschwingen kann und der Messwert nicht durch die Bewegung im elektrostatischen Feld verfälscht wird.

Massgebend für die Berechnung des Beurteilungswertes ist der höchste im Messvolumen gemessene Wert E_{max} .

5.2 Messeinrichtung

Als Messgeräte können isotrope Breitbandsonden verwendet werden, die für die zu messenden Frequenzbänder spezifiziert sind und im erwarteten Pegelbereich die in Abschnitt 4.7 festgelegte zulässige Messunsicherheit nicht überschreiten.

5.3 Berechnung des Beurteilungswertes

Weil der aktuelle Betriebszustand der Anlage nicht bekannt ist, wird im Sinne einer *worst case*-Betrachtung angenommen, dass während der Messung nur gerade die BCCH aktiv gewesen seien und dass keine Fremdquellen vorhanden sind. Für jede Zelle i , die von der Anlage versorgt wird, wird ein Hochrechnungsfaktor K_i nach der folgenden Formel berechnet:

$$K_i = \sqrt{\frac{P_{i\max}}{P_i}} \quad (3)$$

Dabei bedeuten:

- K_i Hochrechnungsfaktor für Zelle i
- P_i Aktuelle Sendeleistung (ERP) des BCCH von Zelle i in W
- $P_{i\max}$ Maximal zugelassene Sendeleistung (ERP) der Zelle i in W

Da grundsätzlich nicht bekannt ist, welcher BCCH am Messort dominiert, wird als Hochrechnungsfaktor K für die Berechnung des Beurteilungswertes der höchste der Faktoren K_i eingesetzt. Typische Werte des Hochrechnungsfaktors K_i liegen zwischen 1.5 und 2.5.

P_i und $P_{i\max}$ können aus den Angaben der Betreiber abgeleitet werden.

Der Beurteilungswert E_B und seine erweiterte Unsicherheit U_B werden nach den folgenden Formeln berechnet:

$$E_B = E_{\max} \cdot K \quad (4)$$

$$U_B = E_B \cdot U / 100 \quad (5)$$

Dabei bedeuten:

E_{\max} Maximale im Messvolumen gemessene elektrische Feldstärke in V/m

E_B Beurteilungswert in V/m

U erweiterte Messunsicherheit in %

U_B erweiterte Unsicherheit des Beurteilungswertes in V/m

K Hochrechnungsfaktor für die Berechnung des Beurteilungswertes

6 Selektive Messung

6.1 Messmethode

Mit einer Messantenne und einem Spektrumanalysator oder einem Messempfänger wird selektiv die elektrische Feldstärke der einzelnen BCCH-Frequenzen gemessen.

Innerhalb des Messvolumens muss für die beteiligten BCCH-Frequenzen das Feldstärke-Maximum gesucht werden, und zwar in Bezug auf:

- Stehwellen im Raum
- Polarisierung der Messantenne
- Ausrichtung der Messantenne

Da für selektive Messungen keine geeigneten isotropen Antennen existieren, muss mit einer nicht-isotropen Antenne in Bezug auf die drei erwähnten Parameter das Maximum gesucht werden. Dazu sind mehrere Methoden möglich:

- Schwenkmethode
- Drehmethode
- Punkterastermethode

Im jetzigen Zeitpunkt kann keine der drei Methoden eindeutig als „am besten geeignet“ bezeichnet werden. Es wird deshalb vorgeschlagen, je nach den Möglichkeiten des Labors und den örtlichen Gegebenheiten vorläufig mit einer oder mehreren der drei Methoden zu arbeiten. Falls sich mit zunehmender Erfahrung eine bestimmte Methode als optimal erweist (Kompromiss zwischen Messaufwand und Reproduzierbarkeit), so wird sie zu einem späteren Zeitpunkt als Vorzugsmethode festgelegt werden.

6.1.1 Schwenkmethode

Das ganze Messvolumen wird mit einer handgeführten Messantenne abgetastet, wobei gleichzeitig die Vorzugsrichtung und die Polarisationsrichtung der Messantenne variiert werden. Während des ganzen Suchvorgangs wird das Spektrum mit der Maximum Hold-Funktion des Messgerätes kontinuierlich erfasst.

Es gibt zwei Varianten dieser Methode:

- Variante 1: Der Messwert wird auf dem Messgerät während der Messung beobachtet (z.B. mit gleichzeitiger Anzeige von momentan gemessenem Wert und Maximum Hold-Wert). Der Ort im Messvolumen, die Richtung und die Polarisierung der Antenne werden solange verändert, bis für jeden BCCH das Feldstärke-Maximum gefunden und registriert ist.
- Variante 2: Das Messvolumen wird manuell systematisch mit unterschiedlichen Polarisierungen und Antennenrichtungen langsam abgetastet.

Bei beiden Varianten muss die Bewegung der Antenne, bezogen auf die Frequenzsweep des Spektrumanalysators, langsam erfolgen.

Bei dieser Methode resultiert ein „Max hold Spektrum“, aus dem für jeden BCCH i die Feldstärke $E_{i\max}$ abgelesen und in die Auswerteformel (7) eingesetzt wird.

6.1.2 Drehmethode

Die Messantenne wird auf einer kreisförmigen Bahn um einen Drehpunkt bewegt. Dabei soll der Mittelpunkt der Antenne einen Kreis von mindestens 1.00 m Durchmesser beschreiben. Diese Drehung wird mit vier verschiedenen Polarisierungen der Antenne (Horizontal, Vertikal, +45 Grad, -45 Grad) und auf drei Höhen (0.75 m, 1.25 m, 1.75 m) wiederholt. Während des ganzen Vorgangs wird das Spektrum mit der Maximum Hold-Funktion des Messgerätes kontinuierlich erfasst. Die Drehung der Antenne muss, bezogen auf die Frequenzsweep des Spektrumanalysators, langsam erfolgen.

Die Spektren für die einzelnen Polarisierungen und Messhöhen können separat abgespeichert werden. Die Berechnung des Beurteilungswertes erfolgt nach der Auswerteformel (7), wobei für jeden BCCH i der höchste gemessene Wert $E_{i, max}$ eingesetzt wird. Die Werte der verschiedenen Polarisierungen werden (im Gegensatz zur Punkterastermethode 6.1.3) nicht addiert.

6.1.3 Punkterastermethode

Das Messvolumen wird mit einer Messantenne in einem fixen Punkteraster abgetastet.

An jedem Messpunkt wird die Antenne in drei orthogonale Richtungen orientiert, und für jede Richtung wird ein Spektrum aufgenommen. Für jeden BCCH wird die Wurzel aus der Quadratsumme der drei Messwerte orthogonaler Polarisation berechnet. Es resultiert somit an jedem Rasterpunkt j für jeden BCCH i ein Feldstärkewert $E_{i,j}$. Dieser Feldstärkewert wird in die Auswerteformel (9) eingesetzt.

Das Antennen-Diagramm der Messantenne muss dipolförmig oder dipolähnlich sein, und das Signal muss während der Dauer der drei orthogonalen Messungen konstant sein. Dies ist bei der Messung des BCCH gewährleistet, falls sich niemand im Raum bewegt.

Diese Methode ergibt zwar physikalisch sauber definierte Messwerte an einem Rasterpunkt, sie erfasst aber nicht auf Anhieb den höchsten Beurteilungswert im Messvolumen. Die Messung und Hochrechnung muss daher an vielen Punkten im Messvolumen wiederholt werden. Massgebend ist der höchste an einem Rasterpunkt ermittelte Beurteilungswert (siehe Formel (10)).

Die notwendige Anzahl der Rasterpunkte und deren Verteilung über das Messvolumen kann erst definitiv festgelegt werden, wenn aus der Praxis genügend Erfahrungen über die statistische Verteilung der Messwerte vorliegen. Vorerst sollen auf den drei Messebenen (0.75 m, 1.25 m, und 1.75 m) je mindestens 20 Rasterpunkte gemessen werden. Bei der Festlegung dieser Rasterpunkte muss darauf geachtet werden, dass sie sich nicht in Abständen wiederholen, die der halben Wellenlänge der zu messenden Frequenzen entsprechen.

6.2 Messeinrichtung

6.2.1 Antennen

Folgende Antennentypen sind geeignet:

- Kleine Log Per Antenne (normalerweise mit einem Frequenzbereich ab ca. 500 MHz)
- Kleine Bikonische Antenne (normalerweise mit einem Frequenzbereich ab ca. 500 MHz)
- Abgestimmte Dipolantenne

Die verwendete Antenne soll genügend kleine Abmessungen (weniger als 40 cm in Querrichtung zur Empfangsrichtung) haben, so dass eine Anwendung in Innenräumen gut möglich ist. Die Antenne muss individuell kalibriert sein. Falls die Punkteraster-Methode (Abschnitt 6.1.3) angewendet wird, so muss die Antenne ein dipol-ähnliches Antennendiagramm aufweisen.

6.2.2 Spektrumanalysator / Messempfänger

Für die selektive Messung kann ein Spektrumanalysator oder ein Messempfänger mit Maximum Hold-Funktion verwendet werden. Die Geräte müssen kalibriert sein, und ihre Messunsicherheit muss bekannt sein.

Die Messung soll in der Regel mit 300 kHz Bandbreite und mit Peak-Detektor (bei nicht-belegten Nachbarkanälen) erfolgen.

Hinweis: Der Kanalabstand bei GSM beträgt 200 kHz. Normalerweise ist die Zuteilung der Frequenzen so gewählt, dass die benachbarten Kanäle frei bleiben. Im Einzelfall kann dies durch Beobachtung mit dem selektiven Messgerät kontrolliert werden. Eine Messung mit einer Bandbreite von 200 kHz oder 300 kHz ist deshalb im Normalfall möglich. Bei einer Messung mit 300 kHz Bandbreite bei nicht belegten Nachbarkanälen fallen die unterschiedlichen Eigenschaften der Bandfilter im Messgerät am wenigsten ins Gewicht.

6.3 Berechnung des Beurteilungswertes

Für jede Zelle i , die von der Anlage versorgt wird, wird ein Hochrechnungsfaktor K_i nach der folgenden Formel berechnet:

$$K_i = \sqrt{\frac{P_{i \max}}{P_i}} \quad (6)$$

Dabei bedeuten:

- K_i Hochrechnungsfaktor für Zelle i
- P_i Aktuelle Sendeleistung (ERP) des BCCH von Zelle i in W
- $P_{i \max}$ Maximal zugelassene Sendeleistung (ERP) der Zelle i in W

P_i und $P_{i \max}$ können aus den Angaben der Betreiber abgeleitet werden.

Der Beurteilungswert E_B wird je nach der gewählten Messmethode nach den Formeln (7) bzw. (9) und (10) berechnet, die erweiterte Unsicherheit U_B des Beurteilungswertes nach den Formeln (8) bzw. (11).

Dabei bedeuten:

- $E_{i \max}$ Maximale im Messvolumen gemessene elektrische Feldstärke des BCCH von Zelle i in V/m (nur eine Polarisation berücksichtigt)
- $E_{i,j}$ Am Rasterpunkt j gemessene elektrische Feldstärke des BCCH von Zelle i in V/m (Wurzel aus der Quadratsumme von drei Werten orthogonaler Polarisation)
- E_B Beurteilungswert in V/m

U	Erweiterte Messunsicherheit in %
U_B	Erweiterte Unsicherheit des Beurteilungswerts in V/m
n	Anzahl Zellen, die von der Anlage versorgt werden
j	Einzelner Rasterpunkt (nur bei der Punkterastermethode von Bedeutung)

6.3.1 Schwenk- und Drehmethode

Die Berechnung wird für das ganze Messvolumen einmal durchgeführt.

$$E_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{i \max} \cdot K_i)^2} \quad (7)$$

$$U_B = E_B \cdot U / 100 \quad (8)$$

6.3.2 Punkterastermethode

Die Berechnung wird für jeden Rasterpunkt j einzeln durchgeführt.

$$E_{Bj} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{i,j} \cdot K_i)^2} \quad (9)$$

Der Beurteilungswert E_B ist der höchste der Einzelwerte $E_{B,j}$.

$$E_B = \max(E_{Bj}) \quad (10)$$

$$U_B = E_B \cdot U / 100 \quad (11)$$

7 Spezialfälle

In einigen speziellen Fällen kann nicht nach dem allgemein gültigen Rezept vorgegangen werden. Es ist wichtig, solche Fälle zu erkennen und entsprechend angepasste Messmethoden zu verwenden.

7.1 Überdeckung eines BCCH durch Frequenzhüpfen (Frequency hopping)

Falls ein BCCH durch die benachbarten Frequenzhüpf-Kanäle überdeckt wird, gibt es folgende Möglichkeiten:

- Verwenden des (zu hohen) Messwertes des überdeckten BCCH. Solange der Beurteilungswert, der sich aus diesem Messwert ergibt, einschliesslich seiner Unsicherheit den Anlagegrenzwert nicht überschreitet, sind keine weiteren Vorkehrungen nötig.
- Ausschalten des Frequenzhüpfens durch den Betreiber während der Zeit der Messung.

7.2 Abstrahlung von BCCH und TCH über räumlich getrennte Antennen

Falls der BCCH und die TCH über zwei räumlich getrennte Antennen abgestrahlt werden, so kann nicht mehr angenommen werden, dass die TCH am Messort die gleiche Feldstärke wie der BCCH erzeugen. In einem solchen Fall muss der Anteil der TCH individuell gemessen werden. Dabei muss während der Messung ein definierter Betriebszustand der TCH mit bekannter Sendeleistung hergestellt werden (Ausschalten der Leistungsregelung; fixe Anzahl gefüllter Zeitschlitze).

Anhang 1 Abkürzungsverzeichnis

NISV	Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung	
GSM	Global System for Mobile Communication	
WLL	Wireless Local Loop	
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	
TDMA	Time Domain Multiple Access	
BCCH	Broadcast Control Channel	
TCH	Traffic Channel	
u	Standard-Messunsicherheit eines Messresultates	%
U	Erweiterte Messunsicherheit eines Messresultates	%
U_B	erweiterte Unsicherheit des Beurteilungswertes	V/m
K_i	Hochrechnungsfaktor für Zelle i	–
K	Hochrechnungsfaktor für die Berechnung des Beurteilungswertes	–
P_i	Aktuelle Sendeleistung (ERP) des BCCH von Zelle i	W
$P_{i\max}$	Maximal zugelassene Sendeleistung (ERP) der Zelle i	W
E_{\max}	Maximale im Messvolumen gemessene elektrische Feldstärke (bei breitbandiger Messung)	V/m
$E_{i\max}$	Maximale im Messvolumen gemessene elektrische Feldstärke des BCCH von Zelle i (bei Schwenk- und Drehmethode)	V/m
$E_{i,j}$	Am Rasterpunkt j gemessene elektrische Feldstärke des BCCH von Zelle i (Wurzel aus der Quadratsumme von drei Werten orthogonaler Polarisations); (bei Punkterastermethode)	V/m
E_B	Beurteilungswert	V/m
n	Anzahl Zellen, die von der Anlage versorgt werden	

Anhang 2 **Berechnung der erweiterten Messunsicherheit U**

Die Messunsicherheit wird in Anlehnung an den „IEC Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (First edition 1995 ISBN 92-67-10188-9) bestimmt.

Zur Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit werden alle Einflussfaktoren aufgeführt, die das Messresultat beeinflussen können. Für jeden Einflussfaktor wird die zugehörige Messunsicherheit abgeschätzt. Zudem ist die statistische Verteilung der durch diesen Einflussfaktor verursachten Schwankungen anzugeben.

Unsicherheitsangaben aus einem Kalibrierzertifikat sind als 2σ -Werte einer Normalverteilung angegeben. Unsicherheitsangaben in den Spezifikationen des Datenblattes werden als Maximalwerte einer Rechteckverteilung betrachtet. Für die Unsicherheit infolge von Fehlanpassungen muss eine U-förmige Verteilung angenommen werden.

Der Sensitivitätsfaktor wird immer als 1 angenommen und erscheint deshalb in den Tabellen nicht.

Die einzelnen Unsicherheiten werden durch einen Divisor auf die Standardunsicherheit einer Normalverteilung reduziert.

Verteilung	Divisor
Normal	2
Rechteck	$\sqrt{3}$
U-förmig	$\sqrt{2}$

Die einzelnen Standardunsicherheiten werden quadriert, und aus der Summe der Quadrate wird die Wurzel gezogen. Als Ergebnis resultiert die kombinierte Standard-Messunsicherheit u .

Die erweiterte Messunsicherheit U wird für eine einseitige Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95% berechnet. Deshalb beträgt der Erweiterungsfaktor 1.64.

$$U = 1.64 u \quad (\text{vgl. Gleichung (2) in Abschnitt 4.7})$$

Die Angabe der erweiterten Messunsicherheit U erfolgt in % des gemessenen Wertes.

Nachstehend sind zwei Beispiele für die Berechnung der erweiterten Messunsicherheit ausgeführt:

Beispiel 1: Breitbandsonde mit individueller Kalibration

Beispiel 2 : Selektive Messeinrichtung mit separater Kalibration von Messgerät, Antenne und Kabel

Beispiel 1: Breitbandsonde mit individueller Kalibration

Die Sonde ist individuell kalibriert. Der Absolutfehler wird entsprechend dem Kalibrierzertifikat der Sonde korrigiert. Die Unsicherheit der Kalibration sowie die Unsicherheiten bezüglich Linearität und Frequenzgang werden aus dem Kalibrierzertifikat abgeleitet. Die übrigen Unsicherheiten sind aus dem Datenblatt der Sonde abgeleitet. Die nachfolgende Berechnung der erweiterten Messunsicherheit bezieht sich auf einen erwarteten Messwert von 1 V/m.

Spezifizierter Frequenzbereich: 100 kHz – 3 GHz
 Spezifizierter Messbereich: 0.6 V/m – 800 V/m
 Spezifizierter Temperaturbereich: 0 – 50 Grad C

Unsicherheit der Absolut-Kalibration nach Kalibrierzertifikat: 7%
 Linearitätsabweichung nach Kalibrierzertifikat: 3.5%
 Frequenzgang nach Kalibrierzertifikat: 22%
 Isotropieabweichung (aus Datenblatt): ± 1 dB 12%
 Unsicherheit wegen Modulationsabhängigkeit (aus Datenblatt, bei 1 V/m): 20%
 Unsicherheit wegen Temperaturabhängigkeit (aus Datenblatt, 10°C bis 30°C): ± 0.25 dB 3%
 Unsicherheit wegen Quantisierung (2 Stellen nach dem Komma bei 1 V/m): 0.5%
 Begrenzte Reproduzierbarkeit (Maximumsuche, Messanordnung): ± 1.5 dB 19%

Berechnung der erweiterten Messunsicherheit (ausgedrückt in % des Messwertes):

Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit des Messwertes %	Verteilung	Divisor (entsprechend der Verteilung)	Standard-unsicherheit %
Absolut-Kalibration	7	Normal	2.00	4
Linearitätsabweichung	3.5	Normal	2.00	2
Frequenzgang	22	Normal	2.00	11
Isotropieabweichung	12	Rechteck	1.73	7
Modulationsabhängigkeit (gegenüber Sinusmodulation)	20	Rechteck	1.73	12
Temperaturabhängigkeit	3	Rechteck	1.73	2
Quantisierung	0.5	Rechteck	1.73	0
Begrenzte Reproduzierbarkeit	19	Rechteck	1.73	11
Kombinierte Standard-Messunsicherheit u (Wurzel aus der Quadratsumme der Standardunsicherheiten)				21

Resultat:

Standard-Messunsicherheit u : 21% des Messwertes

Erweiterungsfaktor: 1.64

Erweiterte Messunsicherheit U : 34% des Messwertes oder 2.5 dB

Beispiel 2 : Selektive Messeinrichtung mit separater Kalibration von Messgerät, Antenne und Kabel

Absolutfehler, Linearitätsfehler, Frequenzgang, Antennenfaktor und Kabelverluste werden aufgrund der Kalibrierdaten korrigiert.

Unsicherheit der Absolut-Kalibration nach Kalibrierzertifikat:	± 0.2 dB	2.4%
Unsicherheit der Linearitätskorrektur nach Kalibrierzertifikat:	± 0.4 dB	4.7%
Unsicherheit der Frequenzgangkorrektur nach Kalibrierzertifikat:	± 0.2 dB	2.4%
Unsicherheit wegen Temperaturabhängigkeit des Messgerätes (geschätzt):		10%
Unsicherheit wegen Modulationsabhängigkeit des Messgerätes (geschätzt):		10%
Unsicherheit der Antennenkalibration nach Kalibrierzertifikat:	± 1.5 dB	19%
Unsicherheit der Korrektur für Kabelverluste nach Kalibrierzertifikat:	± 0.2 dB	2.4%
Unsicherheit wegen Fehlanpassung Kabel / Messgerät (berechnet aus Reflexionsmessung; siehe Bem. 1):		5.4%
Unsicherheit wegen Fehlanpassung Antenne / Kabel (berechnet aus Reflexionsmessung; siehe Bem. 1):		1%
Unsicherheit wegen Fehlanpassung Antenne / Messgerät (berechnet aus Reflexionsmessung; siehe Bem. 1):		6.7%
Begrenzte Reproduzierbarkeit (Maximumsuche, Messanordnung):	± 1.5 dB	19%

Bem. 1:

Die Unsicherheit u_F infolge von Fehlanpassungen wird für jede Stossstelle nach der folgenden Formel berechnet:

$$u_F = 2 \cdot |r_{Last}| \cdot |r_{Quelle}|$$

Dabei bedeuten:

u_F Unsicherheit infolge von Fehlanpassung

$|r_{Last}|$ Reflexionsfaktor Last (gemessen)

$|r_{Quelle}|$ Reflexionsfaktor Quelle (gemessen)

Für die Unsicherheit infolge von Fehlanpassungen wird eine U-förmige Verteilung angenommen.

Berechnung der erweiterten Messunsicherheit (ausgedrückt in % des Messwertes):

Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit des Messwertes %	Verteilung	Divisor (entsprechend der Verteilung)	Standard- unsicherheit %
Absolut-Kalibration Messgerät	2.4	Normal	2.00	1
Linearitätskorrektur Messgerät	4.7	Normal	2.00	2
Frequenzgangkorrektur Messgerät	2.4	Normal	2.00	1
Temperaturabhängigkeit Messgerät	10	Rechteck	1.73	6
Modulationsabhängigkeit Messgerät	10	Rechteck	1.73	6
Antennenkalibration	19	Normal	2.00	10
Kabelverluste	2.4	Normal	2.00	1
Fehlanpassung (Antenne / Kabel)	5.4	U-förmig	1.41	4
Fehlanpassung (Kabel / Messgerät)	1	U-förmig	1.41	1
Fehlanpassung (Antenne / Messgerät)	6.7	U-förmig	1.41	5
Begrenzte Reproduzierbarkeit	19	Rechteck	1.73	11
Kombinierte Standard-Messunsicherheit u (Wurzel aus der Quadratsumme der Standardunsicherheiten)				18

Resultat:

Standard-Messunsicherheit u : 18% des Messwertes

Erweiterungsfaktor: 1.64

Erweiterte Messunsicherheit U : 30% des Messwertes oder 2.3 dB