

Nichtionisierende Strahlung

Mobilfunk-Basisstationen (UMTS - FDD)

Messempfehlung

Entwurf vom 17.9.2003



BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
OFEFP Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
UFAPF Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio
UFAGC Uffizi federal d'ambient, gaud e cuntrada

m

e

t

a

s

metrologie und akkreditierung schweiz

Bezugsquellen:

Sprachen: Die vorliegende Publikation liegt auch in französischer Sprache vor.

Internet: Die vorliegende Publikation kann als pdf-Datei aus dem Internet heruntergeladen werden.
<http://www.elektrosmog-schweiz.ch/vollzug/mobilfunk>

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5
Vorwort	7
1 Zweck und Geltungsbereich	9
2 UMTS-Technik	11
2.1 Das UMTS-Mobilfunksystem	11
2.2 Die Funkschnittstelle	11
2.3 Steuer- und Datenkanäle	12
3 Anforderungen der NISV	15
4 Grundsätzliches zur Messung	17
4.1 Betrieb der Anlage während Abnahmemessungen	17
4.2 Messwert und Beurteilungswert	17
4.2.1 Messwert	17
4.2.2 Beurteilungswert	17
4.3 Anforderungen an Messfirmen und Messpersonen	18
4.4 Angaben des Auftraggebers und der Netzbetreiber	19
4.5 Ort der Messung	19
4.6 Zeitpunkt der Messung	20
4.7 Messprinzipien (breitbandig, spektral, code-selektiv)	20
4.8 Messunsicherheit und Kalibration	21
4.8.1 Allgemeines zur Messunsicherheit	21
4.8.2 Unsicherheit der Messeinrichtung	22
4.8.3 Unsicherheit der Probenahme	23
4.8.4 Anforderung an die Messunsicherheit	23
4.8.5 Kalibration	24
4.9 Messbericht	24
5 Bestimmung der Hochrechnungsfaktoren	25
6 Breitbandige Messung	27
6.1 Messmethode	27
6.2 Messeinrichtung	27
6.3 Berechnung des Beurteilungswertes	27
7 Spektrale Messung	29
7.1 Messmethode	29
7.2 Messeinrichtung	30
7.2.1 Antennen	30
7.2.2 Messgeräte	30
7.2.3 Kabel	31

7.3	Berechnung des Beurteilungswertes	31
8	Code-selektive Messung	33
8.1	Messmethode	33
8.2	Messeinrichtung	34
8.2.1	Antennen	34
8.2.2	Messgeräte	34
8.2.3	Kabel	34
8.3	Berechnung des Beurteilungswertes	34
8.4	Schwache Signale	36
9	Abnahmemessung bei kombinierten UMTS/GSM-Anlagen	37
Anhang 1	Beispiele zur Berechnung der Messunsicherheit	39
	Beispiel 1.1: Kalibrierte Breitbandsonde	42
	Beispiel 1.2 :Spektral auflösende Messeinrichtung mit gemeinsamer Kalibration von Antenne und Kabel	45
	Beispiel 1.3 :Code-selektive Messeinrichtung mit unabhängiger Kalibration von Antenne und Kabel	48
Anhang 2	Beispiele zur Berechnung des Beurteilungswertes bei reinen UMTS-Anlagen	53
	Beispiel 2.1	53
	Beschreibung der Anlage 1	53
	Breitbandmessung bei der Anlage 1	55
	Spektrale Messung bei der Anlage 1	55
	Code-selektive Messung bei der Anlage 1	55
	Beispiel 2.2	57
	Beschreibung der Anlage 2	57
	Breitbandmessung bei der Anlage 2	57
	Spektrale Messung bei der Anlage 2	58
	Code-selektive Messung bei der Anlage 2	58
	Beispiel 2.3	60
	Beschreibung der Anlage 3	60
	Breitbandmessung bei der Anlage 3	61
	Spektrale Messung bei der Anlage 3	62
	Code-selektive Messung bei der Anlage 3	62
	Beispiel 2.4	64
	Beschreibung der Anlage 4	64
	Breitbandmessung bei der Anlage 4	65
	Spektrale Messung bei der Anlage 4	66
	Code-selektive Messung bei Anlage 4	66
Anhang 3	Beispiel zur Berechnung des Beurteilungswertes bei kombinierten UMTS/GSM-Anlagen	69
	Beschreibung der Anlage	69
	Breitbandmessung	71
	Spektrale Messung	71
	Spektrale Messung (GSM) und code-selektive Messung (UMTS)	73
Anhang 4	Verzeichnis der Abkürzungen	75

Abstracts

This publication provides instructions for enforcement authorities and measuring laboratories, on how radiation from mobile telecommunication base stations of the UMTS network has to be measured and assessed. It also provides the basis for the accreditation of measuring laboratories for such measurements. Indoor measurements are the main priority. After a short overview of UMTS technology, the relevant regulations in the Ordinance relating to Protection from Non-Ionising Radiation (ONIR) are explained and further specified. Then, detailed recommendations are given on the measurement procedures, the measurement equipment, the treatment of the measurement uncertainty and the assessment of results in accordance with the Ordinance. An appendix illustrates the determination of the measurement uncertainty, another appendix illustrates projections of the measured values to the maximum capacity of the transmission installation.

Keywords: non-ionising radiation; ONIR; installation limit values; base station; measurement; UMTS; accreditation

La présente publication, destinée aux autorités d'exécution et aux laboratoires de mesures, contient des instructions sur la manière de mesurer et d'évaluer le rayonnement émis par les stations de base de téléphonie mobile des réseaux UMTS. Elle sert en même temps de base à l'accréditation des laboratoires effectuant de telles mesures. L'accent porte sur les mesures effectuées à l'intérieur des bâtiments. Après un bref aperçu de la technique UMTS, les dispositions déterminantes de l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) sont expliquées et précisées. Suivent des recommandations détaillées concernant la méthode et les appareils de mesure, le traitement de l'incertitude de mesure et une évaluation des résultats conforme à l'ordonnance. Une des annexes concerne la détermination de l'incertitude de mesure, une autre l'extrapolation d'un résultat de mesure à la capacité maximale de l'installation émettrice.

Mots-clés: rayonnement non ionisant; ORNI; valeur limite de l'installation; station de base; mesure; UMTS; accréditation

Diese Publikation ist eine Anleitung für Vollzugsbehörden und Messlabors, wie die Strahlung von Mobilfunk-Basisstationen der UMTS-Netze zu messen und zu beurteilen ist. Sie bildet gleichzeitig die Grundlage für die Akkreditierung von Messlabors für solche Messungen. Im Vordergrund stehen Messungen in Innenräumen. Nach einem kurzen Überblick über die UMTS-Technik werden die massgebenden Bestimmungen der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) erläutert und präzisiert. Es folgen detaillierte Empfehlungen zum Messverfahren, zur Messeinrichtung, zur Behandlung der Messunsicherheit und zur verordnungskonformen Beurteilung eines Messergebnisses. Ein Anhang illustriert die Bestimmung der Messunsicherheit, ein weiterer Anhang die Hochrechnung eines Messresultats auf die maximale Kapazität der Sendeanlage.

Schlüsselwörter: nichtionisierende Strahlung; NISV; Anlagegrenzwert; Basisstation; Messung; UMTS; Akkreditierung

La presente pubblicazione vuole essere un'introduzione rivolta alle autorità esecutive e ai laboratori di misurazione che indichi come rilevare e valutare le radiazioni emesse dalle stazioni base di telefonia mobile delle reti UMTS. Al contempo, costituisce la base per l'accréditamento dei laboratori di misurazione per simili rilevamenti. In primo piano vi sono le misurazioni in ambienti chiusi. Dopo un breve sguardo sulla tecnica UMTS vengono illustrate e precisate le principali prescrizioni dell'ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI). Seguono raccomandazioni dettagliate sul procedimento e sugli apparecchi di misurazione, su come gestire il margine di errore di misurazione e su come effettuare una valutazione dei risultati delle misurazioni conforme all'ordinanza. Un primo allegato illustra come determinare il margine di errore delle misurazioni, un secondo l'estrapolazione di un risultato di misurazione sulla capacità massima dell'impianto di trasmissione.

Parole chiave: radiazioni non ionizzanti; ORNI; valore limite dell'impianto; stazione base; misurazione; UMTS; accreditalmento

Vorwort

Die vorliegende Messempfehlung gibt detaillierte Anleitung, wie die Strahlung der im Aufbau befindlichen UMTS-Mobilfunknetze zu messen und gemäss der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) zu bewerten ist. Sie wurde federführend durch das BUWAL unter intensiver Mitarbeit des Bundesamtes für Metrologie und Akkreditierung (METAS) erarbeitet. Diese Arbeit wurde durch eine Konsultationsgruppe aus Vertretern von Bundes- und Kantonsbehörden, der Netzbetreiber und der Schutzorganisationen begleitet.

Die vorliegende Messempfehlung hat den Status eines Entwurfs, der in der Praxis erprobt werden soll. Dies wird erst möglich sein, wenn die UMTS-Netze ihren Betrieb aufnehmen. Ab diesem Zeitpunkt und wenn sich genügend Messlabors mit den UMTS-spezifischen Messgeräten ausgerüstet haben, ist auch die Durchführung einer organisierten Vergleichsmessung (Ringversuch) vorgesehen. Nach Abschluss der Erprobungsphase wird die Messempfehlung wenn nötig überarbeitet und anschliessend in einer definitiven Fassung publiziert werden.

Es ist vorgesehen, dass sich Messlabors bereits gestützt auf den vorliegenden Entwurf für UMTS-Messungen akkreditieren lassen können.

Falls das Bedürfnis besteht, bereits vor der Inbetriebnahme einer UMTS-Sendeanlage eine (vorgezogene) Abnahmemessung durchzuführen, kann eine solche basierend auf einer Messung der GSM-Strahlung erfolgen. Das entsprechende Verfahren und die zu beachtenden Randbedingungen sind in einem Nachtrag¹ zur GSM-Messempfehlung festgehalten. Dieses Verfahren ist eine Übergangslösung und soll nur so lange eingesetzt werden, als die UMTS-Anlagen noch nicht in Betrieb sind. Sobald diese den Betrieb aufnehmen, soll die vorliegende Messempfehlung zur Anwendung kommen.

¹ BUWAL/METAS: Mobilfunk-Basisstationen (GSM). Messempfehlung. Nachtrag 2003.
<http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/luft/nis/vorschriften/VU-5800-D-Nachtrag.pdf>

1 Zweck und Geltungsbereich

Die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) verlangt, dass die Strahlung von Mobilfunksendeanlagen an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) den Anlagegrenzwert einhalten muss. Eine Mobilfunkanlage im Sinne der NISV umfasst Sendeanlagen der Funkdienste UMTS, GSM, Tetrapol, TETRA und WLL. 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 über den bewilligten Bereich hinaus geändert werden.

Zuständige Behörde ist in den meisten Fällen die Baubehörde der Gemeinde oder des Kantons. Für Sendeanlagen auf Masten von Hochspannungsleitungen ist das Eidg. Starkstrominspektorat, für solche auf Einrichtungen der Eisenbahn das Bundesamt für Verkehr die zuständige Behörde.

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 rechnerische Prognose die reale Strahlungsbelastung nicht in allen Feinheiten wiedergeben. Eine abschliessende Aussage über die Intensität der Strahlung kann daher nur eine Messung liefern. Mit der vorliegenden Empfehlung kommt das BUWAL seinem Auftrag nach, geeignete Messmethoden zu empfehlen.

Die vorliegende Empfehlung gilt für **Abnahmemessungen**. Abnahmemessungen werden auf Verlangen der zuständigen Behörde durchgeführt, in der Regel immer dann, wenn gemäss der rechnerischen Prognose die NIS-Belastung den Anlagegrenzwert zu mindestens 80 % erreicht. Eine Abnahmemessung dient dazu, verbindlich festzustellen, ob der Anlagegrenzwert im massgebenden Betriebszustand der Anlage eingehalten wird.² Das Ergebnis einer Abnahmemessung bildet ausserdem die Grundlage, um eine Erhöhung der Sendeleistung zu beantragen.

Die vorliegende Empfehlung behandelt die Messung von UMTS-Strahlung im FDD-Betriebsmodus (FDD: frequency division duplex, siehe Kapitel 2). Sendeanlagen, welche ausschliesslich UMTS-Strahlung im FDD-Modus emittieren, können mit der vorliegenden Messempfehlung vollständig gemessen und beurteilt werden. Mobilfunksendeanlagen, bei denen zusätzlich noch GSM-, Tetrapol-, TETRA-, WLL- oder UMTS (TDD)-Antennen vorhanden sind, können mit der vorliegenden Empfehlung allein nicht

² Ergänzend zur Abnahmemessung können später **Kontrollmessungen** durchgeführt werden. Kontrollmessungen haben einen anderen Zweck und liefern eine andere Aussage als die Abnahmemessung. Mit der Abnahmemessung wird festgestellt, ob der Anlagegrenzwert im ungünstigsten Fall, der gemäss Bewilligung eintreten kann, eingehalten ist. Mit der Kontrollmessung wird die NIS-Belastung im realen Betrieb der Anlage festgestellt.

abschliessend beurteilt werden. Bei solchen Anlagen muss auch die Strahlung der letztgenannten Antennen gemessen und in die Beurteilung einbezogen werden.³ Ein Beispiel für die Beurteilung einer kombinierten UMTS/GSM-Anlage findet sich in Anhang 3.

Die vorliegend beschriebenen Mess- und Hochrechnungsverfahren sind auch anwendbar, wenn die Einhaltung des Immissionsgrenzwertes zu überprüfen ist. Im Unterschied zum Anlagegrenzwert bezieht sich der Immissionsgrenzwert jedoch nicht nur auf die Strahlung einer einzelnen Anlage, sondern auf die gesamte an einem Messort einfallende Hochfrequenzstrahlung. Die vorliegende Messempfehlung gibt dabei Anleitung, wie der Anteil der UMTS-Strahlung zu messen ist. Die Addition der einzelnen Strahlungsbeiträge und die Gesamtbeurteilung sind nicht in diesem Bericht, sondern in einer Rahmenempfehlung⁴ des BUWAL beschrieben.

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.

³ Für die Messung und Beurteilung von GSM-Strahlung gilt die Messempfehlung des BUWAL/METAS: „Mobilfunk-Basisstationen (GSM) – Messempfehlung“, Vollzug Umwelt, BUWAL/METAS, Bern 2002. Tetrapol-Strahlung kann weitgehend mit gleichen Methoden und gleicher Instrumentierung gemessen werden wie GSM-Strahlung.

⁴ BUWAL: „Messung nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung – 1. Teil: Frequenzbereich 100 kHz bis 300 GHz“. Schriftenreihe Umwelt Nr. 164, Bern, Mai 1992

2 UMTS-Technik

2.1 Das UMTS-Mobilfunksystem

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) ist die Bezeichnung für eine Mobilfunktechnik der 3. Generation. In der Schweiz wurden Ende 2000 vier landesweite Konzessionen an vier Netzbetreiber vergeben. Jeder Betreiber wird ein eigenes UMTS-Netz betreiben, wobei die Sendeinfrastruktur unter gewissen Bedingungen gemeinsam genutzt werden darf.

Die UMTS-Netze ermöglichen die Übertragung wesentlich höherer Datenraten als die GSM-Netze. Sie eignen sich daher zusätzlich zur Sprachübertragung generell für die Übertragung von umfangreichen digitalen Daten, beispielsweise von digitalen Bildern.

Das Versorgungsgebiet eines Netzbetreibers ist in Zellen eingeteilt. Eine Sendeantenne versorgt eine oder mehrere Zellen mit UMTS, wobei diese Zellen dem gleichen Netz oder auch verschiedenen Netzen angehören können. In der Regel sind auf einem Mast oder auf einem Gebäude mehrere Sendeantennen angeordnet; sie bilden zusammen eine Basisstation.

Für eine Verbindung baut das Mobilgerät eine Funkverbindung zu einer oder mehreren Basisstationen auf. Von der Basisstation geht die Verbindung dann über Leitungen oder über Richtfunkstrecken zur Mobilfunkvermittlungszentrale.

2.2 Die Funkschnittstelle

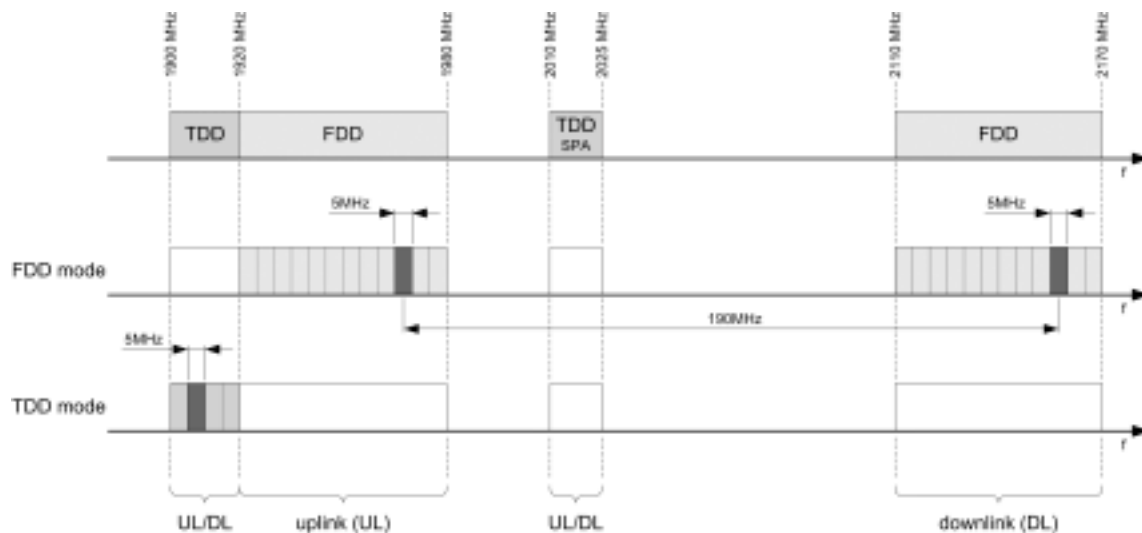
Der UMTS-Standard kennt zwei unterschiedliche Betriebsarten:

- TDD (Time division duplex): Hier wird die Datenübermittlung vom Mobilgerät zur Basisstation (uplink) auf der gleichen Frequenz abgewickelt wie in der umgekehrten Richtung (downlink). Uplink- und downlink-Sequenzen sind zeitlich getrennt.
- FDD (Frequency division duplex). Hier findet die uplink- und downlink-Verbindung gleichzeitig, aber auf zwei unterschiedlichen Frequenzen, statt.

Jeder der vier schweizerischen Netzbetreiber hat 5 MHz Bandbreite für TDD und 2x15 MHz für FDD-Betrieb zur Verfügung. Die zugewiesenen Frequenzbänder sind aus Figur 1 ersichtlich.

Gemäss derzeitiger Planung sind in der Schweiz vorerst nur UMTS-Netze im FDD-Modus vorgesehen. Die vorliegende Messempfehlung behandelt deshalb nur die Messung von UMTS-Strahlung in der FDD-Betriebsart.

Eine UMTS-Verbindung im FDD-Modus benötigt zwei Trägerfrequenzen mit 5 MHz Bandbreite, je eine für uplink und downlink. Ein UMTS-Netz lässt sich mit einem einzigen solchen Frequenzpaar realisieren und betreiben, d.h. sämtliche Sendeantennen desselben Netzes verwenden dieselbe downlink- und alle Mobilgeräte dieselbe uplink-Trägerfrequenz. Damit mehrere Mobilteilnehmer gleichzeitig Daten übermitteln können, werden diese codiert, überlagert und in diesen 5 MHz Bandbreite simultan übertragen. Jedes Mobilgerät extrahiert aus dem ausgestrahlten Datengemisch nur diejenigen Inhalte, die für es bestimmt sind.



Figur 1: Für UMTS reservierte Frequenzbänder in der Schweiz

Mit der Bandbreite von 2x15 MHz verfügt jeder Netzbetreiber über je drei unabhängige UMTS-Frequenzpaare für up- und downlink. Beim UMTS-Start wird wahrscheinlich pro Betreiber nur ein Frequenzpaar aufgeschaltet. Ob die übrigen Frequenzen eingesetzt werden, ist derzeit noch unklar. Für NIS-Abnahmemessungen ist in dieser Hinsicht von Bedeutung, ob ein Netzbetreiber pro Antenne nur eine UMTS-Frequenz oder allenfalls zwei oder drei gleichzeitig abstrahlen wird. Die vorliegende Messempfehlung ist so konzipiert, dass alle denkbaren Möglichkeiten abgedeckt werden können. Sollte sich beim realen Betrieb der UMTS-Netze zeigen, dass generell jeder Netzbetreiber pro Basisstation nur eine einzige Trägerfrequenz einsetzt, könnten die Berechnungsformeln vereinfacht werden.

Zentral für die Auswertung von NIS-Messungen ist der Begriff der Zelle. Eine Zelle bei UMTS ist der Raumbereich, der ausgehend von einer Basisstation von demselben UMTS-Signal versorgt wird. Dieses Signal ist eindeutig charakterisiert durch seine Trägerfrequenz und den so genannten Scrambling-Code. Der Scrambling-Code ist eine fixe Zahl, die von der Basisstation permanent übermittelt wird und dem Mobilgerät anzeigt, von welcher Sendeantenne das UMTS-Signal stammt.

Eine einfache Basisstation, bestehend aus drei Antennen, die von nur einem UMTS-Betreiber mit einer einzigen Trägerfrequenz genutzt wird, bedient somit drei Zellen. Die emittierten UMTS-Signale haben die gleiche Frequenz, unterscheiden sich jedoch durch ihren Scrambling-Code. Wird die Basisstation von zwei UMTS-Betreibern mit je drei Antennen genutzt, dann hat man es mit 6 Zellen zu tun. Die 6 emittierten UMTS-Signale unterscheiden sich durch den Scrambling-Code und/oder die Frequenz. Die Frequenz definiert dabei eindeutig, um welches Netz (Betreiber) es sich handelt. Eine bestimmte Kombination von Scrambling-Code und Frequenz kommt pro Anlage und in deren Umkreis nur einmal vor.

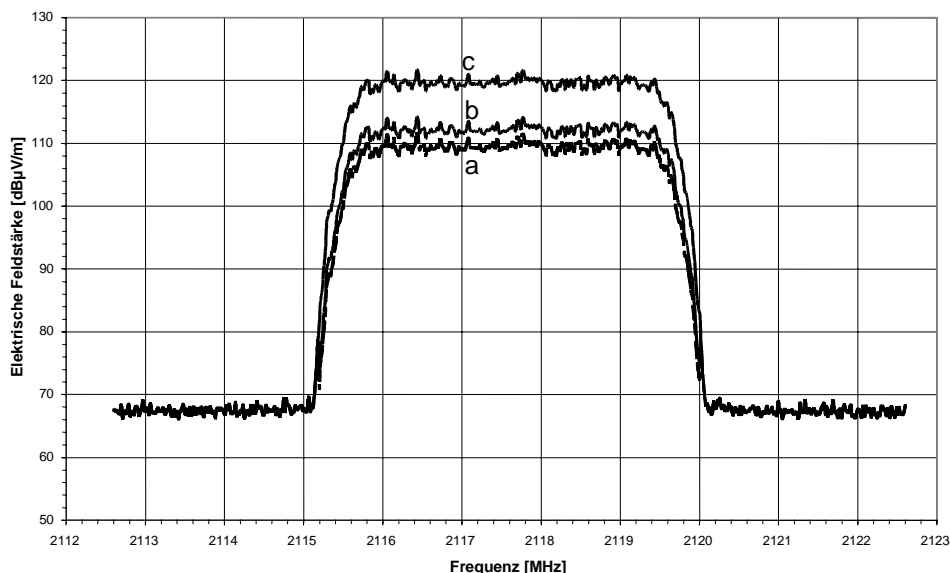
2.3 Steuer- und Datenkanäle

Das UMTS-Signal jeder Zelle enthält sowohl Steuer- als auch Datenkanäle. Der für NIS-Messungen wichtigste Steuerkanal ist der primäre CPICH (primary common pilot channel). Dieser wird permanent mit konstanter und bekannter Sendeleistung abge-

strahlt. In einer typischen Konfiguration beträgt die Sendeleistung des primären CPICH ungefähr 10 % der maximalen Sendeleistung des gesamten UMTS-Signals. Dieser primäre CPICH enthält unter anderem den Scrambling-Code. Der primäre CPICH ist im UMTS-Signal „versteckt“ (codiert), kann aber anhand des Scrambling-Codes mit modernen Messgeräten aus dem Gesamtsignal „extrahiert“ (decodiert) und gemessen werden. Auf dieser Eigenschaft beruht die in Kapitel 8 beschriebene Code-selektive Messmethode.

Neben dem P-CPICH enthält ein UMTS-Signal noch weitere Steuerkanäle, von welchen jedoch vorderhand für NIS-Messungen nicht Gebrauch gemacht wird.

Den Steuerkanälen überlagert sind die Datenkanäle. Die Überlagerung ist additiv, hat im Endeffekt also im Spektrum lediglich eine Erhöhung der Amplitude bei gleichbleibender Signalform zur Folge. Die Sendeleistung der Datenkanäle wird alle 0.67 ms neu eingestellt und optimiert. Ein UMTS-Signal, dargestellt im Frequenzbereich, verhält sich ungefähr wie Rauschen einer Bandbreite von 5 MHz, dessen Intensität je nach übertragener Datenmenge schwankt. Die niedrigste Intensität resultiert, wenn nur Steuer- aber keine Nutzdaten übertragen werden, die maximale Intensität, wenn die Übertragungskapazität voll ausgeschöpft wird. Diese Verhältnisse sind in Figur 2 illustriert.



Figur 2: Schematische Darstellung der Form und Intensität eines UMTS-Signals im Frequenzbereich in Abhängigkeit von der übertragenen Datenmenge (Detektor: RMS, Messbandbreite: 300 kHz).
 Kurve a: Beitrag vom primären CPICH allein;
 Kurve b: Maximaler Beitrag von allen Steuerkanälen;
 Kurve c: Signalpegel bei maximaler Zellenauslastung.

3 Anforderungen der NISV

Die für Mobilfunk-Basisstationen relevanten Bestimmungen finden sich in Anhang 1 Ziffer 6 der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV):

Anhang 1 NISV
.....
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.

Nach Anhang 1 Ziffer 61 NISV gehören nur diejenigen Sendeantennen zur Anlage, welche für zellulare Mobilfunknetze (zur Zeit die Netze UMTS, GSM900, GSM1800, GSM-Rail, Tetrapol und TETRA) sowie für WLL eingesetzt werden. Antennen für alle übrigen Funkdienste (z.B. Rundfunk, Telepage, Betriebsfunk, Amateurfunk) bilden nach Anhang 1 Ziffer 7 NISV eine eigene Anlagekategorie. Richtfunkantennen werden grundsätzlich nicht als Bestandteil der Anlage betrachtet. Die Behörde legt bereits im Bewilligungsverfahren fest, welche Sendeantennen in die Beurteilung einzubeziehen sind. Die Liste dieser Sendeantennen, zusammen mit ihren technischen Daten, findet sich im Standortdatenblatt, welches der Behörde im Bewilligungsverfahren einzureichen ist.

Bei der Abnahmemessung einer Anlage ist die Strahlung aller Sendeantennen zu erfassen, welche zu dieser Anlage gehören⁵. Die vorliegende Messempfehlung regelt als Teilbereich die Messung der Strahlung von UMTS-Anlagen, die im FDD-Modus betrieben werden.

Die Sendeleistung einer UMTS-Basisstation schwankt je nach der momentan zu übertragenden Datenmenge beträchtlich. Zu beurteilen ist jedoch die Strahlung im massgebenden Betriebszustand (maximaler Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung). Eine externe Einstellung des massgebenden Betriebszustandes würde die Funktion des ganzen Netz beeinträchtigen. Die Messung muss daher beim realen Betrieb der Anlage durchgeführt, und das Messergebnis anschliessend auf den massgebenden Betriebszustand hochgerechnet werden.

Falls für die Senderichtung der Antennen ein Winkelbereich bewilligt wurde, müssen die Antennen während der Abnahmemessung so ausgerichtet werden, dass ihre Hauptstrahlrichtung der kritischen Senderichtung entspricht.

Der Anlagegrenzwert muss nur an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) eingehalten werden. Diese Orte sind in Artikel 3 Absatz 3 NISV abschliessend festgelegt. In Zweifelsfällen entscheidet die Behörde im Bewilligungsverfahren, ob eine empfindliche Nutzung vorliegt. 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.

Erfahrungsgemäss schwankt die Strahlung gerade in Innenräumen örtlich beträchtlich. Für die NIS-Beurteilung soll der örtlich höchste Wert der NIS-Belastung, der an einem gegebenen OMEN auftritt, zugrunde gelegt werden.

Messungen sind 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. Der wahrscheinlichste Wert ist allerdings derjenige, welcher am Messgerät abgelesen wird. Für die NIS-Beurteilung soll der abgelesene Messwert zu Grunde gelegt werden, auf Zu- oder Abschläge der Messunsicherheit ist zu verzichten. Flankierend wird in Abschnitt 4.8.4 die maximal zulässige Messunsicherheit und damit eine Anforderung an die Qualität der Messeinrichtung festgelegt.

⁵ Von diesem Grundsatz kann abgewichen werden, wenn folgende Voraussetzungen kumulativ erfüllt sind:

- Es handelt sich um die Änderung oder Erweiterung einer bestehenden Anlage.
- Die Änderung/Erweiterung betrifft nur einzelne Antennen der Anlage.
- Es sind nach der Änderung/Erweiterung die gleichen OMEN am stärksten exponiert wie vorher.
- Es liegt für die bestehende Anlage bereits eine vollständige Abnahmemessung an den höchstbelasteten OMEN vor.

Sind diese Voraussetzungen erfüllt, dann muss nur die Strahlung der geänderten bzw. neu dazukommenden Antennen neu gemessen werden. Für den unveränderten Teil der Anlage dürfen die Messresultate der früheren Abnahmemessung verwendet und in den neuen Messbericht übernommen werden.

4 Grundsätzliches zur Messung

4.1 Betrieb der Anlage während Abnahmemessungen

Wenn für die Senderrichtungen ein Winkelbereich bewilligt wurde, dann müssen die Sendeantennen während der Abnahmemessung so ausgerichtet werden, dass ihre Hauptstrahlrichtung mit der kritischen Senderichtung übereinstimmt. Die kritische Senderichtung ist im Standortdatenblatt für jede Sendeantenne festgehalten. Sie kann für jeden Messort anders sein.⁶

Die Anlage muss während der Messung nicht notwendigerweise mit voller Sendeleistung und Auslastung betrieben werden. Messwerte bei einem andern Betriebszustand können anschließend auf den massgebenden Betriebszustand hochgerechnet werden (Abschnitt 4.2.2).

4.2 Messwert und Beurteilungswert

4.2.1 Messwert

Zu messen ist der Effektivwert der elektrischen Feldstärke aller UMTS-Signale, die von der Anlage emittiert werden (Ausnahme siehe Kapitel 3, Fussnote 5). 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 6 bis 8).

4.2.2 Beurteilungswert

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

Die Messunsicherheit wird bei der Berechnung des Beurteilungswertes nicht einbezogen, d.h., man geht bei der Hochrechnung von den abgelesenen Messwerten aus.

Wenn die Sendeanlage nur UMTS-Antennen beinhaltet, dann darf der ermittelte Beurteilungswert direkt mit dem Anlagegrenzwert der NISV verglichen werden. Der Anlagegrenzwert gilt als eingehalten, wenn der Beurteilungswert kleiner oder gleich dem Anlagegrenzwert ist.

Sind andere Mobilfunkdienste auf der Anlage vorhanden (z.B. GSM oder Tetrapol), dann müssen auch deren Strahlungsbeiträge gemessen und mit dem UMTS-Anteil zu einem Beurteilungswert für die ganze Anlage summiert werden.

⁶ Bei Kontrollmessungen (siehe Kapitel 1) kann darauf verzichtet werden, die Antennen in die jeweils kritische Richtung auszurichten. Bei Kontrollmessungen interessiert der tatsächliche Betriebszustand, nicht der potenziell höchstbelastende.

4.3 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. Der Auftraggeber muss sich in diesem Fall selber vergewissern, ob der Auftragnehmer über eine ausreichende Fachkompetenz und Qualitätssicherung verfügt.

Der Prüfbericht über eine akkreditierte Messung muss das Logo der Schweizerischen Akkreditierungsstelle (SAS) mit der dazugehörigen Akkreditierungsnummer (xy) tragen, nur dann gilt die Messung als akkreditierte Messung.



STS (xy)

Sollten der Auftraggeber einer Abnahmemessung oder die Behörde oder Dritte feststellen, dass eine akkreditierte Messfirma bei der Messung fehlerhaft arbeitet oder unvollständige oder fehlerhafte Messberichte abliefern, kann der Auftraggeber von der Messfirma eine Wiederholung der Messung oder eine Richtigstellung verlangen. Die Messfirma muss solche Vorkommnisse gemäss der Norm ISO/IEC 17025 dokumentieren und der Schweizerischen Akkreditierungsstelle (SAS) bei deren periodischen Kontrollen offenlegen und detailliert begründen.

Im Wiederholungsfall können solche Mängel der SAS unter Beilage einer Kopie des Messberichts gemeldet werden. Solche Rügen dürfen allerdings nur Messungen betreffen, für welche die Messfirma akkreditiert ist, und sie dürfen nur Fehler und Unterlassungen, nicht jedoch Aspekte der Darstellung von Messergebnissen zum Gegenstand haben. Die SAS untersucht derartige Vorkommnisse von Amtes wegen, wird aber bei unbegründetem Vorwurf die Kosten der reklamierenden Partei verrechnen.

Adresse:

Schweizerische Akkreditierungsstelle (SAS), METAS, Lindenweg 50, 3003 Bern-Wabern

4.4 Angaben des Auftraggebers und der Netzbetreiber

Vom **Auftraggeber** der Messung müssen die folgenden Angaben vorhanden sein:

- Standortdatenblatt mit Situationsplan. Im Standortdatenblatt sind alle Sendeantennen aufgeführt, welche zur Anlage gehören, inkl. den bewilligten technischen und betrieblichen Daten.
- Vorgabe, in welchen Räumen und an welchen Messorten die Messung durchgeführt werden soll. Wenn die Abnahmemessung auf behördliche Anordnung erfolgt, ist die zuständige kantonale oder kommunale NIS-Fachstelle für die Festlegung der Messorte zu konsultieren.
- 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:

- Für jede Zelle, die von der Anlage versorgt wird: Trägerfrequenz, Scrambling-Code, und die aktuell eingestellte Sendeleistung (ERP) des primären CPICH.
- Zuordnung der primären CPICH zu den einzelnen Antennen und Polarisationen
- Aktuelle Senderichtung der einzelnen Antennen während der Messung. Diese muss mit der kritischen Senderichtung gemäss Standortdatenblatt übereinstimmen.

Der Netzbetreiber oder – in dessen Auftrag – die Messfirma soll die zuständige kantonale oder kommunale NIS-Fachstelle und die Standortgemeinde frühzeitig über den genauen Zeitpunkt geplanter Abnahmemessungen informieren.

4.5 Ort der Messung

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

Der Verlauf der Feldstärke in Innenräumen kann sehr unterschiedlich sein und relativ kleinräumig infolge von Reflexionen und Stehwellen im Raum schwanken. Bei mehreren UMTS-Kanälen überlagern sich die Stehwellen der verschiedenen Frequenzen im Raum zu einem komplizierten 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. Zu diesem Zweck muss der Raum mit der Messsonde bzw. -antenne abgetastet werden, wobei besondere Sorgfalt auf diejenigen Raumbereiche zu verwenden ist, in denen das Maximum erkennbar ist. Bezüglich der Höhe kann man sich in der Regel auf den Bereich bis zu 1.75 m über dem Fussboden beschränken. Nur in besonderen Situationen, wenn ein Langzeitaufenthalt von Personen in grösserer Höhe möglich ist, ist das Suchvolumen entsprechend auszuweiten.

Aus messtechnischen Gründen darf die Antenne nie näher als 0.5 m zu Wänden, Boden, Decke und Mobiliar geführt werden.

Mit einer Skizze oder Foto soll dokumentiert werden, welche Bereiche des Raumes bei der Maximumsuche abgetastet wurde.

4.6 Zeitpunkt der Messung

Der Zeitpunkt der Messung ist unkritisch. Einzige Voraussetzung ist, dass die primären CPICH während der Messung aktiv sind und mit der vom Netzbetreiber angegebenen Leistung betrieben werden. Bei breitbandigen und spektralen Messungen wird der Beurteilungswert dann am ehesten die wahre UMTS-Feldstärke wiedergeben, wenn während der Messung nur die Steuerkanäle aktiv sind. Wenn während der Messung auch ein oder mehrere Datenkanäle aktiv sind, dann wird die UMTS-Feldstärke mit diesen Methoden eher überschätzt.

4.7 Messprinzipien (breitbandig, spektral, code-selektiv)

Die **breitbandige** Messung (Kapitel 6) dient als orientierende Messung. Es wird mit einer Breitbandsonde gemessen, welche die Strahlung in einem breiten Frequenzbereich erfasst und keine Identifikation der einzelnen Strahlungsanteile erlaubt. Allfällig vorhandene Strahlung von Fremdquellen wird mitgemessen.

Wenn der Beurteilungswert, der sich aus einer breitbandigen Messung ergibt, den Anlagegrenzwert nicht überschreitet, dann gilt der Anlagegrenzwert als eingehalten. Wenn der Beurteilungswert hingegen höher ist als der Anlagegrenzwert, dann bedeutet dies nicht zwingend, dass der Anlagegrenzwert tatsächlich überschritten ist. In diesem Fall muss eine spektrale oder eine code-selektive Messung durchgeführt werden. Mit einer breitbandigen Messung lässt sich somit grundsätzlich nur die Einhaltung des Anlagegrenzwertes nachweisen, nicht aber dessen Überschreitung.

Auch die **spektrale** Messung (Kapitel 7) ist eine orientierende Messung. Im Gegensatz zur breitbandigen Messung werden Fremdsignale, die nicht von UMTS-Sendern stammen, nicht erfasst. Gemessen wird nur die Feldstärke der UMTS-Kanäle und zwar für jeden Kanal einzeln. Diese Messmethode erlaubt damit, UMTS-Signale verschiedener Betreiber zu unterscheiden und zuzuordnen. Sie kann allerdings nicht unterscheiden, von welcher Sendeanlage oder –antenne ein gemessenes UMTS-Signal stammt, da alle Basisstationen eines Betreibers dieselben Trägerfrequenzen verwenden können. Die gemessene Feldstärke je UMTS-Kanal schwankt infolge der variierenden Auslastung der Anlage. Die Hochrechnung ergibt in der Regel eine Überschätzung der maximal möglichen Feldstärke.

Wenn der Beurteilungswert, der sich aus einer spektralen Messung ergibt, den Anlagegrenzwert nicht überschreitet, dann gilt der Anlagegrenzwert als eingehalten. Wenn der Beurteilungswert hingegen höher ist als der Anlagegrenzwert, dann bedeutet dies nicht zwingend, dass der Anlagegrenzwert tatsächlich überschritten ist. In diesem Fall muss eine code-selektive Messung durchgeführt werden. Mit einer spektralen Messung lässt sich somit, gleich wie mit der breitbandigen Messung, grundsätzlich nur die Einhaltung des Anlagegrenzwertes nachweisen, nicht aber dessen Überschreitung.

Die spektrale Messung stellt eine Zwischenstufe zwischen der breitbandigen und der code-selektiven Methode dar. Sie führt am ehesten bei schwacher Auslastung der Anlage und grosser Distanz zu benachbarten UMTS-Anlagen zu vergleichbaren Ergebnissen wie die code-selektive Methode.

Die **code-selektive** Messung (Kapitel 8) ist die Referenzmethode, welche im Zweifelsfall Vorrang vor den beiden einfacheren Methoden hat. Es wird selektiv die zeitlich konstante Feldstärke der primären CPICH der Anlage gemessen. Zu diesem Zweck muss ein Messgerät eingesetzt werden, welches das UMTS-Summensignal decodieren und selektiv den Anteil der einzelnen primären CPICH detektieren kann. Dazu

müssen die Scrambling-Codes der einzelnen CPICH der zu beurteilenden Anlage und deren Trägerfrequenz bekannt sein. Diese Messmethode erlaubt die eindeutige Zuordnung der gemessenen Signale zur jeweiligen Sendeanlage, Sendeantenne und zum Netzbetreiber.

Wenn der Beurteilungswert, der sich aus einer code-selektiven Messung ergibt, den Anlagegrenzwert nicht überschreitet, dann gilt der Anlagegrenzwert als eingehalten. Andernfalls gilt er als überschritten.

Sind noch andere Mobilfunkdienste auf der Anlage vorhanden (z.B. GSM oder Tetra-pol), dann müssen sowohl bei der spektralen als auch der code-selektiven Methode auch deren Strahlungsbeiträge gemessen und mit dem UMTS-Anteil zu einem Beurteilungswert für die ganze Anlage summiert werden (siehe Kapitel 9).

4.8 Messunsicherheit und Kalibration

4.8.1 Allgemeines zur Messunsicherheit

Jede Messung ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Dies hat zur Folge, dass wiederholte Messungen derselben Situation durch verschiedene Messpersonen und mit unterschiedlicher Messausrüstung voneinander abweichende Resultate ergeben.

Die gesamte Unsicherheit des Messresultates setzt sich aus zwei Beiträgen zusammen:

- einer instrumentellen Unsicherheit, bedingt durch Geräte- und Kalibrierungenauigkeiten. Dieser Anteil der Unsicherheit wird im folgenden als „Unsicherheit der Messeinrichtung“ bezeichnet.
- einer methodenbedingten Unsicherheit, im folgenden als „Unsicherheit der Probenahme“ bezeichnet. Hier gehen beispielsweise individuell unterschiedliche Vorgehensweisen verschiedener Messpersonen zum Auffinden des örtlichen Maximums ein. Nicht eingeschlossen wird hingegen die Variabilität, die sich bei Breitband- und spektralen Messungen aus der zeitlich veränderlichen Auslastung der Anlage und – bei der Breitbandmethode – aus dem Einfluss von anlagefremden Funksignalen ergibt.

Statistisch unterscheidet man zwischen der Standardunsicherheit u und der erweiterten Unsicherheit U .

- Die Standardmessunsicherheit entspricht der Standardabweichung der Verteilung der Messgrösse.
- Die erweiterte Messunsicherheit definiert den Bereich, innerhalb dessen die Messgrösse mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt (normalerweise wird eine Wahrscheinlichkeit von 95 % festgelegt).

Die Standardunsicherheit u des Messresultates wird aus der Unsicherheit der Messeinrichtung und der Unsicherheit der Probenahme wie folgt berechnet:

$$u = \sqrt{u_m^2 + u_p^2} \quad (1)$$

Es bedeuten:

- u Standardunsicherheit des Messresultates
- u_m Standardunsicherheit der Messeinrichtung
- u_p Standardunsicherheit der Probenahme

Die erweiterte Messunsicherheit U beträgt:

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

4.8.2 Unsicherheit der Messeinrichtung

Im Idealfall ist die Messeinrichtung mit einem Signal kalibriert, welches bezüglich Frequenz, Intensität, Polarisation und Modulation genau dem zu messenden Mobilfunksignal entspricht. Wenn auch noch die Temperatur während der Kalibration mit der Temperatur bei der Messung übereinstimmt, dann ist die Unsicherheit der Messeinrichtung im Wesentlichen nur durch die Unsicherheit der Kalibration gegeben.

In der Praxis sind die zu messenden Situationen allerdings zu vielfältig und häufig auch zu wenig klar definiert, als dass für jeden Einzelfall eine spezifische Kalibration der Messeinrichtung möglich wäre. Man muss sich bei der Kalibration deshalb auf eine oder wenige ausgewählte Referenzbedingungen beschränken. Beispielsweise werden Breitbandsonden oft nur bei einer einzigen Frequenz und einem bestimmten Pegel kalibriert. Die Empfindlichkeit der Sonde bei anderen Frequenzen wird vom Hersteller für den jeweiligen Sondentyp (nicht für jede Sonde individuell) in Form einer maximalen Abweichung relativ zum Kalibrierpunkt spezifiziert. Ähnliches gilt für den Intensitätsbereich: Hier können Abweichungen vom idealen linearen Verhalten der Sonde auftreten, welche der Hersteller ebenfalls als maximale Abweichung spezifiziert. Diese und weitere nichtideale Eigenschaften der Messeinrichtung erhöhen die Messunsicherheit des Messresultats.

Grundsätzlich ist anzustreben, solche Nichtidealitäten durch Kalibration und anschließende numerische Korrektur zu kompensieren. So kann bei einer frequenzselektiven Messeinrichtung beispielsweise ein Korrekturfaktor bei verschiedenen Frequenzen bestimmt werden. Jeder Messwert wird dann mit dem für die betreffende Frequenz gültigen Korrekturfaktor numerisch korrigiert. Auch in diesem Fall verschwindet die Unsicherheit nicht gänzlich, weil der Korrekturfaktor selbst noch mit einer Unsicherheit behaftet ist und im allgemeinen zwischen zwei Kalibrierpunkten interpoliert werden muss. Diese verbleibende Unsicherheit ist jedoch erheblich kleiner als wenn nur eine Spezifikation für die maximale Abweichung über den gesamten Frequenzbereich zur Verfügung steht. Bei Breitbandsonden ist die beschriebene Korrektur allerdings nur dann möglich, wenn am Messort nur Strahlung eines einzigen Frequenzbandes vorliegt. Ist dies nicht gewährleistet, dann ist zusätzlich der Frequenzgang der Sonde in die Berechnung der Messunsicherheit einzubeziehen.

Die Unsicherheit der Messeinrichtung hängt einerseits davon ab, wie diese kalibriert wurde, andererseits davon, wie die Messeinrichtung und die Kalibrierdaten bei der Messung verwendet werden. So kann beispielsweise der Fall eintreten, dass eine Messeinrichtung zwar für jede Frequenz individuell kalibriert ist, dass diese detaillierten Kalibrierfaktoren bei der Messung jedoch nicht verwendet werden. In diesem Fall muss als Unsicherheitsbeitrag die ganze Bandbreite des Frequenzgangs eingesetzt werden, was einen wesentlich höheren Beitrag ergibt, als wenn die Messdaten mit dem an sich bekannten Kalibrierfaktor korrigiert worden wären.

Die Unsicherheit der Messeinrichtung ist aufgrund der Geräte- und Kalibrierspezifikationen und unter Berücksichtigung der angewendeten Messprozedur vom beauftragten Messlabor zu berechnen und im Messbericht anzugeben. Bei der Berechnung der Unsicherheit der Messeinrichtung sind mindestens die folgenden Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

Breitbandsonden

- Unsicherheit der Kalibration des Messgerätes
- Linearitätsabweichung des Messgerätes
- Frequenzgang des Messgerätes
- Isotropieabweichung des Messgerätes
- Modulationsabhängigkeit des Messgerätes
- Temperaturabhängigkeit des Messgerätes

Bei Breitbandsonden muss darauf geachtet werden, dass der gemessene Wert im spezifizierten Messbereich der Sonde (Pegel und Frequenz) liegt.

Spektral auflösende und code-selektive Messausrüstung

- Unsicherheit der Kalibration des Messgerätes
- Linearitätsabweichung des Messgerätes
- Frequenzgang des Messgerätes
- Modulationsabhängigkeit des Messgerätes (bei spektraler Messung)
- Unsicherheit der Code-Detektion (bei code-selektiver Messung)
- Temperaturabhängigkeit des Messgerätes
- Unsicherheit der Antennenkalibration
- Unsicherheit der Kabelkalibration
- Fehlanpassungen

Beispiele für die Berechnung der Unsicherheit der Messeinrichtung sind in Anhang 1 zusammengestellt.

4.8.3 Unsicherheit der Probenahme

Die Unsicherheit der Probenahme kann durch das messende Labor nicht beliebig verkleinert werden.

Für die Probenahme muss mit einer Standardunsicherheit u_p von $\pm 15\%$ gerechnet werden. Dieser Wert gilt bei sorgfältiger Durchführung der Messung. Er ist bei der Berechnung der gesamten Messunsicherheit als fixer Beitrag einzusetzen.

Bei der Breitband- und der spektralen Messung vergrößern die variable Auslastung der Basisstation und – bei Breitbandmessungen - der Einfluss von Fremdsignalen die Streuung der Messresultate zusätzlich. Diese Einflüsse haben immer eine Überschätzung der UMTS-Feldstärke zur Folge, entziehen sich jedoch weitgehend einer statistischen Behandlung. Sie werden deshalb in der Unsicherheit der Probenahme nicht eingeschlossen.

4.8.4 Anforderung an die Messunsicherheit

Die gesamte erweiterte Messunsicherheit U soll den Wert von $\pm 45\%$ nicht überschreiten. Dies bedeutet, dass die Standardunsicherheit der Messeinrichtung nicht mehr als $\pm 16.7\%$, die erweiterte Unsicherheit der Messeinrichtung nicht mehr als $\pm 33.5\%$ betragen darf. Messungen sollen nur akzeptiert werden, wenn diese Anforderung erfüllt ist.

In Tabelle 1 sind die zulässigen Unsicherheiten zusammengestellt. Für die Unsicherheit der Probenahme ist ein konstanter Wert zu verwenden; die Unsicherheit der Messeinrichtung ist durch das Messlabor für seine Messausrüstung zu berechnen.

	Standardunsicherheit	Erweiterte Unsicherheit
Unsicherheit der Messeinrichtung	$u_m \leq \pm 16.7 \%$	$U_m \leq \pm 33.5 \%$
Unsicherheit der Probenahme	$u_p = \pm 15 \%$	$U_p = \pm 30 \%$
Gesamte Messunsicherheit	$u \leq \pm 22.5 \%$	$U \leq \pm 45 \%$

Tabelle 1: Anforderungen an die Messunsicherheit.

4.8.5 Kalibration

Die Messgeräte, Antennen und Kabel sollen im Abstand von 1 Jahr bei einer anerkannten Kalibrierstelle kalibriert werden.

Die Kalibrierzertifikate müssen vorliegen und dem Auftraggeber auf Wunsch vorgelegt werden.

4.9 Messbericht

- Der Messbericht soll so detailliert sein, dass alle Schritte der Messung und der Weiterverarbeitung der Messwerte nachvollzogen werden können. Er muss mindestens die folgenden Angaben enthalten:
- Bezug auf das Standortdatenblatt
- Angaben des Auftraggebers
- Angaben der Netzbetreiber, insbesondere die Angaben über den Betrieb der Anlage während der Messung (Sendeleistungen, Senderichtungen)
- Zeitpunkt der Messung
- Anwesende Personen
- Angaben zu den Messorten und zu den Raumbereichen, in denen das Maximum gesucht wurde (Skizze, Fotos, Begründung)
- Angaben über die verwendeten Messgeräte
- Angaben über die gesamte Messunsicherheit
- Messergebnisse und Beurteilungswerte (detailliert, mit Berechnung der Beurteilungswerte)
- Weitere Randbedingungen wie Wetter, besondere, ev. temporäre bauliche Verhältnisse
- u.a.

Für den schnellen Leser soll jedem Messbericht eine unterschriebene⁷ und datierte Kurzzusammenfassung vorangestellt werden. Diese Zusammenfassung soll für jeden Messort den ermittelten Beurteilungswert für den massgebenden Betriebszustand und den zugehörigen Grenzwert enthalten.

⁷ Diese Unterschrift gilt für den ganzen Messbericht.

5 Bestimmung der Hochrechnungsfaktoren

Bevor die Messung durchgeführt wird, empfiehlt es sich, die für die Berechnung des Beurteilungswertes benötigten Hochrechnungsfaktoren zu bestimmen. Dazu werden die Angaben der Netzbetreiber über die aktuelle Sendeleistung der primären CPICH und die gemäss Standortdatenblatt bewilligten maximalen UMTS-Sendeleistungen benötigt.

Grundsätzlich geht man bei der Hochrechnung von der aktuellen Sendeleistung der primären CPICH aus. Das UMTS-Signal enthält zwar neben dem primären CPICH noch weitere Steuersignale, welche immer vorhanden sind und grundsätzlich bei der Ermittlung des Hochrechnungsfaktors auch berücksichtigt werden dürften. Derzeit ist allerdings noch unklar, wie diese Zusatzsignale bei den schweizerischen UMTS-Netzen konfiguriert werden. Bis entsprechende Praxiserfahrungen vorliegen, soll die Hochrechnung nur ausgehend vom primären CPICH erfolgen. Bei breitbandigen und spektralen Messungen wird im Sinne einer worst case-Betrachtung angenommen, dass nur gerade die primären CPICH aktiv und – im Fall der Breitbandmessungen – keine Fremdsignale vorhanden sind.

Das UMTS-Signal, das eine bestimmte Zelle versorgt, ist durch seine Trägerfrequenz und durch den Scrambling-Code eindeutig definiert. Anhand der Trägerfrequenz lässt sich feststellen, zu welchem Netz (Betreiber) ein Signal gehört. Der Netzbetreiber muss für jede Zelle, die von der zu messenden Basisstation versorgt wird, die aktuell eingestellte Sendeleistung des primären CPICH liefern.

Im Standortdatenblatt sind die bewilligten Sendeleistungen nicht notwendigerweise für jede Zelle einzeln aufgeführt. Insbesondere wenn ein Netzbetreiber über die gleiche Antenne mehrere Zellen versorgt, ist im Standortdatenblatt die Sendeleistung nur pro Antenne, nicht jedoch für die einzelnen Zellen individuell ersichtlich. Anders ist es, wenn zwei Betreiber eine Antenne gemeinsam nutzen. In diesem Fall ist im Standortdatenblatt in der Regel die jedem Netzbetreiber zustehende Sendeleistung separat aufgeführt.

Für jede Antenne j der Anlage, über die UMTS abgestrahlt wird, wird ein Hochrechnungsfaktor K_j nach der folgenden Formel berechnet. Diese Berechnung soll für jedes UMTS-Netz, das auf der Anlage vertreten ist, separat durchgeführt werden:

$$K_j = \sqrt{\frac{P_{j,bew}}{\sum_i P_{i,j}}} \quad (3)$$

Dabei bedeuten:

- j Index für die Antenne
- i Index für die Zelle
- K_j Hochrechnungsfaktor für die Antenne j
- $P_{i,j}$ **Aktuelle** Sendeleistung (ERP) des primären CPICH der Zelle i , abgestrahlt über Antenne j , in W

$P_{j, bew}$ **Bewilligte** UMTS-Sendeleistung (ERP) für Antenne j , in W (Summe aller Steuer- und Datenkanäle). Für den Fall, dass zwei Netzbetreiber eine Antenne gemeinsam nutzen, ist $P_{j, bew}$ nur die für den betreffenden Betreiber bewilligte UMTS-Sendeleistung, nicht die bewilligte Leistung für beide Betreiber zusammen.

Die Summierung erfolgt über alle Zellen i des betreffenden Netzes, die über die Antenne j versorgt werden.

Die aktuellen Sendeleistungen $P_{i, j}$ sind den Angaben des jeweiligen Netzbetreibers zu entnehmen, die pro Antenne und Netzbetreiber bewilligten UMTS-Sendeleistungen $P_{j, bew}$ finden sich im Standortdatenblatt.

Typische Werte des Hochrechnungsfaktors K_j liegen zwischen 3 und 8.

Beispiele für die Berechnung der Hochrechnungsfaktoren finden sich in Anhang 2.

6 Breitbandige Messung

6.1 Messmethode

Mit einer isotropen Breitbandsonde wird die elektrische Feldstärke an einem Punkt im Raum in einem relativ breiten Frequenzbereich integral gemessen. Das Ergebnis ist die Summenfeldstärke am gegebenen Punkt, wobei alle Frequenzen im spezifizierten Frequenzbereich der Sonde und alle Polarisierungen 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. Dabei muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass die zeitlichen Schwankungen der NIS-Belastung, welche sich aus der variablen Auslastung der Sendeanlage und infolge von Fremdstrahlung ergeben, während des Ab tastens nicht fälschlicherweise als örtliche Schwankungen interpretiert werden. Das Ab tasten 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} .

6.2 Messeinrichtung

Als Messgeräte können isotrope Breitbandsonden verwendet werden, deren spezifizierter Frequenzbereich das UMTS-Frequenzband einschliesst. Die gemessenen Feldstärken müssen innerhalb des spezifizierten Pegelbereichs liegen und die Messunsicherheit der Messeinrichtung darf die in Abschnitt 4.8.4 festgelegte zulässige Messunsicherheit nicht überschreiten.

6.3 Berechnung des Beurteilungswertes

Da grundsätzlich nicht bekannt ist, welche Antenne den dominierenden Beitrag an die gesamte UMTS-Belastung am Messort liefert, wird als Hochrechnungsfaktor K der grösste der gemäss Kapitel 5 berechneten Faktoren K_j eingesetzt.

Der Beurteilungswert E_B wird nach der folgenden Formel berechnet:

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

Dabei bedeuten:

E_B Beurteilungswert, in V/m

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

K Hochrechnungsfaktor für die Berechnung des Beurteilungswertes

Beispiele für die Berechnung des Beurteilungswerts finden sich in Anhang 2.

7 Spektrale Messung

7.1 Messmethode

Mit einer Messantenne und einem Spektrumanalysator oder einem Messempfänger wird frequenzselektiv die elektrische Feldstärke der einzelnen UMTS-Kanäle gemessen. Ein UMTS-Kanal ist durch eine bestimmte Trägerfrequenz definiert. Da die Trägerfrequenzen den Betreibern eindeutig zugeordnet sind, erlaubt eine spektrale Messung die Identifikation und Zuordnung der UMTS-Signale der einzelnen Netze. Nicht unterscheiden kann diese Methode hingegen, von welcher Anlage und von welcher Antenne ein UMTS-Signal stammt, da die UMTS-Netze als Gleichwellennetze betrieben werden.

Innerhalb des Messvolumens muss für jede von der Anlage abgestrahlte UMTS-Trägerfrequenz f das Feldstärke-Maximum gesucht werden, und zwar in Bezug auf:

- Stehwellen im Raum
- Polarisierung der Messantenne
- Ausrichtung der Messantenne in Azimut und Elevation

Zu diesem Zweck muss das ganze Messvolumen mit einer handgeführten Messantenne abgetastet werden, wobei gleichzeitig die Vorzugsrichtung und die Polarisationsrichtung der Messantenne variiert werden. Dabei muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass die zeitlichen Schwankungen der NIS-Belastung, welche sich aus der variablen Auslastung der Sendeanlage ergeben, während des Abtastens nicht fälschlicherweise als örtliche Schwankungen interpretiert werden.

Als Messvolumen gilt bei Innenräumen mit einer Grundfläche bis zu 25 m² der ganze Innenraum in einer Höhe zwischen 0.5 und 1.75 m über den Fussboden. Bei größeren Räumen kann man die Maximumsuche und die Summierung einzelner UMTS-Signale auf ein Volumen mit einer Grundfläche von 25 m² in Höhen zwischen 0.5 und 1.75 m über dem Fussboden beschränken. Dieses Volumen soll im Raum so gelegt werden, dass der resultierende Beurteilungswert maximal wird. Bei der Absuche dieses Volumens soll die Antenne immer einen minimalen Abstand von 50 cm zu Wänden, Boden, Decke und Mobiliar einhalten. Während des ganzen Suchvorgangs wird das Spektrum oder der UMTS-Pegel mit der Maximum Hold-Funktion des Messsystems kontinuierlich erfasst.

Zum Auffinden des örtlichen Maximums sind zwei Vorgehensweisen möglich:

Variante 1:

Der Messwert wird mit dem Messsystem während der Messung laufend beobachtet (z.B. durch gleichzeitige Anzeige des momentan gemessenen Werts und des Maximum Hold-Werts). Der Ort im Raum, die Richtung und die Polarisierung der Antenne werden solange verändert, bis das Feldstärke-Maximum gefunden und registriert ist. Die räumliche Suche wird bei dieser Variante in der Regel für jede zu messenden UMTS-Frequenz separat durchgeführt.

Variante 2:

Der Raum wird systematisch mit unterschiedlichen Polarisierungen und Antennenrichtungen langsam abgetastet, ohne dass die Anzeige während des Abtastens beobachtet wird. Verschiedene UMTS-Frequenzen können in **einem** Durchgang simultan

erfasst werden. Das Messsystem registriert während der Abtastung mit Hilfe der Maximum Hold-Funktion die höchsten vorkommenden Werte.

Erfahrungsgemäss ergeben die beiden Vorgehensweisen bei sorgfältiger Durchführung die gleichen Resultate. Bei beiden Varianten muss die Bewegung der Antenne, bezogen auf die Messgeschwindigkeit des Messsystems, langsam genug erfolgen.

Für jede UMTS-Frequenz f wird der höchste gemessene Wert $E_{f, max}$ abgelesen. Die Messwerte bei allen Frequenzen desselben Netzbetreibers werden in die Auswerteformel (6) eingesetzt.

7.2 Messeinrichtung

7.2.1 Antennen

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 kalibriert sein.

Folgende Antennentypen sind geeignet:

- Kleine Log Per Antennen (normalerweise mit einem Frequenzbereich ab ca. 500 MHz). Log Per Antennen haben den Vorteil, dass sie aufgrund ihrer Richtwirkung weniger empfindlich auf die Messperson hinter der Antenne reagieren. Allerdings muss gerade wegen ihrer Richtwirkung besonders gut darauf geachtet werden, dass die Antenne überall im Messvolumen in jede Richtung und Polarisierung orientiert wird.
- Kleine bikonische Antennen (normalerweise mit einem Frequenzbereich ab ca. 500 MHz)
- Abgestimmte Dipolantennen

Bikonische und abgestimmte Dipolantennen haben in radialer Ebene keine Richtwirkung. Dadurch sind sie empfindlicher auf den Einfluss von Personen in ihrer Nähe. Die Antenne muss deshalb mit einem nichtmetallischen Halter in genügendem Abstand von der messenden Person entfernt gehalten werden.

7.2.2 Messgeräte

Für die spektrale Messung kann ein Spektrumanalysator oder ein Messempfänger verwendet werden. Das Messsystem soll über eine Maximum Hold Funktion verfügen. Die Geräte müssen kalibriert und ihre Messunsicherheit muss bekannt sein.

Da der Anlagegrenzwert gemäss Anhang 1 Ziffer 64 NISV für den **Effektivwert** der elektrischen Feldstärke festgelegt ist, gilt als Referenzverfahren die Messung mit einem „true RMS“-Detektor und einer Messbandbreite von 5 MHz, entsprechend der Bandbreite des UMTS-Signals. Andere Detektoren sollen nicht eingesetzt werden. Messungen mit einer kleineren Bandbreite als 5 MHz sind zulässig, sofern das Gerät mit einem normgerechten UMTS-Signal kalibriert ist.

Moderne Messgeräte verfügen zum Teil über eine speziell für UMTS-Signale zugeschnittene Detektion, bei der automatisch der integrale Pegel eines ganzen UMTS-Kanals mit einem true RMS-Detektor bestimmt wird. Man muss sich in diesem Fall nicht um die Messbandbreite kümmern und der Messwert muss nicht aus einem Spektrum herausgelesen werden, sondern wird direkt numerisch angezeigt.

7.2.3 Kabel

Das Kabel zwischen der Antenne und dem Messgerät soll kalibriert sein.

Erfahrungsgemäss besteht im praktischen Einsatz ein erhebliches Risiko, dass das Kabel mechanisch überbeansprucht wird und deshalb – unbemerkt – die Kalibrierwerte nicht mehr zutreffen. Es ist daher zu empfehlen, das Kabel vor und nach jedem Messauftrag kurz zu überprüfen. Dazu kann zum Beispiel der Tracking-Generator des Messgerätes verwendet werden.

7.3 Berechnung des Beurteilungswertes

Die nachstehend beschriebene Hochrechnung wird für jedes UMTS-Netz, das auf der zu beurteilenden Anlage vertreten ist, separat durchgeführt. Dabei spielt es keine Rolle, ob jeder Netzbetreiber über eigene UMTS-Antennen verfügt oder ob solche gemeinsam genutzt werden. Für jedes UMTS-Netz resultiert eine auf die bewilligte Sendeleistung hochgerechnete UMTS-Feldstärke E_h . Diese Teilergebnisse werden am Schluss gemäss Gleichung (6) zum Beurteilungswert der Anlage zusammengefasst.

Da grundsätzlich nicht bekannt ist, welche Antenne den dominierenden Anteil an die UMTS-Belastung der betreffenden Trägerfrequenz am Messort beiträgt, wird als Hochrechnungsfaktor K für die Berechnung des Beurteilungswertes der höchste der gemäss Kapitel 5 für das betreffende Netz berechneten Faktoren K_j eingesetzt.

Die registrierten Messwerte $E_{f,max}$ aller UMTS-Frequenzen des betreffenden Netzes werden wie folgt zusammengefasst und hochgerechnet:

$$E_h = K \cdot \sqrt{\sum_f E_{f,max}^2} \quad (5)$$

Dabei bedeuten:

f UMTS-Trägerfrequenz

E_h UMTS-Feldstärke des betreffenden UMTS-Netzes in V/m, hochgerechnet auf die bewilligte Sendeleistung

$E_{f,max}$ Maximale im Messvolumen gemessene elektrische Feldstärke der UMTS-Frequenz f , in V/m

Die Summierung erfolgt über alle UMTS-Frequenzen f des betreffenden Netzes.

Wird die Anlage durch einen einzigen UMTS-Betreiber genutzt, dann ist die in Gleichung (5) berechnete Feldstärke E_h gleich dem Beurteilungswert E_B .

Wird die Anlage von mehreren UMTS-Betreibern genutzt, dann wird für jedes Netz eine hochgerechnete Feldstärke E_h ermittelt. Der Beurteilungswert ergibt sich aus diesen Beiträgen wie folgt:

$$E_B = \sqrt{E_{\text{Netz } 1, h}^2 + E_{\text{Netz } 2, h}^2 + \dots} \quad (6)$$

Beispiele für die Berechnung des Beurteilungswerts finden sich in Anhang 2.

8 Code-selektive Messung

8.1 Messmethode

Mit einer Messantenne und einem Messgerät, welches UMTS-Signale decodieren kann, wird selektiv die elektrische Feldstärke der einzelnen primären CPICH gemessen. Ein einzelner CPICH ist durch seinen Scrambling-Code und die Trägerfrequenz eindeutig charakterisiert.

Innerhalb des Messvolumens muss für jeden von der Anlage abgestrahlten primären CPICH das Feldstärke-Maximum gesucht werden, und zwar in Bezug auf:

- Stehwellen im Raum
- Polarisierung der Messantenne
- Ausrichtung der Messantenne in Azimut und Elevation

Zu diesem Zweck muss das ganze Messvolumen mit einer handgeführten Messantenne abgetastet werden, wobei gleichzeitig die Vorzugsrichtung und die Polarisationsrichtung der Messantenne variiert werden. Bei dieser Absuche des Volumens soll die Antenne immer einen minimalen Abstand von 50 cm zu Wänden, Boden, Decke und Mobiliar einhalten. Während des ganzen Suchvorgangs werden die Pegel der einzelnen primären CPICH kontinuierlich erfasst. Es ist von Vorteil, wenn das Messsystem über eine Maximum Hold-Funktion verfügt.

Als Messvolumen gilt bei Innenräumen mit einer Grundfläche bis zu 25 m² der ganze Innenraum in einer Höhe zwischen 0.5 und 1.75 m über den Fussboden. Bei grösseren Räumen kann man die Maximumsuche und die Summierung einzelner UMTS-Signale auf ein Volumen mit einer Grundfläche von 25 m² in Höhen zwischen 0.5 und 1.75 m über dem Fussboden beschränken. Dieses Volumen soll im Raum so gelegt werden, dass der resultierende Beurteilungswert maximal wird.

Zum Auffinden des örtlichen Maximums sind zwei Vorgehensweisen möglich:

Variante 1:

Der Messwert wird mit dem Messsystem während der Messung laufend beobachtet (z.B. durch gleichzeitige Anzeige des momentan gemessenen Werts und des Maximum Hold-Werts). Der Ort im Raum, die Richtung und die Polarisierung der Antenne werden solange verändert, bis das Feldstärke-Maximum gefunden und registriert ist. Die räumliche Suche wird bei dieser Variante in der Regel für jeden beteiligten CPICH, welcher anhand des zugehörigen Scrambling-Codes decodiert wird, separat durchgeführt.

Variante 2:

Der Raum wird systematisch mit unterschiedlichen Polarisierungen und Antennenrichtungen langsam abgetastet, ohne dass die Messwerte während des Abtastens beobachtet werden. Alle interessierenden CPICH können in **einem** Durchgang simultan erfasst werden. Das Messsystem muss über eine Maximum Hold-Funktion verfügen, mit der während der Abtastung die höchsten vorkommenden Werte registriert werden.

Bei sorgfältiger Durchführung ergeben die beiden Vorgehensweisen die gleichen Resultate. Bei beiden Varianten muss die Bewegung der Antenne, bezogen auf die Messgeschwindigkeit des Messsystems, langsam genug erfolgen.

Für jeden primären CPICH_{*i,j*}, der von der Anlage abgestrahlt wird, wird der höchste gemessene Wert $E_{i,j,max}$ abgelesen. Der Index *j* bezeichnet dabei die Antenne, von der der CPICH abgestrahlt wird, der Index *i* die Zelle. Diese Messwerte werden nach Antenne und Netzzugehörigkeit gruppiert und in die Auswerteformel (7) eingesetzt.

8.2 Messeinrichtung

8.2.1 Antennen

Es gelten die gleichen Anforderungen wie bei der spektralen Messung (siehe 7.2.1).

8.2.2 Messgeräte

Für die code-selektive Messung werden Spektrumanalysatoren, Messempfänger oder UMTS-Versorgungsmessgeräte (so genannte drive tester) eingesetzt, welche für die Decodierung und Absolutmessung des Signalpegels des primären CPICH spezifiziert sind. Die Messsysteme müssen für Effektivwertmessung kalibriert sein und über eine maximum hold Funktion verfügen. Ihre Messunsicherheit muss bekannt sein.

Komfortable Geräte erlauben die gleichzeitige Messung mehrerer CPICH, während bei einfacheren Geräten ein CPICH nach dem anderen eingestellt und gemessen werden muss. Es können sowohl Geräte eingesetzt werden, welche den Scrambling-Code der messbaren CPICH selbständig erkennen als auch solche, bei denen dieser Code manuell eingegeben wird.

8.2.3 Kabel

Es gelten die gleichen Anforderungen wie bei der spektralen Messung (siehe 7.2.3).

8.3 Berechnung des Beurteilungswertes

Die nachstehend beschriebene Hochrechnung wird für jedes UMTS-Netz, das auf der zu beurteilenden Anlage vertreten ist, separat durchgeführt. Dabei spielt es keine Rolle, ob jeder Netzbetreiber über eigene UMTS-Antennen verfügt oder ob solche gemeinsam genutzt werden. Für jedes UMTS-Netz resultiert eine auf die bewilligte Sendeleistung hochgerechnete UMTS-Feldstärke E_h . Diese Teilergebnisse werden am Schluss gemäss Gleichung (9) zum Beurteilungswert der Anlage zusammengefasst.

Zuerst werden die Messwerte aller primären CPICH des betreffenden Netzes, die von der gleichen Antenne abgestrahlt werden, summiert und auf den massgebenden Betriebszustand hochgerechnet:

$$E_{j,h} = K_j \cdot \sqrt{\sum_i E_{i,j,max}^2} \quad (7)$$

Dabei bedeuten:

j Index für die Antenne

i Index für die Zelle

$E_{j, h}$	Hochgerechneter Messwert für Antenne j , in V/m
$E_{i, j, max}$	Maximale im Messvolumen gemessene elektrische Feldstärke des CPICH von Zelle i , abgestrahlt von Antenne j , in V/m
K_j	Hochrechnungsfaktor für Antenne j und das betreffende Netz gemäss Kapitel 5

Die Summierung erfolgt über alle Zellen i des betreffenden Netzes, die von der Antenne j versorgt werden.

Die Zwischenergebnisse nach Gleichung (7) werden wie folgt zusammengefasst:

$$E_h = \sqrt{\sum_{j=1}^n E_{j, h}^2} \quad (8)$$

Dabei bedeuten:

E_h	UMTS-Feldstärke des betreffenden UMTS-Netzes, in V/m, hochgerechnet auf die bewilligte Sendeleistung
$E_{j, h}$	Hochgerechneter Messwert für Antenne j , in V/m
n	Anzahl Antennen, die UMTS Signale des betreffenden Netzes abstrahlen.

Wird die Anlage durch einen einzigen UMTS-Betreiber genutzt, dann ist die in Gleichung (8) berechnete Feldstärke E_h gleich dem Beurteilungswert E_B .

Wird die Anlage von mehreren UMTS-Betreibern genutzt, dann wird für jedes Netz eine hochgerechnete Feldstärke E_h ermittelt. Der Beurteilungswert ergibt sich aus diesen Beiträgen wie folgt:

$$E_B = \sqrt{E_{Netz 1, h}^2 + E_{Netz 2, h}^2 + \dots} \quad (9)$$

Beispiele für die Berechnung des Beurteilungswerts finden sich in Anhang 2.

8.4 Schwache Signale

Unterschreitet der Pegel eines primären CPICH eine untere Limite, dann kann das UMTS-Signal nicht mehr decodiert werden und eine code-selektive Messung dieses CPICH ist nicht möglich. Ein derartiger CPICH darf bei der Summierung gemäss Gleichung (7) vernachlässigt werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Es muss sichergestellt sein, dass weder auf der Sende- noch auf der Empfangsseite technische Störungen vorliegen, welche eine Decodierung verunmöglichen.
- Es muss aufgrund der Senderichtung, Topografie, Bebauung etc. plausibel sein, dass der besagte primäre CPICH mindestens 10 dB schwächer ist als der stärkste primäre CPICH der Anlage.

9 Abnahmemessung bei kombinierten UMTS/GSM-Anlagen

Viele Mobilfunkanlagen sind sowohl mit UMTS- als auch mit GSM-Antennen bestückt. Bei einer Abnahmemessung muss in diesem Fall sowohl die UMTS- als auch die GSM-Strahlung - gemessen und daraus der Beurteilungswert für die gesamte Anlage berechnet werden.

Grundsätzlich misst man die GSM-Strahlung nach der Messempfehlung des BUWAL/METAS „Mobilfunk-Basisstationen (GSM) – Messempfehlung“⁸ - nachfolgend GSM-Messempfehlung genannt -, die UMTS-Strahlung nach der hier vorliegenden Messempfehlung für UMTS.

Man erhält einen Beurteilungswert für GSM $E_{B,GSM}$ und einen Beurteilungswert für UMTS $E_{B,UMTS}$ und berechnet daraus den Beurteilungswert E_B für die gesamte Anlage nach folgender Formel:

$$E_B = \sqrt{E_{B,GSM}^2 + E_{B,UMTS}^2} \quad (10)$$

Dieses Verfahren ist allerdings bei Breitbandmessungen nicht anwendbar, da dort UMTS- und GSM-Strahlung gesamthaft gemessen und nicht separiert werden können.

In diesem Fall bestimmt man nach der GSM-Messempfehlung, Kapitel 5.3, den Hochrechnungsfaktor für GSM K_{GSM} und nach der vorliegenden UMTS-Messempfehlung, Kapitel 5, den Hochrechnungsfaktor für UMTS K_{UMTS} . Da grundsätzlich nicht bekannt ist, ob am Messort die UMTS- oder die GSM-Strahlung dominiert, wird als Hochrechnungsfaktor K für die Berechnung des Beurteilungswertes E_B der höhere der beiden Hochrechnungsfaktoren K_{GSM} und K_{UMTS} eingesetzt.

Der Beurteilungswert E_B wird nach folgender Formel berechnet:

$$E_B = E_{max} \cdot K \quad (11)$$

Dabei bedeuten:

E_B Beurteilungswert, in V/m

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

K Hochrechnungsfaktor für die Berechnung des Beurteilungswertes

Beispiele für die Berechnung des Beurteilungswertes für kombinierte UMTS/GSM-Anlagen finden sich in Anhang 3.

⁸ BUWAL/METAS: Mobilfunk-Basisstationen (GSM). Messempfehlung. Vollzug Umwelt, Bern, 2002

Anhang 1 Beispiele zur Berechnung der Messunsicherheit

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.

In der Metrologie werden die Begriffe **Standardmessunsicherheit** und **erweiterte Messunsicherheit** verwendet.

- Die Standardmessunsicherheit entspricht der Standardabweichung der Verteilung der Messgrösse.
- Die erweiterte Messunsicherheit definiert den Bereich, innerhalb dessen die Messgrösse mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt (normalerweise wird eine Wahrscheinlichkeit von 95 % festgelegt.) Bei einer normalverteilten (gaussverteilten) Messgrösse ist die erweiterte Messunsicherheit für einen Vertrauensbereich von 95 % 1.96 mal grösser als die Standardmessunsicherheit. In der Metrologie wird dieser Faktor normalerweise auf den Wert 2 aufgerundet.

Zur Berechnung der Unsicherheit des Messresultats werden alle Einflussfaktoren aufgeführt, die das Messresultat beeinflussen können. Für jeden Einflussfaktor wird die zugehörige Unsicherheit abgeschätzt. Zusätzlich zur Unsicherheit der Messeinrichtung ist ein fixer Beitrag von $\pm 15\%$ (Standardunsicherheit) für die Unsicherheit der Probenahme einzusetzen.

Aus der angegebenen Unsicherheit des Einflussfaktors wird mit einem für die angenommene statistische Verteilung spezifischen Divisor die Standardunsicherheit berechnet. Die so normierten Unsicherheitsbeiträge werden dann wie folgt addiert:

$$u = \sqrt{\sum_q u_q^2} = \sqrt{\sum_q \left(\frac{U_q}{k_q} \right)^2} \quad (12)$$

$$U = 2 \cdot u \quad (13)$$

Dabei bedeuten:

k_q	Divisor für den Einflussfaktor q zur Reduktion auf die Standardunsicherheit
u	Standardunsicherheit der Messung, in %
u_q	Standardunsicherheit des Einflussfaktors q , in %
U	Erweiterte Unsicherheit der Messung, in %
U_q	Spezifizierter/geschätzter Unsicherheitsbeitrag des Einflussfaktors q , in %

Der im „IEC Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ vorgesehene Sensitivitätsfaktor wird als 1 angenommen und erscheint deshalb in den nachfolgenden Beispielen nicht.

Für die Wahl des Divisors k_q zur Umrechnung auf die Standardunsicherheit gelten folgende Regeln:

- Unsicherheitsangaben, die aus einem Kalibrierzertifikat stammen, sind normalerweise als 95 % Konfidenz-Werte einer Normalverteilung zu verstehen. Der Divisor für die Berechnung der Standardunsicherheit beträgt in diesem Fall
 $k = 2$.
- Unsicherheitsangaben in den Spezifikationen des Datenblattes sind als Maximalwerte einer Rechteckverteilung zu betrachten. Der Divisor für die Berechnung der Standardunsicherheit beträgt
 $k = \sqrt{3}$.
- Für die Unsicherheit infolge von Fehlanpassungen muss eine U-förmige Verteilung angenommen werden. Der Divisor für die Berechnung der Standardunsicherheit beträgt
 $k = \sqrt{2}$.

Wenn ein Einflussfaktor bei den gegebenen Messbedingungen quantitativ bekannt ist, dann kann der Messwert mit diesem bekannten Faktor korrigiert werden. Die Unsicherheit bezüglich dieser Einflussgrösse verschwindet dann zwar nicht völlig, reduziert sich jedoch auf die Unsicherheit der Korrektur.

- Generell wird man den Messwert mit dem bei der Absolutkalibration ermittelten Kalibrierfaktor korrigieren.
- Liegt eine Kalibration bei den zu messenden UMTS-Frequenzen vor, dann erübrigt sich die Berücksichtigung des Frequenzgangs. Allenfalls ist noch ein kleiner Unsicherheitsbeitrag mitzuführen, wenn zwischen zwei Kalibrierfrequenzen interpoliert werden muss. Diese Korrektur ist bei einer spektral auflösenden oder Code-selektiven Messeinrichtung grundsätzlich immer möglich. Bei breitbandigen Messgeräten hingegen ist insbesondere bei kombinierten GSM/UMTS-Anlagen nicht bekannt, welche Signale wie stark sind. Daher ist in diesem Fall eine Korrektur des Frequenzgangs nicht möglich. Anders ist es, wenn sichergestellt ist, dass von der zu messenden Anlage nur UMTS abgestrahlt wird. In diesem Fall ist eine Korrektur für den Frequenzgang auch bei Messungen mit einer Breitbandsonde zulässig, sofern die Sonde im UMTS-Frequenzband kalibriert wurde.
- Falls eine Kalibration bei verschiedenen Pegeln vorliegt, lassen sich Abweichungen von der Linearität numerisch korrigieren. Auch hier verbleibt als Unsicherheit nur noch die Unsicherheit des jeweiligen Korrekturwertes.

Fehlanpassungen

Zwischen der Antenne, dem Kabel und dem Messgerät kommt es zu Fehlanpassungen. Die damit verbundenen Unsicherheitsbeiträge U_F können für jede Stosstelle aufgrund von Reflexionsmessungen nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$U_F = |r_{Last}| \cdot |r_{Quelle}| \quad (14)$$

Dabei bedeuten:

$|r_{Last}|$ Reflexionsfaktor Last

$|r_{Quelle}|$ Reflexionsfaktor Quelle

U_F Unsicherheit infolge von Fehlanpassung

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

Die Angaben für die Fehlanpassung (VSWR), die Rückflusdämpfung und den Reflexionsfaktor sind gleichwertig und können ineinander umgerechnet werden.

$$\text{Reflexionsfaktor } r = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (15)$$

$$\text{Rückflusdämpfung (in dB)} = 20 * \log\left(\frac{1}{r}\right) \quad (16)$$

Die Angaben für die Fehlanpassung (VSWR) können aus dem Kalibrierbericht oder aus der Spezifikation entnommen werden.

Nachstehend sind drei Beispiele für die Berechnung der erweiterten Messunsicherheit ausgeführt. Es wird angenommen, dass auf der zu messenden Anlage sowohl UMTS als auch GSM implementiert ist.

Beispiel 1.1: Kalibrierte Breitbandsonde

Beispiel 1.2 : Spektral auflösende Messeinrichtung mit gemeinsamer Kalibration von Antenne und Kabel

Beispiel 1.3 : Code-selektive Messeinrichtung mit unabhängiger Kalibration von Antenne und Kabel

Beispiel 1.1: Kalibrierte Breitbandsonde

Die Sonde im vorliegenden Beispiel hat folgende allgemeine Spezifikationen:

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

Die Breitbandsonde wurde durch ein Kalibrierlabor kalibriert. Die Kalibrierung umfasste drei Messungen, welche im Kalibrierbericht dokumentiert sind:

- Eine Absolutkalibration bei einer Feldstärke von 27.5 V/m und einer Frequenz von 27.12 MHz, mit einer Unsicherheit von ± 1.9 V/m, entsprechend ± 6.9 %. Der resultierende Kalibrierfaktor wird im Messgerät gespeichert, und jeder Messwert wird automatisch mit diesem Kalibrierfaktor korrigiert. Auf diesen Kalibrierpunkt beziehen sich die Angaben über die Abweichung von der Linearität und über den Frequenzgang.
- Eine Messung der Abweichung von der Linearität, gemessen bei der fixen Frequenz von 27.12 MHz. Es handelt sich um eine Relativmessung bei verschiedenen Pegeln, bezogen auf den Referenzpegel von 27.5 V/m. Die vorliegende Sonde wurde bei 0.8 V/m, 2 V/m und 10 V/m (etc.) kalibriert, pro Pegel mit spezifizierter Unsicherheit.
- Eine Messung des Frequenzgangs bei einem Pegel von 27.5 V/m. Es handelt sich um eine Relativmessung bei verschiedenen Frequenzen, bezogen auf die Referenzfrequenz von 27.12 MHz. Die vorliegende Sonde wurde bei den Frequenzpunkten 800 MHz, 900 MHz, 1 GHz, 1.2 GHz, 1.4 GHz, 1.6 GHz, 1.8 GHz, 2.0 GHz, 2.2 GHz, 2.4 GHz etc kalibriert, mit einer Unsicherheit von ± 3.6 V/m bis 1 GHz, ± 3.8 V/m zwischen 1.2 GHz und 2 GHz und ± 4 V/m ab 2 GHz.

Die nachfolgende Berechnung der Messunsicherheit gilt für einen erwarteten Messwert von 1 V/m und für Frequenzen in den Bereichen von 800 – 1000 MHz, 1700 MHz – 1900 MHz und 2100 MHz – 2200 MHz. Da eine Breitbandsonde nicht zwischen den Signalen im GSM und im UMTS Frequenzbereich unterscheidet, werden für die Berechnung der Messunsicherheit im vorliegenden Fall alle drei Frequenzbänder berücksichtigt.

Die Messunsicherheit setzt sich aus folgenden Beiträgen zusammen:

- **Unsicherheit der Absolutkalibration**

Jeder gemessene Wert wird automatisch mit dem Kalibrierfaktor gemäss Kalibrierzertifikat korrigiert. Der Kalibrierfaktor selbst ist mit einer Unsicherheit von ± 6.9 % behaftet. Da diese Angabe vom Kalibrierlabor stammt, wird eine Normalverteilung angenommen.

- **Linearitätsabweichung**

Die im Kalibrierbericht ausgewiesene Linearitätsabweichung liegt für den erwarteten Feldstärkebereich (1 V/m bis 20 V/m) zwischen -3 % und +2 %. In der Regel werden gemessene Werte nicht korrigiert. Die ausgewiesenen Abweichungen von

der Linearität definieren ein Toleranzband, welches als Unsicherheitsbeitrag behandelt wird. Dieses Toleranzband wird im vorliegenden Fall mit $\pm 3\%$ als Rechteckverteilung in die Tabelle A1.1 eingesetzt.

Dazu kommt noch die Unsicherheit, mit der die Linearitätsabweichung bei der Kalibration bestimmt wurde. Sie ist im Kalibrierbericht für jeden Pegel angegeben und schwankt zwischen $\pm 2\%$ und $\pm 2.5\%$. Als Beitrag zur Messunsicherheit wird ein Wert von $\pm 2.5\%$ mit Normalverteilung in die Tabelle A1.1 eingesetzt.

- **Frequenzgang**

Der Frequenzgang ist aus dem Kalibrierbericht bekannt. Die Abweichung liegt im Frequenzbereich von 800 MHz bis 2200 MHz zwischen $+7\%$ und -15% . Gemessene Werte werden in der Regel nicht korrigiert. Die ausgewiesenen Abweichungen definieren ein Toleranzband, welches als Unsicherheitsbeitrag behandelt wird. Als Toleranzband wird $\pm 15\%$ mit Rechteckverteilung eingesetzt.

Dazu kommt noch die Unsicherheit, mit welcher der Frequenzgang bei der Kalibration bestimmt wurde. Sie ist im Kalibrierbericht für die massgebenden Frequenzpunkte mit $\pm 12\%$ bis $\pm 14\%$ angegeben. Als Beitrag zur Messunsicherheit wird ein Wert von $\pm 14\%$ mit Normalverteilung in die Tabelle A1.1 eingesetzt.

- **Isotropieabweichung**

Die Isotropieabweichung ist im Datenblatt mit ± 1 dB, entsprechend $\pm 12\%$, spezifiziert. Es wird eine Rechteckverteilung angenommen.

- **Modulationsabhängigkeit**

Der Modulationseinfluss kann durch ein Vergleichsexperiment mit Sinus-Signalen und UMTS Signalen abgeschätzt werden. Für unser Beispiel wird eine Abweichung von $\pm 10\%$ angenommen (Rechteckverteilung)

- **Temperaturabhängigkeit**

Die Temperaturabhängigkeit ist im Datenblatt für den Temperaturbereich von 0°C bis 50°C mit $+0.2/-1.5$ dB angegeben. Es ist mit einem Einsatz der Sonde bei Temperaturen von $+5^{\circ}\text{C}$ bis 30°C zu rechnen. Aus der Kurve für den typischen Temperaturgang kann für diesen eingeschränkten Temperaturbereich eine Unsicherheit von ± 0.3 dB ($\pm 3.5\%$) abgeschätzt werden (Rechteckverteilung).

Einflussfaktor	Datenherkunft	Unsicherheitsbeitrag %	Verteilung	Divisor k_q	Standardunsicherheit %
Unsicherheit der Absolutkalibration	Kalibrierbericht	± 7	Normal	2	± 3.5
Toleranzband der Linearitätsabweichung	Kalibrierbericht	± 3	Rechteck	1.73	± 1.7
Unsicherheit der Linearitätsmessung	Kalibrierbericht	± 2.5	Normal	2	± 1.3
Toleranzband des Frequenzgangs	Kalibrierbericht	± 15	Rechteck	1.73	± 8.7
Unsicherheit der Frequenzgangmessung	Kalibrierbericht	± 14	Normal	2	± 7
Isotropieabweichung	Datenblatt	± 12	Rechteck	1.73	± 6.9
Modulationsabhängigkeit	Geschätzt	± 10	Rechteck	1.73	± 5.8
Temperaturabhängigkeit	Datenblatt	± 3.5	Rechteck	1.73	± 2
Standardunsicherheit der Messeinrichtung u_m					± 15.0
Standardunsicherheit der Probennahme u_p	Vorgabe				± 15
Standardunsicherheit des Messresultates u					± 21.2

Tabelle A1.1: Berechnung der Standard-Messunsicherheit für eine kalibrierte Breitbandsonde (Beispiel)

Ergebnis

Die Standardmessunsicherheit u beträgt ± 21.2 %.

Die erweiterte Messunsicherheit U beträgt ± 42.5 %.

Die Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit ($U < \pm 45$ %) ist erfüllt.

Beispiel 1.2 : Spektral auflösende Messeinrichtung mit gemeinsamer Kalibration von Antenne und Kabel

Für das vorliegende Beispiel wird eine spektral auflösende Messeinrichtung moderner Technologie vorausgesetzt. Die Antenne sei zusammen mit dem Kabel als zusammengehörende Einheit von einem Kalibrierlabor kalibriert worden. Die Messwerte werden mit dem Antennenfaktor (inklusive Kabelverlust) korrigiert. Für die Messung muss das gleiche Kabel verwendet werden und dieses muss gleich angeschlossen sein wie bei der Antennenkalibration. Bei diesem Vorgehen reduziert sich der Unsicherheitsbeitrag der Fehlanpassungen. Als Nachteil dieser Lösung muss bemerkt werden, dass bei einem Kabeldefekt die ganze Antennenkalibration wiederholt werden muss. Wenn das Kabel separat kalibriert wird, muss nur das Kabel neu kalibriert werden. Die Unsicherheitsbeiträge durch Fehlanpassungen sind aber in diesem Fall grösser. (Siehe Beispiel 1.3)

Messgerät

Für das Messgerät im vorliegenden Beispiel (Spektrumanalysator) liegt ein Kalibrierzertifikat für den Absolutpegel und für den Frequenzgang vor. Die restlichen Angaben sind geschätzt oder stammen aus dem Datenblatt des Herstellers.

Unsicherheit des *Absolutpegels* nach Kalibrierzertifikat (Normalverteilung) $\pm 1.5 \%$

Unsicherheit des *Frequenzgangs* nach Kalibrierzertifikat (Noormalverteilung) $\pm 1.5 \%$

Interpolation des Frequenzgangs (Rechteckverteilung) $\pm 1.0 \%$

Linearitätsabweichung (Rechteckverteilung): $\pm 0.3 \text{ dB} \Rightarrow \pm 3.5 \%$

Es wird angenommen, dass das Messgerät mit einem „true RMS“-Detektor misst. Damit ist die Modulationsabhängigkeit des Messgerätes bereits in den obenstehenden Unsicherheitsangaben enthalten. Auch der Temperatureinfluss ist in diesem Beispiel in den obenstehenden Unsicherheitsangaben enthalten und wird deshalb nicht separat ausgewiesen.

Antenne inklusive Kabel

Gemessene Werte werden mit dem Antennenfaktor (inklusive Kabelverluste) korrigiert. Diese Korrektur ist mit folgenden Unsicherheiten behaftet:

Unsicherheit der *Antennenkalibration* nach Kalibrierzertifikat: $\pm 1.5 \text{ dB} \Rightarrow \pm 18.9 \%$ (Normalverteilung)

Interpolation (Rechteckverteilung): $\pm 0.3 \text{ dB} \Rightarrow \pm 3.5 \%$

Die Antenne ist in der Regel nur bei einer begrenzten Zahl von Frequenzen kalibriert. Für Frequenzen, die zwischen diesen Werten liegen, entsteht eine zusätzliche Unsicherheit. In diesem Beispiel wird angenommen, dass für Frequenzen, die zwischen den Stützwerten der Antennenkalibration liegen, der Kalibrationswert der nächstliegenden Frequenz verwendet wird. Die angegebene Unsicherheit ist in diesem Fall der maximale Unterschied zwischen zwei Stützwerten der Antennenkalibration.

Es gibt Antennen mit eingebautem Vorverstärker. Falls dieser Vorverstärker bei der Messung verwendet wird, muss dessen Temperaturabhängigkeit und Linearität ebenfalls in der Messunsicherheitsberechnung mitberücksichtigt werden. In diesem Beispiel wird angenommen dass die Antenne ohne Vorverstärker verwendet wird.

Fehlanpassung Antenne inklusive Kabel / Messgerät

	Frequenz	VSWR	Rückflussdämpfung	Reflexionsfaktor r
Antenne inklusive Kabel (Quelle)	2150 MHz	1.5	14.0 dB	0.200
Messgerät (Last)	2150 MHz	1.5	14.0 dB	0.200

Damit wird: $U_F = |r_{Last}| \cdot |r_{Quelle}| = 0.200 \cdot 0.200 = 0.04$, entsprechend $\pm 4\%$

Einflussfaktor	Datenherkunft	Unsicherheitsbeitrag %	Verteilung	Divisor k_q	Standardunsicherheit %
Messgerät					
Absolutpegel	Kalibrierbericht	±1.5	Normal	2	±0.75
Frequenzgang	Kalibrierbericht	±1.5	Normal	2	±0.75
Interpolation des Frequenzgangs	Geschätzt	±1.0	Rechteck	1.73	±0.6
Linearitätsabweichung	Datenblatt	±3.5	Rechteck	1.73	±2.0
Antenne					
Antennenkalibration	Kalibrierbericht	±18.9	Normal	2	±9.5
Interpolation	Geschätzt	±3.5	Rechteck	1.73	±2.0
Fehlanpassungen					
Antenne mit Kabel / Messgerät	Kalibrierbericht/ Datenblatt	±4	U-förmig	1.41	±2.8
Standardunsicherheit der Messeinrichtung u_m					±10.3
Standardunsicherheit der Probennahme u_p	Vorgabe				±15
Standardunsicherheit des Messresultates u					±18.2

Tabelle A1.2: Berechnung der Standard-Messunsicherheit für eine spektral auflösende Messeinrichtung mit gemeinsamer Kalibration der Antenne und des Kabels (Beispiel)

Ergebnis

Die Standardmessunsicherheit u beträgt ±18.2 %.

Die erweiterte Messunsicherheit U beträgt ±36.4 %.

Die Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit ($U < ±45$ %) ist erfüllt.

Beispiel 1.3 : Code-selektive Messeinrichtung mit unabhängiger Kalibration von Antenne und Kabel

Für das vorliegende Beispiel wird eine code-selektive Messeinrichtung moderner Technologie vorausgesetzt. Die Antenne und das Kabel seien von einem Kalibrierlabor kalibriert worden. Die Messwerte werden mit dem Antennenfaktor und um den Kabelverlust korrigiert.

Messgerät

Für das Messgerät im vorliegenden Beispiel (Spektrumanalysator) liegt ein Kalibrierzertifikat für den Absolutpegel und für den Frequenzgang vor. Die restlichen Angaben sind geschätzt oder stammen aus dem Datenblatt des Herstellers.

Unsicherheit des <i>Absolutpegels</i> nach Kalibrierzertifikat (Normalverteilung)	$\pm 1.5 \%$
Unsicherheit des <i>Frequenzgangs</i> nach Kalibrierzertifikat (Noarmalverteilung)	$\pm 1.5 \%$
<i>Interpolation des Frequenzgangs</i> (Rechteckverteilung)	$\pm 1.0 \%$
<i>Linearitätsabweichung</i> (Rechteckverteilung):	$\pm 0.3 \text{ dB} \Rightarrow \pm 3.5 \%$
<i>Unsicherheit der Code Detektion</i> (Rechteckverteilung):	$\pm 0.1 \text{ dB} \Rightarrow \pm 1.2 \%$

Der Temperatureinfluss ist in diesem Beispiel in den obenstehenden Unsicherheitsangaben enthalten und wird deshalb nicht separat ausgewiesen.

Antenne

Gemessene Werte werden mit dem Antennenfaktor korrigiert. Diese Korrektur ist mit folgenden Unsicherheiten behaftet:

Unsicherheit der <i>Antennenkalibration</i> nach Kalibrierzertifikat: (Normalverteilung)	$\pm 1.5 \text{ dB} \Rightarrow \pm 18.9 \%$
<i>Interpolation</i> (Rechteckverteilung):	$\pm 0.1 \text{ dB} \Rightarrow \pm 1.2 \%$

Die Antenne ist in der Regel nur bei einigen ausgewählten Frequenzen kalibriert. Für Frequenzen, die zwischen diesen Werten liegen, muss interpoliert werden, was mit einer Unsicherheit verbunden ist. Im Gegensatz zum Beispiel 1.2. wird hier angenommen, dass die Antennenfaktoren zwischen den Stützwerten der Kalibration linear interpoliert werden und dass genügend solche Stützwerte vorhanden sind. Dadurch wird dieser Beitrag zur Messunsicherheit hier kleiner als in Beispiel 1.2.

Kabel

Gemessene Werte werden um den Kabelverlust korrigiert. Diese Korrektur ist mit folgenden Unsicherheiten behaftet:

Unsicherheit der *Kabelkalibration* nach Kalibrierzertifikat: $\pm 0.2 \text{ dB} \Rightarrow \pm 2.3 \%$
(Normalverteilung)

Interpolation (Rechteckverteilung): $\pm 0.1 \text{ dB} \Rightarrow \pm 1.2 \%$

Fehlanpassung Kabel / Messgerät

	Frequenz	VSWR	Rückflussdämpfung	Reflexionsfaktor r
Kabel (Quelle)	2150 MHz	1.2	20.8 dB	0.091
Messgerät (Last)	2150 MHz	1.5	14.0 dB	0.200

Damit wird

$$U_F = |r_{Last}| \cdot |r_{Quelle}| = 0.200 \cdot 0.091 = 0.018, \text{ entsprechend } \pm 1.8 \%$$

Fehlanpassung Antenne / Kabel

	Frequenz	VSWR	Rückflussdämpfung	Reflexionsfaktor r
Antenne (Quelle)	2150 MHz	1.6	12.7 dB	0.231
Kabel (Kabel)	2150 MHz	1.2	20.8 dB	0.091

Damit wird

$$U_F = |r_{Last}| \cdot |r_{Quelle}| = 0.091 \cdot 0.231 = 0.021, \text{ entsprechend } \pm 2.1 \%$$

Fehlanpassung Antenne / Messgerät

Wenn das Kabel eine relativ kleine Dämpfung aufweist, muss auch die Fehlanpassung zwischen der Antenne und dem Eingang des Messgeräts berücksichtigt werden. Für eine vereinfachte Abschätzung wird die Rückflussdämpfung der Antenne um die doppelte Kabeldämpfung erhöht. Damit trägt man dem Umstand Rechnung, dass die reflektierte Welle das Kabel zweimal durchläuft.

Der Kabelverlust beträgt laut Kalibrierbericht 4dB.

	Frequenz	VSWR	Rückflussdämpfung*	Reflexionsfaktor r^*
Antenne* (Quelle)	2150 MHz	1.6	12.7 dB + 8 dB =20.7 dB	0.092
Messgerät (Last)	2150 MHz	1.5	14 dB	0.200

* : Rückflussdämpfung und Reflexionsfaktor der Antenne, wie sie am Eingang des Messgerätes erscheinen.

Damit wird

$$U_F = |r_{Last}| \cdot |r_{Quelle}| = 0.200 \cdot 0.092 = 0.018, \text{ entsprechend } \pm 1.8 \%$$

Dieser Unsicherheitsbeitrag kann reduziert werden, wenn ein Kabel mit grösserer Dämpfung gewählt wird, oder wenn zwischen der Antenne und dem Kabel ein Dämpfungsglied eingeschaltet wird.

Einflussfaktor	Datenherkunft	Unsicherheitsbeitrag %	Verteilung	Divisor k_q	Standardunsicherheit %
Messgerät					
Absolutpegel	Kalibrierbericht	±1.5	Normal	2	±0.75
Frequenzgang	Kalibrierbericht	±1.5	Normal	2	±0.75
Interpolation	Geschätzt	±1.0	Rechteck	1.73	±0.6
Linearitätsabweichung	Datenblatt	±3.5	Rechteck	1.73	±2.0
Unsicherheit der Code Detektion	Datenblatt	±1.2	Rechteck	1.73	±0.7
Antenne					
Antennenkalibration	Kalibrierbericht	±18.9	Normal	2	±9.5
Interpolation	Geschätzt	±3.5	Rechteck	1.73	±2.0
Kabel					
Kabelkalibration	Kalibrierbericht	±2.3	Normal	2	±1.2
Interpolation	Geschätzt	±1.2	Rechteck	1.73	±0.7
Fehlanpassungen					
Antenne / Kabel	Kalibrierbericht	±1.8	U-förmig	1.41	±1.3
Kabel / Messgerät	Kalibrierbericht / Datenblatt	±2.1	U-förmig	1.41	±1.5
Antenne / Messgerät	Kalibrierbericht / Datenblatt	±1.8	U-förmig	1.41	±1.3
Standardunsicherheit der Messeinrichtung u_m					±10.1
Standardunsicherheit der Probenahme u_p	Vorgabe				±15
Standardunsicherheit des Messresultates u					±18.1

Tabelle A1.3: Berechnung der Standard-Messunsicherheit für eine code-selektive Messeinrichtung mit unabhängiger Kalibration der Antenne und des Kabels (Beispiel)

Ergebnis

Die Standardmessunsicherheit u beträgt ± 18.1 %.

Die erweiterte Messunsicherheit U beträgt ± 36.2 %.

Die Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit ($U < \pm 45$ %) ist erfüllt.

Anhang 2 Beispiele zur Berechnung des Beurteilungswertes bei reinen UMTS-Anlagen

Die Berechnung des Beurteilungswertes E_B wird anhand von vier typischen Anlagen, je für die breitbandige Messung (Kapitel 6), die spektrale Messung (Kapitel 7) und die code-selektive Messung (Kapitel 8) illustriert.

Es muss ein Standortdatenblatt vorliegen, aus dem für jede Antenne die bewilligte Sendeleistung (ERP) $P_{j,bew}$ ersichtlich ist. Die bewilligte Sendeleistung gilt jeweils für die Summe der Sendeleistungen des primären CPICH, der anderen Organisationskanäle und aller Datenkanäle der betreffenden Antenne. Bei Standortmitbenutzung durch mehrere UMTS-Betreiber werden diese Sendeleistungen in der Regel pro Netzbetreiber separat aufgeführt und bewilligt.

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

- Aktuelle Sendeleistung (ERP) $P_{i,j}$ des CPICH jeder Zelle i , die von der Antenne j versorgt wird.
- Trägerfrequenz jeder Zelle i .
- Scrambling-Code jeder Zelle i .

Das Vorgehen zur Berechnung der Hochrechnungsfaktoren ist in Kapitel 5 erläutert.

Beispiel 2.1

Beschreibung der Anlage 1

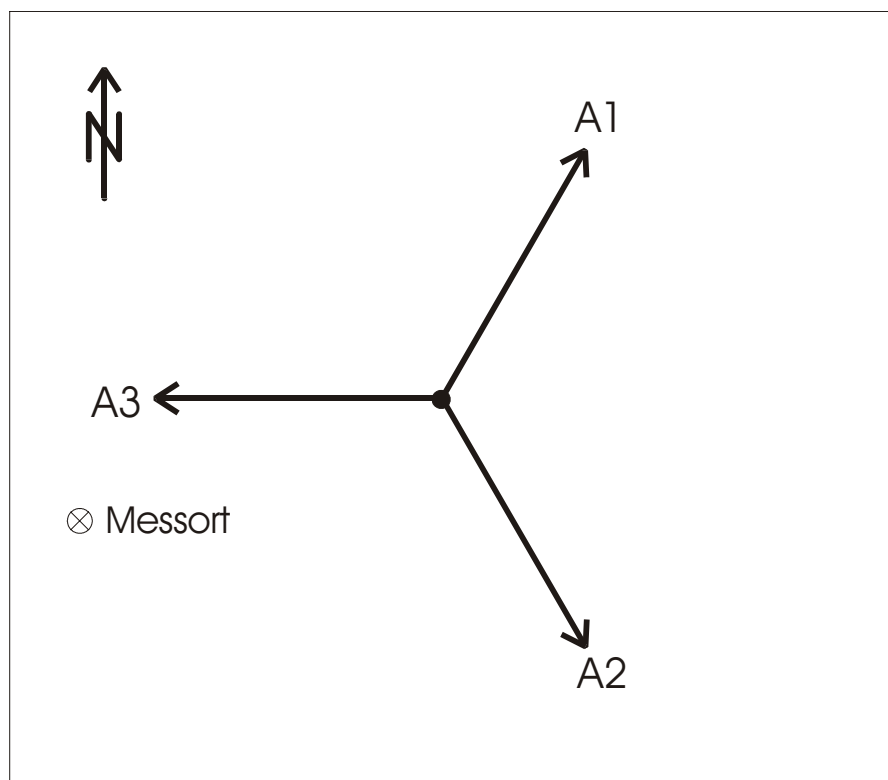
Ein Netzbetreiber versorgt mit drei Antennen, die an einem Mast installiert sind, drei UMTS-Zellen. Der Winkel zwischen den horizontalen Hauptstrahlrichtungen der drei Antennen beträgt je 120° . Die Senderichtungen und der Messort sind in Figur A2.1 skizziert.

Die technischen Daten der Anlage und die daraus bestimmten Hochrechnungsfaktoren finden sich in Tabelle A2.1.

Bei der beschriebenen Anlage handelt es sich um eine reine UMTS-Anlage. Es gilt daher ein Anlagegrenzwert von 6 V/m .

Antenne j	Zelle i	horizontale Hauptstrahlrichtung	Scrambling Code	Trägerfrequenz f [MHz]	aktuelle Sendeleistung (ERP) des CPICH [W] $P_{i,j}$	Bewilligte Sendeleistung (ERP) $P_{j,bew}$ [W]	Hochrechnungsfaktor K_j
A1	1	30°	151	2117.6	50	710	3.77
A2	1	150°	152	2117.6	50	710	3.77
A3	1	270°	153	2117.6	50	710	3.77

Tabelle A2.1: Technische Daten der Anlage 1 (Angaben des Netzbetreibers schattiert) und die daraus bestimmten Hochrechnungsfaktoren K_j .



Figur A2.1: Plan der Anlage 1 mit den drei Hauptstrahlrichtungen und der Lage des Messortes

Breitbandmessung bei der Anlage 1

Mit einer Breitbandsonde wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 1 gemessen.

Der (örtlich) höchste Messwert E_{max} beträgt 1.05 V/m. Als Hochrechnungsfaktor K ist der grösste Hochrechnungsfaktor K_j aus Tabelle A2.1 einzusetzen. Im vorliegenden Fall sind alle K_j gleich hoch mit einem Wert von 3.77, der Hochrechnungsfaktor K beträgt somit ebenfalls 3.77.

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert wie folgt:

$$E_B = E_{max} \cdot K = 1.05 \text{ V/m} \cdot 3.77 = 3.96 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt unter dem Anlagegrenzwert. Der Anlagegrenzwert ist eingehalten.

Spektrale Messung bei der Anlage 1

Mit einer frequenzselektiven Messeinrichtung wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 1 gemessen.

Der (örtlich) höchste Messwert $E_{f,max}$ beträgt 0.86 V/m. Als Hochrechnungsfaktor K ist der grösste Hochrechnungsfaktor K_j aus Tabelle A2.1 einzusetzen. Im vorliegenden Fall sind alle K_j gleich hoch mit einem Wert von 3.77, der Hochrechnungsfaktor K beträgt somit ebenfalls 3.77.

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert wie folgt:

$$E_B = E_{f,max} \cdot K = 0.86 \text{ V/m} \cdot 3.77 = 3.24 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt unter dem Anlagegrenzwert. Der Anlagegrenzwert ist eingehalten.

Code-selektive Messung bei der Anlage 1

Mit einer code-selektiven Messeinrichtung wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 1 gemessen. Für jeden primären CPICH wird die (örtlich) höchste elektrische Feldstärke $E_{i,j,max}$ erfasst und mit dem jeweiligen Hochrechnungsfaktor K_j gemäss Tabelle A2.1 hochgerechnet. Die Messwerte $E_{i,j,max}$, die Hochrechnungsfaktoren K_j und die hochgerechneten Messwerte $E_{j,h}$ finden sich in Tabelle A2.2.

Antenne j	Zelle i	Messwert $E_{i,j,max}$ des CPICH [V/m]	Hochrechnungs- faktor K_j	Hochgerechneter Messwert $E_{j,h}$ [V/m]
A1	1	0.15	3.77	0.58
A2	1	0.14	3.77	0.54
A3	1	0.68	3.77	2.57

Tabelle A2.2: Messwerte, Hochrechnungsfaktoren und hochgerechnete Messwerte pro Antenne

Daraus errechnet sich der Beurteilungswert E_B wie folgt:

$$E_B = E_h = \sqrt{\sum_{i=1}^3 E_{j,h}^2} = \sqrt{0.58^2 + 0.54^2 + 2.57^2} \text{ V/m} = 2.69 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt unter dem Anlagegrenzwert. Der Anlagegrenzwert ist eingehalten.

Wie erwartet ist der Beurteilungswert aus der code-selektiven Messung niedriger als derjenige aus der spektralen Messung, weil bei der spektralen Messung auch die Strahlung der Datenkanäle und von UMTS-Signalen benachbarter Anlagen bei gleicher Frequenz mitgemessen wurde.

Der Beurteilungswert aus der spektralen Messungen hingegen ist niedriger als derjenige aus der Breitbandmessungen, weil bei der Breitbandmessung auch Fremdstrahlung mitgemessen wird.

Beispiel 2.2

Beschreibung der Anlage 2

Es handelt sich um dieselbe Anlage wie bei Beispiel 2.1 (Anlage 1), mit dem Unterschied, dass der Betreiber der Anlage nun über jede Antenne mit allen drei ihm zur Verfügung stehenden UMTS-Frequenzen sendet.

Die technischen Daten der Anlage und die daraus bestimmten Hochrechnungsfaktoren finden sich in Tabelle A2.3.

Bei der Anlage handelt es sich um eine reine UMTS-Anlage. Der Anlagegrenzwert beträgt demnach 6 V/m.

Antenne j	Zelle i	horizontale Hauptstrahlrichtung	Scrambling-Code	Trägerfrequenz f [MHz]	aktuelle Sendeleistung (ERP) des CPICH [W] $P_{i,j}$	Bewilligte Sendeleistung (ERP) $P_{j,bew}$ [W]	Hochrechnungsfaktor K_j
A1	1	30°	151	2112.5	20	900	3.59
	2		154	2117.5	20		
	3		157	2122.5	30		
A2	1	150°	152	2112.5	15	900	3.87
	2		155	2117.5	30		
	3		158	2122.5	15		
A3	1	270°	153	2112.5	30	900	3.35
	2		156	2117.5	30		
	3		159	2122.5	20		

Tabelle A2.3: Technische Daten der Anlage 2 (Angaben des Netzbetreibers schattiert) und die daraus bestimmten Hochrechnungsfaktoren K_j .

Breitbandmessung bei der Anlage 2

Mit einer Breitbandsonde wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 2 gemessen.

Der (örtlich) höchste Messwert E_{max} beträgt 1.78 V/m. Als Hochrechnungsfaktor K ist der höchste Hochrechnungsfaktor K_j aus Tabelle A2.3, also ein Wert von 3.87, einzusetzen.

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert wie folgt:

$$E_B = E_{max} \cdot K = 1.78 \text{ V/m} \cdot 3.87 = 6.89 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt über dem Anlagegrenzwert. Es kann jedoch nicht abschliessend beurteilt werden, ob der Anlagegrenzwert überschritten ist. Es muss eine spektrale Messung oder eine code-selektive Messung durchgeführt werden.

Spektrale Messung bei der Anlage 2

Mit einer frequenzselektiven Messeinrichtung wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 2 gemessen. Für jede UMTS-Frequenz f wird die (örtlich) höchste elektrische Feldstärke $E_{f, max}$ erfasst und mit dem höchsten Hochrechnungsfaktor K_j aus Tabelle A2.3 hochgerechnet. Die Frequenz f , die Messwerte $E_{f, max}$ und der Hochrechnungsfaktor K finden sich in Tabelle A2.4.

Frequenz f [MHz]	Messwert $E_{f, max}$ [V/m]	Hochrechnungsfaktor K
2112.5	0.89	3.87
2117.5	1.02	
2122.5	0.81	

Tabelle A2.4: Frequenzen, Messwerte und Hochrechnungsfaktor

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert wie folgt:

$$E_B = E_h = K \cdot \sqrt{\sum_f E_{f, max}^2} = 3.87 \cdot \sqrt{0.89^2 + 1.02^2 + 0.81^2} \text{ V/m} = 6.11 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt über dem Anlagegrenzwert. Es kann jedoch nicht abschliessend beurteilt werden, ob der Anlagegrenzwert überschritten ist. Es muss eine code-selektive Messung durchgeführt werden.

Code-selektive Messung bei der Anlage 2

Mit einer code-selektiven Messeinrichtung wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 2 gemessen. Für jede UMTS-Frequenz und jeden Scrambling-Code, also für jede Zelle, wird die elektrische Feldstärke $E_{i, j, max}$ des primären CPICH erfasst. Anschliessend werden die Messwerte aller von einer Antenne j versorgten Zellen quadratisch addiert und mit dem Hochrechnungsfaktor K_j der betreffenden Antenne hochgerechnet.

Die Messwerte $E_{i, j, max}$, die Hochrechnungsfaktoren K_j und die hochgerechneten Messwerte für die einzelnen Antennen $E_{j, h}$ finden sich in Tabelle A2.5.

Antenne j	Zelle i	Messwert $E_{i,j,max}$ des CPICH [V/m]	Hochrechnungsfaktor K_j	Hochgerechneter Messwert $E_{j,h}$ [V/m]
A1	1	0.23	3.59	1.39
	2	0.14		
	3	0.28		
A2	1	0.11	3.87	0.98
	2	0.11		
	3	0.20		
A3	1	0.68	3.35	3.32
	2	0.60		
	3	0.40		

Tabelle A2.5: Messwerte, Hochrechnungsfaktoren und hochgerechnete Messwerte pro Antenne.

Der Beurteilungswert berechnet sich wie folgt:

$$E_B = \sqrt{1.39^2 + 0.98^2 + 3.32^2} \text{ V/m} = 3.73 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt unter dem Anlagegrenzwert. Das Ergebnis der code-selektiven Messung hat Vorrang gegenüber der spektralen und der breitbandigen Messung. Der Anlagegrenzwert ist eingehalten.

Beispiel 2.3

Beschreibung der Anlage 3

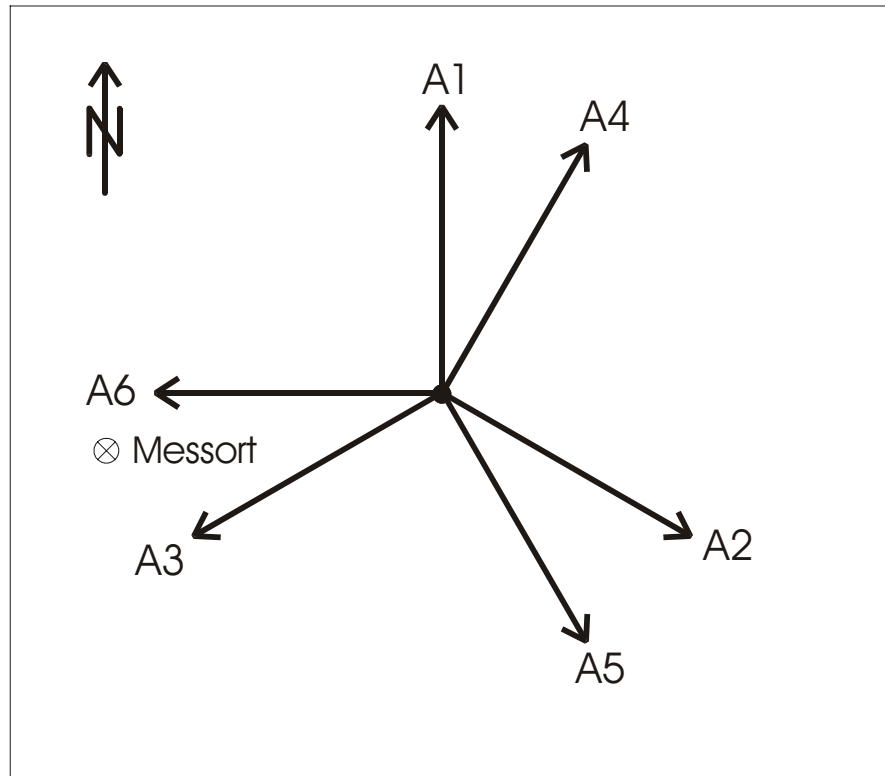
Zwei Netzbetreiber teilen sich einen Antennenstandort. Beide Betreiber senden über je drei Antennen mit je zwei Frequenzen. Betreiber 1 sendet mit den Antennen A1, A2 und A3, Betreiber 2 mit den Antennen A4, A5 und A6. Die Senderichtungen und der Messort sind in Figur A2.2 skizziert.

Die technischen Daten der Anlage und die daraus bestimmten Hochrechnungsfaktoren finden sich in Tabelle A2.6.

Bei der beschriebenen Anlage handelt es sich um eine reine UMTS-Anlage. Es gilt daher ein Anlagegrenzwert von 6 V/m.

Betreiber	Antenne j	Zelle i	horizontale Hauptstrahlrichtung	Scrambling-Code	Trägerfrequenz f [MHz]	aktuelle Sendeleistung (ERP) des CPICH [W] $P_{i,j}$	Bewilligte Sendeleistung (ERP) $P_{j, bew}$ [W]	Hochrechnungsfaktor K_j
Betreiber 1	A1	1 2	0°	151 152	2112.5 2117.5	30 30	600	3.16
	A2	1 2	120°	153 154	2112.5 2117.5	20 40	600	3.16
	A3	1 2	240°	155 156	2112.5 2117.5	10 10	600	5.48
Betreiber 2	A4	1 2	30°	121 122	2127.5 2132.5	5 5	500	7.07
	A5	1 2	150°	123 124	2127.5 2132.5	10 10	500	5.00
	A6	1 2	270°	125 126	2127.5 2132.5	10 5	400	5.16

Tabelle A2.6: Technische Daten der Anlage 3 (Angaben der Netzbetreiber schattiert) und die daraus bestimmten Hochrechnungsfaktoren K_j .



Figur A2.2: Plan der Anlage 3 mit den sechs Hauptsenderrichtungen und der Lage des Messortes

Breitbandmessung bei der Anlage 3

Mit einer Breitbandsonde wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 3 gemessen.

Der (örtlich) höchste Messwert E_{max} beträgt 1.51 V/m. Als Hochrechnungsfaktor K ist der höchste Hochrechnungsfaktor K_j aus Tabelle A2.6, also ein Wert von 7.07, einzusetzen.

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert wie folgt:

$$E_B = E_{max} \cdot K = 1.51 \text{ V/m} \cdot 7.07 = 10.68 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt über dem Anlagegrenzwert. Es kann jedoch nicht abschließend beurteilt werden, ob der Anlagegrenzwert überschritten ist. Es muss eine spektrale Messung oder eine code-selektive Messung durchgeführt werden.

Spektrale Messung bei der Anlage 3

Mit einer frequenzselektiven Messeinrichtung wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 3 gemessen. Für jede UMTS-Frequenz f wird die (örtlich) höchste elektrische Feldstärke $E_{f, max}$ erfasst. Anschliessend werden die Messwerte aller zum gleichen Netz gehörenden Frequenzen quadratisch summiert und mit dem für das betreffende Netz höchsten Hochrechnungsfaktor K_j aus Tabelle A2.6 hochgerechnet. Die Messwerte $E_{f, max}$, die Hochrechnungsfaktoren K und die hochgerechneten Messwerte E_h pro Betreiber finden sich in Tabelle A2.7.

Betreiber	Frequenz f [MHz]	Messwert $E_{f, max}$ [V/m]	Hochrechnungsfaktor K	hochgerechneter Messwert E_h [V/m]
Betreiber 1	2112.5	0.80	5.48	6.56
	2117.5	0.89		
Betreiber 2	2127.5	0.21	7.07	2.65
	2132.5	0.31		

Tabelle A 2.7: Messwerte, Hochrechnungsfaktoren und hochgerechnete Messwerte pro Betreiber

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert wie folgt:

$$E_B = \sqrt{E_{h, \text{Betreiber 1}}^2 + E_{h, \text{Betreiber 2}}^2} = \sqrt{6.56^2 + 2.65^2} \text{ V/m} = 7.08 \text{ V/m}$$

Der Beurteilungswert liegt über dem Anlagegrenzwert. Es kann jedoch nicht abschliessend beurteilt werden, ob der Anlagegrenzwert überschritten ist. Es muss eine code-selektive Messung durchgeführt werden.

Code-selektive Messung bei der Anlage 3

Mit einer code-selektiven Messeinrichtung wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 3 gemessen. Für jede UMTS-Frequenz f und jeden Scrambling-Code, also für jede Zelle, wird die elektrische Feldstärke $E_{i, j, max}$ des primären CPICH erfasst. Anschliessend werden die Messwerte aller von einer Antenne j versorgten Zellen quadratisch addiert und mit dem Hochrechnungsfaktor K_j der betreffenden Antenne hochgerechnet.

Die Messwerte $E_{i, j, max}$, die Hochrechnungsfaktoren K_j und die hochgerechneten Messwerte für die einzelnen Antennen $E_{j, h}$ finden sich in Tabelle A2.8.

Betreiber	Antenne j	Zelle i	Messwert $E_{i,j,max}$ des CPICH [V/m]	Hochrech- nungsfaktor K_j	Hochgerech- neter Mess- wert $E_{j,h}$ [V/m]
Betreiber 1	A1	1 2	0.11 0.09	3.16	0.45
	A2	1 2	0.12 0.15	3.16	0.61
	A3	1 2	0.33 0.26	5.48	2.30
Betreiber 2	A4	1 2	0.14 0.11	7.07	1.26
	A5	1 2	0.27 0.26	5.00	1.87
	A6	1 2	0.47 0.81	5.16	4.83

Tabelle A2.8: Messwerte, Hochrechnungsfaktoren und hochgerechnete Messwerte pro Antenne

Für die zwei Betreiber ergeben sich folgende Zwischenergebnisse:

$$E_{\text{Betreiber 1},h} = \sqrt{0.45^2 + 0.61^2 + 2.30^2} \text{ V/m} = 2.42 \text{ V/m}$$

$$E_{\text{Betreiber 2},h} = \sqrt{1.26^2 + 1.87^2 + 4.83^2} \text{ V/m} = 5.33 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert rechnet sich wie folgt:

$$E_B = \sqrt{E_{\text{Betreiber 1},h}^2 + E_{\text{Betreiber 2},h}^2} = \sqrt{2.42^2 + 5.33^2} \text{ V/m} = 5.85 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt unter dem Anlagegrenzwert. Das Ergebnis der code-selektiven Messung hat Vorrang gegenüber der spektralen und der breitbandigen Messung. Der Anlagegrenzwert ist eingehalten.

Beispiel 2.4

Beschreibung der Anlage 4

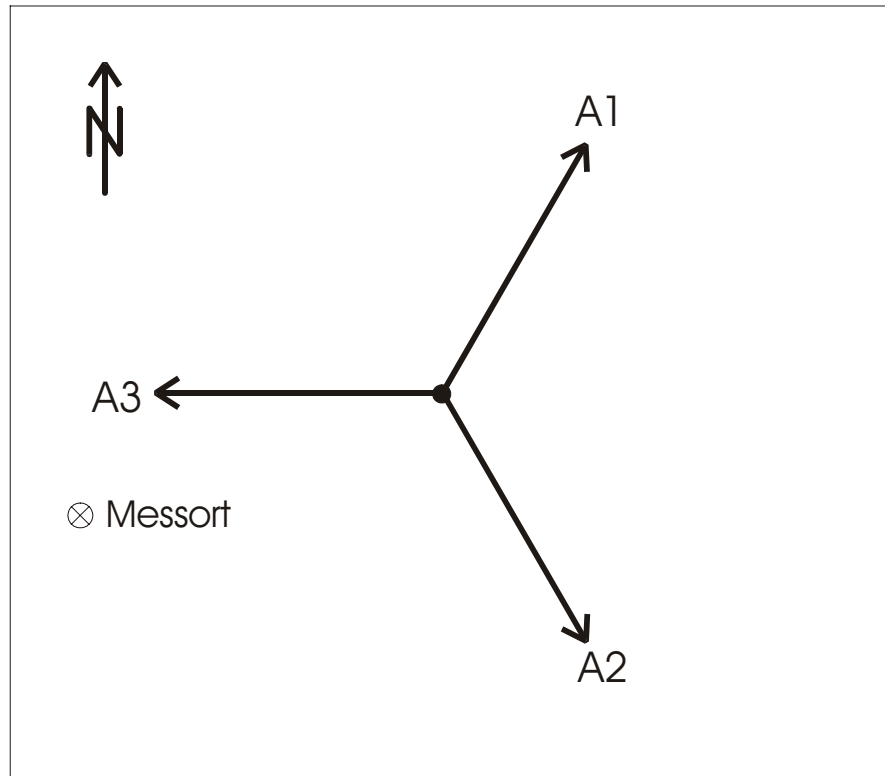
Zwei Netzbetreiber teilen sich einen Antennenstandort. Beide Betreiber senden mit je zwei Frequenzen über *dieselben* Antennen A1, A2 und A3 in drei Richtungen. Jede Antenne versorgt somit vier Zellen. Die Senderichtungen und der Messort sind in Figur A2.3 skizziert.

Die technischen Daten der Anlage und die daraus bestimmten Hochrechnungsfaktoren finden sich in Tabelle A2.9.

Bei der beschriebenen Anlage handelt es sich um eine reine UMTS-Anlage. Es gilt daher ein Anlagegrenzwert von 6 V/m.

Betreiber	Antenne j	Zelle i	horizontale Hauptstrahlrichtung	Scrambling-Code	Trägerfrequenz f [MHz]	aktuelle Sendeleistung (ERP) des CPICH [W] $P_{i,j}$	Bewilligte Sendeleistung (ERP) $P_{j,bew}$ [W]	Hochrechnungsfaktor K_j
Betreiber 1	A1	1	30°	151	2112.5	30	600	3.16
		2		152	2117.5	30		
	A2	1	150°	153	2112.5	20	600	3.16
	A3	1	270°	155	2112.5	10	600	5.48
		2		156	2117.5	10		
Betreiber 2	A1	1	30°	121	2127.5	5	500	7.07
		2		122	2132.5	5		
	A2	1	150°	123	2127.5	10	500	5.00
		2		124	2132.5	10		
	A3	1	270°	125	2127.5	10	400	5.16
		2		126	2132.5	5		

Tabelle A2.9: Technische Daten der Anlage 4 (Angaben der Netzbetreiber schattiert) und die daraus bestimmten Hochrechnungsfaktoren K_j .



Figur A2.3: Plan der Anlage 4 mit den drei Hauptsenderrichtungen und der Lage des Messortes.

Breitbandmessung bei der Anlage 4

Mit einer Breitbandsonde wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 4 gemessen.

Der (örtlich) höchste Messwert E_{max} beträgt 1.37 V/m. Als Hochrechnungsfaktor K ist der höchste Hochrechnungsfaktor K_j aus Tabelle A2.9, also ein Wert von 7.07, einzusetzen.

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert wie folgt:

$$E_B = E_{max} \cdot K = 1.37 \text{ V/m} \cdot 7.07 = 9.69 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt über dem Anlagegrenzwert. Es kann jedoch nicht abschließend beurteilt werden, ob der Anlagegrenzwert überschritten ist. Es muss eine spektrale Messung oder eine code-selektive Messung durchgeführt werden.

Spektrale Messung bei der Anlage 4

Mit einer frequenzselektiven Messeinrichtung wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 4 gemessen. Für jede UMTS-Frequenz f wird die (örtlich) höchste elektrische Feldstärke $E_{f,max}$ erfasst. Anschliessend werden die Messwerte aller zum gleichen Netz gehörenden Frequenzen quadratisch summiert und mit dem für das betreffende Netz höchsten Hochrechnungsfaktor K_j aus Tabelle A2.9 hochgerechnet.

Die Messwerte $E_{f,max}$, die Hochrechnungsfaktoren K und die hochgerechneten Messwerte E_h pro Betreiber finden sich in Tabelle A2.10.

Betreiber	Frequenz f [MHz]	Messwert $E_{f,max}$ [V/m]	Hochrechnungsfaktor K	hochgerechneter Messwert E_h [V/m]
Betreiber 1	2112.5	0.71	5.48	4.99
	2117.5	0.57		
Betreiber 2	2127.5	0.29	7.07	3.00
	2132.5	0.31		

Tabelle A 2.10: Messwerte, Hochrechnungsfaktoren und hochgerechnete Messwerte pro Betreiber

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert wie folgt:

$$E_B = \sqrt{E_{h, \text{Betreiber 1}}^2 + E_{h, \text{Betreiber 2}}^2} = \sqrt{4.99^2 + 3.00^2} \text{ V/m} = 5.82 \text{ V/m}$$

Der Beurteilungswert liegt unter dem Anlagegrenzwert. Der Anlagegrenzwert ist eingehalten.

Code-selektive Messung bei Anlage 4

Mit einer code-selektiven Messeinrichtung wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage 4 gemessen. Für jede UMTS-Frequenz f und jeden Scrambling-Code, also für jede Zelle, wird die elektrische Feldstärke $E_{i,j,max}$ des primären CPICH erfasst. Anschliessend werden die Messwerte aller Zellen desselben Betreibers, die von einer Antenne j versorgt werden, quadratisch addiert und mit dem jeweiligen Hochrechnungsfaktor K_j der betreffenden Antenne hochgerechnet.

Die Messwerte $E_{i,j,max}$, die Hochrechnungsfaktoren K_j und die hochgerechneten Messwerte für die einzelnen Antennen $E_{j,h}$ finden sich in Tabelle A2.11.

Betreiber	Antenne j	Zelle i	Messwert $E_{i,j,max}$ des CPICH [V/m]	Hochrech- nungsfaktor K_j	Hochgerech- neter Mess- wert $E_{j,h}$ [V/m]
Betreiber 1	A1	1 2	0.12 0.09	3.16	0.47
	A2	1 2	0.08 0.12	3.16	0.46
	A3	1 2	0.31 0.26	5.48	2.22
Betreiber 2	A1	1 2	0.06 0.03	7.07	0.47
	A2	1 2	0.07 0.05	5.00	0.43
	A3	1 2	0.39 0.21	5.16	2.29

Tabelle A2.11: Messwerte, Hochrechnungsfaktoren und hochgerechnete Messwerte pro Antenne und Betreiber

Für die zwei Betreiber ergeben sich folgende Zwischenergebnisse:

$$E_{\text{Betreiber } 1,h} = \sqrt{0.47^2 + 0.46^2 + 2.22^2} \text{ V/m} = 2.32 \text{ V/m}$$

$$E_{\text{Betreiber } 2,h} = \sqrt{0.47^2 + 0.43^2 + 2.29^2} \text{ V/m} = 2.38 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert rechnet sich wie folgt:

$$E_B = \sqrt{E_{\text{Betreiber } 1,h}^2 + E_{\text{Betreiber } 2,h}^2} = \sqrt{2.32^2 + 2.38^2} \text{ V/m} = 3.32 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt unter dem Anlagegrenzwert. Der Anlagegrenzwert ist eingehalten.

Anhang 3 Beispiel zur Berechnung des Beurteilungswertes bei kombinierten UMTS/GSM-Anlagen

Die Berechnung des Beurteilungswertes E_B wird anhand einer typischen kombinierten UMTS/GSM-Anlage, je für die breitbandige, die spektrale⁹ und die code-selektive Messung illustriert.

Es muss ein Standortdatenblatt vorliegen, aus dem für jede Antenne die für UMTS und GSM bewilligten Sendeleistungen ersichtlich sind. Bei UMTS gilt die bewilligte Sendeleistung für die Summe der Sendeleistungen des primären CPICH, der anderen Organisationskanäle und aller Datenkanäle, bei GSM für die Summe der Sendeleistungen des BCCH und aller TCH der betreffenden Antenne. Bei Standortmitbenutzung durch mehrere Betreiber werden diese Sendeleistungen in der Regel pro Netzbetreiber separat aufgeführt und bewilligt.

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

UMTS

- Aktuelle Sendeleistung (ERP) $P_{i,j}$ des CPICH jeder Zelle i , die von der Antenne j versorgt wird.
- Trägerfrequenz jeder Zelle i .
- Scrambling-Code jeder Zelle i .

GSM

- aktuelle Sendeleistung (ERP) P_i auf der BCCH-Frequenz jeder Zelle i
- Aktuelle Zuteilung der BCCH- und TCH-Frequenzen zu den einzelnen Zellen und Antennen

Das Vorgehen zur Berechnung der Hochrechnungsfaktoren für UMTS ist in Kapitel 5 der vorliegenden Messempfehlung, das Vorgehen zur Berechnung der Hochrechnungsfaktoren für GSM in den Kapiteln 5.3 und 6.3 der GSM-Messempfehlung erläutert.

Beschreibung der Anlage

Ein Netzbetreiber versorgt mit sechs Antennen, die an einem Mast installiert sind, drei UMTS-Zellen und drei GSM900-Zellen. Der Winkel zwischen den horizontalen Hauptstrahlrichtungen der drei UMTS-Antennen (A1-A3) beträgt je 120°. Ebenfalls der Winkel zwischen den horizontalen Hauptstrahlrichtungen der drei GSM900-Antennen (A4-A6) beträgt 120°. Die Senderichtungen für GSM900 sind allerdings gegenüber denje-

⁹ In der GSM-Messempfehlung wird dafür synonym der Begriff „frequenzselektiv“ verwendet.

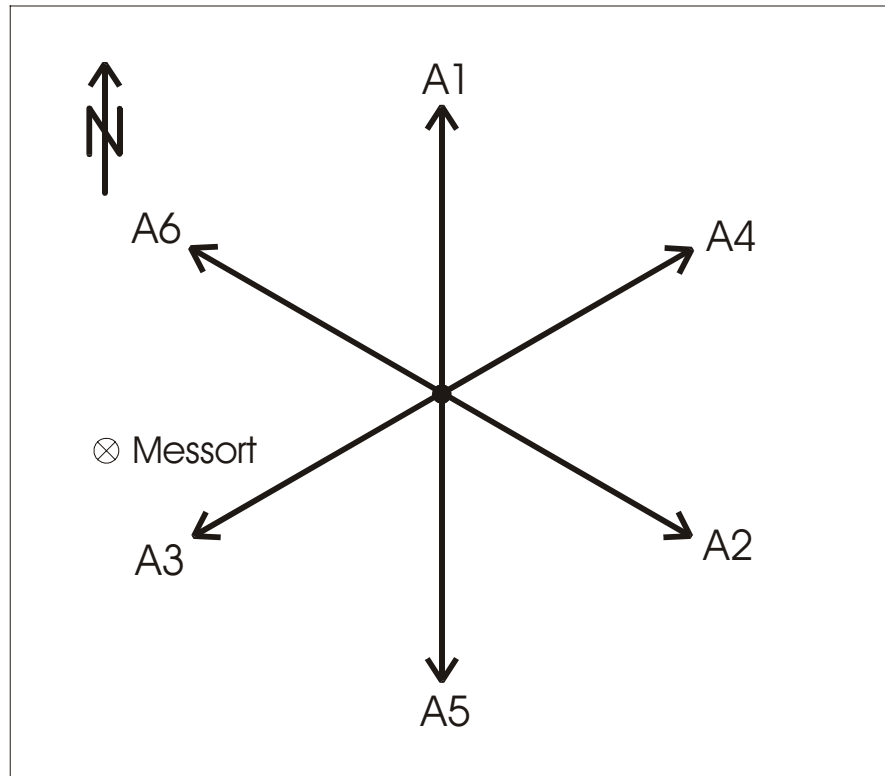
nigen für UMTS um 60° verschoben. Die Senderichtungen und der Messort sind in Figur A3.1 skizziert.

Die technischen Daten der Anlage und die daraus bestimmten Hochrechnungsfaktoren finden sich in Tabelle A3.1.

Bei der beschriebenen Anlage handelt es sich um eine gemischte GSM900/UMTS-Anlage. Es gilt daher ein Anlagegrenzwert von 5 V/m.

UMTS	Antenne j	Zelle i	horizontale Hauptstrahlrichtung	Scrambling-Code	Trägerfrequenz f [MHz]	aktuelle Sendeleistung (ERP) des CPICH $P_{i,j}$ [W]	Bewilligte Sendeleistung (ERP) $P_{j,bew}$ [W]	Hochrechnungsfaktor K_j
	A1	1	0°	151	2117.6	50	710	3.77
	A2	1	120°	152	2117.6	40	710	4.21
	A3	1	240°	153	2117.6	50	710	3.77
GSM	Antenne	Zelle i	horizontale Hauptstrahlrichtung		Frequenz des BCCH [MHz]	aktuelle Sendeleistung (ERP) des BCCH P_i [W]	Bewilligte Sendeleistung (ERP) $P_{i,bew}$ [W]	Hochrechnungsfaktor K_i
	A4	1	60°		947.6	273	710	1.61
	A5	2	180°		948.0	273	710	1.61
	A6	3	300°		951.4	273	710	1.61

Tabelle A3.1: Technische Daten der Anlage (Angaben der Netzbetreiber schattiert) und die daraus bestimmten Hochrechnungsfaktoren K_j (für UMTS) bzw. K_i (für GSM)



Figur A3.1: Plan der Anlage mit den sechs Hauptsenderrichtungen für UMTS und GSM und der Lage des Messortes.

Breitbandmessung

Mit einer Breitbandsonde wird die elektrische Feldstärke am Messort bei der Anlage gemessen. Die Sonde ist für das GSM900 und das UMTS-Frequenzband spezifiziert.

Der (örtlich) höchste Messwert E_{max} beträgt 1.65 V/m. Als Hochrechnungsfaktor K ist der höchste Hochrechnungsfaktor aus Tabelle A3.1 einzusetzen. Der Hochrechnungsfaktor beträgt somit 4.21.

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert wie folgt:

$$E_B = E_{max} \cdot K = 1.65 \text{ V/m} \cdot 4.21 = 6.95 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt über dem Anlagegrenzwert. Es kann jedoch nicht abschließend beurteilt werden, ob der Anlagegrenzwert überschritten ist. Es muss für GSM eine frequenzselektive Messung und für UMTS eine spektrale oder code-selektive Messung durchgeführt werden.

Spektrale Messung

Mit einer frequenzselektiven Messeinrichtung wird die elektrische Feldstärke für UMTS und GSM am Messort bei der Anlage gemessen.

UMTS

Der (örtlich) höchste Messwert für UMTS $E_{f,max}$ beträgt 0.96 V/m. Als Hochrechnungsfaktor K ist der grösste Hochrechnungsfaktor K_j (für UMTS!) aus Tabelle A3.1 einzusetzen. Der Hochrechnungsfaktor für UMTS beträgt somit 4.21.

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert für UMTS wie folgt:

$$E_{B,UMTS} = E_{f,max} \cdot K = 0.96 \text{ V/m} \cdot 4.21 = 4.04 \text{ V/m.}$$

GSM

Für jeden BCCH der GSM-Antennen wird die (örtlich) höchste Feldstärke $E_{i,max}$ separat erfasst und mit dem jeweiligen Hochrechnungsfaktor K_i (für GSM!) gemäss Tabelle A3.1 hochgerechnet. Die Messwerte $E_{i,max}$, die Hochrechnungsfaktoren K_i und die hochgerechneten Messwerte $E_{i,h}$ für GSM finden sich in Tabelle A3.2.

Zelle i	Antenne	Messwert $E_{i,max}$ des BCCH [V/m]	Hochrechnungsfaktor K_i	Hochgerechneter Messwert $E_{i,h}$ [V/m]
1	A4	0.25	1.61	0.40
2	A5	0.55	1.61	0.89
3	A6	0.61	1.61	0.98

Tabelle A3.2: Messwerte, Hochrechnungsfaktoren und hochgerechnete Messwerte für die GSM-Antennen.

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert für GSM wie folgt:

$$E_{B,GSM} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 E_{i,h}^2} = \sqrt{0.40^2 + 0.89^2 + 0.98^2} \text{ V/m} = 1.38 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert E_B für die *gesamte* Anlage berechnet sich wie folgt:

$$E_B = \sqrt{E_{B,UMTS}^2 + E_{B,GSM}^2} = \sqrt{4.04^2 + 1.38^2} \text{ V/m} = 4.26 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt unter dem Anlagegrenzwert. Der Anlagegrenzwert ist somit eingehalten.

Spektrale Messung (GSM) und code-selektive Messung (UMTS)

Mit einer frequenzselektiven Messeinrichtung wird die elektrische Feldstärke für GSM, und mit einer code-selektiven Messeinrichtung die elektrische Feldstärke für UMTS am Messort bei der Anlage gemessen.

GSM

Für jeden BCCH der GSM-Antennen wird die (örtlich) höchste Feldstärke $E_{i,max}$ separat erfasst und mit dem jeweiligen Hochrechnungsfaktor K_i für GSM gemäss Tabelle A3.1 hochgerechnet. Die Messwerte $E_{i,max}$, die Hochrechnungsfaktoren K_i und die hochgerechneten Messwerte $E_{i,h}$ für GSM finden sich in Tabelle A3.3.

Zelle i	Antenne	Messwert $E_{i,max}$ des BCCH [V/m]	Hochrechnungs- faktor K_i	Hochgerechneter Messwert $E_{i,h}$ [V/m]
1	A4	0.25	1.61	0.40
2	A5	0.55	1.61	0.89
3	A6	0.61	1.61	0.98

Tabelle A3.3: Messwerte, Hochrechnungsfaktoren und hochgerechnete Messwerte für die GSM-Antennen.

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert für GSM wie folgt:

$$E_{B,GSM} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 E_{i,h}^2} = \sqrt{0.40^2 + 0.89^2 + 0.98^2} \text{ V/m} = 1.38 \text{ V/m.}$$

UMTS

Für jeden primären CPICH der UMTS-Antennen wird die (örtlich) höchste elektrische Feldstärke $E_{i,j,max}$ erfasst und mit dem jeweiligen Hochrechnungsfaktor K_j für UMTS gemäss Tabelle A3.1 hochgerechnet. Die Messwerte $E_{i,j,max}$, die Hochrechnungsfaktoren K_j und die hochgerechneten Messwerte $E_{j,h}$ für UMTS finden sich in Tabelle A3.4.

Antenne j	Zelle i	Messwert $E_{i,j,max}$ des CPICH [V/m]	Hochrechnungsfaktor K_j	Hochgerechneter Messwert $E_{j,h}$ [V/m]
A1	1	0.15	3.77	0.56
A2	1	0.11	4.21	0.46
A3	1	0.24	3.77	0.90

Tabelle A3.4: Messwerte, Hochrechnungsfaktoren und hochgerechnete Messwerte für die UMTS-Antennen

Daraus berechnet sich der Beurteilungswert für UMTS wie folgt:

$$E_{B,UMTS} = \sqrt{0.56^2 + 0.46^2 + 0.90^2} \text{ V/m} = 1.16 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert E_B für die *gesamte* Anlage berechnet sich wie folgt:

$$E_B = \sqrt{E_{B,UMTS}^2 + E_{B,GSM}^2} = \sqrt{1.16^2 + 1.38^2} \text{ V/m} = 1.80 \text{ V/m.}$$

Der Beurteilungswert liegt unter dem Anlagegrenzwert. Der Anlagegrenzwert ist somit eingehalten.

Anhang 4 Verzeichnis der Abkürzungen

CPICH	Common Pilot Channel	
FDD	Frequency Division Duplex	
GSM	Global System for Mobile Communication	
NIS	Nichtionisierende Strahlung	
NISV	Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung	
OMEN	Ort mit empfindlicher Nutzung	
TDD	Time Division Duplex	
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio (Stehwellenverhältnis)	
E_B	Beurteilungswert für die Anlage	V/m
$E_{f, max}$	Örtlich höchster Messwert der elektrischen Feldstärke der UMTS-Frequenz f (bei spektraler Messung)	V/m
E_h	Hochgerechneter Messwert für ein einzelnes UMTS-Netz (bei spektraler und code-selektiver Messung)	V/m
$E_{i, j, max}$	Örtlich höchster Messwert der elektrischen Feldstärke des CPICH von Zelle i , abgestrahlt von Antenne j (bei code-selektiver Messung)	V/m
$E_{j, h}$	Hochgerechneter Messwert für Antenne j (bei code-selektiver Messung)	V/m
E_{max}	Örtlich höchster Messwert der elektrischen Feldstärke (bei breitbandiger Messung)	V/m
f	Trägerfrequenz des UMTS-Signals	MHz
i	Index für die Zelle	
j	Index für die Antenne	
K	Hochrechnungsfaktor für die Berechnung des Beurteilungswertes (bei breitbandiger und spektraler Messung)	–
K_j	Hochrechnungsfaktor für Antenne j (bei code-selektiver Messung)	–
k_q	Divisor für die Messunsicherheit für den Einflussfaktor q	–
n	Anzahl Antennen, die UMTS-Signale eines Netzes abstrahlen	–
$P_{i, j}$	Aktuelle Sendeleistung (ERP) des CPICH von Zelle i , abgestrahlt über Antenne j	W
$P_{j, bew}$	Bewilligte UMTS-Sendeleistung (ERP) für Antenne j (Summe aller Steuer- und Datenkanäle)	W
r	Reflexionsfaktor	–
u	Standardunsicherheit des Messresultates	%
U	Erweiterte Unsicherheit des Messresultates mit 95 % Vertrauenswahrscheinlichkeit	%

U_F	Erweiterte Unsicherheit infolge von Fehlanpassung	%
u_m	Standardunsicherheit der Messeinrichtung	%
U_m	Erweiterte Unsicherheit der Messeinrichtung	%
u_p	Standardunsicherheit der Probenahme	%
U_p	Erweiterte Unsicherheit der Probenahme	%