

Autor H. Lehmann  
OE CT-EEC  
Telefon 031/892 48 48

## **Vergleichsmessungen zur Überprüfung der Messempfehlung für GSM-Basisstationen (Entwurf BUWAL/METAS vom 20. März 2001)**

Ausgabedatum	9.8.01
Dok-ID	U-CITCT-2008
Seitenumfang	15
Anzahl Beilagen	
Ko-Autoren	P. Fritschi CT-EEC, B. Eicher CT-EEC
Referenzen	Messempfehlung für GSM-Basisstationen (Entwurf vom 20. März 2001) Bernardi et al., IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 48, 11, 2000, p. 1996-2002
Schlüsselwörter	Immissionsmessungen, Hochfrequenzmessungen
Ablage	Ei_Kurzbericht_für_SICTA_Dokument_02.doc
Projekttitel	Vollzugshilfen zur NISV: Vergleichsmessungen zur Überprüfung der Messempfehlung für GSM-Basisstationen (Entwurf vom 20. März 2001)
Projektschlüssel	
Auftraggeber	MC
Projektleiter	H. Lehmann CT-EEC
Verteiler	C. Georges, MC-CNV-MSU

9.8.2001 i.V.



(Datum / Unterschrift Autor)

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Dokuments darf ohne Genehmigung des Auftraggebers und/oder Autors in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verwaltet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

**Änderungskontrolle**

Version	Datum	Ausführende Person/Stelle	Art der Änderungen
1.0	8.8.01	Hugo Lehmann	Erstellung

**Prüfung**

Version	Datum	Prüfende Person/Stelle	Bemerkungen
1.0	9.8.01	B. Eicher/P. Fritschi	Review

**Freigabe**

Version	Datum	Freigebende Person/Stelle	Bemerkungen
1.0	9.8.01	B. Eicher	o.k.

**Management Summary**

Die Messung der Feldbedingungen des elektrischen Feldes in Innenräumen ist möglich. Gegenüber den von BUWAL/METAS vorgeschlagenen Messmethoden liefert die räumliche Mittelwertbildung die stabilsten und somit die reproduzierbarsten Resultate. Die Abweichung der Mittelwerte verschiedener Messungen nimmt mit steigender Anzahl Stützstellen grundsätzlich ab. Maximumsuchmethoden zeigen grössere Abweichungen als die Mittelwertmethoden und hängen zudem in stärkerem Masse von der Messperson ab. Die mittleren Feldbedingungen werden von Maximumsuchmethoden bis zu 100% überschätzt. Obwohl die Schnelligkeit und Effizienz einer Mittelwertmethode geringer ist als jene einer Maximumsuchmethode, ist aufgrund der besseren Reproduzierbarkeit und der realistischeren Abbildung der Feldsituation eine Mittelwertmethode vorzuziehen. Eine Breitbandmessung mit Hochrechnung ist zur Überprüfung der Anlagegrenzwerte ungeeignet.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Anforderungen an eine Messvorschrift .....</b>	<b>5</b>
<b>3 Ziel .....</b>	<b>5</b>
<b>4 Vorgehensweise .....</b>	<b>5</b>
<b>5 Beschreibung der Messeinrichtung .....</b>	<b>6</b>
<b>6 Verwendete Messverfahren .....</b>	<b>7</b>
6.1 Schwenkmethode .....	7
6.2 Drehmethode .....	7
6.3 Punktrastermethode .....	7
6.4 Mittelwertmethoden .....	7
6.4.1 Mittelwert über die Rasterpunkte .....	7
6.4.2 „Dummy“ .....	7
<b>7 Messorte .....</b>	<b>8</b>
7.1 Auswahl der Messorte .....	8
7.2 Beschreibung der Messorte .....	9
7.2.1 Direkt gegenüber der Antenne .....	9
7.2.2 Seitlich, zwischen zwei Hauptstrahlrichtungen .....	9
7.2.3 Unterhalb der Antenne .....	9
7.2.4 Geometrisch verteilte Antennen .....	10
7.3 Standortdatenblätter zu den Messorten .....	10
<b>8 Messergebnisse .....</b>	<b>10</b>
8.1 Allgemeine Bemerkungen .....	10
8.2 Rohdaten und deren Aufbereitung .....	10
8.3 Zusammenstellung der Messresultate .....	11
8.3.1 Direkt gegenüber .....	11
8.3.2 Seitlich, zwischen zwei Hauptstrahlrichtungen .....	11
8.3.3 Unterhalb der Antenne .....	12

8.3.4	Geometrisch verteilte Antennen.....	12
<b>9</b>	<b>Interpretation der Messergebnisse .....</b>	<b>12</b>
9.1	Breitbandmessungen mit Hochrechnung.....	12
9.2	Stabilität der Messergebnisse .....	12
9.2.1	Bezüglich der verschiedenen Messverfahren.....	13
9.2.2	Bezüglich der verschiedenen Messfirmen .....	13
9.2.3	Zeitliche Stabilität .....	13
9.3	Vergleich Messwerte - Prognosewerte.....	14
9.4	Fehlerbetrachtung .....	14
<b>10</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>15</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>15</b>

## 1 Einleitung

Obwohl das Phänomen der elektromagnetischen Wellen seit Ende des 19. Jahrhundert theoretisch mit Hilfe der Maxwell'schen Gleichungen verstanden werden kann und wichtige technische Anwendungen gefunden hat, ist die Messung des elektrischen Feldes noch heute eine nicht zu unterschätzende Aufgabe. Durch Reflexion und Absorption entstehen örtlich ausgeprägte Interferenzmuster, welche zudem durch sich ändernde Rahmenbedingungen zeitlichen Schwankungen unterliegen können. Diese physikalischen Eigenschaften elektromagnetischer Wellen stehen diametral zur Anforderung von Reproduzierbarkeit, welche an ein Messverfahren, das juristisch verbindliche Grenzwerte überprüfen soll, gestellt werden muss.

Am 20. März sind in Bern die Vollzugshilfen zur NISV vorgestellt worden. Darunter war auch eine Messempfehlung, ausgearbeitet vom METAS und BUWAL, welche verschiedene Messprozeduren zur Überprüfung des Anlagegrenzwertes bei Mobilfunkanlagen vorschlagen. In einer Vernehmlassungsphase von einem halben Jahr sollen erste Erfahrungen mit den Vorschlägen gemacht werden. Da diese Vorgehensweise wahrscheinlich nicht zu einem systematischen Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren führen wird, haben wir ein definiertes Messzenario für Vergleichsmessungen ausgearbeitet. An vier unterschiedlichen, aber typischen Standorten messen drei unterschiedlichen Messfirmen nach den in dem BUWAL/METAS Vorschlag genannten Verfahren. Zusätzlich soll die von uns vorgeschlagene Mittelwertbildung bei der Punktrastermethode und einer von uns vorgestellten Geometrie (nachfolgend als „Dummy“ bezeichnet) als weitere Möglichkeit hinzugezogen und von allen drei Messfirmen eingesetzt werden.

## 2 Anforderungen an eine Messvorschrift

Ein Messverfahren muss folgende, wesentlichen Anforderungen erfüllen:

1. Reproduzierbarkeit (Unabhängigkeit bezüglich Messpersonen und Messinstrumente)
2. Die Messung sollte die herrschenden Feldbedingungen realistisch darstellen können (sollte also wissenschaftlich und technisch fundiert sein)
3. Praktische Durchführbarkeit, Effizienz, Wirtschaftlichkeit

Die ersten zwei Punkte haben einen grossen Einfluss auf den letzten der aufgeführten Punkte. Will man die Feldbedingungen realistisch und insbesondere reproduzierbar erfassen, müssen Einschränkungen in der Effizienz und Wirtschaftlichkeit in Kauf genommen werden.

## 3 Ziel

Diese Vergleichsmessungen sollen einerseits die vom BUWAL/METAS vorgeschlagenen Messverfahren gegeneinander vergleichen. Sie werden daher Aufschluss über die Reproduzierbarkeit der Erfassung der Feldstärkewerte in Innenräumen und über die Streuung der Messwerte liefern. Andererseits sollen sie aber auch aufzeigen, wie ein Verfahren, welches die bestmögliche Erfassung der Immissionssituation erlaubt, aussehen sollte.

## 4 Vorgehensweise

Um die Messungen einerseits breiter abzustützen und andererseits die nötige Manpower in relativ kurzer Zeit zu mobilisieren, wurden die Messungen zwischen drei Messbüros aufgeteilt. Die drei Messteams waren die Maxwave AG (A), Montena emc (B) und Swisscom CT-EEC (C).

CT-EEC hatte dabei den Lead über die Messungen inne. Die Messfirmen haben mit ihrer eigenen, unterschiedlichen Ausrüstung an insgesamt vier Standorten gemessen. So wird die Variabilität zwischen den verschiedenen Messfirmen sowie die Reproduzierbarkeit zu verschiedenen Messzeiten erfasst. Zusätzlich wurde an je einem Standort von je einer Firma eine Nachmessung gemacht.

Folgender Messplan ist befolgt worden:

Tabelle 1: Messplan

Messsituation	Messfirma	# Messungen
Unterhalb der Antennen	A,B,C	3
Direkt gegenüber den Antennen	A,B,C	3
Seitlich, zwischen den Hauptstrahlrichtungen	A,B,C	3
Geometrisch verteilte Antennen	A,B,C	3
Zusätzliche Nachmessung an einem Messort	A,B,C	3
Total	5*A, 5*B, 5*C	15

Es messen also alle 3 Messinstitute an allen der insgesamt 4 Standorte. Bis dato liegen von 12 Messungen an allen vier Standorten die gesamten Datensätze vor. Aufgrund von technischen Problemen war es der Maxwave AG noch nicht möglich alle Messungen komplett durchzuführen. Die Messungen werden aber nächstens noch vervollständigt.

## 5 Beschreibung der Messeinrichtung

Die Messungen wurden von den zwei unabhängigen Messfirmen und Swisscom CT-EEC mit unterschiedlichen Messgeräten derselben Gerätetypen durchgeführt. Das heißt mit Dipolantennen (breitbandig oder abgestimmt), mit logarithmisch periodischen Antennen mit größerer Richtempfindlichkeit sowie mit einem Spektrumanalysator zur Signalmessung. Die Messungen wurden gemäß Empfehlung des BUWAL durchgeführt. Einzige Abweichung war der Gebrauch der Messbandbreite von 100 kHz im Gegensatz zu den vorgeschlagenen 300 kHz. Es hat sich jedoch gezeigt, dass daraus keine bedeutenden Abweichungen entstehen. Die Messbandbreite musste aufgrund der Kanalabstände zu gehoppten TCH's so gewählt werden, um fehlerhafte Pegelmessungen zu vermeiden.

Schon zu Beginn der Messkampagne haben wir bei CT-EEC die Messsoftware LabVIEW 5.0 von National Instruments eingesetzt. Kernanwendung dieser Software ist die Messgerätesteuerung über die IEC 488 Schnittstelle, über die die meisten professionellen Messgeräte verfügen. Im Laufe der Projektaktivitäten entstanden zur Effizienzsteigerung immer mehr Programme, die rein zum Ersatz der manuellen Bedienung am Spektrumanalysator zur Erfassung der Daten und zum Ersatz der manuellen Auswertung der Resultate per Taschenrechner und Notizzettel bzw. EXCEL-Sheet dienten.

Als wir die externen Messfirmen miteinbezogen, drängte sich der Einsatz der vorhandenen Messsoftware auf, um unnötigen kostensteigernden Messaufwand zu vermeiden und um alle Messverfahren plus Dummy an einem Standort an einem Tag von einer Messfirma messen zu können. Die Sitzungszimmer und Privatwohnungen konnten nicht beliebig beansprucht werden. Somit entschlossen wir uns die entstandene Messsoftware für die andern Messgerätetypen anzupassen und den Messfirmen kompilierte Versionen d.h. ohne Programmcode zugänglich zu machen.

Die mit der Messsoftware erzielten Ergebnisse können jederzeit manuell verifiziert und der Formalismus unabhängig auch z.B. gemäss der Messempfehlung des BUWAL nachvollzogen werden.

## **6 Verwendete Messverfahren**

Die verwendeten Messverfahren sind einerseits die vom BUWAL/METAS in der Messempfehlung für GSM Basisstationen (Entwurf vom 20. März 2001) beschriebenen (6.1-6.3). Andererseits sind auch zwei Methoden, welche eine Mittelwertbildung vollziehen, angewandt worden (6.4.1 & 6.4.2).

### **6.1 Schwenkmethode**

Gemäss der Messempfehlung für GSM-Basisstationen (Entwurf vom 20. März 2001). Kapitel 6.1.1 (Seite 17).

### **6.2 Drehmethode**

Gemäss der Messempfehlung für GSM-Basisstationen (Entwurf vom 20. März 2001). Kapitel 6.1.2 (Seite 18).

### **6.3 Punktrastermethode**

Gemäss der Messempfehlung für GSM-Basisstationen (Entwurf vom 20. März 2001). Kapitel 6.1.3 (Seite 18).

Die gewählte Verteilung der Rasterpunkte über der Kreisfläche ist in zwei verschiedenen Varianten realisiert worden:

1. Auf den Höhen 75, 125 und 175 cm wurden je 21 äquidistante Punkte im Abstand von 22.5 cm in folgender Anordnung durchgemessen (Montena emc und CT-EEC):

```
* * *
* * * *
* * * * *
* * * * *
* * *
```

2. Auf den Höhen 75, 125 und 175 cm wurden auf drei Kreisscheiben je 8 Punkte (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°) gemessen. Der Radius der drei Kreisscheiben betrug dabei 24, 40 und 50 cm (Maxwave AG).

### **6.4 Mittelwertmethoden**

#### **6.4.1 Mittelwert über die Rasterpunkte**

Mit den bei der Punktrastermethode (vergleiche 6.3) anfallenden Messwerten wurde ein arithmetischer Mittelwert über die erfassten Rasterpunkte gebildet, da aus wissenschaftlicher Sicht [Lit.1] die Erfassung eines räumlichen Mittelwertes geeigneter für die Beschreibung der Feldbedingungen in einem Raum erscheint als ein Maximalwert, der zeitlichen und örtlichen Schwankungen unterliegen kann.

#### **6.4.2 „Dummy“**

Aufgrund der vorgängig gemachten Erfahrungen mit dem zur Verfügung stehendem Platz in normalen Wohnungen, haben wir eine zusätzliche Geometrie vorgeschlagen, die weniger Platz braucht und zudem dem

Körper eines stehenden Menschen nachempfunden ist. Dieses von uns „Dummy“ getaufte Verfahren besteht aus folgender Anordnung der Messpunkte:

Auf einer Höhe von 1.5 m werden in 5 cm Abständen Messpunkte wie folgt akquiriert:

10  
11  
12  
13

Zudem sind am Punkte 5 (Mitte des Kreuzes) in 10 cm Abständen die Höhen 75, 85, 95, 105, 115, 125, 135, 145, 155, 165 und 175 cm zu messen. Es entsteht also eine Art Kreuz, das in einer einfachen dreidimensionalen Darstellung folgendermassen aussieht:

So entstehen insgesamt 24 Messpunkte. Diese Figur wird am Punkt des höchstmöglichen Feldes platziert. Die Messung ist somit weniger aufwendig als die ganze Punktrastermethode und der Dummy kann zudem ohne grosse Probleme in jeder Wohnung eingesetzt werden, ohne die geforderten Mindestabstände zu Gegenständen und Wänden zu verletzen. Der Mittelwert sollte aber trotzdem ein gutes und reproduzierbares Bild der Feldsituation am Punkt maximaler Immission ergeben.

## 7 Messorte

## 7.1 Auswahl der Messorte

Jeder Messort bietet durch seine unterschiedliche Geometrie, Reflexions- und Absorptionseigenschaften gänzlich andere Rahmenbedingungen für die Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen. Wir haben vier typische Situationen unterschieden: unterhalb, seitlich, direkt gegenüber und geometrisch versetzte Antennen. Die meisten realen Situationen setzen sich aus einer Kombination dieser vier Typen zusammen.

## 7.2 Beschreibung der Messorte

### 7.2.1 Direkt gegenüber der Antenne

Ein Messort in direkt gegenüberliegender Lage zu einer Zelle einer Basisstation wurde an der Kelterstrasse 93 in 3018 Bern Bümpliz gefunden. Die Basisstation ist sowohl mit GSM 900, als auch mit GSM 1800 ausgerüstet. Die Situation direkt gegenüber wird durch die Höhe des Wohnhauses und durch die Abwärtsneigung der Antennen erreicht.

Das Gebäude ist vermutlich zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts gebaut worden und ist Teil einer Häuserzeile. Die hölzerne Dachkonstruktion, ein Walmdach, ist gedeckt mit Tonziegeln. Das Dach ist zweistöckig, Estrich und Dachwohnung. In der Dachwohnung liegt der Messort. Alle Fenster der Dachwohnung befinden sich in Lukarnen mit Sattel. Die Lukarnen als rechtwinkliger Fortsatz des Daches bilden eine Art kurzen Gang vom Fenster zum Wohnraum. Durch die Messvorschrift bedingt, die einen freien Platz (frei von Einrichtungsgegenständen) von brutto 2 m Radius fordert bei 2.25 m Höhe, konnte damit nur im eigentlichen Wohnraum ein vorschriftsgerechtes Messvolumen definiert und gemessen werden.

Die Konstruktion des Hauses ist weitgehend nichtmetallisch (Backstein) ausgeführt, wobei übliche metallische Konstruktionsteile wie Dachrinnen, horizontale Stangen zum Verhindern des Schneearbrutsches im Winter, Blechabdeckungen an den Knickstellen des Daches, Wasser- und Heizungsrohre, Elektroleitungen etc. durchaus vorhanden sind.

### 7.2.2 Seitlich, zwischen zwei Hauptstrahlrichtungen

Ein Messort, der zwischen den Hauptrichtungen zweier Zellen einer Basisstation liegt, wurde am Zikadenweg 35 in 3006 Bern gefunden. Diese Basisstation ist nur mit GSM 900 ausgerüstet. Die seitliche Situation ist begleitet von einem Höhenunterschied. Eine noch idealere Form des seitlichen Versatzes, bei gleicher Höhe von Antenne und Messort war in der gegebenen Zeit nicht zu finden.

Das Swisscom Gebäude beherbergt im obersten Stockwerk eine Cafeteria und zwei Schulungsräume. Im Raum 10 A befand sich der Messort. Das oberste Stockwerk ist hauptsächlich aus Metallteilen konstruiert. Insbesondere das Dach, eine Wellblechkonstruktion. Die Fenster, die geöffnet werden können, machen ca. einen knappen Viertel der Fensterfläche aus, die der Basisstation gegenüber steht. Die stark metallgeprägte Bausubstanz wurde absichtlich gewählt, um auch den Einfluss dieses Freiheitsgrads auf die Messresultate sicherzustellen.

### 7.2.3 Unterhalb der Antenne

Ein Messort, möglichst unmittelbar unterhalb einer GSM-Antenne wurde an der Poststrasse 25 in 3072 Ostermundigen gefunden. Wiederum ein Gebäude der Swisscom. Die Basisstation ist sowohl mit GSM 900 als auch mit GSM 1800 bestückt.

Da die Feldstärken bei Situationen unterhalb der Antenne von Basisstationen relativ klein sind, wurde das Messvolumen unter vier Dachluken positioniert. Zwei der vier Dachluken wurden geöffnet. Die Dachluken sind aus Plexiglas. Die Decke des Gebäudes, ein Flachdach, besteht aus armiertem Beton.

Das Sitzungszimmer Raum 414 ist für einen modernen Büroraum typisch mit metallischen Gegenständen ausgerüstet. So sind zum Beispiel Lampenbahnen zimmerlang aus Metall von der Decke herunterhängend montiert. Deckenelemente sind aus gelochtem Metallblech.

#### **7.2.4 Geometrisch verteilte Antennen**

Um an einem Ort mit geometrisch verteilten Antennen und daraus resultierenden, unterschiedlichen Immissionsrichtungen messen zu können, wurde an der Sägestrasse 65 in 3098 Köniz ein Zusammenzug von einer Orange, Sunrise und einer Swisscom Basisstation prognostiziert und gemessen. Die Basisstation wurde sowohl mit GSM 900 als auch mit GSM 1800 definiert. Gemäss NISV gelten diese 3 Anlagen jedoch immissionstechnisch als separate Anlagen.

Im Gebäude wurde im obersten Stockwerk (4. Stock) gemessen. Das oberste Stockwerk ist als Aufbau auf dem Flachdach realisiert. Das Flachdach dieses Aufbaus ist mit einem Metalldach überspannt. Das Sitzungszimmer, in dem gemessen wurde, ist mit grossen Fenstern versehen, welche nur geringe Dämpfungseigenschaften besitzen. Die Gebäudekonstruktion besteht aus Metall- und Betonelementen. Die Reflexionseigenschaften sind - beurteilt für ein heutiges Bürogebäude - eher durchschnittlich bis niedrig.

### **7.3 Standortdatenblätter zu den Messorten**

Für jeden der vier Messorte ist zum Vergleich mit den Messungen eine Berechnung nach dem Standortdatenblatt BUWAL (Entwurf 98) vorgenommen worden, wobei realistischere Dämpfungen (vor allem unter und hinter) der Antenne von -40dB berücksichtigt worden sind. Die entsprechenden Werte sind in den Tabellen mit den Messwerten im Kapitel 8 zu finden.

## **8 Messergebnisse**

### **8.1 Allgemeine Bemerkungen**

Bei den hier präsentierten Resultaten handelt es sich immer ausschliesslich um auf die maximal definierte Leistung hochgerechnete Messresultate.

### **8.2 Rohdaten und deren Aufbereitung**

Es würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen, alle Rohdaten zu präsentieren. Aus diesem Grunde werden im Folgenden die Resultate in tabellarischer Form wiedergegeben.

Bei der Schwenk- und Drehmethode (vergleiche 6.1, resp. 6.2) ist das Resultat der Messung ein Spektrum über den relevanten Spektralbereich, während für die Punktraster- und die Mittelwertmethoden (siehe 6.3 und 6.4) jeweils die Pegel der verschiedenen Messungen an einem Rasterpunkt anfallen.

## 8.3 Zusammenstellung der Messresultate

### 8.3.1 Direkt gegenüber

Tabelle 2: Zusammenstellung der Messresultate direkt gegenüber

Prognosewert: [V/m]	Methode						
	Maxhold Schwenk (6.1)	V/m Dreh (6.2)	Punktraster Max (6.3)	V/m Min.	Mittelwert Punktraster V/m (6.4.1)	Δmax (6.1-6.3) V/m %	Breitband V/m
CT-EEC_1	1.446	1.501	1.426	0.433	0.815	0.075	5.261
Montena	1.427	1.643	1.836	0.459	0.862	0.409	24.878
CT-EEC_2	1.707	1.621	1.638	0.556	0.883	0.086	5.278
Δmax V/m	0.279	0.143	0.410	0.123	0.068		
Δmax %	19.57	9.51	28.78	28.48	8.34		

Die Dummymessung ist bei dieser ersten Messung nicht in die Tabelle aufgenommen worden, da nur zwei Messungen mit gleicher Geometrie vorhanden sind. Die Abweichung dieser zwei Messungen beträgt jedoch blass 10%. Es handelte sich hierbei um den ersten Messort während der Kampagne, wo noch Abstimmungsbedarf in der vorgeschlagenen Geometrie bestand. CT-EEC\_1, resp. CT-EEC\_2 bedeutet hierbei, dass diese Messfirma an diesem Ort die Nachmessung durchgeführt hat.

### 8.3.2 Seitlich, zwischen zwei Hauptstrahlrichtungen

Tabelle 3: Zusammenstellung der Messresultate seitlich, zwischen zwei Hauptstrahlrichtungen

Prognosewert: [V/m]	Methode							Δmax
	Maxhold Schwenk (6.1)	V/m Dreh (6.2)	Punktraster Max (6.3)	V/m Min.	Mittelwerte Punktraster (6.4.1)	Dummy (6.4.2)	V/m Max	
CT-EEC	0.468	0.483	0.421	0.135	0.244	0.291	0.368	0.183
Montena	0.471	0.476	0.521	0.125	0.263	0.333	0.417	0.178
Maxwave	0.575	0.612	0.664	0.106	0.339	0.425	0.505	0.281
Δmax V/m	0.106	0.136	0.243	0.029	0.095	0.133	0.137	0.102
Δmax %	22.72	28.49	57.73	27.35	38.81	45.85	37.10	57.26

### 8.3.3 Unterhalb der Antenne

Tabelle 4: Zusammenstellung der Messresultate unterhalb der Antenne

Prognosewert: [V/m]	0.29	Methode									
		Maxhold V/m		Punktraster		Mittelwerte V/m		Dummy		Δmax (6.1-6.3) V/m %	
Messfirma		Schwenk (6.1)	Dreh (6.2)	Max (6.3)	Min	Punktraster (6.4.1)	Max (6.4.2)	Min	Max (6.4.2)	Min	Max (6.4.2)
CT-EEC	1.312	1.280	1.141	0.239	0.625	0.905	1.181	0.590	0.172	15.037	
Montena	1.730	1.580	1.863	0.275	0.748	1.297	1.828	0.627	0.283	17.919	
Maxwave	1.944	2.381	2.196	0.332	0.843	0.835	1.253	0.416	0.437	22.486	
Δmax V/m	0.632	1.101	1.056	0.093	0.219	0.462	0.646	0.211			
Δmax %	48.17	86.02	92.55	38.91	34.98	55.37	54.70	50.80			

### 8.3.4 Geometrisch verteilte Antennen

Tabelle 5: Zusammenstellung der Messresultate bei geometrisch verteilten Antennen

Prognosewert: [V/m]	3.16	Methode										Breit- Band V/m
		Maxhold V/m		Punktraster		Mittelwerte V/m		Dummy		Δmax (6.1-6.3) V/m %		
Messfirma		Schwenk (6.1)	Dreh (6.2)	Max (6.3)	Min	Punktraster (6.4.1)	Max (6.4.2)	Min	Max (6.4.2)	Min	Max (6.4.2)	Min
CT-EEC	2.491	2.380	2.603	0.663	1.418	1.652	1.946	1.175	0.223	9.365	6.200	
Montena_1	3.587	2.854	2.375	0.673	1.415	1.762	2.091	1.125	1.211	50.985	8.4	
Montena_2	2.999	2.323	2.660	0.777	1.423	1.765	2.067	1.326	0.677	29.126		
Δmax V/m	1.096	0.532	0.285	0.114	0.008	0.113	0.146	0.200				
Δmax %	44.00	22.88	11.99	17.14	0.58	6.84	7.48	17.81				

## 9 Interpretation der Messergebnisse

### 9.1 Breitbandmessungen mit Hochrechnung

Die durchgeföhrten Breitbandmessungen zeigen auf, dass eine Breitbandmessung mit nachfolgender Hochrechnung mit Worst-Case-Annahmen die Feldsituation krass überschätzt und daher nicht sehr aussagekräftig ist (vergleiche Resultate in 7.3.1 und 7.3.4). Aus diesem Grunde wurden breitbandige Messungen bei den Messungen seitlich und unterhalb zu den Antennen nicht mehr weitergeföhr. Eine Messung mit einer Breitbandsonde kann nur zu einem ersten Eindruck der Feldsituation verhelfen, aber nichts zur Überprüfung des Anlagegrenzwertes in der Nähe der Basisstation, der selektiv gemessen werden muss, beitragen.

Eine gültige Aussage kann nur betreffend der aktuellen Immissionssituation gegeben werden. Zeigt die Breitbandsonde einen Wert, der kleiner als der Anlagegrenzwert ist, an, so kann lediglich davon ausgegangen werden, dass zu diesem präzisem Zeitpunkt die Anlage den Grenzwert einhält.

## 9.2 Stabilität der Messergebnisse

Im folgenden sollen die Messresultate aufgrund ihrer Stabilität bezüglich verschiedener Parameter überprüft werden.

### 9.2.1 Stabilität bezüglich der verschiedenen Messverfahren

Vergleicht man die drei vom BUWAL vorgeschlagenen Maximumsuchmethoden (6.1-6.3) auf ihre Stabilität bezüglich der Messwerte (vergleiche Tabelle, graue Spalte), erkennt man, dass schon innerhalb einer Messfirma mögliche Abweichungen der Werte von bis maximal 51% entstehen können (am gleichen Messort!). Im Mittel ist eine Abweichung der Messwerte dieser drei Methoden von 18% erreicht worden. Diese Abweichungen können nur schwer mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen wie Wetter, unterschiedliche Möblierung und Änderungen in der Messausrüstung erklärt werden, da die Messungen mit den verschiedenen Methoden an ein und demselben Tag gemacht worden sind. Sie sind also methodisch bedingt. Tests mit unterschiedlichen Messpersonen und gleicher Ausrüstung haben zudem gezeigt, dass die Resultate stark von der Messperson abhängen.

Es ist zu erwarten, dass die Abweichungen beim Vergleich der Werte der verschiedenen Messfirmen am gleichen Messort noch grösser ist.

### 9.2.2 Stabilität bezüglich der verschiedenen Messfirmen

Die untenstehende Tabelle zeigt die mittlere prozentuale Abweichung von je drei Messungen mit einer einzelnen Messmethoden gemittelt über die vier verschiedenen Messorte:

Tabelle 6: Rangreihe der prozentualen Abweichungen der einzelnen Messmethoden

Rang	Methode	Mittlere prozentuale Abweichung von je 3 Messungen an 4 verschiedenen Messorten [%]	Anzahl Messpunkte
1	Mittelwert über Rasterpunkte (6.4.1)	21 (39 max. Abweichung)	63, bzw. 72
2	Schwenkmethode (6.1)	34 (48 max. Abweichung)	
3	Mittelwert über Dummy (6.4.2)	36 (55 max. Abweichung)	24
4	Drehmethode (6.2)	37 (86 max. Abweichung)	
5	Punktraster Maximalwert (6.3)	48 (91 max. Abweichung)	

Man erkennt, dass die mittlere prozentuale Abweichung für den räumlichen Mittelwert klar die kleinste Abweichung zwischen den Messungen der verschiedenen Messfirmen zeigt. Die anderen Messmethoden liegen mit weit grösseren Abweichungen zurück. Der Mittelwert über die Messpunkte des Dummies mit 36% entspricht ebenfalls den Erwartungen, da mit blos 24 Stützstellen eine grössere Abweichung des Mittelwerts zu erwarten ist. Theoretisch sollten die Abweichung vom Mittelwert für 24 Punkte 1.6 mal grösser sein als bei Messungen mit 63 Stützstellen. Dies ist näherungsweise auch in den experimentellen Abweichungen der Fall ( $36/21=1.7$ .). Betrachtet man die maximalen Abweichungen ändert sich das Bild nicht, d.h. auch hier ergibt eine Mittelwertbildung über die 63 Punkte die stabilsten Resultate.

### 9.2.3 Zeitliche Stabilität

Um einen Aufschluss über die zeitliche Stabilität der Daten zu erhalten, kann man einerseits die Tabelle des vorangehenden Kapitels zu Hilfe ziehen oder man muss die Nachmessungen der verschiedenen Messinstitute miteinander vergleichen. Da aber, wie in Kapitel 9.2.1 gezeigt worden ist, auch die Messung einer Messfirma grossen Schwankungen unterliegen kann, ist natürlich auch der zeitliche versetzte Messung der gleichen

Messfirma mit derselben Unsicherheit behaftet. Dies wird sofort klar, wenn man die Abweichungen der zwei in den Tabellen der Kapitel 8.3.1. und 8.3.4 zu findenden Nachmessung von CT-EEC (\_1 und 2) und Montena emc (\_1 und \_2) gegeneinander vergleicht. Aber auch hier stellt sich die Mittelwertmethode klar als stabilste Methode heraus, insbesondere im Falle der geometrisch verteilten Antenne (8.3.4) kommt dies klar zum Ausdruck. Hier beträgt die Abweichung der Mittelwertmethode nur gerade 0.58% während Schwenk- und Drehmethode mit 44%, resp. 23% Abweichung doch schon eine erhebliche Variation aufzeigen.

### 9.3 Vergleich Messwerte - Prognosewerte

Für den Vergleich der Messwerte mit den berechneten Prognosewerten wurden Immissionsberechnungen gemäss den aktuell gültigen Standortdatenblättern durchgeführt, mit dem Unterschied, dass die realen Werte der vom Hersteller gelieferten Antennendiagramme eingesetzt wurden.

Ein Vergleich der verschiedenen Messwerte (ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit) mit den prognostizierten Werten (Tabellen 2 bis 5), zeigt auf, dass die Messwerte meistens unterhalb der Prognosewerte liegen. Ausnahme ist der Fall unter der Antenne. Die genauen Ursachen dieser Diskrepanz müssen noch untersucht werden. Im Falle des Standortes gegenüber der Antennen wurden relativ zur Berechnung kleine Werte gemessen. Hier spielt jedoch die Baustruktur (Ziegeldach mit enger Lukarne) eine wesentliche Rolle. Zudem konnte aus Platzgründen nicht in der Nähe des Fensters gemessen werden.

Seitlich, zwischen den Hauptstrahlrichtungen und im Falle der verteilten Antennen, haben wir jedoch klar den Fall, wo die Maximumsuchmethoden – würde man den Fehler der Messung zum Messwert hinzuzählen (wie vom BUWAL verlangt) – über oder bei den prognostizierten Werten zu liegen kommen. Dies zeigt auf, dass die Maximumsuchmethoden die Prognosewerte überschätzen können. Bei der Berücksichtigung eines Mittelwertes als Messwert würde dies nicht der Fall sein.

Diese Tatsache kann auch auf theoretischer Basis bestätigt werden [Lit. 1]. In dieser Arbeit wurden realistische Fälle numerisch untersucht. Wir haben die entsprechenden Geometrien und Resultate mit der Berechnung gemäss NISV-Standortdatenblatt überprüft.

Tabelle 7: Vergleich Messwerte - Prognosewerte

Fall	$E_{\max \text{ numerisch}}$ V/m	$E_{\text{mittel numerisch}}$ V/m	$E_{\text{BUWAL-Formel}}$ V/m
Gegenüber der Antenne	8.1	5.5	5.4
Unterhalb der Antenne	1.3	1.1	1.1

Auch hier stimmt der numerisch ermittelte Mittelwert besser mit den durch die BUWAL-Formel (Kugelwellenausbreitung) überein, als die durch die Simulation ermittelten Maximalwerte.

### 9.4 Fehlerbetrachtung

Da wir mit konventionellen Messgeräten und Antennen gearbeitet haben, ändert sich die Fehlerbetrachtung nicht. Einzig die höhere Reproduzierbarkeit einer Mittelwertbildung schlägt sich in einem kleineren Gesamtfehler nieder. Andere Fehlerquellen wie Fehlanpassungen, Kalibrationsunsicherheiten, Einflüsse der Kabel und anderer Gegenstände auf die Antennencharakteristik sind jedoch Fehlerquellen, die das ihre zum Gesamtfehler

ler beitragen, so dass der Gesamtfehler bei der Berücksichtigung von Mittelwertmethoden nur geringfügig kleiner werden wird. Dies ändert jedoch nichts an der Tatsache, dass die Mittelwerte besser reproduzierbar sind.

## 10 Schlussfolgerungen

Die räumliche Mittelwertbildung liefert die stabilsten und somit die reproduzierbarsten Resultate. Die Abweichung der Mittelwerte verschiedener Messungen nimmt mit steigender Anzahl Stützstellen grundsätzlich ab. Die mittlere Abweichung des Mittelwertes ist umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Anzahl der durchgeföhrten Einzelmessungen.

Die Maximumsuchmethoden liefern Messwerte, welche die mittleren Feldbedingungen bis zu 100% überschätzen. Zudem ist die Stabilität der Messwerte bei diesen Methoden geringer als bei den Mittelwertmethoden. Die Forderung nach Reproduzierbarkeit kann daher durch diese Maximumsuchmethoden weniger gut erfüllt werden.

Verschiedene Methoden erzielen unterschiedliche Messresultate. Darum ist nur eine einzige Methode zur Überprüfung des Anlagegrenzwertes vorzuschlagen. Je genauer das Messverfahren die Messung (Messpunkte, Antennen, Empfänger) definiert sind, desto reproduzierbarer sind auch die Resultate.

Die vom BUWAL vorgeschlagene breitbandige Messung kann nicht zur messtechnischen Überprüfung der Anlagegrenzwerte herangezogen werden. Diese Methode kann bloss einen Hinweis auf die Gesamtmissionen geben. Eine Hochrechnung führt in den allermeisten Fällen zur Überschätzung der Feldsituation. Eine frequenzselektive Messung ist also unumgänglich. Für einen ersten Überblick kann ein Breitbandmessgerät aber hilfreiche Informationen liefern.

Der Ort der voraussichtlich höchsten Feldstärke kann erfahrungsgemäss durch die Messfirmen nach Prüfung der Situation vor Ort recht gut abgeschätzt werden. So fanden bei der Messkampagne die verschiedenen Messpersonen, bei Einhaltung der geforderten Mindestabstände, relativ gut übereinstimmende Messpunkte. Um bei einer möglichen Nachmessung die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, ist es unabdingbar, die gewählten Messpunkte nachvollziehbar zu dokumentieren.

Das vom Entwurf des 20. März verlangte, freistehende Messvolumen ist für durchschnittliche Wohn- und Arbeitszimmerverhältnisse nur selten ohne ein Umstellen und Herausräumen der Möbel zu realisieren. Die in einem üblichen Wohnraum vorhandenen Feldverteilung kann also nicht wirklichkeitsgetreu bestimmt werden. Die Mindestabstände sind aber ganz klar erforderlich. Eine Lösung kann durch eine dichtere Packung der Messpunkte am Ort, wo die Messperson das Maximum erwartet, gefunden werden. Die vom BUWAL/METAS vorgeschlagenen drei Messhöhen (75, 125, und 175 cm) in der Punktrastermethode sind arbiträr gewählt. Um die Feldbedingungen realistischer abzubilden, sollte eine bessere vertikale Verteilung der Messpunkte angestrebt werden. Der hier vorgeschlagene Dummy erfüllt alle dieser Forderungen. Um die mittlere Abweichung der Dummymethode zu verkleinern, muss jedoch die Anzahl Stützstellen erhöht werden (grösser 50).

In einem ausführlichen Schlussbericht über die Vergleichsmessungen werden die gesamten Resultate weiter analysiert und die Kriterien, welche zu dem, im Vorschlag der Mobilfunkbetreiber beschriebenen Messmethode geführt haben, vollständig beschrieben.

## 11 Literaturverzeichnis

- [Lit. 1] Bernardi et al., IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 48, 11, 2000, p. 1996-2002

