

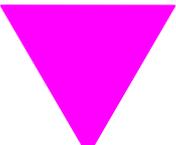


Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg

Beschreibung und wissenschaftliche Bewertung des Messvorhabens

Autoren: Prof. Dr.-Ing. U. Bochtler
Dipl.-Ing. Roland Eidher
Prof. Dr.-Ing. M. Wuschek

Juli 2003



Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg

Beschreibung und wissenschaftliche Bewertung des Messvorhabens

Auftraggeber: Landesanstalt für Umweltschutz
Hertzstr. 173
76187 Karlsruhe

Auftragnehmer: botronic gmbh
Jurastraße 10
70565 Stuttgart
Tel.: +49 (7 11) 6 87-48 42
Fax: +49 (7 11) 6 87-68 30
eMail: info@botronic.de

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Bochtler, Fachhochschule Aschaffenburg

Dipl.-Ing. Roland Eidher, botronic gmbh, Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek, Fachhochschule Deggendorf

Ort und Datum: Aschaffenburg/Stuttgart/Regensburg, den 06. Juli 2003

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abkürzungsverzeichnis	4
1 Aufgabenstellung	5
2 Durchführung der Messungen	7
2.1 Messgrößen für hochfrequente elektromagnetische Felder	7
2.2 Messorte	7
2.3 Verwendete Messgeräte und Messverfahren	8
2.4 Bewertung	11
2.5 Qualitätssicherung	13
2.6 Messunsicherheit	14
2.7 Einfluss durch zeitlich schwankende Signalabgabe	16
2.8 Besonderheiten bei der Messung der Felder von GSM-Mobil- funktensendern	17
2.9 Besonderheiten bei der Messung der Felder von Pulsradarsendern	19
3 Zusammenfassung und Bewertung	20
4 Literaturverzeichnis	21
Anhang A – Messequipment	23

Abkürzungsverzeichnis

Liste der verwendeten Formelzeichen (mit Einheit)

E	[V/m]	Elektrische Feldstärke
ERP	[W]	Äquivalente Strahlungsleistung bezogen auf einen $\lambda/2$ -Dipol (effective radiated power)
H	[A/m]	Magnetische Feldstärke
S	[W/m ²]	Leistungsflussdichte

Liste der verwendeten Abkürzungen

BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft; Schweiz
DAB	Digitaler Rundfunk (digital audio broadcast)
DCF77	über Langwelle (77,5 kHz) ausgesendetes Zeitsignal
ERP	Äquivalente Strahlungsleistung (effective radiated power)
GSM	Mobilfunkstandard (global system for mobile communications)
ICNIRP	Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlen (international commission on non-ionizing radiation protection)
KW	Kurzwelle
LMK	Langwelle, Mittelwelle und Kurzwelle
LW	Langwelle
METAS	Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung Schweiz
MW	Mittelwelle
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post
TV	Fernsehen (Television)
UKW	Ultrakurzwelle
UMTS	neuer mobiler Kommunikationsstandard (universal mobile telecommunications system)
WHO	Weltgesundheitsorganisation (world health organization)

1 Aufgabenstellung

Im Oktober 2001 wurde im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg eine umfangreiche Messkampagne gestartet, deren Zweck es ist, genauere Informationen über die Immissionssituation der Bevölkerung durch hochfrequente elektromagnetische Felder zu erhalten. Die Konzeption und Koordination des Messprogramms liegt in den Händen der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Die Firma botronic, Stuttgart, wurde hierbei mit der Detailplanung und der Durchführung von Messungen beauftragt.

Um repräsentative Aussagen treffen und um Vergleiche zwischen unterschiedlichen Verursachern (z.B. UKW/TV/Mobilfunk) ziehen zu können, wurde bei der Auswahl der Messpunkte ein flächenorientierter Ansatz gewählt. Die Messpunkte befinden sich im Freien auf einem regelmäßigen Raster von 2 x 2 km, wobei große, besonders dicht besiedelte Teile von Baden-Württemberg abgedeckt werden. Die insgesamt 895 Messpunkte liegen in den Regionen Heidelberg/Mannheim, Freiburg, Oberschwaben und im Großraum Stuttgart.

Der Schutz der Bevölkerung vor den Wirkungen elektromagnetischer Felder ist in Deutschland seit Januar 1997 in der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) [1] verbindlich geregelt. Die in dieser Verordnung festgelegten Immissionsgrenzwerte entsprechen den aktuellen Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO), der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierenden Strahlen (ICNIRP), des Europäischen Rates sowie der deutschen Strahlenschutzkommission [2,3,4].

Die Intensität elektromagnetischer Wellenfelder wird durch die Feldstärke oder die Leistungsflussdichte beschrieben. Welche Feldstärke- bzw. Leistungsflussdichtewerte an bestimmten Orten auftreten, lässt sich im allgemeinen nur näherungsweise berechnen, da neben der Leistung der Sendeanlagen verschiedene andere Einflussfaktoren zusätzlich eine Rolle spielen können. Als Beispiel seien hier Antennencharakteristik, Topographie, Bewuchs (vor allem Bäume), und Bebauung genannt.

Um zuverlässige Aussagen über die Stärke hochfrequenter Felder in der Fläche treffen zu können, sind daher Messungen in der Regel das geeignetere Instrumentarium. Ein Vergleich der Messergebnisse mit den gesetzlichen Grenzwerten für elektromagnetische Felder erlaubt eine Bewertung der Immissionssituation vor Ort.

Die Ergebnisse der Messungen in Baden-Württemberg sollen insbesondere der Beantwortung folgender Fragen dienen:

- **Wie groß sind die Immissionen, die durch Funksendeanlagen an den betrachteten Messpunkten verursacht werden, in Relation zum gesetzlichen Grenzwert?**
- **Wie verteilen sich die Immissionen auf verschiedene Funkdienste (z.B. Tonrundfunk, TV, Mobilfunk)?**
- **Zeigen sich bei den Immissionen signifikante Unterschiede je nach geographischer Lage (z. B. Stadt / ländlicher Raum)?**
- **Gibt es Regionen mit besonders hohen oder besonders niedrigen Immissionen?**

Dieser Bericht stellt die Messungen näher vor, beschreibt wichtige Randbedingungen und liefert Hinweise zur Abschätzung der Genauigkeit der Immissionsbestimmungen.

2 Durchführung der Messungen

2.1 Messgrößen für hochfrequente elektromagnetische Felder

Für die Beurteilung der Intensität hochfrequenter elektromagnetischer Felder werden üblicherweise die folgenden Größen verwendet [5]:

- Der Effektivwert der elektrischen Feldstärke E in Volt pro Meter.
- Der Effektivwert der magnetischen Feldstärke H in Ampere pro Meter.
- Die Leistungsflussdichte S in Watt pro Quadratmeter oder Mikrowatt pro Quadratmeter (1 Mikrowatt = 1 Millionstel Watt).

Die Leistungsflussdichte in Watt pro Quadratmeter gibt die durch eine Fläche von einem Quadratmeter pro Zeiteinheit fließende Energie an, die durch ein hochfrequentes elektromagnetisches Wellenfeld transportiert wird.

Im Fernfeld einer Antenne stehen Leistungsflussdichte, elektrische und magnetische Feldstärke in einem festen Verhältnis zueinander. Alle drei Größen sind im Fernfeld also äquivalent, ähnlich wie Stromaufnahme und Leistungsverbrauch bei Elektrogeräten. Bei den hier durchzuführenden Messungen ist der Abstand zu den Antennen üblicherweise so groß, dass von Fernfeldbedingungen ausgegangen werden kann. Für die Beurteilung der Feldintensität genügt daher die Angabe einer dieser drei Größen. In den Messprotokollen wird die elektrische Feldstärke als Bezugsgröße für die ermittelten Immissionen verwendet, um einen direkten Vergleich mit den in der 26. BImSchV angegebenen Grenzwerten zu ermöglichen.

2.2 Messorte

Die Messungen wurden in Bodennähe (1,50 m über Grund) im Freien an insgesamt 895 Punkten, die sich auf einem regelmäßigen Raster von 2 x 2 km befinden, durchgeführt. Das Messpunktraster wurde den durchführenden Messteams von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, vorgegeben. Nur wenn sich der auf der Landkarte bzw. mittels Gauss-Krüger-Koordinaten festgelegte Messpunkt vor Ort als nicht zugänglich oder für den Aufbau der Messantennen ungeeignet erwies, durfte das Messteam vom eigentlichen Punkt um maximal ± 100 m abweichen.

Begonnen wurden die Messungen im Herbst 2001 im Raum Heidelberg/Mannheim. Danach folgten die Messungen in der Region Freiburg, anschließend in Oberschwaben und zum Schluss im Großraum Stuttgart.

Insgesamt wurden mit den Messungen etwa zehn Prozent der Landesfläche von Baden-Württemberg erfasst, in denen rund ein Drittel der Bevölkerung von Baden-Württemberg lebt. Die Punkte sind auf die Gebiete von 143 Gemeinden im Land verteilt. Lage und Größe der vier Untersuchungsgebiete sind in Abb. 1 dargestellt.

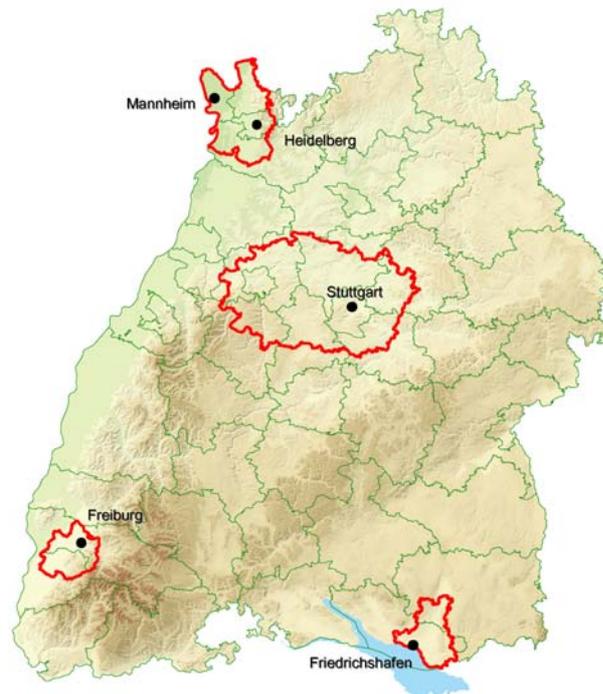


Abb. 1: Lage und Größe der vier Untersuchungsgebiete

Die Durchführung der Messungen war auf Werktage zwischen 08:00 und 20:00 Uhr beschränkt. Bei nennenswertem Niederschlag wurden keine Messungen vorgenommen.

2.3 Verwendete Messgeräte und Messverfahren

Methoden zur Bestimmung der Immissionen durch Funkseideanlagen müssen den folgenden Mindestanforderungen genügen [5]:

- Es muss die am Messpunkt vorhandene Ersatzfeldstärke festgestellt werden (d.h. isotrope Messung). Bei Vorhandensein mehrerer Einzelimmissionen ist eine grenzwertbezogene Summation durchzuführen.
- Aufgrund von Abschattungen und Interferenzen schwanken die Feldstärkewerte räumlich erheblich. Das Messverfahren muss daher so ausgelegt sein, dass Unterbewertungen der Immissionen vermieden werden. Dies geschieht durch Suche der im Messvolumen vorhandenen Maximalfeldstärke.
- Schwankungen der Immission aufgrund zeitlich variabler Leistungsabgabe der Sendeanlagen (z. B. bei schwankender Gesprächsauslastung von Mobilfunksendern) dürfen nicht zu einer Unterschätzung der Einwirkung führen. Es muss die Gesamtfeldstärke bestimmt werden, die auftritt, wenn die verursachenden Anlagen mit maximaler Auslastung arbeiten. Auf diese Forderung wird in den Kapiteln 2.6 und 2.7 noch ausführlicher eingegangen.

Im Rahmen der Feldstärkemessungen werden Spektrumanalysatoren und unterschiedliche Antennen eingesetzt, so dass es möglich ist, die Größe elektromagnetischer Felder im Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz zu bestimmen.

Genauere Angaben zu den von den einzelnen Messteams verwendeten Messgeräten und Kalibrationsdaten finden sich im Anhang dieses Berichtes.

Mittels des Spektrumanalysators und einer geeigneten Messantenne werden Frequenz und Empfangspegel der einzelnen am Messort vorhandenen Funksignale festgestellt. Unter Zuhilfenahme der Kalibrierdaten der verwendeten Messantenne und unter Berücksichtigung der Dämpfung des Messkabels kann damit die am Messort herrschende Feldstärke bestimmt werden.

Wie oben bereits erwähnt, sind die Immissionen von Hochfrequenzquellen aufgrund von Abschattungen und Interferenzen häufig kleinräumigen Schwankungen unterworfen. Um möglichst zuverlässig die im Bereich des Messpunktes vorhandenen größten Werte der Felder der einzelnen Funksignale zu erfassen, wird ein Verfahren angewendet, das in den wesentlichen Punkten auf einer Messvorschrift der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) [6] und den Vorschlägen einer Messempfehlung des Schweizer Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) basiert [7]:

Die in [6] und [7] beschriebenen Messverfahren wurden für die speziellen Anforderungen dieser Messkampagne in einigen Punkten modifiziert. Die Messantenne wird auf einem Stativ in 1,5 m Höhe (durchschnittliche Kopfhöhe eines Kindes bzw. durchschnittliche Brusthöhe eines Erwachsenen) über Grund montiert und um einen Drehpunkt um 360° bewegt. Mit dieser Drehung wird sichergestellt, dass die Messergebnisse möglichst unabhängig von der Einfallrichtung der elektromagnetischen Wellen sind. Der Einfluss von kleinräumigen Feldstärkeschwankungen wird durch die Wiederholung dieser Drehung an drei Punkten, die sich auf einem gleichseitigen Dreieck mit 1,5 m Kantenlänge befinden, weitgehend minimiert (Abb. 2). Diese Abtastung muss außerdem mit verschiedenen Polarisierungen der Messantenne (horizontal, vertikal) wiederholt werden. Die Aufnahme des so erfassten größten Wertes erfolgt dabei kontinuierlich unter Zuhilfenahme der Maximum Hold-Funktion des Spektrumanalysators.

Bei den Signalen unter 30 MHz (Messung mit der Rahmenantenne HFH2-Z2) wird auf die Messung an drei Punkten verzichtet, da bei den in diesem Frequenzbereich typischen Wellenlängen (zwischen 10 Meter und 30 Kilometer) keine ausgeprägten kleinräumigen Immissionsschwankungen zu erwarten sind. Vielmehr wird durch die hohe Anzahl an Messpunkten und das bei der Messkampagne verwendete quadratische Grundraster von 2 km x 2 km sichergestellt, dass im Mittel keine Unterschätzung der tatsächlichen vorhandenen Immissionsbelastung stattfindet. Die unterschiedlichen Einfallrichtungen der Signale werden wieder durch geeignetes Drehen der Rahmenantenne berücksichtigt.



Abb. 2: Typischer Messaufbau (Rot: 3 Messpunkte, an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks mit 1,5 m Kantenlänge)

Die Messungen werden an jedem der drei Messpunkte schrittweise für bestimmte Frequenzbereiche durchgeführt, da eine Erfassung des gesamten Spektrums in einem Durchlauf nicht möglich ist (Gründe: unterschiedliche Messantennen je nach Frequenz, begrenzte Darstellungsauflösung des Spektrumanalysators, sowie unterschiedliche Messbandbreiten je nach Funkdienst).

In der nachfolgenden Tabelle sind die einzelnen zu erfassenden Frequenzbereiche, die teilweise entgegen der Literatur bezüglich der gewählten Start- und Stoppfrequenzen leicht modifiziert wurden, sowie die verwendeten Messbandbreiten dargestellt.

Frequenzbereich	Startfrequenz	Stoppfrequenz	Messbandbreite	Videobandbreite
LW	50 kHz	285 kHz	10 kHz	10 kHz
MW	536 kHz	1605 kHz	10 kHz	10 kHz
KW	5,95 MHz	26,1 MHz	10 kHz	10 kHz
UKW	85,0 MHz	110 MHz	100 kHz	100 kHz
TV-I	47 MHz	68 MHz	1 MHz	1 MHz
TV-III	174 MHz	230 MHz	1 MHz	1 MHz
TV-IV	470 MHz	622 MHz	1 MHz	1 MHz
TV-V	622 MHz	790 MHz	1 MHz	1 MHz
GSM 900	921 MHz	960 MHz	100 kHz	100 kHz
GSM 1800	1805 MHz	1880 MHz	100 kHz	100 kHz

Tab. 1: Für die Immissionserfassung explizit festgelegte Frequenzbänder

Spezielle Frequenzen außerhalb der in Tabelle 1 definierten Bänder (z.B. DCF 77; BOS; Datenfunk; DAB; Radar; UMTS etc.) werden bei Bedarf, d.h. bei Vorhandensein nennenswerter Immissionen, betrachtet. Somit ist eine lückenlose Erfassung des Frequenzbereiches von 50 kHz bis 3 GHz sichergestellt.

Alle Messungen werden softwareunterstützt, d.h. mittels einer speziell für dieses Vorhaben entwickelten Mess- und Auswertesoftware durchgeführt.

Die Immissionen an den einzelnen Messpunkten sind zumeist durch verschiedene Funkanwendungen bedingt. Wenn deren Beiträge am Messpunkt etwa gleich groß sind, was in der Praxis häufig der Fall ist, muss eine normgerechte Summation durchgeführt werden.

Einzelimmissionen, die am betrachteten Messpunkt nur einen vernachlässigbar kleinen Beitrag zu den Einwirkungen liefern, werden nicht berücksichtigt. Immissionen, die nicht mehr als 0,6 dB oberhalb der für die einzelnen Messbereiche gültigen Rauschgrenze liegen, werden vom Messgerät nicht mehr erfasst. Aufgrund der Empfindlichkeit des Spektrumanalysators und der Wandlungsfaktoren der verwendeten Messantennen ist für alle Frequenzbereiche sichergestellt, dass die Nachweisgrenze unter einer Feldstärke von 10 mV/m – d. h. unterhalb 1 ‰ des Grenzwertes nach 26. BImSchV – liegt.

2.4 Bewertung

Die Bewertung der Immissionen erfolgte anhand der Empfehlung des Europäischen Rates 1999/519/EG [3]. Die Messergebnisse wurden ins Verhältnis zu den dort aufgeführten Referenzwerten für die Feldstärken gesetzt. Diese entsprechen den Grenzwerten der in Deutschland geltenden Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV, [1]); die EU-Ratsempfehlung umfasst jedoch einen größeren Frequenzbereich

Nach dem allgemein anerkannten biologischen Wirkungsmodell, auf dem auch die Grenzwerte der 26. BImSchV basieren, führt die im menschlichen Körper absorbierte Hochfrequenzstrahlung oberhalb 100 kHz je nach Intensität zu einer Temperaturerhöhung (thermische Wirkung). Die Wirkung ist proportional zur absorbierten Strahlungsleistung und zum Quadrat der einwirkenden elektrischen Feldstärke.

Wenn sich mehrere Einzelfelder überlagern, ist die Summe über die einzelnen Feldstärkequadrate zu bilden. Bezieht man die Einzelfeldstärken vor ihrer Quadrierung auf den jeweiligen Grenzwert und zieht dann aus der entstehenden Summe der Quadrate die Wurzel, so ergibt sich die am Ort wirksame Summenimmission in Form einer grenzwertbezogenen Feldstärke E_{Summe} . Die Grenzwertvorgaben sind eingehalten, solange die Gesamtimmission den Wert 1 – also 100 % – nicht überschreitet. Diese Summation kann durch folgende Formel beschrieben werden [2,3]:

$$E_{Summe} = \sqrt{\sum_{f=100kHz}^{1MHz} \left(\frac{E_f}{c} \right)^2 + \sum_{f=1MHz}^{300GHz} \left(\frac{E_f}{E_{G,f}} \right)^2}$$

E_f : Feldstärke der Einzelimmission bei der Frequenz f
 c : $87 / f^{1/2}$ V/m
 $E_{G,f}$: für die Einzelimmission bei der Frequenz f gültiger Grenzwert
 E_{Summe} : wirksame Summenimmission

Für den Frequenzbereich unter 10 MHz (also bei Immissionen durch LMK-Sender) werden die Grenzwerte aus der EU-Ratsempfehlung [3] entnommen, da die 26. BImSchV hierfür keine Grenzwerte angibt [8]. In diesem Bereich sind neben den thermischen Wirkungen auch die induzierten Körperströme zu betrachten. Hierfür schreiben die einschlägigen Empfehlungen [2,3] eine lineare Summation vor. Da im Rahmen dieses Messprojekts nur Sender mit Frequenzen oberhalb 9 kHz relevant sind, ist die unten angegebene Summationsformel gegenüber den Angaben in [2,3] leicht verändert:

$$E_{Summe} = \sum_{f=9kHz}^{10MHz} \frac{E_f}{a}$$

E_f : Feldstärke der Einzelimmission bei der Frequenz f
 a : 87 V/m
 E_{Summe} : wirksame Summenimmission

Bei LMK-Sendern müssen also **zwei unterschiedliche Summationen** durchgeführt werden, wobei üblicherweise die Addition nach der zweiten Formel (Körperströme) einen größeren Summenwert ergibt.

Als Konsequenz dieser notwendigen Doppelbetrachtung werden in der Auswertung der Messwerte die Immissionen von LMK-Sendern (9 kHz bis 10 MHz) als eigene Immissionsklasse geführt. In diesem Frequenzbereich wird dann das schärfere Kriterium zur Bewertung der Immissionen herangezogen.

Zur Ermittlung der an einem Messpunkt herrschender Gesamtimmission wird also zunächst der in der ersten Formel beschriebene thermische Summenwert ermittelt. Dieser wird mit dem nach der zweiten Formel gebildeten Summenwert gemäß Wirkungsmodell "Körperströme" verglichen. Der größere von beiden Werten wird letztlich als Wert für die Gesamtimmission am betrachteten Punkt verwendet.

Aufgrund der unterschiedlichen Summationsvorschriften ist es also prinzipiell möglich, dass die Grenzwertausschöpfung gemäß Bewertungsmodell "Körperströme" (Frequenzbereich 9 kHz bis 10 MHz) größer ist als gemäß Bewertungsmodell "thermische Wirkungen" (Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz). Bei der

Ergebnisdarstellung wird für jeden Messpunkt angegeben, wie groß die maximale Grenzwertausschöpfung ist, d. h. von den beiden Summenwerten wird der größere gewählt. Zur besseren Unterscheidung wird dieses Endergebnis als **Gesamt-immission** bezeichnet.

Da bei allen Messpunkten von idealen Fernfeldbedingungen ausgegangen wird, kann die in den einschlägigen Empfehlungen zusätzlich geforderte Summation der magnetischen Feldstärken entfallen.

2.5 Qualitätssicherung

Um für eine derartige groß angelegte Messaktion die Verlässlichkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, ist die fachgerechte Durchführung der Messungen mit geeigneten Maßnahmen sicherzustellen. Folgende Qualitätssicherungsprozeduren werden im Rahmen des Funkwellenmessprojektes Baden-Württemberg durchgeführt:

- Die relevanten Geräte unterliegen einem regelmäßigen Kalibrierzyklus.
- Während der Messungen wird die Funktionsfähigkeit der Ausrüstung in regelmäßigen Abständen überprüft (Funktionstest des Spektrumanalysators; Sichtprüfung von Antennen und Kabel; Kontrolle der Kabeldämpfung).
- Um durch Temperatureinflüsse verursachte Messunsicherheiten zu minimieren, sollen bei Außentemperaturen unter 5°C keine Messungen durchgeführt werden.
- Vor Beginn der Messkampagne wurden die Messteams im Rahmen eines eintägigen Workshops (Leitung: Prof. Wuschek) mit dem ordnungsgemäßen Ablauf der Immissionsmessungen vertraut gemacht und in die Bedienung der Messsoftware eingewiesen.
- Die fachlichen Betreuer des Projektes (Prof. Wuschek und Prof. Bochtler) nehmen in unregelmäßigen Abständen als Beobachter an den Immissionsmessungen vor Ort teil. Eine erste Begutachtung fand am 22.10.2001 im Rahmen von Messungen im Raum Heidelberg/Mannheim statt.
- Zu Beginn der Messungen in jeder Region werden mindestens drei Messpunkte von unterschiedlichen Messteams mehrfach vermessen, um aus eventuell auftretenden Unterschieden in den Ergebnissen frühzeitig Rückschlüsse auf etwaige Unregelmäßigkeiten bei den Geräten oder dem Messablauf ziehen zu können.

In folgender Tabelle finden sich die Resultate der Immissionsmessungen (Summenimmissionswerte in Prozent vom Grenzwert, aufgeteilt nach Verursacherguppen) für zwei Punkte im Raum Heidelberg/Mannheim, die zum Vergleich von zwei Teams vermessen wurden:

	Tonrundfunk		Fernsehen		Mobilfunk	
	Team 1	Team 2	Team 1	Team 2	Team 1	Team 2
Messpunkt Nr. 1086	3,03	3,53	0,88	0,89	0,79	0,73
Abweichung (Bezug: Team1)	+ 17 %		+ 1 %		- 8 %	
Messpunkt Nr. 1098	0,76	0,89	0,20	0,15	0,16	0,12
Abweichung (Bezug: Team1)	+ 17 %		- 25 %		- 25 %	

Tab. 2: Vergleich der Resultate beider Messteams an zwei Messpunkten

Die Abweichungen an diesen beiden Messpunkten liegen offenbar in der Größenordnung der zu erwartenden Messunsicherheit. Diese wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

2.6 Messunsicherheit

Im Folgenden wird die zu erwartende Messunsicherheit des hier angewendeten Verfahrens dargestellt, wobei an dieser Stelle nur auf Fehlerquellen eingegangen wird, die in der Messausrüstung bzw. in der Messprozedur begründet sind. Die Vorgehensweise lehnt sich dabei an die Fehlerbetrachtung von Feldstärkemessungen im EMV-Bereich an [9,10]. Fehlerquellen, die im zeitlich variablen Abstrahlverhalten von Sendeanlagen begründet sind, werden in Kapitel 2.6 diskutiert.

In folgender Tabelle sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die gesamte Messunsicherheit für eine Feldstärkemessung beim Mobilfunk exemplarisch wiedergegeben. Für die anderen Frequenzbereiche sind die Werte ähnlich. Es wurden dabei größtenteils die Angaben der Gerätehersteller bzw. die Werte in den Kalibrierdokumenten verwendet (Spektrumanalysator: Advantest R3131; Messantenne: Bikonusanterne SBA9113 von Schwarzbeck).

Der Unsicherheitsbeitrag aufgrund der begrenzten Reproduzierbarkeit der Messprozedur wurde auf Basis eigener Untersuchungen [11] und den Resultaten eines Ringversuches zum Nachweis von nichtionisierender Strahlung in Bern und Zollikofen (Herbst 2001) festgesetzt. Veranstalter dieser Vergleichsmessungen, an denen die Firma botronic als einziges deutsches Labor teilnahm, war das Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung der Schweiz (METAS).

Eine ausführliche Darstellung der Unsicherheitsbeiträge bei Messungen mit Messempfänger bzw. Spektrumanalysator findet sich beispielsweise in [12]. Die erweiterte Messunsicherheit wird, wie auch in [7] angegeben, für eine einseitige Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95% berechnet. Deshalb beträgt der Erweiterungsfaktor statt der üblichen 1,96 nur 1,64.

Komponente	Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit in dB	Verteilung	Divisor	Standard-unsicherheit in dB
Empfänger	Frequenzgang	0,5	Normal	2	0,25
Empfänger	Eingangsdämpfungsglied	0,1	Normal	2	0,05
Empfänger	Auflösebandbreite	0,05	Normal	2	0,03
Empfänger	ZF-Verstärker	0,5	Normal	2	0,25
Empfänger	Temperaturgang (geschätzt)	1,0	Rechteck	1,73	0,58
Empfänger	Modulationsabhängigkeit (geschätzt)	0,5	Rechteck	1,73	0,29
Empfänger	Ablesegenauigkeit	0,05	Rechteck	1,73	0,03
Antennenkabel	Absolutkalibration	0,2	Normal	2	0,10
Antennenkabel	Interpolation der Dämpfungswerte	0,1	Rechteck	1,73	0,06
Antenne	Absolutkalibration Antennenfaktor	1,0	Normal	2	0,50
Antenne	Interpolation Antennenfaktor	0,1	Rechteck	1,73	0,06
Fehlanpassung	Antenne - Spektrumanalysator (total)	0,8	U-förmig	1,41	0,57
Messprozedur	Begrenzte Reproduzierbarkeit	2,3	Normal	2	1,15
Wurzel aus Quadratsumme:					1,57
Erweiterungsfaktor:					1,64
Erweiterte Messunsicherheit in dB:					2,57
Erweiterte Messunsicherheit in %:					34,4

Tab. 3: Bestimmung der Messunsicherheit nach [7] und [11]

Es zeigt sich also, dass die Feldstärkemessungen mit einer erweiterten Unsicherheit von etwas weniger als 3 dB durchführbar sind. Um die vorhandenen Unsicherheiten angemessen zu berücksichtigen und eine Unterbewertung der Immissionen auf jeden Fall auszuschließen, werden daher alle im Rahmen dieser Messkampagne gefundenen Immissionswerte pauschal um 3 dB erhöht.

Neben einer zuverlässigen Pegelmessung ist auch die Genauigkeit der Frequenzbestimmung der einzelnen Immissionen von Bedeutung, da in den Frequenzbereichen von 1 bis 10 MHz und von 400 bis 2000 MHz die Grenzwerte nach 26. BImSchV bzw. EU-Ratsempfehlung [1,3] frequenzabhängig sind.

Ein Vergleich der gefundenen Messergebnisse mit den wahren Werten (Sendertabellen bei UKW/TV bzw. Betreiberangaben beim Mobilfunk) zeigt, dass in diesem Frequenzbereich Abweichungen von maximal (typisch) ± 200 kHz auftreten, so dass bezüglich der Grenzwertbewertung nur verschwindend geringe Fehler auftreten.

Einzig die Messergebnisse im Langwellenbereich zeigen größere Frequenzabweichungen (typisch bis ca. ± 10 %, da die Messbandbreite mit 10 kHz in der gleichen Größenordnung wie die Signalfrequenz liegt). Daher kann es durchaus vorkommen, dass die Immissionen des Zeitzeichensenders DCF77 (Mainflingen) vom Analysator nicht bei 77 kHz sondern beispielsweise bei 85 kHz angezeigt werden. Diese Abweichungen sind jedoch wenig kritisch, da bei der Beurteilung der Körperströme im Frequenzbereich bis 1 MHz ein konstanter, frequenzunabhängiger Grenzwert von 87 V/m vorgegeben ist [3] und daher eine Fehlbewertung ausgeschlossen ist. Für die Beurteilung der thermischen Wirkungen wird zwar in [3] ein frequenzabhängiger Grenzwert proportional $f^{-1/2}$ angegeben, wodurch eine Frequenzabweichung von typisch ± 10 % allerdings zu einem tolerierbaren Fehler von etwa ± 5 % führt.

2.7 Einfluss durch zeitlich schwankende Signalabgabe

Nicht alle Funksender geben eine zeitlich kontinuierliche Leistung an die Umgebung ab. Zu den diesbezüglich unproblematischen Anlagen können alle UKW-, DAB- und TV-Sender sowie viele LW- und MW-Sender gezählt werden, da diese Anlagen über 24 Stunden die gleiche Leistung abstrahlen. Auch GSM-Mobilfunksender, die mit minimaler Kapazität ausgestattet sind (1 Frequenzkanal je Sektor), sind in Bezug auf zeitliche Immissionsschwankungen unproblematisch. Nennenswerte Variationen in den Feldstärken aufgrund von Sendeleistungsschwankungen sind hier nicht zu erwarten.

Bei Sendern mit zeitlich schwankendem Abstrahlverhalten ist die zeitliche Repräsentativität einer Messung deutlich problematischer: Wie in der 26. BImSchV gefordert, sollten natürlich auch im Rahmen des Funkwellenmessprojektes Baden-Württemberg die an den einzelnen Punkten maximal auftretenden Immissionen bestimmt werden. Hierzu müssten alle relevanten Sender in der Umgebung des Messpunktes während der Messung mit maximaler Leistung senden, was natürlich nicht veranlasst werden kann. Daher ergeben sich bei der Erfassung der Immissionen einige Probleme. Die wichtigsten sind im Folgenden kurz beschrieben:

- Lang- und Mittelwellensender strahlen häufig nachts in bestimmte Richtungen mit verminderter Leistung. Diese Tatsache lässt sich beherrschen, indem man Messungen nur tagsüber durchführt.
- Kurzwellensender haben üblicherweise ein Abstrahlverhalten, das bezüglich Leistung (Programmzahl) und Senderichtung im Lauf eines Tages sehr starken Änderungen unterworfen ist.
- Amateur-, BOS-, Flug- und Datenfunkanlagen senden ebenfalls in der Regel nicht kontinuierlich.
- Im GSM-Mobilfunk sind bei allen Anlagen mit mehr als einem Frequenzkanal je Sektor ebenfalls auslastungsabhängige Immissionsschwankungen zu erwarten, auf die weiter unten noch näher eingegangen wird.

Aufgrund dieser zeitlichen Schwankungen stellen die Messungen an einem Messort quasi einen momentanen Schnappschuss dar. Insgesamt können diese zeitlichen Schwankungen durch eine statistische Betrachtung eingeordnet werden. Durch die große Anzahl der Messpunkte ergibt sich eine Mittelung der Verhältnisse, da zu erwarten ist, dass an manchen Punkten nahezu die maximal mögliche Immission erfasst wird, hingegen an anderen Punkten niedrigere Werte. Dies entspricht durchaus der Situation, welcher der Mensch im täglichen Immissionsumfeld ausgesetzt ist.

2.8 Besonderheiten bei der Messung der Felder von GSM-Mobilfunksendern

Bei GSM-Basisstationen kann die vom Sender abgegebene Signalform und -leistung unter bestimmten Umständen stark schwanken. Eine ausführliche und erschöpfende Erläuterung dieses Sachverhaltes findet man in der GSM-Spezialliteratur [13]. Grundsätzlich können jedoch die folgenden beiden Fälle unterschieden werden:

1. Ist eine Anlage mit nur einem Kanal pro Funkzelle ausgerüstet, so wird von der Antenne ein quasi kontinuierliches Signal abgegeben, das einen vom momentanen Gesprächsaufkommen unabhängigen, konstanten Leistungspegel besitzt. Derartige Anlagen, die über einen Kanal sowohl das Signalisierungssignal als auch die Nutzsignale senden, finden sich vorwiegend in ländlichen Gebieten mit geringem Verbindungsaufkommen. Die Gefahr von Messfehlern, insbesondere einer Unterschätzung der Exposition ist in diesen Fällen nicht gegeben.
2. Ist eine Anlage mit zwei oder mehreren Frequenzen pro Funkzelle ausgestattet, so sendet ein Kanal andauernd mit konstantem Pegel ein Signalisierungssignal. Abhängig von der Höhe des momentanen Gesprächsaufkommens werden die übrigen Kanäle zu- oder abgeschaltet. Je nach Zahl der gerade zu bedienenden Teilnehmer wird auf den Gesprächskanälen zudem ein Signal mit schwankendem Puls-Pausen-Verhältnis gesendet. Dabei kann die Sendeleistung vom System in jedem Zeitschlitz passend zur herrschenden Verbindungsqualität reduziert werden (jeder Zeitschlitz ist für die Bedienung eines Teilnehmers zuständig und dauert ca. 580 Mikrosekunden). Derartige Anlagen finden sich vorwiegend in Regionen mit höherem Gesprächsaufkommen. Eine Unterschätzung der maximal möglichen Feldstärken kann hier bei folgendem Szenario entstehen: Aufgrund einer geringen Gesprächsauslastung sendet nur der permanent vorhandene Kanal. Wenn die Felder zu diesem Zeitpunkt gemessen werden, wird nicht die maximal mögliche Immission der Anlage ermittelt.

Die meisten derzeit in Betrieb befindlichen Mobilfunksender sind mit zwei bis vier Kanälen je Zelle ausgestattet. Für die gemessenen Immissionen bedeutet dies, dass aufgrund der zeitlichen Schwankung der Signalabgabe zusätzlich eine typische Unsicherheit von 3 bis 6 dB entsteht. Wenn die Messung also zu einem Zeitpunkt mit geringem Gesprächsaufkommen durchgeführt wird, entspricht die gemessene Feldstärke nur 50 bis 70 % des maximal möglichen Wertes.

Ein zweites Problem bei der Erfassung von GSM-Mobilfunksignalen stellt das so genannte "Frequency-hopping" dar:

Bei Anlagen mit mehr als einem Kanal pro Funkzelle hat der Netzbetreiber die Möglichkeit, die Sendefrequenz von Zeitschlitz zu Zeitschlitz zu wechseln, um interferenzbedingte Störungen zu minimieren. Es werden dabei meist 5 - 15 Frequenzen je Zelle freigegeben.

Bei aktiviertem Frequency-hopping ist es also möglich, dass wegen der Maximum Hold-Funktion während der Messung (siehe Kap. 2.3) auf dem Display des Spektrumanalysators mehr Signale sichtbar werden, als wirklich vorhanden sind. Bei dieser Betriebsart des Messgerätes ist nämlich auf dem Schirm nicht mehr

erkennbar, dass die einzelnen Frequenzen während der Messung nacheinander und nicht gleichzeitig aktiv sind.

Bei 15 freigegebenen Frequency-hopping-Frequenzen ergibt sich eine mögliche Überschätzung der Immissionen von ca. 9 dB, d.h. die dokumentierte Summenfeldstärke der betreffenden Anlage ist bis um etwa den Faktor drei größer, als sie in Wirklichkeit vorhanden ist.

Fehlinterpretationen durch Frequency-hopping können bei Immissionsmessungen in der Umgebung einer oder einiger genau bekannter Anlagen vermieden werden, wenn im Vorfeld der Messungen entsprechende Informationen von den Betreibern eingeholt werden. Im Rahmen des Funkwellenmessprojektes Baden-Württemberg ist die aufwendige Recherche derartiger Vorabinformationen nicht realisierbar.

Zusammenfassend gesehen, ergeben sich für die Messungen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen aus den oben genannten Besonderheiten der GSM-Technik folgende Konsequenzen:

- Aufgrund der auslastungsabhängigen Anzahl der abgestrahlten Sendeleistung ist bei einigen GSM-Stationen eine Unterschätzung der Immission von typisch 3 bis 6 dB möglich, wenn zu einem Zeitpunkt gemessen wird, zu dem gerade sehr wenig Gesprächsverkehr abgewickelt wird. Dieser Fehler lässt sich minimieren, wenn nur während den Hauptgesprächszeiten gemessen wird.
- Aufgrund der Tatsache, dass die Messungen in Baden-Württemberg nur an Werktagen zwischen 08:00 und 20:00 Uhr durchgeführt werden, wird die Wahrscheinlichkeit minimiert, dass es z.B. beim Mobilfunk durch Messung während auslastungsschwacher Zeiten zu einer systematischen Unterschätzung der Immission kommt.
- Arbeiten GSM-Stationen mit "Frequency-hopping", so führt dies zu einer Überbewertung der Immissionen von typisch bis zu etwa 9 dB. Allerdings wird Frequency-hopping derzeit nur von einigen Netzbetreibern im größeren Stil eingesetzt. Eine mögliche Überschätzung der tatsächlichen maximalen Feldstärken wird daher in Kauf genommen.
- Es kann davon ausgegangen werden, dass sich diese beiden möglichen Messfehler an vielen Standorten in gewissen Grenzen gegenseitig kompensieren. Nach unserer Erfahrung ist aufgrund der Besonderheiten beim GSM-Mobilfunk eher mit einer Über- als mit einer Unterbewertung der Immissionen zu rechnen.

2.9 Besonderheiten bei der Messung der Felder von Pulsradarsendern

Bei derartigen Radaranlagen (Flughafenradar, Luftraumüberwachungsradar) handelt es sich um Hochleistungs-Pulsradargeräte. Diese Systeme arbeiten mit sehr leistungsstarken kurzzeitigen Sendepulsen (typische Dauer: 0,1 - 100 Mikrosekunden) und darauf folgenden Sendepausen, die etwa um den Faktor 100 - 1.000 länger sind als die Dauer des Sendepulses. Die Antenne derartiger Anlagen führt mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von etwa 6 - 20 Umdrehungen/Minute permanente 360°-Abtastungen des Luftraumes durch. Die Immission ist daher nur in dem kurzen Zeitpunkt wirksam, in dem die Antenne exakt zum Messpunkt hin abstrahlt. Das ist im Lauf einer Umdrehung nur für Bruchteile einer Sekunde der Fall.

Gemäß 26. BImSchV ist für den Grenzwertvergleich nicht der Spitzenwert des Sendepulses, sondern die durchschnittlich wirkende Immission ("Effektivwert") heranzuziehen, es sei denn, der Spitzenwert überschreitet den in der 26. BImSchV festgelegten Grenzwert um mehr als das 32-fache. Das ist jedoch bei den hier durchgeführten Messungen sicher nicht der Fall.

Die mittlere Immission ergibt sich aus der gemessenen Spitzenfeldstärke nach folgender Formel:

$$E_{\text{mittel}} = E_{\text{Peak}} \sqrt{\left(\frac{\tau}{T} \cdot \frac{\alpha}{360^\circ} \right)}$$

- E_{mittel} : mittlere wirksame Feldstärke
 E_{peak} : Spitzenfeldstärke
 T : Zeit zwischen zwei Sendepulsen
 τ : Dauer des Sendepulses
 α : Öffnungswinkel der Radarantenne (3-dB-Punkte)

Wird bei derartigen Anlagen das Verhältnis T/τ beispielsweise mit 1.000 und der Öffnungswinkel α der Antenne zu $0,5^\circ$ angenommen, folgt, dass die gemessene Spitzenfeldstärke des Radars noch um etwa den Faktor 850 (58 dB) verringert werden muss, will man die gemäß 26. BImSchV wirksame effektive Feldstärke bestimmen. Es werden daher die Immissionswerte verursacht durch Radaranlagen im Rahmen der Auswertung gesondert betrachtet.

Anmerkung:

Pulsspitzenwerte werden z.B. bei der Beurteilung der Wirkung auf medizinische Implantate wie Herzschrittmacher herangezogen. Im Unterschied zu den direkten biologischen Wirkungen von Hochfrequenz, wie thermische Wirkungen oder induzierte Körperströme, liegen den technischen Störungen aber auch andere Wirkungsmodelle zugrunde.

3 Zusammenfassung und Bewertung

Die im Rahmen des "Funkwellenmessprojektes Baden-Württemberg" durchgeführten flächenhaften Immissionsmessungen im Hochfrequenzbereich wurden in diesem Umfang bisher weder in Deutschland noch in anderen Ländern vorgenommen. Daher ist es auch nur begrenzt möglich, bei der Vorbereitung und der Durchführung der Messungen auf Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten zurückzugreifen. Es werden allerdings bereits existierende Messvorschriften und -empfehlungen (z.B. RegTP, Schweiz) berücksichtigt, damit möglichst vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

Die fachliche Begutachtung der in Baden-Württemberg definierten Messverfahren (Frequenzbereiche, Messaufbau, Auswertung, Summation) ergibt, dass hier der aktuelle Stand von Technik und Normung sowie die Vorgaben der 26. BImSchV bzw. der EU-Ratsempfehlung bestmöglichst eingehalten werden. Die eingesetzten Messgeräte und die begleitende Qualitätssicherung lassen reproduzierbare Ergebnisse mit einer für diese Erhebungen typischen Unsicherheitsspanne erwarten.

Sowohl der Auftraggeber als auch die Durchführenden der Messungen sind sich der Grenzen der Erfassung zeitlich schwankender Immissionsgrößen (z.B. GSM-Mobilfunk) bewusst. Wie im Kapitel 2.7 dieses Berichtes näher erläutert, ist beim Mobilfunk jedoch eher mit einer Über- als einer Unterschätzung der tatsächlich vorhandenen Immissionen zu rechnen.

Besonders große Aussagekraft bekommen die gefundenen Messergebnisse, wenn man die Einzelimmissionen für jeden Messpunkt nach verursachenden Funkdiensten gruppiert (z.B. analoger Tonrundfunk, Fernsehen, Mobilfunk etc.), da sich dann zeitliche und räumliche Immissionsvariationen teilweise kompensieren und damit in der Gesamtheit der Messungen reproduzierbarere Resultate erzielt werden.

4 Literaturverzeichnis

- [1] **Bundesrepublik Deutschland**
"26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes"
Bundesgesetzblatt Jg. 1996, Teil I, Nr.66, Bonn 20.12.1996.
- [2] **International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)**
"Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electro-magnetic Fields (up to 300 GHz)"
Health Physics, Vol. 74, Nr. 4, April 1998, S. 494-522.
- [3] **Der Rat der Europäischen Union**
"Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz)"
Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L199, 30.07.1999, S. 59 – 70.
- [4] **Strahlenschutzkommission (SSK)**
"Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern; Empfehlungen der Strahlenschutzkommission"
Bonn, 14.09.2001 (www.ssk.de).
- [5] **DIN VDE 0848**
"Sicherheit in elektromagnetischen Feldern – Grenzwerte von Feldstärken zum Schutz von Personen, Teil 1: Mess- und Berechnungsverfahren"
VDE-Verlag GmbH, Berlin, 08/2000.
- [6] **Bundesamt für Post und Telekommunikation (heute: RegTP)**
"Messvorschrift BAPT 212 MV 20"
Mainz 1995.
- [7] **Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)**
"Mobilfunk-Basisstationen (GSM) Messempfehlung" , Bern, 2002
- [8] **Bundesministerium für Wirtschaft**
"Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV)"
Entwurf vom 05.03.2002; www.bmwi.de
- [9] **International Electrotechnical Commission**
"IEC-Guide to the Expression of Uncertainty in measurement"
First edition 1995.
- [10] **International Electrotechnical Commission**
"Radio-Interference measurements and Statistical Techniques"
CISPR/A/256 (CDV), 5/2001.
- [11] **M. Wuschek**
"Feldstärkemessungen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen"
EMV 2002; Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit
VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach 2002, S. 683-692

- [12] **C. Rauscher**
"Grundlagen der Spektrumanalyse"
Rohde & Schwarz, München 2000.
- [13] **K. David, T. Benkner**
"Digitale Mobilfunksysteme"
B. G. Teubner Verlag, Stuttgart 1996.

Anhang A - Messequipment

Liste des verwendeten Messequipments des Messteams 1

Prüfgerät / -einrichtung	Typ	Hersteller	Geräte-Nr.	Letzte Kalibrierung
Spektrumanalysator	R3131	Advantest	101000317	12.09.2001
Aktive Loop-Antenne	HFH2-Z2	Rohde & Schwarz	100021	24.10.2001
Bikonische Antenne (25 MHz – 1,1 GHz)	UBA 9116	Schwarzbeck	9116332	05.07.2000
Bikonische Antenne (0,5 GHz – 3 GHz)	SBA 9113	Schwarzbeck	SBA 9113-101	20.09.2001
Messkabel (Länge 10 m)	AK 9513	Schwarzbeck	bo-01221	12.10.2001
Mess-Software	VMA	Botronic	VMA-01	

Liste des verwendeten Messequipments des Messteams 2

Prüfgerät / -einrichtung	Typ	Hersteller	Geräte-Nr.	Letzte Kalibrierung
Spektrumanalysator	R3131	Advantest	110500873	Sept. 2001
Aktive Loop-Antenne	HFH2-Z2	Rohde & Schwarz	880665/033	29.05.2000
Bikonische Antenne (25 MHz – 1,1 GHz)	UBA 9116	Schwarzbeck	UBA9116 0417	12.10.2001
Bikonische Antenne (0,5 GHz – 3 GHz)	SBA 9113	Schwarzbeck	SBA9113-116	12.10.2001
Messkabel (Länge 10 m)	AK9513	Schwarzbeck	95085	15.10.2001
Mess-Software	VMA	Botronic	VMA-01	

Liste des verwendeten Messequipments des Messteams 3

Prüfgerät / -einrichtung	Typ	Hersteller	Geräte-Nr.	Letzte Kalibrierung
Spektrumanalysator	ESPI 3	Rohde & Schwarz	100046	Sept. 2001
Aktive Loop-Antenne	HFH2-Z2	Rohde & Schwarz	100013	Sept. 2001
Bikonische Antenne (20 MHz – 1 GHz)	VUBA 9117	Schwarzbeck	9117-123	Nov. 2001
Bikonische Antenne (0,5 GHz – 3 GHz)	SBA 9113	Schwarzbeck	9113-122	Nov. 2001
Messkabel (Länge 10 m)	RG 213 / U	Suhner		Sept. 2001
Mess-Software	VMA	Botronic	VME-01	