

Paralleles Langzeitmonitoring von Basisstationssignalen unter Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse

DI. Harald Haider, ARC Seibersdorf research, EMC and RF-Engineering
Dr. Georg Neubauer, ARC Seibersdorf research, Mobile Communications Safety
Patrick Preiner, ARC Seibersdorf research, Mobile Communications Safety
DI. Richard Überbacher, ARC Seibersdorf research, Mobile Communications Safety

1. Einleitung

Die Ausbreitung hochfrequenter, elektromagnetischer Felder entspricht einem komplexen Wellenausbreitungsphänomen. Betrachtet man die Situation in der Umgebung von Basisstationen, so ist die Feldverteilung abhängig von den Ausbreitungsbedingungen in der Luft und der umgebenden Topographie. Mit der Ausbreitung der Felder verbunden ist deren Absorption durch Medien wie z.B. Luft, Mauern oder Erde, aber auch deren Reflexion, Streuungs- und Fading Effekte. In der Praxis führen diese Effekte zu einem nicht vorhersehbaren Interferenzverhalten am Messort. Zusätzlich ist die Umgebung keineswegs stabil. Durch bewegte Objekte oder Personen, Veränderung der Oberflächeneigenschaften (z.B. nasser Boden) und viele weitere Effekte sind die tatsächlichen Feldstärkewerte an einem festen Ort zeitlich betrachtet nicht konstant.

Durch die parallele Messung der Feldstärke eines BCCH mit sechs Antennen über mehrere Wochen werden hier typische Feldstärkeverteilungen in der Umgebung von Basisstationen aufgezeichnet. Die Antennen wurden dabei so positioniert, dass die aufgespannte Fläche annähernd dem menschlichen Körpervolumen entspricht. Durch die gleichzeitige Aufzeichnung meteorologischer Daten können Rückschlüsse auf die Auswirkung der Witterung auf das Ausbreitungsverhalten der elektrischen Felder gemacht werden. Mit Hilfe von Ähnlichkeitsuntersuchungen und Amplitudendichteverteilungsanalysen wird untersucht, ob es für die gemessenen Zeitverläufe der BCCH-Signale charakteristische Merkmale gibt. Weiters wird durch das Herausziehen von Einzelmessungen und deren Vergleich mit den Gesamtdaten eine Aussage über die Repräsentativität einzelner Messungen ermöglicht.

Die Feldstärkewertemessung in der Umgebung von Basisstationen stellt keineswegs ein neues Thema dar. Speziell durch den Versuch geeignete Messprozeduren zur Expositionsbeurteilung von Basisstationen zu entwickeln und die andauernde Diskussion eventueller gesundheitlicher Gefährdungen sind in den letzten Jahren eine Vielzahl von Einzelmessungen so wie die Vermessung ganzer Raumvolumina durchgeführt worden [1, 2, 3]. Der besondere Wert unserer Untersuchungen liegt in der gleichzeitigen Verwendung (Parallelität) von 6 Antennen, der Messung über einen längeren Zeitraum und der Aufzeichnung meteorologischer Daten um einen eventuellen Witterungseinfluss untersuchen zu können.

2. Beschreibung der Messungen

2.1 Feldstärkemessungen

Zur frequenzselektiven Messung der Feldstärke wurden 6 baugleiche konische Präzisionsdipolantennen (PCD8250) und ein Spektrumanalyser (HP 8563E) verwendet. Um eine isotrope Richtcharakteristik zu erhalten, wurde entsprechend dem Add3D Prinzip [4] für jede Messung die Antenne mit Hilfe einer automatischen Drehvorrichtung in drei zueinander orthogonalen Richtungen positioniert. Aus diesen drei Einzelmessungen kann die resultierende Gesamtfeldstärke unter Berücksichtigung des Antennenfaktors und der Kabelverluste berechnet werden. Der HF-Pfad zwischen den 6 Antennen und dem Analyser wird über einen HF-Schalter mit Hilfe eines Messrechners (PC) über USB automatisch umgeschaltet (siehe Bild 1).

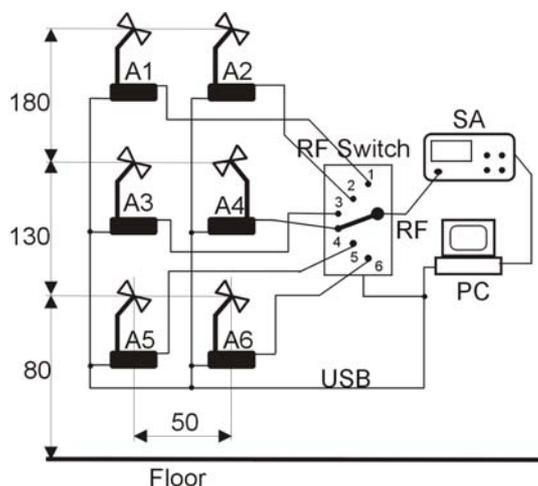


Bild1: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Feldstärkemessung und Beispielfoto aus dem Messraum Einstein.

Die Aufstellung der Antennen inklusive Drehvorrichtung erfolgte auf einem Gerüst aus Styrodur. Die 6 Messpositionen (Mittelpunkte der Antennenelemente) lagen bei einem seitlichen Abstand von 50 cm in 80, 130 und 180 cm Höhe. Dieses Raster wurde gewählt, um einerseits das Körpervolumen eines Menschen annähernd zu repräsentieren und andererseits gegenseitige Kopplungseffekte der Antennen durch zu geringe Abstände zu vermeiden.

Die Messungen erfolgten innerhalb des GSM Downlink-Bereichs von 940 bis 960 MHz mit 100 kHz Auflösungsbandbreite und jeweiligem Max-Hold von 20 Sweeps pro Antennenposition. Bedingt durch die Sweepgeschwindigkeit des Analysers und den Rotationszeiten der Drehvorrichtung konnte alle 4,5 Minuten ein neuer Messzyklus gestartet werden. Zur weiteren Auswertung wurden aus diesen sequentiell aufgenommenen Frequenzfiles die Amplitudenwerte der Feldstärke des untersuchten BCCH bei dessen Sendefrequenz herangezogen. Diese Amplitudenverläufe bilden die Grundlage der feldstärkebezogenen Auswertungen.

Als Messort wurde der Besprechungsraum Einstein in Seibersdorf ausgewählt, da hier durch die ländliche Umgebung eine dominante Basisstation leicht erkennbar ist und kaum Störungen durch Personen oder bewegte Objekte gegeben sind. Die 6 Antennen wurden in direkter Sicht zur Basisstation hinter einem Fenster aufgestellt, wobei jedoch teilweise eine Abschattung durch einen laubtragenden Baum nicht vermeidbar war. Die Antennen 2, 4, und 6 wurden zusätzlich durch eine Fenstersäule etwas abgeschattet. Die Messkampagne dauerte vom 24.09.03 bis 1.10.03 und lieferte über 27000 Messfiles.

2.2 Meteorologische Messdaten

Um Abhängigkeiten der Feldmessungen von der jeweiligen, aktuellen Wettersituation feststellen zu können, wurden uns meteorologische Daten einer in Seibersdorf befindlichen Messstation von der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) zur Verfügung gestellt. Diese Daten erlauben eine gute Beurteilung der Wettersituation und ermöglichen daher, einen eventuellen Zusammenhang mit den vorherrschenden Ausbreitungsbedingungen herzustellen. Die angegebenen meteorologischen Daten wurden uns mit zeitlicher Kodierung in einem 10 Minuten Raster zur Verfügung gestellt und durch lineare Interpolation an die Zeitwerte der Feldstärkemessungen angepasst. Die Absolute Luftfeuchte FA ist keine klassisch meteorologische Messgröße. Sie lässt sich jedoch näherungsweise entsprechend Formel 1 berechnen.

Lufttemperatur	T	[°C]
Relative Luftfeuchte	FR	[%]
Luftdruck	P	[hPa]
Niederschlag-Minutensummen	NS	[mm/10 min]
Globalstrahlung	GS	[W/m ²]
Absolute Luftfeuchte	FA	[g/m ³]

$$FA = \frac{13,196 * FR * 10^{\frac{7,5 * T}{(237,5 + T)}}}{(273,16 + T)} \quad (1)$$

3. Ergebnisse und Interpretation der Messungen

Im Bild 2 sind die 6 Amplitudenverläufe (Antennen A1 bis A6) des untersuchten BCCH aus der Messserie im Raum Einstein bis Ende September dargestellt. Darunter (Bild 3) sind die entsprechenden meteorologischen Daten zeitlich synchron zu den Antennensignalen aufgetragen, wobei 1 Tag 320 Messpunkten entspricht. Zwischen den Punkten 1813 und 1814 (strichlierte Linie) fehlt ein Zeitintervall von 15,3 Stunden, worauf die Amplitudensprünge zwischen diesen beiden Punkten zurückzuführen sind.

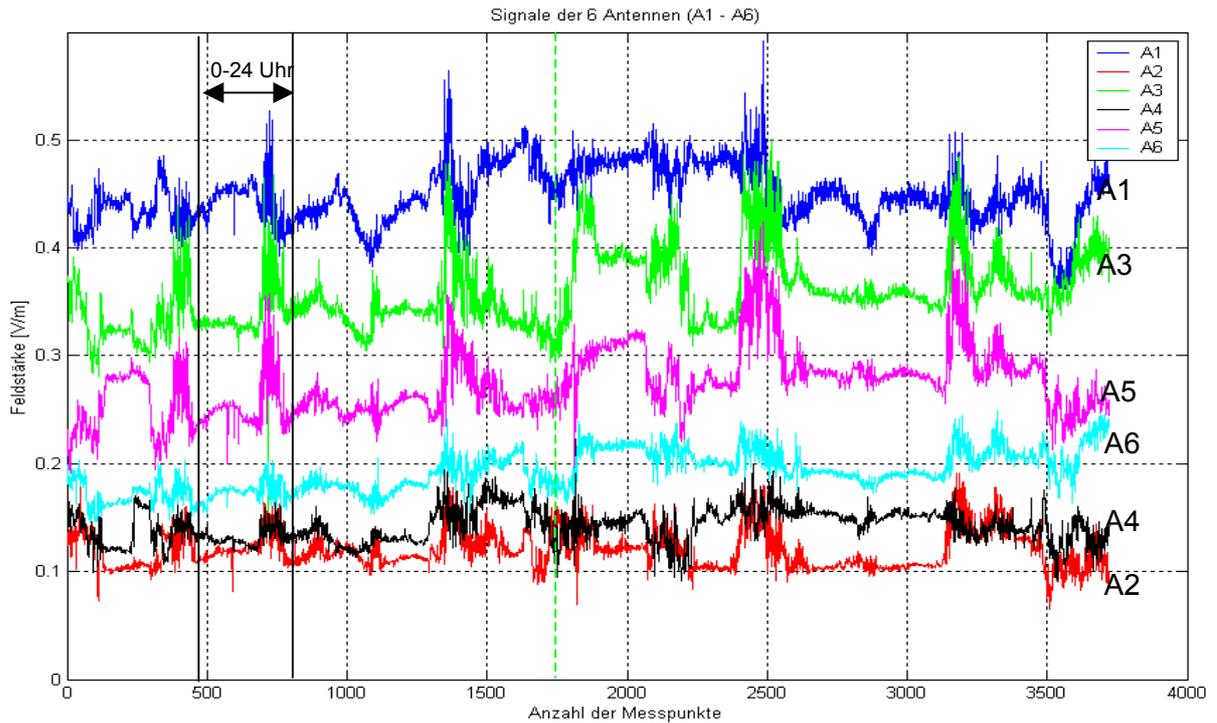


Bild 2: Ausschnitt der gemessenen BCCH Signale (946,6 MHz) der Antennen A1 bis A6. Ein Messpunkt entspricht einer Zeitspanne von 4,5 Minuten.

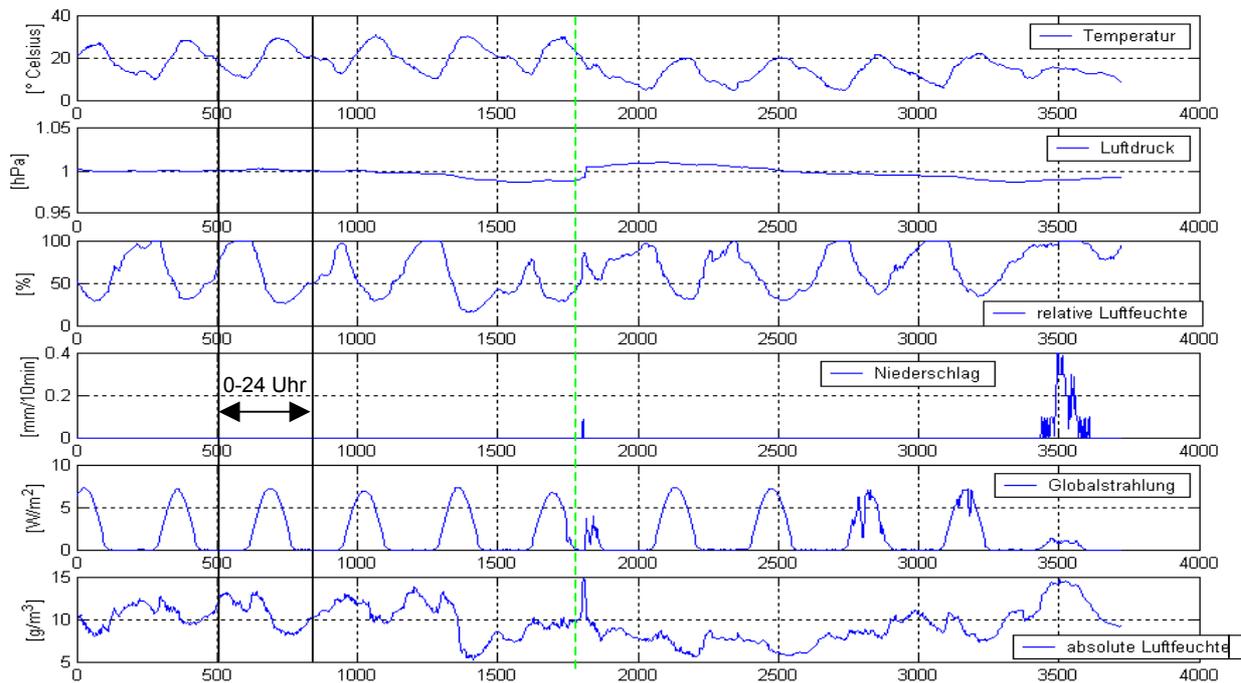


Bild 3: Ausschnitt der verwendeten meteorologischen Daten. In den Bildern 2 und 3 ist der gleiche Zeitausschnitt dargestellt.

Betrachtet man zunächst die gemessenen BCCH Signale, so zeigen sich hohe Unterschiede in deren Absolutwerten, ansonsten jedoch weitgehend gleiches Verhalten der Feldstärkeverläufe zueinander. Insbesondere beinhalten alle Kurven ruhigere Phasen und solche mit starken Schwankungen aufeinander folgender Messwerte. Diese können teilweise aus den vorliegenden meteorologischen Daten, z.B. bei Niederschlag oder einer extrem hohen Änderung der absoluten Luftfeuchte abgeleitet werden. Andererseits zeigen sich solch unruhige Bereiche auch verstärkt am Nachmittag heißer Tage (Bereiche um die Messpunkte 380, 700, 1350, 2500, und 3180), wobei deren Ursache aus den vorliegenden meteorologischen Daten nicht unmittelbar erklärt werden kann. Vermutete Ursachen dafür könnten der Ozongehalt oder der Ionisationszustand der Luft sein, da keine Veränderung der Umgebung bemerkt wurde. Die Schwankungsbreite der einzelnen Antennen um deren Mittelwert liegt im Bereich von +61% bis – 45.17%. Dies entspricht maximal ca. 4dB (Tabelle1).

Antenne	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Mittelwert [V/m]	0.446	0.119	0.356	0.138	0.268	0.188
Maximalwert [V/m]	0.591	0.192	0.528	0.199	0.423	0.248
Minimalwert [V/m]	0.354	0.065	0.280	0.082	0.190	0.145
Pos. Schwankungsbreite [%]	32.58	61.00	48.50	44.80	57.85	32.03
Neg. Schwankungsbreite [%]	-20.58	-45.17	-21.26	-40.14	-28.99	-22.78

Tabelle 1: Maximale zeitliche Schwankungen der Amplitude des BCCH für A1 bis A6

Um Ähnlichkeiten der Feldstärkekurven zueinander und zu den meteorologischen Daten quantifizieren zu können, normierten wir alle Kurven auf gleichen Flächen-inhalt. Anschließend wurden jeweils 2 Kurven übereinander dargestellt um deren gemeinsame (überlappende) und nicht überlappende Flächenanteile zu ermitteln. Dann bildeten wir den Quotienten aus den nicht überlappenden und den überlappenden Flächenanteilen, der seinerseits ein Maß für die Amplitudenähnlichkeit ist. Um auch ein Maß für den Kurvenverlauf bzw. die Ähnlichkeit der Form der Kurven zu erhalten, wurden die normierten Kurven differenziert und aus diesen differenzierten Verläufen wieder der Quotient aus nicht überlappenden zu überlappenden Flächenteilen gebildet. Für identische Kurven ergibt sich aus dieser Beurteilungsmethode für beide Quotienten jeweils Null. Unterscheiden sich die Kurven jedoch in deren Amplituden bzw. in deren Form, ergeben sich entsprechend größere Zahlenwerte. Um den Vergleich zweier Kurven auf eine einzige Zahl zu reduzieren, wurden die beiden Quotienten noch miteinander multipliziert. Die Tabellen 2 und 3 zeigen die Ergebnisse dieser Ähnlichkeitsanalyse.

	A1	A2	A3	A4	A6	A6
A1	0.00	6.00	4.96	6.00	5.67	5.84
A2		0.00	4.97	5.02	5.47	6.00
A3			0.00	4.47	3.90	4.72
A4				0.00	4.08	4.67
A5					0.00	3.68
A6						0.00

Tabelle 2: Ähnlichkeit der gemessenen Feldstärkeverläufe von A1 bis A6

Mit 3,68 besteht zwischen den Antennen A5 und A6 die größte Ähnlichkeit, wobei jedoch alle Werte in der selben Größenordnung liegen. Von den meteorologischen Daten korreliert entsprechend Tabelle 3 die Temperatur am besten mit den Feldstärkewerten. Die ist ein Hinweis darauf, dass die Luftfeuchte keine dominante Rolle für die Ausbreitungseigenschaften besitzt.

	Temperatur	Luftdruck	R. Feuchte	Niederschlag	Strahlung	A. Feuchte
A_mittel	7.42	20.62	12.74	148.97	26.04	13.11

Tabelle 3: Ähnlichkeit des Mittelwertes aller Feldstärkeverläufe (A1 – A6) mit den jeweiligen meteorologischen Daten

Eine weitere Möglichkeit der Charakterisierung sind Amplitudendichteverteilungsdiagramme entsprechend Bild 4. Darin sind auf der horizontalen Achse die Feldstärkewerte von 0 bis 0,6 V/m, unterteilt in 100 Klassen, aufgetragen und vertikal die Anzahl n der Messergebnisse pro Klasse (n = 300).

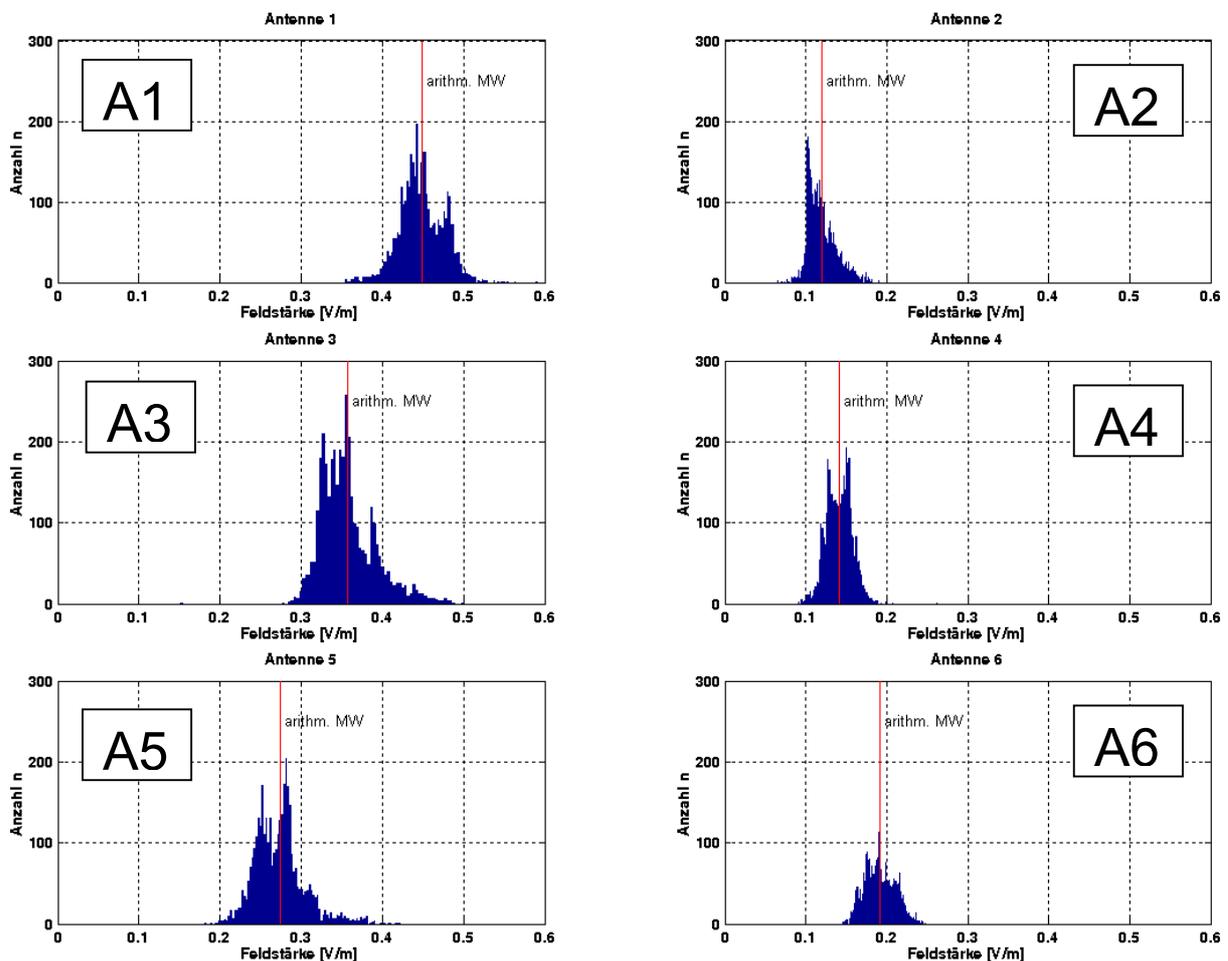


Bild 4: Amplitudendichteverteilung des BCCH für die Antennen A1 bis A6. Auf der horizontalen Achse ist die Feldstärke (0 bis 0,6 V/m) unterteilt in 100 Klassen aufgetragen und vertikal die Anzahl der Messergebnisse pro Klasse (n= 0 - 300).

Man erkennt in Bild 4 besonders gut die höheren Feldstärkewerte der linken, durch die Fenstersäule nicht abgeschatteten Antennen (A1, A3, A5). Die Dichte-Verteilungen selbst lassen trotz der hohen Ereigniszahl von über 4500 Messungen keine einheitlich zuordenbaren Verteilungsfunktionen erkennen.

4. Analyse von Untermengen zur Reduktion des Messaufwands

Für die praktische Durchführung von Messungen z.B. für Zulassungsverfahren oder im Personenschutz sind im Allgemeinen aufwendige Messprozeduren aus Zeit- und Kostengründen nicht akzeptabel. Es besteht daher die Notwendigkeit, einfache Prozeduren mit hoher Zuverlässigkeit im Bezug auf die erhaltenen Resultate und einer guten Reproduzierbarkeit zu entwickeln [5]. Eine Möglichkeit ist, eine Prozedur zu etablieren, die mit exakt festgelegten und daher reproduzierbaren Messpunkten arbeitet, deren Anzahl jedoch individuell variabel angewandt werden kann. Für eine solche Prozedur wäre nachzuweisen, ob mit steigender Anzahl von systematisch gewählten Messpunkten die verbleibende Messunsicherheit (der Prozedur, nicht des Messsystems an sich) reduziert wird. Dies führt in ihren Extremfällen zu einer einzigen Messung mit entsprechend hoher Unsicherheit bzw. zu vielen Messungen bei immer kleiner werdender methodischer Unsicherheit. In der Praxis liegen die gemessenen Feldstärkewerte meist weit unter den geltenden Grenzwerten und man könnte daher mit wenigen Messungen das Auslangen finden, ohne dass die höhere Unsicherheit von Bedeutung ist.

Geht man davon aus, dass die verwendeten 6 Antennen das Volumen eines Menschen ausreichend gut repräsentieren, so kann aus der gesamten Menge der Messwerte (immerhin über 27.000) das absolute Maximum bzw. ein repräsentativer Mittelwert bestimmt werden. Diese beiden Werte dienen in Tabelle 4 als Bezugswerte für die prozentuell angeführten maximalen Abweichungen von Untermengen. Untermengen sind Gruppen, bestehend aus jeweils 6, 3, 2 oder nur einer Antenne. Untersucht wurde die maximale Abweichung dieser Gruppen zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Messkampagne und für alle möglichen Kombinationen von gleich großen Gruppen (z.B. für Gruppe mit 3 Antennen die Positionen: 123; 124; 125; 126, 134, 135, usw.). In Tabelle 4 ist angegeben, mit welchen maximalen Abweichungen man für diese Gruppen im Bezug zum absoluten Maximalwert (2 Zeile) und zum Mittelwert gebildet aus allen Messungen, rechnen müsste (Zeile 3 und 4).

	6 Antennen	3 Antennen	2 Antennen	1 Antenne
Max. Unterschreitung des abs. Max. [%]	-63.13	-79.68	-84.28	-88.94
Pos. Abweichung vom ges. MW. . [%]	30.20	90.88	110.01	134.07
Neg. Abweichung vom ges. MW. [%]	-13.70	-52.44	-63.20	-74.12

Tabelle 4: Maximale methodische Abweichungen von Untermengen (Antennengruppen) für die Messkampagne im Raum Einstein

Die Aussagekraft von Tabelle 4 liegt nicht nur in den, für diese Messkampagne gefundenen, absoluten Zahlenwerten, sondern auch in der Tatsache, dass dieser Ansatz die Möglichkeit bietet entsprechend den Anforderungen von ICNIRP [1]

betreffend der Expositionsbestimmung eine bessere Abschätzung der Situation zu gewährleisten. Eine Aufgabe zukünftiger Untersuchungen ist die Definition optimierter Messpositionen und die Abschätzung der maximalen methodischen Unsicherheiten in Abhängigkeit von der Anzahl der Messungen und der Expositionssituation (z.B. direkte oder indirekte Sicht zum Sender).

5. Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Wetterverhältnisse einen unmittelbar messbaren Einfluss auf die Ausbreitungseigenschaften hochfrequenter elektromagnetischer Felder besitzen. Ebenso wurde aber auch durch die, im wesentlichen über die gesamte Messdauer gleich bleibenden, jedoch in ihrem absoluten Werten zueinander stark unterschiedlichen Feldstärken des betrachteten BCCH festgestellt, dass Objekte im direkten Ausbreitungspfad (Abschattung der Antennen A2, A4 und A6 durch Fenstersäule) gegenüber diesen Witterungseffekten dominant sind (quasi-optische Ausbreitung). Es wurde eine einfache Möglichkeit zur quantitativen Angabe der Ähnlichkeit von Amplitudenverläufen mit Hilfe der Quotienten von nicht überlappenden zu überlappenden Flächenanteilen der untersuchten Kurven und deren Ableitungen vorgestellt. Zusätzlich konnte durch die Analyse von Untermengen eine praktisch gut anwendbare Methode z.B. zur Expositionsbeurteilung von Personen in Feldern von GSM Basisstationen inklusive typischer Abweichungen in Abhängigkeit von der Anzahl der gemessenen Punkte aufgezeigt werden. Die Unsicherheiten dieser neuen Methode für spezifische Situationen hinreichend zu quantifizieren ist Aufgabe weiterer Untersuchungen. Dadurch wären auch Methoden, welche sich auf das Auffinden eines 'Absoluten Maximums' verlassen, ersetzbar.

6. Literaturverzeichnis

- [1] ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300GHz), Health Physics 74(4), pp. 494- 522, 1998
- [2] Bernardi P., Cavagnaro M., Pisa S., Piuze E.; Human Exposure to Radio Base Station Antennas in Urban Environment; IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 48, No.11, November 2000
- [3] Neubauer G, Überbacher R., Kaczmarczyk, A.; Giczi, W.; Lamedschwandner K., Variations of Field Levels of Base Stations within Small Areas in the Range of a Few Wavelengths, Poster Presentation P 75 - C; 25th annual BEMS Meeting, 22-27.6, 2003, Maui, Hawaii, USA, Abstract Book p.251
- [4] Haider H, Kriz A, Müllner W.; Frequenzselektive Analyse des Isotropieverhaltens und der Messunsicherheit für das Feldstärke Messverfahren Add3D Vortrag, 10. Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, 9 – 11 April 2002, Düsseldorf, Kongressband S. 305 – 312
- [5] Safety Code 6, Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3kHz to 300GHz, Health Canada, Safety Code 6, http://www:hc-sc.gc.ca/ehp/ehd/catalogue/rpb_pubs/99ehd237.pdf, 1999