



Gunthard Kraus, DG 8 GB

Bestimmung von Empfangsfeldstärken im UHF-Bereich

Mit relativ geringem Meßaufwand lassen sich Signalstärken bestimmter Sender feststellen. Um von der Signalstärke zur Feldstärke eines Senders an einem bestimmten Empfangs-Standort zu kommen, ist zusätzlich Rechenarbeit notwendig.

Nachfolgend wird eine geeignete Messanordnung, die notwendige Umrechnung und die Auswertung der Ergebnisse beschrieben.

1.

Vorbemerkung

Wer möchte nicht mal die exakten Feldstärken bestimmter Stationen am eigenen Empfangsort wissen, die sonst nur ganz nüchtern durch die Angabe von „S-Stufen“ gekennzeichnet werden? Oder wie wäre es, mal die Diagramme und Formeln für die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen auf ihre

Richtigkeit zu prüfen oder aus gemessenen Feldstärken zurück auf die Sendeleistung zu schließen?

Und da gibt es noch ein ganz neues und aktuelles Phänomen: durch die Zunahme der Basis-Stationen in den Mobilfunknetzen (D1, D2, Eplus, VIAG...) und dem daraus resultierenden Anstieg der Antennenstandorte wächst die Beunruhigung in der Bevölkerung wegen möglicher gesundheitlicher Gefährdung. So ist es durchaus sinnvoll und auch reizvoll, solche Feldstärken zu bestimmen und sie mit den gültigen gesetzlichen Maximalwerten zu vergleichen.

In diesem Artikel wird dazu ein einfaches Verfahren beschrieben, das nur einen kalibrierten Spektrum-Analysator für den gewünschten Frequenzbereich benötigt, der ja in der Zwischenzeit bei vielen Amateuren vorhanden ist. Mit einer geeigneten Messantenne (Kostenaufwand zwischen 50 und 100 Euro) hat man bereits die komplette Mess-Station zusammen, der Rest ist reine Rechenarbeit.

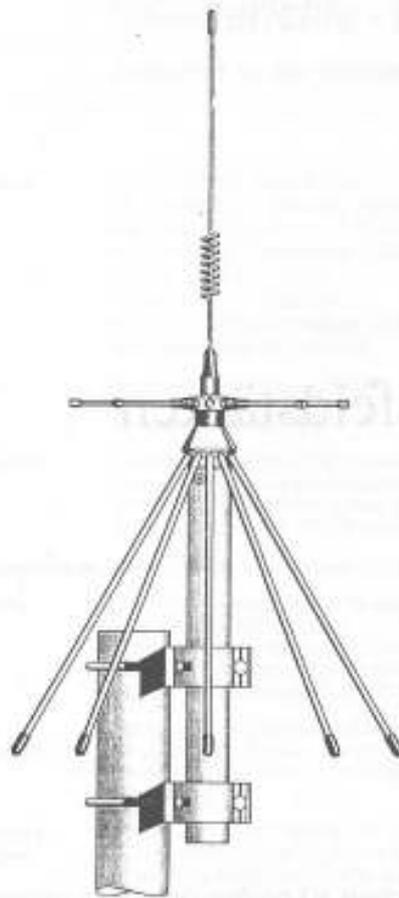


Bild 1: So sieht eine breitbandige Discone-Antenne aus. Das Antennenkabel wird von unten durch das kurze Rohrstück geführt und an eine N-Buchse angeschlossen

2. Messanordnung und Messvorgang

Als „Messantenne“ dient eine „Discone-Breitbandantenne“ (Modell SD 3000 U/N der Firma SIRIOantenna) für den Frequenzbereich 300 MHz bis 3000 MHz, die über „UKW-Berichte“ in Deutschland vertrieben wird. **Bild 1** soll einen Eindruck davon vermitteln, wie dieser Antennentyp aussieht und angeschlossen wird. Der Ausgang dieser Antenne wird durch das untere kurze, senkrechte Rohrstück herausgeführt und mit dem Spektrum-Analysator über einen N-Stecker und ein etwa 1m langes Kabel RG 214 verbunden.

Die elektrischen Daten der Antenne sind:

Antennengewinn für den angegebenen Frequenzbereich: ca. 2,2 dBi

Systemwiderstand: 50 Ω unsymmetrisch (N-Steckverbindung)

VSWR im angegebenen Frequenzbereich: siehe **Bild 2** und **Bild 3**

Beim Spektrum-Analysator handelt es sich um das weit verbreitete Grundgerät „hp 141T“ mit dem Einschub „8555A“ der Firma Hewlett Packard für den Frequenzbereich

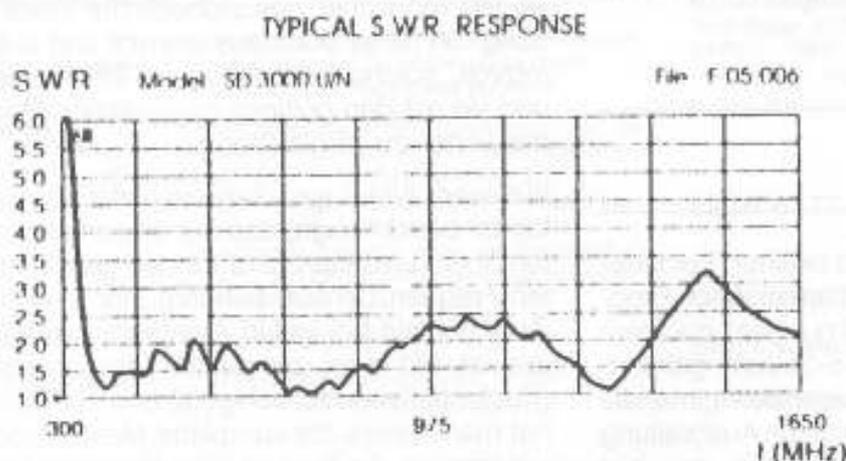


Bild 2: Verlauf des VSWR der Antenne im Frequenzbereich 300 bis 1650 MHz

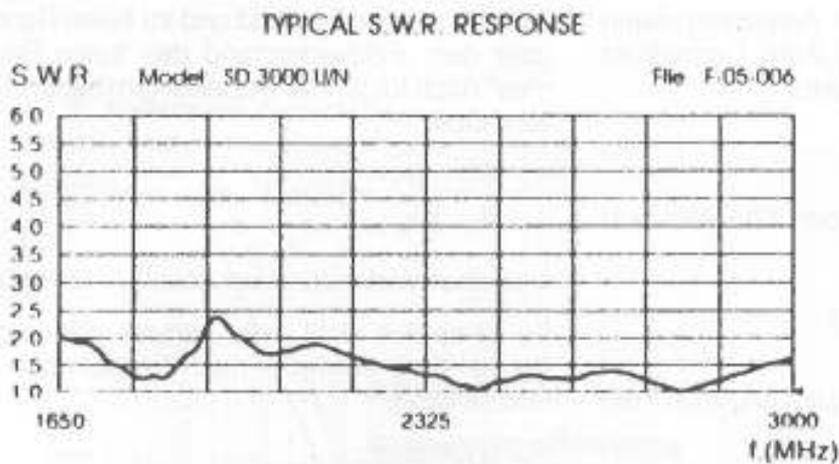


Bild 3:
Verlauf des VSWR
der Antenne im
Frequenzbereich
1650 bis 3000 MHz

von 10 MHz bis 18 GHz. Der Eingangswiderstand beträgt ebenfalls 50Ω , durch den im Gerät eingebauten, umschaltbaren Vorteiler lassen sich Signalpegel zwischen +40 dBm und weniger als -100 dBm sicher darstellen und bestimmen.

Nach dem Aufbau der Anordnung und dem Warmlaufen muss der Analysator zuerst kalibriert werden, damit die von der Antenne aufgenommene und an den Analysator weitergegebene Leistung möglichst genau bestimmt werden kann. Anschließend werden Antenne und Analysator verbunden, die gewünschte Station auf die Mitte des Bildschirms geholt, in aller Ruhe abgelesen und der Wert notiert. Das ist schon alles - der Rest wird im nächsten Kapitel genau beschrieben.

3. Berechnung der Feldstärke aus der gemessenen Leistung

Aus dem mit dem Spektrum-Analysator ermittelten Leistungswert kann man die Feldstärke rechnerisch ermitteln, das läuft nach folgendem Prinzip ab:

- a) Bestimmung der Antennen-Wirkfläche
- b) Berechnung der Strahlungsdichte am Empfangsort
- c) Umrechnung der Strahlungsdichte in elektrische und magnetische Feldstärke.

Ableitung des Verfahrens:

Die von der Messantenne aufgenommene und bei korrekter Anpassung an den Messempfänger weitergegebene Wirkleistung kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$P_E = S \cdot F_E \quad (1)$$

Darin bedeutet S die „Strahlungsdichte“ in Watt pro m^2 und F_E die „Wirkfläche“ der Antenne.

Die Gewinnangabe der eingesetzten Messantenne bezieht sich auf den „isotropen Kugelstrahler“ (der keine Richtwirkung kennt). Für dessen Wirkfläche gilt einer bestimmten Frequenz:

$$F_{\text{isotrop}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2)$$

Hierbei stellt λ die der Betriebsfrequenz entsprechende Wellenlänge dar.



Laut Datenblatt liegt der Antennengewinn der Messantenne bei ca. 2,2 dBi. Deshalb ist ihre Wirkfläche um den Faktor

$$10^{\frac{2,2}{10}} = 1,66 \quad (3)$$

größer als die des isotropen Strahlers und beträgt damit:

$$F_{\text{Messantenne}} = 1,66 \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (4)$$

Damit läuft die Auswertung auf folgende Weise ab:

1. Schritt:

Bei der Empfangsfrequenz wird mit obiger Formel die gültige Antennen-Wirkfläche berechnet.

2. Schritt:

Dann wird der in dBm gemessene Pegel in Leistung umgerechnet, wobei folgende Beziehung zu verwenden ist:

$$P \text{ in Milliwatt} = 10^{\frac{\text{Pegel}}{10}} \quad (5)$$

3. Schritt:

Diese Leistung ist durch die geltende Wirkfläche zu dividieren, um die gesuchte Strahlungsdichte S zu erhalten.

4. Schritt:

Die Strahlungsdichte S ist der „Poyntingsche Vektor“, der in Ausbreitungsrichtung der Welle zeigt und auf dem die Elektrische bzw. Magnetische Feldstärke senkrecht stehen. E-Feld und H-Feld-Vektor sind im Fernfeld (räumlich und zeitlich!) phasengleich, stehen aber selbst wieder senkrecht aufeinander. Für diesen Zusammenhang gilt allgemein

$$\bar{S} = \frac{1}{2} (\bar{E} \times \bar{H}) \quad (6)$$

und für die Annahme, dass die Antenne optimal ausgerichtet ist und man sich tatsächlich im echten Fernfeld befindet (was ja ab einigen Wellenlängen der Fall ist):

$$S = \frac{1}{2} E \cdot H \quad (7)$$

E und H sind im Fernfeld und im freien Raum über den „Feldwiderstand des freien Raumes“ nach folgender Beziehung miteinander verknüpft:

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi\Omega \quad (8)$$

was einen Widerstand von etwa 377 Ω ergibt.

So ist es nun nicht mehr schwer, die obige Formel für S entweder nach E oder nach H umzustellen:

Für S gilt dann:

$$S = \frac{1}{2} E \left(\frac{E}{120\pi\Omega} \right) = \frac{E^2}{240\pi\Omega} \quad (9)$$

Damit erhält man die elektrische Feldstärke E zu

$$E = \sqrt{S \cdot 240\pi\Omega} \quad (10)$$

in Volt pro Meter, wenn S in Watt pro m^2 eingesetzt wird.

Ebenso gilt für die magnetische Feldstärke H:

$$S = \frac{1}{2} H \cdot (120\pi\Omega \cdot H) = 60\pi\Omega \cdot H^2 \quad (11)$$

und daraus

$$H = \sqrt{\frac{S}{60\pi\Omega}} \quad (12)$$

in Ampere pro Meter, wenn S in Watt pro m^2 ausgedrückt wird.

4.

Messbeispiel aus der Praxis

Aus reiner Neugier, und weil die Wellen im Augenblick bei diesem Thema gerade hoch schlagen, wurde einfach mal der 900 MHz-Frequenzbereich der GSM-Handies (um 950 MHz) als Testfall für die vorgestellte Methode näher untersucht.

Am Messort waren in der näheren und weiteren Umgebung schon mit bloßem Auge mehrere neu installierte Basis-Stationen auszu-

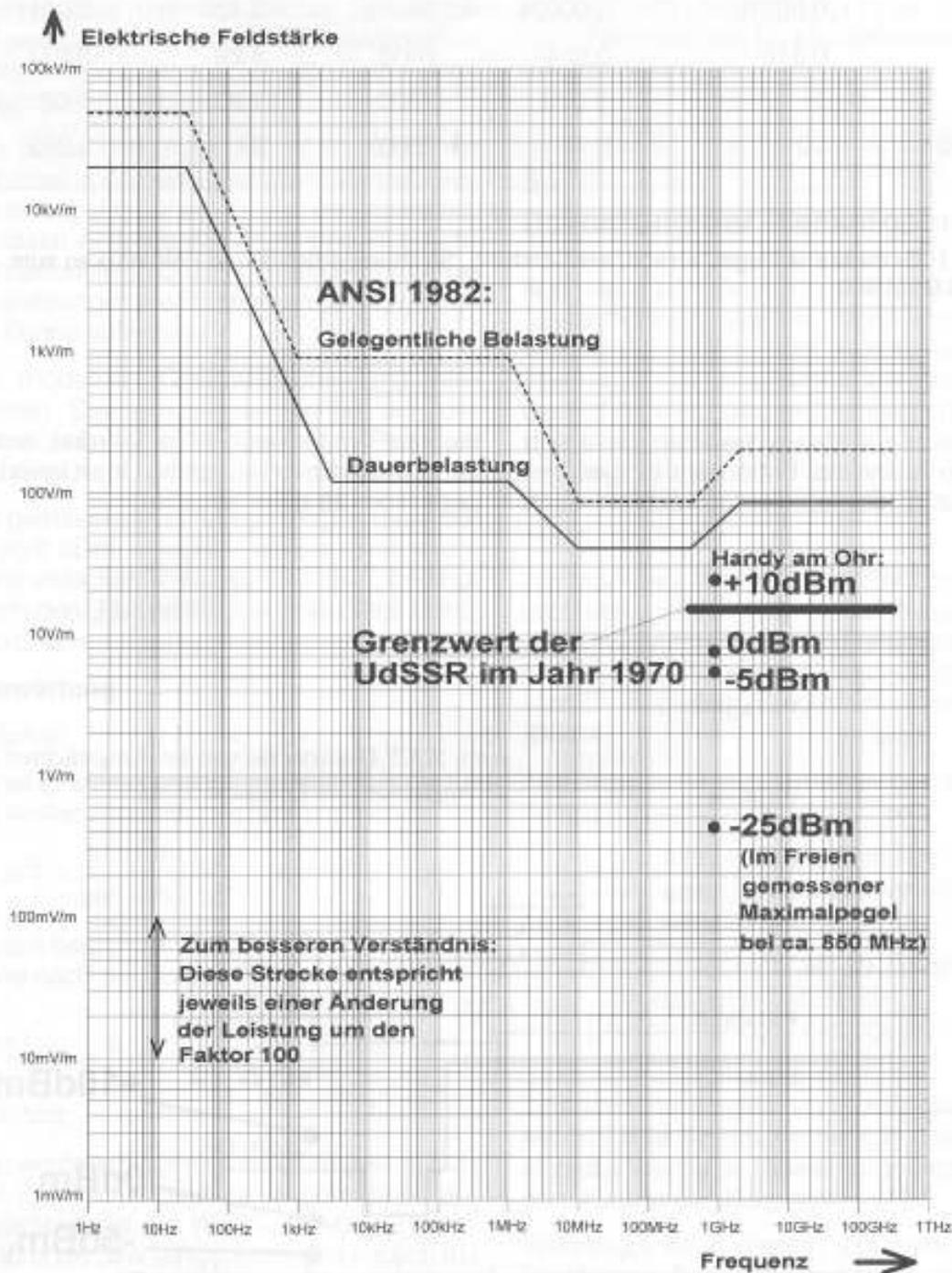


Bild 4: Zulässige elektrische Feldstärken in der westlichen Welt. Eingetragen sind der höchste, mittlere und kleinste beobachtete Wert für den Fall „Handy am Ohr“ bei der Messfrequenz von 950 MHz



Pegel in dBm	Leistung in mW	S in W/m^2	S in nW/cm^2	E in V/m	H in A/m
-25	0,00316	0,00024	24	0,425	0,0011
-5	0,316	0,024	2400	4,25	0,011
0	1	0,076	7600	7,57	0,02
+10	10	0,76	76000	24	0,063

Tabelle 1: Gemessene Pegel, errechnete Leistung, Strahlungsdichte und Feldstärken zum Beispiel GSM 900

machen; es war also zu erwarten, dass sich auf dem Analysator-Bildschirm einiges zeigen würde. So konnten tatsächlich auch

mehrere Träger beobachtet werden, wobei der stärkste davon kurzzeitig einen Maximalpegel von **-25 dBm** erreichte.

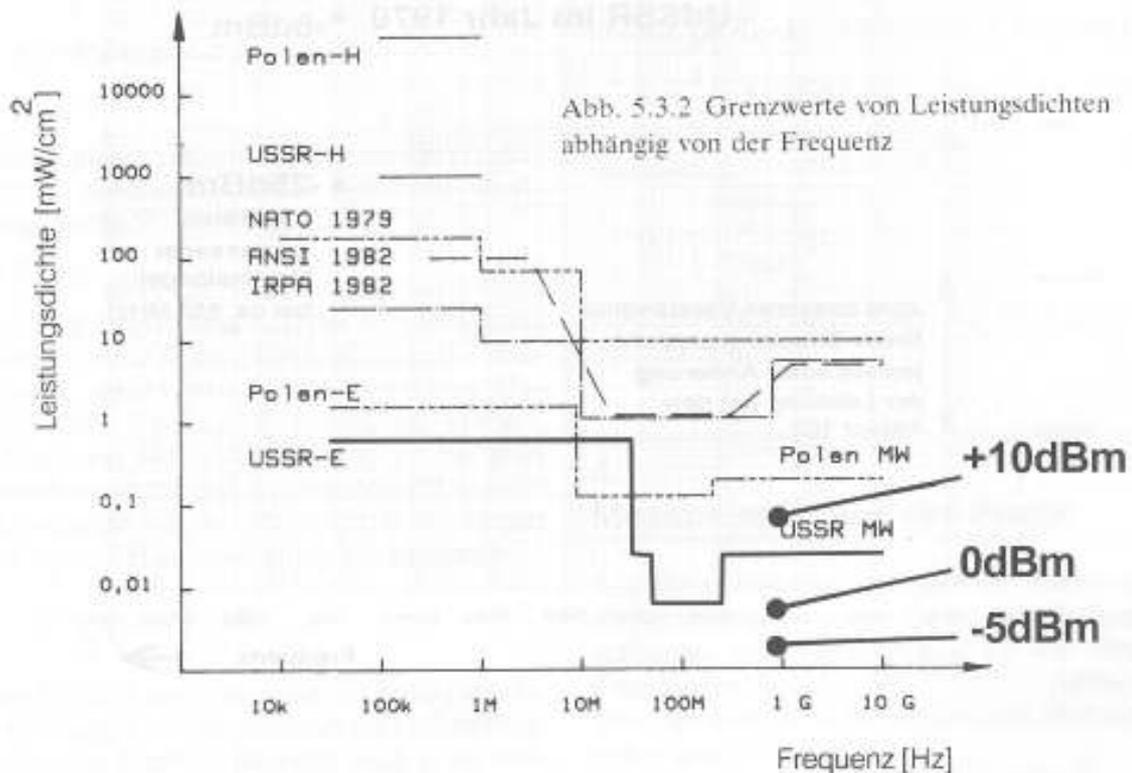


Bild 5: Nochmals die beobachteten Feldstärken bei „Handy am Ohr“. Diesmal aber im Vergleich zu den Grenzwerten der früheren UdSSR bzw. in Polen



Anschließend wurden - um die Verhältnisse im Kopf eines Handy-Users zu simulieren - nacheinander mehrere solcher Geräte bis auf weniger als 10 cm der Messantenne an-genähert und die auftretenden Pegel beim Telefonieren beobachtet.

Hier zeigte sich, dass die älteren Versionen mit einer externen „Stummelantenne“ wesentlich „gefährlicher“ für den Benutzer sind, da diese Antennenbauarten eine Rundum-Charakteristik und damit eine gleichmäßige Abstrahlung in alle Richtungen der horizontalen Ebene aufweisen.

Die modernen Geräteversionen mit integrierten Streifenleitungsantennen auf der Platine schwächen dagegen den Pegel „in Richtung Kopf“ um bis zu 15 dB ab!

Die gemessenen Leistungen lagen meist bei -5 bis 0 dBm, erreichten aber auch Spitzenwerte zwischen + 5 und +10 dBm, bedingt durch den „Pulsbetrieb“, in dem diese Geräte arbeiten.

Auswertung:

1. Schritt:

Bei einer Messfrequenz von 950 MHz gilt für die Wellenlänge ein Wert von

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{sec}}{\text{sec} \cdot 950 \cdot 10^6} = 0,315 \text{ m} = 31,5 \text{ cm}$$

Daraus berechnet sich die Wirkfläche der Antenne nach der obigen Formel (4) zu

$$F_{\text{Messantenne}} = 1,66 \cdot \frac{(31,5 \text{ cm})^2}{4\pi} = 131 \text{ cm}^2$$

2. Schritt:

Nun werden die gemessenen Pegel mit Formel (5) in eine Leistung umgerechnet, anschließend die zur Wirkfläche von 131 cm² gehörende Strahlungsdichte und endlich mit dem Formeln (10) und (12) die Feldstärken mit dem Taschenrechner bestimmt.

Für diesen Anwendungsfall wurde alles in **Tabelle 1** eingetragen. Dabei wurde die Strahlungsdichte nicht nur in W/m², sondern in einer weiteren Spalte auch in der bei

modernen Diskussionen (über die biologischen Auswirkungen elektromagnetischer Felder) meist verwendeten Einheit

„Nanowatt pro Quadratzentimeter“ ausgedrückt.

5.

Bewertung der Messergebnisse

Nun stellte sich die wichtige Frage nach der „Gefährlichkeit“ solcher Signalamplituden für den Menschen. Hierzu wurden aus dem Internet [3] die Diagramme mit den in der westlichen Welt gültigen Grenzwerten heruntergeladen und die zur kurzzeitig beobachteten Maximalleistung (= Nahfeld des Handys) von +10 dBm gehörende elektrische Feldstärke eingetragen.

Wie man sieht, liegt man damit noch deutlich unter den „gefährlichen“ Grenzen - erst recht, wenn man versucht, den im Freien gemessenen Basis-Stations-Pegel von -25 dBm zusätzlich in diesem Diagramm einzuordnen (**Bild 4**).

Allerdings sollte nicht verschwiegen werden, dass

- heute massiv für wesentlich kleiner angesetzte Grenzwerte plädiert wird und
- schon vor mehr als 30 Jahren die damalige UdSSR die weltweit absolut niedrigsten Maximalwerte eingeführt hat.

Zum direkten Vergleich und zum Nachdenken soll **Bild 5** herausfordern, in das die ersten drei Werte der Tabelle eingetragen wurden. (Quelle des Diagramms: [4]).

Interessant ist in diesem Zusammenhang: Beobachtet man mehrere eng benachbarte Träger mit vergleichbaren Leistungen im untersuchten Frequenzband, so erhält man die Gesamtwirkung auf einen Organismus, indem man zuerst die einzelnen Pegel in Leistungen umrechnet und dann durch Addition dieser Einzelwerte die Gesamtbelastung er-



mittelt. Das ist zulässig, da diese Signale nicht korreliert sind.

6. Praxismessung im Bereich GSM 1800

Zum Vergleich wurden noch die Verhältnisse im Bereich des E-Netzes untersucht.

Dort ergab sich ein Maximalpegel von -55 dBm, der natürlich noch einer weiteren „Behandlung“ bedarf.

Bei Verdopplung der Frequenz halbiert sich nämlich die Wellenlänge und damit sinkt - wegen des quadratischen Zusammenhangs zwischen Wellenlänge und Wirkfläche - die Wirkfläche auf ein Viertel des im vorigen Kapitel verwendeten Wertes von 131cm^2 .

Dadurch steigt die Strahlungsdichte bei gleicher abgelesener Leistung auf den vierfachen Wert an!

Doch auch bei Berücksichtigung dieses Sachverhaltes liegt der Wert der vorhandenen Strahlungsdichte auf jeden Fall noch sehr weit unter allen Gefährdungsgrenzen.

7. Fehlermöglichkeiten beim verwendeten Messverfahren

Jedes Messverfahren und jede Messanordnung geht von idealen Voraussetzungen aus. Die Adaption an die realen Gegebenheiten ist immer mit möglichen Ungenauigkeiten oder Fehlerquellen verbunden:

a) Der angegebene Antennengewinn von $2,2$ dBi wurde im gesamten Frequenzbereich als konstant angenommen. Falls Schwankungen vorkommen, aber der genaue Verlauf bekannt ist, kann bei der gewählten Messfrequenz die nötige Korrektur vorgenommen werden.

b) Es muss überall möglichst korrekte Leistungs-Anpassung herrschen (= der Reflektionsfaktor r bzw. das VSWR dürfen im gesamten Frequenzbereich nicht über einen bestimmten Maximalwert ansteigen). Ist diese Bedingung nicht erfüllt, dann ist die angezeigte Leistung und die daraus berechnete Strahlungsdichte zu klein.

Für die verwendete Messantenne gilt bei 950 MHz laut dem in Bild 2 abgedruckten Diagrammen:

VSWR etwa $2,2$

Daraus lässt sich mit der folgenden Formel ein Reflektionsfaktor von

$$|r| = \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} = \frac{2,2 - 1}{2,2 + 1} = 0,375 = 37,5\%$$

errechnen.

Die durch diese Fehlanpassung verursachte Minder-Anzeige (in dB) beträgt dann

$$\Delta a = 10 \cdot \log \frac{1}{1 - |r|^2}$$

$$\Delta a = 10 \cdot \log \frac{1}{1 - |0,375|^2} = 0,66\text{dB}$$

c) Bei längeren Zuleitungen zur Antenne macht sich die Dämpfung der verwendeten Messkabel bemerkbar. Bei der Frequenz $f = 950$ MHz dürfte dieser Wert noch unter 20 dB pro 100 m Länge liegen.

Eine Kabellänge von 2 m zwischen Antenne und Messempfänger bewirkt jedoch schon eine zusätzliche Dämpfung (und damit eine Reduktion der berechneten Strahlungsdichte) um ca. $0,4$ dB.

d) Der Eigenfrequenzgang des Spektrumanalysators beeinflusst direkt die angezeigte Leistung und die daraus ermittelte Strahlungsdichte, also muss er berücksichtigt werden. Er liegt im Messbereich von 0 bis 2 GHz mit steigender Frequenz bei maximal 1 dB und führt ebenfalls zu einer verminderten Anzeige.



e) Die Messungen müssen im Fernfeld der Strahler erfolgen. Außerdem dürfen keine Echos von irgendwelchen Gebäuden oder Gegenständen das Ergebnis beeinflussen - es kommen also nur Freifeldmessungen in Frage.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der angezeigte und für die Berechnungen herangezogene Pegel um ca. 2 dB erhöht werden sollte, um die meisten der auftretenden Fehler auszugleichen.

8.

Verwendete Literatur

[1]: Edmund Stirner, „Antennen“. Band 1: Grundlagen. Hüthig Verlag, ISBN 3-7785-0962-4

[2]: John D. Kraus, „Antennas“. McGrawhill International Editions. ISBN 0-07-100482-3

[3]: Homepage der TU-München. Link: <http://www.hfs.ei.tum.de>

[4]: Käs / Pauli „Mikrowellentechnik“. Franzis-Verlag 1991. ISBN 3-7723-5594-3. Kapitel 5: „Biologische Wirkung von Mikrowellen“.

9.

Bezugsquellen

SD 3000: Breitband-Rundstrahlantenne; Fachversand für Funkzubehör „UKW-Berichte“, Baiersdorf
Tel. 09133-77980,
Fax 09133-779833

ANZEIGE

Mikrowellen-CAD-Software

PUFF Version 2.1

- wieder lieferbar -

DOS-Software auf Diskette
engl. Original-Handbuch



Art.Nr. 03407 € 22,-



UKW Berichte
Telecommunications

UKW-Berichte, Eberhard L. Smolka
Jahnstrasse 7, D-91083 Baiersdorf
Tel. 09133-77980
Fax 09133-779833
Email: ukwbericht@aol.com
www.ukw-berichte.de