

Ein Mikrowatt ist ein Mikrowatt - oder ?

Messungen von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen

Die Nutzung von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen für immer neue Anwendungen im Bereich der Telekommunikation und des Datenaustausches zwischen Computern wird begleitet von einer Diskussion um die gesundheitliche Auswirkungen dieser Funkwellen. Messungen der tatsächlichen Strahlungsbelastung könnten dabei helfen, diese Diskussion zu objektivieren, aber leider gibt es auch bezüglich der Frage, wie die tatsächliche Strahlungsbelastung eigentlich zu ermitteln ist, keine einheitliche Meinung.

Das Frequenzspektrum

Bevor man auf die Messung von elektromagnetischen Wellen eingehen kann, müssen zunächst einige Aspekte der technischen Anwendung von elektromagnetischen Wellen besprochen werden. Die technische Anwendung von elektromagnetischen Wellen findet in einem sehr breiten Band von Frequenzen statt. Der Frequenzbereich von 9 kHz (Kilohertz = Tausend Schwingungen pro Sekunde) bis ca. 800 MHz (Megahertz = Millionen Schwingungen pro Sekunde) wird vornehmlich für die Übertragung von analogen Radio und Fernsehprogrammen genutzt. Im Bereich zwischen 900 MHz und 5,7 GHz (Gigahertz = Milliarden Schwingungen pro Sekunde) sind die Frequenzen angesiedelt, die für die neueren Techniken zur digitalen Signalübertragung wie Mobilfunk, Heimtelefone und Computer-Funknetzwerke genutzt werden. Radaranlagen arbeiten im Frequenzbereich ab ca. 1,5 GHz bis über 100 GHz.

Die Frequenzbänder der wichtigsten digitalen Funktechniken

Für die Techniken zur digitalen Signalübertragung sind die Frequenzbänder gemäß der folgenden Aufstellung freigegeben:

- 885 MHz – 887 MHz und 930 MHz – 932 MHz CT1+ Heimtelefone
- 935 MHz – 960 MHz GSM-Mobilfunk D-Netz
- 1,805 GHz – 1,88 GHz GSM-Mobilfunk E-Netz
- 1,88 GHz – 1,9 GHz DECT-Heimtelefone
- 2,11 GHz – 2,17 GHz UMTS
- 2,4 GHz – 2,48 GHz Wireless-Lan IEEE 802.11b und 802.11g (Computer-Funknetzwerke)
- 5,15 GHz – 5,35 GHz und 5,47 – 5,725 GHz Wireless-Lan IEEE 802.11a (Computer-Funknetzwerke)

Der Thermische Effekt

Auch Mikrowellen-Öfen arbeiten mit elektromagnetischen Wellen und zwar im Frequenzbereich von ca. 2,45 GHz. Elektromagnetische Wellen in diesem Frequenzbereich regen Wassermoleküle zu Schwingungen an. Dies führt zur Erwärmung des Wassers und wird als thermischer Effekt bezeichnet. In Mikrowellen-Öfen werden sehr hohe Feldstärken erzeugt um damit Wasser zu kochen oder Speisen zu erwärmen. Der thermische Effekt findet über ein sehr breites Frequenzband statt. Man muss für alle Anwendungen des Frequenzbereichs von 900 MHz bis zu mehreren GHz davon ausgehen, dass bei

ihnen ein thermischer Effekt messbar ist. Die Grenzwerte, die in Deutschland für hochfrequente elektromagnetische Felder gelten, sind ausschließlich daran orientiert, den thermischen Effekt auf ein unschädliches Maß zu begrenzen.

Gepulste und ungepulste Strahlung

Es gibt eine sehr wesentliche Unterscheidung zwischen den verschiedenen Funk-Anwendungen, nämlich die Frage, ob die Signalübertragung gepulst oder ungepulst ist. Gepulst bedeutet, dass nicht permanent ein Funksignal ausgestrahlt wird, sondern dass das Funksignal ähnlich einem Blinklicht ein- und ausgeschaltet wird. Der Zweck dieser gepulsten Signalübertragung ist, dass sich auf diese Weise mehrere Sender eine Frequenz teilen können. Dies wird z.B. bei den heute gängigen GSM-Handys benutzt, wo jeweils 8 Handys auf der selben Frequenz funken, jedes in seinem eigenen Zeitfenster. Die analogen Radio und Fernsehsender im Bereich bis 800 MHz strahlen durchweg ungepulste Signale aus. Im Frequenzbereich oberhalb von 800 MHz arbeiten die meisten Anwendungen jedoch mit gepulster Strahlung. Gepulste Strahlung wird von der gesundheitlichen Relevanz im Allgemeinen als wesentlich kritischer als ungepulste Strahlung eingeschätzt. Der Grund dafür ist, dass der periodische Anstieg und Abfall des elektromagnetischen Feldes im Körper zusätzliche Effekte bewirken können.

Wenn man die Feldstärke eines Senders misst, der mit gepulster Strahlung arbeitet, dann stellt sich die Frage, ob man die Feldstärke messen will, die der Sender abstrahlt, wenn er tatsächlich sendet, oder ob man den zeitlichen Mittelwert der Feldstärke messen will. Je nachdem, wie lange die Pausen zwischen zwei Sendepulsen sind, kann sich der Spitzenwert und der zeitliche Mittelwert bis zu einem Faktor von über 100 unterscheiden.

Örtliche Schwankungen des elektromagnetischen Feldes

Eine weitere Schwierigkeit bei der Messung von elektromagnetischen Feldern sind die örtlichen Schwankungen der Feldstärke. Man kennt diesen Effekt vom Radio, je nachdem wo man es hinstellt und wie man die Antenne ausrichtet ist der Empfang mal besser, mal schlechter. Wenn man angeben will, wie hoch die Strahlung innerhalb eines Raumes ist, müsste man im Prinzip immer angeben, an welcher Stelle genau im Raum man eigentlich gemessen hat. Weil sich auf diese Weise keine vergleichbaren Messergebnisse gewinnen lassen, ist es stattdessen üblich, das Maximum der Feldstärke innerhalb des Raumes anzugeben. Die Schwierigkeit dabei ist allerdings folgende: wenn die Strahlung von verschiedenen Sendern kommt, dann hat jeder dieser Sender sein eigenes lokales Maximum. Nur wenn die Messausrüstung es erlaubt, selektiv einzelne Frequenzen zu messen, können diese lokalen Maxima separat bestimmt werden. Bei einer Messung die breitbandig ist, kann nur das gemeinsame Maximum aller Frequenzen bestimmt werden.

Zeitliche Schwankungen

Schließlich gibt es auch noch die Frage, wann man eigentlich gemessen hat. Beim GSM-Handynetz gibt es z.B. große zeitliche Schwankungen in der Auslastung und entsprechend auch in der Feldstärke, die von einer GSM-Basisstation ausgesendet wird. Um das zeitliche Maximum zu bestimmen, könnte man eine 24-stündige Dauermessung durchführen, was allerdings selten praktikabel ist. Zumindestens bei GSM-Basisstationen ist es jedoch möglich, das zeitliche Maximum zu berechnen, wenn man eine frequenzselektive Messung für eine bestimmte Frequenz, den Organisationskanal der Basisstation, durchführen kann. Ohne die Betrachtung dieses Maximalwertes ist der Vergleich von Messwerten nur mit sehr beschränkter Aussagekraft möglich. Der Maximalwert der Strahlungsintensität unterscheidet sich bei einer GSM-Basisstation um den Faktor 4 vom Minimalwert.

Kriterien für Messverfahren

Messtechnisch gesehen ergeben sich aus diesen Betrachtungen also die folgenden Kriterien, auf die man ein Messverfahren untersuchen muss:

- Unterscheidet das Messverfahren zwischen gepulster und ungepulster Strahlung
- Gibt die Messverfahren bei gepulster Strahlung den zeitlichen Mittelwert oder den Spitzenwert an
- Erlaubt die Messverfahren das selektive Analysieren einzelner Frequenzen
- Gibt das Messverfahren das zeitliche Maximum der Feldstärke an oder nur den Momentanwert zum Messzeitpunkt

Messgeräte

Für die genaue Messung von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen ist eine nicht gerade billige Messausrüstung notwendig. Unter „genau“ ist dabei zu verstehen, dass sich der tatsächliche Wert nach oben um maximal 100 % und nach unten um maximal 50 % vom wahren Messwert unterscheidet (technisch gesprochen, eine Abweichung von max. 3 dB). Übertragen auf ein Tachometer im Auto würde das bedeuten, dass der Tacho zwischen 50 und 200 anzeigen kann, wenn das Auto tatsächlich mit 100 km/h fährt. Die notwendige Messausrüstung besteht aus einem Spektralanalysator mit geeichter Antenne und kostet ab 20000 Euro. Spektralanalysatoren erlauben es, zunächst das gesamte Frequenzspektrum nach benutzten Sendefrequenzen zu durchsuchen, und sodann jeden dieser Frequenzen separat detailliert zu analysieren.

Breitband-Messgeräte

Seit kurzem gibt es auch einige brauchbare Messgeräte, die mit eingeschränktem Funktionsumfang zu deutlich geringeren Preisen bis ca. 1000 Euro angeboten werden. Diese Messgeräte erlauben keine frequenzselektiven Messungen sondern sie messen breitbandig über alle Frequenzen des eingestellten Messbereichs. Es gibt jedoch nur wenige tatsächlich empfehlenswerte Geräte. Nähere Informationen hierzu in einem [Testbericht](#) über Breitbandmessgeräte der im März 2004 vom Verband Baubiologie veröffentlicht wurde (<http://www.verband-baubiologie.de/pdf/Test%20Breitbandmessgeraete.pdf>). Zu diesem Testbericht gibt es eine ebenfalls lesenswerte [Stellungnahme](#) des Messgeräte-Herstellers Gigahertz-Solutions (<http://www.gigahertz-solutions.de/AKTUELLES/VB.pdf>).

Messwerte in der Praxis

In der Praxis haben wir es in der Literatur mit den verschiedensten Messergebnissen zu tun, die man aufgrund unterschiedlicher Messverfahren nicht direkt vergleichen kann. Vielfach wird dabei der Messstandard nicht explizit dokumentiert, so dass die korrekte Interpretation durch den Leser häufig unmöglich ist. Bei neueren Messungen wird meist einer der beiden folgenden Standards verwendet:

Der Messstandard der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (Reg TP MV 09/EMF/3)

Dieser Standard ist die inhaltliche Übernahme des Europäischen Standard ECC RECOMMENDATION (02)04. Er wird ab dem Jahr 2003 für die vergleichenden Feldstärkemessungen der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (Reg TP) verwendet.

Charakteristika des Messstandards:

- Frequenzbereich 9 kHz bis 3 GHz
- Frequenzselektive Messung jedes relevanten Einzelsignals mittels Spektralanalysator
- Bei gepulster Strahlung wird der zeitlicher Mittelwert angegeben, Sonderregelungen für sehr kurze Signale
- Bei den GSM-Mobilfunkfrequenzen erfolgt keine Normalisierung der gemessenen Strahlung auf den Maximalwert, d.h. das Messergebnis ist auslastungsabhängig

Der Messstandard der Baubiologen

Die Baubiologen, die im Verband Baubiologie organisiert sind, messen in der Regel nach diesem Standard.

Charakteristika des Messstandards:

- Frequenzbereich in der Regel 27 MHz bis 3 GHz, nicht normiert
- Frequenzselektive Messung jedes relevanten Einzelsignals mittels Spektralanalysator
- Bei gepulster Strahlung wird der Maximalwert angegeben
- Bei GSM-Mobilfunkfrequenzen wird auf den Maximalwert normalisiert, d.h. das Messergebnis ist auslastungsunabhängig

Je nach dem, welches Signal gemessen wird, können sich die Messergebnisse der beiden Messverfahren für das selbe elektromagnetische Feld mehr oder weniger stark unterscheiden. Die Unterschiede am Beispiel GSM-Basisstation und DECT-Heimtelefone werden weiter unten im Detail besprochen.

Weißer Fleck auf der Frequenzkarte

Man muss feststellen, dass es einen Frequenzbereich mit stark ansteigender Nutzung gibt, der bisher von keinem der Messverfahren erfasst wird, nämlich das für Funknetzwerke nach der Spezifikation IEEE 802.11a genutzte Frequenzband zwischen 5,2 und 5,7 GHz. Diese Frequenzen wurden erst vor relativ kurzer Zeit für die Funknetzwerke freigegeben. Die derzeit verbreiteten Spektralanalysatoren sind in der Regel für einen Messbereich bis maximal 3 GHz ausgerüstet. Es wird noch einige Zeit dauern, bis eine nennenswerte Zahl von Messlabors über die technischen Voraussetzungen verfügt, Frequenzen bis 5,7 GHz zu messen.

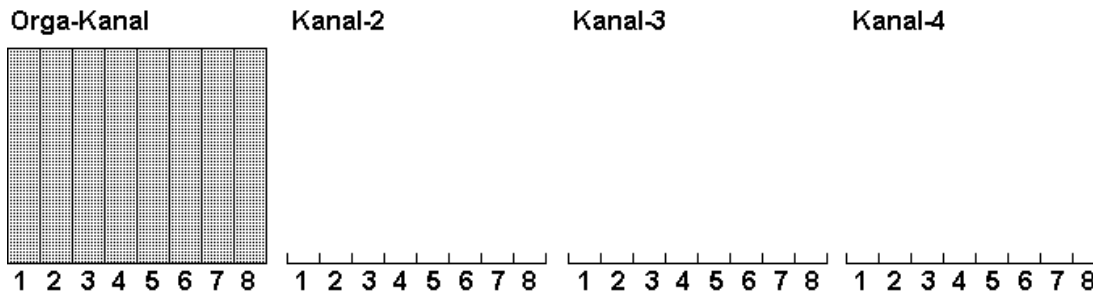
Messung von GSM-Mobilfunk-Basisstationen

Eine GSM-Funkzelle verfügt in der Regel über 8 verschiedene Sendefrequenzen oder Kanäle. Von diesen 8 Kanälen werden je 4 für die Übertragung von der Basisstation zu den Handys und 4 für die Übertragung von den Handys zur Basisstation genutzt. Die Kanäle sind jeweils in 8 Zeitschlitze aufgeteilt, die Sequenz der 8 Zeitschlitze wird 217 Mal pro Sekunde durchlaufen, das ergibt eine Dauer für jeden Zeitschlitz von 0,576 Millisekunden. Beim GSM-Funknetz wird eine Leistungsregelung durchgeführt. Das bedeutet, dass die Handys und die Basisstation immer nur mit soviel Leistung senden, dass das Signal auf der Empfängerseite noch störungsfrei empfangen werden kann. Ein Kanal der Basisstation, der sog. Organisationskanal, ist von der Leistungsregelung allerdings ausgenommen. Der Organisationskanal ist gewissermaßen der Leuchtturm der Basisstation, er sendet permanent mit voller Leistung, damit die Handys im Einzugsbereich ihre Basisstation erkennen können. Auch beim Organisationskanal wird die Sendeleistung zwischen zwei Zeitschlitzen kurzzeitig bis auf 0 zurückgefahren, so dass auch die Strahlung des Organisationskanal als gepulste Strahlung charakterisiert wird.

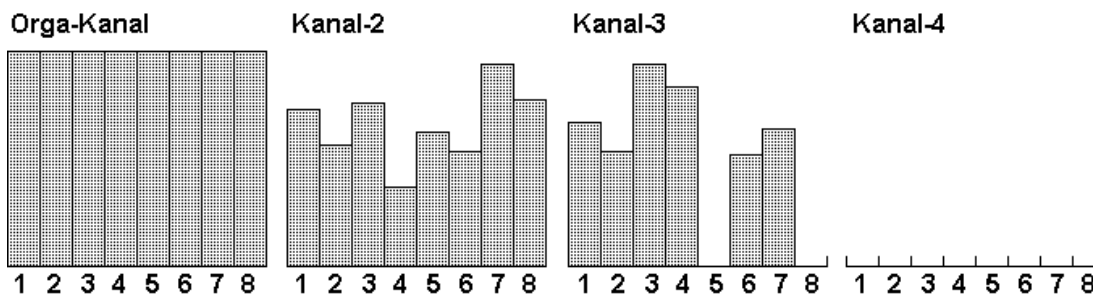
Lastabhängige Sendecharakteristik einer GSM-Basisstation

Die maximale Anzahl von Handygesprächen, die in einer Funkzelle gleichzeitig geführt werden können, ergibt sich durch Multiplikation der Kanäle mit der Anzahl der Zeitschlitze, also $4 \times 8 = 32$. Dies ist noch nicht ganz korrekt, da 2 Zeitschlitze des Organisationskanals tatsächlich für Organisationszwecke benutzt werden, auf dem Organisationskanal also nur 6 Zeitschlitze für Handy-Gespräche übrig bleiben. Bei 30 gleichzeitigen Handygesprächen ist die Funkzelle also voll ausgelastet. Bei geringer Last mit 0 bis 6 Gesprächen sendet die Basisstation nur auf dem Organisationskanal. Wie oben erläutert wird auf dem Organisationskanal permanent mit voller Leistung gesendet. Auf den übrigen Kanäle werden nur bei Bedarf gesendet. In den untenstehenden Grafiken ist die Sendecharakteristik für 3 verschiedene Fälle aufgezeichnet. Ein Balken entspricht dabei jeweils einem Zeitschlitz auf einem Kanal. Die Höhe des Balkens gibt die Strahlungsintensität an. Die auf den Kanälen 2 bis 4 erkennbare Variation der Strahlungsintensität rührt von der Leistungsregelung her.

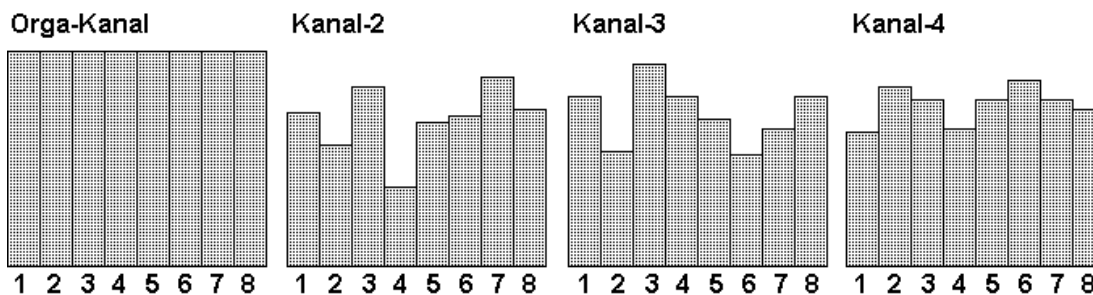
GSM-Basisstation ohne Last oder mit geringer Last: 0 – 6 aktive Gespräche



GSM-Basisstation bei mittlerer Auslastung: 20 aktive Gespräche



GSM-Basisstation bei voller Auslastung: 30 aktive Gespräche



Messungen

Bei der Messung nach dem Baubiologen-Standard wird die Strahlungsintensität des Organisationskanals gemessen. Diese Messung ist auslastungsunabhängig. Bei den übrigen 3 Kanäle ist die Strahlungsintensität auslastungsabhängig und kann maximal den Wert des Organisationskanals erreichen. Die Messvorschrift nach dem Baubiologen-Standard besagt, dass die Kanäle 2 bis 4 nicht gemessen werden, sondern, dass der gemessene Wert für den Organisationskanal mit der Anzahl der Kanäle multipliziert wird. Damit wird der auslastungsunabhängige Maximalwert der Strahlungsintensität angegeben

Bei der Messung nach der Messvorschrift der Regulierungsbehörde wird jeder Kanal einzeln gemessen. Für jeden Kanal wird dabei der Zeitschlitz mit der größten Sendeleistung bestimmt, und diese Sendeleistung als Messwert für den ganzen Kanal gesetzt. Ein Kanal der gerade nicht aktiv ist, wird nicht berücksichtigt.

Messung von DECT Telefonanlagen

DECT steht für Digitally Enhanced Cordless Telephone und ist der heute gängige Standard für drahtlose Festnetz-Telefonanlagen. Eine DECT-Telefonanlage besteht aus einer Basisstation, die an das analoge Telefonnetz oder an einen ISDN-Anschluss angeschlossen wird und bis zu zwölf

gleichzeitig aktive DECT-Handys. Die DECT-Telefonanlage arbeitet mit gepulster Strahlung im Frequenzbereich zwischen 1880 und 1900 MHz. Bei DECT wird der Übertragungskanal in 24 Zeitschlitzte aufgeteilt, von denen 12 für die Datenübertragung von der Basisstation zu den DECT-Handys und 12 für die Datenübertragung in der umgekehrten Richtung verwendet werden. Die DECT-Technik sieht im Unterschied zu den GSM-Handys keine Leistungsregelung vor, d.h. die DECT-Basisstation und die DECT-Handys senden stets mit der vollen Leistung von 250 Milliwatt (mW). Für DECT-Handys wird oft eine Sendeleistung von 10 mW angegeben, diese Angabe bezieht sich jedoch auf die durchschnittliche Sendeleistung. Diese ergibt sich, wenn man die 250 Milliwatt durch das Verhältnis von Sendzeit zur Periodendauer teilt: $250 \text{ mW} / (10\text{ms} / 0,38\text{ms}) = 9,5 \text{ mW}$.

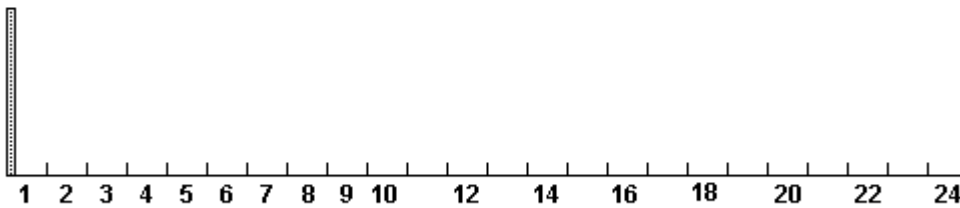
Man sollte meinen, dass ein DECT-Handy eine kleinere Sendeleistung hat als z.B. ein E-Netz Handy, dass fast mit der selben Frequenz sendet. Das E-Netz Handy hat eine maximale Sendeleistung von 1 Watt, also 4 mal mehr als ein DECT-Handy. Durch die Leistungsregelung beim GSM-Mobilfunk wird das E-Netz Handy aber nur bei sehr schlechten Empfangsbedingungen die Sendeleistung von 1 Watt erreichen. Bei mittlerem bis gutem Empfang wird das E-Netz Handy mit einer geringeren Sendeleistung senden als ein DECT-Handy.

DECT-Anlage bei Nullast

Die DECT-Basisstation sendet auch wenn niemand telefoniert permanent alle 10 ms ein kurzes Signal aus, das nur für die Dauer von etwa einem Zehntel eines Zeitschlitzes von 0,41 Millisekunden gesendet wird, also etwa 0,04 Millisekunden.

DECT bei Nullast

Periodendauer = 10 ms, 24 Zeitschlitzte zu je 0,41 ms

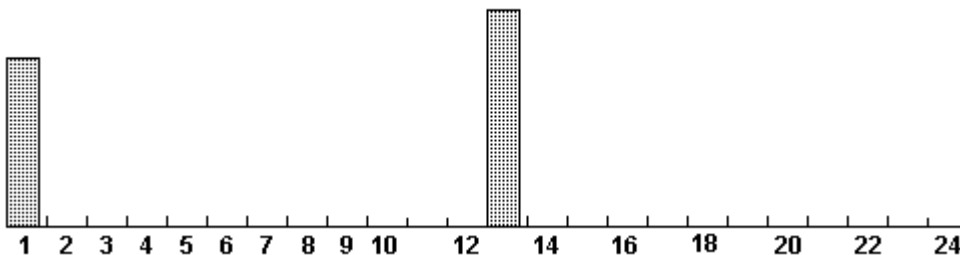


DECT-Anlage bei Übertragung von einem Telefongespräch

Wenn ein Telefongespräch übertragen wird, sind 2 der 24 Zeitschlitzte belegt. Auf Zeitschlitz 1 sendet die Basisstation alle 10 ms ein Datenpaket an das DECT-Handy, welches ebenfalls alle 10 ms ein Datenpaket in die umgekehrte Richtung schickt. Für die Datenübertragung wird von der Dauer eines Zeitschlitzes von 0,41 ms jeweils nur 0,38 ms genutzt, so dass die Signallaufzeit nicht zu Störungen im System führen kann. Auf der Untenstehenden schematischen Darstellung ist die Strahlungsintensität bei den Zeitschlitzten 1 und 13 unterschiedlich dargestellt, dies entspricht einer Situation, wo sich das Messgerät näher am aktiven DECT-Handy als an der Basisstation befindet. Die Sendeleistung von Basisstation und DECT-Handy während des Sendepulses, nämlich 250 mW ist gleich.

DECT 1 Gespräch

Zeitschlitz 1 = Basisstation, Zeitschlitz 13 = DECT-Handy

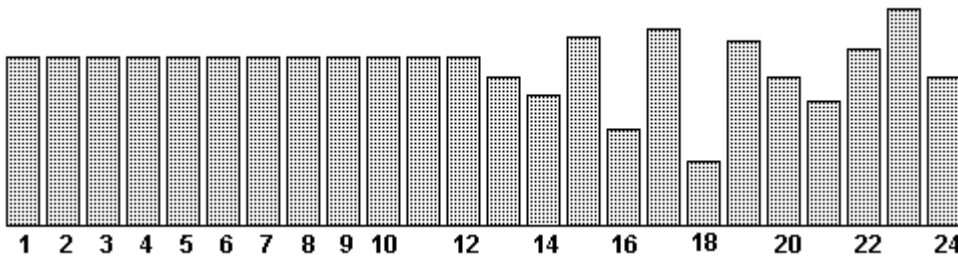


DECT-Anlage bei Vollast

Bei 12 gleichzeitigen Gesprächen sind alle 24 Zeitschlitzte der DECT-Telefonanlage belegt. Die Zeitschlitzte 1 bis 12 werden von der Basisstation belegt, die Zeitschlitzte 13 – 24 von den aktiven Messungen von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen

DECT-Handys. Auf der untenstehenden schematischen Darstellung ist für die von den DECT-Handys belegten Zeitschlitzten eine unterschiedliche Strahlungsintensität dargestellt, was dadurch zustande kommt, dass die DECT-Handys sich in unterschiedlicher Entfernung zum Messgerät befinden.

DECT Vollast (12 Gespräche) Zeitschlitzte 1-12 = Basisstation, 13-24 = DECT-Handys



Messungen

Bei DECT-Telefonanlagen interessiert man sich gemeinhin nicht für die Strahlung der DECT-Handys sondern für die Strahlung der Basisstation, insbesondere deshalb, weil diese permanent 24 Stunden am Tag ihr Nullast-Signal aussendet. Es empfiehlt sich also, die Messung vorzunehmen, wenn nicht gerade telefoniert wird.

Bei der Messung nach dem Baubiologen-Standard wird die Strahlungsintensität des Nullast-Signals bestimmt und damit hat man das Messergebnis, dass in der Messauswertung angegeben wird.

Bei der Messung nach Reg TP MV 09/EMF/3 wird ebenfalls die Strahlungsintensität des Nullast-Signals bestimmt, der Wert, der in der Messauswertung angegeben wird, ist jedoch der gemessene Wert geteilt durch 32. Warum das? Die Messvorschrift der RegTP sieht vor, dass bei gepulster Strahlung die gemessene Strahlungsintensität auf den zeitlichen Mittelwert umgerechnet wird. Dabei darf der Messwert jedoch höchstens durch 32 geteilt werden. Da das Nullast-Signal nur etwa den zehnten Teil eines Zeitschlitzes belegt, der zeitliche Mittelwert also etwa einem 240zigstel der gemessenen Intensität entspricht, muss hier der Wert genommen werden, der sich aus der Strahlungsintensität geteilt durch 32 ergibt.

Bewertung der Mess-Standards

Wie die Diskussion der Messung von GSM-Basisstationen und DECT-Telefonanlagen gezeigt hat, können die beiden gängigen Standards für Hochfrequenz-Messungen sehr verschiedene Ergebnisse liefern. Aus diesem Grunde sollte man immer nach dem Mess-Standard fragen, wenn man mit Messwerten konfrontiert wird.

Bei Messungen von GSM-Basisstationen ist das Messergebnis nach dem RegTP-Standard immer von der gegenwärtigen Auslastung abhängig, die Messwerte lassen sich also nur eingeschränkt vergleichen. Der Messwert nach dem RegTP-Standard kann sich bei sonst gleichen Messbedingungen im Bereich zwischen 25 % und 100 % des Messwertes nach dem Baubiologen-Standard bewegen. Bei Messungen von GSM-Basisstationen sollte deshalb bei Messungen nach dem RegTP-Standard immer zusätzlich gefordert werden, dass die Strahlungsintensität des Organisationskanals separat ausgewiesen wird.

Bei Messungen von DECT-Telefonanlagen ist der RegTP-Standard völlig unbrauchbar. Die Vorschrift, dass bei gepulsten Signalen mit dem zeitlichen Mittelwert gerechnet wird, wird der gesundheitlichen Relevanz der gepulsten Strahlung in keiner Weise gerecht.

Gerrit Lindloff
Juni 2005