

Ein Mobilfunk-Dosimeter für die epidemiologische Ermittlung der EMF-Belastung der Bevölkerung.

Bernhard Liesenkötter, Heinrich Eder

1. Einführung

Zur Ermittlung eventueller gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch elektromagnetische Wellen und Felder (abgekürzt EMF) wird versucht in epidemiologischen Studien einen Zusammenhang zwischen der EMF-Belastung der Bevölkerung und ihrem Gesundheitszustand zu finden. Epidemiologen fordern deshalb seit längerem eine personenbezogene Dosimetrie im Mobilfunk /1/. Bevor weiter unten ein nun verfügbares kleines Dosimeter beschrieben wird, muss zunächst die Eigenschaft der elektromagnetischen Wellen - und die darin begründete Schwierigkeiten sie zu messen - genauer erläutert werden. Gerade im Frequenzbereich des Mobilfunks, der seit einiger Zeit der Auslöser intensiver Suche nach gesundheitlichen Auswirkungen ist, ergibt sich durch die Eigenschaften der Wellen eine bedeutend höhere Messunsicherheit als bei EMF im niedrigen Frequenzbereich (NF).

2. Einige wichtige Begriffe bei elektromagnetischen Wellen

Auch wenn sich die Abkürzung „EMF (= Elektromagnetisches Feld)“ eingebürgert hat, muss zunächst geklärt werden, dass der Begriff „Feld“ eigentlich nur für statische oder quasistatische elektrische Zustände benutzt werden sollte. Bei sehr niedrigen Frequenzen, wie z.B. den 50 Hz der Stromversorgungsnetze, kann dieser Begriff durchaus verwendet werden, da die grundsätzlich wellenförmige Ausbreitung aller elektromagnetischer Wechselfelder sich in diesem Fall auch in einem Bereich mehrerer hundert Meter kaum nachweisen lässt, beispielsweise ergibt sich auch in einem sehr langen Abschnitt einer Hochspannungsleitung überall die gleiche Phase der Wechselspannung.

2.1 Felder – Wellen – Strahlung

Wegen der Ausbreitungsgeschwindigkeit aller elektromagnetischer Wellen mit Lichtgeschwindigkeit (im freien Raum) kann die Wellenlänge (= Abstand gleicher Phasenzustände in der Ausbreitungsrichtung) ermittelt werden zu

$$\text{Wellenlänge: } \lambda = \frac{c_0}{f},$$

mit c_0 = Lichtgeschwindigkeit im freien Raum und f = Frequenz.

Einige typische Werte zur Verdeutlichung zeigt die Tabelle:

Frequenz f	Wellenlänge λ
Netzstrom 50 Hz	6000 km
TV , etwa 200...800 MHz	im Bereich 1,5 m – 37 cm
DECT-Telefon 1890 MHz	ca. 16 cm
Mikrowellenofen 2,45 GHz	ca. 12 cm

Das bedeutet, dass bei einem homogenen 50-Hz-Feld innerhalb mehrerer hundert Meter überall die gleiche Momentanfeldstärke gemessen werden könnte, während

bei einem DECT-Feld diese Momentanfeldstärke sich innerhalb von nur 4 cm vom Maximalwert auf Null, bzw. nach 8 cm sich zum gegenphasigen Maximalwert ändert.

Die geradlinige Ausbreitung von Energie in Form von elektromagnetischen Wellen kann – unabhängig von der Wellenlänge – als Strahlung bezeichnet werden. Nur dieser Begriff macht den Energietransport in einer bestimmten Richtung deutlich; er stammt aus der Optik, und auch dort kennt man z.B. den Begriff der Beugung, die die vereinfachte Vorstellung von Reflexion und Abschattung nach der geometrischen Optik stark modifiziert („physikalische Optik“), und die gerade im hier betrachteten Frequenzbereich beachtet werden muss.

2.2 Reflexion – Abschattung – Streuung – Beugung

Die elektromagnetische Strahlung wird an Grenzen des Ausbreitungsmediums, also z.B. beim Auftreffen auf Körper, prinzipiell reflektiert, wobei die unterschiedliche Beschaffenheit der beiden Ausbreitungsmedien die Höhe der Reflexion bestimmt. Bei ideal leitenden Metallen ergibt sich eine Totalreflexion, beim Übergang von Luft in ein anderes dielektrisches Medium (z.B. Holz, Kunststoff, Wasser) ergeben sich entsprechend niedrigere Reflexionsfaktoren. Hinter einem metallischen Körper erwartet man grundsätzlich eine Abschattung der Strahlung, jedoch ist hier die Abmessung dieses Körpers im Vergleich zur Wellenlänge λ wichtig:

- Körper kleiner Abmessung (deutlich kleiner als 1λ) streuen die Strahlung in einen breiten Winkelbereich und verursachen kaum Abschattung;
- bei Körpern in der Größenordnung der Wellenlänge (z.B. Mensch im Mobilfunkbereich) wird neben dieser Streuung bereits die Abschattung erkennbar, aber sehr deutlich ist hier der Effekt der Beugung zu berücksichtigen;
- bei Körpern mit Abmessungen $\gg \lambda$ wird die Abschattung eindeutiger und der Einfluss der Beugung nimmt ab (erst bei großen Entfernungen von diesem Körper wird der abgeschattete Bereich durch die gebeugten Strahlungsanteile wieder aufgefüllt).

In Bild 1 ist der Effekt der Beugung am Beispiel einer auf einen metallischen Körper auftreffenden Welle gezeigt. Der Querschnitt des Körpers entspricht etwa dem des menschlichen Oberkörpers.

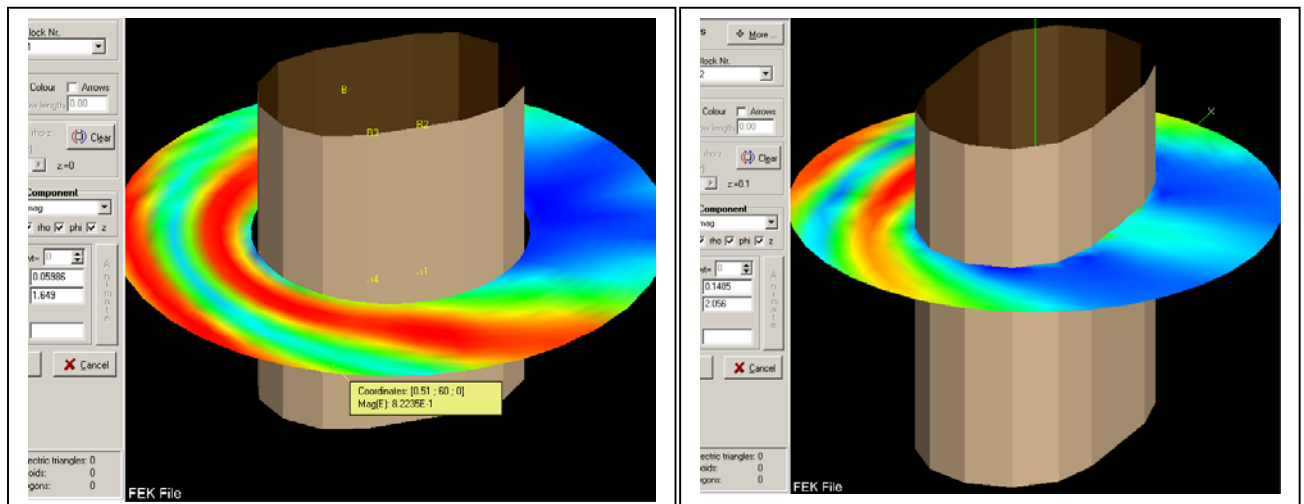


Bild 1: Auftreffen einer Welle auf einen metallischen Körper
a: auf die Schmalseite, **b:** auf die Breitseite

Die Welle trifft einmal auf die Schmalseite (**a**) und einmal auf die Breitseite (**b**) des Körpers. Im Bereich der Abschattung erwartet man eigentlich eine mit der Querabmessung steigende Abschattungswirkung, aber genau das Gegenteil ist hier zu erkennen: in der Mitte des Schattenbereichs bei (**b**) ergibt sich eine höhere Feldstärke als bei (**a**). Dies belegt die starke Aus-

wirkung der Beugungseffekte (und/oder Oberflächenströme) bei Körperabmessungen in der Größenordnung von 1λ .

Auch die anderen erwähnten Begriffe sind in Bild 1 zu erkennen: die Reflexion der Welle an der Metalloberfläche ergibt eine z. T. in sich selbst zurückreflektierte Welle bzw. eine vom Einfallswinkel abhängige Verteilung in andere Richtungen (Streuung). Wellen, die sich mit unterschiedlicher Ausbreitungsrichtung überlagern (z. B. einfallende und reflektierte Wellen), erzeugen das typische Muster der periodisch wiederkehrenden Feldstärkeminima und -maxima (Interferenz).

2.3 Eindringtiefe der Strahlung in verschiedenen Materialien

Wenn elektromagnetische Strahlung auf eine Grenzfläche zu verlustbehaftetem Dielektrikum trifft, wird ein Teil reflektiert, der andere Teil dringt in das Material ein. Hierbei kommt es darauf an, wie groß die Leitfähigkeit σ dieses Materials ist. Bei extrem hoher Leitfähigkeit kann dessen Wirkung mit Metall verglichen werden (fast totale Reflexion, nur geringes Eindringen der Welle), bei sehr niedriger Leitfähigkeit (typisch: Kunststoffe) wird der eingedrungene Strahlungsanteil näherungsweise ungehindert hindurchlaufen.

Bei mittleren Leitfähigkeiten wird man deutlich eine exponentielle Abnahme der Feldstärke im Material feststellen, siehe Bild 2.

Der verbreitete Begriff der „Eindringtiefe“ ist zwar eine für manche Zwecke der Hochfrequenztechnik sinnvolle Ersatzgröße (Aufsummierung aller exponentiell absinkenden Feldanteile zu einem Wert der äquivalenten Leitschichtdicke), es muss jedoch beachtet werden, dass die Welle nicht nur diese Strecke zurücklegt, sondern dass dort ihre Amplitude auf $1/e$ des Oberflächenwertes abgesunken ist.

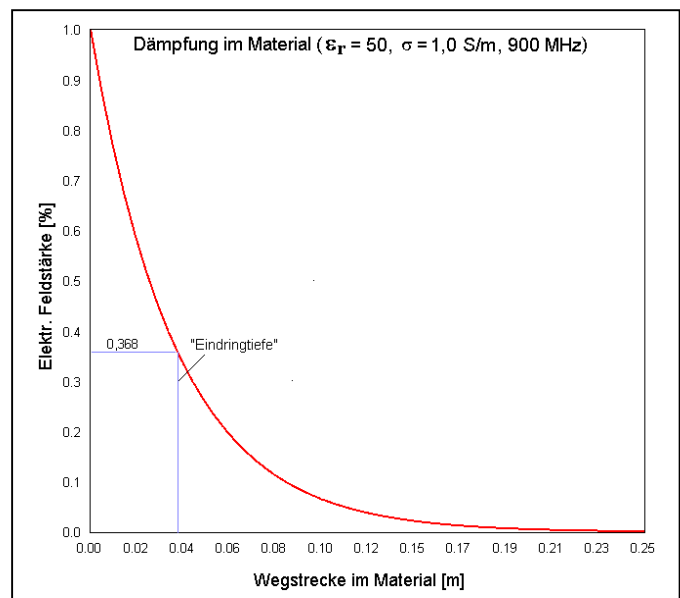


Bild 2: Eindringen einer Welle in ein verlustbehaftetes Medium

3 Berechnung der spezifischen Absorptionsrate SAR im menschlichen Körper

Zur Beurteilung der Strahlenexposition von Menschen durch elektromagnetische Strahlung wurde wegen bisher fehlender anderer zweifelsfrei erwiesener Auswirkungen die Wärmebildung im Körper als Maß gewählt. Es wird der Wärmeeintrag in den Körper betrachtet, der als Leistung pro Kilogramm Körpergewebe SAR in W/kg gemessen wird. Internationale Expertengremien haben Grenzwerte für den ganzen Körper und für Teile des Körpers festgelegt, die eine Gesundheitsgefährdung durch diese Erwärmung sicher ausschließen.

3.1 Berechnung der SAR aus der Feldstärke im Dielektrikum

SAR-Werte können mit modernen Feldberechnungsprogrammen wie z.B. Feko [2] in beliebig geformten Körpern beliebiger Materialien berechnet werden. Allerdings ist der Rechenaufwand oft so groß, dass man bestrebt ist, vereinfachte Geometrien anzunehmen, solange keine unzulässige Beeinträchtigung der Ergebnisse zu erwarten ist.

Die SAR-Grenzwerte beziehen sich auf einen über ein kleines Volumen gemittelten Wert (z.B. 1 cm³) der dort in Wärme umgesetzten Energie pro Masse.

Die eindringende Strahlung hat eine Leistungsflussdichte S (Leistung pro Flächeneinheit in W/m²) von

$$S = \frac{1}{2} \cdot E \cdot H \quad , \text{ mit elektrischer und magnetischer Feldstärke } E \text{ bzw. } H \text{ (Scheitelwerte).}$$

Meist wird wegen des festen Zusammenhangs zwischen elektrischer und magnetischer Feldstärke über den Feldwellenwiderstand im betrachteten Dielektrikum die Berechnung der SAR mit nur einer der beiden Komponenten durchgeführt, wie auch beim Programm Feko.

3.2 Beispiel der Feldverteilung an und in einer dielektrischen Kugel

Ein stark verlustbehafteter dielektrischer Körper beeinflusst durch seine Anwesenheit die Feldverteilung der einfallenden elektromagnetischen Strahlung in seiner näheren Umgebung. Während die Auswirkungen von metallischen oder verlustlosen dielektrischen Körpern lehrbuchmäßig relativ klar erklärt werden könnten (Beispiel: elektrische Feldlinien müssen immer senkrecht auf einer ideal leitenden Ebene enden), ist der reale Fall bei beliebig verlustbehafteten Körpern nicht so klar vorstellbar.

Deshalb wird im folgenden mit Feko die Einwirkung einer Strahlung auf eine verlustbehaftete Kugel (Durchmesser $\frac{1}{2} \lambda$, entspricht Kopf bei Mobilfunk D-Netz) mit den Eigenschaften eines typischen Körpergewebes dargestellt. Wegen der Kugelform lassen sich mit einer einzigen angenommenen Strahlrichtung alle Situationen gleichzeitig an verschiedenen Stellen der Kugel zeigen:

- Frontalauftreffen der Strahlung
- Streifender Einfall der Strahlung
- Polarisation senkrecht und parallel zur Oberfläche

Die Strahlung wird in den folgenden Teil-Bildern immer von oben kommend mit der gleichbleibend eingezeichneten Polarisation (Ausrichtung des E-Feldes) angenommen. Bild 3a zeigt die Intensitätsverteilung des elektrischen Feldes in einer Ebene um die Kugel, Bild 3b die Verteilung des magnetischen Feldes, Bild 3c die Verteilung der Leistungsflussdichte S , Bild 3d die Verteilung der SAR im Inneren der Kugel, alles jeweils in der gleichen Ebene senkrecht zum Strahlungseinfall.

Ergänzend dazu sind zwei orthogonale Schnitte in der Einfallrichtung in den Bildern 3e (E-Feld) und 3f (SAR) gezeigt.

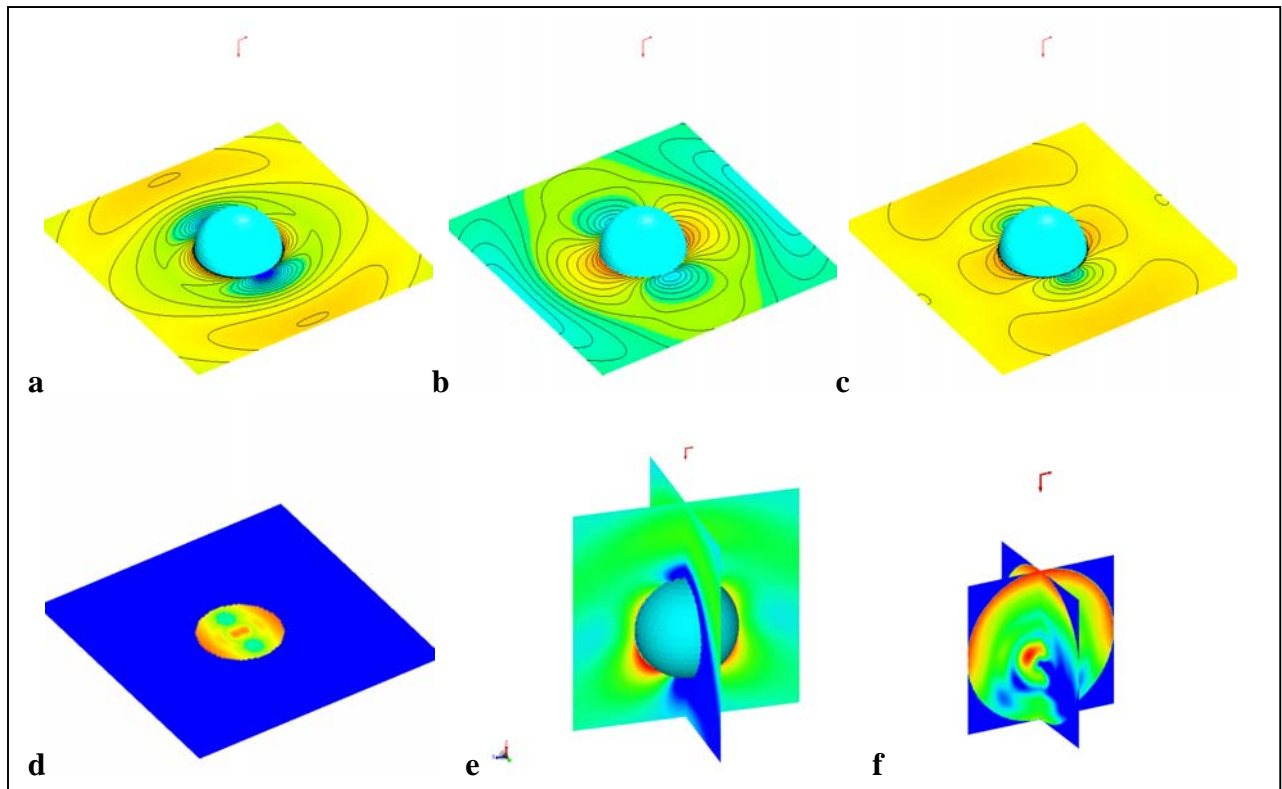


Bild 3: Feldverteilungen bei einer verlustbehafteten dielektrischen Kugel (ebene Welle)

Zur Verteilung der SAR in der Kugel ist zu bemerken, dass nur die ideale Kugelform die erkennbare Fokussierung eines relativen Nebenmaximums im Zentrum ergibt; bei realen ungleichförmigen Körpern (Kopf) ist dieses Phänomen natürlich nicht vorhanden (siehe auch Bild 6).

3.3 Strahlungsverteilung vor und in einem Körper beim Einfall einer ebenen Welle

Das menschliche Körpergewebe hat im Mobilfunk-Frequenzbereich im Mittel folgende Eigenschaften: Permittivität $\epsilon_r = 43 \dots 50$, Leitfähigkeit $\sigma = 0,9 \dots 1,3$ S/m.

Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Gewebearten (Fett, Muskel, Knochen) zwar deutlich (siehe z.B. auch /3/) aber im Vergleich zum freien Raum ($\epsilon_r = 1$) außerhalb des Körpers darf für die folgenden Darstellungen prinzipieller Feldverteilungen als Vereinfachung durchaus ein homogenes Gewebe mit einem Mittelwert angenommen werden. Frühere Fachveröffentlichungen im Zusammenhang mit der SAR-Berechnung im Kopf eines Handy-Benutzers (z.B. /4/) nehmen folgende Werte an:

Frequenz	Kopf – Querschnitt genähert: ca. 210 mm x 160 mm	
900 MHz	$\epsilon_r = 43,5$	$\sigma = 0,9$ S/m
1800 MHz	$\epsilon_r = 42,5$	$\sigma = 1,66$ S/m

Bei anderen Untersuchungen variieren diese Werte bis etwa $\epsilon_r = 50,5$ mit Leitfähigkeiten um ca. $\sigma = 1,2 \text{ S/m}$.

Mit solchen Werten wurde in /5/ die Feldverteilung um einen Menschen und die SAR-Verteilung in dessen Körper (grob vereinfacht angenähert) mit Feko berechnet.

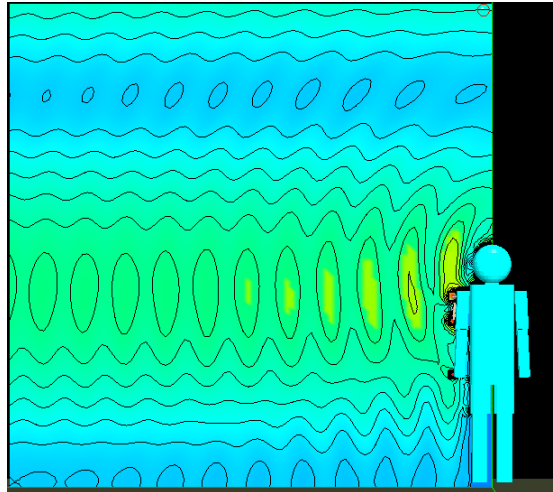


Bild 4: Feldstärkeverteilung vor einem Kind auf realem Boden

Bild 4 (aus /5/) zeigt die Feldstärkeverteilung vor einem Kind (mit Dosimeter am Arm) beim Einfall einer Welle von links (900 MHz, vert. Pol.) aus der Elevation 6° (deshalb ergibt sich ein Feldstärkemaximum in 1 m Höhe über Grund). Deutlich ist die Reflexionswirkung des Körpers zu erkennen (periodische Feldstärkerhöhungen in Richtung der ankommenden Strahlung).

Die Untersuchung in /5/ bestätigte zwei wichtige Tatsachen, die bei der Dosimetrie von Mobilfunkstrahlung in epidemiologischen Untersuchungen beachtet werden müssen:

- der Körper beeinflusst durch sein Vorhandensein stark die Feldverteilung,
- die Maximalwerte der SAR erscheinen dicht unter der Oberfläche des Körpers, d.h. es sind im wesentlichen nur die Strahlungsanteile, die aus der Richtung der Flächennormalen auf den Körper auftreffen, beteiligt.

Beide Tatsachen müssen bei der Strahlungsmessung durch Dosimeter bedacht werden, die ja im alltäglichen Umfeld, d.h. in einem höchst inhomogenen Strahlungsfeld, stattfinden. Sobald der Körper Abmessungen hat, die im Bereich der Wellenlänge liegen, wird der SAR-Wert nicht durch die maximal (durch Interferenzen) auftretende Feldstärke gebildet, sondern nur durch die aus den verschiedenen Richtungen jeweils auf die Körperoberfläche zulaufenden Wellen.

4 Dosimetrische Messungen im inhomogenen Strahlungsfeld

Die realen Bedingungen der Umgebung, in der sich die Probanden einer epidemiologischen Studie aufhalten, sind zu komplex, als dass sie mit Freiraumbedingungen verglichen werden könnten. In letzter Zeit wurden Feldverteilungen im Mobilfunkfrequenzbereich in einfachen Räumen berechnet und dargestellt (z.B. /6/ und /7/), wobei die starken interferenztypischen Feldstärkeschwankungen verdeutlicht wurden.

4.1 Feldstärkeschwankungen in der Wohnumgebung

Für die Erläuterungen zum Problem der Feldstärkeüberhöhungen durch Interferenz zwischen verschiedenen reflektierten Wellen wird die Wirkung einer Zimmerecke simuliert mit Wän-

den, deren Eigenschaften grob mit denen von realen Wänden (d.h. nur Teilreflexion) übereinstimmen. Genau aus der Diagonalrichtung fällt eine Welle ein, deren Quelle 10 m vor dem Eckpunkt liegt, bewusst etwas unsymmetrisch vor dieser Zimmerecke sei der Kopf eines Menschen positioniert, siehe Bild 5a. Die Wände wurden mit einer Länge von je 3 m berücksichtigt um den Beugungseinfluss klein zu halten.

Wegen der Reflexionsgeometrie (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) ergeben sich im Bereich dieser Zimmerecke Strahlungen von vorn (direkter Strahl), von links (Reflexion der linken Wand), von rechts (Reflexion der rechten Wand) und von hinten (doppelte Reflexion durch linke und rechte Wand). Diese vier Strahlrichtungen bilden vor der Zimmerecke das Interferenzbild von Bild 5b.

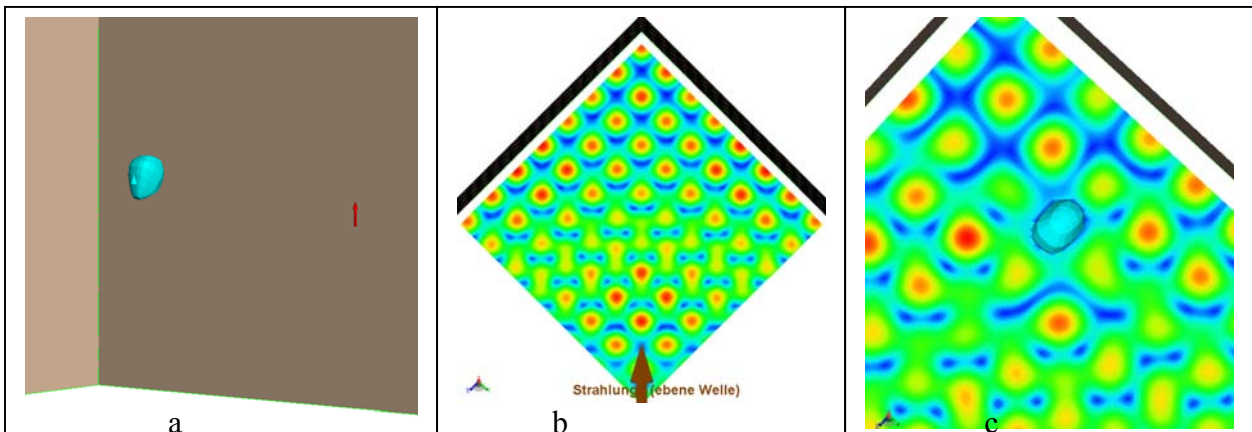


Bild 5: Ecke eines Zimmers, a) Ansicht, b) Interferenzfeld ohne und c) mit Kopf (Ausschnitt)

Die Farben der Feldstärken in Bild 5 b weisen zwischen blau und rot eine Dynamik von max. 36 dB auf, die Größenverhältnisse gelten für 900 MHz.

4.2 Beeinflussung des Feldes durch den menschlichen Körper

Die Feldverteilung von Bild 5 b des leeren Raums könnte mit einer kleinen isotropen Feldsonde gemessen werden. Sobald andere Gegenstände – oder auch ein Proband mit Dosimeter – sich im Raum befinden, wird sich die Feldverteilung ändern.

In Bild 5 c ist lediglich der Kopf als Störkörper eingefügt, es ist sein Ort zu sehen und auch die Beeinflussung eines gewissen Bereichs um ihn, manche Maxima werden verstärkt, andere abgeschwächt.

In Bild 6 ist in der gleichen horizontalen Schnittebene des Feldes auch die Verteilung der Leistungsdichte im Kopf, mit dem die SAR-Werte berechnet werden, gezeigt.

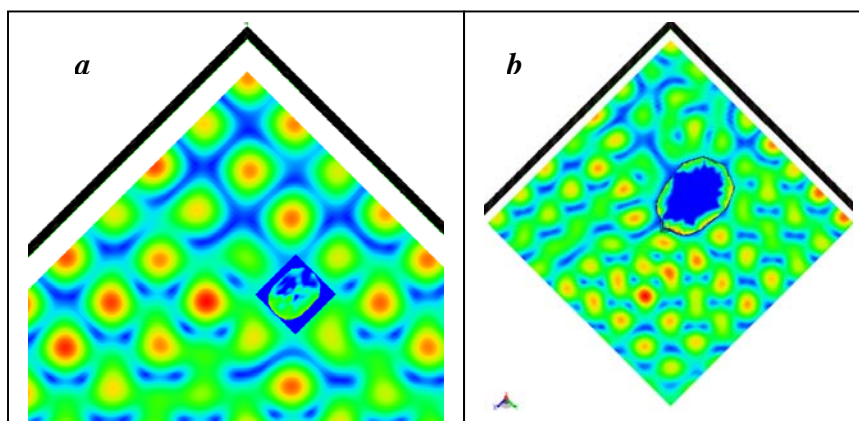


Bild 6: SAR-Verteilung im Kopf, a) bei 900 MHz, b) bei 2,45 GHz

Die Leistungsverteilung im Kopf zeigt im Wesentlichen, dass die Hauptintensität auf der der Strahlungsquelle zugewandten Seite auftritt. Bei 900 MHz ist dieser Effekt schon relativ gut zu erkennen: die Strahlung von vorne ist wesentlich stärker als die beiden Strahlungen von links und rechts; am schwächsten – aber immer noch deutlich von den anderen drei Richtungen zu unterscheiden – ist die Strahlung von hinten wegen der doppelten Reflexion im Winkel.

Im Bild 6 b ist die Situation bei 2,45 GHz (WLAN-Band) gezeigt: Die SAR-Werte sind nur in der äußeren Zone des Kopfes erkennbar (Darstellung der SAR-Verteilung in beiden Kopfquerschnitten mit 20 dB Dynamik). Wegen der schrägen Position des Kopfes gehen die Auswirkungen der direkten Strahlung von vorne in die der von rechts kommenden Strahlung über, wogegen die von links eintreffende Strahlung deutlich von der vorderen und von der hinteren getrennt erscheint.

4.3 Sinnvolle Empfangscharakteristik eines Personendosimeters

Während bisher alle Feldverteilungen grundsätzlich mit möglichst isotropen Feldsonden oder nach der sogenannten „Schwenkmethode“ mit Dipolen oder Richtantennen (kleine log.per. Dipolantennen) gemessen werden (siehe z.B. /8/), ist bei der Personendosimetrie in höheren Frequenzbereichen (oberhalb UHF) die Praxis mit isotropen Feldsonden nochmals zu hinterfragen. Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, macht es keinen Sinn, in einem Raum den Punkt mit der höchsten Feldstärke zu suchen, wenn die daran beteiligten Strahlen später nicht mehr bis zu diesem Punkt vordringen können, weil das Objekt, dessen Belastung ermittelt werden soll, wegen seiner geometrischen Ausdehnung diese Strahlungsanteile an verschiedenen Oberflächenorten bereits vorher absorbiert hat.

Aus den Rechenergebnissen kann man folgern, dass bei Untersuchungen über mögliche Einflüsse auf stark verlustbehaftete Körper (wie Lebewesen) die Abmessungen dieser Körper nur in der Größenordnung von $1/10 \lambda$ sein dürfen, wenn man die vorher gemessenen Feldstärkemaxima an diesem Ort zur Grundlage der Strahlenbelastung nehmen möchte. Der Kopf eines Kindes hat bereits die Größenordnung von $1/2 \lambda$ beim D-Netz und ist noch wesentlich größer bei E-Netz, DECT und WLAN-Frequenzen.

Im Bereich der Personendosimetrie bei Mobilfunkfrequenzen und darüber (WLAN) ist es daher nur sinnvoll, die Strahlenbelastung an der Oberfläche des Körpers zu messen.

Wegen des Einflusses des Körpers auf das elektromagnetische Feld ist dicht vor der Körperoberfläche eine dazu parallele elektrische Feldstärke kaum vorhanden, siehe Bild 3 e.

Wenn also eine isotrope Feldsonde für solche Zwecke in ein dicht am Körper getragenes Dosimeter eingebaut wird, wird mindestens eine der drei Sonden systematisch keinen (oder mindestens zwei Sonden einen wesentlich verringerten) Beitrag zur empfangenen Feldstärke liefern. Die vorher angestrebte Isotropie des Antennensystems ist dabei natürlich hinfällig (siehe auch Ergebnisse in /9/).

Wesentliches Wissen über kleine und trotzdem möglichst isotrop wirkende Antennen an größeren leitfähigen Körpern ist in früherer Zeit in der Luft- und Raumfahrt gewonnen worden, z.B. /10/, /11/. In /10/ wurde dabei erstmals eine einfache zahlenmäßige Bewertung der Eigenschaft „Isotropie“ bei Antennen eingeführt. Für das unten beschriebene Personendosimeter wurden dementsprechend optimierte Antennen ausgewählt, die auf den Einsatz am Körper ausgelegt sind und nur die Felder messen, die am Körper auch existieren.

4.4 Zusammenfassung zum Problemkreis der Dosimetrie im inhomogenen Strahlungsfeld

Die Folgen der diskutierten Erscheinungen bei der Ausbreitung von Wellen in Anwesenheit stark verlustbehafteter und daher leitfähiger Körper können zusammengefasst werden wie folgt:

- Nur Körper mit kleinen Abmessungen werden im Inneren SAR-Werte aufweisen, die man mit den vorher an diesem Ort gemessenen Feldstärkewerten errechnen kann. Bei niedrigen Frequenzen können diese Abmessungen durchaus mehrere Meter betragen, bei Mobilfunkfrequenzen und noch höheren Frequenzen wären jedoch bereits die Teilkörper-Betrachtungen (Kopf, Rumpf, Arm) für Menschen stark fehlerbehaftet.
- Hinweise auf die für den Körper oder für Körperteile zu erwartende Exposition können nur erhalten werden durch rechnerische Ermittlung der Winkelabhängigkeit des Dosimeterempfangs am betrachteten Körper. Aus dieser Empfangscharakteristik kann dann näherungsweise die Exposition verschiedener Körperteile berechnet werden.
- Wegen des Boden- und Umgebungseinflusses ist eine ausreichende Bewegung der Probanden im inhomogenen Feld notwendig, um aussagekräftige gemittelte Werte zu erhalten.
- Wenn über längere Zeit eine fixe Position eingenommen bleibt, kann bei bekannter (gerechneter) Empfangscharakteristik eine Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, mit der ein bestimmter Feldstärkewert über- oder unterschritten wurde, siehe z.B. Bilder 7 und 10.
- Die in den Bildern 7 und 10 dargestellten Wahrscheinlichkeitsverteilungen können bei einer größeren Anzahl von Probanden für Statistiker eine sehr genaue Aussage ergeben. Einzelmessungen mit einem Personendosimeter können jedoch naturgemäß nicht sehr genau sein.

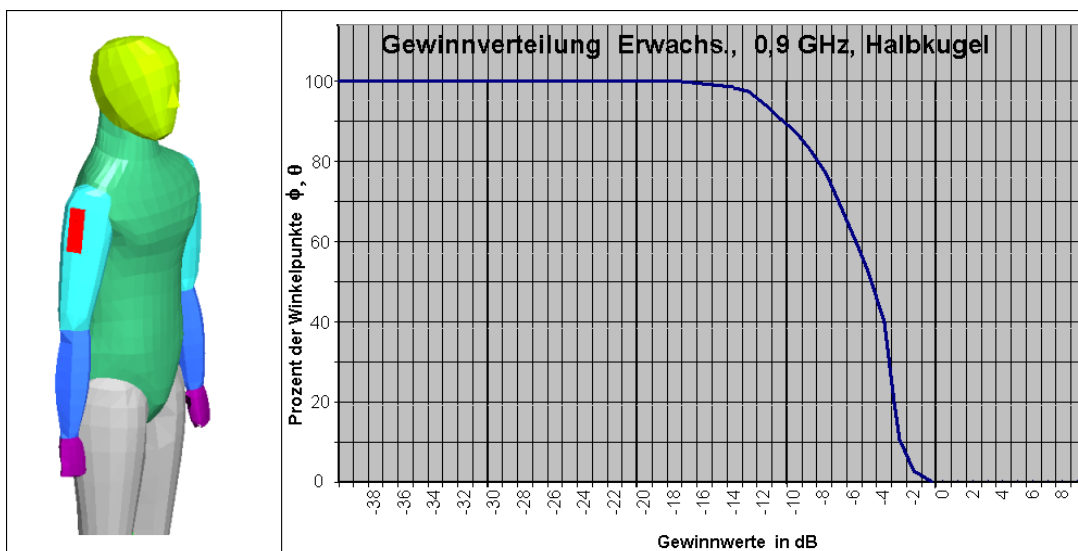


Bild 7: Berechnete Bedeckung der oberen Halbkugel (5275 Werte, auf max. Gewinn normiert)

5 Technische Realisierung eines body-worn-Mobilfunkdosimeters

5.1 Technische Anforderungen

An vorderster Stelle stehen bei einem „body-worn“-Personendosimeter neben den Messeigenschaften geringes Gewicht, Robustheit und geringe Größe.

Erste Erfahrungen mit einem Vorläufermodell des jetzigen Dosimeters, das im Rahmen einer Pilotstudie eingesetzt wurde, haben gezeigt, dass das Gerät für die Anwendung unmittelbar am menschlichen Körper mechanisch sehr robust sein muss. Die Befestigung sollte einfach, sicher und auch bei Kindern möglich sein. Bei der Vorstudie wurde das Dosimeter von einem Probanden sogar beim Duschen getragen! Die Endausführung musste daher in jedem Fall spritzwasserdicht sein.

Das neue Dosimeter hat ein Gewicht von nur 76 Gramm (einschl. Akku) und hält dem normalen Umgang im täglichen Leben stand, Bild 8. Eine grundlegende Anforderung ist auch der Ereignis-Signalisierungsknopf, mit dem wichtige Ereignisse, z. B. besondere Orte, Expositionen oder das momentane Auftreten persönlicher Beschwerden markiert und auf der Zeitskala bei der Auswertung sichtbar gemacht werden können.

Epidemiologen fordern von einem Personendosis-Messgerät, dass es genügend empfindlich ist, um Exponierte und nicht exponierte Personen unterscheiden zu können. Diese Forderung ist im Hinblick auf so genannte elektrosensitive Personen nicht einfach zu realisieren. Das ESM-140 Dosimeter hat eine Empfindlichkeit (Offset) von 10 mV/m und dürfte daher den Ansprüchen weitgehend gerecht werden.

Darüber hinaus wird gefordert, dass das Dosimeter, das ja unmittelbar am Körper getragen wird, keinerlei physiologisch relevante Feldemissionen besitzt. Der Proband würde sonst durch Eigenemission des Dosimeters vorbelastet, was jegliche epidemiologische Betrachtung unmöglich machen würde.

Das Dosimeter erfüllt diese Forderungen, indem es das so genannte Detektorprinzip in Form abstimmbarer Einzelantennen realisiert. Das Schaltschema ist in Bild 9 dargestellt.



Bild 8: Das Mobilfunkdosimeter ESM-140 mit Halteband. Deutlich zu sehen ist hier der Markierungsknopf für besondere Ereignisse.

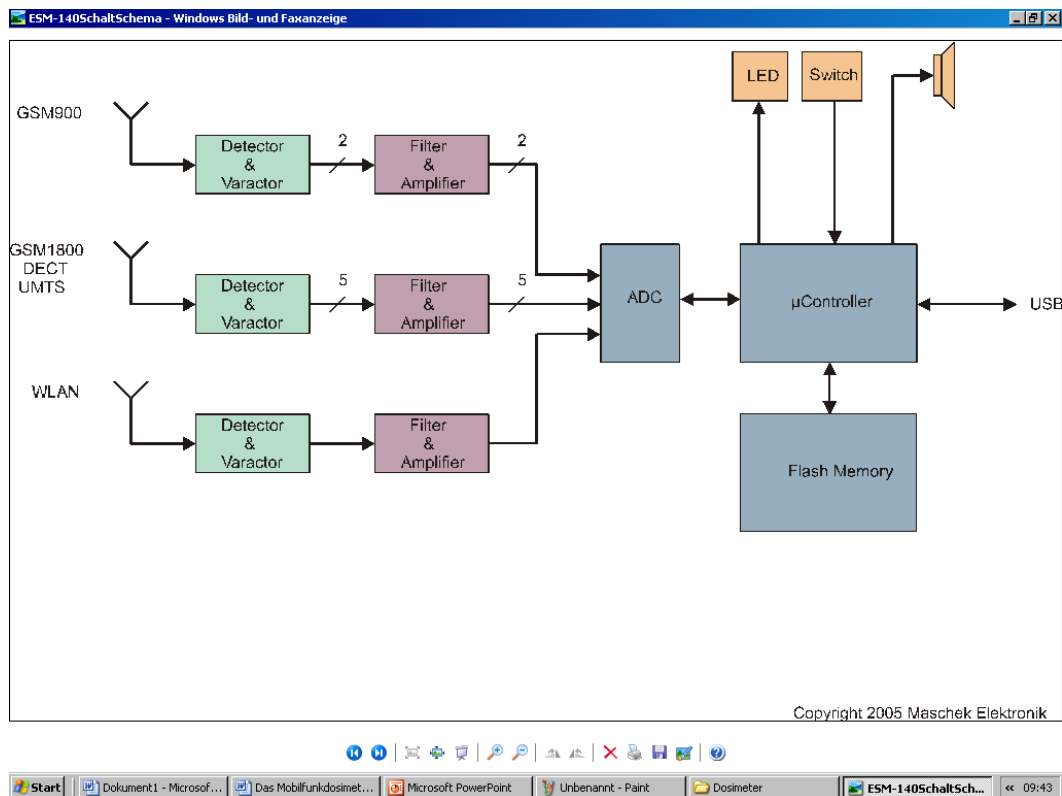


Bild 9: Schaltschema des Dosimeters

5.2 Kalibrierung

Da hier eine körpernahe Feldstärke detektiert wird, ist die Rückführbarkeit von großer Bedeutung. Aus den körperbezogenen Messwerten ist daher der Zusammenhang mit der ungestörten Ersatzfeldstärke herzustellen, denn die abgeleiteten Grenzwerte basieren auf Ersatzfeldstärken. Dies ist nur durch Simulationsrechnungen möglich.

Um eine möglichst geringe Feldstörung in Körpernähe zu gewährleisten, muss das Dosimeter möglichst kleine Abmessungen besitzen.

Die Körperkopplung hält sich aufgrund der Konstruktion des Gerätes in Grenzen, d. h. die gemessene Feldstärke unterscheidet sich – außer durch die Abschattung und Feldformung des Körpers – gegenüber der Freiraumfeldstärke nicht wesentlich.

Eine MoM-Simulation (Programm FEKO) lieferte die entsprechenden Zusammenhänge und die Strahlungsdiagramme.

Die Ergebnisse der Simulation können wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Dosimeter empfängt - am Oberarm getragen – vorwiegend die vertikale Komponente des elektrischen Feldes aus einem großen azimutalen Winkelbereich. Die hori-

zontale E-Feldkomponente wird in seitlicher Richtung (rund 6 dB schwächer) detektiert.

- Der Bodeneinfluss ist bei ausreichender Bewegung des Dosimeterträgers zu vernachlässigen (Maxima und Minima gleichen sich aus).
- Das Dosimeter wird in der Haupt-Empfindlichkeitsrichtung (0 Grad Azimut, 0 Grad Elevation, vertikale Polarisation) mittels eines Körperphantoms kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt frequenzbezogen auf die *Freifeldwerte*, also diejenigen Werte, die sich an der Stelle des Dosimeters ohne Person ergeben.
- Die Bewegung des Trägers führt zu einer räumlichen Mittelung über alle Richtungen. Schon kleine Bewegungen im Sitzen ($\sim \lambda/2$) reichen für eine örtliche Mittelung.
- Wahlweise ist per Software eine Kalibrierung auf den 360 Grad-Mittelwert des Richtdiagrammes einstellbar. Die Kalibrierung bezieht sich dann auf den Mittelwert des Empfangsdiagrammes über 360 Grad und rechnet damit den mittleren Körpereinfluss wieder heraus. Das kommt der ICNIRP-Bewertung nahe (siehe Bild 10).
- Im Bereich reflektierender Umgebung (Wände, Straßenfluchten) ist die Ermittlung einer repräsentativen Feldstärke nur durch Bewegung des Trägers möglich. Ortsfest gewonnene Werte sind wegen der auftretenden Maxima und Minima (ca. ± 10 dB) häufig Zufallswerte.
- Sitzt man längere Zeit an einem Platz sollte das Dosimeter an demjenigen Arm angebracht werden, der dem Fenster bzw. der nächsten Basisstation zugewandt ist (typ. Beispiel: Schulkind).
- Wird das Dosimeter abseits des Körpers platziert (z. B. nachts), kann es z. B. an einer Mineralwasserflasche befestigt werden, da dort ähnliche Verhältnisse herrschen wie beim Tragen am Oberarm.

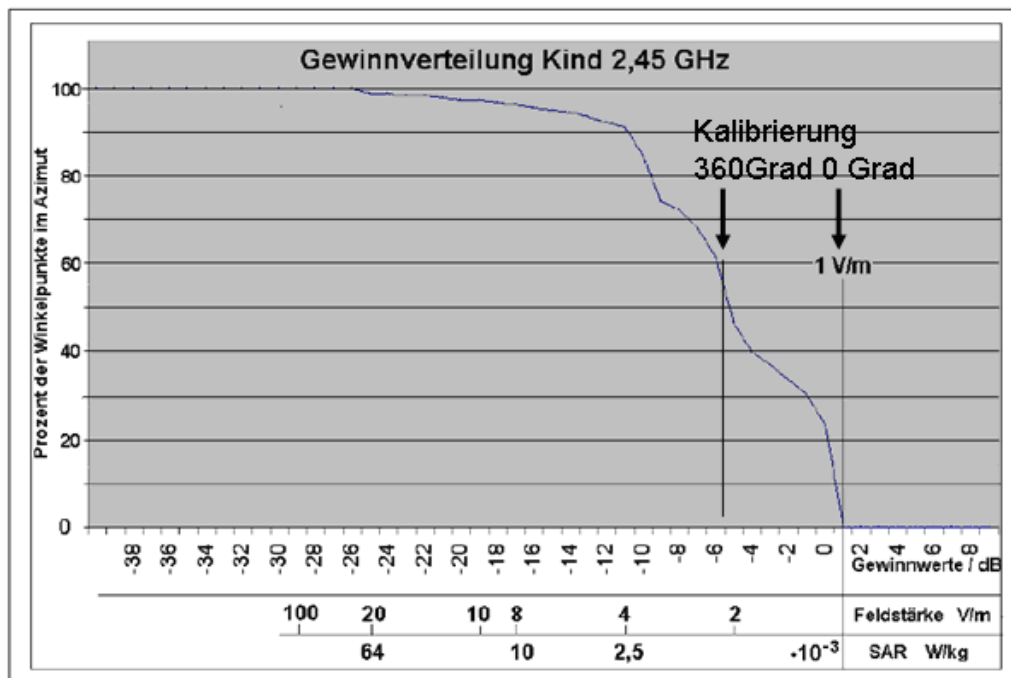


Bild 10: Gewinnverteilung in Abhängigkeit vom Azimutwinkel (Beispiel Kind, 2,45 GHz)

Die 3D-Richtungsdiagramme sowie die Richtungsabhängigkeiten in der Horizontalebene sind unter Einbeziehung des Körpers für verschiedene Frequenzen in den folgenden Bildern 11 bis 13 dargestellt.

In Bild 11 wurde der Bodeneinfluss berücksichtigt. Die Einbrüche im Empfangsdiagramm entstehen durch die Interferenzen der Bodenwelle mit der frei einfallenden Welle. Bei nicht leitfähigen Boden bzw. diffusen Umgebungseinflüssen sind die Empfindlichkeitsminima weit weniger ausgeprägt.

Die übrigen Bilder zeigen die Strahlungscharakteristiken deshalb ohne Bodeneinfluss. Durch die Bewegung der überwachten Person im Raum kommt es ohnehin zu einer Mittelung der Einstrahlrichtungen. Hier wird offensichtlich, dass eine ortsfeste Messung im Raum wenig Sinn macht.

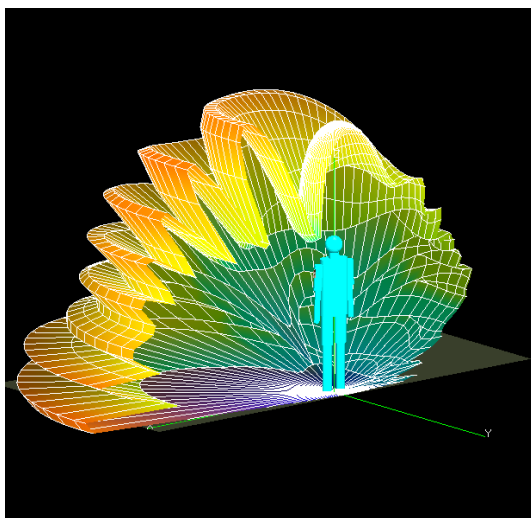


Bild 11: Richtungscharakteristik des ESM-140 bei 900 MHz über realem Boden. Man beachte die Interferenz zwischen reflektierter Bodenwelle und freier Raumwelle.

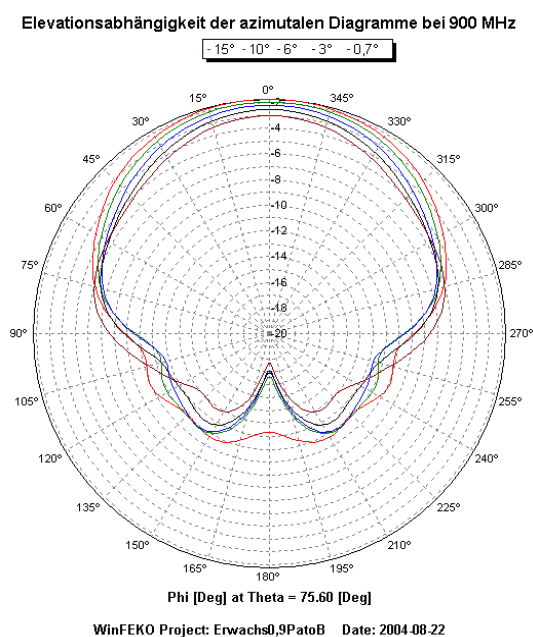


Bild 12: Azimutale Richtungscharakteristik des am Oberarm befestigten Dosimeters bei 900 MHz, Elevation variabel (15, 10, 6, 3, 0,7 Grad)

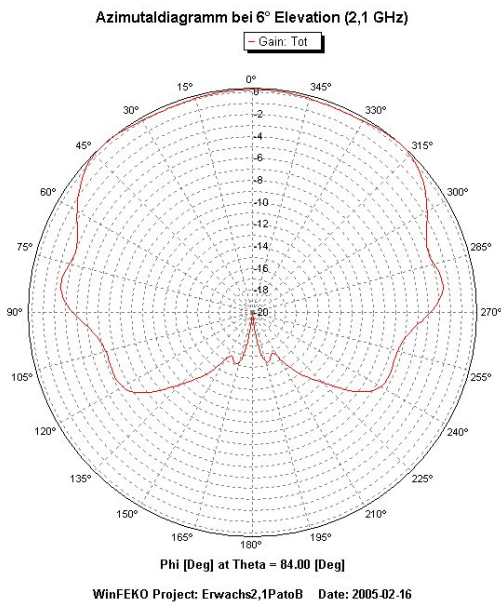


Bild 13: Azimutale Richtungscharakteristik des am Oberarm befestigten Dosimeters bei 2,1 GHz, Elevation 6 Grad

5.3 Technische Daten

Mit dem Detektorprinzip wird der Energieverbrauch so minimiert, dass das Dosimeter bis zu einer Woche ohne Nachladen getragen werden kann.

Das Dosimeter empfängt kontinuierlich und tastet das Mobilfunksignal im Millisekundenbereich ständig ab. Der Effektivwert der elektrischen Feldstärke wird innerhalb eines einstellbaren Messzyklus von 0,5 bis 5 Sekunden detektiert. Zum Speicher gelangt dann jeweils der mittlere Effektivwert oder der Maximalwert aus dem Messzyklus. Mit maximal 130.000 gespeicherten Datensätzen kann also theoretisch über 7 Tage gemessen werden.

Aufgezeichnet werden die Messwerte für alle Mobilfunkbänder GSM 900 und 1800 sowie UMTS und das DECT-Band und das WLAN/Bluetoothband. Nach der Summenformel wird die energiebezogene Gesamteinwirkung aus dem Mobilfunk berechnet.

Mit Hilfe des USB-Anschlusses ist das Auslesen der Messwerte samt graphischer Darstellung des Zeitverlaufes sehr einfach möglich. Mit der Maus können „regions of interest“ gezogen und die Zeitskala in diesem Bereich stark gedehnt werden. Alle Zeitverläufe aus den einzelnen Bändern lassen sich auf dem Bildschirm getrennt anwählen oder wegklicken. Dies ist ein gutes Hilfsmittel um die Signalverläufe getrennt zu verfolgen.

Die Empfindlichkeit des Dosimeters sowie die Bandtrennung konnten bei der neuen Ausführung gegenüber der Erstversion verbessert werden. Die Empfindlichkeit beträgt jetzt 10 mV/m in einem Temperaturbereich von -10 bis $+45$ °. Zonen mit Mobilfunkpegeln deutlich unter 10 mV/m sind in bewohnten Gegenden im Freien heute kaum mehr anzutreffen. Diese Empfindlichkeit konnte bei U-Bahnfahrten (keine Mobilfunksignale) bestätigt werden (Bild 14).

6 Messungen mit dem ESM 140

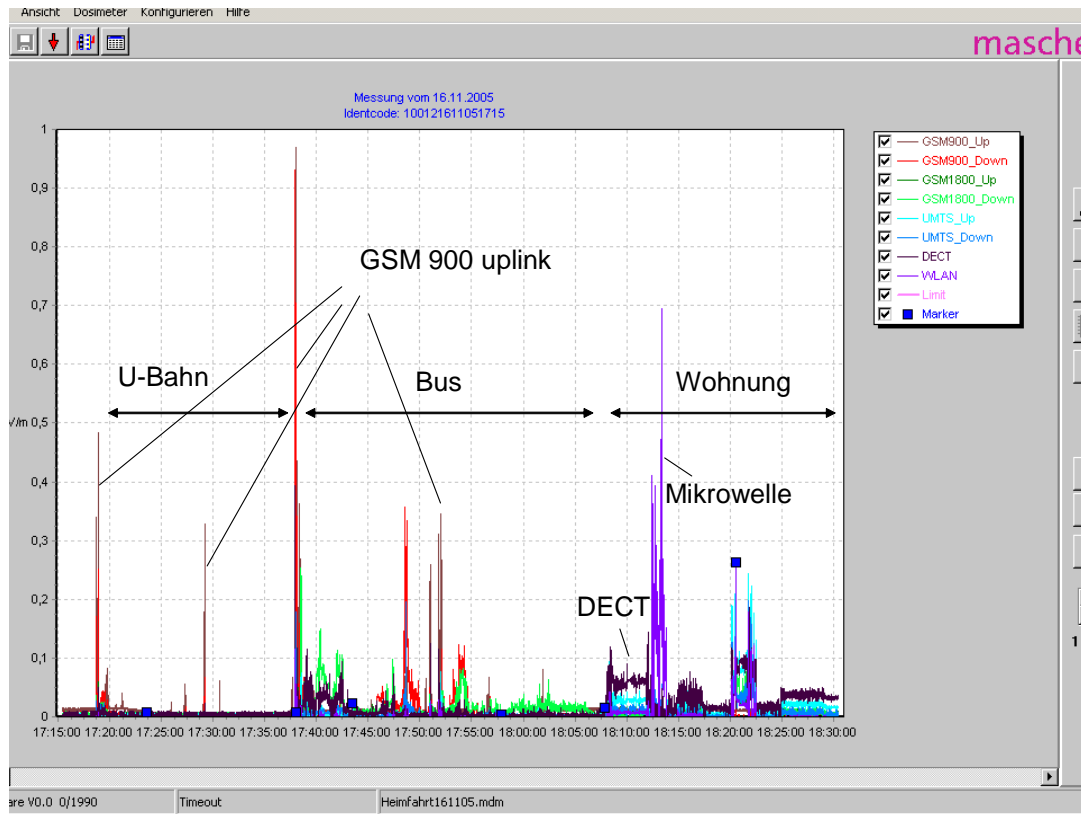
Mit dem Dosimeter wurden bereits zahlreiche Erprobungen durchgeführt, siehe /12/ und /13/. Es ist immer wieder überraschend, welche Einwirkungen an verschiedenen Orten dominieren. So nimmt der WLAN-Einfluss immer mehr zu. Immer häufiger empfängt man das WLAN oder die Mikrowelle in Wohnungen.

Bild 14 zeigt ein typisches Messbeispiel aus dem Alltag, nämlich den Nachhauseweg über U-Bahn und Bus zur eigenen Wohnung. Der Abbildung entnimmt man, dass das eigene Handy während der U-Bahn-Fahrt nichts abstrahlt. Es versucht jedoch einen Verbindungsaufbau jeweils an den Haltestellen (Empfang über Treppenabgänge).

Die Ergebnisstatistik zeigt die Messergebnisse als Mittelwert, die 25/50/75/95er -Perzentilen in den einzelnen Bändern sowie das Summenergebnis.

Diese Werte werden als Indikator in % des jeweiligen Grenzwertes angegeben.

Insgesamt bestätigen sich die bisherigen Ergebnisse, dass die mittleren Mobilfunkexpositionen aus externen Quellen - bezogen auf die Grenzwerte - gering sind.



Statistische Auswertung

Messung vom 16.11.2005
 Dosimeter S/N: 10012
 Identcode: 100121611051715

	E [mittel]	Perzentil 25%	Perzentil 50%	Perzentil 75%
GSM900 Uplink	0,03 V/m	0,00 V/m	0,01 V/m	0,01 V/m
GSM900 Downlink	0,03 V/m	0,00 V/m	0,00 V/m	0,00 V/m
GSM1800 Uplink	0,02 V/m	0,00 V/m	0,00 V/m	0,00 V/m
GSM1800 Downlink	0,02 V/m	0,00 V/m	0,01 V/m	0,01 V/m
UMTS Uplink	0,02 V/m	0,00 V/m	0,00 V/m	0,01 V/m
UMTS Downlink	0,02 V/m	0,00 V/m	0,00 V/m	0,01 V/m
DECT	0,03 V/m	0,00 V/m	0,01 V/m	0,02 V/m
WLAN	0,03 V/m	0,00 V/m	0,00 V/m	0,00 V/m

	Indikatoren
Uplink	0,09 %
Downlink	0,08 %
DECT	0,04 %
WLAN	0,05 %
ICNIRP	0,14 %

Anzahl der Datensätze: 9000

OK Drucken Probandenauswertung

Bild 14: a) Messbeispiel: Fahrt in U-Bahn, Bus, Aufenthalt in Wohnung
 b) Auswertestatistik zu obigem Messbeispiel

7 Literaturhinweise

- /1/ „Kriterien zur Bewertung epidemiologischer Studien“, Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 2002; Band 50 (2003)
- /2/ Feko: Feldberechnungssoftware mit hybriden Lösungsmöglichkeiten (MoM, PO, FEM, UTD, MLFMM); EM Software & Systems GmbH, Böblingen; feko@emss.de
- /3/ Wang, J., Fujiwara, O.: „FDTD Computation of Temperature Rise in the Human Head for Portable Telephones“, IEEE Trans. on MTT, Vol. 47, No.8, pp 1528-1534
- /4/ Hombach, V.: „Kopfmodelle für Expositionsuntersuchungen von Handfunktelefonen“, VDE/ITG-Diskussionssitzung 18./19.4.1996 in Starnberg, S. 49-52
- /5/ Liesenkötter, B.: „Zusammenhang zwischen Dosimeteranzeige und der Feldstärke am Ort sowie der SAR im Kopf des Trägers“, Kurzbericht für das Bayer. Landesamt für Arbeitsschutz, August 2004
- /6/ Bornkessel, C., Schubert, M.: „Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren“, Abschlussbericht der IMST GmbH für das Bundesamt für Strahlenschutz, März 2005
- /7/ Leitgeb, N., Cech, R.: „Unwirksamkeit von Elektromog-Abschirmmatten. Teil 2: Hochfrequenzbereich“, Biomedizinische Technik Bd. 50, Heft 9, S. 277-281, Sept. 2005
- /8/ „Mobilfunk-Basisstationen (GSM). Messempfehlung“, herausgegeben vom schweizerischen BUWAL, Dokument VU-5800-D; Bern 2002
- /9/ Mann, Addison, Blackwell, Khalid: „Personal Dosimetry of RF Radiation“, Health Protection Agency, report HPA-RPD-008, Oct. 2005, ISBN 0 85951 568 0
- /10/ Koob, K.: “A Near-Isotropic Antenna System for Large Aerospace Vehicles”, IEE-Conf. On Aerospace Antennas, conf. publ. Nr. 77, London, June 1971, pp. 206-211
- /11/ Liesenkötter, B.: “The Quasi-Isotropic Antenna of the Helios Solar Probe”, IEE-Conf. On Aerospace Antennas, conf. publ. Nr. 77, London, June 1971, pp. 106-111
- /12/ Radon, K., et al.: “Mobile Phones : Exposure And Well-Being in Children And Adolescents – Mobilee”, Epidemiology, Vol. 16(5) Sept. 2005, p. S147
- /13/ Radon, K., et al.: ”Personal dosimetry of exposure to mobile telephone base stations – are we close? An epidemiologic feasibility study comparing the Maschek dosimeter prototype and the Antennessa DSP- 090 system”, (Bioelectromagnetics 2006, in Druck)