

# Schnelles SAR-Messverfahren für handgehaltene Funktelefone

Hans-Oliver Ruoff, Michael Klar, Wolfgang Spreitzer, Georg Fässler, Wolfgang Hiller

Es wird ein neuartiges, effizientes Verfahren für eine schnelle (im Sekundenbereich) und genaue Bestimmung der spezifischen Absorptionsrate (SAR) in einem homogenen Phantom vorgestellt. Um die elektrischen Eigenschaften von Gewebe im menschlichen Kopf nachzubilden, wird ein Festmaterial zur Herstellung des Phantoms verwendet. Die Messung der elektrischen Feldstärke erfolgt in einem schnellen (quasi-parallelen) Scan-Verfahren auf der Oberfläche des Phantoms, wobei Arrays von elektrischen Feldsonden zum Einsatz kommen. Um eine hohe Genauigkeit bei der Bestimmung der Feldstärken zu gewährleisten, muß die durch das Sonden-Array verursachte Feldbeeinflussung auf ein Minimum reduziert werden. Aus diesem Grund werden hochohmige Ableitungen verwendet. Um die elektrische Feldstärke innerhalb des Phantoms zu bestimmen, wurde ein effizienter numerischer Transformationsalgorithmus entwickelt. Wendet man das neue Messverfahren auf die Überprüfung der SAR-Werte bei handgehaltenen Funktelefonen an, so ist aufgrund der hohen Messgeschwindigkeit (Zeitfaktor  $\approx 100$  schneller im Vergleich zu den heute angewandten Verfahren) erstmals das Testen von Stichproben aus der Produktion oder sogar ein 100%-Test denkbar.

## 1. Einleitung

Die von Mobiltelefonen ausgehenden elektromagnetischen Felder dürfen in ihrer Intensität – aus Gründen des Personenschutzes und der Beeinflussung anderer Geräte – bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Grenzwerte müssen im gesamten Raum und auch innerhalb des mensch-

lichen Körpers eingehalten werden. Im Falle des Mobilfunks ist die Bestimmung der spezifischen Absorptionsrate (SAR) maßgebend, für die Grenzwerte existieren und die ein Maß für die in ein bestimmtes Gewebivolumen einströmende Leistung darstellt. Die Ermittlung der SAR-Verteilung im Gewebe des menschlichen Körpers wird in selteneren Fällen über eine Messung des Temperaturanstiegs, meist jedoch über die Bestimmung der elektrischen Feldstärke durchgeführt.

Bei den heute etablierten Messverfahren wird die Bestimmung der SAR (z.B. bei Mobiltelefonen) auf die Messung der elektrischen Feldstärke direkt im Inneren einer – mit einer die elektrischen Eigenschaften von Gewebe nachbildenden Flüssigkeit gefüllten – Kopfnachbildung (Phantom) zurückgeführt. Dazu wird eine elektrische Feldsonde mittels eines Roboters im Kopfphantom verschoben, was zu einem enormen zeitlichen Messaufwand (Größenordnung 20 bis 30 Minuten für eine einzelne Messsituation) führt.

Mit Hilfe des hier vorgestellten neuartigen Verfahrens wird eine sehr schnelle (im Bereich von Sekunden) und genaue Bestimmung der SAR-Verteilung in einem aus Festmaterial hergestellten Phantom durch quasi-paralleles Messen der elektrischen Feldstärke mit Hilfe geeigneter, auf der Oberfläche des Phantoms aufgebrachter Feldsonden ermöglicht. Die Bestimmung der SAR erfolgt mit Hilfe einer numerischen Transformation der Feldstärke von der Oberfläche ins Innere des Phantoms. Die wesentlichen Vorteile liegen in einer drastischen Reduzierung der Messzeit, der unmittelbaren und genauen Messung im besonders relevanten Oberflächenbereich

und einer guten Handhabbarkeit und ständigen Verfügbarkeit wegen des Verzichtes auf die das Gewebe nachbildende Flüssigkeit.

Die nachfolgenden Abschnitte gliedern sich wie folgt: Im Kapitel 2 wird – unter physikalischen Gesichtspunkten – die Wechselwirkung zwischen Mobiltelefonen und dem menschlichen Kopf diskutiert, während in Kapitel 3 der hier vorgestellte neue Ansatz den „konventionellen“ Verfahren zur Bestimmung der SAR gegenübergestellt wird. Kapitel 4 beschreibt in Kürze die technische und technologische Realisierung des neuen Messsystems. Abschließend wird in Kapitel 5 anhand eines Messbeispiels ein erster Vergleich mit den etablierten Verfahren bzw. mit einer numerischen Berechnung vorgestellt.

## 2. Wechselwirkung zwischen Mobiltelefonen und dem menschlichen Kopf

Die zu untersuchende Beeinflussung von Antennen und Personen ist eine wechselseitige. Betrachtet man diesen Sachverhalt für den Fall eines Mobiltelefons, das unmittelbar am menschlichen Kopf betrieben wird (siehe Abbildung 1), so findet zum einen eine Veränderung der Antenneneigenschaften (gekennzeichnet durch die Strahlungscharakteristik  $C(\theta, \phi)$ , die Eingangsimpedanz  $Z_e$  und den Wirkungsgrad  $\eta$ ) durch die Person statt, zum anderen wird ein Teil der von der Antenne abgestrahlten Leistung  $P_t$  nicht ins Fernfeld ( $P_f$ ), also z.B. zur Basisstation, übertragen, sondern in den menschlichen Kopf eingekoppelt.

Dieser Effekt kann z.B. durch die Angabe der beiden Größen Verlustleistung  $P_v$  und

spezifische Absorptionsrate  $SAR$  erfaßt werden. Eine Aufspaltung der Gesamtproblematik in die einzelnen Fragestellungen

- Physikalische Wechselwirkungen: Beeinflussung der Person – Beeinflussung der Antenne
  - Biologische Wirkungen
- ist erforderlich, wobei die Frage nach möglichen Wirkungsmechanismen der elektromagnetischen Felder in biologischen Systemen an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden soll.

Anders verhält es sich bei der Frage nach der physikalischen Beeinflussung von biologischem Gewebe durch hochfrequente Felder, die durch dosimetrische Untersuchungen quantifiziert wird. Weit verbreitet ist die Bestimmung der spezifischen Absorptionsrate  $SAR$ , für die zahlreiche Grenzwerte existieren und die als die zeitliche Änderung der Energie  $\Delta W$ , die von einer Masse  $\Delta m$  (welche in einem Volumenelement  $\Delta V$  mit konstanter Materialdichte  $\rho$  enthalten ist) absorbiert wird, definiert ist. Im Falle harmonischer Anregungen kann dies auch in der Form

$$SAR(\rho) = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\rho} \cdot |E(\rho)|^2 \quad (1)$$

geschrieben werden, d.h. die Ermittlung der  $SAR$ -Verteilung wird zurückgeführt auf die (meßtechnische oder numerische) Bestimmung der elektrischen Feldstärke  $E$  im Gewebe, der Leitfähigkeit  $\sigma$  und der Dichte. Oft interessieren nur die lokalen Spitzenwerte  $SAR_{max}$ , die – als Verhältnis aus insgesamt im Körper absorbiertes Leistung zur Gesamtmasse definierte – gemittelte oder die (maximale) über kleine Volumen- bzw. Masselemente lokal gemittelte  $SAR$  (z.B.  $SAR_{log, max}$ ,  $SAR_{lg, max}$  in Abhängigkeit vom Mittelungsvolumen). Zusätzlich zu dieser

nicht-thermischen, feldstärkeabhängigen Definition des SAR-Werts existiert eine weitere thermische, welche deren direkte Proportionalität zum Temperaturanstieg durch die Gleichung  $SAR = C \cdot \delta T / \delta t$ , in der  $C$  die spezifische Wärmekapazität bezeichnet, zum Ausdruck bringt.

Die Erfassung der lokalen SAR-Verteilung im menschlichen Kopf im Zusammenhang mit der Bestrahlung durch mobile Funktelefone kann durch numerische Berechnungen (unter Anwendung von Verfahren wie FDTD, FIT, FEM, MMP oder MoM – siehe z.B. [1] und Abbildung 2) oder durch Messung der elektrischen Feldstärke z.B. in einem – mit gewebebildender Flüssigkeit gefüllten – Kopfphantom durch eine verschiebbare elektrische Feldsonde erfolgen (siehe z.B. [2], sowie Abschnitt 3.1.).

## 3. Messverfahren zur Bestimmung der spezifischen Absorptionsrate (SAR)

Die Bestimmung der spezifischen Absorptionsrate kann auf die Messung des Temperaturanstiegs im menschlichen Gewebe oder – gemäß Gleichung (1) – auf die Ermittlung der elektrischen Feldstärke zurückgeführt werden. Im folgenden sollen ausschließlich Verfahren des zweiten Typs (Bestimmung der elektrischen Feldstärke) betrachtet werden.

### 3.1. „Konventionelles“ SAR-Messverfahren

Bei den meisten heute eingesetzten Messplätzen erfolgt die Bestimmung der SAR durch Messung der elektrischen Feldstärke in einem Phantom, das mit einer geeigneten, die elektrischen Eigenschaften von

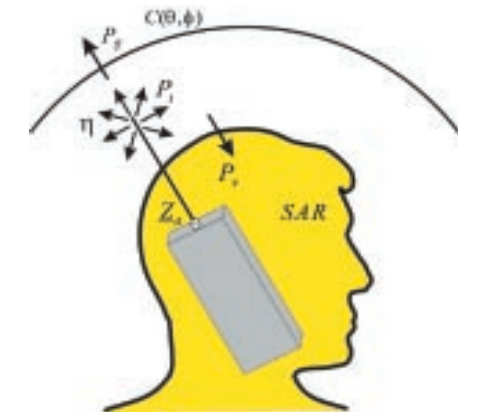


Abb. 1: Wechselwirkung von Antenne und Person für den Fall eines Mobiltelefons am Kopf

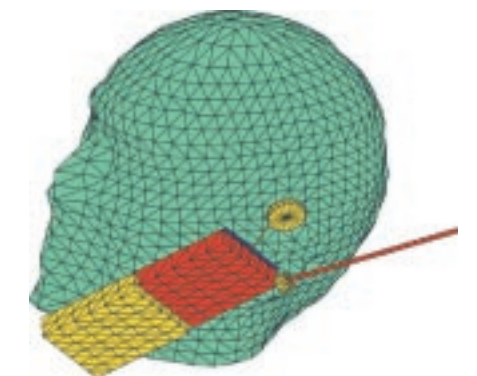


Abb. 2: Berechnungsmodell eines Mobiltelefons am Kopf (Programm FEKO)



Abb. 3: SAR-Messplatz, siehe [3]

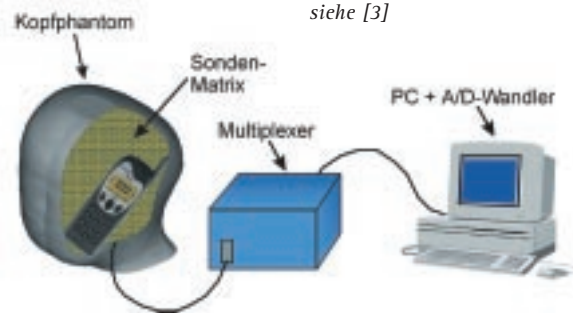


Abb. 4: Prinzipieller Messaufbau des neuen SAR-Testverfahrens mit Kopfphantom

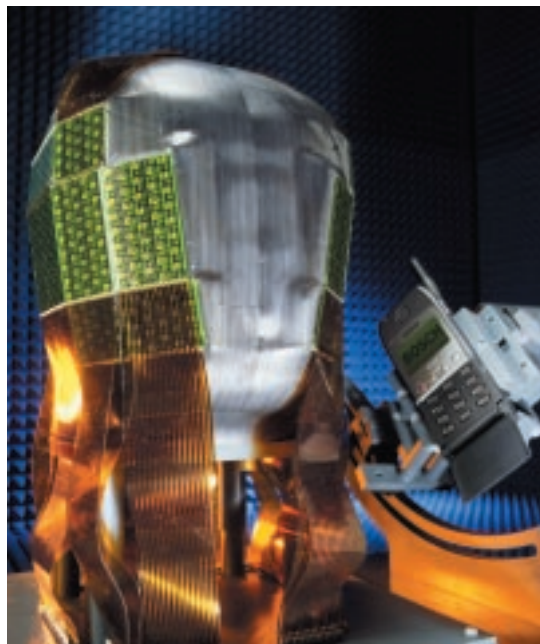


Abb. 5: Prototyp eines Messplatzes zur Durchführung von schnellen SAR-Tests

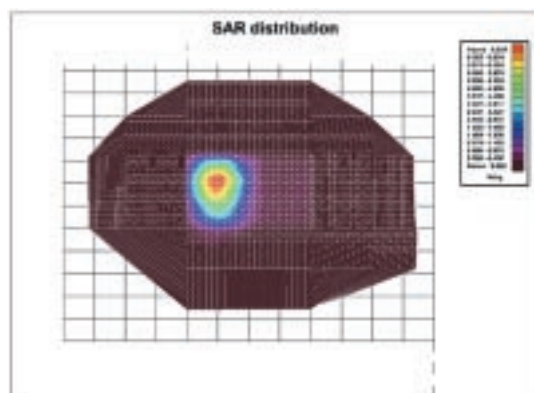


Abb. 6: Verteilung von  $SAR_{10g}$  – projiziert auf die (eben dargestellte) Kopfoberfläche

Gewebe nachbildenden Flüssigkeit gefüllt ist (siehe Abbildung 3). Mit Hilfe eines Roboters wird eine elektrische Feldsonde in einem zeitaufwendigen 3D-Scan positioniert. Aktuelle Forschungsarbeiten zu diesen SAR-Messverfahren werden beispielsweise an der ETH Zürich (Prof. Kuster), sowie auf europäischer Ebene im Rahmen von COST 244bis und im Projekt CEPHOS (SMT4-CT97-2173, EU / 4. Rahmenprogramm) durchgeführt.

Aus praktischer Erfahrung ist bekannt, daß für eine Einzelmessung eine Messzeit von ca. 20 bis 30 Minuten erforderlich ist. Ein vollständiger Test an einem einzelnen Mobiltelefon ist auf der Grundlage existierender Spezifikationen durchzuführen. So sind bei einem Dualband-Gerät für mehrere Positionen des Telefons an beiden Seiten des Kopfes bei Betrachtung von mehreren Frequenzen pro Band (z.B. die Frequenzen an den Bandgrenzen und die Bandmittelfrequenz) sowie bei Berücksichtigung von zwei Antennenpositionen (ausgezogen und eingeschoben) zahlreiche Einzelmessungen erforderlich. Dies bedeutet in der Regel einen Messaufwand von mehreren Arbeitstagen für einen vollen Test eines Gerätes, wobei zusätzlich Aspekte wie „Vorbereitung des Messplatzes“ etc. berücksichtigt werden müssen. Bislang war keine andere als die in Abbildung 3 gezeigte Methode verfügbar, die bei hoher Messgenauigkeit schnelle SAR-Messungen zuläßt. Betrachtet man neue Geräte, die an Komplexität noch zunehmen (z.B. Tripleband-Geräte und Mobiltelefone mit „Headset“), wird die Notwendigkeit eines schnelleren Meßsverfahrens offensichtlich.

### 3.2. Neuartiges schnelles SAR-Messverfahren

Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau des neuen Messverfahrens. Dieses Verfahren ermöglicht eine schnelle (im Sekundenbereich) und genaue Bestimmung der SAR innerhalb eines Phantoms. Durch Verwendung eines Festmaterials zur Her-

stellung des Phantoms können die Nachteile der das menschliche Gewebe nachbildenden Flüssigkeit überwunden werden. Eine zeitliche Änderung der elektrischen Parameter kann dadurch ausgeschlossen werden – das Phantom ist damit jederzeit und ohne aufwendige Vorbereitungsphase verfügbar. Des weiteren werden – für eine schnelle Erfassung der elektrischen Feldstärke – die Messungen auf die Oberfläche des Phantoms reduziert. Für eine weitere Beschleunigung des Messvorgangs werden Arrays von miniaturisierten elektrischen Feldsonden direkt auf der Oberfläche des Phantoms aufgebracht und quasi parallel (durch schnelles Schalten) „ausgelesen“. Dafür ist ein ausgefeiltes Konzept von elektrischen Feldsonden und Signalleitungen erforderlich, das – aus Gründen der Messgenauigkeit – ein Minimum an Feldbeeinflussung garantiert. Ein weiterer Vorteil liegt darin, daß die Messungen unmittelbar auf der Oberfläche, also dem Bereich, wo die maximalen Feldstärkewerte auftreten und der damit von besonderem Interesse ist, durchgeführt werden. Um die für die Berechnung der gemittelten SAR erforderlichen Werte der elektrischen Feldstärke im Innern des Phantoms zu erhalten, wird ein effizienter numerischer Transformationsalgorithmus verwendet [4].

### 4. Technische und technologische Realisierung des neuen Messsystems

Abbildung 5 zeigt einen ersten Prototyp des neuen Messverfahrens.

Zur Herstellung des Phantoms wird ein Materialgemisch verwendet [5], das die elektrischen Eigenschaften von menschlichem Gewebe im Frequenzbereich der Mobilfunknetze nachbildet. Dieses Phantommateriale besteht aus folgenden drei Grundsubstanzen:

- Keramik mit hoher Permittivität zur Einstellung der Dielektrizitätskonstante,
- Graphit zur Einstellung der elektrischen Verluste,

- Polyvinylidenfluorid (PVDF) als Trägermaterial, um mechanische Festigkeit und Bearbeitbarkeit zu gewährleisten.

Als elektrische Feldsonden kommen verkürzte Dipole und Monopole mit einer Detektordiode und anschließendem Tiefpass, welche in einer Matrixstruktur verschaltet sind, zum Einsatz. Die an den Kondensatoren der einzelnen Sonden anliegenden Gleichspannungssignale werden mittels hochohmiger Signalleitungen einer Steuer- und Auswerteeinheit zugeführt. Bei dem bislang verwendeten Sondenkonzept können lediglich die Beträge der an dem jeweiligen Ort anliegenden Feldstärkekomponente gemessen werden. Dies führt aufgrund der fehlenden Phaseninformation zwischen den verschiedenen Punkten auf der Phantomboberfläche zu einer geringfügigen Überschätzung der gemittelten SAR.

Zur effizienten Berechnung der elektrischen Feldstärke im Inneren des Phantoms auf der Grundlage der auf der Oberfläche gemessenen Amplitudenwerte wurde ein numerischer Transformationsalgorithmus entwickelt, der auf einer Kombination einer „Greenschen Funktion“ mit einer schnellen „FFT / Matrix-Vektor-Multiplikation“ beruht [4].

### 5. Messbeispiel

Abschließend soll als Messbeispiel ein vertikal polarisierter  $\lambda/2$ -Dipol, der in einem Abstand von 1 cm zum „Ohrpunkt“ der rechten Seite des in Abbildung 5 gezeigten Kopfphantoms positioniert wird, betrachtet werden. Mit Hilfe eines HF-Generators wird der Antenne ein CW-Signal zugeführt, so dass sie eine (normierte) Sendeleistung von 1 W abstrahlt (dies entspricht einer maximalen Sendeleistung von 8 W bei GSM-Modus und liegt damit um einen Faktor 4 höher als bei kommerziellen Mobiltelefonen). Die bei der Frequenz  $f = 900$  MHz durchgeführte Messung ergab einen maximalen (über 10g Gewebe) gemittelten Wert  $SAR_{10g, max}$  von **7,83 W/kg**.

Vergleichende Messungen wurden mit Hilfe des in Abbildung 3 gezeigten Meßsystems durchgeführt. Hiermit ergab sich ein Wert für  $SAR_{10g, max}$  von **7,64 W/kg**.

Eine vergleichende Berechnung unter Anwendung des Feldberechnungsprogramms FEKO ergab einen Wert von **7,80 W/kg** bzw. **7,60 W/kg** (mit eingefügten ebenen Flächen bzw. „originales“ Kopfmodell, siehe dazu auch [6]).

Insgesamt ist eine sehr gute Übereinstimmung der einzelnen Ergebnisse zu verzeichnen. Wie erwartet, führt das neue Messverfahren zu einer geringfügigen (aber in der praktischen Anwendung tolerierbaren) Überschätzung des maximalen gemittelten SAR-Werts. Im Vergleich zu den „konventionellen“ Methoden kann die Messzeit aber um einen Faktor  $\approx 100$  in den Bereich von Sekunden reduziert werden.

Abbildung 6 zeigt die mit dem neuen Verfahren ermittelte Verteilung von  $SAR_{10g}$ .

Die Autoren Dr. Hans-Oliver Ruob, Dipl.-Ing. Michael Klar, Dipl.-Ing. Wolfgang Spreitzer, Dr. Georg Fässler und Dr. Wolfgang Hiller haben gemeinsam das Projekt bei der Robert Bosch GmbH in Stuttgart durchgeführt.

### Literatur

- [1] H.-O. RUOB: Auf der Momentenmethode basierende Berechnungsverfahren zur Untersuchung der Wechselwirkung von Antennen und biologischen Körpern. Dissertation, Institut für Hochfrequenztechnik, Universität Stuttgart, November 1998, Shaker Verlag, 1999
- [2] N. KUSTER: Automated E-Field Scanning System for Dosimetric Assessments. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 44, no. 1, pp. 105-113, January 1996
- [3] SCHMID & PARTNER ENGINEERING AG. Homepage. Available at <http://www.speag.ch>
- [4] H.-O. RUOB, M. KLAR UND W. SPREITZER: Effektives Meßverfahren zur Bestimmung der Spezifischen Absorptionsrate (SAR) im menschlichen Kopf. Nichtionisierende Strahlung, NIR 99, 31. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, vol. II, S. 1101-1114, Köln, September 1999
- [5] H. TAMMURA, et al.: A dry phantom material composed of ceramics and graphite powder. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 39, no. 2, pp. 132-137, May 1997
- [6] H.-O. RUOB: Influence of the shape of the head model on the maximum averaged SAR value. Seminar on „Electromagnetic assessment and antenna design relating to health implications of mobile phones“, IEE, pp. 7/1-7/5, London, 28.6.1999