

Erfassung der HF-Exposition in typischen Alltagsszenarien

Dr. Christian Bornkessel und Prof. Dr. Matthias A. Hein, Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik, Ilmenau, Deutschland

1 Einleitung

In dosimetrischen Messstudien zur Untersuchung der Exposition der Allgemeinbevölkerung durch hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF) standen in den letzten Jahren primär *einzelne* Funkdienste der Mobilkommunikation und des drahtlosen Internetzugangs (z.B. UMTS, WiMAX, LTE) und dabei insbesondere die Immissionen der *Basisstationen* im Vordergrund. Gemäß den Vorgaben der 26. BImSchV [1] wurden diese Immissionen bei unterstellter maximaler Sendeleistung der Funkanlage ermittelt, die auch bei der Zulassung derartiger Anlagen relevant ist. In der öffentlichen Diskussion stellt sich jedoch zunehmend die Frage, wie groß die persönliche *Gesamtexposition* durch *verschiedenartige* HF-Quellen ist und in welchem Verhältnis die Beiträge durch Körperkontakt-Quellen (eigenes Mobiltelefon), körpernahe Endgeräte (umliegende Endgeräte sowie HF-Quellen im unmittelbarere Nähe) sowie körperferne Sendeanlagen (externe Sendeanlagen, wie z.B. Rundfunk- oder Mobilfunkanlagen) zueinander stehen. Im Fokus des Interesses stehen dabei Informationen zur mittleren *momentan vorliegenden*, tatsächlichen Exposition und zu deren Größenordnung und Verteilung in typischen Alltagsszenarien.

Zu dieser Fragestellung gibt es derzeit nur wenige Untersuchungen. In einigen, z.T. epidemiologischen Messstudien wurden z.B. Personendosimeter eingesetzt (z.B. [2]), wobei diese eine begrenzte Empfindlichkeit (ca. 0,05 V/m) sowie teilweise erhebliche Messunsicherheiten u.a. durch das Tragen der Dosimeter am Körper (Abschattungseffekte) aufweisen. Die meisten Messwerte in diesen Studien lagen unter der Nachweisgrenze der Dosimeter. Ein weiteres Merkmal der Studien ist, dass die Immissionen zumeist nicht systematisch ermittelt wurden, was die Auswahl der Szenarien und die Festlegung der Messpunkte betrifft.

In der hier vorgestellten, durch das Informationszentrum Mobilfunk e.V. (IZMF) unterstützten Studie wurde die Immission mit empfindlicheren spektrumanalysatorbasierten Messgeräten erfasst. Zum Einsatz kam das Gerät SRM-3006 der Firma Narda Safety Test Solutions, das neben einer guten Empfindlichkeit vor allem auch eine besonders effiziente Messung mehrerer spektral getrennter Funkdienste in einem Messdurchlauf gestattet. Die systematische Auswahl der Messpunkte sowie das eingesetzte Messverfahren sind im nächsten Kapitel detailliert beschrieben.

2 Messdurchführung

Die Messungen erfolgten im Frequenzbereich von 75 MHz bis 3 GHz. Es wurden sowohl *Endgeräte* (Geräte im häuslichen sowie im Arbeitsumfeld, d.h. WLAN, DECT, Mikrowelle sowie benachbarte mobile Endgeräte), als auch *Sendeanlagen* (ortsfeste Sendeanlagen wie z.B. Rundfunksender und Mobilfunk-Basisstationen inkl. TETRA und Betriebsfunk) erfasst. Die Mittelungszeit betrug 6 Minuten entsprechend den ICNIRP-Richtlinien [3]. Die Höhe der Messantenne repräsentiert den Kopf- und Brustbereich. Örtliche Mittelungen

wurden z.B. durch Bewegungen des Messgerätes bei einem Rundgang durch das Szenario berücksichtigt. Bezüglich der örtlichen Bewegung wurde sich in erster Linie am grundlegenden Szenario orientiert (während der Bahnfahrt sitzt man überwiegend; auf der Messe hingegen steht man schon einmal 6 Minuten an einem Stand, läuft aber andererseits auch durch das Messegelände). Pro Szenario wurde die Immission an mehreren unterschiedlichen Messpunkten aufgenommen, um die Spannweite der resultierenden Gesamtimmission aufzuzeigen.

Eine potenzielle Immission durch das persönliche Mobiltelefon wurde aus Literaturdaten abgeleitet (siehe Abschnitt 3.2) und für jedes Szenario nachträglich hinzugerechnet, um eine einheitliche Vorgehensweise für jedes Szenario zu gewährleisten.

2.1 Vorstellung der untersuchten Szenarien

Für die Messungen wurden folgende sieben Szenarien ausgewählt, die verschiedene alltagstypische Aufenthaltsbereiche bzw. Tätigkeiten von Personen abdecken. Mit Ausnahme der Messungen im Szenario „Messe“ erfolgte die Auswahl der Messorte in Abstimmung mit dem Referat für Gesundheit und Umwelt der Bayerischen Landeshauptstadt München. Die Durchführung der Messungen erfolgte von April bis Juli 2015.

Szenario	Beschreibung	Beispiele
MES	Messe / Hotspot	Hannover: Hannovermesse, in Messehallen und im Außengelände
VER	Verkehr	Bundesbahn, Münchner U-Bahn, Bahnhof
SCH	Schule	München: Städtische Berufsschule für Informationstechnik
ARB	Arbeitsplatz	München: Bürgerinformation, Gasteig, Lesesaal Uni, Feuerwache
WOH	Wohnung	München: 3 Privatwohnungen
GAS	Gastronomie	München: Café Marienplatz, Mensa LMU, Restaurant Olympiaviertel
ÖBE	Öffentlicher Bereich	München: Marienplatz, Viktualienmarkt, Englischer Garten, Gasteig

Tabelle 2.1: Untersuchte Szenarien

2.2 Eingesetztes Messverfahren

Für die Szenarienmessungen wurde das Messgerät Narda SRM-3006 in der Betriebsart „Safety Evaluation“ verwendet. In dieser Betriebsart können in einem Messdurchlauf verschiedene Funkdienste quasi gleichzeitig gemessen werden. Die Funkdienste werden dabei durch Anfangs- und Endfrequenz sowie durch die Auflösungsbandbreite (RBW) spezifiziert. Es wurden dabei folgende Funkdienste erfasst (Sortierung nach aufsteigender Frequenz):

Sendeanlagen		Endgeräte	
Funkdienst	Bemerkung	Funkdienst	Bemerkung
UKW		TETRA	Endgeräte
DAB		LTE-800	Endgeräte
TETRA	Basisstationen	GSM-R/GSM-900	Endgeräte
DVB-T		GSM-1800/LTE-1800	Endgeräte
LTE-800	Basisstationen	DECT	Basis und Hörer
GSM-R/GSM-900	Basisstationen	UMTS	Endgeräte
GSM-1800/LTE-1800	Basisstationen	WLAN	WLAN Access-Points und Clients, ggf. Bluetooth
UMTS	Basisstationen	LTE-2600	Endgeräte
LTE-2600	Basisstationen	ISM 434/868	ISM 434 und 868 MHz, nur in einzelnen Szenarien gemessen

Tabelle 2.2: Erfasste Funkdienste im Frequenzbereich 75 MHz bis 3 GHz

Wurden am Messort darüber hinaus weitere Funkdienste identifiziert (z.B. Betriebsfunk), dann wurden diese mit entsprechend angepassten Messeinstellungen ebenfalls erfasst und ausgewertet.

Die Messungen für Sendeanlagen und Endgeräte wurden in separaten Durchläufen durchgeführt, um unterschiedliche Empfindlichkeitsvoreinstellungen des Messgerätes zu ermöglichen. Bei den Frequenzbereichen für DAB und DVB-T wurden in Abhängigkeit von der Untersuchungsregion die dort vorhandenen Kanäle als Messpakete definiert, um eine höhere Empfindlichkeit gegenüber der Abtastung des gesamten Frequenzbereiches zu gewährleisten. Bezüglich der Auflösebandbreite RBW wurde für jeden Funkdienst ein individueller Wert verwendet, der bei digital modulierten Funkdiensten mit hohem Crestfaktor zu etwa 1/100stel der Kanalbandbreite gewählt wurde.

Die Nachweisschwelle lag je nach Funkdienst bei maximaler Empfindlichkeit des Messgerätes zwischen etwa 0,004 und 0,04 V/m. Funkdienste, die unter der Nachweisschwelle lagen, wurden in der Auswertung mit einem der jeweiligen Nachweisschwelle entsprechenden Wert berücksichtigt, es sei denn, dass durch spezifische Einzelmessung ein niedrigerer Wert nachgewiesen werden konnte.

Die Zeit für das Durchlaufen einer kompletten Messung beträgt für die in Tabelle 2.2 genannten Funkdienste der Sendeanlagen etwa 4 Sekunden und für die der Endgeräte etwa 3 Sekunden. Somit kann gewährleistet werden, dass in der Messzeit von 6 Minuten eine ausreichend große Anzahl von Messwerten für eine aussagekräftige Mittelung erfasst wird.

3 Messergebnisse

3.1 Größenordnung der Immission

In Bild 3.1 sind die Ergebnisse der Messungen an allen 30 Messpunkten grafisch dargestellt. Die gemessene Immission wird dabei als *Ausschöpfung des Grenzwertes (GW) für die Leistungsflussdichte* ausgewiesen. Diese Darstellung wird anstelle der häufig gebräuchlichen feldstärkebasierten Darstellung deswegen hier verwendet, da ein besonderer Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Erfassung der Beiträge unterschiedlicher Quellen liegt und sich die Beiträge der Quellen entsprechend thermischem Grenzwertmodell im Hochfrequenzbereich *leistungsbezogen* addieren.

Der maximal festgestellte Wert beträgt 0,458 % des Leistungsflussdichte-Grenzwertes (entsprechend 43,1 mW/m² bzw. 4,03 V/m) und wird am Messpunkt GAS1 erreicht. Dieser Messpunkt liegt etwa 10 m von einer in ca. 3 m Höhe montierten Mikrozellen-Mobilfunkantenne entfernt, die den Hauptanteil der Immission verursacht. Die minimale Immission wurde am Messpunkt WOH4 mit 0,0005 % des Leistungsflussdichte-Grenzwertes (entsprechend 0,022 mW/m² bzw. 0,09 V/m) gemessen. Das betreffende Studentenappartement liegt zwar nur etwa 700 m vom Olympiaturm mit seinen Sendeanlagen entfernt, ist aber durch die ebenerdige Lage, das Mauerwerk und das Fehlen von Fenstern in Richtung Olympiaturm funkmäßig von diesem abgeschirmt.

Der Median beträgt 0,0034 % des Leistungsflussdichte-Grenzwertes. 90 % aller Messwerte liegen unter 0,08 % des Grenzwertes.

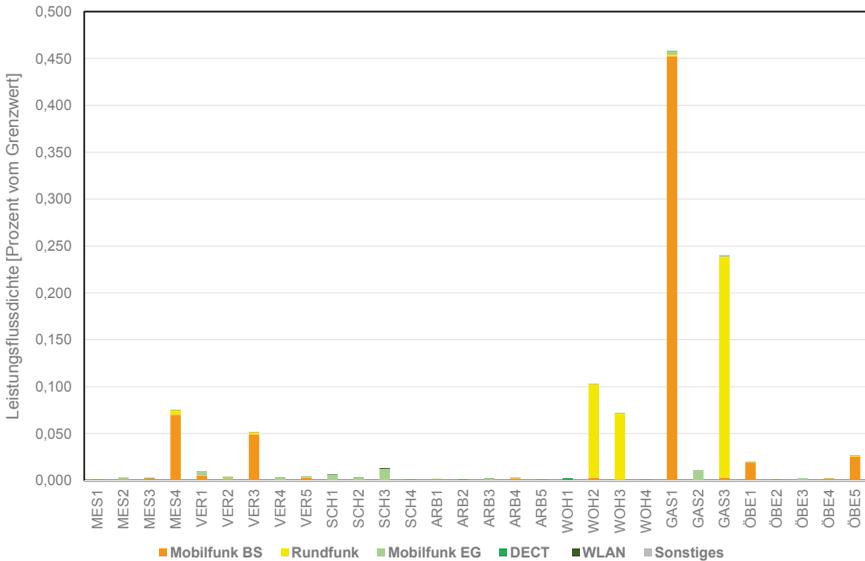


Bild 3.1: Festgestellte Immissions-Messwerte an den 30 Messpunkten

3.2 Einbeziehung des eigenen Mobiltelefons

In den Szenarienmessungen wurde die persönliche Exposition durch das eigene Mobiltelefon während eines Telefonates nicht erfasst. Diese persönliche Exposition soll vielmehr als *additiver Zusatz* auf alle gemessenen Immissionen in allen Szenarien *einheitlich* berücksichtigt werden. Somit werden die Szenarien bezüglich der persönlichen Mobiltelefonexposition miteinander vergleichbar. Die Ableitung der persönlichen Exposition durch ein Mobiltelefon wurde nach folgenden Grundüberlegungen vorgenommen:

Eine Analyse der SAR-Werte von 152 Smartphones, Phablets und Handys der Jahre 2009 bis 2014 zeigt einen mittleren SAR-Wert von 0,68 W/kg entsprechend 34 Prozent des Grenzwertes von 2,0 W/kg (Stand März 2014, Zeitschrift Connect).

Dieser gerätegemittelte Wert gilt jedoch nur für Mobiltelefone, die mit maximaler Sendeleistung betrieben werden, was in der Regel nicht der Fall ist. Vielmehr ist die effektive Sendeleistung von der Verbindungsqualität zur Basisstation abhängig. In [4] wurde aus einer Vielzahl von Einzelmessungen im Rahmen der Interphone-Studie ein typischer mittlerer GSM-Sendeleistungspegel von 50 % der maximalen Sendeleistung ermittelt. Unterstellt man während des Telefonats eine 50 % Sprech- und eine 50 % Hörnutzung, so bestimmt sich der zeitgemittelte SAR-Wert auf 25 % von 0,68 W/kg = 0,17 W/kg entsprechend 8,50 % Grenzwertausschöpfung. Dieser Wert wird für alle Messpunkte einheitlich als Maß für die persönliche Exposition durch das eigene Mobiltelefon angesetzt.

Ein Vergleich dieses Wertes mit den Messergebnissen in den unterschiedlichen Szenarien zeigt, dass an allen Messpunkten die persönliche Gesamtimmission durch das eigene Mobiltelefon dominiert wird. Der Maximalwert bleibt aber auch hier mit 8,96 % (Messpunkt GAS1) der leistungsbezogenen Grenzwertausschöpfung deutlich unterhalb der Grenzwerte.

3.3 Beitrag der unterschiedlichen Funkdienste

Da in Bild 3.1 aufgrund der an den Maximalwerten der Messreihe ausgerichteten Skalierung der Beitrag der einzelnen Funkdienste an der Gesamtimmission für die meisten Messpunkte nur unzureichend zu erkennen ist, ist für Bild 3.2 eine feinere Skalierung gewählt worden. Hieraus lässt sich anhand der Legende ablesen, welche Beiträge Sendeanlagen (Mobilfunk-Basisstationen und Rundfunkanlagen) sowie Endgeräte (Mobilfunk-Endgeräte, DECT, WLAN und Sonstige, wie z.B. ISM 434/868 Funkanlagen) zur gemessenen Gesamtimmission liefern. Es ist zu erkennen, dass im Allgemeinen das Verhältnis von Sendeanlagen und Endgeräten nicht nur zwischen den unterschiedlichen Szenarien, sondern auch innerhalb eines Szenarios völlig unterschiedlich sein kann. Als Beispiel sollen hier die Messpunkte GAS1 und GAS2 des Szenarios Gastronomie herangezogen werden: Während beim Messpunkt GAS1 die Gesamtimmission eindeutig von Mobilfunk-Basisstationen dominiert wird, dominiert am Messpunkt GAS 2 ebenso deutlich die Immission durch Endgeräte. Dies ist in Bild 3.3 nochmals anhand einer Tortendiagramm-darstellung ausgeführt: In diesem Fall sorgen die Lage des Messpunkte GAS2 (Innenraum Erdgeschoss) sowie die Abschirmung vor den Immissionen externer Sendeanlagen durch bedampfte Fenster für einen vergleichsweise geringen Mobilfunk-Empfang. Deswegen regeln die Mobilfunk-Endgeräte ihre Sendeleistung hoch, was sich in der Gesamtimmissionsbilanz deutlich widerspiegelt. Im Gegensatz dazu sorgt die Hotspotversorgung an GAS1 für eine überdurchschnittliche Netzversorgung, so dass umliegende Endgeräte ihre

Sendeleistung herunterregeln und die Gesamtimmission deutlich durch die Hotspot-Ver-
sorgung dominiert wird.

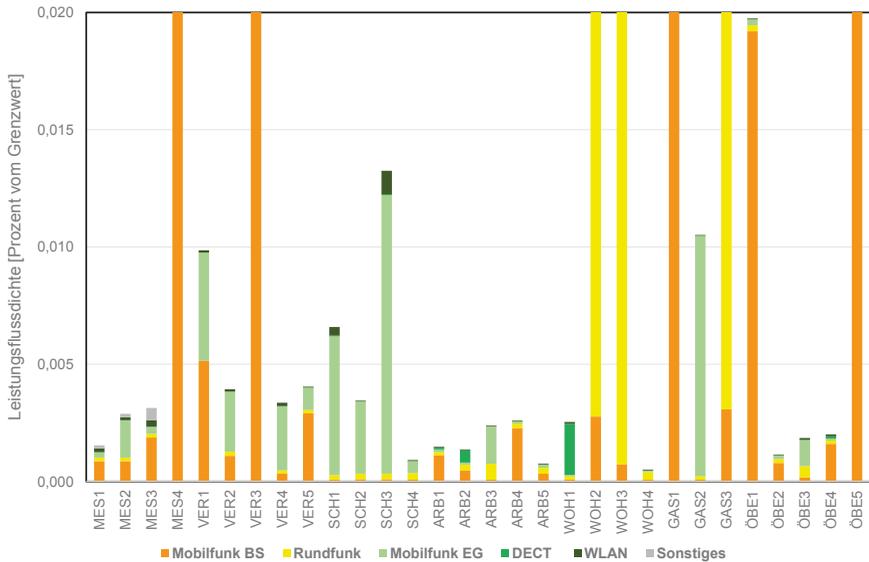


Bild 3.2: Detaildarstellung der festgestellten Immissions-Messwerte an den 30 Messpunkten, Aufteilung des Beitrags der einzelnen Quellen entsprechend Legende



Bild 3.3: Relativer Anteil der einzelnen Quellen zur Gesamtimmission an den Messpunkten GAS1 (links) und GAS2 (rechts)

Aus den Messergebnissen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

Bezüglich *Sendeanlagen* wurden im Mittel (Median) höhere Immissionen durch Mobilfunk-Basisstationen als durch Rundfunkanlagen gemessen. Hinsichtlich der Endgeräte dominiert ebenfalls Mobilfunk. Betrachtet man den Median, dann ist das Immissionsverhältnis

zwischen Sendeanlagen (0,00114 %GW) und Endgeräten (0,00082 %GW) fast ausgeglichen. Betrachtet man hingegen die Anzahl der Messpunkte, dann sind an 17 von 30 Messpunkten die Immissionen durch Sendeanlagen größer als durch Endgeräte; an zwei Messpunkten sind die Immissionsverhältnisse ausgeglichen.

Hinsichtlich Mobilfunk lässt sich am Beispiel der Messpunkte GAS2, ÖBE3, ARB3 und SCH1-3 eindeutig nachvollziehen, dass die Endgeräte-Immission immer dann überwiegt, wenn die Mobilfunkversorgung z.B. durch die Lage des Messpunktes zur nächsten Basisstation oder durch bedampfte Fenster eingeschränkt ist. Umgekehrt regelt das Mobiltelefon seine Sendeleistung dann herunter, wenn die Mobilfunkversorgung z.B. an Hotspots mit Mikrozellenversorgung oder durch Repeater überdurchschnittlich ist. Dies führt dann häufig zu einer deutlich höheren Immission durch Sendeanlagen im Vergleich zu Endgeräten (MES4, VER3, GAS1). Endgeräte können immer dann in der Immissionsgesamtbilanz relevant werden, wenn sie in unmittelbarer Nähe von Personen betrieben werden, wie die Messpunkte MES2, VER1, 2 und 4 zeigen.

Hinsichtlich Rundfunksendeanlagen sind vor allem an den Messpunkten in der Umgebung des Olympiaturms, von dem UKW-, DAB- und DVB-T-Programme abgestrahlt werden, relevante Immissionen gemessen worden. An den betreffenden Messpunkten WOH2, WOH3 und GAS3 sind die Immissionen durch Rundfunksendeanlagen wesentlich größer als durch Mobilfunk-Basisstationen und dominieren die Immissionsgesamtbilanz.

DECT ist nur im Wohn- und Büroumfeld, z.B. WOH1 und ARB2, nennenswert vorhanden. WLAN findet sich an vielen Messpunkten, spielt aber oftmals nur eine untergeordnete Rolle. Eine Ausnahme hiervon bildet der Messpunkt SCH3 in der Berufsschule. An diesem Messpunkt ist die Gesamtimmission durch Endgeräte von allen untersuchten Messpunkten am höchsten. Das liegt aber nicht daran, dass in einem Schulszenario per se mit großen Endgeräteimmissionen zu rechnen ist, sondern daran, dass auf Anweisung des Rektors die Schüler „definiert“ maximalen Datenverkehr auf ihren Smartphones erzeugt haben. Im Vergleich zur Messung im selben Klassenzimmer „im Normalbetrieb“ wurde durch diesen „provozierten“ Mobiltelefonbetrieb die Immission durch Endgeräte leistungsbezogen mehr als vervierfacht.

Wird die zusätzliche Immission durch das eigene Mobiltelefon (Kopfbetrieb) in die Betrachtung mit einbezogen, ändert sich die Immissionsgesamtbilanz, bestehend aus Sendeanlagen, Endgeräten und dem eigenen Mobiltelefon, deutlich. An allen Messpunkten dominiert dann die Immission durch das eigene Mobiltelefon. Der Maximalwert bleibt aber auch hier mit 8,96 % (Messpunkt GAS1) der leistungsbezogenen Grenzwertausschöpfung deutlich unterhalb der Grenzwerte.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vorgestellten Messungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- An den 30 Messpunkten wurden sowohl zwischen den Szenarien, als auch innerhalb ein und desselben Szenarios sehr unterschiedliche Immissionen gemessen. Der Unterschied zwischen größtem und kleinstem Messwert beträgt etwa 30 dB.

- Auch an Orten mit Zusatzversorgung und intensiver Nutzung (Hotspots) liegt die Gesamtimmission weit unterhalb der Grenzwerte. Ohne Berücksichtigung des eigenen Mobiltelefons beträgt der gemessene Maximalwert 0,458 % der leistungsbezogenen Grenzwertausschöpfung (bzw. 6,77 % bezüglich des Feldstärke-GW). Im Mittel (Median) werden deutlich geringere Werte erreicht (0,0034 % bezüglich des Leistungsflussdichte-GW bzw. 0,58 % bezüglich des Feldstärke-GW).
- Das eigene Mobiltelefon ist die Hauptquelle der persönlichen Immission. Aufgrund der Leistungsregelung sorgt eine gute Mobilfunkversorgung deswegen für eine effektive persönliche Immissionsminimierung.
- Die Endgeräte-Immission überwiegt in der Gesamtbilanz immer dann, wenn die Mobilfunkversorgung schwach ist.
- DECT-Immissionen sind nur im Wohn-/Bürobereich relevant. WLAN-Immissionen wurden an vielen Messpunkten gemessen, spielen aber insgesamt nur eine untergeordnete Rolle

Die gemessenen Immissionswerte und die abgeleiteten Schlussfolgerungen liefern wichtige Informationen über die tatsächlichen Expositionen der Bevölkerung durch hochfrequente elektromagnetische Felder in typischen Alltagsszenarien.

5 Danksagung

Das hier beschriebene Vorhaben wurde vom Informationszentrum Mobilfunk (IZMF) e.V. gefördert.

6 Literaturhinweise

- [1] 26. BImSchV, Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), BGBl. Jg. 2013 Teil I Nr. 50, 21.08.2013.
- [2] P. Frei et al., Personal Radio Frequency Electromagnetic Field Exposure in a Swiss Population Sample, *Epidemiology* 19(2008)6, S. S78 ff.
- [3] ICNIRP Guidelines, Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, vol. 74 no. 4, S. 494-522, (1998).
- [4] M. Vrijheid et al., Determinants of mobile phone output power in a multinational study: implications for exposure assessment, *Occup Environ Med.* 2009 Oct;66(10):664-71. doi: 10.1136/oem.2008.043380.