

Unter der Leistungsregel unter realen Be

Matthias Wuschek

Einführung

Bei der Benutzung von Mobiltelefonen wird der menschliche Kopf elektromagnetischen Feldern ausgesetzt.

Die Hersteller von Mobiltelefonen müssen nachweisen, dass ihre Produkte bezüglich der Hochfrequenzexposition des Nutzers geltende Grenzwerte einhalten.

Zur Beschreibung der Immission im Nahfeld von Mobiltelefonen ist die Spezifische Absorptionsrate (SAR) die geeignete Größe. Die SAR dient als Basisgröße für die Bewertung von Hochfrequenz-Immissionen. Der SAR-Wert eines Mobiltelefons wird mittels eines normierten Messverfahrens gewonnen und gibt den Energieeintrag in das Körpergewebe des Telefonierenden an (Einheit: Watt/Kilogramm). Der relevante Grenzwert für den Teilkörper SAR-Wert bei lokaler Exposition im Kopf-/Rumpfbereich beträgt 2 W/kg, gemittelt über 10 g zusammenhängenden Gewebavolumens. Bei diesem normierten SAR-Messverfahren handelt es sich um eine „worst case“-Betrachtung, da das Mobiltelefon während der Messung definiert auf der höchsten Leistungsstufe sendet. Unter Normalbedingungen regeln Mobiltelefone ihre Sendeleistung in Abhängigkeit der Verbindungsqualität zur Basisstation nach, so dass sie möglichst immer nur mit der für

suchung ung eines GSM-Mobiltelefons triebsbedingungen

die Aufrechterhaltung der Gesprächsverbindung minimal notwendigen Leistung senden.

Für die Beantwortung bestimmter Fragestellungen sind allerdings Informationen über die maximale Exposition des Nutzers nicht ausreichend. Hierzu zählen beispielsweise:

- Epidemiologische Studien, die sich mit möglichen Auswirkungen der Hochfrequenzexposition auf die Gesundheit des Nutzers beschäftigen, benötigen möglichst genaue Daten über die mittlere Exposition beim Telefonieren: Die maximale SAR liefert zu wenig Information.
- Im Rahmen der vorsorglichen Expositionsminimierung sind ebenfalls Informationen über das Regelverhalten von Mobiltelefonen interessant. Denn nur bei genauerer Kenntnis der Faktoren, die einen Einfluss auf die reale Exposition des Nutzers ausüben, können beispielsweise Verhaltensempfehlungen für Telefonnutzer gegeben werden. Insbesondere muss Klarheit herrschen, welche Parameter einen starken Einfluss auf die reale Exposition ausüben und welche eher von untergeordneter Bedeutung sind.

Bisher liegen nur wenige Untersuchungen vor, die sich mit der Frage der tatsächlichen Exposition bei der Benutzung eines Mobiltelefons und deren Einflussfaktoren beschäftigen [WIART 00, ARDO 04]. Bei manchen Untersuchungen resultierten die Ergebnisse nicht aus individuellen Messungen, sondern aus der nachträglichen Auswertung der von den Mobil-



Abb. 1: SAR-Meter ESM 120

funkbetreibern gespeicherten Daten vieler Einzelgespräche [LÖNN 04].

Derzeit läuft im Rahmen des „Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms“ unter dem Titel „Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten“ eine Untersuchung zu diesem Thema. Der Abschluss der Projektes ist für Mitte 2005 vorgesehen. Zwei Zwischenberichte zum Projekt sind bereits verfügbar [GEORG 04-1, GEORG 04-2].

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden an der Fachhochschule Deggendorf im Sommer 2004 umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die bisher ver-

öffentlichten Erkenntnisse zur Leistungsregelung von Mobiltelefonen zu verifizieren bzw. um noch weitergehende Resultate zu gewinnen [WUR 04]. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf anschauliche Ergebnisdarstellungen gelegt. Die folgenden wesentlichen Fragestellungen zur Sendeleistung von Mobiltelefonen wurden im Rahmen des Projektes behandelt:

- Abhängigkeit der Sendeleistung von der Netzstruktur und Versorgungsgüte
- Einfluss des menschlichen Körpers auf die Sendeleistungsregelung
- Reproduzierbarkeit der Messergebnisse
- Unterschiede zwischen mittlerer Sendeleistung bei sich bewegendem Telefonierer und flächenorientierter Auswertung der Telefonsendeleistung,
- Sendeleistungsregelung bei U-Bahnstrecken mit Tunnelversorgung.

Die Messungen wurden größtenteils im Freien vorgenommen. Zusätzlich wurden allerdings auch einige Untersuchungen in U-Bahnzügen sowie Messungen bei Benutzung des Telefons als Beifahrer im Kfz (ohne Außenantenne) durchgeführt. Untersuchungen zum Regelverhalten von Telefonen in geschlossenen Räumen sind für zukünftige Arbeiten vorgesehen. Einige besonders anschauliche Resultate der Arbeit werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Grundsätzliches zur Leistungsregelung von GSM-Mobiltelefonen

Zur Minimierung des Energieverbrauchs bzw. zur Verbesserung der Netzqualität (Interferenzminimierung) wird die Sendeleistung von GSM-Mobiltelefonen während einer Verbindung permanent geregelt. Die Leistung von GSM900-Telefonen kann dabei in 15 Stufen von 2 Watt (33 dBm; Leistungsstufe 5) auf 3,2 Milliwatt (5 dBm; Leistungsstufe 19) reduziert werden. Pro Stufe wird die Leistung dabei um 2 dB verändert. Bei GSM1800 gibt es 16 Stufen im Abstand von 2 dB zwischen 1 Watt (30 dBm; Stufe 0) und 1 Milliwatt (Stufe 15). Der Unterschiedsfaktor zwischen maximaler und minimaler Sendeleistung beträgt also sowohl bei GSM900 als auch bei GSM 1800 etwa 1.000. Gesteuert wird die Sendeleistungsregelung durch die Basisstation. Diese beobachtet permanent den Pe-

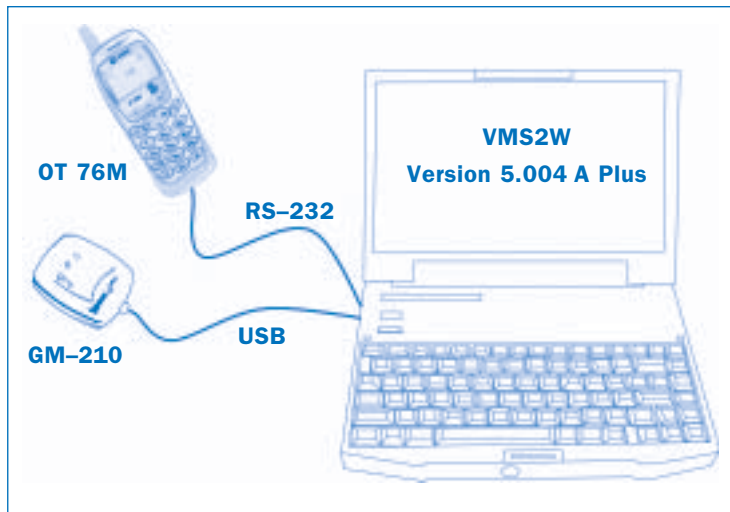


Abb. 2: Aufbau des Messsystems



Abb. 3: Für die dargestellten Strecken in der Innenstadt von Passau wurden die räumliche Verteilung der Sendeleistung sowie deren Mittelwerte bestimmt. Die Pfeile zeigen jeweils die Gehrichtung an.

gel und die Bitfehlerrate des Empfangssignals und fordert das Telefon auf, je nach Veränderung der Verbindungsqualität die Sendeleistung zu erhöhen oder zu verringern. Etwa alle 0,5 Sekunden wird ein derartiges „Power-control“-Kommando an das Telefon gesendet (Die eigentliche Leistungseinstellung erfolgt allerdings deutlich schneller: Das Telefon kann seine Sendeleistung alle 60 ms verändern). Welche Sendeleistungen vom Telefon jeweils gefordert werden, ist in den GSM-Normen nicht zahlenmäßig spezifiziert, die Netzbetreiber haben hier die Freiheit, optimale Regelalgorithmen zu definieren. Im Allgemeinen lässt sich jedoch beobachten, dass bei schlechter Verbindungsqualität das Telefon meist sehr schnell zu deutlichen Leistungssteigerungen aufgefordert wird, damit beispielsweise Verbindungsabbrüche verhindert werden. Typisch ist ein Kommando, das eine Leistungssteigerung von 6 dB anfordert. Leistungsreduktionen hingegen geschehen meist eher langsam. Typisch ist hier eine Erniedrigungsanforderung um eine Stufe, also 2 dB.

Sehr wichtig für die Betrachtung der mittleren Sendeleistung ist die Tatsache, dass ein GSM-Mobiltelefon zu Beginn einer Gesprächsverbindung immer mit maximaler Sendeleistung arbeitet und erst nach einiger Zeit (je nach Verbindungsqualität typisch innerhalb weniger Sekunden bis zu etwa 20 Sekunden) durch die Kommandos der Basisstation seine Leistung auf das ausreichende Maß reduziert hat. Gleiches Verhalten zeigen Mobiltelefone üblicherweise nach einem Zellwechsel (Handover): Auch hier wird zunächst mit maximaler Leistung gesendet, bevor gegebenenfalls eine Leistungsreduktion wirksam wird.

Einen weiteren Mechanismus zur Reduktion der mittleren Sendeleistung stellt der DTX-Mode (diskontinuierliche Übertragung) dar, bei dem in Sprechpausen vom Telefon nicht mehr 217 Sendeimpulse pro Sekunde, sondern eine Mischung aus 8 Hz- und 2 Hz-Pulsfolgen abgestrahlt werden. Diese Betriebsart wird jedoch nicht durch externe Größen, sondern einzig durch das Gesprächsverhalten des Nutzers (Häufigkeit von Sprechpausen) beeinflusst und war daher auch nicht Thema der durchgeführten Untersuchungen.

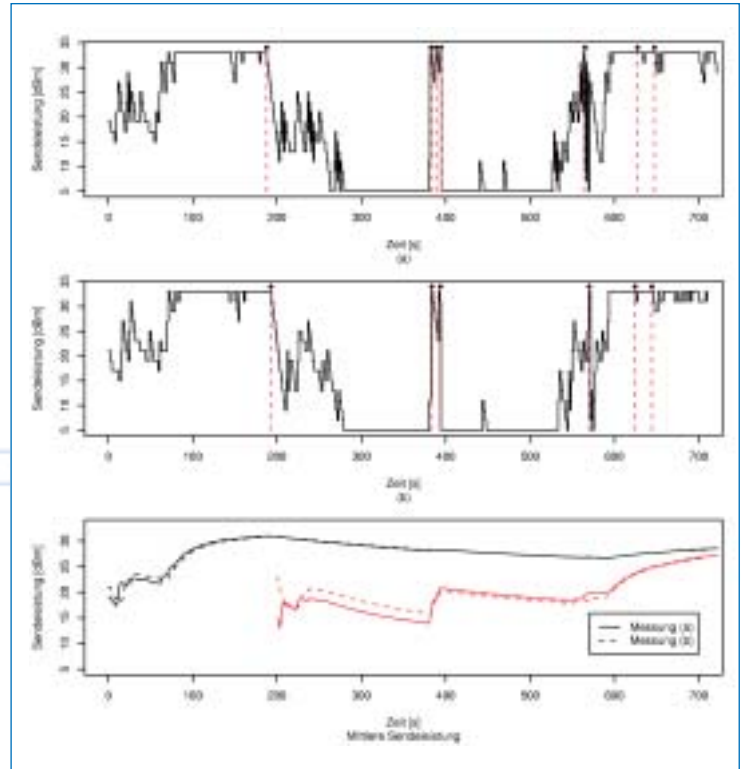


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Sendeleistung des Mobiltelefons entlang Messtrecke 1 in Passau (zweimalige Messung zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit). Handover sind durch die senkrechten roten Linien gekennzeichnet. Die dritte Grafik gibt zwei verschiedene laufende Mittel der Sendeleistung an, die zu unterschiedlichen Zeiten gestartet wurden. Beachte: Die Aufzeichnungen am Startpunkt des Weges beginnen erst einige Sekunden nach dem Aufbau der Gesprächsverbindung, nachdem das Telefon auf die dort ausreichende Sendeleistung heruntergeregelt hat.

Auch UMTS-Telefone werden in ihrer Leistung geregelt und zwar deutlich schneller und auch mit einem wesentlich größeren Dynamikbereich als bei GSM. UMTS-Telefone wurden allerdings im Rahmen des Projektes nicht näher untersucht.

Verfahren zur Bestimmung der Exposition des Telefonnutzers

Als physikalische Größe zur Beschreibung der Exposition bei der Benutzung von Mobiltelefonen verwendet man die im Kopf auftretende spezifische Absorptionsrate (SAR). Diese gibt an, wie viel Leistung pro Gramm Körpergewebe absorbiert und damit in Wärme umgewandelt wird. Zur normgerechten Bestimmung der SAR bei Mobiltelefonnutzung existieren komplizierte Messaufbauten mit Kopfmodellen, die mit gewebesimulierender Flüssigkeit gefüllt sind. Für SAR-Messungen im täglichen Umfeld sind derartige Apparaturen nicht geeignet, da die Messung sehr zeitintensiv ist und die Gerätschaften nicht mit vernünftigem Aufwand mobil eingesetzt werden können.

Seit geraumer Zeit wird jedoch ein vereinfachtes „SAR-Messgerät“ angeboten [MASCH 03], das zwar nicht zur normgerechten SAR-Bestimmung bei der Typprüfung von Mobiltelefonen geeignet ist, jedoch für qualitative Untersuchungen durchaus effektiv eingesetzt werden kann. Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, ist dieser „SAR-Messkopf“ zumindest für Messungen in Innenräumen oder mobile Messungen in Kraftfahrzeugen (Montage auf dem Beifahrersitz) geeignet. Untersuchungen zu Fuß über längere Strecken sind mit diesem System allerdings auch noch recht mühsam.

Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde daher kein System zur direkten Messung der SAR verwendet. Stattdessen wurden die Untersuchungen mit einem modifizierten Mobiltelefon (Sagem OT 76M) durchgeführt, bei dem wichtige Signalisierungsdaten der Luftschnittstelle (unter anderem die aktuelle Sendeleistungsstufe) über eine Schnittstelle an einen Laptop übertragen werden (Abbildung 2). Zusätzlich wird mit einem GPS-Empfänger die aktuelle Position bestimmt und den Daten des Mobiltelefons zugeordnet. Mit diesem portablen Messsystem ist es also nicht möglich, die aktuell auftretende SAR zu bestimm-

men, sondern nur die momentane Sendeleistung, die allerdings direkt proportional zur SAR ist, so dass durch Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs der Sendeleistung des Telefons auch die zeitliche Veränderung der SAR bestimmt wird. Somit können mit diesem Messverfahren keine absoluten SAR-Werte, sondern nur relative Größen angegeben werden. Zudem beziehen sich die gefundenen Ergebnisse nur auf das verwendete Telefon. Ein Vergleich verschiedener Telefone konnte nicht durchgeführt werden. Die großen Vorteile dieses Messaufbaus sind dafür die einfache Handhabung (Messungen zu Fuß sind recht unproblematisch möglich, der Laptop kann beispielsweise in einem Rucksack transportiert werden), außerdem können zusätzlich zur aktuellen Sendeleistungsstufe noch weitere Parameter der Luftschnittstelle protokolliert werden (Empfangspegel, Bitfehlerrate, ID der zugeordneten Basisstation etc.), so dass weitergehende Auswertungen ermöglicht werden.

Mit dem oben vorgestellten Messsystem wurden umfangreiche Messungen in einem GSM900-Netz in unterschiedlichen Umgebungen durchgeführt. Einige Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Messungen in der Innenstadt von Passau

Sehr umfangreiche Untersuchungen wurden in der Innenstadt von Passau durchgeführt. Der Passauer Stadtkern ist gekennzeichnet durch relativ dichte Bebauung mit teilweise recht engen Straßenzügen und Gassen, so dass hier von einer verhältnismäßig schwierig zu versorgenden Topographie gesprochen werden kann. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der einzelnen Messgänge.

Um Aussagen zur Reproduzierbarkeit treffen zu können, wurde die Messstrecke 1 (Gesprächsdauer etwa 12 Minuten) zwei mal abgegangen. Die Ergebnisse der beiden Messungen sind in Abbildung 4 vergleichend gegenübergestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Messung (mittlere Sendeleistung 0,71 bzw. 0,68 Watt). Im Zeitverlauf findet man sowohl Bereiche mit maximaler als auch Teilstrecken mit minimaler Sendeleistung. Schön zu sehen ist auch, dass



nach einem Handovers zunächst immer mit maximaler Leistung gesendet wird, bevor die Leistungsregelung eingreift. In Abbildung 5 ist die momentane Sendeleistung des Telefons in einer Landkarte farblich dargestellt. Gut zu sehen ist der kleinräumige Bereich mit maximaler Sendeleistung während des Handovers nach etwa dem halben Weg. (Hierbei wird das Gespräch nur von einer Sektorantenne des in unmittelbarer Nähe befindlichen Senderstandortes auf eine andere Antenne des gleichen Standortes übergeben.)

Prinzipiell gibt es zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Angabe von mittlerer Exposition:

- Nahe liegend ist die Berechnung der mittleren Sendeleistung aus den Messergebnissen. Diese Größe ist repräsentativ für die durchschnittliche Exposition eines Telefonierers, der sich während des Telefonats entlang der betrachteten Strecke bewegt (beispielsweise ein Fußgänger). Der sich ergebende mittlere Leistungswert ist allerdings stark abhängig von der Gesprächsdauer, der Zahl der Handover und der gewählten Wegstrecke.
- In der Realität werden allerdings Handygespräche nicht nur von sich bewegenden Teilnehmern ge-

führt, mindestens genau so häufig sind Telefonate von Personen, die sich nicht nennenswert bewegen, also während des Telefonats an einem Punkt stehen (z.B. Bushaltestelle) oder sitzen (z.B. Cafe). In solchen Fällen sind mittlere Sendeleistungen, die aus derartigen Messgängen gewonnen wurden, wenig aussagekräftig. Informativer ist hier die kartografische Darstellung der Sendeleistung, so wie es in Abbildung 6 für den Innenstadtbereich von Passau geschehen ist. Nahe liegend ist es dann, die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Sendeleistung durch Perzentilwerte darzustellen. Der Median gibt beispielsweise an, welche Sendeleistung an 50 Prozent der untersuchten Punkte unterschritten wird.

Wertet man die gesamten Messungen im Innenstadtbereich von Passau bezüglich mittlerer Leistung und Median aus, ergibt sich folgendes Bild (s. Tabelle 1). Die Betrachtung von Tabelle 1 liefert folgende Erkenntnisse:

- Sowohl Median als auch mittlere Sendeleistung sind stark abhängig von der gewählten Messstrecke. Durch die enge Bebauung ergeben sich hier

Messung Nr.	1a	1b	1c	2	3	4	5	6	Total
Mittlere Leistung [Watt]	0,71	0,68	0,51	0,34	0,13	0,77	1,82	0,18	0,75
Median [Watt]	0,08	0,08	0,02	0,05	0,03	0,5	2	0,03	0,13

Tab. 1: Ergebnisse der Untersuchungen im Innenstadtbereich von Passau (mittlere Sendeleistungen und Median) auf den verschiedenen Teilstrecken. Bei allen Messungen wurde das Telefon am rechten Ohr gehalten. Eine Ausnahme bildet Messung 1c: Hier befand sich das Telefon in der Brusttasche.

Wegstrecke Nr.	Mittlere Entfernung zum Senderstandort	Mittlere Sendeleistung (Telefon dem Sender zugewandt)	Mittlere Sendeleistung (Kopf zwischen Telefon und Sender)
1	482 Meter	6,7 dBm	11,3 dBm
2	951 Meter	14,3 dBm	10,6 dBm
3	1.594 Meter	25 dBm	15,2 dBm
4	1.802 Meter	29,7 dBm	13,4 dBm

Tab. 3: Mittlere Sendeleistungen in Abhängigkeit von der Position des Telefons bezüglich der Sendeanlage (Mittelwerte aus allen durchgeführten Messungen)



Abb. 5: Örtliche Sendeleistungsverteilung auf der Messstrecke 1 in Passau (Messung 1a)



Abb. 6: Örtliche Sendeleistungsverteilung im Innenstadtbereich von Passau

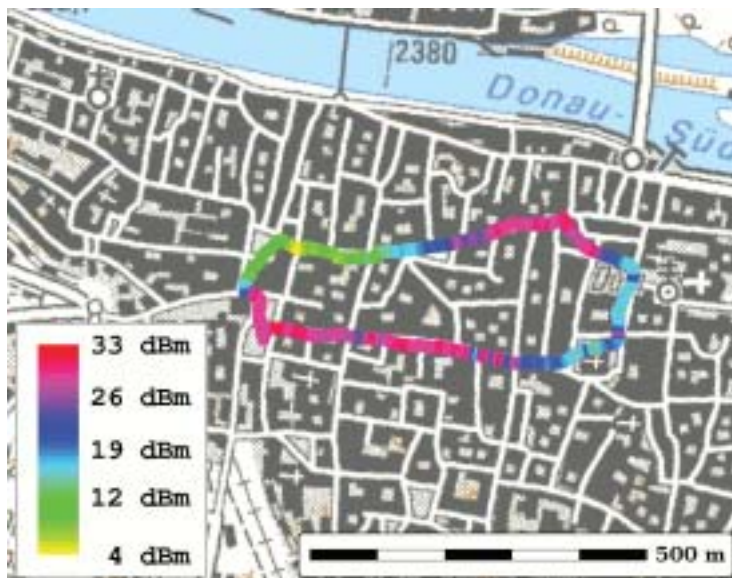


Abb. 7: Örtliche Sendeleistungsverteilung im Innenstadtbereich von Regensburg (links: konventionelles Netz mit Dachstandorten; rechts Mikrozellennetz)

nur in unmittelbarer Umgebung der Senderstandorte (etwa 100 Meter Umkreis) Bereiche mit stark verringerter Sendeleistung. Bereits nach Passieren einer Gebäudeecke ist die direkte Sicht zum Anlagenstandort nicht mehr vorhanden, das Telefon erhöht seine Leistung deutlich.

- Die mittlere Sendeleistung (0,75 Watt) liegt nur etwa um den Faktor 2,5 (etwa 4 dB) unter dem Maximalwert von 2 Watt, eine extreme Leistungsreduktion bei Telefonaten von sich bewegenden Personen ist also aufgrund der engen Bebauung und der relativ häufigen Handover nicht zu beobachten.
- Die flächenbezogene Auswertung liefert einen Medianwert, der deutlich unter der mittleren Sendeleistung liegt (etwa 7,5 dB tiefer). An fünfzig Prozent der untersuchten Punkte in der Innenstadt von Passau beträgt die Sendeleistung weniger als 0,13 Watt. Das ist etwa 12 dB weniger als die maximale Sendeleistung.
- Sowohl die Auswertung der mittleren Sendeleistung als auch die flächenhafte Betrachtung ergeben, dass die minimal mögliche Sendeleistung im Zentrum von Passau im Mittel bei weitem nicht erreicht wird.

Mittlere Immissionen in einem Stadtzentrum mit Mikrozellen

Zur Kapazitätssteigerung werden in Innenstadtbereichen, in denen wegen einer hohen Dichte an Geschäften, Cafes, öffentlichen Plätzen und Bushaltestellen besonders viele Telefonate anfallen, gelegentlich Netze aus vielen eng benachbarten, niedrig montierten Mikrozellenantennen (z.B. an Gebäudefassaden oder Litfaßsäulen) zur Unterstützung der zusätzlich vorhandenen Dachstandorte aufgebaut. In der historischen Altstadt von Regensburg ist ein derartiges Mikrozellennetz von einem GSM900 Betreiber realisiert worden. Der zweite deutsche GSM900 Betreiber hat in der Innenstadt von Regensburg ein konventionelles Netz mit Dachstandorten aufgebaut. Zum Vergleich wurden die mittleren Sendeleistungen für beide Netzstrukturen entlang einer Rundstrecke in der Altstadt von Regensburg gemessen. Die Ergeb-

nisse sind in Abbildung 7 sowie in Tabelle 2 vergleichend gegenübergestellt.

Das Mikrozellennetz liefert entlang der Wegstrecke offensichtlich eine deutlich günstigere Versorgungsqualität, so dass im Mittel das Telefon mit geringerer Sendeleistung auskommt als bei der herkömmlichen Netzstruktur. Betrachtet man den Median der Messung, so ergibt sich sogar, dass an mehr als 50 Prozent der Messpunkte das Telefon auf seiner niedrigsten Leistungsstufe arbeitet.

Das hier gefundene Ergebnis muss jedoch relativiert werden: Zum einen wurde eine Wegstrecke gewählt, die optimal auf die Position der einzelnen Mikrozellenstandorte ausgelegt war, so dass das Messergebnis quasi den „Optimalzustand“ widerspiegelt. In weiteren Messungen in Regensburg wurden auch Wege gewählt, die sich nicht an der örtlichen Lage der Mikrozellenantennen orientieren. Dann konnte man feststellen, dass aufgrund der geringen Reichweite der Mikrozellenstandorte sehr schnell die gleichen mittleren Ergebnisse erzielt werden, wie sie sich bei den Dachstandorten ergeben.

Außerdem muss darauf hingewiesen werden, dass das Mikrozellennetz in Regensburg eine ungemein kostenintensive Alternative darstellt (6 Mikrozellenstandorte plus ein Dachstandort auf einer Fläche von etwa 600 x 200 Meter im Vergleich zu drei Dachstandorten beim „konventionellen“ Netz), so dass diese Netzstruktur wohl kaum wirtschaftlich auf größeren Flächen aufgebaut werden kann.

Netzstruktur	Mittlere Leistung [Watt]	Median [Watt]
Dachstandorte	0,44	0,2
Mikrozellen	0,14	0,003
Unterschiedsfaktor	3,1	66,7
Unterschiedsfaktor in dB	5,0	18,2

Tab. 2: Ergebnisse der Untersuchungen im Innenstadtbereich von Regensburg (mittlere Sendeleistung und Median).

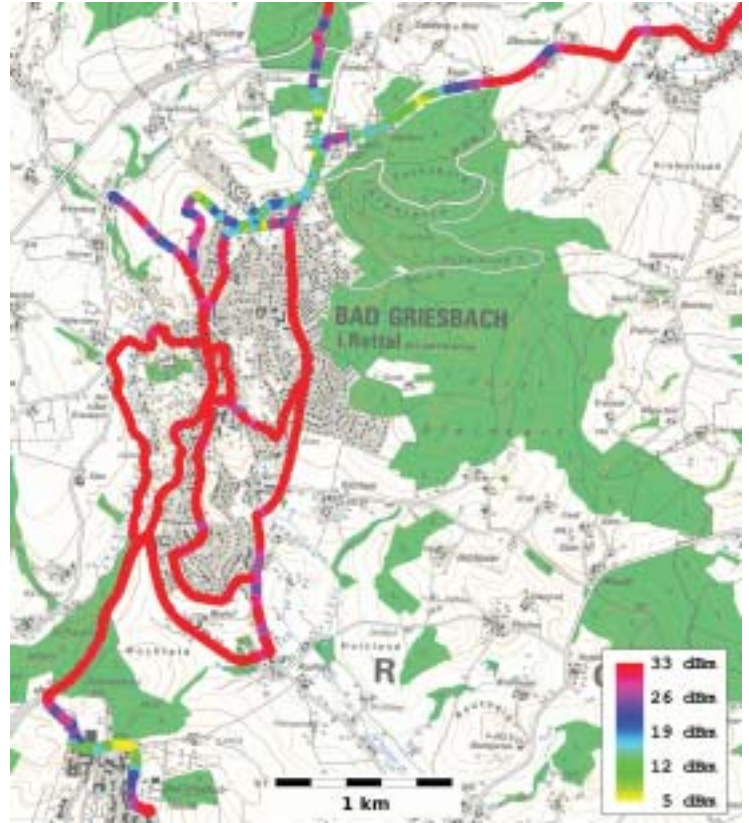


Abb. 8: Örtliche Sendeleistungsverteilung in Bad Griesbach

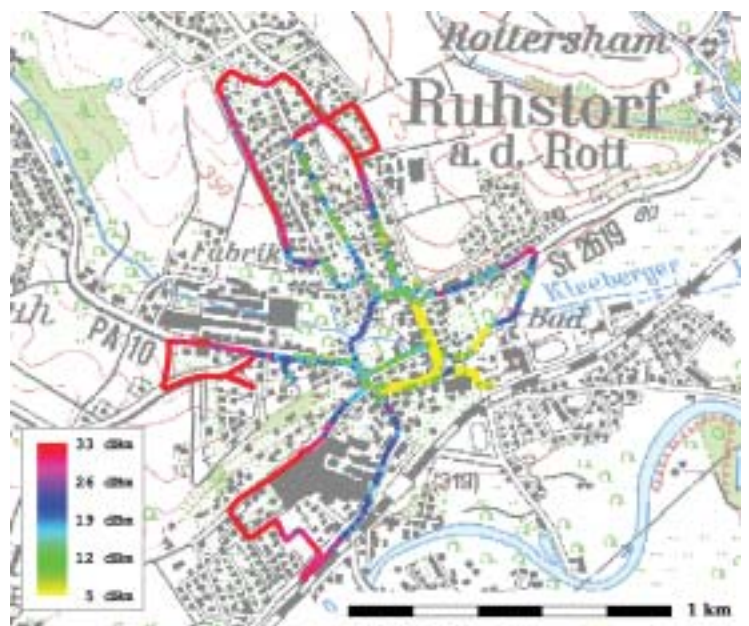


Abb. 9: Örtliche Sendeleistungsverteilung in Ruhstorf

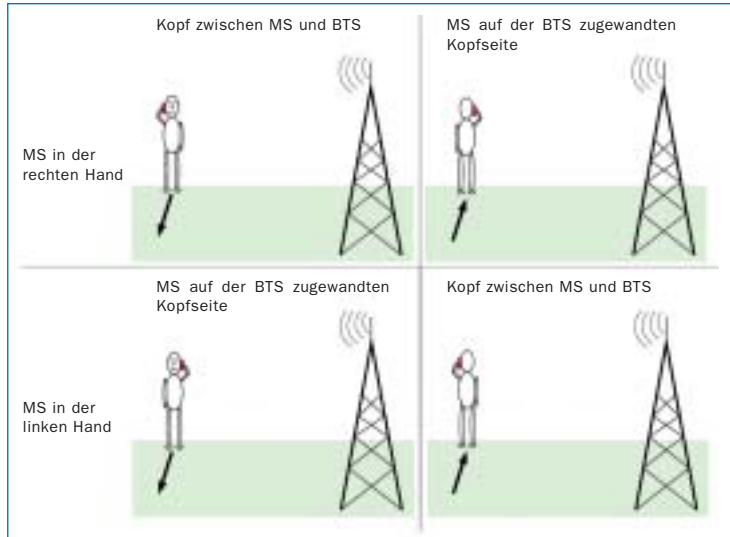


Abb. 10: Einfache Untersuchungen zum Benutzereinfluss

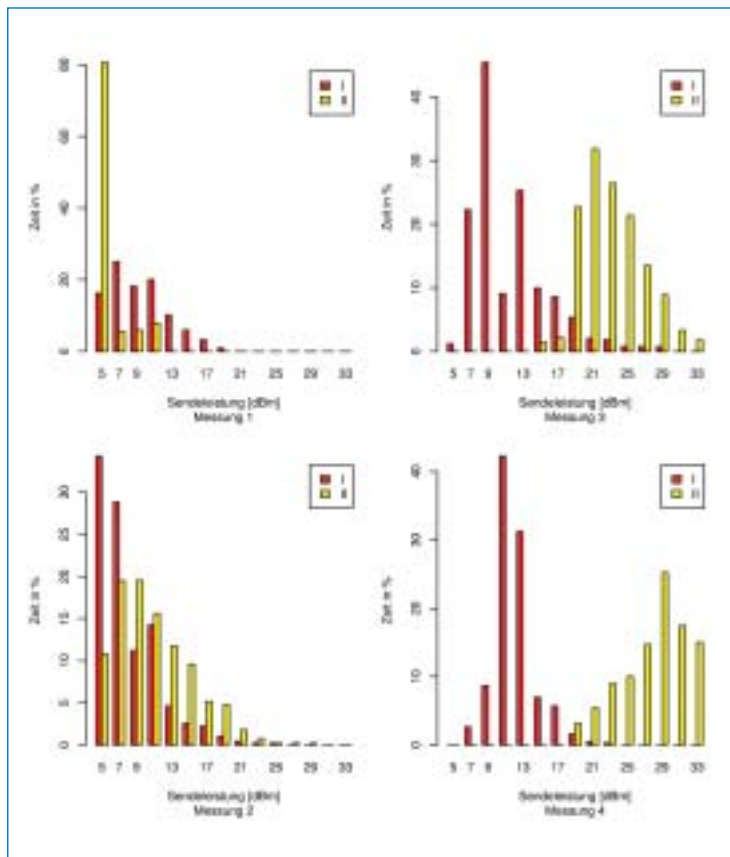


Abb. 11 Histogramme der Messungen mit dem Telefon an der rechten Kopfseite (Rot: Telefon dem Sender zugewandt; Gelb: Kopf zwischen Telefon und Sender).

Einfluss unterschiedlicher Positionierung der Sendeanlage auf die mittlere Sendeleistung

Im Rahmen von Messungen in kleineren Ortschaften sollte unter anderem der Einfluss der Standortwahl für Mobilfunksendeanlagen auf die Exposition des Telefonnutzers untersucht werden. Beispielhaft sind in Abbildung 8 und 9 die Ergebnisse aus Messungen in zwei niederbayerischen Gemeinden (Bad Griesbach und Ruhstorf) wiedergegeben.

Die Versorgung einer Ortschaft nur durch Standorte außerhalb des Ortes, wie es in Bad Griesbach der Fall ist, führt dazu, dass im überwiegenden Teil des Ortes die Telefone mit maximaler Leistung senden müssen, da die Versorgungsgüte zwar ausreichend für das Aufrechterhalten einer Gesprächsverbindung ist, jedoch keine nennenswerte Reduktion der Sendeleistung zulässt. Noch deutlicher ausgeprägt dürfte dieser Effekt innerhalb der Gebäude sein, im Rahmen dieser Untersuchungen wurden allerdings nur Messungen im Freien durchgeführt.

Günstiger für die Exposition des Telefonnutzers ist offensichtlich eine Standortwahl mehr im Zentrum einer Ortschaft, wie es in Ruhstorf der Fall ist. Man sieht hier, dass zumindest im Kernbereich des Ortes die Telefone ihre Sendeleistung erheblich verringern können.

Einfluss des Benutzers auf die Sendeleistungsregelung

Neben Untersuchungen zur Netzstruktur wurde auch der Einfluss des Benutzers auf die Sendeleistungsregelung untersucht. Hierzu wurden beispielsweise unterschiedliche Messstrecken, die sich in verschiedenen Abständen zu einem Mobilfunkstandort befanden, in beiden Richtungen mehrmals begangen, so dass das Telefon sowohl auf der zur Anlage zugewandten Seite als auch auf der abgewandten Seite des Kopfes gehalten wurde (Abbildung 10). Die Messungen wurden in einer flachen, ländlichen Region mit direkter Sicht zum Senderstandort durchgeführt, so dass die Einflüsse von Reflexionen möglichst gering sind. Der Senderstandort war mit einer Rundstrahlantenne ausgestattet, so dass keine Handover



auftraten. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 11 und in Tabelle 3 dargestellt.

Folgende Erkenntnisse können aus den Ergebnissen gewonnen werden:

- Bei Positionierung des Telefons auf der dem Sender zugewandten Seite des Kopfes ergibt sich erwartungsgemäß eine Zunahme der mittleren Sendeleistung mit größer werdendem Abstand zur Station. Bei Haltung des Telefons auf der dem Sender abgewandten Seite des Kopfes ist dieser Trend nicht so deutlich ausgeprägt.
- Außer bei Wegstrecke 1 kann man den aufgrund der Abschattungswirkung des Kopfes zu erwartenden Einfluss auf die Sendeleistung gut beobachten, der sich außerdem mit zunehmendem Abstand stärker ausprägt: Das Telefon benötigt deutlich weniger Sendeleistung, wenn es auf der Seite des Kopfes gehalten wird, die zur Anlage hin zeigt.
- Dass dieser Effekt bei Messstrecke 1 nicht auftritt, lässt sich begründen. Man befindet sich hier sehr nahe an der Station, so dass das Telefon im Mittel fast immer mit der niedrigsten Sendeleistungsstufe arbeitet. Dies ist auch auf der abgewandten Seite des Kopfes noch der Fall, da hier offensichtlich die Körperabschirmung durch ausreichend starke reflektierte Signale kompensiert wird.

Vergleich von Median und mittlerer Sendeleistung bei allen durchgeführten Messungen

Neben den in diesem Beitrag vorgestellten Messungen wurde noch eine Vielzahl weiterer Messgänge bzw. Messfahrten in unterschiedlichsten Umgebungen durchgeführt. Die sich bei allen Untersuchungen ergebenden mittleren Sendeleistungen sowie die Perzentilwerte bei flächenbezogener Betrachtung sind in den Abbildungen 12 und 13 wiedergegeben. Folgende Ergebnisse können hierbei festgehalten werden:

- Messungen zu Fuß in Städten und kleineren Gemeinden ergaben mittlere Sendeleistungen von etwa 0,4 bis 0,8 Watt. Der Medianwert bewegte sich in der Größenordnung von 0,1 bis 0,2 Watt.

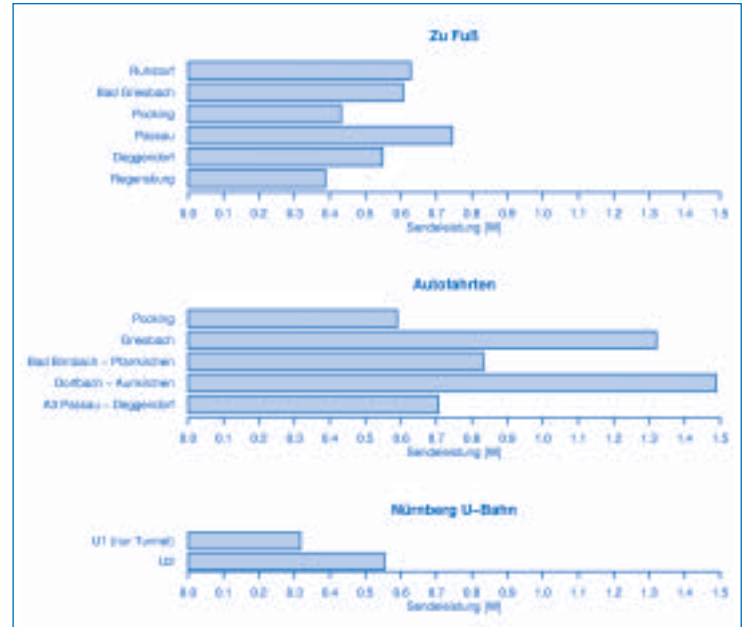
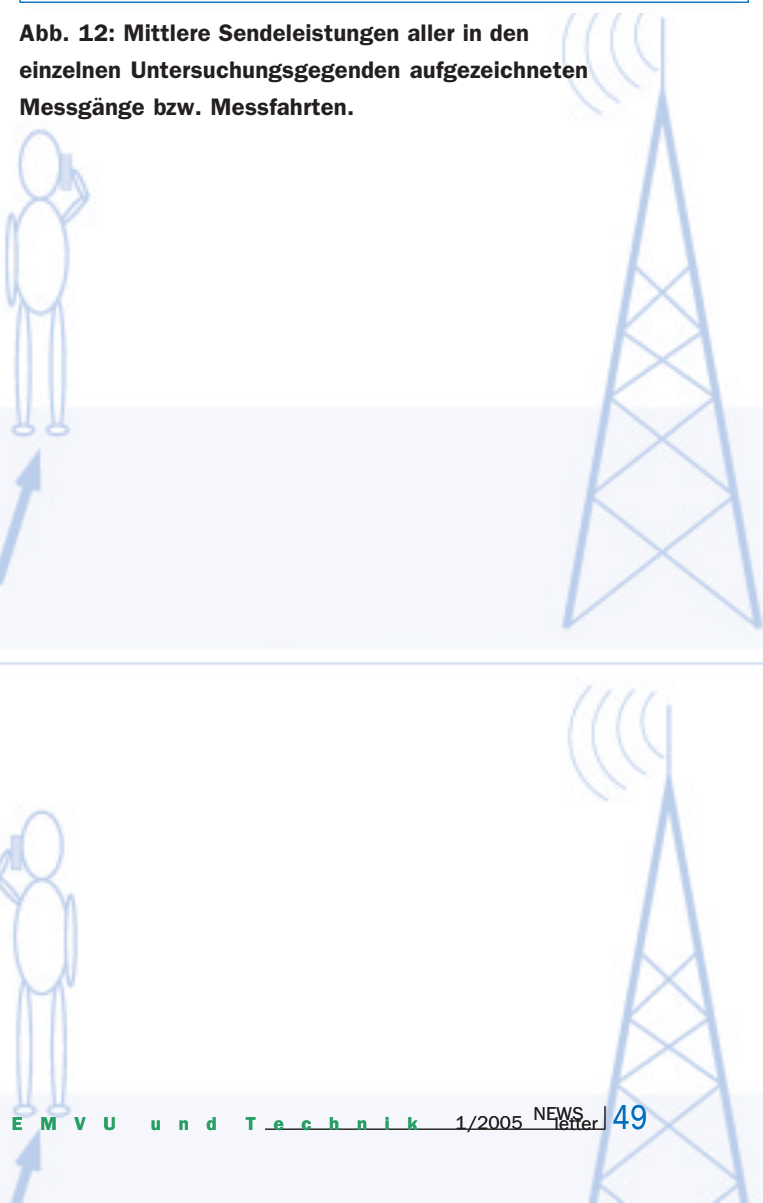


Abb. 12: Mittlere Sendeleistungen aller in den einzelnen Untersuchungsgebieten aufgezeichneten Messgänge bzw. Messfahrten.



Nur der „Extremfall“ Mikrozellenversorgung in der Innenstadt von Regensburg brachte im Vergleich zu den restlichen Messgängen deutlich reduzierte Leistungswerte.

- Unterschiedliche mittlere Sendeleistungen bzw. Medianwerte ergeben sich bei Messungen auf Landstraßen und Autobahnen, abhängig von der Versorgungsqualität. Die Messergebnisse in Bad Griesbach wurden bereits diskutiert, sie sind auf die großen mittleren Abstände zu den Sendestationen zurückzuführen.
- Interessant sind die Messergebnisse im Bereich der Nürnberger U-Bahn. Diese besitzt eine Tunnelversorgung, die allerdings nicht durch im Tunnel montierte abstrahlende Kabel (Schlitzkabel) sondern durch Richtantennen, die im Tunnel in der Nähe der Stationen montiert sind und die jeweils von beiden Seiten in die Tunnelstrecke hineinstrahlen. Für die Versorgung der Stationen reicht in den meisten Fällen die Abstrahlung der Rückkeule der Antennen aus. Die Messungen (mehrere Fahrten in den einzelnen Tunnelstrecken) zeigten, dass mit einer derartigen Tunnelversorgung eine sehr gute Verbindungsqualität erzielt werden kann, so dass dort im Vergleich zu den anderen Messungen mit die günstigsten mittleren Leistungswerte des Telefons gefunden werden konnten.

Zusammenfassung

Mittels eines speziell konfigurierten GSM900-Mobiltelefons wurde die Leistungsregelung in einem GSM-Mobilfunknetz untersucht. Die mittlere Sendeleistung des Telefons kann als Maß für die Exposition des Telefonnutzers herangezogen werden. Die Messungen wurden im Freien zu Fuß oder mit dem Kfz durchgeführt. Es konnte dabei festgestellt werden, dass die mittlere Leistung bei Personen, die sich während eines Telefongesprächs zu Fuß oder mit dem Kfz bewegen, bei weitem nicht den theoretischen Minimalwert des Telefons erreicht, sondern aufgrund ungünstiger Verbindungsqualität und häufiger Handover mit mittleren Leistungen von mehreren hundert Milliwatt bis teilweise sogar mehr als einem Watt gerechnet werden muss.

Eine flächenbezogene Auswertung zeigt aber auch, dass sich in Bereichen mit günstiger Versorgung bei Telefongesprächen eines ortsfesten oder sich nur wenig bewegenden Teilnehmers durchaus Sendeleistungen im Minimalbereich des Telefons einstellen können.

Die Standortwahl und die Standortdichte der Mobilfunksendeanlagen kann einen erheblichen Einfluss auf die mittlere Sendeleistung des Telefons ausüben.

Selbst mit einfachen Messreihen kann ein deutlicher Einfluss des Nutzers auf die mittlere Sendeleistung beim Telefonieren festgestellt werden.

Tunnelversorgungen für U- und S-Bahnen können offensichtlich so gestaltet werden, dass sie nicht nur eine unterbrechungsfreie Verbindung während der Fahrt gewährleisten, sondern auch eine verhältnismäßig große Reduktion der Sendeleistung beim Telefonieren bewirken können.

Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek, Fachhochschule Deggendorf

Literaturverzeichnis

- [ARDO 04] L. Ardoino, E. Barbieri, P. Vecchia „Determinants of Exposure to Electromagnetic Fields From Mobile Phones“, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 111 (4), S. 403-406, (2004)
- [GEORG 04-1] R. Georg „Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten: Literaturstudie“, BfS-Forschungsprojekt M8810, (03/2004), www.deutsches-mobilfunk-forschungsprogramm.de
- [GEORG 04-2] R. Georg „Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten: Vorstellung der Mess- und Berechnungsverfahren“, BfS-Forschungsprojekt M8810 (08/2004), www.deutsches-mobilfunk-forschungsprogramm.de
- [LÖNN 04] S. Lönn, U. Forssen, P. Vecchia, A. Ahlbom, M. Feychting „Output Power Levels from Mobile Phones in Different Geographical Areas; Implications for Exposure Assessment“, Occup. Environ. Med., Vol. 61 (9), S. 769-772, (2004)
- [MASCH 03] Firma Maschek Elektronik Datenblatt SAR Meter ESM 120
- Kaufering, (2003) www.maschek.de
- [WIART 00] J. Wiart, C. Dale, A. Bosisio, A. Cornec „Analysis of the Influence of the Power Control and Discontinuous Transmission on RF Exposure with GSM Mobile Phones“, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 42, S. 376-385, (11/2000)
- [WUR 04] T. Wurstbauer „Untersuchung der Leistungsregelung eines GSM-Mobiltelefons unter realen Betriebsbedingungen“, Diplomarbeit, Fachhochschule Deggendorf, Fachbereich Elektrotechnik und Medientechnik, (2004).