

Vergleich der re durch GSM- und UMTS-

Joachim Baumann,
Friedrich M. Landstorfer

Der technische Fortschritt eröffnete der mobilen Kommunikation eine beispiellose Entwicklung. Konnten vor einem halben Jahrhundert nur wenige Personen über ein teures, unkomfortables und fest eingebautes Autotelefon verfügen, avancierte das Mobiltelefon im Fahrwasser der technischen Evolution zu einem erschwinglichen Massenprodukt im Taschenformat, dessen Funktionalität inzwischen weit über die reine Sprachkommunikation hinausreicht. Dennoch blieb seit den Anfängen des öffentlichen Mobilfunks ein Bestandteil unverändert: die Gesprächsübertragung mittels elektromagnetischer Wellen.



Dieser augenscheinlich konstante Faktor schlägt sich beispielsweise darin nieder, dass etliche Risikostudien zur Handynutzung allenfalls die Expositionsdauer erfassen und das Mobiltelefon als Strahlenquelle undifferenziert betrachten. Eine solch vereinfachte Vorgehensweise ist jedoch insbesondere unter realen Bedingungen unangemessen, wie dieser Artikel, der im Rahmen einer Studie des Bundesamtes für Strahlenschutz entstand, anhand eines Vergleichs der aufeinanderfolgenden Mobilfunkgenerationen GSM (Global System for Mobile Communications, Telekommunikationssystem der 2. Generation) und UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, Telekommunikationssystem der 3. Generation) sehr deutlich aufzeigt.

SAR zur Erfassung der Strahlenexposition

Einleitend gilt es zu klären, wie die Strahlenexposition erfasst werden kann. Als Maß für die Leistung, die von einem Körper aufgenommen wird, hat sich in der *elektromagnetischen Verträglichkeit zur Umwelt* (EMVU) die *spezifische Absorptionsrate* (SAR) etabliert.

Auf der Grundlage von Forschungsergebnissen empfiehlt die *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) zum Schutz vor möglichen Gesundheitsgefährdungen eine Begrenzung der SAR: Gemittelt über einen Zeitraum von sechs Minuten und über einen würfelförmigen Teilkörper mit einer Masse von 10 Gramm sollte im Kopf- oder Rumpfbereich ein Wert von 2 W/kg nicht überschritten werden [1].

Um zu gewährleisten, dass Mobiltelefone, die sich bei der Nutzung in der Regel sehr nahe am Kopf befinden, diesen Wert nicht überschreiten, werden sie vor ihrer Markteinführung vermessen und der sogenannte *SAR-Wert* wird z.B. im Bedienhandbuch dokumentiert. Beim SAR-Wert handelt es sich um diejenige SAR, die unter worst-case-Bedingungen (d.h. bei maximaler Sendeleistung auf einer der möglichen Sendefrequenzen) für einen Teilkörperbereich festge-



alen Exposition Mobiltelefone in der Praxis

stellt werden kann. Die messtechnische Bestimmung des SAR-Wertes dient daher primär einer Überprüfung, ob der Grenzwert von 2 W/kg überschritten werden kann.

SAR-Wert zum Vergleich von GSM und UMTS?

Nach einer umfangreichen Erhebung des Bundesamts für Strahlenschutz unterschreiten alle derzeit erhältlichen Geräte den Grenzwert von 2 W/kg, wobei der Median der getesteten Geräte bei etwa 0,75 W/kg liegt [2]. Obwohl in dieser Liste neben reinen GSM- auch UMTS-Geräte zu finden sind, fallen letztere nicht durch eine andere Verteilung der SAR-Werte auf, d.h. es gibt sowohl UMTS-Geräte mit SAR-Werten ober- und unterhalb dieses Medianwertes. Dieser Umstand ist zunächst dadurch plausibel zu erklären, dass sämtliche UMTS-Geräte auch GSM-kompatibel sind. Wäre die Strahlenbelastung, quantifiziert durch die spezifische Absorptionsrate, bei UMTS geringer, ergäbe sich der SAR-Wert dann für die GSM-Nutzung, da stets der worst-case betrachtet werden muss. Grundsätzlich wäre daher eine differenzierte Angabe des SAR-Wertes nach einzelnen Frequenzbändern (GSM-900, GSM-1800 und UMTS) wünschenswert, weil in der Praxis – je nach Ort und Netzbetreiber – oftmals nicht alle unterstützten Bänder auch tatsächlich genutzt werden können.

Doch selbst wenn man den SAR-Wert für alle drei Frequenzbänder getrennt angeben würde, ergäbe sich für das UMTS-Band ein nahezu identischer Wert. Für eine Erklärung dieses Umstandes ist vorwegzuschicken, dass der SAR-Wert unmittelbar proportional zur (mittleren) abgestrahlten Leistung ist. Im GSM-Modus bei 900 MHz sendet das Mobiltelefon mit 2 Watt, woraus unter Berücksichtigung des zeitlichen Mehrfachzugriffs eine mittlere Leistung von etwa 0,24 W resultiert. Dies entspricht in etwa der maximalen Sendeleistung der derzeit vertriebenen Geräte im UMTS-Frequenzband. Nimmt man stark vereinfachend an,

dass die Antenne für beide Bänder jeweils diese Leistung abstrahlt und die Feldenergie bei 900 MHz (GSM) und 1950 MHz (UMTS) vom Nutzer gleichstark absorbiert wird, resultieren daraus identische SAR-Werte für GSM und UMTS. In der Realität absorbieren die oberflächennahen Körperschichten eines Menschen bei UMTS-Frequenzen jedoch sogar einen höheren Anteil, so dass ein getrennt aufgelisteter SAR-Wert in diesem Fall suggerieren würde, dass die Strahlenbelastung bei UMTS höher wäre.

Praxisrelevanter Vergleich

Der SAR-Wert ergäbe sich auch bei einer Unterscheidung zwischen GSM und UMTS immer nur bei Verwendung der maximalen Sendeleistung. Zum Nachweis, ob der vorgeschriebene Grenzwert von 2 W/kg überschritten wird, ist diese Vorgehensweise durchaus zweckdienlich. Weil die Sendeleistung in beiden Mobilfunkstandards jedoch geregelt wird, muss kritisch hinterfragt werden, wie häufig dieser worst-case auftritt und welche Relevanz der SAR-Wert damit für die Praxis besitzt.

Diese Frage kann für ein reales und dynamisches Umfeld nur durch ein speziell zu diesem Zweck konzipiertes und umfangreiches Messsystem beantwortet werden. Dieses kann sowohl die auftretende (zeitabhängige) SAR mit einem Körperphantom [3] direkt erfassen als auch alternativ die verwendete Sendeleistung aus den Mobiltelefonen auslesen und daraus die Strahlenbelastung berechnen. Durch speziell entwickelte Algorithmen kann dann ein Zusammenhang zwischen der gemessenen Exposition und isolierten Kenngrößen gefunden werden. An dieser Stelle sei bemerkt, dass im Nachfolgenden unter SAR stets die momentane tatsächliche Exposition eines Teilkörperbereichs verstanden wird, die daher im Allgemeinen nicht mit dem SAR-Wert übereinstimmt, welcher den worst-case betrachtet.

Nutzen der Leistungsregelung

Obwohl eine verringerte Strahlenbelastung direkt aus einer reduzierbaren Sendeleistung resultiert, ist die Expositionsminimierung nicht das primäre Ziel der Leistungsregelung. Auch die Hersteller von Mobiltelefonen profitieren nur indirekt, indem eine verringerte Sendeleistung unmittelbar zu einer längeren Akkulaufzeit führt. Dass darin nicht die Hauptaufgabe der Leistungsregelung liegt, zeigt sich daran, dass nicht das Mobiltelefon selbst seine Leistung einstellt, sondern das Mobilfunknetz entsprechende Anweisungen erteilt. Eine angepasste Sendeleistung der Endgeräte trägt nämlich maßgeblich zur Stabilität des gesamten Mobilfunknetzes bei.

Die ersten beiden Mobilfunknetze (analoge Netze), das A- und B-Netz, kamen vollständig ohne eine regelbare Sendeleistung aus, da nur eine begrenzte Anzahl an Kommunikationskanälen verfügbar war und jedem Nutzer exklusiv eine feste Frequenzbandbreite zugeteilt werden konnte. Die Gebiete, die von den ortsfesten Sende- und Empfangsanlagen (Basisstationen) versorgt wurden, überlappten sich dabei in der Regel nicht. Mit der Einführung des C-Netzes (analog) änderte sich dies grundlegend. Im Rahmen des damit eingeführten Konzepts eines zellularen Netzes werden die verfügbaren Frequenzen mehrfach genutzt, um eine höhere Teilnehmerzahl bedienen zu können. Die Größe dieser Mobilfunkzellen ist maßgeblich von der erwarteten Nutzerzahl und den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Im C-Netz entstand daher erstmals ein inhomogenes Netz, das Zellradien zwischen etwa 2 km in Innenstädten und bis zu 30 km außerorts aufwies [4]. Mit der vergleichsweise hohen

Strahlungsleistung von 15 Watt konnten die Mobilfunkgeräte auch am Rande einer ausgedehnten Zelle eine Verbindung herstellen. Probleme bereitete es jedoch, wenn sich ein solch leistungsstarker Sender in einem Gebiet mit kleinen Zellen aufhielt und dann ungewollt weit über die Zellgrenzen hinaus zu empfangen war. In diesem Fall traten Interferenzen zwischen den Nutzern derselben Frequenz innerhalb anderer Zellen auf. Aus diesem Grund führte das C-Netz erstmalig eine regelbare Sendeleistung ein.

Leistungsregelung bei GSM

Wie das C-Netz verwendet GSM (Netz D und E, digital in Deutschland) ein zellulares Netz, so dass der Gesprächskanal eines Teilnehmers in einer anderen Zelle wiederverwendet werden kann und deshalb sichergestellt sein muss, dass keine gegenseitige Störung stattfindet. Eine einfache Regelvorschrift lautet demnach, dass jedes Endgerät gerade noch in ausreichender Qualität von der Basisstation empfangen werden soll. In Bild 1 ist das Prinzip der Sendeleistungsregelung dargestellt. In einem GSM-System wird ca. zweimal pro Sekunde die Übertragungsqualität vom Mobiltelefon zur Basisstation überprüft. Darauf basierend übermittelt die Basisstation Kommandos zur Leistungsänderung an das Mobiltelefon. Dieses kann seinen Leistungspegel in Stufen von 2 dB ändern. Der Regelungsbereich erstreckt sich im GSM-900-Band von 0,003 bis 2 Watt (bzw. 5 bis 33 dBm) und im GSM-1800-Band von 0,001 bis 1 Watt (bzw. 0 bis 30 dBm) [5].

Leistungsregelung bei UMTS

Auch wenn bei UMTS ebenfalls ein zellulares Netz verwendet wird, besteht gegenüber den vorangegangenen Mobilfunkgenerationen ein fundamentaler Unterschied: Der physikalische Kommunikationskanal kann von allen Teilnehmern eines Netzbetreibers zeitgleich im selben Frequenzspektrum genutzt werden. Um die Aussendungen der einzelnen Teilnehmer dennoch voneinander unterscheiden zu können, werden diese mit so genannten Verwürfelungs- bzw. Scramblingcodes multipliziert (CDMA). Eine Detektion an der Basisstation unter Verwendung des bekannten Verwürfelungscodes ist jedoch nur möglich, wenn das Empfangssignal einen ausreichend großen Signal-Rausch-Abstand aufweist. Würden beispielsweise beide Teilnehmer in Bild 2 mit der gleichen Leistung senden, läge an der Basisstation ein deutlich höherer Empfangsleistungspegel für das Endgerät 1 vor,

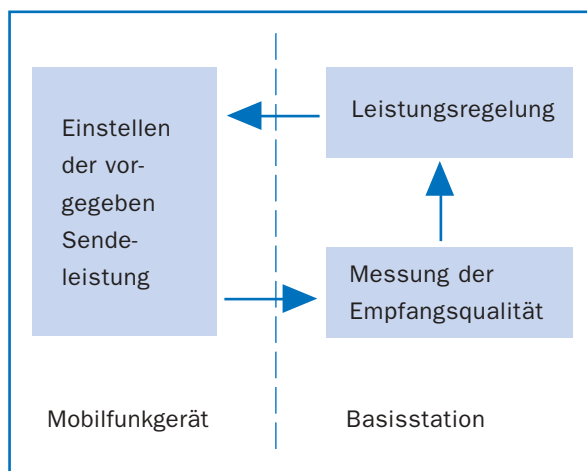


Bild 1: Schematische Darstellung der Leistungsregelung in einem GSM-Mobilfunksystem

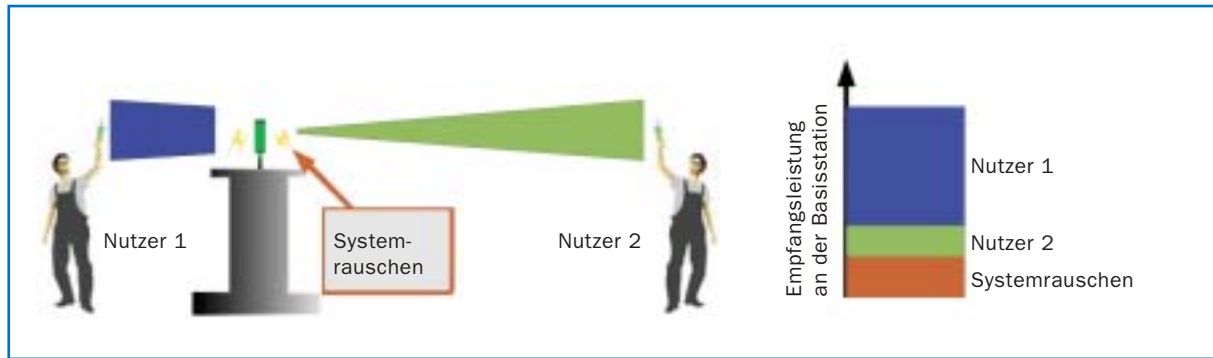


Bild 2: Überlagerung der Aussendungen ohne Leistungsregelung

was eine erhöhte Interferenz für Teilnehmer 2 bedeuten würde. Die Leistungsregelung muss demnach veranlassen, dass Teilnehmer 1 mit niedrigerer Leistung als Nutzer 2 sendet. Der Idealfall wäre, dass alle Endgeräte, die sich innerhalb einer Zelle befinden, von der zugehörigen Basisstation mit gleicher Leistung empfangen werden. Diese Konstellation würde die Interferenz für jeden Teilnehmer minimieren.

Aufgrund der auftretenden Fadingeffekte auf den Mobilfunkkanälen, die beispielsweise durch die Bewegung des Nutzers, aber auch durch weitere Änderungen der Ausbreitungsbedingungen verursacht werden können, kann sich die Empfangsleistung an der Basisstation schnell ändern. Im C- oder GSM-Netz wäre dies kein eklatantes Problem, da die Sendeleistung eines Mobiltelefons deutlich zu hoch sein müsste, um in benachbarten Zellen Störungen zu verursachen. Ist die Sendeleistung zu gering und damit der Empfang an der Basisstation unzureichend, könnte allenfalls die Sprachübertragung kurz unterbrochen werden, bevor die Leistung erhöht wird. Es bleibt daher festzuhalten, dass eine Beeinträchtigung des übigen GSM-Mobilfunknetzes aufgrund einer verzögerten Leistungsregelung sehr unwahrscheinlich ist.

Andere Umstände sind in einem UMTS-Mobilfunknetz gegeben: Verlässt ein Nutzer beispielsweise eine abgeschirmte Position, so würde an der Basisstation schlagartig eine deutlich höhere Empfangsleistung vorliegen. Für andere Nutzer könnte der damit verbundene Interferenzanstieg dazu führen, dass deren Übertragung nicht mehr detektiert werden kann, da die UMTS-Geräte – wie bereits erwähnt – zur gleichen Zeit auf derselben Frequenz senden. Es ist daher notwendig, die Sendeleistung deutlich häufiger und schneller als bei GSM zu korrigieren. Der UMTS-Regelalgorithmus arbeitet prinzipiell nach einem ähnlichen Prinzip wie in einem GSM-System: 1500 mal pro

Sekunde wird von der Basisstation bewertet, ob die Empfangsqualität über oder unter einem vorgegebenen Zielwert liegt. Die UMTS-Standards geben zwei unterschiedliche Algorithmen vor, um diese Bewertungen in Leistungsänderungen umzusetzen. Hierzulande verwenden alle vier Betreiber den Regelalgorithmus Nr. 2, so dass jedes Endgerät seinen Sendeleistungspegel um 1 dB erhöht, wenn fünf Bewertungen in Folge ergaben, dass die Empfangsqualität zu niedrig ist. Die Sendeleistung wird um 1 dB gesenkt, wenn in fünffacher Folge eine zu gute Empfangsqualität festgestellt wurde. Die daraus resultierenden maximal 300 Änderungen pro Sekunde erlauben eine deutlich schnellere Anpassung der Leistung als in den vorherigen Mobilfunkgenerationen.

Neben der schnelleren und feineren Regelung erfuhr auch der Dynamikbereich eine deutliche Erweiterung: Könnte ein UMTS-Gerät seine Sendeleistung, wie bei GSM-1800, lediglich auf 1 mW reduzieren, so würde selbst dieser scheinbar niedrige Wert eine zu hohe Interferenz erzeugen, wenn sich der Nutzer beispielsweise unmittelbar vor der Basisstation aufhält. Es ist deshalb vorgeschrieben, dass jedes Endgerät seine Leistung mindestens bis auf 10 nW (entspricht -50 dBm oder 0,0000001 W) reduzieren kann [6].

Gesprächsaufbau bei GSM

Die vorangegangenen grundlegenden Betrachtungen sind elementar zum Verständnis der nachfolgend diskutierten Szenarien. Der zunächst betrachtete Gesprächsaufbau ist Bestandteil einer jeden Verbindung. Bild 3 zeigt im Vergleich für zwei verschiedene Betreiber den zeitlichen Verlauf der Sendeleistung zum Anfang einer Sprachverbindung. Es ist deutlich zu sehen, dass zunächst eine sehr hohe Leistung verwendet wird und erst nach 35 Sekunden (Betreiber 1) bzw. 7 Sekunden (Betreiber 2) die – in GSM minimal

mögliche - Sendeleistung von 3 bzw. 1 mW erreicht wird. Der Nutzer befand sich während der gesamten Zeit nur wenige Meter von der Basisstation entfernt. Für die Überbrückung dieser Entfernung ist eine Leistung von 1 mW absolut ausreichend, weshalb sich die berechtigte Frage aufwirft, wieso diese minimale Leistung nicht durchgehend verwendet wird. Nach einem Rückblick auf den Abschnitt über den Regelalgorithmus liegt die Antwort nahe: Nicht das GSM-Mobiltelefon regelt seine Leistung, sondern das Mobilfunknetz veranlasst eine Korrektur, die dann vom Endgerät befolgt wird. Naturgemäß kann das Mobilfunknetz aber vor der Verbindungsaufnahme keinerlei Leistungsänderung veranlassen. Die GSM-Standards schreiben daher vor, dass der Verbindungsaufbau stets mit der Leistung vorzunehmen ist, die innerhalb der Mobilfunkzelle maximal zugelassen ist. Üblicherweise sind dies 2 W im 900 MHz-Band und 1 W im 1800 MHz-Band. Bei Betreiber 1 wurde demnach eine GSM-900-Zelle, bei Betreiber 2 eine GSM-1800-Zelle verwendet. Weiterhin unterscheiden sich die Betreiber deutlich im Regelverhalten. Die Standards empfehlen zwar Parameterwerte für den Regelalgorithmus – die Betreiber sind aber nicht daran gebunden und verwenden deutlich unterschiedliche Parametrierungen. Nach Bild 3 beginnen beide Netze nach einer Vorlaufzeit von etwa 5 s nach dem Gesprächsaufbau mit der Leistungssenkung. Dieser Vorlauf wird benötigt, um die Anzahl an Messwerten zu sammeln, die für eine gesicherte Bewertung des Übertragungskanals notwendig ist. Ein eklatanter Unterschied besteht in der Zeitspanne, in welcher die endgültige Leistungsstufe

erreicht wird: Im Netz von Betreiber 1 dauert es etwa 36 s bis zum Abschluss der Regelung. Dieses Vorgehen minimiert die Gefahr eines Verbindungsabbruchs, da nach jeder (kleinstmöglichen) Reduzierung innegehalten wird, um die Eingangsgrößen des Regelalgorithmus neu zu überprüfen. Deutlich schneller arbeitet der Algorithmus von Betreiber 2, bei dem die Leistung über nur einen Zwischenschritt angepasst wird. Dieses Vorgehen führt daher auch zu einer reduzierten Strahlenexposition.

Für eine Bewertung der Strahlenexposition muss berücksichtigt werden, dass in Bild 3 die Sendeleistung dargestellt ist, mit der ein GSM-Burst gesendet wird, die im Allgemeinen nicht der mittleren Leistung entspricht, aus welcher sich die SAR bestimmt (siehe Abschnitt *Gegenüberstellender Vergleich*). Wird das Telefon während eines Gesprächs besprochen, so reduziert sich die mittlere Leistung – und damit auch die durch die zeitabhängige SAR quantifizierte – Exposition auf etwa ein Achtel des dargestellten Wertes. Im Zeitraum ab dem Wählvorgang bis zur Annahme des Gesprächspartners wird das Telefon im Regelfall aber nicht besprochen. In diesem Fall werden aufgrund der sogenannten unterbrochenen Übertragung (englisch: Discontinuous Transmission, kurz DTX [7]) deutlich weniger Informationen übertragen, so dass die mittlere Leistung nur etwa 1,4 % der in Bild 3 dargestellten Leistung entspricht. Unter diesem Aspekt relativiert sich die oft genannte Empfehlung, das Mobiltelefon erst einige Zeit nach dem Initiieren einer Verbindung ans Ohr zu halten, um die Strahlenbelastung vorsorglich zu reduzieren.

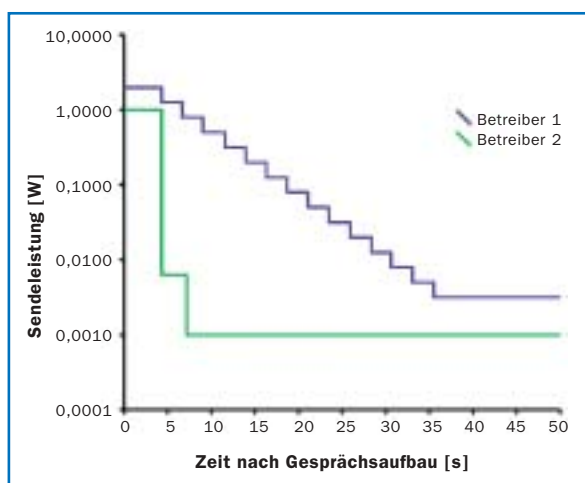


Bild 3: Leistungsregelung nach Gesprächsaufbau in verschiedenen Mobilfunknetzen

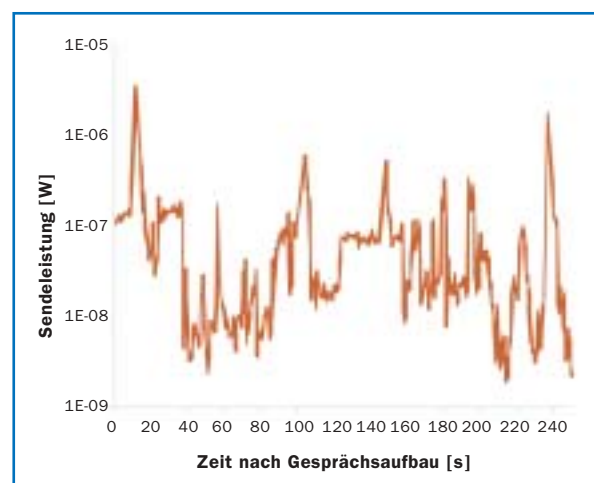


Bild 4: Leistungsregelung UMTS unmittelbar vor Basisstation

Gesprächsaufbau bei UMTS

Insbesondere kann eine solche Empfehlung nicht pauschal für den Mobilfunk gegeben werden und damit zwangsläufig auch auf UMTS-Telefone ausgedehnt werden, wie Bild 4 zeigt. Diese Messwerte wurden ebenfalls in einem Szenario aufgezeichnet, in welchem die Kommunikation unmittelbar vor einer Basisstation initiiert wurde. Würde die Verbindung mit der maximal zulässigen Leistung aufgebaut werden, würden die übrigen Verbindungen anderer Teilnehmer in dieser Situation massiv gestört werden. Daher wird einem UMTS-Endgerät zugebilligt, die anfängliche Sendeleistung selbst zu berechnen. Die Grundlage bilden hierfür Daten der Basisstation, die in regelmäßigen Abständen im Rahmen der allgemeinen Signalisierung an alle Teilnehmer übermittelt werden sowie Messungen, die das Mobiltelefon für Referenzkanäle vornimmt. Untersuchungen haben ergeben, dass diese initiale Leistung in der Praxis auch unter vergleichsweise widrigen Umständen, beispielsweise während einer zügigen Fahrt durch ein Stadtgebiet mit schnell wechselnder Umgebung, gut mit der tatsächlich benötigten Leistung übereinstimmt [8].

Nachdem der Verbindungsaufbau vollzogen wurde, übernimmt aber das UMTS-Mobilfunknetz die Regelung. In Bild 4 ist die häufige Anpassung entlang des Verlaufs der Sendeleistung deutlich zu erkennen, die daraus resultiert, dass es sich beim betrachteten Szenario um ein belebtes Parkdeck handelt, bei dem sich die Ausbreitungsbedingungen schnell ändern und dadurch häufige Korrekturen einfordern. Sowohl die hier dargestellten wie auch alle nachfolgenden UMTS-Werte sind über einen Zeitraum von einer Sekunde gemittelt, da die Momentanwerte aufgrund der schnellen Regelung keinen klaren Kurvenverlauf erkennen lassen würden.

Am Ende des vorangegangenen Abschnitts *SAR-Wert zum Vergleich von GSM und UMTS?* wurde festgehalten, dass die Strahlenexposition im worst-case bei UMTS und GSM nahezu identisch ist. Im betrachteten Szenario, also unter nahezu bestmöglichen Versorgungsbedingungen unmittelbar vor einer Basisstation, ergeben sich jedoch deutlich niedrigere Sendeleistungen bei UMTS.

Zellwechsel bei GSM

Ein weiteres praxisrelevantes Szenario, an welchem die Unterschiede der beiden Mobilfunkgenerationen ebenfalls gut zu studieren sind, ist der Zellwechsel.

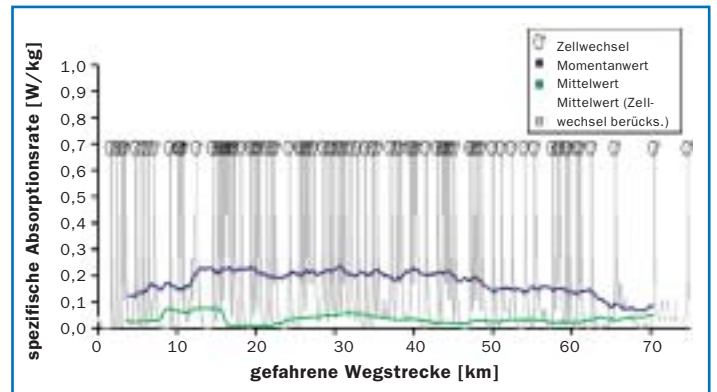


Bild 5: Spezifische Absorptionsrate (SAR) bei Autobahnfahrt

Ein Zellwechsel wird erforderlich, wenn der Teilnehmer den Versorgungsbereich einer Zelle verlässt und gleichzeitig eine bessere Mobilfunkversorgung durch eine andere Zelle gegeben ist. Darüber hinaus sind weitere Veranlassungen möglich, auf die jedoch nicht weiter eingegangen werden soll.

Bild 5 zeigt für einen Autobahnabschnitt, der in einem geschlossenen Kraftfahrzeug zurückgelegt wurde, den Verlauf der zeitabhängigen SAR (in einem Teilkörperbereich) für einen Beifahrer, der in einem GSM-900-Netz ohne Außenantenne telefoniert. Zur Bestimmung der SAR aus der gemessenen Sendeleistung wurde das in [9] beschriebene Verfahren angewandt, welches eine Umrechnung von der Sendeleistung in die SAR unter Verwendung von Feldsimulationen erlaubt. Für die Netzbetreiber stellen Autobahnen traditionell ein bevorzugtes Versorgungsziel dar [4], so dass viele Basisstationen entlang der Autobahn aufgebaut werden. Die hohe Dichte führt sowohl zu einer guten Mobilfunkversorgung und insgesamt 81 Zellwechseln entlang der Strecke von 75 Kilometern.

Dem Diagramm ist deutlich zu entnehmen, dass die Exposition bei jedem Zellwechsel ihr Maximum erreicht. Dieses Verhalten lässt sich unmittelbar aus dem vorangegangenen Abschnitt erklären: Bei einem GSM-Zellwechsel wird die Verbindung zu einer Basisstation gelöst und unmittelbar danach zu einer neuen Basisstation aufgebaut. Da unbekannt ist, welche Sendeleistung für diese neue Verbindung benötigt wird, verwendet das Mobiltelefon nach einem Zellwechsel die maximal erlaubte Sendeleistung – ganz analog zum Gesprächsaufbau.

Dieses Vorgehen führt daher zu einer erhöhten Exposition und kompensiert den Vorteil der guten Mobil-

funkversorgung weitestgehend. Um den genauen Einfluss der Zellwechsel zu quantifizieren, wird zunächst die tatsächliche Exposition über einen Zeitraum von 6 Minuten gemittelt, was auf die blaue Kurve in Bild 5 führt. In einem weiteren Schritt wird in diesem Zeitfenster die hohe Exposition – aufgrund der initialen Sendeleistung nach einem Zellwechsel – herausgefiltert, woraus die grüne Kurve resultiert.

Der Abstand beider Kurvenverläufe ist erwartungsgemäß dann gering, wenn wenige Zellwechsel auftreten, was entlang des letzten Wegstücks gegeben ist. Im übrigen Streckenteil schlagen die häufigen Wechsel nachteilig zu Buche, wie insbesondere zwischen 18 und 25 km verdeutlicht wird, wo die Versorgungslage eine sehr niedrige Sendeleistung und damit auch eine niedrige Exposition zuließe (grüne Kurve). Allerdings treten in dieser Umgebung gehäuft Zellwechsel auf, die vom Mobiltelefon stets die maximale Sendeleistung fordern und daher die Exposition erhöhen.

Zellwechsel bei UMTS

Wie bereits angesprochen, behält ein UMTS-Mobiltelefon immer denselben physikalischen Kanal bei, so dass seine Aussendungen von allen Basisstationen in Reichweite empfangen werden könnten. Anstatt eines abrupten Wechsels wird dadurch ein „sanfter“ Zellwechsel (soft handover) ermöglicht: Das Mobiltelefon stellt während eines Zellwechsels zunächst eine zusätzliche Verbindung zur potenziellen Zielzelle her. Da weiterhin eine Verbindung zur ursprünglichen Basisstationsantenne besteht, ist sichergestellt, dass das Endgerät weiterhin empfangen wird.

Während einer mehrfachen Verbindung bewertet jede verbundene Basisstation die Empfangsqualität des Mobiltelefons. Aufgrund unterschiedlicher Ausbreitungswege und -bedingungen senden sie dann oftmals unterschiedliche Anweisungen zur Leistungsänderung, die mit folgender Priorität umgesetzt werden [10]: Die Aufforderung zur Leistungssenkung durch mindestens eine Basisstation befolgt das Mobilgerät immer. Diese Festlegung trägt signifikant zur Emissionsreduzierung bei und ist unmittelbar plausibel, da es völlig ausreichend ist, wenn das Mobiltelefon in *einer* Zelle empfangen wird. Dahingegen wird die Leistung nur dann erhöht, wenn dies die Mehrheit der Basisstationen fordert und die übrigen eine Beibehaltung des Leistungsniveaus wünschen. Eine solche mehrfache Verbindung verspricht daher für die Praxis eine niedrigere Sendeleistung des Mobiltelefons auf-

grund der gegebenen Diversität durch Empfangsantennen an unterschiedlichen Orten.

Bild 6 zeigt den Verlauf der Sendeleistung während einer Autobahnfahrt im Detail. Neben einem vergleichsweise niedrigen Sendeleistungspegel ist darauf zu erkennen, dass ein Zellwechsel – anders als bei GSM – auf jeden Fall nicht zu einer deutlich erhöhten Exposition führt. Allerdings ist der, zuvor theoretisch erläuterte Hintergrund, dass die Verbindung zu mehreren Zellen zu einer reduzierten Exposition führt, nicht zu erkennen. So wird – genau entgegen der Erwartung – beispielsweise die höchste Sendeleistung bei einer Verbindung zu drei und die niedrigste Leistung bei einer Verbindung zu einer Zelle erreicht. Diese Interpretation ist jedoch unzulässig, da Bild 6 keine Information über die jeweiligen Übertragungskanäle enthält, auf deren Verhältnisse die Leistung angepasst wird. Um den genauen Einfluss einer mehrfachen Verbindung quantifizieren zu können, muss die Betrachtung daher zunächst auch auf die Komponente des Übertragungskanals ausgedehnt werden.

Anpassung der Sendeleistung an den Übertragungskanal bei UMTS

Dieser Abschnitt geht dafür zunächst der Frage nach, wie effizient die Sendeleistung des Mobilgeräts in der Praxis an den Übertragungskanal angepasst wird. Die gewählte Sendeleistung wird grundsätzlich von den vorliegenden Ausbreitungsbedingungen zwischen Endgerät und Basisstation bestimmt. Obwohl diese Größe nicht unmittelbar zugänglich ist, kann sie zumindest indirekt bestimmt werden: Die UMTS-Basisstation sendet kontinuierlich den Common Pilot Channel (CPICH) mit konstanter Leistung. Misst das Mobiltelefon einen Rückgang der Empfangsleistung des CPICH um einen bestimmten Wert, kann eine Erhöhung der Sendeleistung in gleichem Umfang erwartet werden, wenn Reziprozität zwischen Up- und Downlink vorausgesetzt wird. Dies bedeutet: Aus einer halbierten Empfangsleistung (entspricht 3 dB) kann geschlossen werden, dass sich die Pfaddämpfung verdoppelt hat. Um diese Zunahme zu kompensieren, muss die Sendeleistung verdoppelt (d.h. um 3 dB erhöht) werden.

Bild 7 zeigt in einer doppellogarithmischen Darstellung die Einordnung von über 10 000 Messsätzen nach ihrem Sende- und Empfangsleistungspegel. Die Daten wurden während einer Sprechverbindung an unterschiedlichen Orten in einer Mobilfunkzelle ge-

wonnen, ohne dass dabei Zellwechsel auftraten. Das Diagramm enthält außerdem die Regressionsgerade dieser Verteilung, die den linearen Zusammenhang zwischen Sende- und Empfangsleistungspegel beschreibt, von der nur 20 % der dargestellten Messsätze um mehr als 3 dB hinsichtlich des verwendeten Sendeleistungspegels abweichen. Die Sendeleistungs-Regelung in UMTS arbeitet daher sehr effektiv und vermeidet damit insbesondere eine zu hohe Exposition des Nutzers. Diese Regressionsgerade kann nun als Referenz dienen, um den Einfluss einer mehrfachen Verbindung auf die Sendeleistung aufzuzeigen. Die Verteilung nach Bild 8 zeigt die Datensätze von einzelnen Messungen, bei denen eine Verbindung zu mehreren Zellen besteht. Zum Vergleich wird die zuvor bereits betrachtete orangefarbene Regressionsgerade gegenübergestellt, welche die Verteilung für nur eine verbundene Zelle annähert. Die übrigen Messsätze werden danach differenziert, ob eine gleichzeitige Verbindung zu 2 oder 3 Zellen besteht. Die Mehrzahl dieser Messsätze liegt unterhalb der orangefarbenen Regressionsgeraden, was bedeutet, dass eine mehrfache Verbindung bei vergleichbarer Mobilfunkversorgung zu einer verringerten Sendeleistung führt. Diese Reduzierung beträgt im Mittel mehr als 3 dB, wenn eine Verbindung zu zwei Basisstationsantennen besteht.

Anpassung der Sendeleistung an den Übertragungskanal bei GSM

Auch für GSM kann eine Einteilung der Messsätze in Abhängigkeit von einer messbaren Referenz erfolgen, welche den Übertragungskanal charakterisiert. Der Broadcast Control Channel (BCCH) wird von jeder Basisstation mit konstanter Sendeleistung ausgestrahlt und kann damit als Referenz dienen – ähnlich dem CPICH bei UMTS. Da ein Mobiltelefon diesen Kanal während einer Verbindung nicht messen kann, muss der BCCH durch ein zweites Endgerät parallel gemessen werden. Bild 9 zeigt die so gewonnene Verteilung von etwa 600 Messpunkten, die alle innerhalb einer Zelle aufgezeichnet wurden, so dass keine Zellwechsel auftraten. Da die GSM-Sendeleistung nur in 2 dB-Schritten geändert werden kann und die Empfangsleistung nur mit einer Auflösung von 1 dB erfasst wird, sind in Bild 9 lediglich diskrete Punkte besetzt, wohingegen sich bei der gleichen Darstellung für UMTS in den Bildern 7 und 8 durch die feinere Regelung und die Mittelung quasi kontinuierliche Werte ergeben. Auffällig ist im Vergleich mit UMTS, dass die

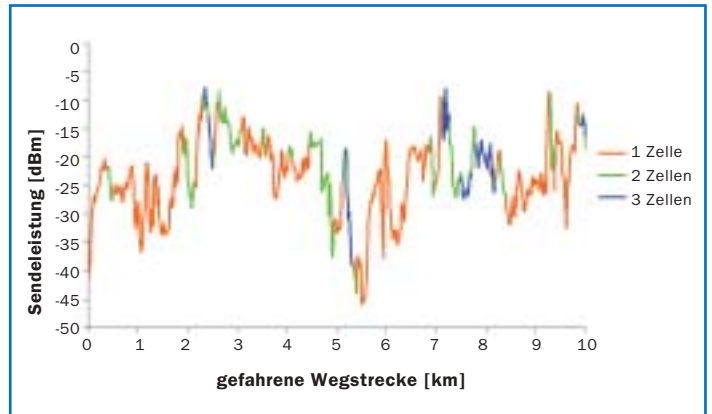


Bild 6: Auswirkung von Zellwechseln auf die Sendeleistung bei UMTS

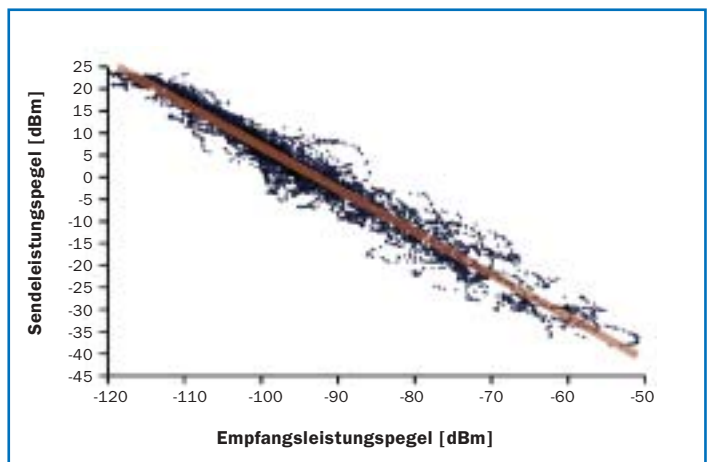


Bild 7: Abhängigkeit des Sende- von dem Empfangsleistungspegel bei UMTS

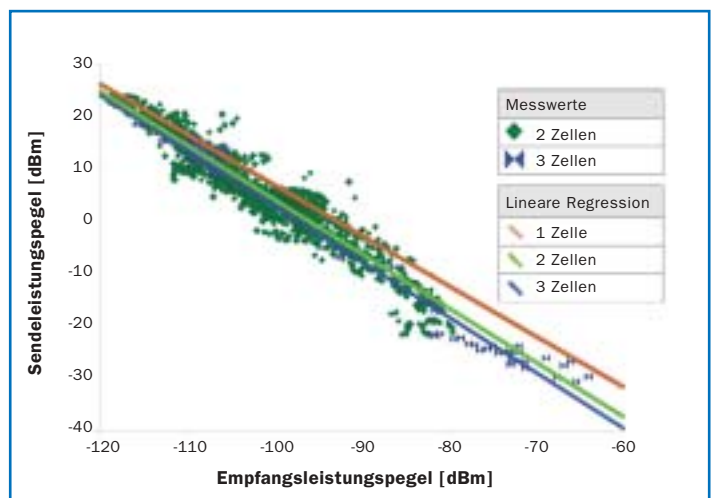


Bild 8: Abhängigkeit des Sende- von dem Empfangsleistungspegel bei einer Verbindung zu mehreren Zellen bei UMTS

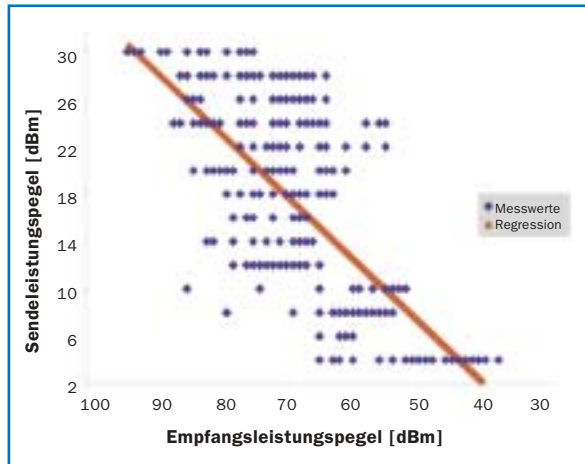


Bild 9: GSM-Sendeleistungspegel in Abhängigkeit des Übertragungskanals

Messpunkte bei GSM deutlich höhere Abweichungen von der Regressionsgeraden aufweisen. Nach der Verteilung in Bild 9 ist die maximale Sendeleistung (30 dBm) ausreichend für eine Verbindung bei einem Empfangsleistungspegel von -94 dBm. Besteht Reziprozität zwischen Up- und Downlink, so bedeutet dies, dass bei einem Empfangsleistungspegel von -64 dBm eine Sendeleistung von 0 dBm genügen würde. Tatsächlich erstreckt sich die verwendete Sendeleistung unter diesen Verhältnissen jedoch von 4 bis 28 dBm! Erst bei deutlich besserer Versorgung treten ausschließlich Sendeleistungen von 4 dBm auf, wobei der Netzbetreiber die zwei niedrigsten Leistungsstufen 0 und 2 dBm nicht zulässt. Bemerkenswert ist zudem die Regressionsgerade, die bei gegebener Reziprozität eine Steigung von -1 aufweisen müsste. Wird dieser Wert bei UMTS (Bild 7) nahezu erreicht, ergibt sich in Bild 9 für GSM eine Steigung von lediglich -0,53. Dies bedeutet, dass die verwendete Sendeleistung oftmals deutlich oberhalb des Wertes liegt, der für eine Verbindung benötigt würde. Dafür verantwortlich sind die vergleichsweise träge Leistungsregelung sowie die Parametrierung der Regelalgorithmen, die eher zu einer Leistungserhöhung als zu einer –senkung tendieren [8]. Obgleich dies zu einer eigentlich vermeidbar höheren Exposition führt, ist die zurückhaltende Leistungssenkung nachvollziehbar, da andernfalls die Wahrscheinlichkeit eines Gesprächsabbruchs signifikant erhöht wäre.

Gegenüberstellender Vergleich

In den vorangegangenen Abschnitten wurde deutlich, dass in einem UMTS-Mobilfunknetz eine deutlich effi-

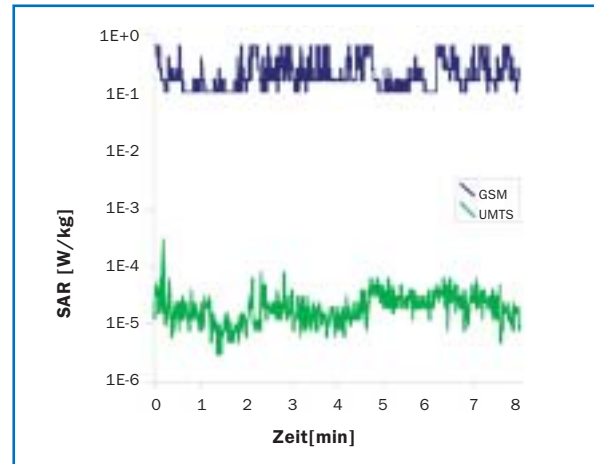


Bild 10: Expositionsvergleich zwischen GSM und UMTS (verharrendes Telefonieren)

zientere Anpassung an den Übertragungskanal möglich ist und somit die Exposition für den Nutzer minimal gehalten wird. Außerdem wurde am Beispiel der mehrfachen Verbindung zu mehreren UMTS-Zellen, die bei GSM technisch nicht realisierbar ist, gezeigt, dass durch diese Weiterentwicklung die Strahlenexposition deutlich gesenkt werden kann. Darüber hinaus existieren weitere Faktoren, die zu einer verringerten Sendeleistung eines UMTS-Mobilfunkgeräts führen, aber an dieser Stelle nur kurz angesprochen werden sollen.

- Um die große UMTS-Frequenzbandbreite von 5 MHz zu füllen, werden die Datenströme mit orthogonalen Codes gespreizt. Durch einen Korrelationsempfänger kann die Basisstation dann die übertragene Information wiedergewinnen, selbst wenn diese etwa 15 dB unterhalb des Rauschniveaus liegt. Aus diesem Grund ist bei UMTS (vgl. Bild 7) ein Empfang auch noch bei -120 dBm möglich. Bei GSM (Bandbreite: 0,2 MHz) muss sich das Empfangssignal dahingegen stets aus dem Rauschen hervorheben und daher größer als etwa -104 dBm sein.
- Bei GSM wird der Übertragungskanal nur zeitweise genutzt. Da sich der Sender nicht abrupt ein- und ausschalten kann, sendet das Mobiltelefon auch einen gewissen Zeitraum vor und nach der eigentlichen Datenübertragung. Währenddessen besteht für den Nutzer eine Exposition, ohne dass Daten übertragen werden. Bei UMTS (FDD-WCDMA) überträgt das Mobilgerät im Regelfall kontinuierlich und nutzt den Übertragungskanal dadurch effizienter. Durch den Wegfall der GSM-charakteristischen Pulsung sind elektrische Geräte daher auch weniger stör anfällig gegenüber UMTS-Mobiltelefonen.

- UMTS verwendet mit der Turbo-Codierung ein vergleichsweise junges und effizientes Codierungsverfahren. Im Vergleich zur einfachen Faltungscodierung, wie sie bei GSM eingesetzt wird, kann damit dieselbe Übertragungsqualität (gemessen an der Bitfehlerrate) mit einer niedrigeren Sendeleistung erreicht werden.
- Die Verwendung einer adaptiven Sprachcodierung ist wesentlich effizienter als die in GSM implementierte unterbrochene Übertragung bei Sprechpausen (DTX) und trägt zu einer weiteren Reduzierung der Strahlenexposition bei.

Abschließend werden zwei konkrete Szenarien hinsichtlich der jeweiligen Exposition in beiden Mobilfunkstandards betrachtet.

Bild 10 zeigt den Verlauf der spezifischen Absorptionsrate während des verharrenden Telefonierens in einem Büroraum. Da sich dieser Raum eindeutig in einer GSM-900- bzw. UMTS-Zelle befindet, treten keine Zellwechsel auf. Die zugehörigen Basisstationsantennen teilen sich einen Standort, sodass ein fairer Vergleich gewährleistet ist. Trotz des verharrenden Telefonierens zeigen die beiden Verläufe in Bild 10 eine fortlaufende Anpassung an den zeitvarianten Übertragungskanal, der weitgehend auf den Einfluss der telefonierenden Person zurückzuführen ist. Wie auch in den vorhergehenden Beispielen ist ersichtlich, dass die Regelung im UMTS-Netz schneller und häufiger vollzogen wird. Obwohl vergleichbare Bedingungen bei der Versuchsdurchführung vorliegen, trennt ein Faktor von knapp 40 dB die beiden Leistungsniveaus, d.h. die Sendeleistung ist bei GSM im Mittel etwa 10 000-mal höher als bei UMTS. Während des betrachteten Telefonats liegt die UMTS-Sendeleistung im Mittel bei 4,6 μW (0,0000046 W) und damit deutlich unterhalb der Sendeleistung eines DECT-Telefons von etwa 10 mW im Mittel bzw. Spitzenwerten über 0,2 W.

Für eine Messfahrt von Leinfelden-Echterdingen nach Öhringen zeigt Bild 11 den Unterschied der momentanen SAR beider Mobilfunksysteme während eines Telefongesprächs. Entlang des dargestellten Wegs wird im UMTS-Netz zu 95 % eine niedrigere Sendeleistung verwendet, so dass die Exposition entsprechend geringer ist. Weil das UMTS-Netz im Vergleich zu GSM derzeit eine geringere Abdeckung aufweist, ergeben sich weiße Wegabschnitte, entlang derer kein Vergleich durchgeführt werden konnte. Insbesondere beim Übergang zu diesen weißen Abschnitten ist die

Strahlenexposition durch UMTS etwas höher, da das Telefon am Rande der UMTS-versorgten Gebiete mit sehr hoher Leistung senden muss, um die große Distanz zur Basisstation zu überbrücken. Hierbei sei bemerkt, dass in der Praxis zwar durchaus die maximale UMTS-Sendeleistung von 23 dBm verwendet wird, dann aber eine weitere Verschlechterung der Ausbreitungsbedingungen oftmals zum schnellen Verbindungsabbruch führt. Die UMTS-Standards schreiben zudem bei einem Synchronisationsverlust vor, den Sender des Endgeräts abzuschalten, da dessen Leistung unter diesen Umständen unkontrollierbar wird [11]. Infolgedessen wird die maximale Sendeleistung eines UMTS-Mobiltelefons – anders als bei GSM – nur selten über einen längeren Zeitraum beibehalten [12]. Auch während der Messfahrt wird im UMTS-Netz die Sendeleistung eines DECT-Telefons vom UMTS-Gerät in mehr als 95,6 % der Zeit unterschritten.

Zusammenfassung

Obgleich der geltende SAR-Grenzwert von 2 W/kg nach aktuellem Kenntnisstand ausreichend vor möglichen Gesundheitsgefährdungen schützt, wird oftmals eine weitergehende Reduzierung der Strahlenexposition empfohlen [13]. Im Hinblick auf mögliche Gefährdun-

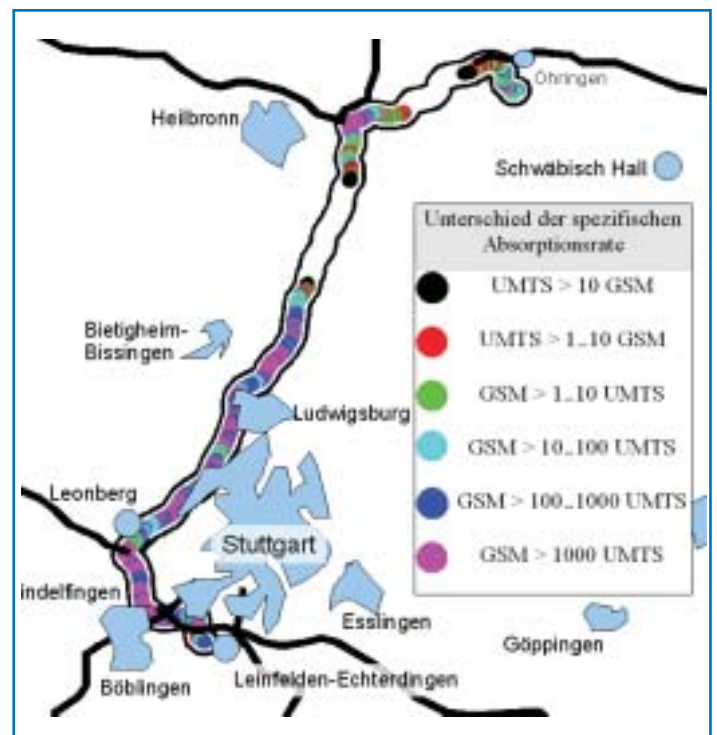


Bild 11: Expositionsvergleich zwischen GSM und UMTS (mobiles Telefonieren)

gen im direkten Umfeld des Mobiltelefons ist primär dessen abgestrahlte Sendeleistung relevant. Diese Größe wird im praktischen Betrieb geregelt, was dazu führt, dass die spezifische Absorptionsrate in der Realität z.T. deutlich unterhalb des SAR-Wertes liegt, der für das entsprechende Gerätemodell stets für den ungünstigsten Fall bestimmt wurde und nicht hinsichtlich der Mobilfunktechnologie (UMTS/GSM) unterscheidet.

Die vorangegangenen Betrachtungen haben die signifikanten Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Sendeleistung bzw. der daraus resultierenden Exposition differenziert nach der jeweiligen Mobilfunktechnologie herausgestellt. Die erläuterten Rahmenbedingungen beider Mobilfunkstandards sowie die Gegenüberstellung von Messungen in vergleichbaren Szenarien zeigen deutlich, dass die mittlere Leistung eines UMTS-Mobiltelefons einige Größenordnungen unterhalb der Sendeleistung eines GSM-Endgeräts liegt.

In der Entwicklungsgeschichte des Mobilfunks wurde durch UMTS eine ausgesprochen niedrige Strahlenexposition für den Nutzer erreicht, die sogar häufig das Niveau eines DECT-Festnetztelefons unterschreitet. Schon allein dadurch müssen bestehende Empfehlungen, wie beispielsweise eine vorrangige Verwendung des Festnetzes, kritisch auf ihre Allgemeingültigkeit hin betrachtet werden. Darüber hinaus besitzt auch die weit verbreitete Verhaltensempfehlung, das Telefon erst einige Zeit nach dem Verbindungsaufbau ans Ohr zu halten bei GSM nur eine eingeschränkte technische Legitimation und ist für ein UMTS-Telefon völlig unzutreffend.

Generell kann die Verwendung eines UMTS-Telefons signifikant zu einer reduzierten Strahlenbelastung beitragen, wobei allerdings zu beachten ist, dass diese Mobilgeräte auch in das GSM-Netz wechseln können. Der Nutzer kann jedoch durch ein entsprechendes Symbol im Gerätedisplay zweifelsfrei erkennen, ob das Telefon im UMTS-Netz eingebucht ist – einige Modelle lassen sich sogar so konfigurieren, dass ausschließlich die UMTS-Technologie verwendet wird. Da die UMTS-Mobilfunknetze noch nicht flächendeckend verfügbar sind, würde deren Ausbau der Expositionsminimierung für Mobiltelefonnutzer entgegen kommen.

Dr.-Ing. Joachim Baumann,

Prof. Dr.-Ing. habil. Friedrich M. Landstorfer, Universität Stuttgart

Literatur

- [1] ICNIRP Guidelines: "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)", *Health Physics* 74 (4), S. 494-522, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 1998.
- [2] Bundesamt für Strahlenschutz: "Strahlenschutzkriterien für ein Mobiltelefon-Ökolabel", <http://www.bfs.de/elektro/oekolabel.html>, Salzgitter, Dez. 2006.
- [3] H. Eder, A. Wiedenhofer: "Mobiler Messkopf zur standortunabhängigen Teilkörper-SAR-Messung an Mobiltelefonen", Bayerisches Landesamt für Arbeitsschutz, Arbeitsmedizin und Sicherheitstechnik (LfAS), München, Juli 2003.
- [4] J. Hermanns, G. Strunz: "Das Funktelefon-Netz C der Deutschen Bundespost", *Der Fernmeldeingenieur*, Ausgaben Dez. 87 bis Apr. 88, Verlag für Wissenschaft und Leben Georg Heidecker, Bad Windsheim, 1988.
- [5] 3GPP TS 45.005: "Radio transmission and reception, V7.3.0", *Techn. Spez.*, http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/45_series/45.005/45005-730.zip, Sophia-Antipolis (Frankreich), Nov. 2005.
- [6] 3GPP TS 25.101: "User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD)", V7.3.0, http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.101/25101-730.zip, Sophia-Antipolis (Frankreich), März 2006.
- [7] 3GPP TS 46.081: "Discontinuous Transmission (DTX) for Enhanced Full Rate (EFR) speech traffic channels", V6.0.0, *Techn. Spez.*, http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/46_series/46.081/46081-600.zip, Sophia-Antipolis (Frankreich), Jan. 2005.
- [8] J. Baumann: "Über die Evolution des öffentlichen Mobilfunks und die damit verbundene Reduktion der Strahlenexposition durch mobile Endgeräte", *Dissertation, Universität Stuttgart, Veröffentlichung vor. 2007.*
- [9] R. Georg: "Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten", *Ingenieurbüro für Telekom-Consult, Kronberg, Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm*, Mai 2005.
- [10] 3GPP TS 25.214: "Physical layer procedures (FDD), V7.0.0, *Techn. Spez.*", http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.214/25214-700.zip, Sophia-Antipolis (Frankreich), März 2006.
- [11] 3GPP TS 25.101: "User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD)", V7.3.0, http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.101/25101-730.zip, Sophia-Antipolis (Frankreich), März 2006.
- [12] J. Baumann, F. M. Landstorfer, L. Geisbusch, R. Georg: "Evaluation of radiation exposure by UMTS mobile phones", *Electronics Letters*, Bd. 42, Nr. 4, S. 225-226, Herts (Großbritannien), Feb. 2006.
- [13] Strahlenschutzkommission: "Neue Technologien (einschließlich UMTS): Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern", 184. Sitzung der SSK am 31.03./01.04.2003, *BAnz. Nr. 127, Bonn, Juli 2003.*