

2 Aspekte der Funkversorgung

Bevor die Möglichkeiten und Grenzen der Minimierung von Mobilfunkimmissionen näher untersucht werden, sollen in diesem Kapitel einige Grundsatzbetrachtungen zum Aufbau und zur Planung von Mobilfunknetzen angestellt werden. Es ist hier allerdings nicht beabsichtigt, ausführlich und umfassend auf den Aufbau und die Funktionsweise von modernen Mobilfunksystemen sowie auf Details der Funknetzplanung einzugehen, da dies den Rahmen des Projektes sprengen würde. Stattdessen sei hier auf einige Veröffentlichungen hingewiesen, die diesbezüglich tiefer gehende Informationen vermitteln können. Grundlegende Auskünfte zur Funktionsweise des Mobilfunks sowie zur Planung von Mobilfunknetzen finden sich beispielsweise in [LÜD 01]. Die komplexen Zusammenhänge beim UMTS-Mobilfunk sind - so weit dies überhaupt möglich ist - relativ anschaulich in [KRÜ 03] dargestellt, eine allgemeinverständliche Einführung in den UMTS-Mobilfunk liefert [STM 03]. Auch in [JÖR 03] und [BERZ 03] sind einige wichtige technische Grundtatsachen des Mobilfunks auf recht anschauliche Art und Weise dargestellt.

Im folgenden sollen allerdings einige häufig gestellte Fragen zum Thema "Mobilfunksendeanlagen" näher behandelt werden, bei denen die Immissionen und deren Minimierung im Mittelpunkt stehen.

Frage 1: Warum werden für den Mobilfunk immer noch neue Sendestationen gebraucht, obwohl die Versorgung offensichtlich ja bereits nahezu überall sichergestellt ist?

Dafür sind mehrere unterschiedliche Gründe verantwortlich. Zunächst muss grundsätzlich festgehalten werden, dass beim Mobilfunk nicht derart große Reichweiten erzielbar sind, wie man sie von UKW- oder TV-Sendern her kennt, da diese mit wesentlich größerer Sendeleistung arbeiten können als Mobilfunkbasisstationen. Prinzipiell könnte man natürlich auch bei Mobilfunksendeanlagen die Leistung erhöhen, um eine größere Reichweite und damit eine größere Flächenabdeckung zu erzielen. Dies macht jedoch keinen Sinn, da die Sendeleistung der Endgeräte (Mobiltelefone) dann ebenfalls vergrößert werden müsste, um die Verbindung auch in der Gegenrichtung sicherzustellen, was sich jedoch u.a. wegen der begrenzten Akkukapazität der Telefone und der sich ergebenden Immissionen im Kopf des Nutzers nicht realisieren lässt. In Kapitel 4.2 wird an konkreten Beispielen gezeigt, dass die aktuell verfügbaren Mobiltelefone die maximal zulässigen SAR-Werte teilweise schon zu 50 Prozent und mehr ausnutzen. Der "gewöhnliche" Rundfunk hat hier Vorteile. Die Verbindung wird nur in einer Richtung (vom Sendeturm zum Rundfunkgerät) aufgebaut, eine Kommunikation in der Gegenrichtung ist nicht vorgesehen. Daher ist die Versorgung größerer Regionen durch wenige leistungsstarke Sendetürme möglich.

Neben dieser Leistungsproblematik wird die Reichweite von Mobilfunksignalen auch noch durch Wellenausbreitungseffekte (Abschattungen durch Berge oder Bebauung, Dämpfungen durch Bäume, Interferenzen durch Mehrwegeausbreitung) erheblich eingeschränkt. Abbildung 2.1 zeigt als Extrembeispiel für eine Reichweitenbeschränkung durch Hindernisse den Abdeckungsbereich einer Mikrozellenantenne im innerstädtischen Gebiet.

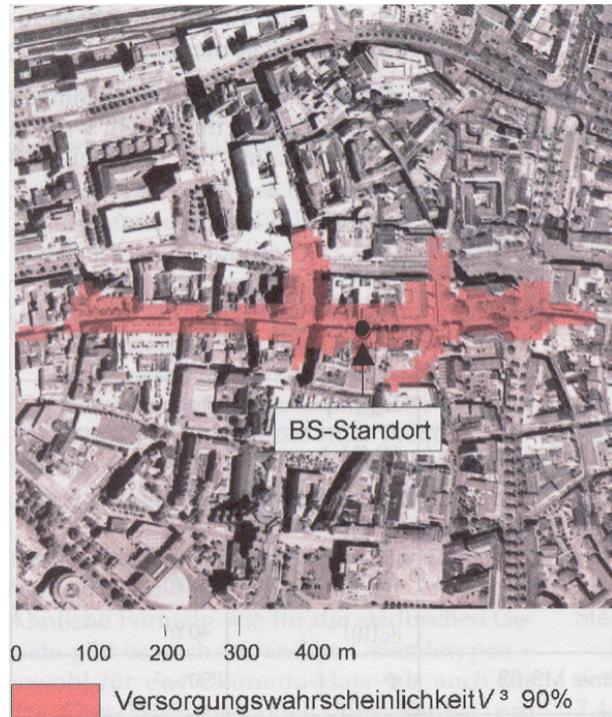


Abb. 2.1: Versorgungsgebiet einer Mikrozelle [LÜD 01].

Um also ausschließlich mit niedrig montierten Mikrozellenantennen (die üblicherweise nur mit wenigen Watt Leistung betrieben werden) ein flächendeckendes Mobilfunknetz aufzubauen, müssten eine Vielzahl derartiger Stationen errichtet werden. Wie aus Abb. 2.1 ersichtlich ist, wäre schon in der nächsten Parallelstraße eine neue Station notwendig. Die Kosten für die Errichtung einer derartigen Netzstruktur wären somit kaum tragbar, außerdem ergeben sich noch weitere technische Probleme aufgrund der sehr häufigen Zellwechsel von Telefonen, die sich innerhalb einer derartigen Netzstruktur schnell bewegen (Kfz). Aus diesen Gründen werden Mikrozellen in der Regel nur in Bereichen realisiert, die aufgrund von hohem Verkehrsaufkommen ein sehr engmaschiges Netz an Stationen notwendig machen.

In der Anfangszeit der GSM-Netze wurde zunächst die Stationsdichte für eine Versorgung von Autotelefonen mit fünf Watt und mehr Sendeleistung geplant. Auch ging man zunächst davon aus, dass die Funkversorgung nur im Freien sichergestellt werden muss. Im Laufe der Jahre nahmen jedoch die Qualitätsansprüche der Kunden zu, so dass das Netz deswegen verdichtet werden musste, um eine lückenlose Kommunikation mit den heute nur noch verwendeten Endgeräten mit einem bzw. zwei Watt Sendeleistung zu gewährleisten. Zudem wurde mehr und mehr gewünscht, dass die Versorgung auch im Gebäudeinnern ("indoor") sichergestellt ist, so dass die Reichweite der einzelnen Senderstandorte sich noch mehr verringerte.

Ein weiterer Grund für eine Zunahme der Anzahl der Sendestationen liegt im gewaltigen Anstieg der Teilnehmerzahlen begründet. Da eine einzelne GSM-Anlage nur eine bestimmte Zahl an Gesprächen gleichzeitig abwickeln kann und aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit an Sendefrequenzen pro Betreiber eine Erweiterung der Stationen nur in Grenzen mög-

lich ist, müssen in Bereichen mit hohem Gesprächsaufkommen zusätzliche Stationen errichtet werden, um die Versorgungsfläche je Station zu verringern. Das Netz wird also noch weiter verdichtet, obwohl dies aus reinen Abdeckungsüberlegungen vielleicht gar nicht zwingend notwendig wäre. Folgende Abbildung zeigt die Struktur eines GSM900-Netzes im Stadtgebiet von Stuttgart. Deutlich zu sehen ist die Verkleinerung der Zellradien auf wenige 100 Meter im Stadtkern aufgrund des dort auftretenden hohen Gesprächsaufkommens.

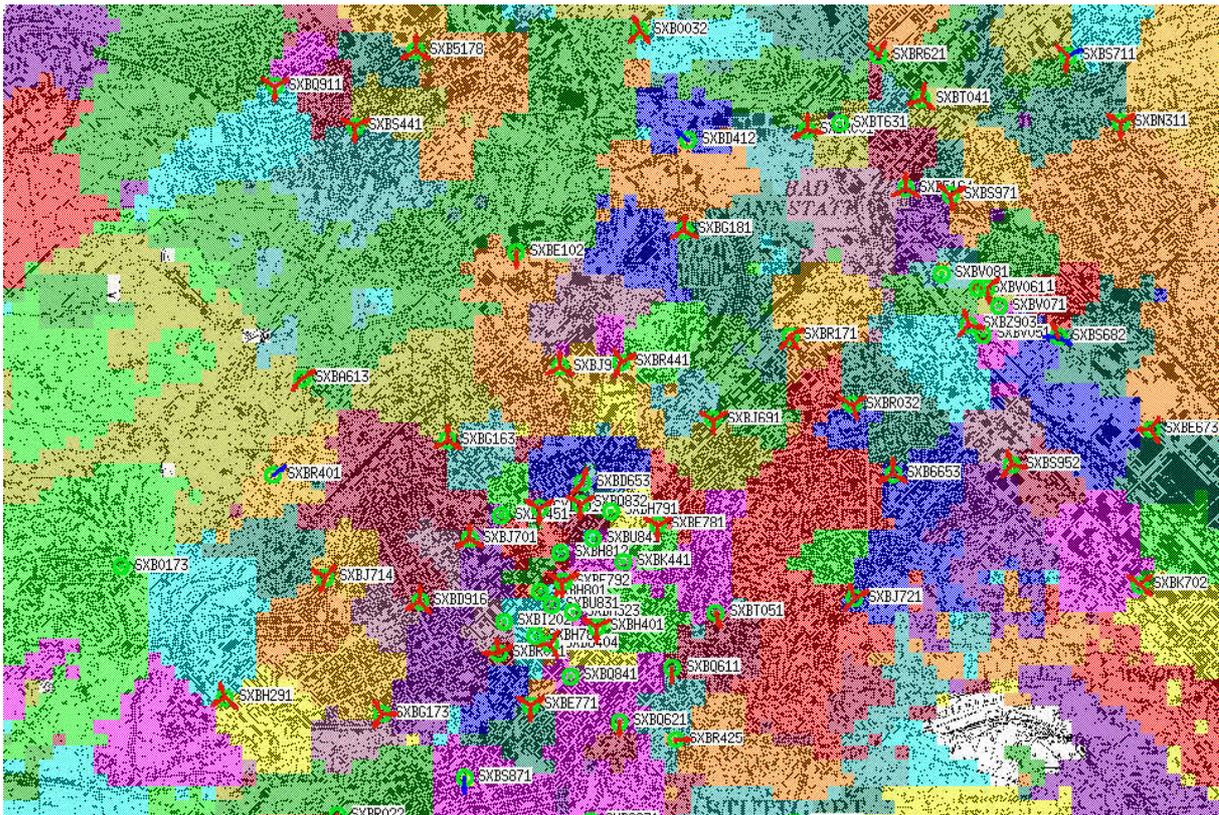


Abb. 2.2: Struktur eines GSM900-Netzes im Stadtgebiet von Stuttgart (Quelle: Vodafone ne).

Des weiteren darf man nicht vergessen, dass in Deutschland vier Netzbetreiber Mobilfunkdienste anbieten, die aufgrund gesetzlicher und kartellrechtlicher Vorgaben, bis auf ganz wenige Ausnahmen, verpflichtet sind, ihre Infrastruktur unabhängig von einander aufzubauen. Die große Zahl der Senderstandorte kommt also teilweise auch daher, dass vier Netze getrennt von einander aufgebaut wurden. Allerdings konnte die Zahl der Standorte durch Mehrfachnutzung deutlich reduziert werden. Ähnliche Gegebenheiten findet man in allen anderen Industrieländern, die Mobilfunknetze besitzen. Inzwischen kann man feststellen, dass die GSM-Netze zumindest bei den beiden großen Netzbetreibern nahezu vollständig ausgebaut sind und nur noch sehr wenige neue Stationen, meist an Verkehrsschwerpunkten, errichtet werden. Ein völliges Ende des Aufbaus von neuen Senderstandorten wird es allerdings schon aus einem anderen Grund in absehbarer Zeit wohl nicht geben, denn nun beginnt die Phase, in der beste-

hende Mietverträge auslaufen und manche nicht mehr verlängert werden. In diesen Fällen werden die Betreiber natürlich veranlasst, in der Nähe des bisherigen Standortes Ersatz zu suchen, um dann dort die Sendeanlage neu zu errichten.

Auch konnte man in den letzten 12 Monaten beobachten, dass die Firma E-Plus deutschlandweit die Zahl ihrer GSM-Standorte nochmals deutlich ausgeweitet hat, da bei diesem Betreiber offensichtlich die Bestrebung besteht, in Bezug auf den GSM-Mobilfunk eine vergleichbare Netzabdeckung anbieten zu können, wie es bei den beiden "großen" Anbietern T-Mobile und Vodafone der Fall ist. Da offensichtlich ein langfristiger Erfolg auf dem Mobilfunkmarkt derzeit nur bei Verfügbarkeit eines qualitativ hochwertigen GSM-Netzes sicherzustellen ist, muss damit gerechnet werden, dass auch der zweite "kleine" Netzbetreiber (O₂) in absehbarer Zeit nochmals den GSM-Ausbau forcieren wird, zumal das derzeit praktizierte "Roaming" mit T-Mobile (O₂ nutzt in den Regionen, in denen keine eigenen Stationen vorhanden sind, die Anlagen von T-Mobile) aus wettbewerbsrechtlicher Sicht vermutlich nicht dauerhaft von der Regulierungsbehörde zugelassen wird. Somit muss auch noch in den nächsten Jahren mit weiteren Neuerrichtungen von GSM-Stationen in Deutschland gerechnet werden.

Frage 2: Ist es nicht möglich, Mobilfunksendeanlagen aus bestimmten Bereichen (Wohngebiete, Umgebung von Schulen, Kindergärten etc.) zu verbannen und trotzdem die Versorgung sicherzustellen?

Um eine gleichmäßige, hochwertige Versorgung insbesondere innerhalb von Ortschaften sicherzustellen (d.h. auch in Gebäuden kann das Mobiltelefon mit hoher Wahrscheinlichkeit genutzt werden), ist eine lückenlose Befeldung mit ausreichend starken Mobilfunksignalen notwendig. Die Stationen müssen dazu, angepasst an topographische Gegebenheiten, in regelmäßigen Abständen zu einander angeordnet werden, so dass sich ihre Versorgungsbereiche leicht überlappen, damit auch eine Weitergabe der Verbindung bei einem sich bewegenden Teilnehmer zuverlässig ermöglicht wird.

Im Bereich etwas geringerer Teilnehmerdichte kann der Standortabstand durchaus mehrere Kilometer, im städtischen Umfeld allerdings auch mal nur wenige hundert Meter betragen. Manche öffentliche Gebäude (Bahnhöfe, Einkaufszentren, Messezentren) erhalten sogar eine eigene Indoorversorgung mit noch deutlich geringeren Antennenabständen.

Die Möglichkeit, Mobilfunkantennen nur außerhalb von Wohngebieten bzw. im größeren Abstand zu "sensiblen Orten" zu platzieren, kann nur in Ausnahmefällen bei ausreichend kleinen Ortschaften realisiert werden, wobei dann in der Regel eine nicht optimale Versorgung erzielt wird, was sich dann wieder auf die Immission des Handynutzers negativ auswirken kann (siehe Frage 5 bzw. die Ausführungen in Kapitel 7). In größeren Ortschaften und Städten ist es in der Praxis nicht machbar, sämtliche Wohngebiete und "sensible Bereiche" völlig von Mobilfunksendeanlagen freizuhalten, da dann zu große Lücken in das Netz gerissen werden, die keinesfalls durch Sendeanlagen, die sich außerhalb befinden, vernünftig geschlossen werden können. Dies soll natürlich nicht heißen, dass kleinere Standortverschiebungen im Rahmen von Konsensgesprächen zwischen Netzbetreiber und Kommune nicht denkbar und technisch realisierbar sind. Standortverlagerungen um viele hundert Meter bzw.

mehrere Kilometer sind jedoch im städtischen Umfeld mit Sicherheit regelmäßig aus Gründen der Versorgungsqualität ausgeschlossen.

Folgendes Beispiel (UMTS-Netz) soll zeigen, welche Konsequenzen beispielsweise das Fehlen einer Sendeanlage auf die flächendeckende Versorgung hat.

In Abbildung 2.3 ist die UMTS-Versorgung im Innenstadtbereich von Regensburg dargestellt. Die blaue Farbe gibt die Bereiche an, in denen eine UMTS-Nutzung mit der standardmäßig gewünschten Qualität (mindestens 144 kbit/s) im Gebäudeinneren möglich ist. In den rot gefärbten Zonen sind bereits Abstriche bei der Indoorversorgung in Kauf zu nehmen, grüne und weiße Bereiche gewährleisten keine befriedigende Versorgungsqualität. Offensichtlich fehlt zur Sicherstellung einer flächendeckenden UMTS-Versorgung im dargestellten Bereich noch eine Station südwestlich der Bahnlinie. Ein Schließen dieser Lücke durch Sendeleistungserhöhung der Nachbarstationen ist aus den bereits beschriebenen Gründen nicht möglich.

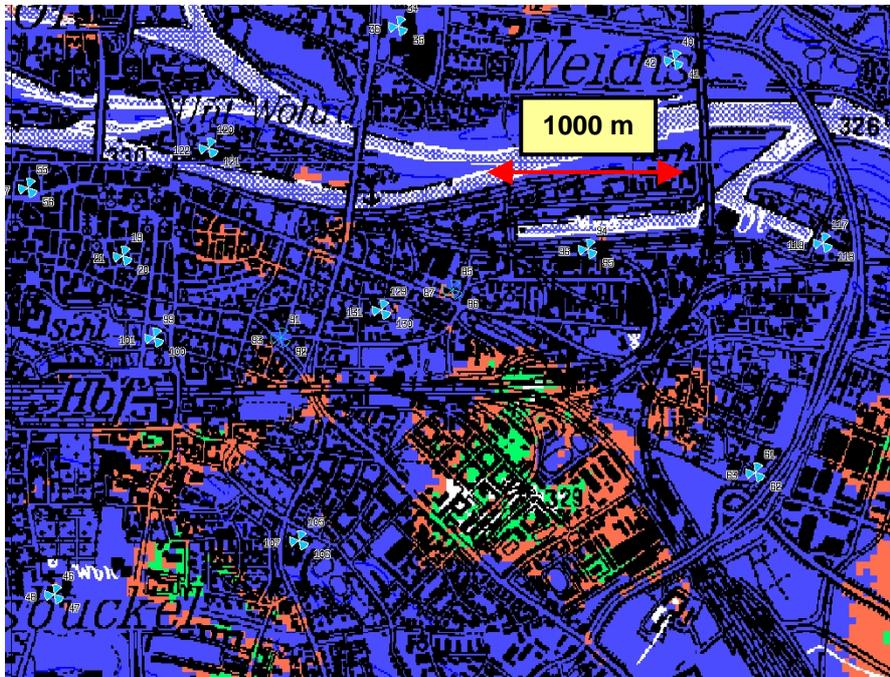


Abb. 2.3: UMTS-Versorgung im Innenstadtbereich von Regensburg (Die hellblauen Symbole stellen die Basisstationsstandorte dar).

Fällt nun ein weiterer Standort (Hier beispielhaft eine Anlage zwischen Bahnlinie und Donau z.B. aufgrund der Kündigung eines Mietvertrages) aus, so reißt dies ein großes Loch in die Versorgungskarte (Abbildung 2.4).

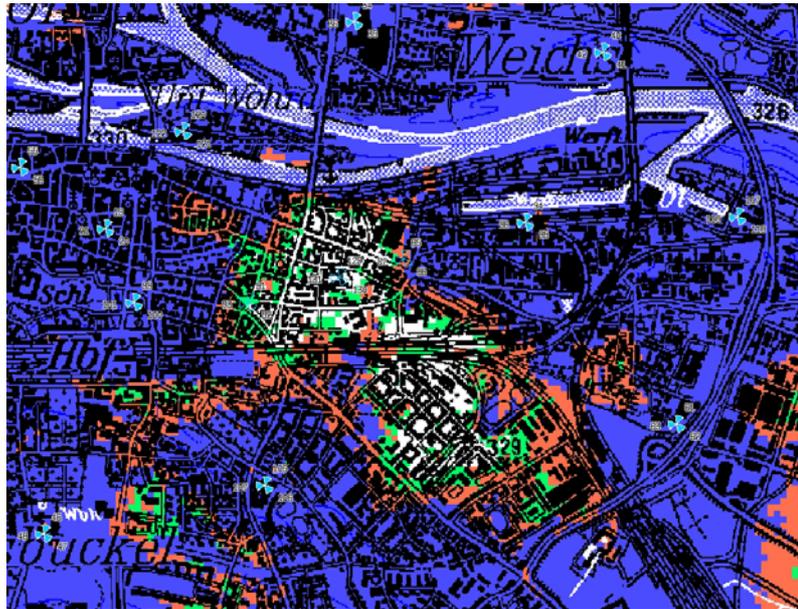


Abb. 2.4: UMTS-Versorgung nach Ausfall eines Standortes nördlich der Bahnlinie.

Geschlossen werden kann die Lücke nur durch einen neuen Standort, der möglichst in unmittelbarer Nähe des alten realisiert werden muss. Gelingt dies nicht, sind also nur Standorte in etwas größerer Entfernung verfügbar, so müssen, wie in diesem Beispiel dargestellt, zwei Anlagen errichtet werden, um die entstandene Lücke vollständig zu schließen (Abbildung 2.5).

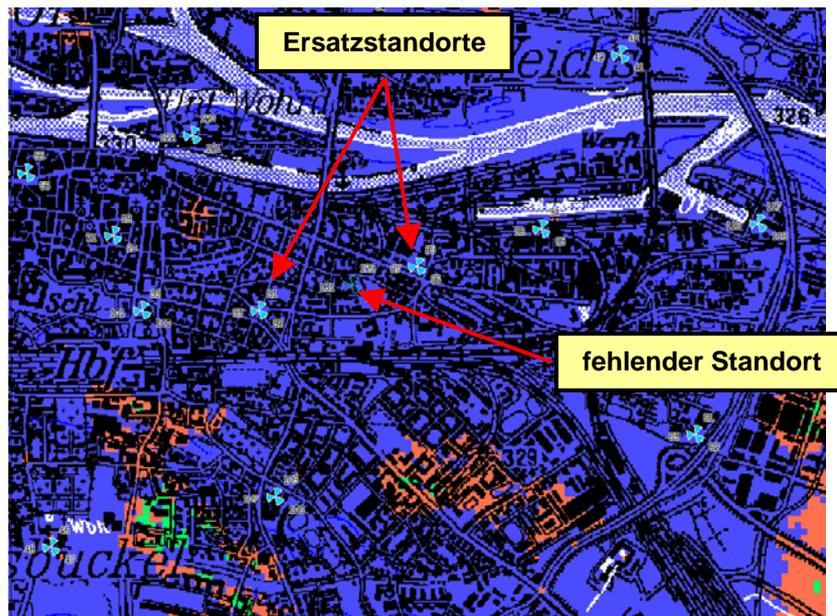


Abb. 2.5: Lückenschluss durch zwei Ersatzstandorte.

Die Mobilfunkanlagen müssen also immer dort installiert werden, wo sie auch versorgen sollen. Eine Versorgung einer bestimmten Region durch Standorte außerhalb dieser ist nicht möglich. Wird von der optimalen Anordnung der Stationen abgewichen (z.B. weil keine Antennenstandorte verfügbar sind), kann es sein, dass zur Sicherstellung einer lückenlosen Versorgung mit der gewünschten Qualität mehr Stationen errichtet werden müssen, als es bei optimaler Standortplanung notwendig wäre.

Frage 3: Welche Unterschiede in der Netzstruktur ergeben sich zwischen GSM und UMTS?

UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) ist, als technologischer Nachfolger der im Moment eingesetzten GSM-Technik, ein System zur mobilen Telekommunikation, das erstmals die effektive Integration vieler unterschiedlicher Dienste (Daten, Sprache, Internet, Video, Audio etc.) ermöglicht. Mit UMTS ist natürlich auch die Übertragung "einfacher" Telefongespräche möglich, zu diesem Zweck wurde es allerdings nicht entwickelt, denn für derartige Aufgaben steht ja mit GSM bereits ein ausreichend leistungsfähiges Mobilfunksystem zur Verfügung. Durch UMTS wird erstmals die schnelle drahtlose Übertragung großer Datenmengen flächendeckend realisiert, was eben die oben genannten neuen Applikationsfelder im Mobilfunk ermöglicht.

Die Fähigkeit zur hochratischen Datenübertragung macht es aber auch notwendig, dass das Funknetz besonders sorgfältig geplant wird. Besondere Effekte und Verfahren, die bei GSM unbekannt sind (z.B. Zellatmung, Soft-Handover, Gleichwellennetz), haben erheblichen Einfluss auf die entstehende Versorgungsqualität. Manche Antennenstandorte, die für GSM gut geeignet sind, können für UMTS nicht verwendet werden. Beispielsweise dürfen UMTS-Standorte nicht zu hoch über die umgebende Bebauung herausragen, da sich sonst sehr starke Störungen in den Nachbarzellen ergeben können. Exponierte Hochhäuser in Großstädten, die gerne als GSM-Standorte genutzt wurden, sind für UMTS meist tabu.

Die folgenden beiden Bilder sollen den bei UMTS besonders unangenehmen Effekt der "Zellatmung" verdeutlichen. Dargestellt ist wieder der gleiche Ausschnitt der Innenstadt von Regensburg. Im Gegensatz zum GSM-Mobilfunk, bei dem die Größe des Versorgungsbereiches einer Funkzelle nicht von der momentan vorliegenden Auslastung abhängt, schwankt der Zellradius bei UMTS mit der Auslastung der Station. Ursache dafür ist, dass alle Teilnehmer auf der gleichen Frequenz senden. Dadurch stellt jede Funkverbindung für alle anderen Verbindungen eine Störquelle dar. Bei geringem Verkehr ist also die Gesamtstörleistung gering und damit können auch weiter entfernte Telefone noch Verbindung mit der Basisstation halten, während diese Verbindung bei größer werdender Auslastung nicht mehr möglich ist. Die Versorgungsfläche der Zelle schrumpft also mit steigender Verkehrslast. Dieser Prozess wird als "Zellatmung" ("cell-breathing") bezeichnet. In Abbildung 2.6 ist zunächst die Abdeckung bei geringem Verkehrsaufkommen dargestellt, während Abbildung 2.7 die Versorgungsqualität bei größerer Auslastung darstellt. Deutlich ist die Verschlechterung der Abdeckung aufgrund der Zellatmung zu erkennen.

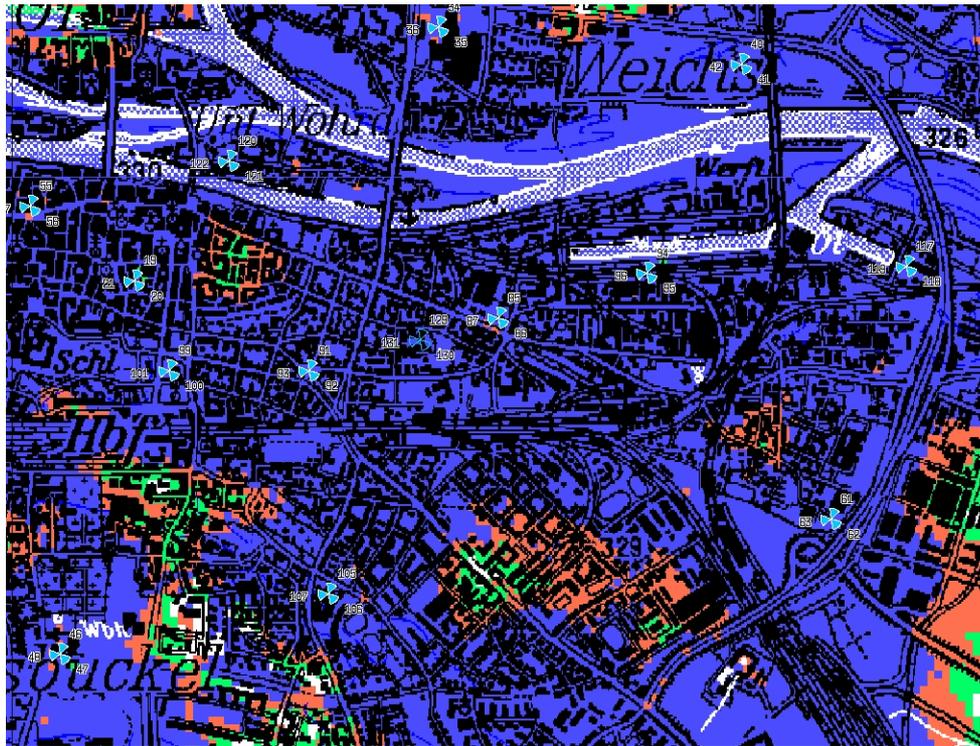


Abb. 2.6: Versorgungsqualität bei geringem Verkehrsaufkommen.

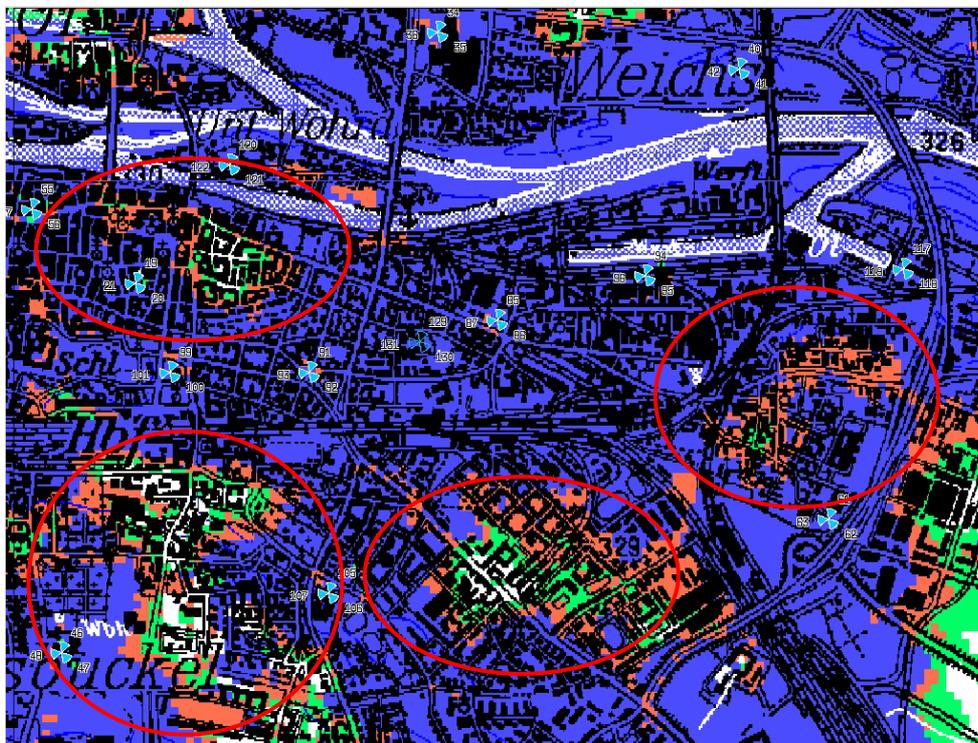


Abb. 2.7: Zellatmung: Verschlechterung der Netzabdeckung bei höherem Verkehrsaufkommen.

Der Effekt der Zellatmung macht es also notwendig, dass bei der Netzplanung eine gewisse Reserve eingeplant werden muss, um nicht bei größer werdender Teilnehmerzahl im UMTS-Netz plötzlich Versorgungslücken zu bekommen. Aus diesem Grund, und um von vorne herein ausreichend Übertragungskapazität bieten zu können, wird UMTS als sehr engmaschiges Netz mit hoher Standortdichte geplant. Im allgemeinen ist es also nicht ausreichend, vorhandene GSM-Standorte mit UMTS-Systemen zu erweitern, sondern es muss zusätzlich eine gewisse Zahl an neuen Standorten gesucht und errichtet werden. Die großen Netzbetreiber planen derzeit in Städten mit einem typischen Stationsabstand von etwa 1.000 bis 1.200 Meter.

Fehlt in einem derartigen Netz eine Station, so entsteht dort in der Regel eine Zone, in der kein hochratiger Datenverkehr mehr möglich ist, sondern bestenfalls noch gewöhnliche Telefongespräche über UMTS abgewickelt werden können. Ein solcher Bereich kann also nicht als "UMTS-versorgt" bezeichnet werden, auch wenn Telefonate möglich sind, denn das Versorgungsziel bei UMTS ist höherwertig (schnelle Datenübertragung, mindestens besser als ISDN). Für die reine Telefonversorgung wäre das GSM-Netz ja völlig ausreichend.

An dieser Stelle sei ergänzend noch darauf hingewiesen, dass kein Mobilfunknetz so geplant wird, dass die Versorgung auch im Keller oder in Tiefgaragen durch außen liegende Standorte sichergestellt ist. Diese fälschliche Annahme ist ein weit verbreiteter Irrtum. Bei GSM ist das Versorgungsziel die Sicherstellung einer ausreichend zuverlässigen "Inhouse" Versorgung mit Telefon und einfachen Datendiensten, bei UMTS soll der Zugriff auf schnelle Datendienste im Freien und in Gebäuden, nach derzeitigen Planungen allerdings meist auch nur "near to window", möglich sein.

Noch einige Worte zur Übertragungskapazität einer UMTS-Station: Die derzeit aufgebaute Technik (FDD-Mode) ermöglicht eine maximale Datenrate von etwa 2 Mbit/s je Zelle. Dies bedeutet, dass maximal nur etwa fünf Teilnehmer in einer Zelle einen gleichzeitigen Download mit 384 kbit/s durchführen können. (384 kbit/s ist die maximale Datenrate der derzeit von den Netzbetreibern angebotenen UMTS-PCMCIA-Karten für Notebookcomputer). Wollen mehr als fünf Nutzer gleichzeitig Daten empfangen, muss die Datenrate der einzelnen Nutzer bereits heruntergefahren werden. Mit der in Zukunft noch möglichen Erweiterung der Anlagen mit der zweiten vergebenen UMTS-Frequenz kann die Übertragungskapazität allerdings noch einmal verdoppelt werden. Will man also vermeiden, dass in Zonen mit hoher Verkehrslast (Innenstädte, Messezentren, etc.) eine Verringerung der maximalen Übertragungsgeschwindigkeit auftritt, so müssen die Zellen flächenmäßig klein gehalten werden.

Aktuell sei noch auf eine neue Aufbaustrategie der Firma E-Plus hingewiesen [EPLUS 04]: Hier werden in größeren Städten seit neuestem "UHS-Standorte" (UHS = ultra high site) errichtet (Montagehöhe der Antennen größer 100 Meter). Dabei soll von hohen Türmen oder Schornsteinen aus mittels einer Vielzahl von Antennen mit großer horizontaler Bündelung eine Zellstruktur erzielt werden, die das Aussehen hat, wie die Stücke einer Torte. E-Plus will mit dieser Strategie kostspielige Standorte auf Gebäudedächern einsparen. Allerdings wurde von E-Plus auch mitgeteilt, dass trotz UHS-Standortkonzept nicht völlig auf konventionelle Anlagen verzichtet werden kann, insbesondere in Zonen mit hohem Verkehrsaufkommen. Ob dieses Standortkonzept dauerhaft eine funktionsfähige Alternative zur bisherigen Aufbaustrategie bei UMTS darstellt, werden die Erfahrungen der nächsten Monate und Jahre zeigen (Probleme könnten z.B. Interferenzen zwischen den UHS-Standorten und den konventionellen

Anlagen bei zunehmender Teilnehmerzahl bereiten). Auf jeden Fall ist es offensichtlich möglich, mit derartigen UHS-Standorten eine nicht unerhebliche Zahl an niedrig montierten Antennenstandorten einzusparen. Sinnvoll realisiert werden kann das UHS-Konzept allerdings nur bei größeren Städten (typ. > 25.000 Einwohner), für kleinere Ortschaften ist diese Versorgungsstrategie sicherlich unrealistisch. Außerdem muss ein ausreichend hoher Antennenstandort (> 100 m) zur Verfügung stehen.

In folgender Tabelle sind zusammenfassend nochmals die wesentlichen Zusammenhänge zwischen Netzversorgung und Kapazität bei GSM und UMTS vergleichend gegenübergestellt:

GSM	UMTS
Die Netzabdeckung ist unabhängig vom Dienst.	Der Begriff "Netzabdeckung" schließt immer die Annahme einer Datenrate und Auslastung der Funkzellen ein.
Die momentane Last im Netz beeinflusst die Qualität beim einzelnen Teilnehmer nicht wesentlich.	Der Leistungsbedarf pro Teilnehmer steigt mit dem Kapazitätsbedarf beim Teilnehmer.
Versorgung und Kapazität sind entkoppelt.	Kapazität und Versorgung sind gegeneinander "austauschbar" (d.h. niederwertige Dienste, wie Sprache, können bei gleicher Sendeleistung über größere Entfernungen übermittelt werden, als hochwertige Datendienste).

Tab. 2.1: Zusammenhang von Netzversorgung und Kapazität (Vergleich GSM - UMTS).

Frage 4: Könnten die Mobilfunksendeanlagen nicht mit deutlich niedrigerer Leistung betrieben werden, da Messungen immer wieder zeigen, dass in der unmittelbaren Umgebung einer Sendeanlage Felder generiert werden, die ein Vielfaches von dem betragen, was für ein Funktionieren der Funkverbindung notwendig wäre?

Dies ist leider nicht möglich, wenn man die oben definierten Versorgungsziele beibehalten will, ohne die Zahl der installierten Sendeanlagen erheblich zu vergrößern.

Es ist zwar richtig, dass in unmittelbarer Nähe zur Station deutlich mehr Feldstärke vorhanden ist, als zur Aufrechterhaltung der Verbindung notwendig wäre. Jedoch darf man nicht die unmittelbare Nachbarschaft des Standortes sondern den Rand der Versorgungszelle, also die Bereiche mit maximaler Entfernung zu den Antennen betrachten. Nachdem die Empfangsleistung am Telefon mit zunehmendem Abstand zur Station im städtischen Umfeld typischerweise etwa mit der vierten Potenz des Abstandes abnimmt (und nicht, wie fälschlicherweise oft angenommen, mit der zweiten Potenz, was nur bei idealer Freiraumausbreitung ohne Hindernisse gilt), ergibt sich eine rapide Abnahme der Empfangsleistung mit zunehmender Entfer-

nung. Beispielsweise würde in diesem Fall in einem Kilometer Abstand zur Station am Telefon nur 1/10.000 der Empfangsleistung auftreten, die man in 100 Meter Abstand erhalten würde. Zusätzlich muss noch berücksichtigt werden, dass auch noch am Zellrand die Versorgung innerhalb von Gebäuden sichergestellt werden soll. Als Gebäudedämpfung kann dabei zusätzlich der Faktor 100 (20 dB) bezüglich der Leistung angesetzt werden. Somit ergibt sich also in einem Kilometer Entfernung innerhalb von Gebäuden eine Empfangsleistung am Telefon, die typischerweise 1 Millionstel des Wertes beträgt, mit dem man im Freien in 100 Meter Abstand zur Anlage rechnen kann (d.h. Dämpfungszunahme um 60 dB).

Reduziert man nun die Sendeleistung der Station beispielsweise um den Faktor 100, so bedeutet das (bei Anwendung der obigen vereinfachten Annahmen) eine Reichweitenreduzierung auf etwa ein Drittel des bisherigen Radius. Die Station versorgt also nur noch ein Neuntel der bisherigen Fläche. Um eine bestimmte Region weiterhin lückenlos zu versorgen, wären also etwa neunmal mehr Stationen notwendig als bisher. Damit wird natürlich die Wirtschaftlichkeit derartiger Netze erheblich in Frage gestellt (Außerdem stellt sich nun die Frage: Würden sich überhaupt genügend geeignete Standorte anmieten lassen?). Zudem ergeben sich wesentlich häufiger Zellwechsel ("Handover"), wenn sich die Teilnehmer bewegen, was wiederum zu einer Verringerung der Netzqualität und -kapazität führt, da für jeden Zellwechsel Systemressourcen verbraucht werden. Außerdem ist es höchst fraglich, ob eine derartige Verdichtung (z.B. 180 Standorte statt 20 innerhalb eines Stadtgebietes) in der Öffentlichkeit Akzeptanz finden würde, da man nicht vergessen darf, dass das Aussehen der Standorte (Antennengröße) sich grundsätzlich nicht verändern würde, auch wenn die Immissionswerte, die von den Antennen erzeugt werden, natürlich im Mittel geringer sind. Eingehender wird diese Fragestellung in Kapitel 4.1 behandelt.

Zusätzlich ist zu bedenken, dass die Funknetzplanung auch gewisse Leistungsreserven bei den Versorgungsberechnungen vorhalten sollte, denn es muss gewährleistet werden, dass die Netzabdeckung beispielsweise auch bei schlechten Wetterbedingungen (starker Regen, Schneefall) sichergestellt ist. Auch jahreszeitlich bedingte Zusatzdämpfungen (beispielsweise durch Laubbäume) sind angemessen zu berücksichtigen. Auch die starken kleinräumigen Feldstärkeschwankungen die insbesondere im städtischen Umfeld durch Mehrwegeausbreitungseffekte generiert werden, müssen berücksichtigt werden ("Fadingreserve"), da es sonst zu unerträglich hohen Schwankungen der Übertragungsqualität oder sogar zu häufigen Verbindungsabbrüchen in derartigen Gebieten kommen kann.

Frage 5: Wie wirkt sich die Netzstruktur auf die Immission der Telefonnutzer selbst aus?

Bei dieser Frage geht es darum, zu klären, welchen Einfluss eine funktechnisch optimierte Netzstruktur auf die Immission des Telefonnutzers ausübt. Immissionen von Basisstation und Mobiltelefon sind zunächst grundsätzlich unterschiedlich: Bei den Immissionen, verursacht durch Basisstationen handelt es sich um Felder, denen man sich unfreiwillig ausgesetzt fühlt, und die 24 Stunden am Tag je nach Aufenthaltsort mehr oder weniger intensiv vorhanden sind. Allerdings zeigen Messungen deutlich, dass selbst bei Vollauslastung der verursachenden Anlagen die Immissionen durch Sendestationen im Regelfall 0,1 Promille des Grenzwertes

tes (bezogen auf die Leistungsflussdichte) nicht überschreiten und selbst bei besonders exponierten Wohnbereichen 1 Prozent des Grenzwertes (bezogen auf die Leistungsflussdichte) nur in seltenen Ausnahmefällen erreicht werden (siehe Kapitel 5).

Wie in Kapitel 4.2 gezeigt wird, erreichen bei der Handynutzung (die der Einzelne allerdings meist als freiwillige, selbst gewollte Immission sieht) die Immissionen am Kopf bei voller Sendeleistung des Gerätes je nach Typ Werte von etwa 20 bis 90 Prozent des Grenzwertes (äquivalente Größe zur Leistungsflussdichte: SAR = "spezifische Absorptionsrate"), wobei noch angemerkt werden muss, dass der SAR-Grenzwert für die Handynutzung (Teilkörperexposition am Kopf) selbst noch einmal um den Faktor 25 größer ist, als der Grenzwert für die Bewertung von Immissionen durch Sendeanlagen (Ganzkörperexposition). Der Kopf eines Handynutzers kann also typisch lokal einer deutlich höheren Immission ausgesetzt sein, als man es in der Nähe einer Mobilfunkbasisstation ist, allerdings nicht 24 Stunden am Tag, sondern nur während der Zeit des Telefonates.

Vergleicht man also die leistungsbezogene Grenzwertausschöpfung von Mobiltelefon und Basisstation, so kommt man bei Anwendung typischer Messwerte zu etwa folgendem Ergebnis:

$$\text{Ausschöpfungsgrad Basisstation} / \text{Ausschöpfungsgrad Handy} = 0,01 \% / 50 \% = 1/5.000$$

Die Grenzwertausschöpfung in der Nähe einer Mobilfunkstation ist also typisch um den Faktor 5.000 geringer als die lokale Ausschöpfung des SAR-Grenzwertes bei Benutzung eines Mobiltelefons.

Daher stellt sich insbesondere dem Strahlenschützer die Frage, welchen Immissionen man mehr wissenschaftliche Aufmerksamkeit widmen sollte, der "unfreiwilligen" 24-Stunden-Exposition bei Basisstationen mit Werten typischerweise deutlich unter einem Promille vom Grenzwert oder den "freiwilligen" kurzzeitigen Immissionen bei Telefonnutzung mit Werten nahe am Grenzwert. Nationale und internationale Expertengruppen sehen den wissenschaftlichen Fokus derzeit deutlich bei den Telefonen.

Will man die Immissionen durch Mobiltelefone näher analysieren, so muss man berücksichtigen, dass GSM-Geräte ihre Sendeleistung bei Vorhandensein einer guten Verbindungsqualität sehr deutlich reduzieren können. Typisch ist hierbei ein Reduktionsfaktor von 100. Befindet man sich also in einer gut versorgten Region, ist der Kopf des Nutzers etwa hundertfach geringer exponiert als bei schlechter Verbindung (unter Vernachlässigung der ersten Sekunden zu Beginn eines Gesprächs bzw. unmittelbar nach einem Zellwechsel, da hier das Telefon zunächst immer mit seiner maximalen Leistung sendet und die Leistungsreduktion erst nach einigen Sekunden wirksam wird). Ein Beispiel zu diesem Effekt findet sich in Kapitel 7.2.1.

Für UMTS ist ebenfalls eine Leistungsregelung vorgesehen, so dass hier die gleichen Grundtatsachen gelten. Ein Unterschied zu GSM besteht bei UMTS zusätzlich: Während bei GSM in der Phase des Gesprächsaufbaus bzw. nach einem "Handover" mit der maximalen Leistung des Gerätes (ein oder zwei Watt) gesendet wird, und erst nach einigen Sekunden bei guter Verbindungsqualität die Leistung reduziert wird, arbeiten UMTS-Endgeräte genau umge-

kehrt. Sie senden zunächst mit sehr niedriger Leistung und erhöhen diese bei Bedarf anschließend so weit, als für die Verbindung notwendig.

Ein qualitätsabhängiges Regelverhalten kann in ähnlicher Form auch bei der Basisstation beobachtet werden. Wickelt die Basisstation gerade Telefongespräche ab, bei denen überwiegend gute Verbindungsqualität herrscht, so ist die abgestrahlte Leistung und damit die Immission bei den Anwohnern der Umgebung im Mittel geringer, als wenn die meisten Gespräche schlechte Verbindungsqualität aufweisen. Allerdings ist der qualitätsabhängige Immissionsunterschied hier bei weitem nicht so stark ausgeprägt, wie beim Telefon.