

Der Effekt der Zellatmung macht es also notwendig, dass bei der Netzplanung eine gewisse Reserve eingeplant werden muss, um nicht bei größer werdender Teilnehmerzahl bzw. Übertragungsgeschwindigkeit im UMTS-Netz plötzlich Versorgungslücken zu generieren. 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, nur die bereits vorhandenen GSM-Standorte mit UMTS-Systemen zu erweitern, sondern es muss meist 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 nochmals 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 Inhausversorgung mit Sprach- 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 ersten von den Netzbetreibern angebotenen einfachen 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 von der Bundesnetzagentur 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, müssen die Zellen flächenmäßig sehr klein gehalten werden.

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.

Tabelle 3.1: Zusammenhang von Netzversorgung und Kapazität (Vergleich GSM - UMTS)

Inzwischen sind insbesondere die beiden großen Netzbetreiber dazu übergegangen, die Übertragungsgeschwindigkeit ihrer UMTS-Netze noch erheblich zu steigern, so dass Übertragungsraten von mehreren Megabit pro Sekunde möglich werden (Stichwort: HSDPA = High Speed Downlink Packet Access). Dies ist notwendig, um als Konkurrenz gegenüber der leitungsgebundenen DSL-Übertragung bestehen zu können. Werden Standorte für derart hohe Übertragungsraten geplant, ist ihre Positionierung noch kritischer, als bei der ersten Generation von UMTS-Anlagen mit maximal 384 kbit/s, da hohe Übertragungsraten nur bei ausreichend guten Signalstörleistungsverhältnissen möglich sind.

3.3 Häufig diskutierte Fragestellungen und Minimierungsansätze

3.3.1 Freihaltebereiche für Mobilfunkanlagen

Eine ebenfalls sehr häufig gestellte Frage beschäftigt sich mit der Möglichkeit, 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, wie bereits weiter oben erläutert, eine lückenlose Befeldung mit ausreichend starken Mobilfunksignalen notwendig. Die Stationen müssen dazu, angepasst an topographische Gegebenheiten, in geeigneten 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 dazu die Ausführungen in Abschnitt 3.3.3). 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 flächenhafte Versorgung hat.

In Bild 3.6 ist die UMTS-Versorgung im Innenstadtbereich von Regensburg dargestellt. Die blaue Farbe gibt die Bereiche an, in denen eine UMTS-Nutzung mit der hier 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.

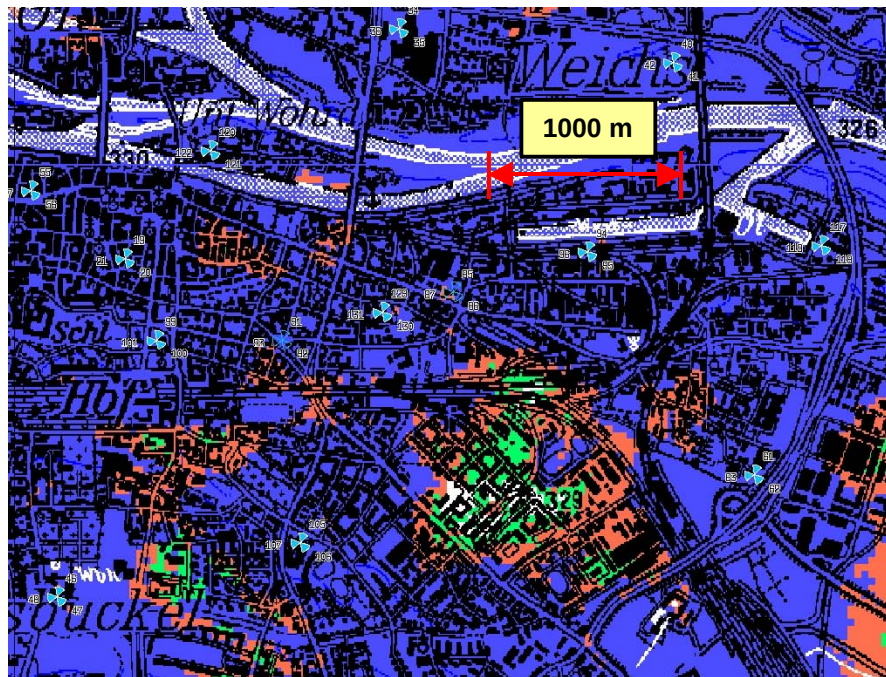


Bild 3.6: UMTS-Versorgung im Innenstadtbereich von Regensburg (Die hellblauen Symbole stellen die Basisstationsstandorte dar)

Offensichtlich fehlt zur Sicherstellung einer flächendeckenden UMTS-Versorgung im dargestellten Bereich noch eine Station südwestlich der Bahnlinie. Ein Schließen dieser Lücke durch Sendleistungserhöhung der Nachbarstationen ist aus den bereits beschriebenen Gründen nicht möglich.

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 (Bild 3.7).



Bild 3.7: 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 (Bild 3.8).

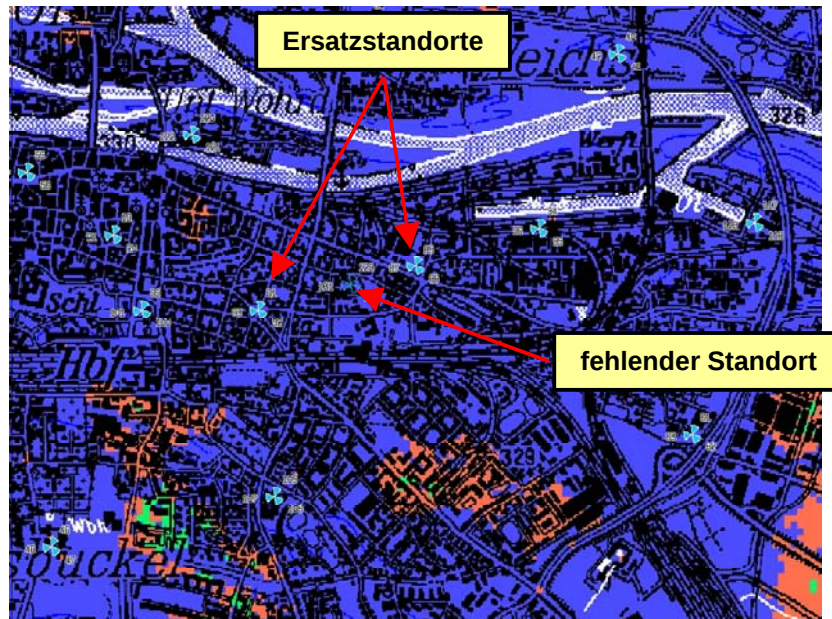


Bild 3.8: Lückenschluss durch zwei Ersatzstandorte

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.

3.3.2 Niedrigere Sendeleistungen

Häufig wird argumentiert, dass die Mobilfunksendeanlagen auch mit deutlich niedrigerer Leistung betrieben werden könnten, 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 bei der Beurteilung der Versorgungsgüte 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 ungemein starke Abnahme der Empfangsleistung mit zunehmender Entfernung. Beispiels-

weise 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. Es 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 Reichweitenverringering 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 neun mal mehr Stationen notwendig als bisher. Damit wird natürlich die Wirtschaftlichkeit derartiger Netze erheblich in Frage gestellt (Außerdem ergibt sich nun vermutlich ein anderes Problem: Würden sich überhaupt genügend geeignete Antennenstandorte anmieten lassen?). Zudem sind dann wesentlich häufiger Zellwechsel („Handover“) notwendig, 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. 90 Standorte statt 10 innerhalb eines Stadtgebietes) in der Öffentlichkeit Akzeptanz finden würde, da man nicht vergessen darf, dass sich das Aussehen der Standorte (Antennengröße) grundsätzlich nicht verändern würde, auch wenn die Immissionswerte, die von den Antennen erzeugt werden, natürlich im Mittel geringer ausfallen.

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 sehr großen Schwankungen der Übertragungsqualität oder sogar zu häufigen Verbindungsabbrüchen in derartigen Gebieten kommen kann.

3.3.3 Einfluss der Netzstruktur auf die Immission des Telefonierenden

Abschließend soll dargestellt werden, 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 Volllast der verursachenden Anlagen die Immissionen durch Sendestationen im Regelfall 0,1 Promille des Grenzwertes (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 wird [WUS 05].

Bei der Handynutzung hingegen (die der Einzelne allerdings meist als freiwillige, selbst gewollte Immission sieht), erreichen 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 vielfach 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 etwa zu folgendem Ergebnis [WUS 05]:

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

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 dem Strahlenschützer und auch der Politik die Frage, welchen Immissionen man mehr 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 sehr 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).

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 umgekehrt. 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.

Es stellt sich also bei allen Überlegungen zur Minimierung der Immissionen von Mobilfunkbasisstationen immer auch die Frage, ob dies „um jeden Preis“ ohne Beachtung der Immissionen der Mobiltelefonnutzer zu geschehen hat. Natürlich ist die Benutzung eines Mobiltelefons oft eine freiwillige Entscheidung, während Basisstationen auch gegen den Willen von Anwohnern errichtet werden, so dass hier keine eigene Wahlfreiheit besteht, sich dieser Art von Exposition auszusetzen oder nicht. Andererseits kann bei einer Zahl von mehr als 80 Millionen Mobiltelefonkunden in Deutschland nicht mehr von einer „Randgruppe“ der Bevölkerung gesprochen werden, so dass diese Personen durchaus beanspruchen können, bei Minimierungsüberlegungen mit einbezogen zu werden. Hier ist also letztendlich die Kommune aufgefordert, dem Gutachter entsprechende Vorgaben bei der Minimierungsstrategie zu definieren. Typische Vorgaben an den Gutachter betreffen beispielsweise folgende Fragestellungen:

- Ist das Ziel eine Minimierung der in der Umgebung von Sendeanlagen auftretenden „Spitzenimmission“ oder soll eine Minimierung der mittleren Immission in der Umgebung erreicht werden?
- Ist allein die Immission der Anwohner in der Umgebung der Sendeanlagen zu beachten oder sollen auch die Immissionen der Mobiltelefonnutzer in die Überlegungen einbezogen werden?
- Gibt es bestimmte „sensible Bereiche“ (z.B. Schulen, Kindergärten), die bei der Minimierung besonders berücksichtigt werden sollen?
- Gibt es konkrete Zielgrößen (z.B. maximale Immissionswerte), die möglichst nicht überschritten werden sollen?
- Sind neben den Aspekten der Feldimmission auch andere Gesichtspunkte bei der Standortbeurteilung zu berücksichtigen (z.B. Ortsbild)?

Ohne entsprechende Klärung derartiger Fragestellungen kann der Gutachter seine Arbeit nicht sinnvoll durchführen.

3.4 Fazit: Realistische Ansatzpunkte zur Minimierung der Mobilfunkimmission

Zur Verbesserung der Netzqualität und -kapazität beim GSM-Mobilfunk bzw. im Rahmen des Aufbaus leistungsfähiger UMTS-Netze sind also weiterhin Anfragen bezüglich neuer Mobilfunkanlagen bei den Kommunen zu erwarten (wenn vermutlich auch nicht mehr in der Intensität, wie es bisher der Fall war).

In den vorgehenden Abschnitten wurde dargelegt, dass aufgrund der physikalischen Randbedingungen der Wellenausbreitung, regulatorischer Vorgaben sowie der betreiberinternen Qualitätsvorgaben und Kundenprofilen die optimale Positionierung einer Basisstation vielen Einflüssen unterliegt. Die Planung effizienter Mobilfunknetze mit einer möglichst geringen Anzahl an Sendestandorten ist daher keine einfache Aufgabe, sondern benötigt großes technisches Fachwissen, die Unterstützung durch komplexe und sehr kostspielige Planungssoftware sowie die Kenntnis betreiberinterner Daten (z.B. Versorgungsziel, Kapazitätswerte, Nachbarstandorte). Ohne diese personelle und technische Ausstattung bzw. die Verfügbarkeit der notwendigen Betreiberinformationen ist es nicht möglich, eine seriöse, fundierte Netzplanung unabhängig von den Betreibern durchzuführen.

Die Kosten für derartige computergestützte Planungen bewegen sich bei Städten mit mehr als 50.000 Einwohnern üblicherweise im sechsstelligen Bereich. In [MÜN 03] wird beispielsweise von Kosten in der Größenordnung von etwa 2 bis 3 Euro je Einwohner für eine derartige Standortplanung gesprochen.

Zusätzlich sollte noch folgendes bedacht werden: Jede neu zu errichtende Basisstation bedeutet für den Netzbetreiber einen hohen finanziellen und organisatorischen Aufwand. Insofern ist die Aufstellung von neuen Stationen kein „Selbstzweck“, sondern dient der Optimierung der funktechnischen Versorgung. Ihre Errichtung wurde im Vorfeld vom Betreiber vermutlich bezüglich der technischen Eignung und wirtschaftlichen Notwendigkeit eingehend bewertet. Es ist also schon aus diesem Grund zweifelhaft, dass ein extern erstelltes Konzept, welches von sich behauptet, mit deutlich weniger Basisstationen eine qualitativ vergleichbare Versorgung gewährleisten zu können wie mit dem ursprünglichen vom Netzbetreiber geplanten Netz, dies in der Realität auch wirklich einhält.

Im Gegensatz zur Erstellung kostspieliger flächendeckender Konzepte, die vermutlich aus obigen Gründen von den Betreibern nicht akzeptiert werden, besteht bei der Optimierung einzelner Standorte (z.B. im Rahmen von neuen Standortanfragen) eher die Chance einer Minimierung (auch im Konsens mit den Betreibern). Eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Minimierung der Immission einzelner Standorte werden beispielsweise in [WUS 05] (insbesondere in Kapitel 7) vorgestellt und ausführlich diskutiert. Beispielsweise werden dort für die Suche von günstigen Standorten u.a. folgende Möglichkeiten vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile diskutiert:

- Standorte im Außenbereich
- Freihaltebereiche um sensible Einrichtungen
- Hohe Standorte

- Konzentration von Mobilfunkanlagen auf wenige Standorte
- Verteiltes Standortkonzept

Auch für Standorte, die bereits errichtet sind, werden einige Optimierungsmaßnahmen angesprochen:

- Veränderung der horizontalen Ausrichtung und der vertikalen Strahlneigung (Downtilt) der Antennen
- Verringerung des Einflusses vertikaler Nebenkeulen im Antennendiagramm
- Verwendung von Antennen mit kleinem vertikalen Öffnungswinkel
- Erhöhung des Antennenträgers

Diese werden bezüglich ihrer Effizienz und ihres Einflusses auf die Versorgungsgüte diskutiert. Obwohl streng genommen das Vorhandensein einer proportionalen Dosis-Wirkungs-Beziehung bei hochfrequenten Feldern unterhalb der geltenden Grenzwerte nicht geklärt ist, wird bei Minimierungsüberlegungen natürlich immer angestrebt, dass möglichst geringe Immissionen in der Umgebung von Sendeanlagen erzeugt werden, was auch dem von der SSK geforderten Minimierungsprinzip [SSK 01] entspricht. Streng genommen kann allerdings die Frage nicht eindeutig beantwortet werden, ob es besser ist, die „Spitzenimmissionen“ in der Umgebung einer Basisstation zu minimieren unter gleichzeitiger Inkaufnahme eines Anstiegs der mittleren Immission im weiteren Umfeld (so wie es unter Umständen zum Beispiel bei einer Erhöhung des Antennenstandortes auftritt), oder stattdessen „Spitzenimmissionen“ (natürlich unterhalb der geltenden Grenzwerte) zuzulassen, wenn dadurch die mittlere Immission in der Umgebung geringer wird. Aus diesem Grund ist jede denkbare Maßnahme sowohl bezüglich ihrer Wirkung auf die mittlere Immission in der Umgebung, als auch auf die entstehenden „Spitzenimmissionen“ im Nahbereich zu bewerten. Ob die Minimierung der „Spitzenimmissionen“ im Fokus stehen soll, oder ob stattdessen eher eine besonders niedrige mittlere Immission angestrebt wird, muss vom Auftraggeber festgelegt werden. Besonders empfehlenswert erscheinen natürlich immer Maßnahmen, die sowohl die „Spitzenimmission“ als auch die durchschnittliche Immission verringern.