

4 Minimierungskonzepte auf Seiten von Basisstation und Mobiltelefon

Technische Weiterentwicklungen haben dazu geführt, dass moderne digitale Mobilfunksysteme wie GSM oder UMTS beispielsweise durch höhere Empfängerempfindlichkeit, optimierte Übertragungsverfahren oder der Einführung von intelligenten Leistungsregelungsmechanismen mit geringeren effektiven Sendeleistungen auskommen als frühere analoge Systeme. Mit dieser Leistungsreduzierung ging auch eine Verringerung der Immission durch diese Systeme einher.

In diesem Abschnitt soll abgeschätzt werden, wie groß das Potenzial für eine weitere Immissionsminimierung bei derzeitigen und zukünftigen Mobilfunksystemen durch technische Maßnahmen ist. Die Maßnahmen werden dahingehend unterteilt, ob sie Anwendung auf Seiten der Basisstationen oder der Mobiltelefone finden. Davon unabhängig ist die Tatsache, dass technische Änderungen z.B. auf Seiten des Mobiltelefons nicht nur in einer verringerten individuellen Exposition (Mobiltelefonnutzer) resultieren, sondern auch Auswirkungen auf die kollektive Exposition (z.B. im Umfeld einer Basisstation lebende Personen) haben kann.

In vielen Fällen ist es möglich, diese Techniken miteinander zu kombinieren, wodurch sich ein entsprechend größeres Minimierungspotenzial ergibt.

4.1 Minimierungstechniken auf Seiten der Basisstation

4.1.1 Engmaschige Sendernetze

Steht zur großflächigen Versorgung der Bevölkerung mit Mobilfunk die versorgungstechnische Gewährleistung einer bestimmten Mindestfeldstärke an jedem Punkt im Vordergrund, kann dies z.B. mit einem sogenannten "konzentrierten Netzkonzept" mit wenig Basisstationen hoher Sendeleistung realisiert werden. Im Extremfall würde dies bedeuten, dass in der Mitte Deutschlands eine Basisstation errichtet würde, die mit solch einer immensen Sendeleistung betrieben werden müsste, dass auch an den Grenzen Deutschlands zu den Nachbarländern die für eine Mobilfunkverbindung notwendige Mindestfeldstärke vorhanden wäre. Unabhängig von Kapazitätsaspekten und der Problematik, dass die leistungsschwachen Mobiltelefone nicht in der Lage wären, im Uplink ebenfalls diese großen Entfernungen zu überbrücken, hat dieses konzentrierte Konzept aus Immissionssicht den Nachteil, dass vor allem in unmittelbarer Nähe der Sender Immissionsspitzen auftreten, die eine Einrichtung von großflächigen Sicherheitsbereichen im direkten Umfeld der Sendeanlagen notwendig machen, in denen ein Zutritt der Allgemeinbevölkerung nicht erfolgen darf. Zur Reduzierung dieser Immissionsspitzen wäre es sinnvoll, die Feldstärkeversorgung *gleichmäßiger* zu gestalten. Dies kann z.B. dadurch erfolgen, dass man sehr viele Sender mit entsprechend kleiner Sendeleistung aufbaut und damit vom "konzentrierten Senderkonzept" zum sogenannten "verteilten Senderkonzept" übergeht. Die Reduzierung der Sendeleistung resultiert aus der Tatsache, dass die maximale Entfernung des Mobiltelefons zur nächsten Basisstation im verteilten Konzept kleiner ist als beim konzentrierten Konzept. Da bei Verdichtung des Netzes die erforderliche Sendeleistung

zur Gewährleistung einer bestimmten Mindestfeldstärke in realen Umgebungen mindestens mit dem Quadrat des Abstandes sinkt, werden in gleichem Maße die Immissionsspitzen in direkter Nähe der Basisstationen reduziert.

Dies ist in Abbildung 4.1 veranschaulicht:

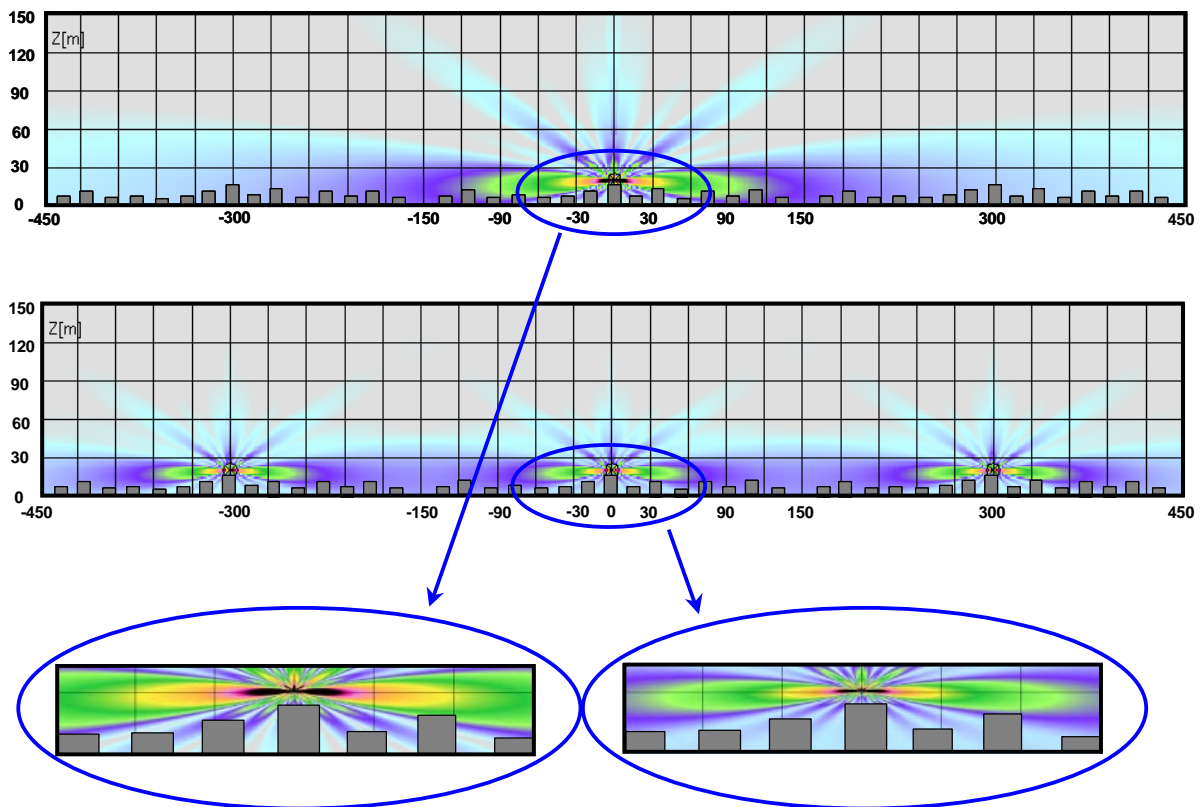


Abb. 4.1: "Konzentriertes" (oben) und "verteiltm" (unten) Senderkonzept. Im "verteiltm Senderkonzept" wurde die Sendeleistung auf ein Viertel des Wertes vom konzentrierten Konzept reduziert.

Unabhängig von einer damit verbundenen Reduzierung der ortsbezogenen Immission im direkten Umfeld der Sendeanlagen kann auch gezeigt werden [BAL 01, BOR 02], dass mit diesem Konzept die gesamte Netzsendeleistung reduziert wird. Unter Netzsendeleistung wird hier die gesamte in das konzentrierte bzw. verteilte Sendernetz eingespeiste Sendeleistung verstanden, die zur Realisierung der Mindestfeldstärke an jedem Punkt des Versorgungsgebietes notwendig ist (Siehe dazu auch die überschlägigen Berechnungen in Kapitel 3.2.1). Da diese abgestrahlte Sendeleistung in der umliegenden Umwelt umgesetzt wird, ist die Gesamt-sendeleistung direkt proportional zur Gesamtimmission. Das bedeutet, dass mit einem verteilten Netzkonzept auch die Gesamtimmission reduziert wird.

Im folgenden soll anhand eines Simulationsbeispiels aufgezeigt werden, in welcher Größenordnung eine Reduzierung der Immission bei einer Netzverdichtung möglich ist. Das Beispiel

wurde aus einer Studie der IMST GmbH für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen entnommen [BOR 02]. Die Berechnungen erfolgten mit einem wellenausbreitungstechnischen Simulationsmodell, dem so genannten COST-WI Modell, für ein Kleinstadtszenario und ein Großstadtzentrum. Im folgenden werden die Ergebnisse für das Kleinstadtszenario dargestellt:

Wird durch Sendernetzverdichtung die Sendeleistung jeder einzelnen Basisstation reduziert, verringert sich der Zellradius, da die Sendeleistung nun nicht mehr ausreicht, um bis zu den Rändern der Originalzelle eine ausreichende Funkversorgung zu gewährleisten. Die sich dabei ergebenden Größenverhältnisse sind in Abbildung 4.2 dargestellt: Bei einer Reduzierung der Sendeleistung auf beispielsweise 50 % (-3 dB, rote Linie in Abbildung 4.2) schrumpft der Zellradius von ursprünglich etwa 1800 m auf jetzt 1500 m.

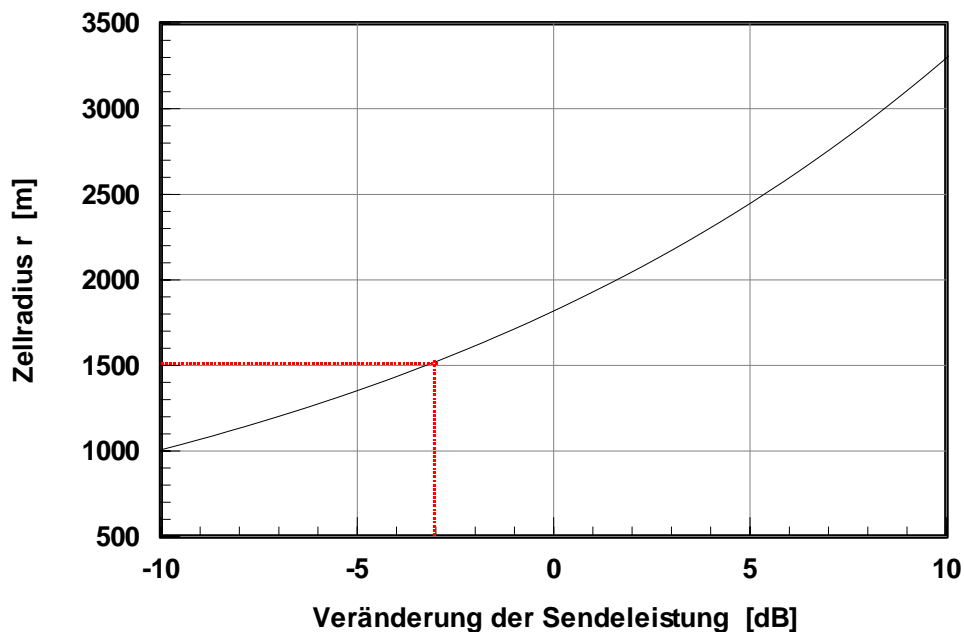


Abb. 4.2: Simulierte Veränderung des Radius einer Mobilfunkzelle in Abhängigkeit der Sendeleistung, Kleinstadtszenario [BOR 02]

Eine Verringerung des Zellradius bedeutet natürlich nichts anderes als eine Verkleinerung der Zellfläche. Damit nun keine Versorgungslücken im Mobilfunknetz entstehen, müssen entsprechend mehr Basisstationen errichtet werden, damit weiterhin eine flächendeckende Versorgung gewährleistet ist. Die sich daraus ergebende Verdichtung des Netzes ist in Abbildung 4.3 dargestellt: Im obigen Beispielfall würde die Zellfläche auf 70 % des ursprünglichen Wertes sinken (schwarze Kurve). Das bedeutet, dass die zur flächendeckenden Versorgung benötigte Anzahl der Basisstationen auf 140 % anwachsen müsste (blaue Kurve).

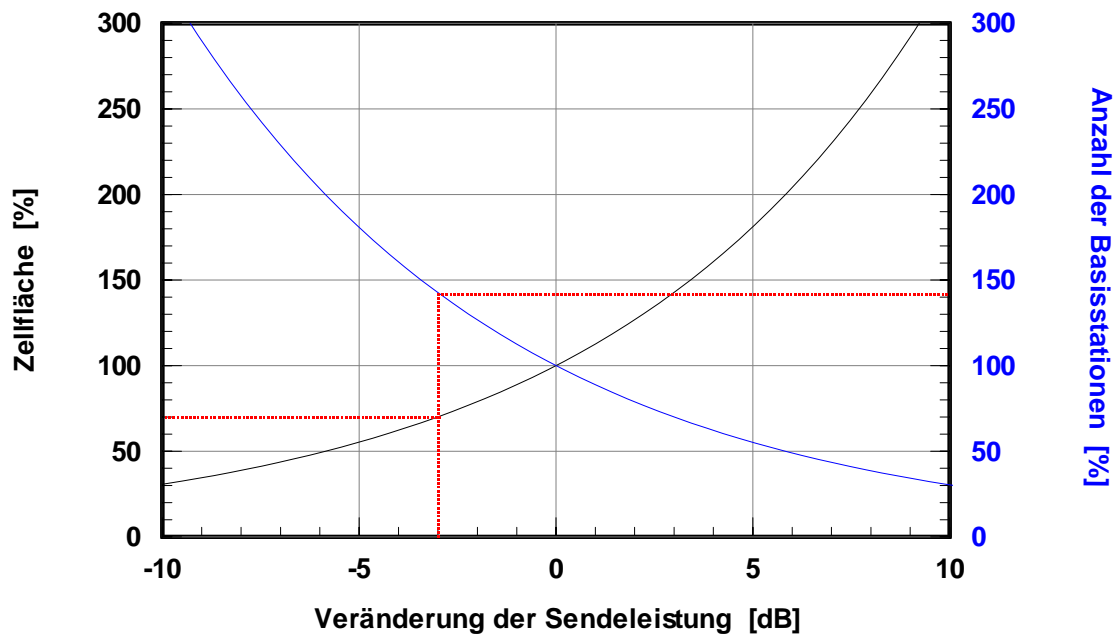


Abb. 4.3: Simulierte Veränderung der normierten Fläche einer Mobilfunkzelle sowie der zur Ausleuchtung eines Gebietes notwendigen Anzahl von Sendern in Abhängigkeit der Sendeleistung, Kleinstadtszenario [BOR 02]

Durch diese Verdichtung des Netzes sinkt jedoch nicht nur die Sendeleistung jeder einzelnen Station (und damit auch die durch sie unmittelbar erzeugte Immission), sondern auch die gesamte Netzsendeleistung und damit auch die Gesamtimmission. Dies ist in Abbildung 4.4 gezeigt; eine Reduzierung der einzelnen Sendeleistungen auf 50 % würde dazu führen, dass die Gesamtimmission auf 70 % des ursprünglichen Wertes zurückgeht.

Bei einer noch kleinzelligeren Auslegung in der Art, dass die Anzahl der Basisstationen verdoppelt wird, reduziert sich die Gesamtimmission auf 50 %. Die einzelnen Basisstationen müssten dann nur noch mit einem Viertel der ursprünglichen Sendeleistung senden (-6 dB); wodurch die Immissionsspitzen dementsprechend auch um 75 % abgesenkt werden. Diese Werte gelten bei unveränderter Beibehaltung der jeweiligen Kanalzahl der Basisstationen nach der Verdichtung, wodurch auch die Kapazität, d.h. die Zahl möglicher Gesprächsverbindungen im Gesamtnetz, steigt. Werden die Berechnungen unter dem Ansatz gleicher Kapazitäten im ursprünglich konzentrierten und nachfolgend verdichteten Netz durchgeführt, sinkt die Kanalzahl pro Anlage und der Trend der Reduzierung von Immissionsspitzen sowie Gesamtimmission verstärkt sich noch.

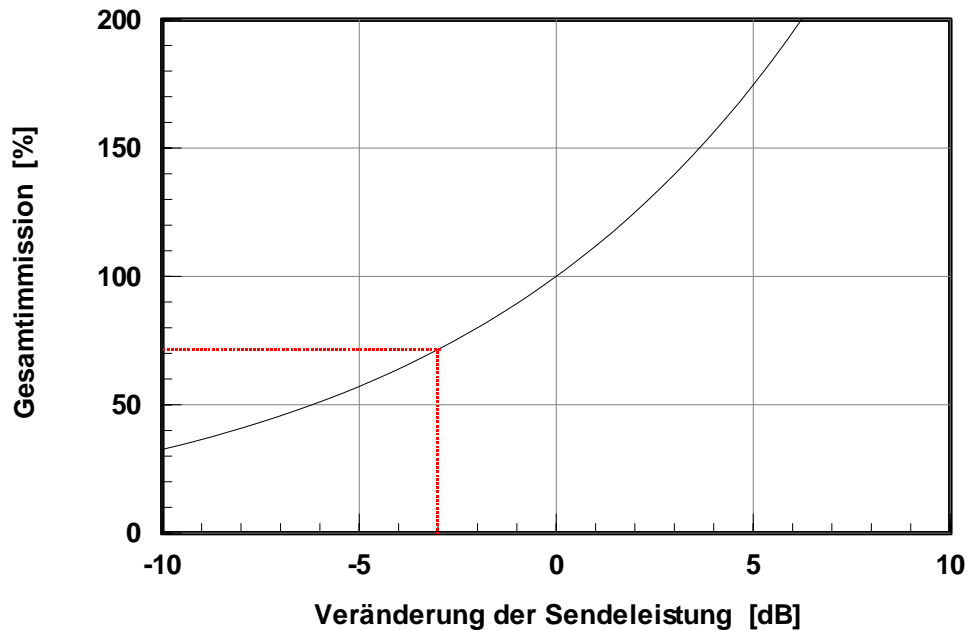


Abb. 4.4: Simulierte Veränderung der normierten Gesamtmission eines Mobilfunknetzes in Abhängigkeit der Sendeleistung der einzelnen Basisstationen, Kleinstadtszenario [BOR 02]

Ein offenkundiger Nachteil dieses verteilten Sendernetzkonzeptes ist, dass mit der Verdichtung eine Vergrößerung der Anzahl der Basisstationen im oben genannten Ausmaß einhergeht. Dieses ist in der gegenwärtig stark emotionalisiert geführten Diskussion zu dieser Thematik als kritisch zu sehen, da oftmals die Ängste von Teilen der Bevölkerung nicht mit der Mobilfunk-Immission an sich, sondern mit der Zahl der sichtbaren Basisstations-Antennen einherzugehen scheint. Mehr Antennen werden mit mehr Immission verbunden, obwohl obiges Beispiel zeigt, dass eher der umgekehrte Fall zutreffend ist. Außerdem ist die Errichtung von zusätzlichen Basisstationen zur Netzverdichtung mit erheblichen Kosten seitens der Netzbetreiber verbunden.

Eine Verdichtung des Netzes geht nicht nur mit einer Verringerung der ortsbezogenen bzw. der Gesamtmission durch die Basisstationen einher. Auch Mobiltelefone verfügen über einen intelligenten Leistungsregelungsalgorithmus, d.h. die Leistung wird seitens des Mobiltelefons so weit herunter geregelt, dass gerade noch genug Feldstärke an der betreffenden Basisstation für die Aufrechterhaltung einer Gesprächsverbindung ankommt (siehe Abbildung 4.5).

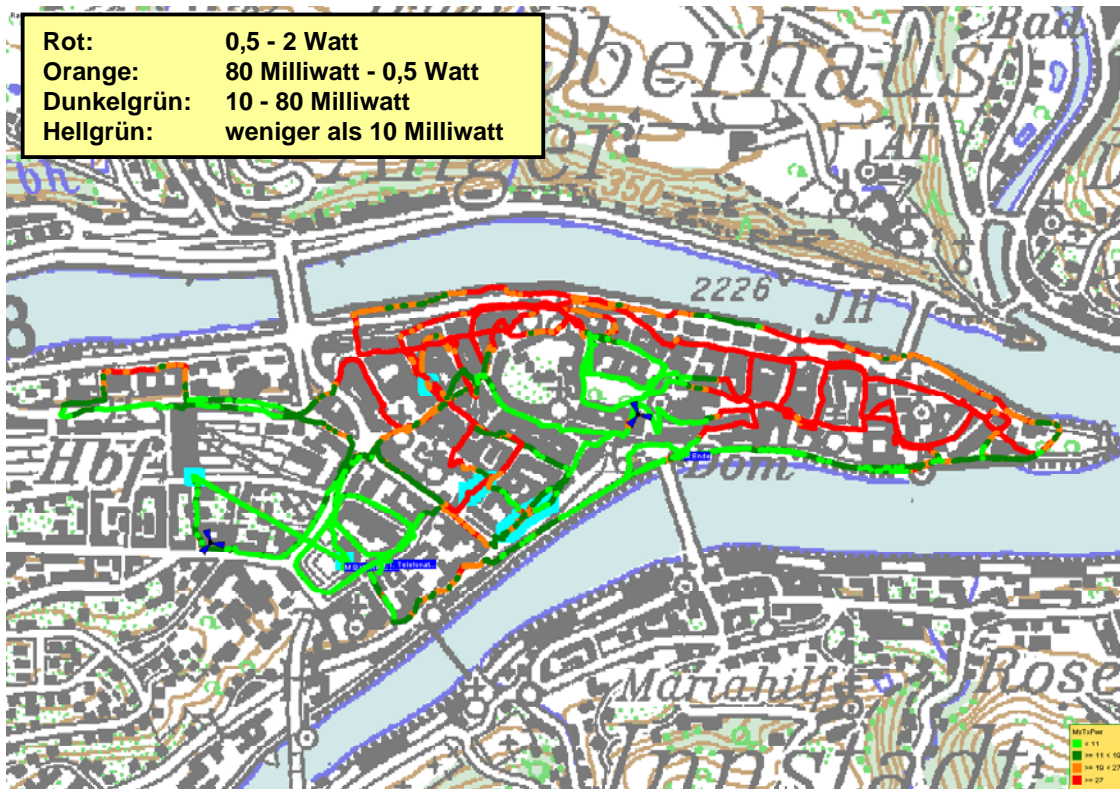


Abb. 4.5: Die Sendeleistung eines Mobiltelefon ist offensichtlich stark abhängig von der lokalen Versorgungsqualität (Messungen in Straßen der Passauer Innenstadt [WUR 04]).

Neben technischen Aspekten (Verringerung der Interferenz, Schonung der Betriebsdauer des Telefonakkus) hat diese mobiltelefonseitige Leistungsregelung auch eine expositionsrelevante Komponente. Weniger Sendeleistung am Mobiltelefon exponiert den Mobiltelefonnutzer entsprechend geringer. Da der Mobiltelefonnutzer auch in direkter Umgebung zur Basisstation während eines mobilen Telefonats primär durch das Mobiltelefon und nur zu einem geringen Ausmaß durch die Basisstation exponiert wird (siehe Kapitel 3.1), wird durch eine Reduzierung der Immission quasi "an der Quelle" eine optimale Wirkung erreicht. Die Reduzierung der Mobiltelefonimmission erfolgt dabei in derselben Größenordnung wie die Reduzierung der Sendeleistung durch die Basisstation. Dies bedeutet, dass bei der oben beschriebenen Netzverdichtung um 100 % nicht nur die Sendeleistung der Basisstation auf ein Viertel reduziert würde, sondern auch entsprechend die Sendeleistung des Mobiltelefons.

Eine Variante der oben vorgestellten Methodik der Zellverdichtung ist die Einführung von Relais-Knoten zwischen die bestehenden Basisstationen des konzentrierten Netzes. Die Relais-Knoten empfangen das gesendete Signal und senden es weiter (sogenannte "Multi-Hop Kommunikation"). Die Relais können dabei feststehend oder mobil ausgeführt werden. Im letzteren Fall können z.B. (eingeschaltete) Mobiltelefone als Relais-Knoten dienen. Durch diese sogenannte "Ad-hoc Kommunikation" kann z.B. bei Veranstaltungen mit vielen mobilen Telefonierern (Messe, Konzert o.ä.) ein übergeordnetes Netz stark entlastet werden. Diese Varianten sind ausführlich in [WIE 03, SIA 04] beschrieben worden. Gerade für den Bereich der Ad-hoc und Multi-Hop Kommunikation wird jedoch noch Forschungsbedarf gesehen, um die Verfahren grundsätzlich und vor allem bezüglich Effizienz und Sicherheit weiter untersuchen zu können. Die Basis des Verfahrens ist jedoch auch hier eine Reduzierung der ortsbezogenen Immission durch Reduzierung der Sendeleistungen von Mobiltelefon und Basisstation aufgrund der verkürzten Distanz zwischen den Sendern und Empfängern im Netz. Außerdem verringert sich wie bereits in Abschnitt 3.2 gezeigt durch die Verwendung mehrerer Sender mit kleinerer Leistung auch die Gesamtimmission.

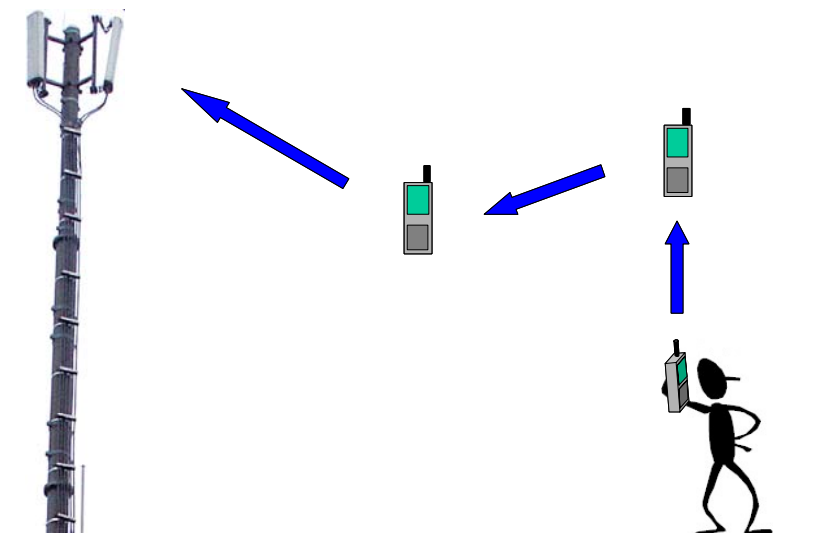


Abb. 4.6: Wirkungsweise eines Ad-hoc bzw. Multi-Hop Netzes.

4.1.2 Erhöhung der Senderstandorte

Eine weitere Möglichkeit, die Immission möglichst gleichmäßig und damit ohne ausgeprägte Immissionsspitzen zu verteilen, ist das Höhersetzen des Senders. Besonders tief montierte Basisstationen (z.B. unterhalb des mittleren Dachniveaus) erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass sich dicht benachbarte, gleich hohe Wohnungen in der Hauptstrahlrichtung befinden. Nach den in Kapitel 5 aus den Messwerten abgeleiteten Erkenntnissen bezüglich der maßgeblichen Einflussfaktoren für die Größe der Immission geht das mit einer vergleichsweise hohen Immission in den benachbarten Wohnungen einher. Ist der Antennenstandort höher, z.B. ein

Maststandort, sind die direkt umliegenden Häuser im sogenannten "Nahbereichsschatten" und erfahren in der Regel geringere Immissionen. Die Hauptstrahlrichtung "trifft" dann erst Gebäude, die vergleichsweise sehr weit entfernt sind (je nach Höhe der Basisstation und der Bebauung bis zu einige 100 m). Aufgrund der Gesetzmäßigkeiten der Wellenausbreitung ist die Strahlungsintensität in dieser Entfernung sehr viel kleiner als an einem Gebäude in direkter Nähe der Basisstation, das sich auch in Hauptstrahlrichtung befindet.

Die Auswirkungen einer Erhöhung des Senderstandortes sind in Abbildung 4.7 illustriert.

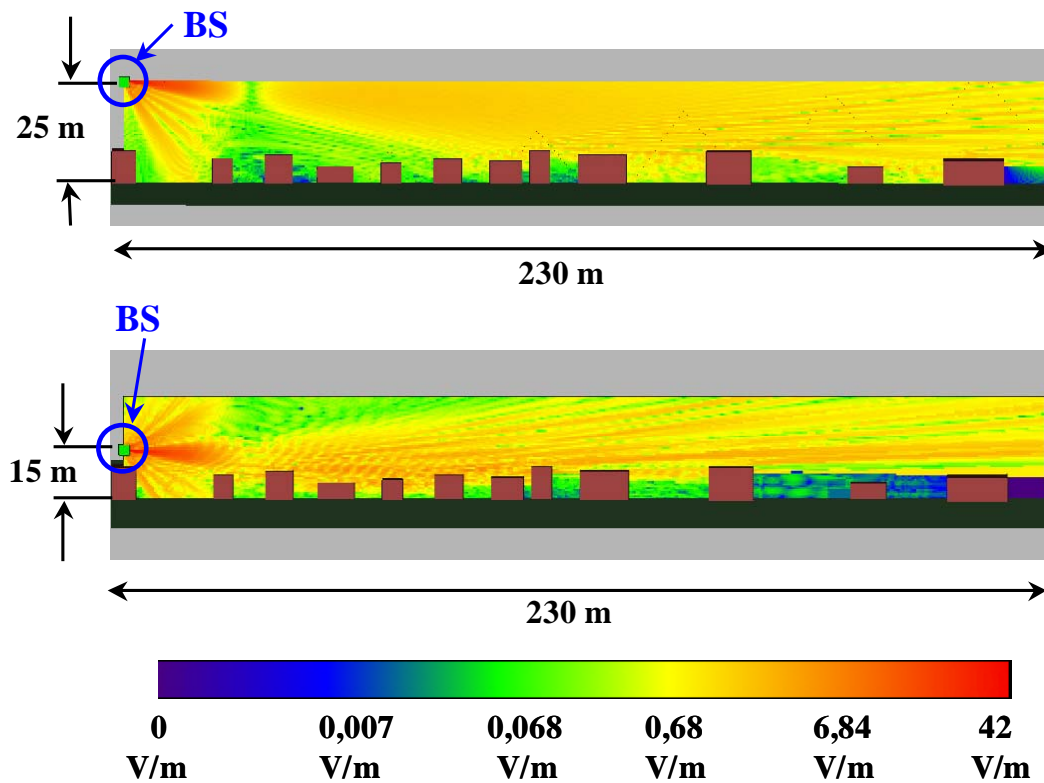


Abb. 4.7: Einfluss der Höhe des Basisstationsstandortes auf die Immissionsverteilung.

Hierzu wurden mit einem auf Strahlenoptik basierenden Programm Simulationen durchgeführt, wobei die Höhe der Mobilfunkanlage von 15 m (unten) auf 25 m (oben) variiert wurde. Das strahlenoptische Programm berücksichtigt wellenausbreitungstechnische Effekte wie Dämpfung, Beugung, Streuung und Reflexion. In Tabelle 4.1 sind die Simulationsparameter aufgeführt.

Höhe der BS über Grund in [m]	Antennentyp (Kathrein)	Frequenz in [MHz]	Sendeleistung BS in [W]	Mechanischer Downtilt in [°]	Elektrischer Downtilt in [°]
15	739665	947	20	3	0
25	739665	947	20	3	0
100	739665	947	20	8	0

Tab. 4.1: Simulationsparameter.

Die Immissionssituation wird in einer vertikalen Ebene durch den farbigen Verlauf repräsentiert. Die Obergrenze in der Legende von 42 V/m entspricht dem Grenzwert bei GSM 900.

Abbildung 4.7 zeigt deutlich, dass sich eine Erhöhung des Senderstandortes nicht automatisch in einer Reduzierung der Immission für alle umliegenden Orte widerspiegelt. Wie aus Abbildung 4.7 ersichtlich, "profitieren" in erster Linie die bislang vergleichsweise stark exponierten Orte in direkter Nähe von der Standorterhöhung. Weiter entfernt gelegene Orte, z.B. am rechten Bildrand, werden nun stärker exponiert, da für diese Orte die Basisstation nun "besser sichtbar" wird. Allerdings betrifft dies primär weiter entfernte Orte, die schon aufgrund ihres großen Abstands zur Basisstation vergleichsweise gering exponiert sind.

Eine Bezifferung der Reduzierung der ortsbezogenen Immission an den direkt betroffenen, dicht an der Station liegenden Orten ist vergleichsweise schwierig, da dies von Ort zu Ort und Szenario zu Szenario stark unterschiedlich sein kann. Für den Fall, dass eine direkt benachbarte Wohnung durch Erhöhung der Basisstation jetzt "aus der Hauptstrahlrichtung rutscht", ist ohne weiteres eine Immissionsreduzierung um den Faktor 100 bis 1000 bezüglich der Leistungsflussdichte an diesen Orten möglich.

Abbildung 4.8 zeigt im Vergleich zu Abbildung 4.7 den Fall eines mit 100 m extrem hohen Antennenstandortes. Hier ist deutlich der Nahbereichsschatten an den nahe der Sendeanlage angrenzenden Gebäuden zu sehen. Andererseits werden durch den erhöhten Standort aber auch die versorgungstechnischen "Lücken" zwischen den weiter weg liegenden Gebäuden (Mitte und rechts in Bild 4.8) besser aufgefüllt.

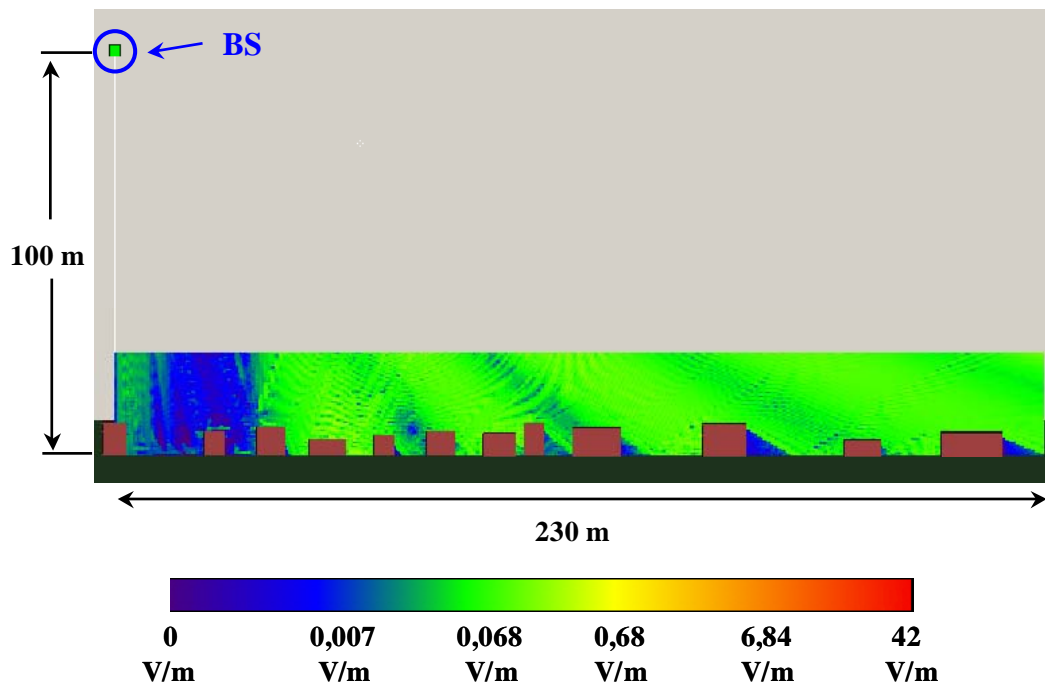


Abb. 4.8: Extremfall eines 100 m hohen Antennenstandortes. Es gilt die Farbskala von Abbildung 4.7.

Sofern über dieselbe Basisstationsantenne nicht nur gesendet, sondern auch empfangen wird, verhält sich die Immission durch Mobiltelefone bei Erhöhung des Senderstandortes theoretisch gegenläufig zur Immission durch die Basisstation: Von Orten in direkter Nähe zur Station, deren Immission durch die Basisstation deutlich abgesenkt wurden, "sieht" die Basisstation das Mobiltelefon nunmehr schlechter als vorher, so dass theoretisch das Telefon mit höherer Leistung senden müsste. Allerdings ist die Sendeleistungsregelung des Mobiltelefons nach unten begrenzt: Bei GSM beträgt die kleinste Sendeleistung immer noch etwa 1/1.000-tel der maximalen Sendeleistung. Überschlägige Berechnungen zeigen, dass in direkter Nähe zur Basisstation, aber außerhalb deren Hauptstrahlrichtung, das Mobiltelefon immer noch mit einer sehr niedrigen Leistung senden kann, um die für ein Telefongespräch erforderliche Feldstärke an der Basisstation zu erzeugen. Insofern wird hier in der Praxis ein Hochregeln der Sendeleistung nicht oder in nur unwesentlichem Umfang erfolgen müssen. Bei den weit entfernten Orten, die nach Erhöhung der Basisstation plötzlich Sicht zu dieser haben, ist dagegen mit einer deutlichen Reduzierung der Immission durch das Mobiltelefon zu rechnen.

Eine Erhöhung des Standortes von Basisstationen stößt aber auf einige technische und nicht-technische Begrenzungen:

Durch die "verbesserte Sichtbarkeit" der Basisstation am Rand der Mobilfunkzelle steigt die Interferenz mit den Nachbarzellen. Die Interferenz ist bei GSM aber vor allem bei UMTS ein kritischer Parameter, da es sich bei UMTS um ein sogenanntes "Gleichwellennetz" handelt, bei dem alle Sender eines Netzbetreibers (vorerst) auf ein und derselben Frequenz arbeiten. Bei UMTS spricht man davon, dass dessen Leistungsfähigkeit durch Interferenzen begrenzt wird. Allerdings gibt es mit dem "UHS- (Ultra High Site) System" der Firma E-Plus auch ein

Beispiel dafür, dass solche extra erhöhten Standorte (100 m oder höher) unter bestimmten Randbedingungen durchaus Einsatz finden können. So hat E-Plus seit Oktober 2004 erste UHS-Standorte unter anderem am Düsseldorfer Rheinturm, am Olympiaturm in München sowie am Colonius in Köln in Betrieb. Ob derartige Standorte in Zukunft auch bei größeren Teilnehmerzahlen eine funktionierende Alternative zu den herkömmlichen UMTS-Netzstrukturen (Dachstandorte und niedrige Masten) darstellen, werden die praktischen Erfahrungen der nächsten Jahre zeigen.

Andererseits ist es für die Netzbetreiber oftmals schwierig, solche exponierten Standorte zu finden. Häufig wird vom Vermieter der Zugang verwehrt, so dass auf tiefere und damit immissionsungünstigere Standorte ausgewichen werden muss. Weiterhin sind hier Fragen des Baurechts und des Städtebildes als einschränkende Faktoren zu nennen.

Eine ungewöhnlich erscheinende Variante des Hochsetzens der Basisstationsstandorte besteht im Einsatz von sogenannten "Hochfliegenden Plattformen" HAPS (High Altitude Platform Station, [WIE 03]). HAPS könnten z.B. in Form von Ballonen oder Seglern oder sogar Satelliten realisiert werden, die in einigen Kilometer Höhe stationär die Funkversorgung von großflächigen Gebieten übernehmen könnten. Durch die große Höhe ist die Immission an der Erdoberfläche extrem gleichmäßig und ohne Immissionsspitzen. Sie kann somit relativ einfach auf die minimal erforderliche Empfangsfeldstärke für die Mobilfunkkommunikation begrenzt werden.

Beschränkungen ergeben sich in der maximal möglichen Kapazität, d.h. der Zahl der möglichen Gesprächsverbindungen, da auch aus Kapazitätsgründen beim Mobilfunk eher immer kleinere Zellen angestrebt werden. Laut [WIE 03] kann dieses Problem allerdings durch den Einsatz von intelligenten Antennen zumindest teilweise kompensiert werden. So ergaben dort durchgeführte Berechnungen, dass ein HAPS-System als UMTS-Basisstation ca. 30.000 Nutzer versorgen könne. Allerdings sind in den Bereichen Antennennachführung bei Flugbewegungen der HAPS und Entwicklung kostensparender und sicherer Fluggeräte noch einige Forschungsanstrengungen notwendig, so dass vor dem Jahre 2008 bis 2010 nicht mit einem Einsatz solcher Systeme zu rechnen sei.

4.1.3 Antennen mit optimierter Abstrahlcharakteristik im Nebenkeulenbereich

Die immissionsverursachenden Elemente einer Basisstation sind die Antennen. In den Mobilfunknetzen wird die Sendeleistung der Basisstation durch die Antennen mit einer bestimmten Abstrahlcharakteristik großflächig um die Basisstation herum verteilt. Somit kann überall in diesem sogenannten "Sektor" eine mobile Kommunikation zwischen Mobilfunknutzer und Basisstation aufgebaut und betrieben werden.

Zum einen muss eine Basisstation also Leistung abstrahlen, da ansonsten eine Funkkommunikation nicht möglich ist. Zum anderen ist es jedoch vom Montageort (siehe oben) sowie der Art und Ausrichtung der Antenne abhängig, *wie* die Sendeleistung um die Basisstation herum verteilt wird. Wäre es beispielsweise möglich, durch eine Optimierung der Antennen-Abstrahlcharakteristik die Sendeleistung möglichst gleichmäßig und ohne ausgeprägte Immissionsspitzen zu verteilen, bestände hier ein Minimierungspotenzial für die Immission. Dies

wird in diesem Abschnitt (und später nochmals in Kapitel 6) näher untersucht. Der Fokus der Untersuchungen liegt hierbei primär in dem durch die Nebenkeulen charakterisierten Abstrahlungsbereich. Dieser ist für die Immission der Orte sowohl unterhalb der Antenne (z.B. selbes Gebäude), als auch im Nahbereich (je nach Höhe der Antenne einige Meter bis etwa 200 m) verantwortlich. Der Hauptstrahlbereich als quasi "primär erwünschter" Abstrahlungsbereich bleibt von der Betrachtung vorerst ausgeschlossen; er wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

Abbildung 4.9 zeigt an einem Beispiel, dass zwei verschiedene, im Hauptstrahlbereich nahezu identische Typen von Basisstationsantennen im Bereich der Nebenkeulen durchaus unterschiedlich abstrahlen können. Im vorliegenden Beispiel ist die grün ange deutete Antenne auf einem Haus installiert. Durch die Antenne mit der rot gekennzeichneten Abstrahlcharakteristik werden die Bewohner des Hauses eine wesentlich größere Immission erfahren als durch die Antenne mit der blau ange deuteten Charakteristik.

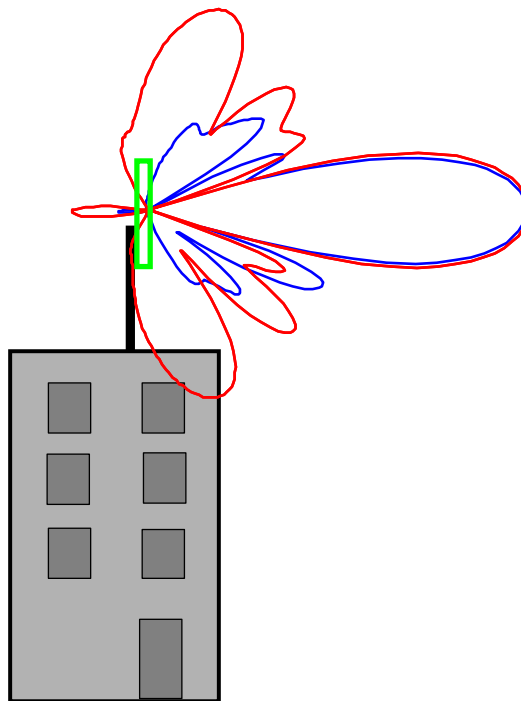


Abb. 4.9: Unterschied zwischen der Abstrahlcharakteristik von zwei Mobilfunkantennen.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die obige Darstellung bezüglich der Größenverhältnisse logarithmisch und damit stark verzerrt ist. Üblicherweise ist die abgestrahlte Sendeleistung in Hauptstrahlrichtung mindestens zehn mal größer als in Richtung der größten Nebenkeule. Durch die logarithmische Darstellung erscheinen hier die Nebenkeulen größer als sie in Wirklichkeit sind; allerdings kann durch diese Form der Darstellung ein qualitativer Vergleich unterschiedlicher Abstrahleigenschaften auch in diesem Winkelbereich anschaulich erfolgen.

Darüber hinaus ist die Immission im Nahbereich der Antenne unter besonderer Berücksichtigung der Bereiche unterhalb der Antenne auch vom Downtilt abhängig. Durch unterschiedliche mechanische und elektrische Downtiltwinkel ist es möglich, dass Orte, die vormals direkt in einer Nebenkeule lagen, plötzlich in einen Einzug zwischen zwei Nebenkeulen gelangen und umgekehrt. Dies ist in Abbildung 4.10 veranschaulicht. Bei einem mechanischen Downtilt von 10° weist deutlich ausgebildet eine Nebenkeule in Richtung des Gebäudedachs.

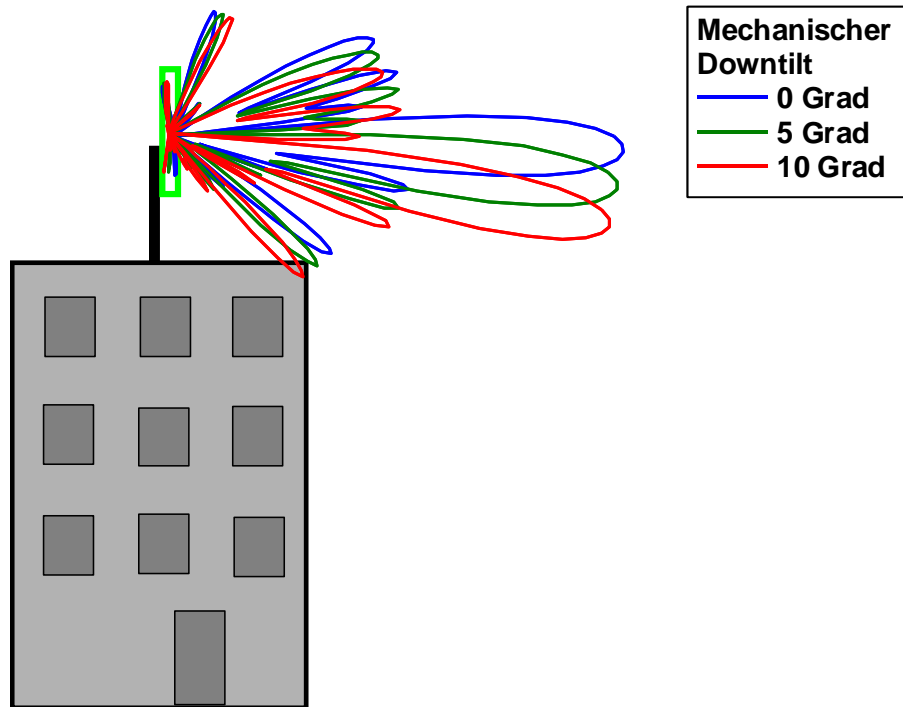


Abb. 4.10: Variation der ortsbezogenen Immission mit dem Downtilt.

Allerdings macht es wenig Sinn, Basisstationsantennen bezüglich Montagehöhe und Ausrichtung so zu „optimieren“, dass ein hinsichtlich der Immission zu minimierender Raumbereich gerade im Einzug zwischen zwei Nebenkeulen positioniert wird. Dies ist deswegen nicht sinnvoll, da

- die Einzüge der Richtcharakteristik aufgrund von Reflexionen an benachbarten Gebäuden möglicherweise wieder aufgefüllt werden können,
- die Montageumgebung der Antenne, d.h. eventuelle Dachaufbauten wie Fahrstuhlschacht, Klimaanlage u.ä. die „theoretische“ Richtcharakteristik der Antenne gerade im Nebenkeulenbereich in nicht vorhersagbarer Weise beeinflussen können und

- die Abstrahlcharakteristik auch abhängig von der gerade aktuellen Frequenz ist, mit der die Anlage sendet.

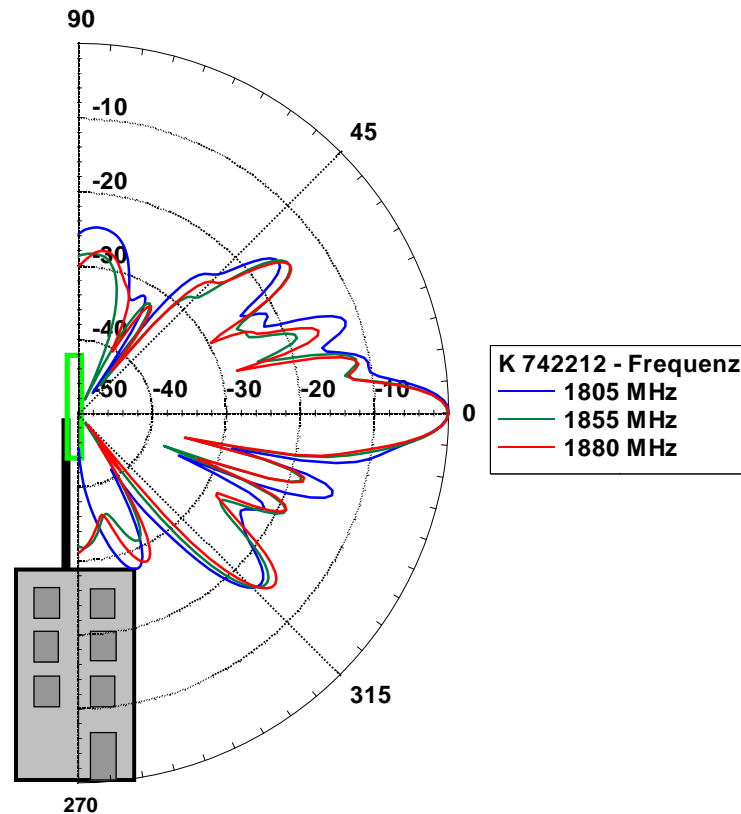


Abb. 4.11: Frequenzabhängigkeit der Abstrahlcharakteristik.

Die Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik von der Frequenz ist beispielhaft in Abbildung 4.11 dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine Antenne, die sowohl für GSM1800, als auch für UMTS eingesetzt wird. Die dargestellten Abstrahlcharakteristiken wurden anhand eigener Messreihen in der hauseigenen Antennenmesskammer der IMST GmbH ermittelt. Bei den Messungen handelt es sich bei einem Messabstand von 8 m zwar streng genommen nicht um Fernfeldmessungen; die Lage und relative Größe der Nebenkeulen werden jedoch korrekt erfasst.

Wie aus Abbildung 4.11 zu entnehmen ist, kann es in einigen Bereichen der Nebenkeulen durchaus Unterschiede bis zu einem leistungsbezogenen Faktor von 10 geben. Besonders anschaulich ist dies im Winkelbereich um 270°, d.h. in Richtung auf die Wohnungen unterhalb der Antenne, zu sehen.

Wenn es auch wenig Sinn macht, die Ausrichtung der Antenne hinsichtlich der Lage der Einzüge im Abstrahldiagramm zu optimieren (bzw. das Abstrahldiagramm derart zu "formen", dass die Einzüge in bezüglich der Immission zu minimierende Raumbereiche zeigen), ist trotzdem eine Optimierung der Abstrahlcharakteristik denkbar: Dies betrifft *primär eine Ab-*

senkung des Nebenkeulenniveaus, und das vorrangig in den Winkelbereichen, in denen allgemein zugängliche Bereiche in relativ naher Entfernung sind. Dies ist z.B. der nach unten gerichtete Winkelbereich, sofern die Anlage auf einem Hausdach installiert ist. In eigenen Untersuchungen [BOR 02] hat sich darüber hinaus gezeigt, dass bei einigen Typen von Mobilfunkbasisstationsantennen durch Nebenzipfel im nahen und mittleren Entfernungsbereich von der Antenne (bis einige 10 m) *größere* Immissionen auf dem Erdboden hervorgerufen werden können als dort, wo die Hauptkeule auf den Erdboden auftrifft (also in typisch 100 bis 200 Meter Entfernung).

Eine beliebige Absenkung des Nebenkeulenniveaus stößt jedoch an physikalische Grenzen: Eine Senkung des Nebenkeulenniveaus in bestimmten Winkelbereichen geht mit einer signifikanten Vergrößerung der Antennenausdehnung einher. Damit wirft diese Technik bezüglich Sichtbarkeit der Antennen, Windlast usw. die bereits in Abschnitt 4.1.1 und 4.1.2 erwähnten Problematiken auf.

4.1.4 Mehrantennenanordnungen und adaptive Antennen

Sendeseite: Formung des Abstrahlbereiches durch intelligente Antennen

In den heutigen mobilen Kommunikationsnetzen ist das Versorgungsgebiet in Zellen aufgeteilt, die üblicherweise aus drei etwa 120° breiten Sektoren bestehen. Jeder Sektor wird über eine eigene Mobilfunkantenne mit elektromagnetischer Strahlung versorgt.

In folgendem Bild ist der typische Aufbau einer solchen Mobilfunkzelle in der Aufsicht zu sehen. Die durch die grünen Kästchen angedeuteten Basisstationsantennen sind jeweils um 120° versetzt angeordnet. Im roten Sektor ist durch das Mobiltelefon ein Benutzer angedeutet.

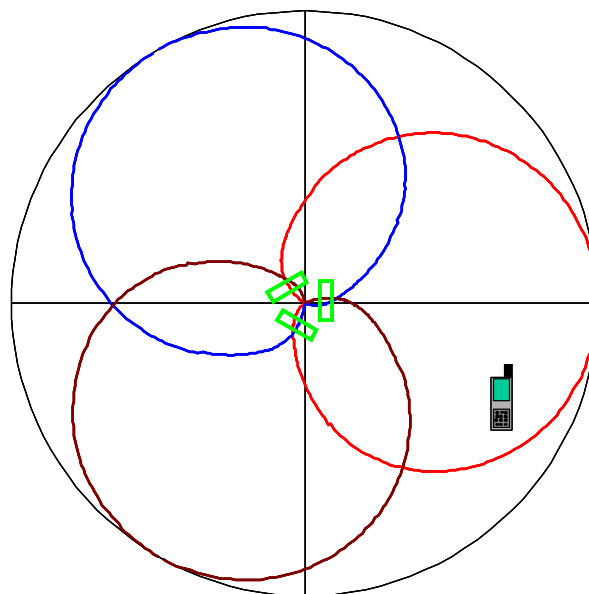


Abb. 4.12: Sektoranordnung einer Mobilfunkzelle.

Betrachtet man den roten Sektor mit dem Benutzer genauer, wird bereits deutlich, dass der größte Teil der elektromagnetischen Strahlung in andere Richtungen abgestrahlt wird als in die des Benutzers. Da nur ein kleiner Teil der von der Basisstation ausgesendeten Leistung den Benutzer erreicht, wäre für eine Minimierung der Immission ein effizienterer Umgang mit dieser Abstrahlung sinnvoll.

Diese könnte darin bestehen, die Immission in die anderen Raumrichtungen in Bezug auf den Benutzer zu minimieren. Anders ausgedrückt, es sollte die Abstrahlung auf den Benutzer fokussiert werden. Die Umsetzung dieser Vorgehensweise ist durch den Einsatz von sogenannten "*intelligenten Antennen*" möglich. Sie bestehen im Prinzip aus der Kombination eines Antennenarrays (zweidimensionale Anordnung von Antennenelementen) und einer adaptiven digitalen Signalverarbeitung der Empfangs- und Sendesignale. Durch die unabhängige Veränderung der Amplituden und Phasen des Antennenstroms jedes Antennenelementes lassen sich beliebige Abstrahl- und Empfangscharakteristiken des Arrays einstellen. Auf diese Weise können schmale (bezüglich Azimut und Elevation) Abstrahlbereiche erzeugt werden, mit denen die jeweilige Abstrahlung gezielt auf das Mobiltelefon gerichtet wird.

In folgendem Bild wird diese spezielle Formgebung der Richtcharakteristik durch intelligente Antennen (blaue Kurve) mit der 120° Abstrahlcharakteristik einer herkömmlichen Sektorantenne (rote Kurve) anhand des Azimutdiagramms verglichen. Analog hierzu kann die Antennencharakteristik einer intelligenten Antenne auch in der vertikalen Ebene geformt werden.

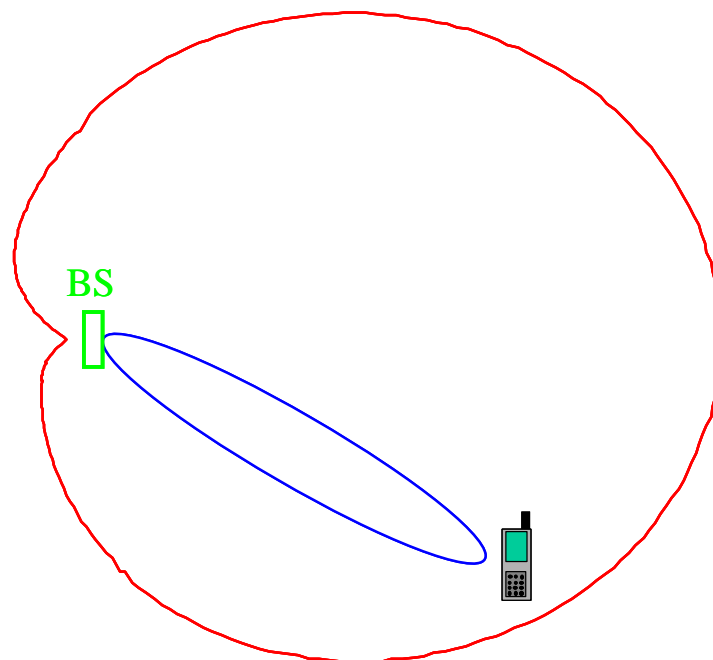


Abb. 4.13: Horizontales Abstrahlverhalten einer intelligenten Antenne (blaue Kurve) im Vergleich zu einer typischen Sektor-Mobilfunkantenne (rote Kurve).

Die intelligenten Antennen können in folgende drei Grundtypen aufgeteilt werden

- statisch,
- halb-dynamisch und
- dynamisch

Im ersten Fall werden im Vorhinein definierte Positionen der Hauptstrahlungsbereiche festgelegt. In folgendem Bild ist diese Variante schematisch in der Aufsicht dargestellt. Als Kriterium für die Auswahl *einer bestimmten Position* kann z.B. die empfangene Leistung des Benutzers dienen. Die anderen Strahlungsbereiche werden dann deaktiviert.

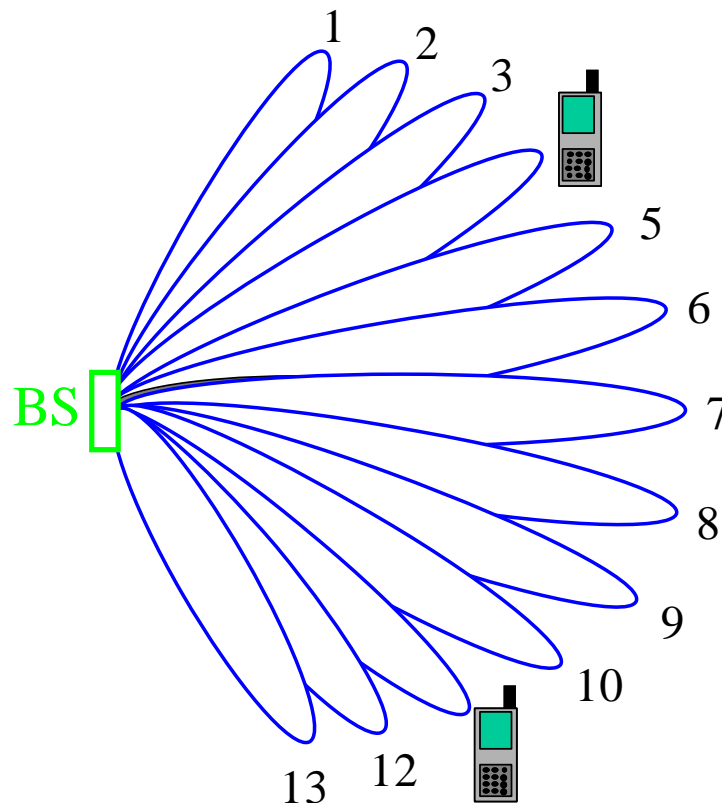


Abb. 4.14: Mögliche Verteilung der Hauptstrahlungsbereiche einer statischen intelligenten Antenne.

In obigen Bild sind 13 verschiedene, mögliche Strahlungsbereiche im Vorhinein definiert worden. Bei dem dargestellten Betriebszustand werden die Hauptstrahlungsbereiche mit den Nummern 4 und 11 für die beiden Benutzer verwendet.

Da die Abstrahlcharakteristiken an den jeweiligen Funkkanal angepasst werden und somit die Strahlung auf den jeweiligen Benutzer fokussiert wird, ist ein sogenannter "Organisationskanal" notwendig, der die "Kontaktaufnahme" vom Mobiltelefon zur Basisstation steuert. Dieser kann z.B. wie bisher als 120° Sektor mit einer herkömmlichen Mobilfunkantenne ausgeführt werden. Eine andere Alternative ist es, das zu versorgende Gebiet mit einer intelligenten Antenne kontinuierlich zu scannen. Sobald die Basisstation auf diese Weise das "neue" Mobiltelefon erkennt, wird ein neues hierauf abgestimmtes Abstrahldiagramm generiert.

Durch die stetig neu generierten Abstrahlcharakteristiken lässt sich das Optimierungspotenzial im Vergleich zum Einsatz einer herkömmlichen 120° Sektor Versorgung nur qualitativ abschätzen. Hierzu wird das vereinfachte Beispiel in folgender Abbildung näher betrachtet.

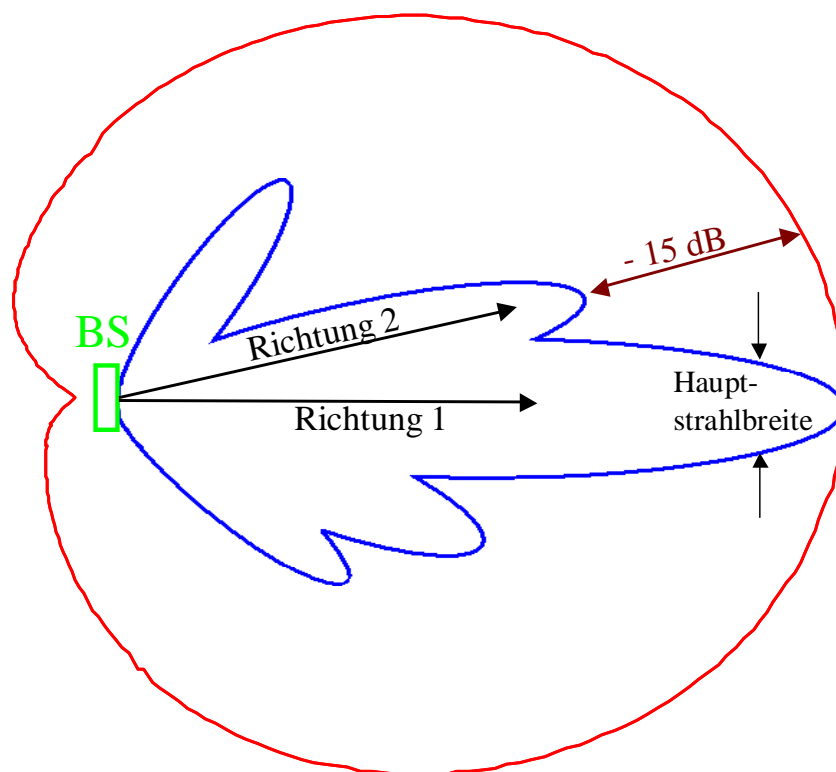


Abb. 4.16: Minimierungspotenzial durch den Einsatz einer adaptiven Antenne (blaue Kurve) im Vergleich zu einer 120° Sektorantenne (rote Kurve).

Der Hauptstrahlbereich der eingesetzten adaptiven Antenne sei auf einen Benutzer ausgerichtet, der sich in Richtung 1 befindet. Zunächst wird das Szenario betrachtet, dass sich eine weitere Person in Hauptstrahlbereich der adaptiven Basisstationsantenne aufhält: Die Expositionssituation wird sich hierbei für diese Person nicht verändern.

Im zweiten Szenario hält sich die Person an einem Punkt auf, der sich in der Richtung 2 in obigen Bild befindet. Unter der Annahme, dass die Nebenkeule eine Winkeldämpfung von 15 dB im Gegensatz zur Hauptstrahlrichtung aufweist, wird sich die Immission in ähnlichem

Maße verringern, d.h. bezüglich der Leistungsflussdichte auf etwa $1/30$ des ursprünglichen Wertes absenken. Der Reduzierungsgrad ist davon abhängig, ob sich eine "unbeteiligte" Person im Hauptstrahlungsbereich von aktiven Mobiltelefonierern befindet bzw. ob sich die Person in oder sogar zwischen zwei Nebenstrahlungsbereichen befindet.

Der Einsatz der adaptiven Antennen bietet nicht nur im Zusammenhang mit einer Minimierung der Immission Vorteile, sondern weist vor allem auch aus technischer Sicht positive Merkmale auf. So wird die Kapazität der Mobilfunknetze durch die Reduktion von Interferenzerscheinungen deutlich gesteigert. Soll diese, wie es z.B. in ländlichen Umgebungen der Fall sein wird, nicht gesteigert werden, kann die Reichweite der Basisstation vergrößert werden. Ferner sind durch die genaue Positionsbestimmung des Mobilfunkteilnehmers neue Dienste möglich (beispielsweise die Ortung in einen Notfall). Die Sicherheit der Mobilfunknetze kann durch den Einsatz von adaptiven Antennen auch verbessert werden. So wird es schwieriger, Telefongespräche abzuhören, da die Signale auf den jeweiligen Benutzer fokussiert sind.

Demgegenüber muss aber mit einer wesentlich *höheren Komplexität* der Hardware gerechnet werden. So müssen digitale Signalprozessoren zur Verfügung stehen, die die Empfangssignale in der Art auswerten, dass eine kontinuierliche Bestimmung der genauen Position des Mobiltelefons erfolgen kann. Hieraus müssen in Echtzeit für eine optimierte Richtstrahlcharakteristik direkt die Ansteuerparameter für die Phasen und Amplituden der einzelnen Arrayelemente bestimmt werden. Dieses stellt derart hohe Leistungsanforderungen an die Rechen- bzw. Signalverarbeitungstechnik, dass dieses Verfahren für eine reguläre Anwendung in Mobilfunknetzen derzeit zu aufwändig ist. Es wurden bereits Feldversuche mit adaptiven Antennen in Mobilfunknetzen durchgeführt, aber ein großflächiger Einsatz dieser Technik ist kurzfristig nicht absehbar.

Für die Strahlbündelung müssen viele Elemente in einem Antennenarray platziert werden. Zusätzlich zur vertikalen Richtung, in der auch heute schon eine Strahlbündelung erfolgt (Elevationsdiagramm), muss diese nun auch in der horizontalen Richtung erfolgen. In der horizontalen Ebene ist mit 6-10 Elementen zu rechnen, die einen Abstand mit einem Faktor von 0,4 bis 0,5 der Wellenlänge aufweisen [LEHNE 99]. In diesem Fall ist bei einer Frequenz von 900 MHz mit einer Breite von 1,2 m zu rechnen (bei 2 GHz beträgt die Breite 60 cm). Die physikalischen Dimensionen der adaptiven Antennen ist demnach wesentlich größer als die der bisher eingesetzten Mobilfunkantennen. An dieser Stelle sind wiederum die schon oben erwähnten technischen Schwierigkeiten (Windlast, geeignete Montageorte, Städtebild, baurechtliche Aspekte) sowie Probleme bezüglich einer erhöhten "Sichtbarkeit" und entsprechenden "Wahrnehmung" der Antennen in der Bevölkerung zu erwarten.

Empfangsseite: Optimierung des gewünschten Empfangssignals

Die aufgrund von unterschiedlichen Ausbreitungswegen (Reflexionen) an der Basisstation empfangenen Signale weisen unterschiedliche Phasenlagen und Polarisierungen auf. Durch die Ausnutzung der Unterschiede zwischen den einzelnen empfangenen Signalen könnte entweder die Empfangsleistung verbessert oder bei gleicher Empfangsleistung die Sendeleistung

des Mobiltelefons reduziert werden. Dieses führt zu einer geringeren Exposition des Mobiltelefonbenutzers.

Um dies zu erreichen, kann eine ähnliche Vorgehensweise wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben angewendet werden: Durch eine spezielle Formung des (Empfangs-) Richtdiagramms der Basisstationsantenne wird der Empfangsantennengewinn in Richtung des Mobiltelefons erhöht und gleichzeitig als "störend" empfundene Signale aus anderen Einfallrichtungen "ausgeblendet". Damit kann das "gewünschte" Mobiltelefon mit einer geringeren Sendeleistung arbeiten, was sich direkt in einer geringeren Nutzerexposition niederschlägt. Allerdings ist, wie oben beschrieben, aus Aufwandsgründen ein flächendeckender Einsatz dieser Technologie derzeit nicht gegeben.

Bereits heute werden jedoch mit *Raum-Diversity* und *Polarisations-Diversity* zwei vereinfachte Verfahren dieser auf empfangsseitigen Mehrantennenanordnungen basierenden Technik eingesetzt [SCHOLZ]:

Beim *Raum-Diversity* besteht das Empfangssystem aus mindestens 2 Antennen, die in einem räumlichen Abstand vom 12 bis 20fachen der Wellenlänge aufgestellt werden (siehe Abbildung 4.17). Sie arbeiten getrennt voneinander und haben jeweils eigene Empfangszweige. Es wird dasjenige Eingangssignal verwendet, das den höheren Empfangspegel aufweist. Der auf diese Weise erreichbare, sogenannte Diversity-Gewinn wird mit ca. 4 bis 6 dB angegeben.



Abb. 4.17: Beispiel für eine Mobilfunkantenne mit Raum-Diversity (hier zwei Rundstrahlantennen, montiert auf einem Gebäudedach).

Auch hier ist natürlich wieder das Problem der erhöhten Wahrnehmung in der Bevölkerung gegeben. Gemeinhin schreibt man einem Standort mit zwei Antennen eine größeres Strahlungspotenzial zu, als einer Anlage mit nur einer Antenne.

Beim *Polarisation-Diversity* werden zwei senkrecht zueinander stehende, üblicherweise X-förmig angeordnete Empfangsantennen eingesetzt, die jeweils primär den in ihrer Polarisationssebene liegenden Anteil des vom Mobiltelefon ausgesendeten Feldes empfangen. Analog zum Raum-Diversity wird das bessere Empfangssignal ausgewählt. Die Antennen müssen keine räumliche Trennung aufweisen und können in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht werden. Auch hier ist ein zu erzielender Gewinn der Empfangsleistung von ca. 4-6 dB möglich, um den die Sendeleistung des Mobiltelefons entsprechend reduziert werden kann.

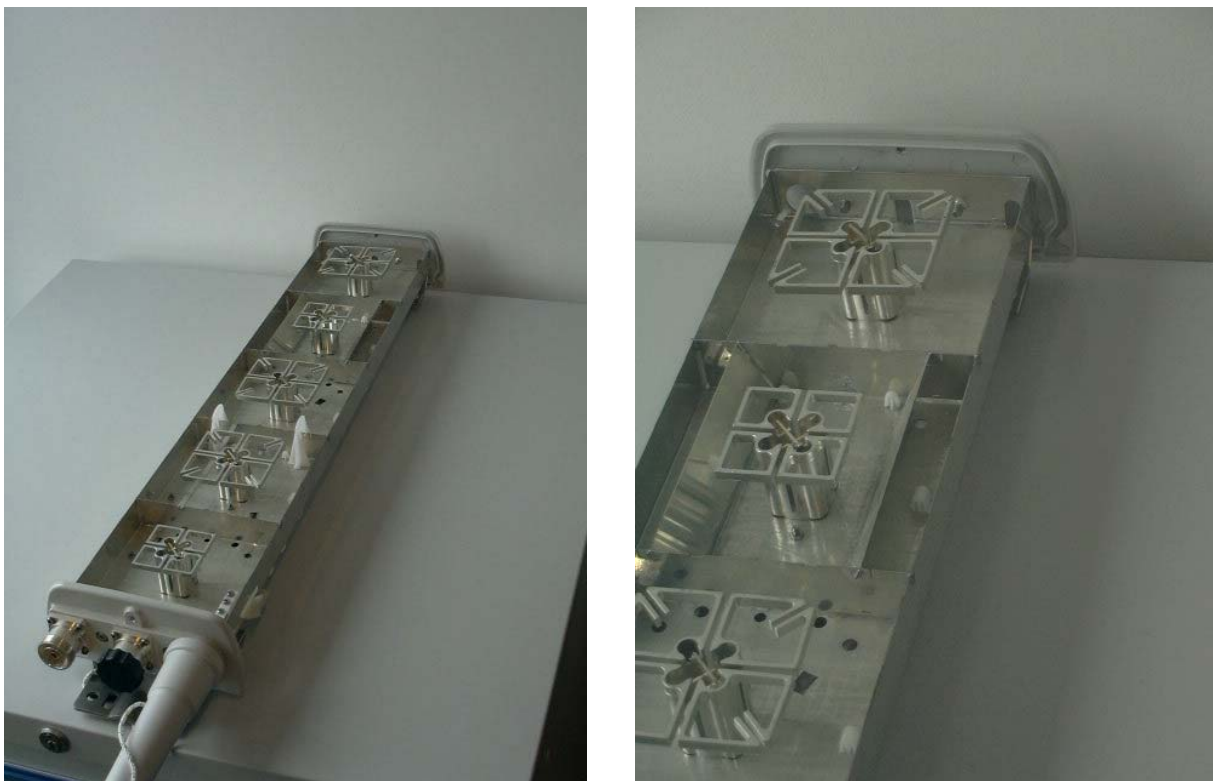


Abb. 4.18: Beispiel für eine Mobilfunkantenne mit Polarisations-Diversity.

Mehrantennensysteme spielen ihre Vorteile jedoch dann optimal aus, wenn *alle* Signale der einzelnen Antennen geeignet kombiniert und ausgewertet werden können. Damit sind dann größere Diversity-Gewinne möglich. Technisch entspricht dies der oben beschriebenen spezifischen Formung des Empfangsdiagramms, das derzeit aber noch nicht mit vernünftigem Aufwand realisierbar ist.

4.1.5 Repeater zur Versorgung von funktechnisch abgeschatteten Bereichen

Bei Tälern, Tunneln, Tiefgaragen oder teilgeschirmten Räumen handelt es sich um Bereiche, die häufig mobilfunktechnisch schwer zu versorgen sind. Aufgrund der hohen Abschirmung dieser Orte gegenüber elektromagnetischen Feldern wären hier vergleichsweise hohe Sendeleistungen seitens der Basisstation notwendig, was zu Immissionsspitzen in unmittelbarer Nähe der Station führt. Auch das Mobiltelefon wird in solchen Fällen seine Sendeleistung hochregeln und somit die individuelle Exposition des Telefonierenden erhöhen.

Eine Lösung bieten hier "Repeater": In ICE-Zügen mit metallischer Außenhaut und metallbedampften Scheiben nehmen diese beispielsweise mit Außenantennen das Basisstationssignal auf und strahlen es über im Wageninneren angebrachte Antennen wieder ab. Die Kommunikation muss hier bidirektional erfolgen, so dass auch das Signal des Mobiltelefons aus dem Innenraum empfangen werden kann und über die Außenantennen zur Basisstation abgestrahlt wird.

Der immissionsminimierende Effekt ist also prinzipiell mit der Schirmdämpfung des zu durchdringenden Hindernisses verknüpft. In einer Bilanz der individuellen Immissionssituation ist aber auch die Abstrahlung der im Repeater eingesetzten Antennen zu berücksichtigen.

4.1.6 Empfängerempfindlichkeit

Schaffte man es, die Empfindlichkeit der Empfängerelektronik zu erhöhen, wäre eine Reduzierung der Sendeleistung des Mobiltelefons und gleichermaßen eine Reduzierung der Exposition des Mobiltelefonnutzers möglich. Leider liegen derzeit für diese Maßnahme keine Abschätzungen über zu erwartende Immissionsminimierungen vor.

4.2 Minimierungstechniken auf Seiten des Mobiltelefons

4.2.1 Optimierung der Antenne und der Gerätetopologie

Wie in Kapitel 3 bereits verdeutlicht wurde, stellen bei der Exposition des Einzelnen die Mobiltelefone meist die Hauptquelle der Immission dar. Deswegen ist hier eine Minimierung "an der Quelle" besonders effizient. Anstrengungen von offizieller Seite zur Zertifizierung strahlungsarmer Endgeräte mit dem "Blauen Engel" und ein Hinwirken auf die Entwicklung strahlungsoptimierter Mobiltelefone in der freiwilligen Selbstverpflichtung der Netzbetreiber zeigen, dass diese Thematik gegenwärtig an Bedeutung gewinnt.

Zur Beschreibung der Immission im Nahfeld von Mobiltelefonen ist die Spezifische Absorptionsrate (SAR) die geeignete Größe. Die SAR dient als Basisgröße für die Bewertung von Hochfrequenz-Immissionen. Der SAR-Wert eines Mobiltelefons gibt den Energieeintrag in das Körper- bzw. primär Kopfgewebe des Telefonierenden an (Einheit W/kg). Der relevante Grenzwert für den Teilkörper SAR-Wert bei lokaler Exposition im Kopf-/Rumpfbereich beträgt 2 W/kg, gemittelt über 10 g zusammenhängenden Gewebevolumens.

Ausgangspunkt einer SAR-bezogenen Optimierung ist die Untersuchung von Mobiltelefonen mit möglichst unterschiedlichen Antennentypen. Lassen sich bei unterschiedlichen Antennen-

arten Trends bezüglich über- oder unterdurchschnittlicher SAR feststellen, kann dies als Ausgangspunkt für die Suche nach SAR-optimierten Geräten dienen.

Die Abbildungen 4.20 und 4.21 zeigen mit einem normierten SAR-Verfahren gemessene SAR-Werte im Frequenzbereich GSM900 und GSM1800. Hierbei handelt es sich um den größten SAR-Wert, der bei verschiedenen Positionen des Mobiltelefons am Kopf festgestellt wurde (worst case). Gemessen wurde jeweils bei der Mittenfrequenz im GSM900- bzw. GSM1800 Band. Bei den untersuchten Mobiltelefonen wurden absichtlich nicht nur aktuelle Geräte einbezogen, sondern es sollte eine repräsentative Vielfalt möglichst unterschiedlicher Antennen- und Gerätetopologien erfasst werden. Die Antennentopologien umfassen:

- Geräte mit kompakter Helixantenne,
- Geräte mit aufklappbarer Helixantenne und
- Geräte mit kompakter integrierter Antenne.

Die untersuchten Antennentypen sind schematisch in Abbildung 4.19 dargestellt.

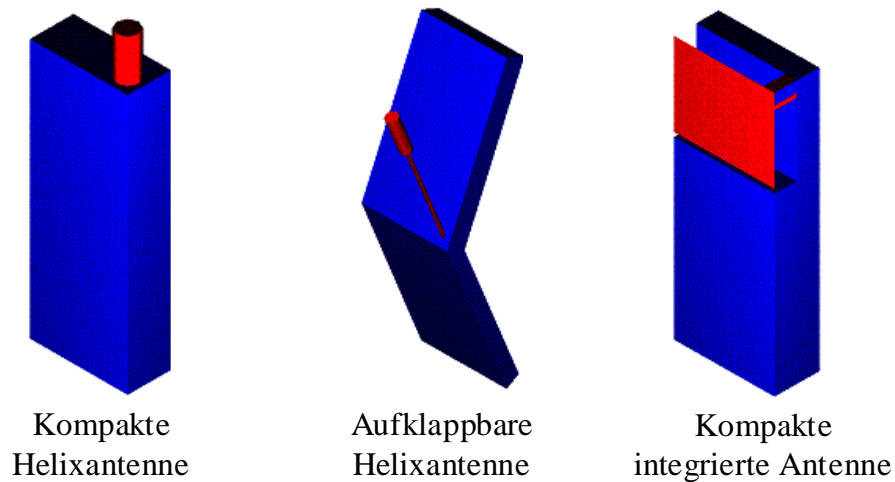


Abb. 4.19: Typische Gerätetopologien von Mobiltelefonantennen.

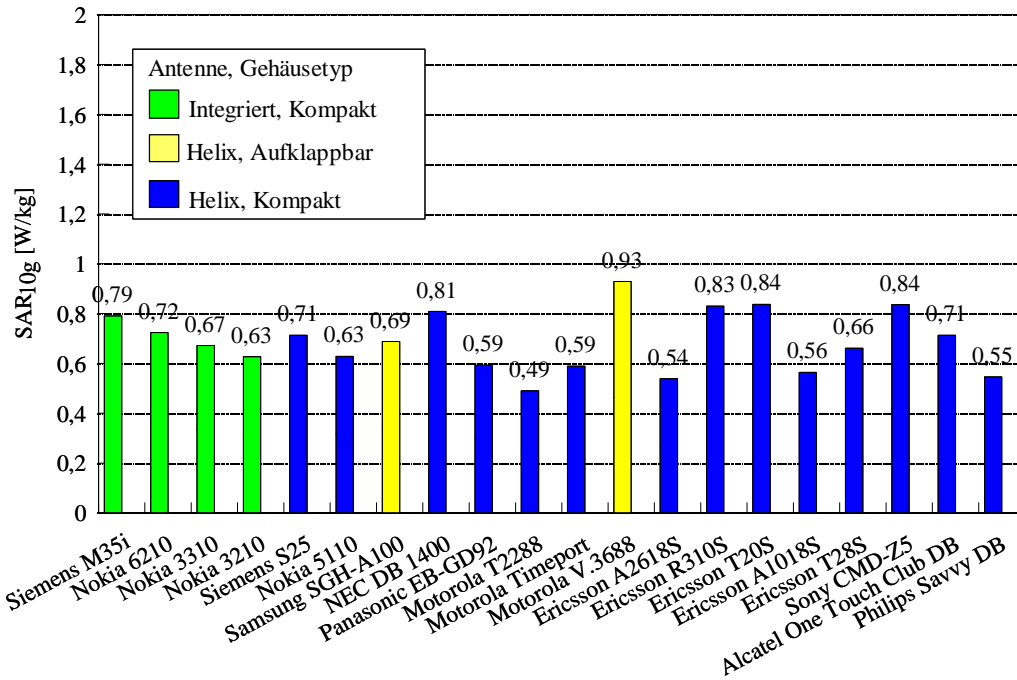


Abb. 4.20: Gemessene "worst case" SAR-Werte verschiedener Mobiltelefone im Frequenzbereich GSM900 (Kanal 62).

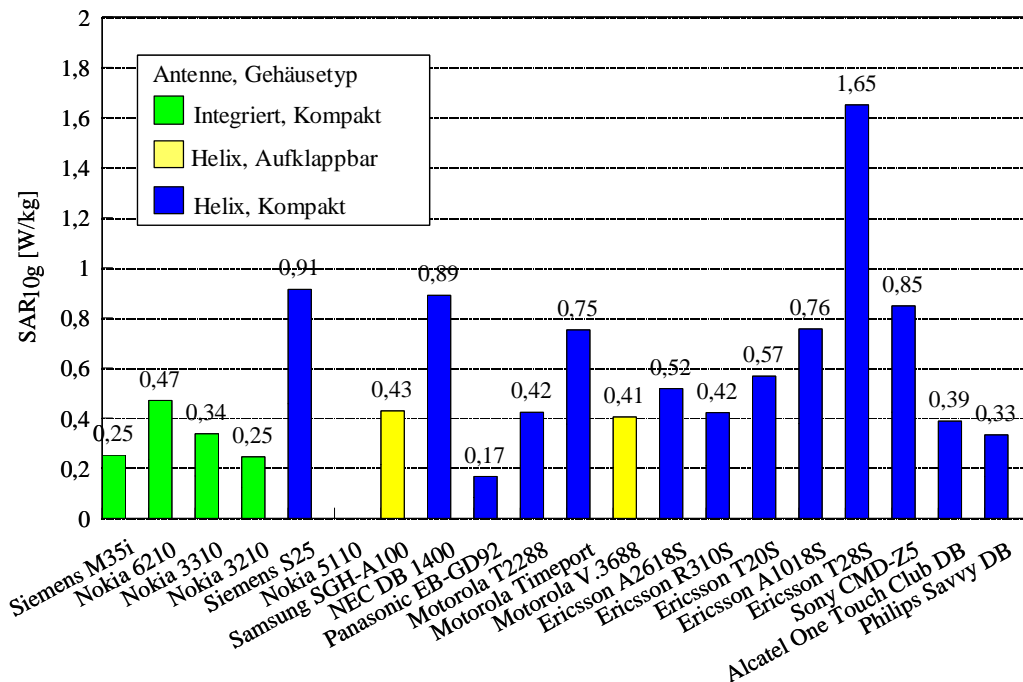


Abb. 4.21: Gemessene "worst case" SAR-Werte verschiedener Mobiltelefone im Frequenzbereich GSM1800 (Kanal 699).

Allerdings wird eine lediglich auf der SAR basierende Betrachtung an dieser Stelle als unzureichend erachtet: Eine geringe SAR ließe sich beispielsweise auch durch die Reduzierung der Sendeleistung des Mobiltelefons erreichen. Da dies in der praktischen Nutzung des Mobiltelefons in einem Mobilfunknetz mit einem entsprechenden Hochregeln der Mobiltelefonleistung einherginge, bliebe die reale SAR gleich; eine geringere SAR ist somit nur vorgetäuscht. Deswegen ist es wichtig, für Minimierungsbetrachtungen die SAR in *Relation zur abgestrahlten Leistung* des Mobiltelefons zu setzen. Ein Mobiltelefon ist demnach optimal, wenn es eine geringe SAR bei gleichzeitig hoher abgestrahlter Leistung aufweist. Ein entsprechendes Messverfahren zur Ermittlung der abgestrahlten Leistung ist neuartig und im europäischen Raum noch nicht standardisiert [BOR 02-2, MAN 02]. Die Abbildungen 4.22 bzw. 4.23 zeigen für die in den Abbildungen 4.20 und 4.21 betrachteten Mobiltelefone die sich unter Berücksichtigung der abgestrahlten Leistung ergebenden SAR-Verhältnisse:

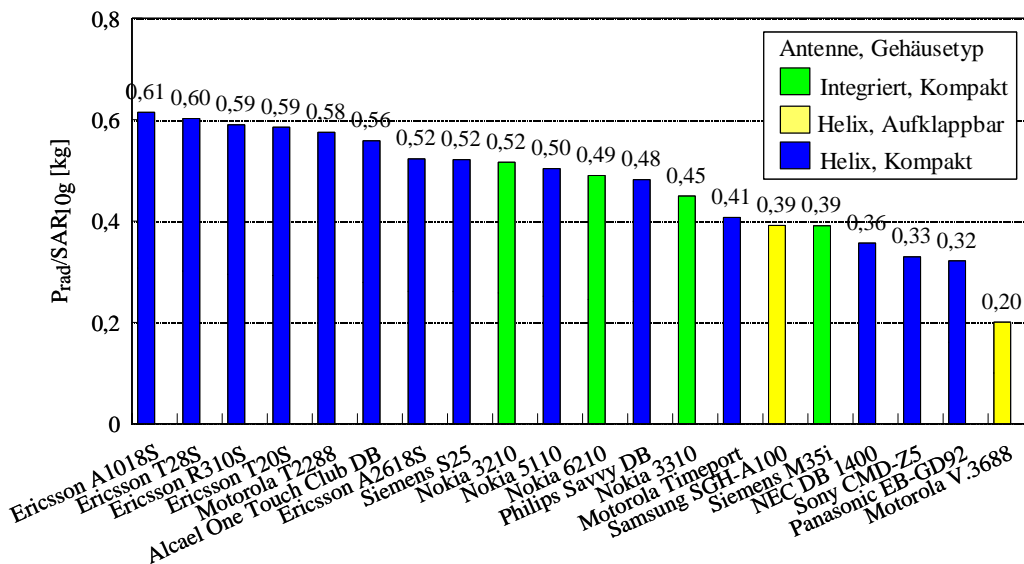


Abb. 4.22: Verhältnis von abgestrahlter Leistung und SAR im Frequenzbereich GSM900, Kanal 62.

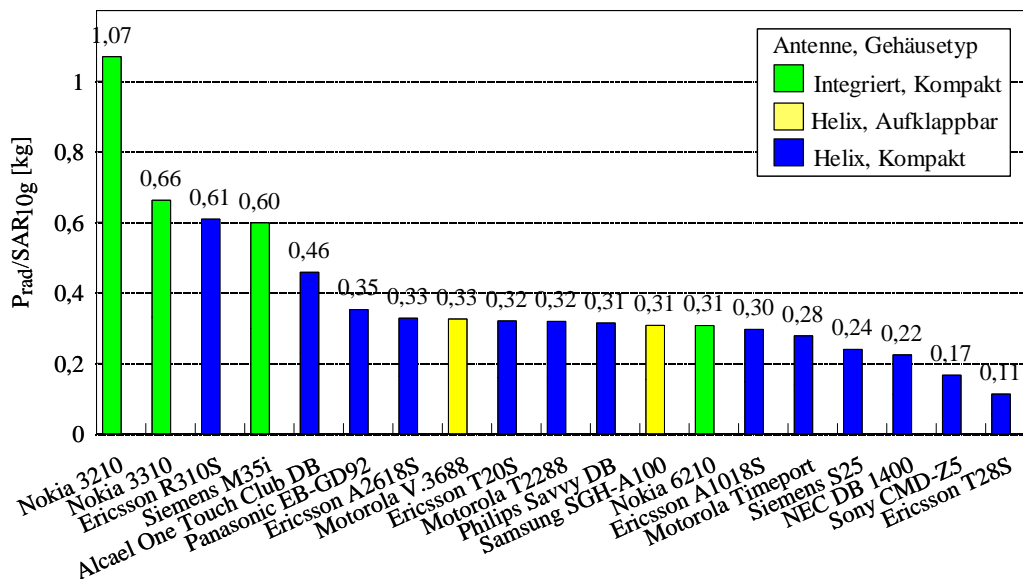


Abb. 4.23: Verhältnis von abgestrahlter Leistung und SAR im Frequenzbereich GSM1800, Kanal 699.

Aus den statistischen Verteilungen der Verhältnisse von abgestrahlter Leistung zur SAR lassen sich bei GSM900 (Abbildung 4.22) keine Rückschlüsse bezüglich einer optimalen Eignung des einen oder anderen Antennentyps ableiten. Anders sieht es bei GSM1800 aus (Abbildung 4.23): Geräte mit integrierten Antennen weisen generell eine auf gleiche abgestrahlte Leistung bezogene geringe SAR in Vergleich zu den anderen Gerätetopologien auf. Bei den aufklappbaren Helixantennen sind keine belastbaren Aussagen möglich, da hier nur zwei Gerätetypen verfügbar waren. Kompakte Helixantennen erweisen sich generell als nicht optimal bezüglich einer geringen SAR.

Die unterschiedlichen Ergebnisse bei GSM900 und GSM1800 legen eine Untersuchung nach den Ursachen und den zugrunde liegenden Wirkungsmechanismen nahe. Insbesondere ist es hierbei interessant, die SAR-Verteilung im Kopf des Mobiltelefonbenutzers entlang des Gerätes zu untersuchen. Hierbei zeigt sich, dass im GSM900-Band alle Geräte wie ein Dipolstrahler arbeiten (d.h. das gesamte Telefon wirkt als "Antenne"); die maximale SAR geht *nicht* vom Ort der Antenne aus. Deswegen verhalten sich hier alle Antennentopologien in etwa gleichartig. Bei GSM1800 sind die Dipoleigenschaften des Gerätes nicht so stark ausgeprägt. Die maximale SAR befindet sich in vielen Fällen am Ort der eigentlichen Antenne. Deswegen sind hier bei verschiedenen Antennentopologien Unterschiede feststellbar. Insbesondere integrierte Antennen weisen eine geringe SAR auf, da die Antenne auf der kopfabgewandten Seite des Gerätes angebracht ist. Abbildung 4.24 zeigt den Verlauf der SAR im Kopf bei GSM1800 entlang des Gerätes. Im linken Bildteil ist eine Querschnittsebene durch den Kopf dargestellt, die in der Längsachse des Mobiltelefons liegt. Wie vorab beschrieben, befindet sich der Ort maximaler SAR im Bereich der Antenne.

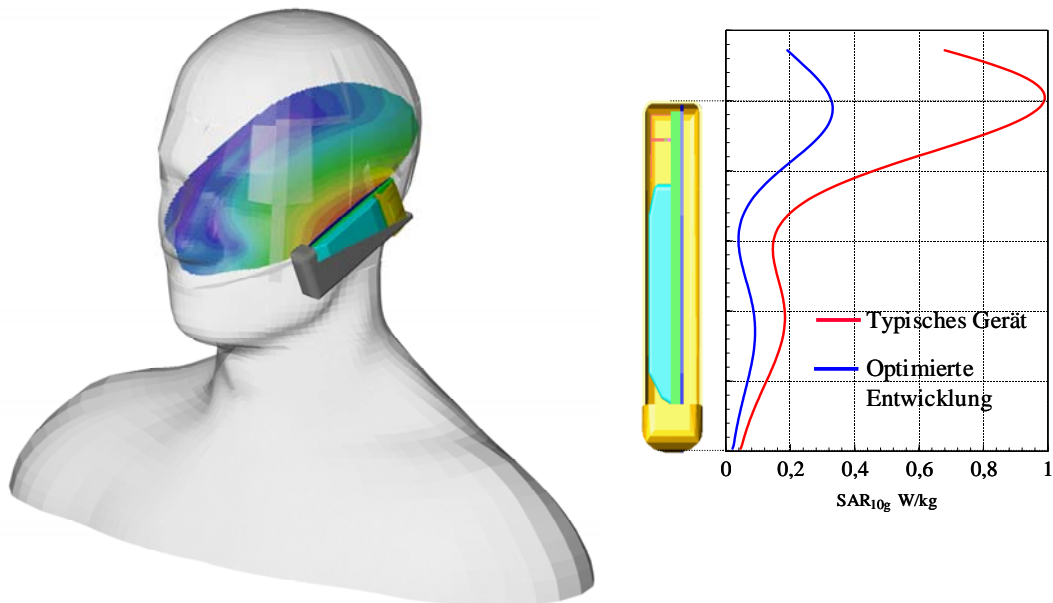


Abb. 4.24: SAR-Verteilung im Kopf entlang der Längsachse des Mobiltelefons.

Mittlerweile verfügen viele Mobiltelefone über integrierte Antennen. Im Vergleich zu GSM900 bzw. GSM1800 umfasst UMTS einen höheren Frequenzbereich, der am ehesten mit dem GSM1800-Bereich vergleichbar ist. Insofern werden auch bei UMTS integrierte Antennen Vorteile gegenüber den anderen Antennentypen aufweisen.

Wie Abbildung 4.22 zeigt, gibt es auch im GSM900 Bereich Unterschiede zwischen den einzelnen Geräten und sogar zwischen gleichen Antennentopologien. Eigene Untersuchungen zeigen hier, dass die Ursache hierfür unterschiedliche Gerätetopologien, also z.B. unterschiedliche Geräteabmessungen, sind. Auch hier ist durch entsprechende Variation der Geräteparameter ein Optimum möglich.

Die Schwankungen zwischen unterschiedlichen Geräten ein und desselben Antennentyps (z.B. integrierte Antennen) finden sich nach Abbildung 4.23 auch im GSM1800-Band. Allerdings sind speziell bei den integrierten Antennen die SAR-Werte bei GSM900 größer als bei GSM1800. Führt man eine SAR-Optimierung der Geräte vorrangig im Hinblick auf eine Minimierung im GSM900-Band durch, kann sich die Situation im GSM1800-Band sogar verschlechtern. Hier sind weitere Forschungsanstrengungen nötig, um für beide Frequenzbereiche geeignete Lösungen zu finden.

Gerade im Bereich von GSM1800 hat sich gezeigt, dass die SAR sehr stark vom speziellen Aufbau und der Anbringung der Antenne abhängt. Auch hier wird noch weiterer Forschungsbedarf bezüglich einer Optimierung gesehen. Das hierbei zu erwartende Optimierungspotenzial wird mit etwa 30 % abgeschätzt.

4.2.2 Erhöhung der Empfängerempfindlichkeit

Wie auf Seiten der Basisstation besteht prinzipiell auch auf Seiten des Mobiltelefons die Möglichkeit, die Empfindlichkeit der Empfangselektronik zu erhöhen. Dadurch kann dann die Sendeleistung der Basisstation verringert werden, was zu einer Reduzierung sowohl der Gesamtimmission, als auch der ortsbezogenen Immission führt. In [WIE 03] wird abgeschätzt, dass durch Optimierung der Parameter im HF-Frontend des Mobilgerätes (z.B. durch digitale Korrektur- und Kalibriertechniken) eine Reduzierung der mittleren und maximalen Sendeleistung der Basisstation um ca. 3 dB, d.h. den Faktor 2 möglich ist. Im selben Ausmaß verringert sich die Immission. Laut [WIE 03] ist mit einer praktischen Umsetzung dieser Minimierungsmaßnahme in den nächsten 3-5 Jahren zu rechnen.

4.2.3 Interferenzreduktion

Durch starke Interferenzen, die als "Störungen" empfunden werden, kann es auf Seiten des Mobiltelefons schwierig oder unmöglich werden, die gesendeten Informationen sicher zu empfangen. In diesem Fall muss die Sendeleistung der Basisstation um den interferenzbedingten Anteil erhöht werden, um einen sicheren Empfang zu gewährleisten. Wäre es jedoch möglich, die Interferenzen im Empfangsteil des Mobiltelefons zu reduzieren, wäre eine Erhöhung der Sendeleistung der Basisstation entbehrlich. In [WIE 03] wurden sowohl für den GSM-Standard, als auch für den UMTS-Standard mehrere diesbezügliche Konzepte untersucht. Diese basieren darauf, dass man auf der Empfängerseite über gewisse Informationen bezüglich der störenden Signale verfügt und diese Informationen zur Reduktion der Störeinflüsse einsetzen kann. Die Höhe der interferenzbedingten Sendeleistung und damit auch das Minimierungspotenzial seitens der Basisstationsimmissionen ist von der Netzlast abhängig: Sofern die Netzlast gering ist, sind keine nennenswerten Immissionsreduzierungen zu erwarten. Im Fall von hoher Netzlast und damit verbundenen starken Interferenzen wurden Reduzierungen der Sendeleistung der Basisstation in der Höhe von etwa 4 dB (Faktor 2,5) simulationstechnisch ermittelt [WIE 03].

4.3 Sonstige Maßnahmen

4.3.1 Alternative Frequenzbereiche

Die Streckendämpfung, d.h. die Übertragungsdämpfung zwischen Basisstation und Mobiltelefon, ist unter anderem auch von der Frequenz abhängig. Höhere Frequenzen werden stärker gedämpft als niedrigere Frequenzen. Durch die Wahl von niedrigeren Frequenzen könnten daher, gleiche Empfindlichkeiten auf der Empfängerseite vorausgesetzt, geringere Leistungen auf der Senderseite verwendet werden, die sich unmittelbar in eine Reduzierung der Immission niederschlagen. In [WIE 03] wurde beispielsweise anhand von numerischen Simulationen ermittelt, dass bei Verlagerung der Frequenz eines UMTS-Mobilfunksystems von derzeit 2000 MHz auf 900 MHz eine Reduzierung der mittleren Sendeleistung der Basisstationen um 10 dB (d.h. auf 10 % des ursprünglichen Wertes) möglich wäre (Zellradius 1.600 m). Beim Übergang zu noch tieferen Frequenzen, beispielsweise 450 MHz, ist eine weitere Reduzierung möglich. Die Immission durch die Basisstationen reduziert sich im selben Verhältnis.

Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine solche Frequenzänderung einen erheblichen Eingriff in den betreffenden Mobilfunkstandard darstellt und somit nicht einfach in ein bestehendes System wie z.B. UMTS "eingebaut" werden kann. Hierzu sind international abgestimmte Standardisierungsvorhaben nötig. Laut [WIE 03] sind derzeit Bestrebungen zur Standardisierung zu UMTS bei 450 MHz und 900 MHz in Gange. Mit einem Abschluss wird im Jahr 2006 gerechnet.

Neben der "technischen Standardisierung" der Hochfrequenzkomponenten in Basisstation und Endgerät muss berücksichtigt werden, dass es nicht ohne weiteres möglich ist, beispielsweise im 900-MHz-Bereich Frequenzen für UMTS zu bekommen, da üblicherweise das gesamte HF-Spektrum für verschiedenste Funk- und Ortungsdienste vergeben ist. Neue Dienste können in der Regel nur nach längeren Wartezeiten (d.h. nach Auslaufen der festgelegten Nutzungszeiten der bisherigen Nutzer) Frequenzbereiche zugeteilt bekommen. Zudem muss dieses Verfahren international abgestimmt werden, wenn man wieder ein europaweit einheitlichen Funkstandard schaffen will.

Vor allem bei Frequenzen, die wesentlich unter 900 MHz liegen, werden praktische Probleme bei der Realisierung der Antennen auf Seiten der Mobiltelefone erwartet: Nach dem derzeitigen Stand der Antennenentwicklung gibt es technische Beschränkungen, praktikable Antennenbauformen bei 450 MHz zu entwickeln, die ähnlich effizient wie bei 900 MHz bzw. 1800/2000 MHz arbeiten. Damit dürfte ein Teil der Reduzierung der Basisstations-Sendeleistung durch eine insgesamt geringere Empfindlichkeit des Mobiltelefons wieder aufgebraucht werden, so dass die Gesamtersparnis geringer ausfällt als oben simuliert. In diesem Bereich ist weiterer Forschungsbedarf absehbar.

4.3.2 Alternative Übertragungstechniken

Nach aktuellen Untersuchungen (z.B. [WIE 03]) wird auch weiterhin mit einem konstanten Wachstum der drahtlosen Kommunikationstechniken gerechnet. Trotzdem wird erwartet, dass die mittlere Immission durch diese Systeme in den nächsten Jahren nahezu konstant bleiben wird. Grund dafür ist unter anderem die Entwicklung und Anwendung von effizienten Übertragungstechniken in den Funksystemen.

Ein aktuelles Beispiel hierfür ist DAB und DVB-T, der digitale Hör- und Fernseh Rundfunk. Versorgungsplanungen und der reale Betrieb in den Bundesländern, in denen diese Technik bereits eingeführt ist, zeigen, dass beim Übergang von der analogen zur digitalen Übertragungstechnik die insgesamt abgestrahlte Leistung und damit auch die Gesamtmission pro Programm reduziert wird.

Auch im Bereich zukünftiger Mobilfunksysteme ist mit einer weiteren Optimierung der eingesetzten Übertragungstechniken zu rechnen. In [WIE 03] wurde dafür beispielsweise die Modulationsart OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) untersucht. Mit OFDM wird der frequenzselektive Mobilfunkkanal in eine gewisse Anzahl schmalbandiger Kanäle unterteilt. Die Information wird dann nur auf denjenigen Einzelkanälen übertragen, auf denen die Übertragungsdämpfung besonders gering ist. Dadurch kann eine Reduzierung der Sende-

leistung von etwa 1,5 dB (entsprechend 30 %) erreicht werden, die sich direkt in der Gesamt-
immission niederschlägt.

Solche optimierten Übertragungsverfahren stellen jedoch, wie auch die im vorigen Abschnitt
diskutierten alternativen Frequenzbereiche, einen tiefgreifenden Eingriff in den jeweiligen
Mobilfunkstandard dar. Das heißt, dass bestehende Mobilfunksysteme damit nicht einfach
nachgerüstet werden können, da dies mit einer Änderung des Standards verbunden wäre. Die
neuen Techniken sind aber für die Entwicklung zukünftiger Mobilfunksysteme geeignet.