

## 6. Einfluss wichtiger anlagenbezogener Faktoren auf die entstehende mittlere Immission

### 6.1 Allgemeines

Wie bereits dargelegt, gibt es für eine Minimierung der Immissionen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen prinzipiell die folgenden Herangehensweisen:

1. Minimierung von Immissionsspitzen an definierten Orten in unmittelbarer Nähe eines Anlagenstandortes (ortsbezogene Immission).
2. Minimierung der Gesamtimmission durch Reduzierung der Sendeleistung einer Anlage.
3. Minimierung der mittleren Immission in einer begrenzten Fläche um den Anlagenstandort.

Im Kapitel 3 wurden bereits die ersten beiden Punkte behandelt. In vorliegendem Kapitel soll mit Punkt 3 eine gänzlich andere Herangehensweise untersucht werden. Dieser Ansatz erfordert eine vergleichsweise komplizierte Betrachtung, da eine Reduzierung der Immission nicht an einzelnen ausgewählten Punkten im Vordergrund steht, sondern eine Minimierung in einem begrenzten Flächenbereich. Unterschiedliche Maßnahmen sind dahingehend zu beurteilen, ob sie einen Gewinn in der Gesamtfläche erbringen, oder eine "Verbesserung" in einem Flächenbereich mit einer "Verschlechterung" in anderen Flächenbereichen erkaufen.

Minimierungsüberlegungen unter Berücksichtigung aller Orte in der Umgebung der Sendeanlage führen sehr schnell zu ungemein aufwändigen, zeitintensiven und damit kostspieligen Betrachtungen. Zudem hängt die Qualität der Berechnungsergebnisse sehr stark von der Genauigkeit der verwendeten Umgebungsparameter (Topographie, Bewuchs, Bebauung) sowie deren exakter Beschreibung in Hinblick auf die entstehende Beeinflussung der Wellenausbreitung ab. Trotz dieser Einschränkungen soll im folgenden ein sehr einfaches numerisches Immissionsberechnungsmodell vorgestellt werden, mit dessen Hilfe einige grundsätzliche Zusammenhänge zwischen mittlerer Immission und wesentlichen anlagenbezogenen Faktoren eines Mobilfunkstandortes dargestellt werden können. Zudem sollen mit diesem Modell auch einige Erkenntnisse, die aus der Auswertung der Immissionsdatenbank gewonnen wurden (Kapitel 5), von der theoretischen Seite her untermauert werden.

Betrachtet wird hierbei ein "typischer Mobilfunkstandort", bestehend aus drei Sektorantennen, die bezüglich ihrer horizontalen Hauptsenderichtung jeweils um  $120^\circ$  versetzt ausgerichtet sind (angenommene horizontale Hauptsenderichtungen:  $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ ). Jede der Antennen wird mit der gleichen Leistung von  $P = 20$  Watt gespeist. Dieser Wert kann als durchaus realistisch für durchschnittliche Mobilfunkstandorte angenommen werden. Beispielsweise werden UMTS-Anlagen derzeit von den Netzbetreibern meist mit etwa 20 Watt Leistung am Antenneneingang bei der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) bean-

trägt (20 Watt Senderausgangsleistung je Kanal, 2 Kanäle je Antenne, 3 dB Dämpfung der Antennenzuleitung).

Mittels der Simulationsrechnungen soll ermittelt werden, welche durchschnittliche Leistungsflussdichte in einem beschränkten Umgebungsbereich um die Station auftritt und wie sich diese bei Variation bestimmter Parameter der Anlage verändert. Einen Einfluss auf die in der Umgebung entstehende Immission üben dabei hauptsächlich die folgenden Anlageparameter aus [BOR 02]:

- Montagehöhe der Antenne über Grund
- Antennentyp (z.B. Nebenkeulen)
- Vertikales Bündelungsverhalten (Öffnungswinkel) der Antenne
- Vertikale Absenkung der Hauptstrahlrichtung ("Downtilt")
- Sendeleistung der Anlage (d.h. die Größe der in die Antenne eingespeisten Leistung)

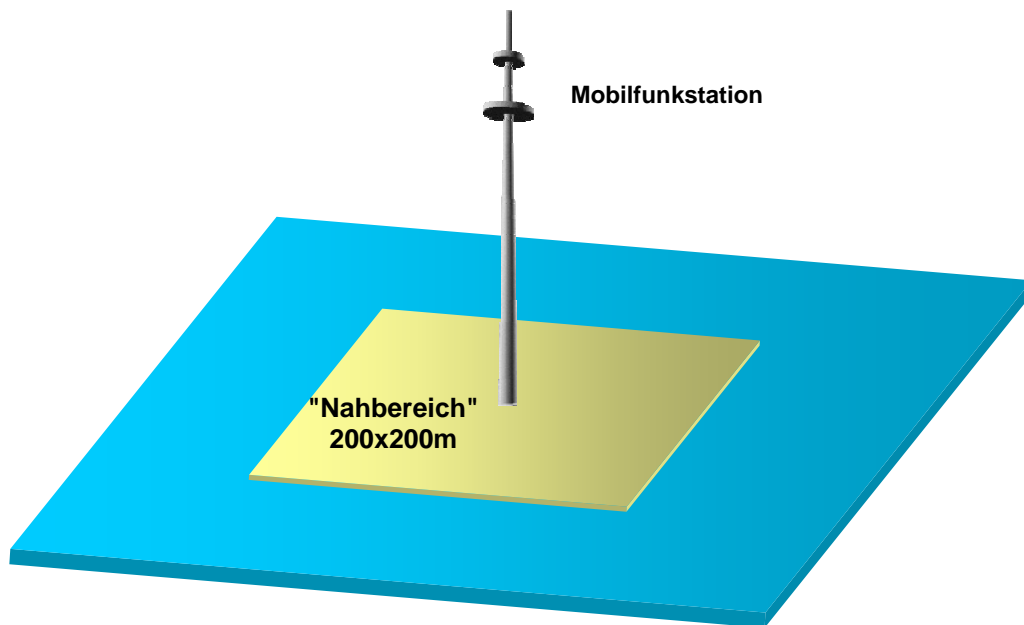
Die Sendeleistung soll im Rahmen dieser Untersuchungen nicht näher betrachtet werden, da klar ist, dass die in der Umgebung entstehende Leistungsflussdichte sich proportional mit der in die Antennen eingespeisten Leistung verändert [BOR 02]. Inwieweit sich ein Netzkonzept mit geringeren Sendeleistungen und dafür größerer Stationsdichte auf die mittlere Immission der Umgebung auswirkt, wurde ebenfalls bereits in [BOR 02, HER 02] ausführlich diskutiert und soll daher nicht mehr weiter untersucht werden. Hier geht es vielmehr um Parameter, die beispielsweise bei der Suche von Standorten oder bei der Abwägung verschiedener Standortalternativen berücksichtigt werden können.

Eine grundsätzliche Änderung des Systemkonzeptes hin zu kleinzelligeren Netzen wird im Rahmen einer kommunalen Standortsuche bzw. -bewertung nicht zur Disposition stehen, da derartig einschneidende Veränderungen der Netzstruktur mit Sicherheit erhebliche technische und wirtschaftliche Konsequenzen für den Netzbetreiber bedeuten würde.

Auch die horizontale Ausrichtung der Antennen soll hier nicht weiter diskutiert werden, da die Betreiber im Regelfall eine flächendeckende Versorgung sicherstellen wollen, und daher meist Stationen errichtet werden, die zwar mit Sektorantennen ausgestattet sind, die Antennen jedoch so ausgerichtet werden, dass näherungsweise eine omnidirektionale Leistungsabgabe in die Umgebung erzielt wird. Das Ausblenden von bestimmten Senderichtungen (z.B. in Richtung einer Schule oder eines Kindergartens) wird hier also nicht weiter betrachtet.

Für die folgenden Untersuchungen wird die Umgebung des betrachteten Standortes in zwei Regionen unterteilt: Der "Nahbereich" wird durch ein Quadrat bestimmt, in dessen Mitte sich die Sendeanlage befindet und dessen Seitenlänge 200 Meter beträgt, im "Fernbereich" befinden sich alle Punkte, die außerhalb des "Nahbereichs", jedoch innerhalb eines Quadrates um die Sendeanlage mit 400 Meter Seitenlänge liegen. In Abbildung 6.1 sind die beiden betrachteten Regionen um die Sendeanlage graphisch dargestellt.

Der Vorteil der quadratischen Zonen um den Mobilfunkstandort im Vergleich zu Bereichen, die durch konzentrische Kreise begrenzt werden liegt darin, dass bei der Berechnung alle einzelnen Flächenelemente gleich groß sind und dadurch die Mittelwertbildung in größeren Abständen nicht an Qualität verliert. Außerdem basieren die meisten kommerziellen Immissionsberechnungstools auf kartesischen und nicht auf Polarkoordinaten, so dass hier auch die Kompatibilität mit anderen Berechnungstools besser gewährleistet ist.



**Abb. 6.1:** Betrachtete Umgebung eines Mobilfunkstandortes.

Somit beträgt die Horizontaldistanz zum Anlagenstandort minimal 0 Meter, maximal ergibt sich aufgrund der quadratischen Fläche eine Distanz von 200 bis 283 Metern. Die Unterteilung wurde nicht willkürlich festgelegt, sondern sie entspringt den Ergebnissen der Immissionsmessungen, bei denen festgestellt wurde, dass ab etwa 200 Metern Abstand zur Anlage regelmäßig geringere Immissionswerte gefunden wurden (vgl. Abb. 5.15). Mit der hier gewählten Einteilung wird also der Bereich betrachtet, in dem regelmäßig die höchsten Immissionswerte auftreten. Diese Zone wird in einen "Nahbereich" und einen "Fernbereich" unterteilt, um zusätzlich erkennen zu können, wie stark und wohin die Immissionsschwerpunkte bei Parametervariation "wandern".

Es muss an dieser Stelle noch angemerkt werden, dass immer von ebenem Gelände ausgegangen wird, da sonst durch die Topographie beliebige Verzerrungen der Immissionsverteilung generiert werden können, was dazu führt, dass allgemeingültige Aussagen nur noch beschränkt möglich sind. Wie oben bereits erwähnt, sind bei rechnerischen Immissionsprognosen eine Vielzahl von Parametern wirksam, so dass Grundsatzbetrachtungen nur dann sinnvoll möglich sind, wenn möglichst immer nur ein Parameter variiert wird.

Auch sollte man sich bewusst sein, dass durch die Mittelwertbildung jeder Punkt im "Nah-" bzw. "Fernbereich" gleichberechtigt behandelt wird. Auch dadurch ergeben sich Grenzen, die bei diesen elementaren Untersuchungen nicht überschritten werden können, ohne dass der Aufwand dafür sehr schnell den Rahmen dieses Projektes sprengen würde. Auf einige Punkte sei an dieser Stelle hingewiesen:

- Ein Flächenelement, für das die Leistungsflussdichte berechnet wird hat die Abmessung 0,8 x 0,8 Meter. Es resultiert also eine recht gute Auflösung von 500 x 500 Punkten für die Gesamtfläche. Jedes Flächenelement wird für die Mittelwertbildung allerdings gleich gewichtet. Dies ist eine wesentliche Vereinfachung, da eigentlich jeder Punkt individuell gewichtet werden müsste. Der Gewichtungsfaktor wäre hierbei aus der Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Personen an diesem Ort zu ermitteln, denn Punkte, an denen sich Menschen mit höherer Wahrscheinlichkeit aufhalten (z.B. Wohnbereiche) sollten eigentlich stärker bewertet werden, als beispielsweise Parkanlagen oder Gärten.
- Zusätzlich müsste berücksichtigt werden, ob die Personendichte am betrachteten Punkt groß oder klein ist.
- Andererseits könnte auch mit einfließen, ob sich am betrachteten Ort regelmäßig besonders empfindliche Personengruppen (z.B. Kinder, Senioren, Kranke) aufhalten.
- Als Gewichtungsfaktor käme auch der Unterschied in Frage, ob sich die Personen am betrachteten Punkt hauptsächlich nur tagsüber (Arbeitsplatz) oder nachts (Wohnbereich) aufhalten.
- Man bedenke auch, dass der "Fernbereich" flächenmäßig dreimal so groß ist wie der "Nahbereich", bei Gleichverteilung also auch um den Faktor drei mehr Personen von der Immission betroffen sind. Diese Tatsache könnte, je nach Auffassung, zu sehr gegensätzlichen Schlussfolgerungen führen. Beispielsweise könnte man folgern, dass etwas höhere Immissionen im Nahbereich in Kauf genommen werden können, wenn dafür im Fernbereich die Immissionen entsprechend niedriger ausfallen, ein Ansatz, der von den betroffenen Personen im "Nahbereich" wohl auf wenig Akzeptanz treffen wird. Umgekehrt könnte man natürlich auch fordern, dass möglichst die höchsten Immissionen verringert werden, auch wenn dadurch die mittlere Immission für den gesamten betrachteten Bereich etwas ansteigen würde.
- Da für hochfrequente Immissionen unterhalb der geltenden Grenzwerte eine Dosis-Wirkungs-Beziehung nicht bekannt ist, erscheint es dagegen vielleicht eher sinnvoll, eine möglichst homogene Immissionsverteilung über der Fläche zu generieren, da bei gleichmäßiger Exposition keine mehr oder weniger benachteiligten Flächen entstehen. Ob diese Vorgehensweise in der Realität immer auch politisch konsensfähig ist, muss an dieser Stelle offen bleiben. Häufig wird beispielsweise gewünscht, dass Schulen, Kindergärten oder Krankenhäuser besonders gering exponiert sind.

Man erkennt also sehr schnell, dass der hier vorgestellte flächenmäßige Ansatz bei intensiver Betrachtung für eine wirklich gute Immissionsbewertung nur ein erster grober Ansatz sein kann und dass für eine echte Immissionsoptimierung eine Vielzahl von Parametern bezüglich der Topographie und der Flächennutzung berücksichtigt werden müssten. Auch wird aus den folgenden Untersuchungen klar werden, dass der flächige Ansatz genau genommen nicht ausreichend ist, da die Immissionen von Mobilfunkanlagen signifikanten Schwankungen je nach Höhe des betrachteten Immissionspunktes über Grund unterliegen und daher eigentlich ein 3D-Modell gerechnet werden müsste, denn Menschen halten sich nicht nur in Bodennähe, sondern auch in höheren Stockwerken von Gebäuden auf. Statt einzelner Flächenelemente, sind vielmehr einzelne Volumenelemente zu betrachten, die jeweils mit einem individuellen Gewichtungsfaktor zu versehen sind. Damit wächst der Rechenaufwand nicht mehr mit dem Quadrat des betrachteten Radius um die Station, sondern mit der dritten Potenz.

## 6.2 Verwendetes Ausbreitungsmodell

Das im folgenden verwendete Ausbreitungsmodell basiert auf einem einfachen Wellenausbreitungsansatz, nämlich der ungestörten Freiraumausbreitung. Die Leistungsflussdichte  $S_i$  an einem bestimmten Punkt im Abstand  $r$  von der  $i$ -ten Antenne errechnet dabei sich zu:

$$S_i = \frac{P_i \cdot G_i(\Theta, \Phi)}{4\pi \cdot r^2}$$

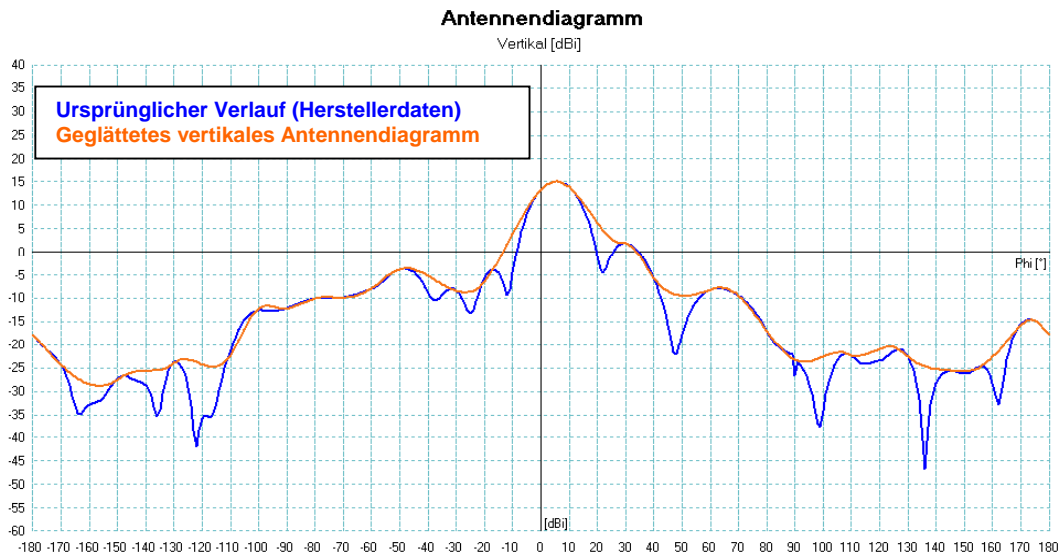
- $P_i$ : In die Antenne eingespeiste Leistung
- $G_i(\Theta, \Phi)$ : Isotropgewinn der Antenne in die Richtung zum Immissionspunkt
- $r$ : Radiale Entfernung zwischen Antenne und Immissionspunkt

Die gesamte am Immissionspunkt wirksame Leistungsflussdichte ergibt sich schließlich durch Addition der Einzelwerte  $S_i$ , verursacht durch die drei unterschiedlich ausgerichteten Antennen.

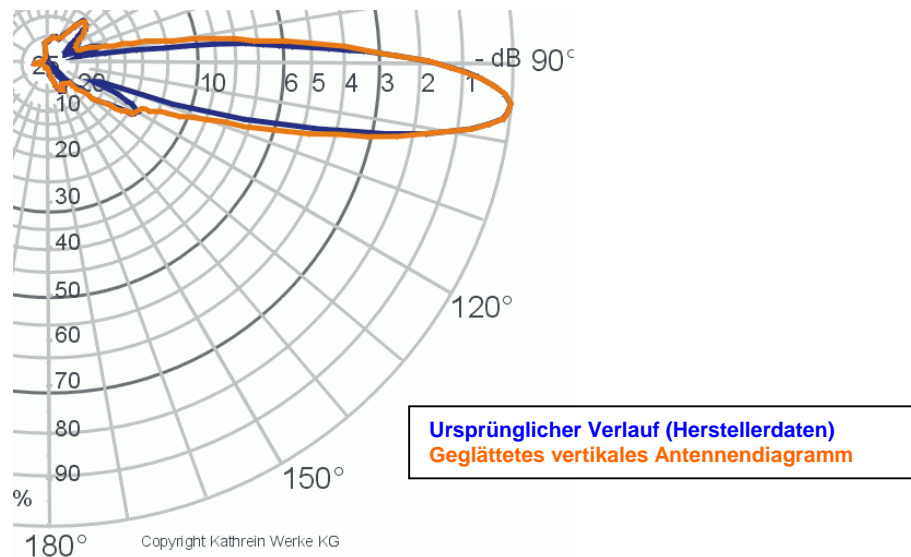
Es wird also grundsätzlich von ungestörter Wellenausbreitung unter Fernfeldbedingungen ausgegangen, Zusatzdämpfungen, verursacht durch Topographie, Bewuchs oder Gebäude werden nicht berücksichtigt. Dieser Ansatz der quadratischen Abnahme der Leistungsflussdichte liefert im hier betrachteten Entfernungsbereich (< 300 Meter), d.h. für Entfernungen, die typisch kleiner sind als der bei Annahme von Zweistrahl Ausbreitung auftretende Übergangspunkt von linearer Abnahme zu quadratischer Abnahme der Feldstärke bei typischen Montagehöhen der Antennen (10 bis 40 Meter) [SAU 99] bei vorhandener Sichtverbindung zwischen Immissionsort und Basisstation durchaus brauchbare Expositionsdaten, wobei im Regelfall eine leichte Überschätzung der Immission auftritt [WUS 03]. Ein typisches Szenario, das mit dem hier verwendeten Ansatz in guter Näherung beschrieben werden kann, wäre

beispielsweise ein ebenes Gelände mit leichter Wohnbebauung (z. B. Siedlungsgebiet mit maximal zweigeschossigen Einfamilienhäusern) und wenigen Bäumen in den Gärten.

Durchgeführt wurden die Berechnungen mit dem Softwareprogramm "*FieldView*", einer Eigenentwicklung zur Feldstärkeprognose im Nahbereich von Mobilfunkantennen. Für die Berechnungen wurden die Originalantennendiagramme des Herstellers [KAT 04] verwendet, wobei durch spezielle Interpolationsalgorithmen die Minima im Vertikaldiagramm aufgefüllt wurden (siehe Abbildung 6.2).



**Abb. 6.2:** Kartesische Darstellung des vertikalen Antennendiagramms der Antenne Kathrein 739684 (6° Downtilt).



**Abb. 6.3:** Polare Darstellung des vertikalen Antennendiagramms der Antenne Kathrein 739684 (6° Downtilt).



### 6.3 Einfluss der Montagehöhe der Antennen

In Kapitel 4.1.2 wurde gezeigt, wie sich die Höhe des Antennenstandortes auf die Größe der Immissionsspitzen im Nahbereich auswirkt. Nun soll untersucht werden, welchen Einfluss die Montagehöhe der Mobilfunkantennen auf die in der Umgebung entstehende mittlere Immission ausübt. Als reales Beispiel für ein derartiges Szenario zeigt Abbildung 6.4 einen Mobilfunkstandort bei dem die Antennen der verschiedenen Betreiber auf drei Masten mit sehr unterschiedlicher Höhe montiert sind.



**Abb. 6.4:** Unterschiedliche Montagehöhe von Mobilfunkantennen (Beispiel).

Für die Simulation wurden folgende Anlagendaten zu Grunde gelegt:

Für die Simulation verwendete Parameter	
Sendeleistung am Antenneneingang	20 Watt
Antennentyp	Kathrein 739684 Horizontaler Öffnungswinkel: 65°; Vertikaler Öffnungswinkel: 15°
Frequenzband	GSM 900
Eingestellter elektrischer Downtilt	3° (6°)

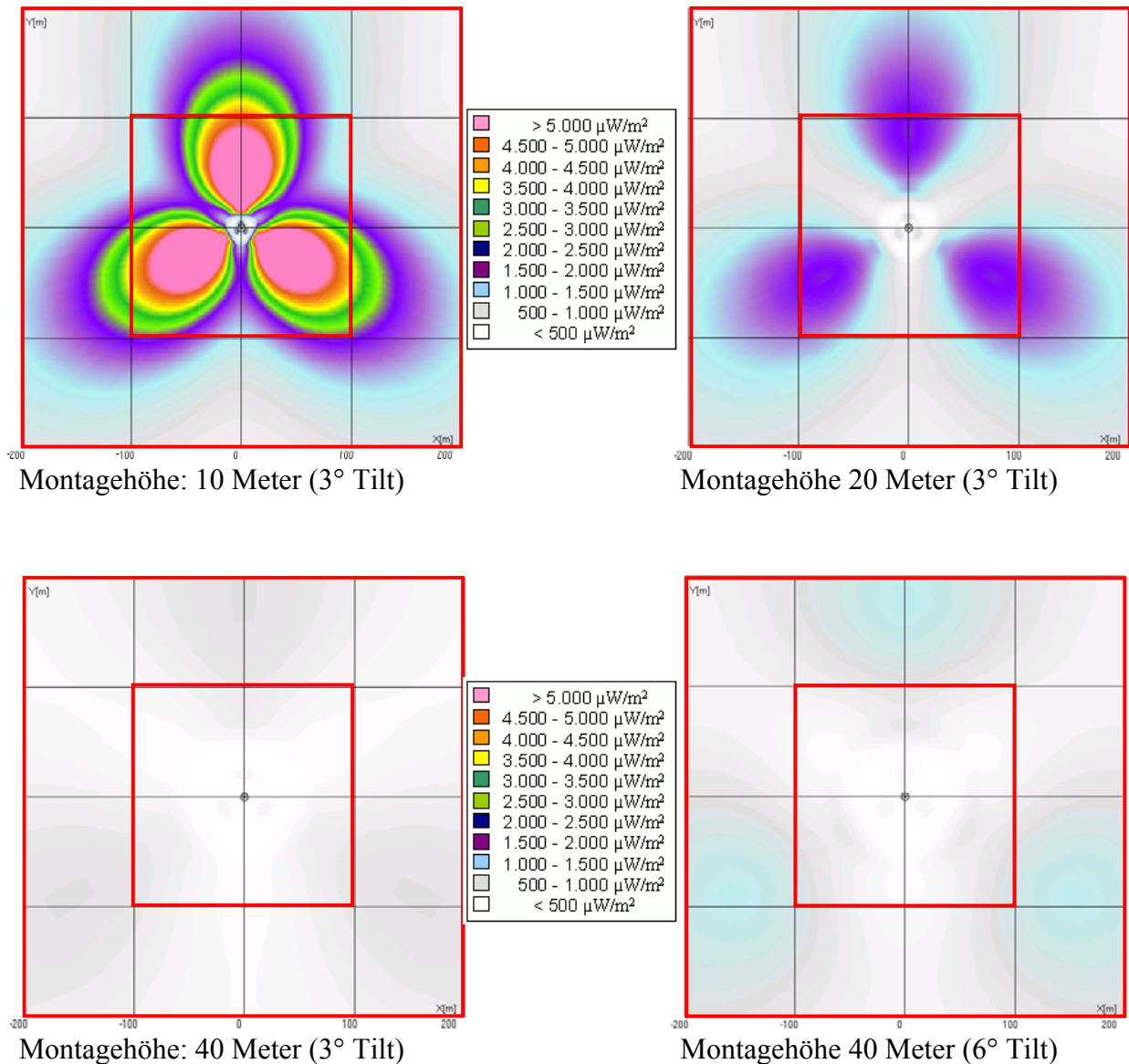
Zusätzlicher mechanischer Downtilt	0°
Horizontale Antennenausrichtung	0°, 120°, 240°
Montagehöhe Antennenunterkante	10 m, 20 m, 40 m

**Tab. 6.1:** Für die Simulation der Höhenabhängigkeit verwendete Parameter.

Bei der gewählten Antenne handelt es sich um einen Typ mit technischen Daten, die in GSM900-Netzen durchaus üblich sind. Die mechanische Bauhöhe der Antenne beträgt 1,3 Meter. Als elektrischer Downtilt wird ein Wert von 3° gewählt, der ebenfalls als typisch angesehen werden kann (Bei Montagehöhe von 40 Meter wurde zusätzlich die Immission bei einem Downtilt von 6° berechnet). Die Immissionen wurden für Orte in Bodennähe (1,5 Meter über Grund) ermittelt.

In folgender Abbildung sind die entstehenden Immissionen im Umfeld des Antennenstandortes in der betrachteten Höhe von 1,5 Meter über Grund in der Horizontalebene farblich dargestellt. Der "Nahbereich" wird durch das innere Quadrat mit 200 Meter Kantenlänge begrenzt, der Rest der Fläche ist der "Fernbereich". Dargestellt sind hier und auch in allen anderen Bildern von Kapitel 6 die Immissionen in Mikrowatt pro Quadratmeter, es wurde also eine leistungsbezogene Darstellung gewählt, weil dadurch die Unterschiede in den einzelnen Bereichen der betrachteten Fläche deutlicher sichtbar werden. Zur Beachtung: In Kapitel 5 wurden alle Ergebnisse feldstärkebezogen dargestellt.

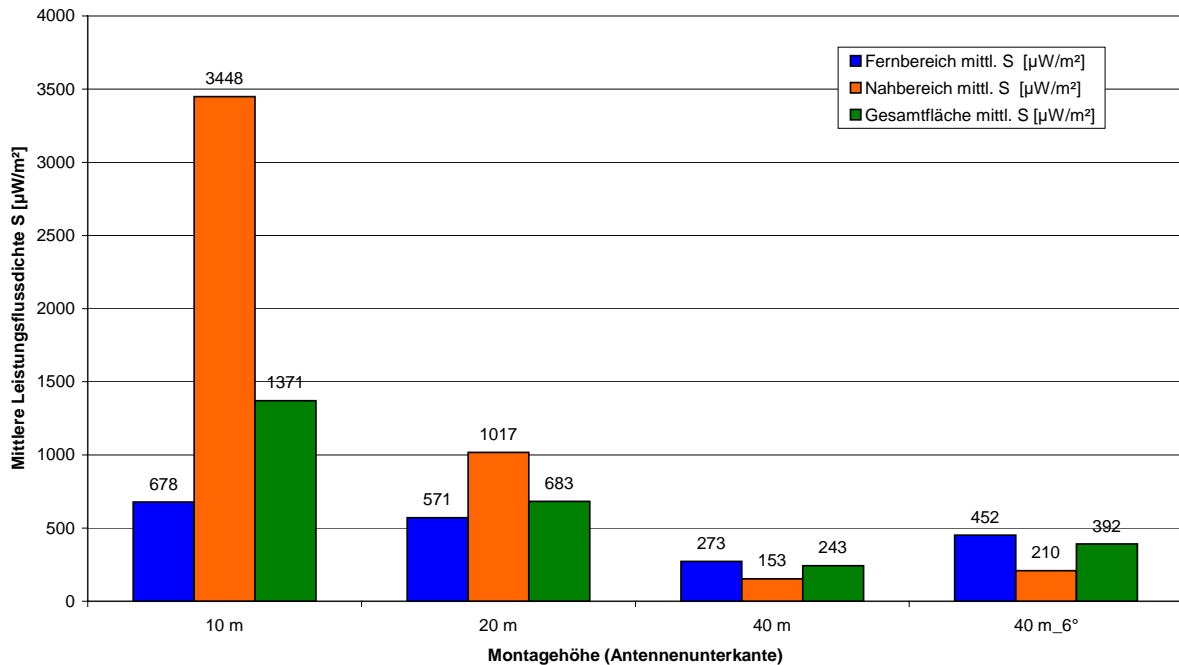




**Abb. 6.5:** Farbliche Darstellung der entstehenden Immission (Horizontalschnitt in 1,5 Meter über Grund) bei verschiedenen Montagehöhen (GSM900).

Man erkennt an den obigen Bildern, wie die Immission mit zunehmender Antennenhöhe kleiner wird und außerdem die Bereiche mit maximaler Leistungsflussdichte nach außen wandern. Bei 40 Meter Montagehöhe erreicht die Hauptkeule erst außerhalb des betrachteten Bereichs den Boden, so dass in der hier dargestellten Fläche die mittleren Immissionen unter 500  $\mu\text{W}/\text{m}^2$  bleiben. Da bei derart hohen Antennenstandorten die Betreiber zumindest in Städten in der Regel einen etwas größeren Downtiltwinkel einstellen müssen um die Interferenzgefahr klein zu halten, wurde die Simulation nochmals mit 6° Tilt wiederholt. Wie aus Abbildung 6.5 ersichtlich, entsteht dadurch der Bereich mit maximaler Immission wieder innerhalb der betrachteten Fläche, so dass sich wieder ein Anstieg der durchschnittlichen Immission ergibt.

Errechnet man nun aus den in Abbildung 6.5 dargestellten flächigen Immissionsverteilungen die entsprechenden Mittelwerte, so ergibt sich folgendes Bild:



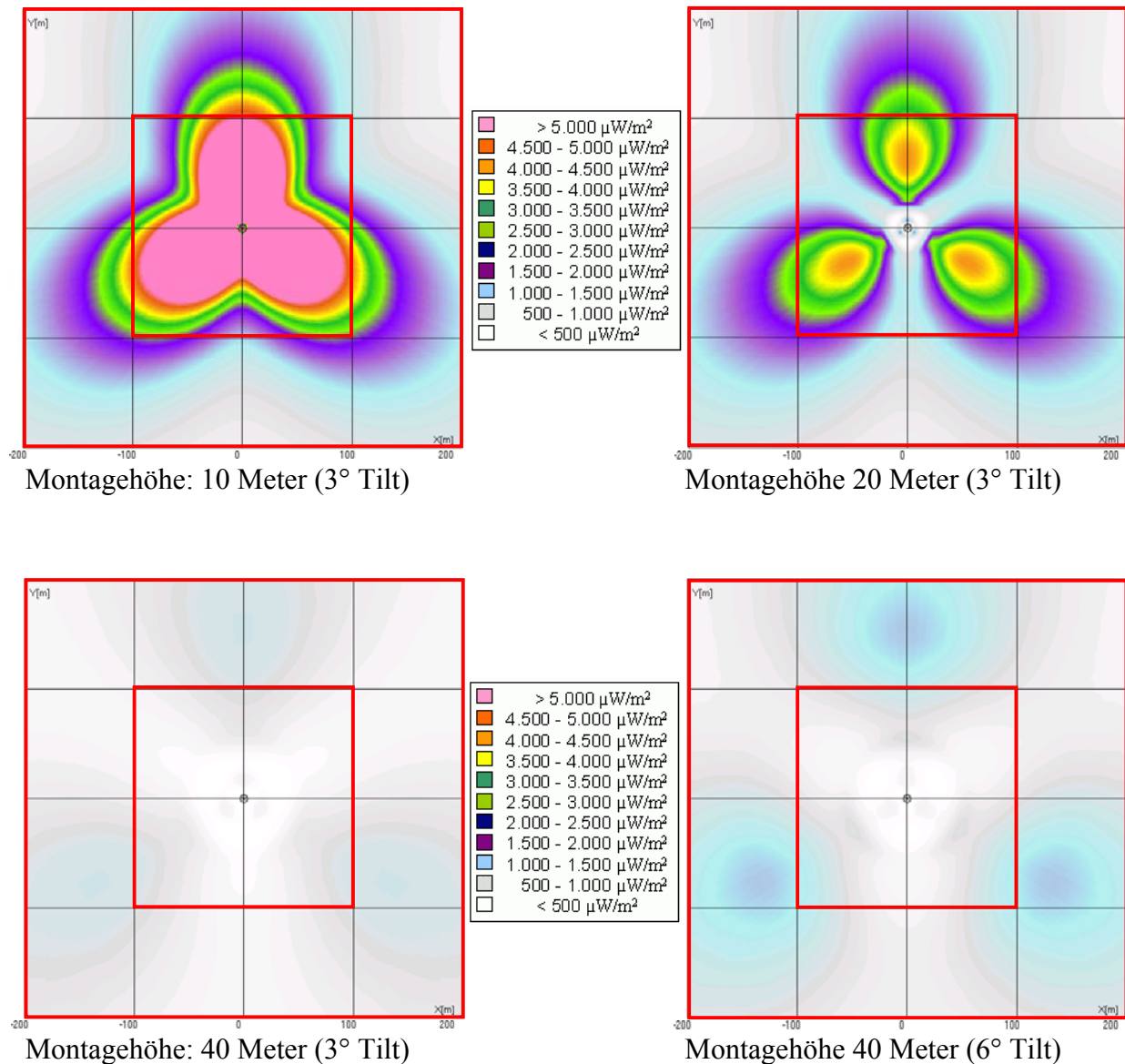
**Abb. 6.6:** Mittlere Immission in 1,5 Meter über Grund bei Variation der Montagehöhe der Antennen (GSM900).

Es ergibt sich also eine deutliche Abnahme der mittleren Immission, wenn die Antennen höher montiert sind. Bei 20 Meter beträgt die mittlere Immission nur etwa 50 Prozent des Wertes bei 10 Meter Montagehöhe, bei 40 Meter ist der Mittelwert über die gesamte betrachtete Fläche gegenüber 10 Meter sogar etwa um den Faktor 5,7 zurückgegangen. Bei 40 Meter und dem größeren Tiltwinkel von 6° entsteht eine etwas größere mittlere Immission (Verringerung gegenüber 10 Meter nur noch etwa um den Faktor 3,5). Es wird also bei großer Montagehöhe deutlich weniger mittlere Leistungsflussdichte erzeugt, da die Leistung auf einen größeren Flächenbereich insbesondere außerhalb der betrachteten Fläche verteilt wird.

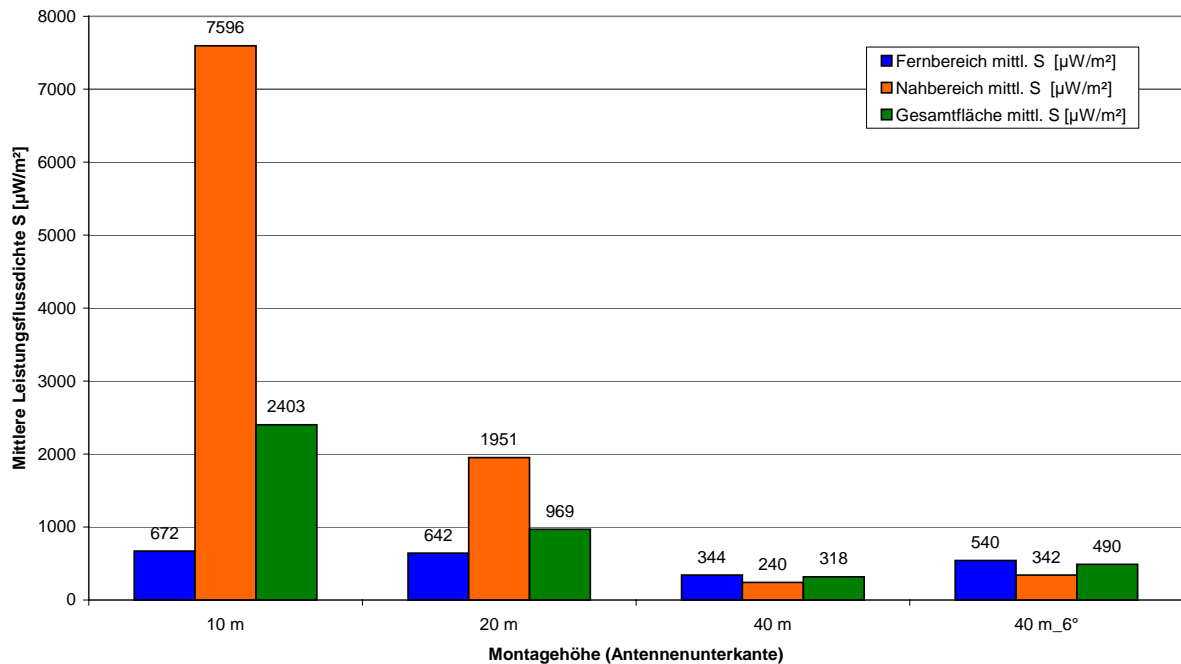
Zusätzlich verändert sich die Verteilung der Immission mit der Höhe des Antennenstandortes. Bei Montagehöhen von 10 beziehungsweise 20 Meter ergibt sich im "Nahbereich" eine größere mittlere Immission" als im "Fernbereich". Bei 40 Meter ist es umgekehrt, da sich der "Nahbereichsschatten" der Mobilfunkantennen besonders gut ausprägen kann.

Bezüglich der Homogenität der Immission, d.h. des Unterschiedsfaktors zwischen den mittleren Leistungsflussdichtewerten in den beiden Entfernungsbereichen kann man feststellen, dass bei niedriger Montagehöhe ein deutlicher Unterschied zwischen "Nah-" und "Fernbereich" besteht (Faktor 5,1 bzw. etwa 7 dB), während bei 20 und 40 Meter deutlich homogenere Zustände herrschen (Faktor 1,8 bzw. 2,6 dB). Der größere Tilt bei 40 Meter Montagehöhe wirkt sich etwas verschlechternd auf die Feldhomogenität aus.

Wie bereits erwähnt, müsste diese Analyse genau genommen für alle Höhenbereiche vorgenommen werden, in denen sich Personen in der Umgebung der Station aufhalten können. Beispielhaft wurde daher die Simulation nochmals für eine Höhe von 7 Meter über Grund durchgeführt, was etwa der Höhe des 2. Obergeschosses von Gebäuden entspricht. Die Resultate der Berechnungen sind in folgenden Abbildungen dargestellt. Alle anderen Parameter wurden unverändert verwendet.



**Abb. 6.7:** Farbliche Darstellung der entstehenden Immission (Horizontalschnitt in 7 Meter über Grund) bei verschiedenen Montagehöhen (GSM900).



**Abb. 6.8:** Mittlere Immission in 7 Meter über Grund bei Variation der Montagehöhe der Antennen (GSM900).

Das grundsätzliche Verhalten (Abnahme der mittleren Immission, größere Immissionen im "Fernbereich" sowie homogenere Immissionsverteilung bei höherer Antennenmontage) ändert sich offensichtlich nicht. Allerdings ergeben sich insbesondere bei niedriger Antennenmontage in sieben Meter Höhe größere Absolutwerte der Immission, als in Bodennähe, da diese Punkte sich näher an der vertikalen Hauptsenderichtung der Antenne befinden.

**Fazit:** Eine größere Montagehöhe der Mobilfunkantennen verringert die mittlere Immission in Bodennähe: Besonders stark ausgeprägt ist die Abnahme im "Nahbereich", wobei zusätzlich eine homogenere Immissionsverteilung durch höhere Antennenstandorte erzielt werden kann.

Nochmals sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass bei diesen Berechnungen von stark vereinfachten Annahmen ausgegangen wurde. Unter anderem wurde vorausgesetzt, dass immer Sichtverbindung zwischen Antenne und Immissionspunkt besteht. Es wird also nicht berücksichtigt, dass in der Realität bei zunehmender Montagehöhe der Standort insbesondere bei Punkten im "Fernbereich" besser sichtbar wird, als bei niedriger Montagehöhe (Abschattung durch angrenzende Bebauung). Dies führt natürlich dazu, dass der hier beschriebene Effekt eventuell deutlich abgeschwächt wird (siehe dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 4,

speziell Abbildung 4.4). Eine genaue Simulation beider Abhängigkeiten wäre sicherlich interessant, würde jedoch den Umfang dieses Projektes sprengen.

Die in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen zeigen auch, dass selbst bei Bestückung eines Standortes mit nur 3 x 20 Watt die "Salzburger Empfehlung" in der Umgebung nicht mehr sicher eingehalten werden kann. Auch eine sehr hohe Montage der Antennen (40 Meter) ist nicht ausreichend. Im Durchschnitt liegen dann die Immissionen zwar unter 1 Milliwatt/m<sup>2</sup>, punktuell treten jedoch immer noch Überschreitungen dieses Wertes auf (Bei 6° Tilt entsteht beispielsweise eine maximale Leistungsflussdichte von 1,07 Milliwatt/m<sup>2</sup>).

## 6.4 Einfluss des vertikalen Bündelungsvermögens der Antenne

### 6.4.1 Vergleich zweier Antennen mit gleicher Bauhöhe bei GSM900 bzw. UMTS

Die Größe des vertikalen Öffnungswinkels, d.h., des Winkelbereichs, in den der überwiegende Teil der elektromagnetischen Energie abgegeben wird, ist hauptsächlich abhängig von der vertikalen Abmessung der verwendeten Antenne im Verhältnis zur Betriebswellenlänge. Mobilfunkantennen werden als "Antennenarray" aufgebaut, d.h. sie bestehen beispielsweise aus einer bestimmten Anzahl an Dipolen, die zum Erzielen der vertikalen Bündelung übereinander gestockt angeordnet werden (siehe Abbildung 6.9). Je mehr Dipole vertikal übereinander angeordnet werden, desto besser bündelt die Antenne in der Vertikalen, d.h. ihr vertikaler Öffnungswinkel wird kleiner. Typischerweise haben die Einzeldipole eine Abmessung von  $\lambda/2$  (d.h. etwa 16 cm bei GSM900 bzw. 7,5 cm bei GSM1800/UMTS). Sehr häufig werden im Mobilfunk Sektorantennen mit einer Bauhöhe von 1,3 Meter eingesetzt, da diese einen guten Kompromiss aus vertikalem Bündelungsverhalten, Gewicht, Windlast und optischer Sichtbarkeit darstellen. Werden also GSM900-Antennen mit einer Bauhöhe von 1,3 Meter hergestellt, haben diese automatisch einen größeren vertikalen Öffnungswinkel (typisch 15°) als GSM1800-Antennen mit gleicher Vertikalabmessung (typisch 7°). Das gleiche gilt natürlich auch bei Dualbandantennen. Diese bündeln eingespeiste GSM1800- oder UMTS-Signale besser, als GSM900.



**Abb. 6.9:** "Innenleben" einer GSM900-Antenne (älterer Typ). Sie besteht aus sechs Dipolpaaren, die übereinander angeordnet sind.

Bei gleicher physikalischer Bauhöhe der Antenne ergibt sich also eine unterschiedliche vertikale Bündelung je nach Frequenzbereich, es ist daher eine Veränderung im Immissionsbild der Umgebung zwischen GSM900 und GSM1800/UMTS zu erwarten. Aus diesem Grund wurde die Simulation aus Abschnitt 6.3 nochmals für eine typische UMTS-Antenne mit wiederum 1,3 Meter Bauhöhe (also vergleichbarer optischer "Sichtbarkeit") durchgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass die Frequenzbereiche von GSM1800 und UMTS sehr nahe beieinander liegen, können die im folgenden dargestellten Ergebnisse auch auf GSM1800 übertragen werden.

Für die Simulationsrechnungen wurden folgende Parameter verwendet:

Für die Simulation verwendete Parameter	
Sendeleistung am Antenneneingang	20 Watt
Antennentyp	Kathrein 742212 Horizontaler Öffnungswinkel: 63°; Vertikaler Öffnungswinkel: 6,5°
Frequenzband	UMTS
Eingestellter elektrischer Downtilt	3°
Zusätzlicher mechanischer Downtilt	0°
Horizontale Antennenausrichtung	0°, 120°, 240°
Montagehöhe Antennenunterkante	10 m, 20 m, 40 m, 100 m*

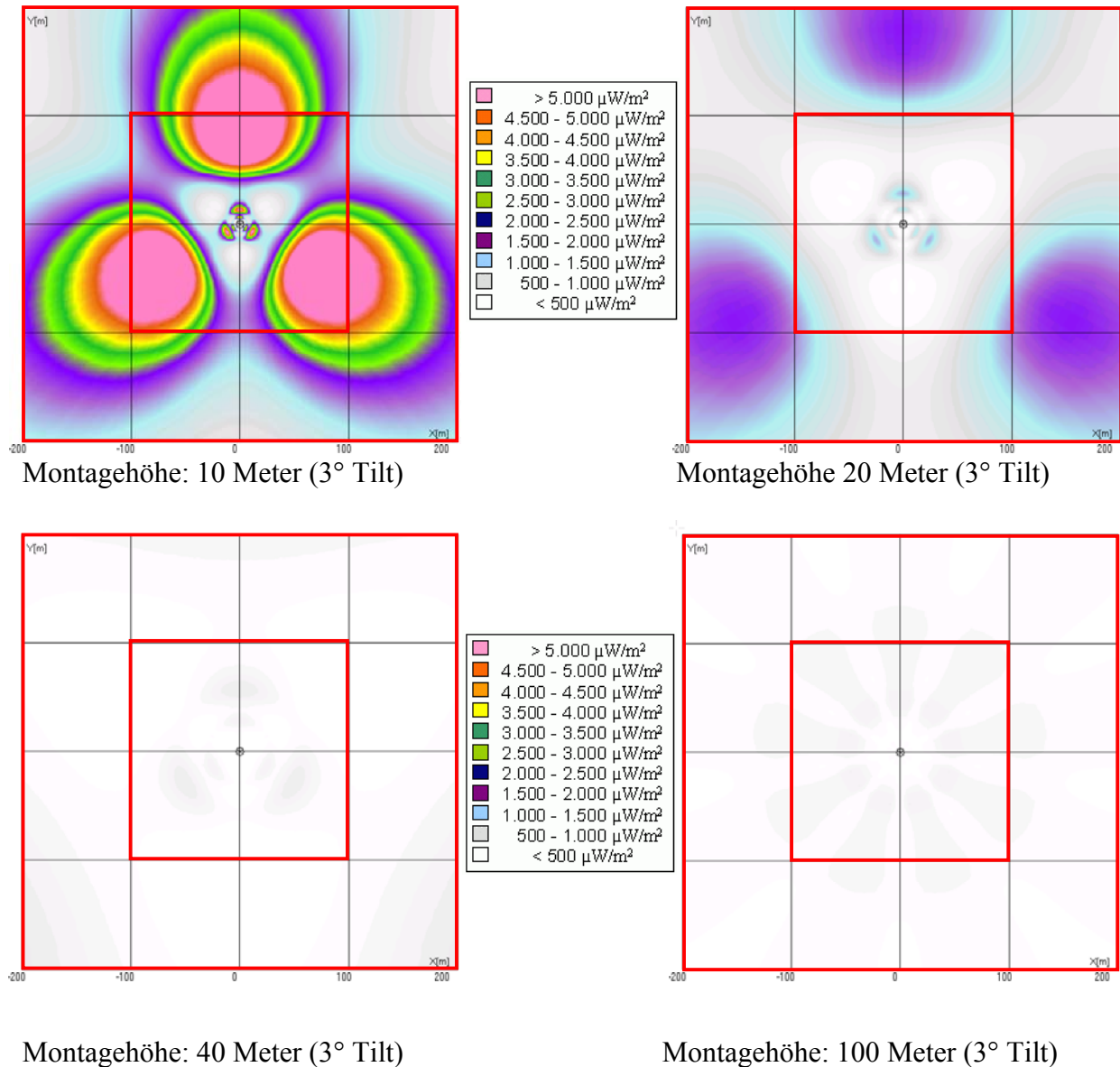
\*: Bei 100 Meter Montagehöhe wurde mit einer anderen Antennenkonfiguration gerechnet (Siehe Text)

**Tab. 6.2:** Für die Simulation der Höhenabhängigkeit bei UMTS verwendete Parameter.

Im Unterschied zur Simulation aus Kapitel 6.3, wurde hier zusätzlich noch eine sehr große Montagehöhe (100 Meter) untersucht, um auch die derzeit von E-Plus im Bereich großer Städte neu aufgebauten UHS-Standorte (UHS = ultra high site) für UMTS bezüglich des entstehenden Immissionsbildes untersuchen zu können. Allerdings wurden bei dieser Montagehöhe nicht nur drei Antennen in 120° Winkelversatz, sondern wie von E-Plus im ersten Ausbaustand vorgesehen, neun Antennen mit je 40° Winkelversatz angeordnet (Typ: Kathrein 742351), die jeweils mit 20 Watt gespeist werden. Diese speziellen Antennen zeichnen sich durch einen sehr kleinen horizontalen Öffnungswinkel von 33° aus, während ihre vertikale Bündelung wiederum etwa 7° beträgt. Als Downtilt wurde trotz 100 Meter Montagehöhe nur 3° gewählt, da nach Auskunft von E-Plus für derartige UHS-Standorte derzeit kein zu starker Tilt eingestellt wird, um eine Versorgung bis in möglichst große Entfernungen sicherzustellen.



In folgender Abbildung sind wiederum die entstehenden Immissionen im Umfeld des Antennenstandortes in der betrachteten Höhe von 1,5 Meter über Grund in der Horizontalebene farblich dargestellt. Der "Nahbereich" wird durch das innere Quadrat mit 200 Meter Kantenlänge begrenzt, der Rest der Fläche ist der "Fernbereich".



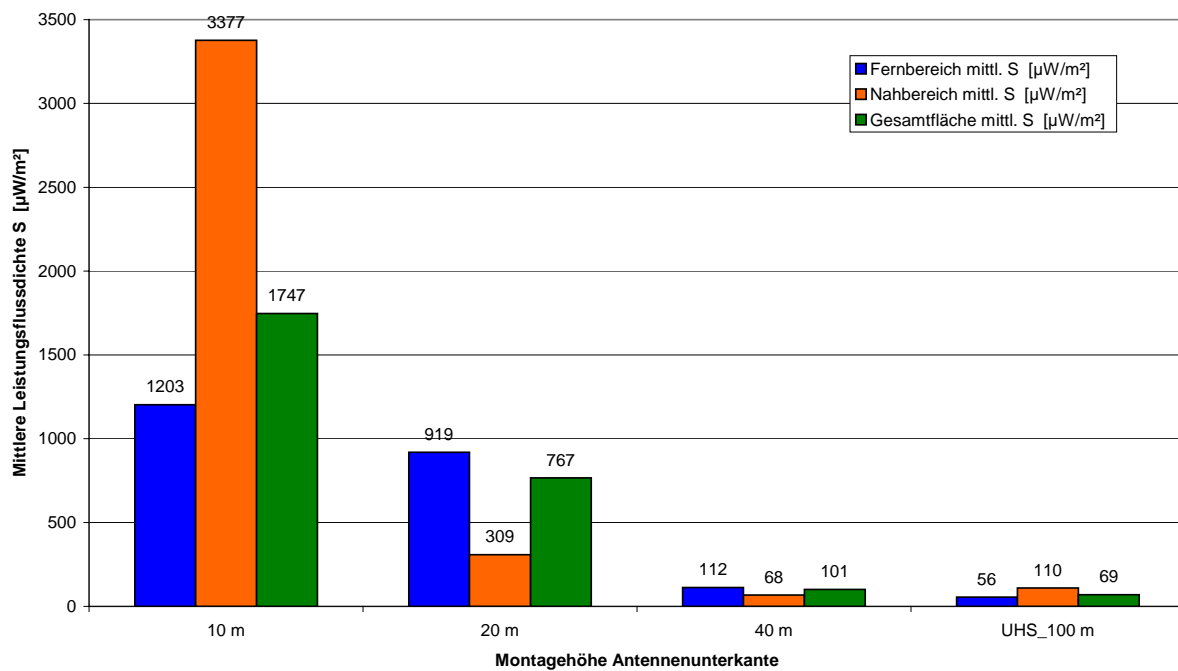
**Abb. 6.11:** Farbliche Darstellung der entstehenden Immission (Horizontalschnitt in 1,5 Meter über Grund) bei verschiedenen Montagehöhen (UMTS).

Man erkennt, dass sich auch bei UMTS ein ähnliches Verhalten bezüglich der Größe und Verteilung der Immission bei zunehmender Antennenhöhe wie bei GSM900 ergibt. Die Simulation des UHS-Standortes zeigt (trotz der Tatsache dass hier neun Antennen mit je 20 Watt statt nur drei Antennen senden) eine besonders geringere Immission in der Fläche, was wegen der



großen Montagehöhe nicht verwunderlich erscheint. Das Zentrum der Hauptkeule erreicht bei ebenem Geländelauf erst in einem Abstand von etwa 900 Meter den Erdboden. Die im hier dargestellten Bereich auftretenden Felder werden also ausschließlich durch Nebenkeulen des Antennendiagramms erzeugt.

Errechnet man nun wieder aus den in Abbildung 6.11 dargestellten flächigen Immissionsverteilungen die entsprechenden Mittelwerte, so ergibt sich folgendes Bild:



**Abb. 6.12:** Mittlere Immission (UMTS) in 1,5 Meter über Grund bei Variation der Montagehöhe der Antennen.

In folgender Tabelle sind für die drei Montagehöhen (10, 20 und 40 Meter) die bei GSM900 bzw. bei UMTS entstehenden mittleren Immissionen vergleichend gegenübergestellt:

Montagehöhe	10 Meter		20 Meter		40 Meter	
Frequenzbereich	GSM900	UMTS	GSM900	UMTS	GSM900	UMTS
"Nahbereich"	3.448 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	3.377 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	1.017 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	309 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	153 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	68 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
"Fernbereich"	678 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	1.203 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	571 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	919 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	273 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	112 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
Gesamtfläche	1.371 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	1.747 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	683 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	767 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	243 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	101 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
Homogenität <sup>1)</sup>	7,1 dB	4,5 dB	2,5 dB	4,7 dB	2,5 dB	2,2 dB
Unterschied zur Montagehöhe 10 Meter <sup>2)</sup>	0 dB	0 dB	3 dB	3,6 dB	7,5 dB	12,4 dB

<sup>1)</sup>: Betrag des Quotienten aus mittleren Immissionen im "Nahbereich" und im "Fernbereich" in dB

<sup>2)</sup>: Quotient aus mittlerer Immission bei 10 Meter und mittlerer Immission bei 20 bzw. 40 Meter in dB

**Tab. 6.3:** Immissionsvergleich GSM900 - UMTS bei Verwendung zweier Antennen mit gleicher Bauhöhe (1,3 Meter).

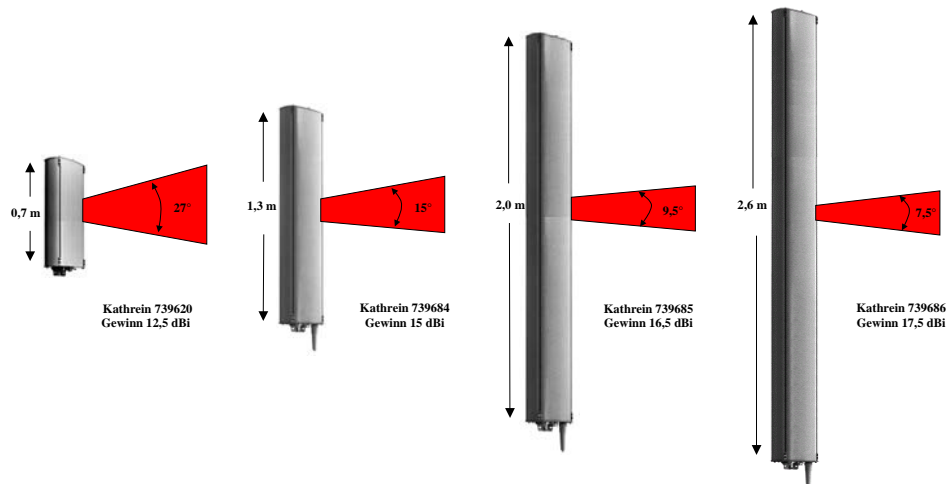
Bei 10 und 20 Meter Montagehöhe wird durch die UMTS-Antennen etwas mehr mittlere Immission im betrachteten Gesamtbereich erzeugt als durch die GSM900-Antennen, was vermutlich auf die bessere Energiebündelung bei den UMTS-Frequenzen zurückzuführen ist. Bei 40 Meter hingegen, wird die Energie durch die UMTS-Antennen besser in weiter entfernte Regionen konzentriert, als es die GSM900-Antennen vermögen. Daher ist hier die mittlere Immission um mehr als den Faktor 2 niedriger als bei GSM900.

Das bessere Bündelungsverhalten wird auch dadurch deutlich, dass die UMTS-Antennen bereits bei 20 Meter Montagehöhe im "Fernbereich" eine höhere mittlere Immission erzeugen als im "Nahbereich". Dies ist bei GSM900 erst ab 40 Meter Montagehöhe der Fall. Auch die Abnahme der mittleren Immission gegenüber der niedrigsten Montagehöhe (10 Meter) ist bei UMTS aufgrund des besser ausgeprägten "Nahbereichsschattens" der Antennen deutlicher zu beobachten als bei GSM900. Im Vergleich zu GSM900, werden durch die UMTS-Antennen im "Nahbereich" für alle drei Höhen niedrigere Immissionen erzeugt.

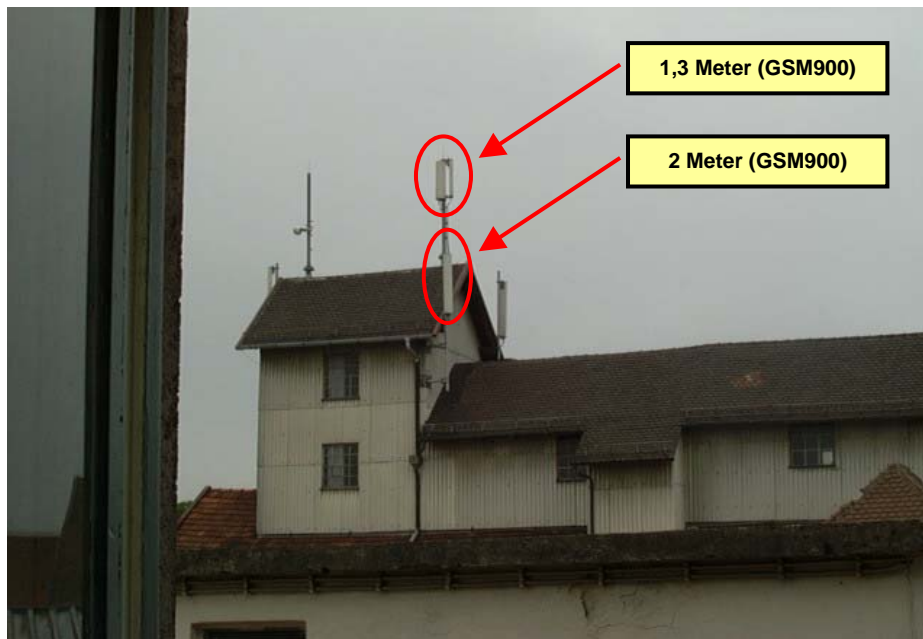
**Fazit:** Bei gleicher mechanischer Bauhöhe wird durch GSM1800- bzw. UMTS-Antennen aufgrund der stärkeren vertikalen Bündelung der "Nahbereich" insbesondere bei größerer Montagehöhe gegenüber GSM900 entlastet. Für die Standortsuche bedeutet dies, dass vor allem bei GSM900-Anlagen höhere Standorte sinnvoll sind, um den Nahbereich zu entlasten.

### 6.4.2 Vergleich von Antennen mit unterschiedlicher Bauhöhe im gleichen Frequenzband

Betrachtet man nicht zwei unterschiedliche Frequenzbereiche, sondern variiert man die vertikale Antennenabmessung bei gleich bleibender Frequenz, so ergibt sich natürlich ebenfalls aufgrund der unterschiedlichen vertikalen Bündelungseigenschaften ein verändertes Immissionsbild in der Umgebung. In folgender Abbildung sind die typischen vertikalen Öffnungswinkel von GSM 900-Antennen mit unterschiedlichen Bauhöhen dargestellt.



**Abb. 6.13:** Vertikaler Öffnungswinkel in Abhängigkeit von der Bauhöhe der Antenne (GSM 900).



**Abb. 6.14:** Zwei GSM900-Systeme auf einem Gebäudedach, allerdings ausgerüstet mit Antennen unterschiedlicher mechanischer Bauhöhe.

Häufig wird gewünscht, dass bei Standorten in Wohnbereichen möglichst "kleine" Antennen verwendet werden, um die optische Beeinträchtigung möglichst gering zu halten (siehe Abbildung 6.14), da in der Öffentlichkeit großvolumige Antennen als größere Immissionsquellen angesehen werden als kleine. In vielen Fällen werden Antennen unterschiedlicher vertikaler Bündelung auch bewusst von den Betreibern eingesetzt, wenn dadurch die Versorgung in der Umgebung optimiert werden kann oder bautechnische Anforderungen nur sehr kleine Antennen zulassen (Statik, Gewicht, Windlast etc.). Ob kleinere Antennen günstiger für die in der Umgebung entstehenden Immissionen sind, soll im folgenden näher untersucht werden.

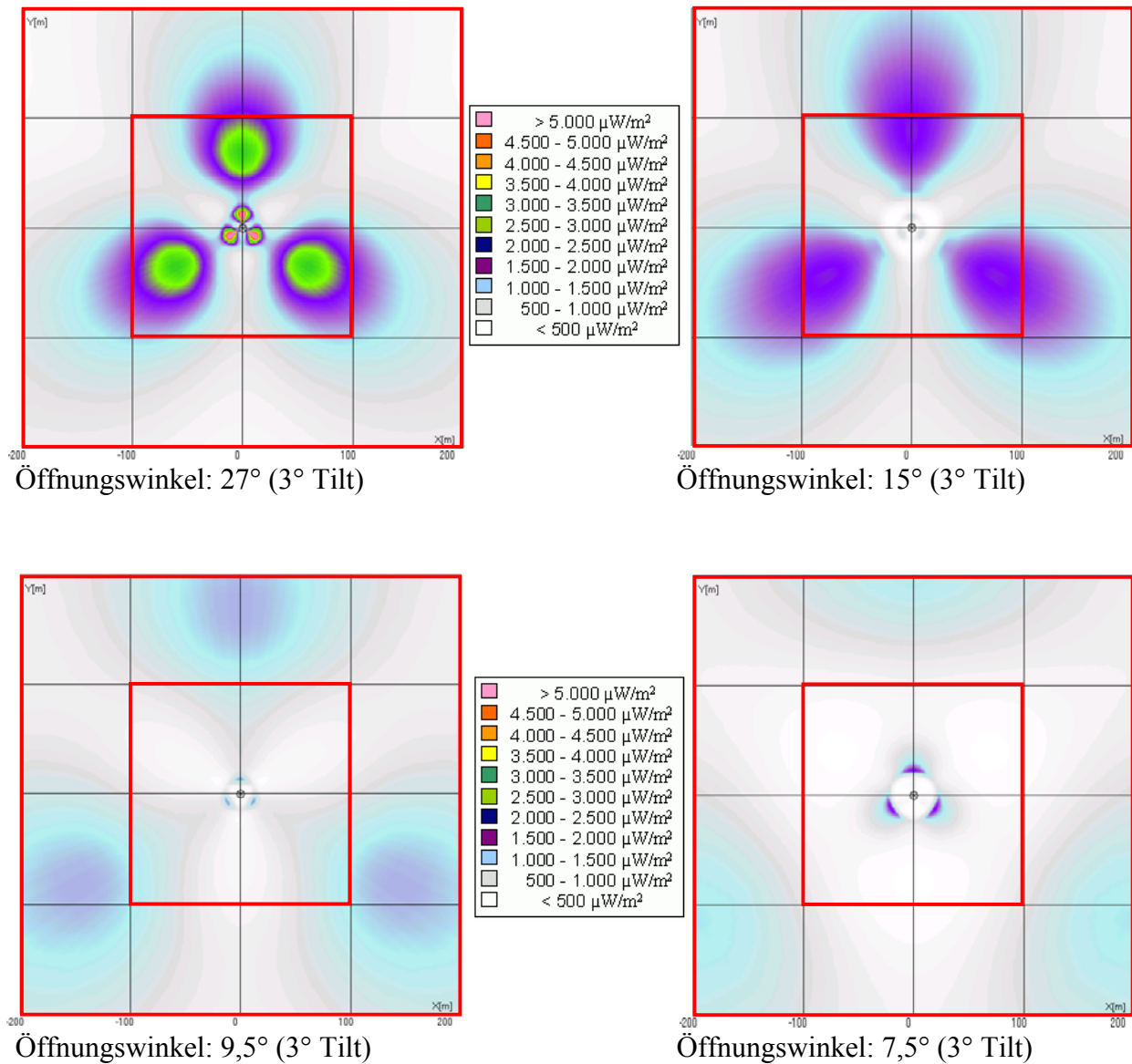
Um den Einfluss der vertikalen Bündelung von Antennen auf die entstehende Immission zu studieren, wurden für folgende Antennen Simulationsrechnungen durchgeführt:

Für die Simulation verwendete Parameter	
Sendeleistung am Antenneneingang	20 Watt
Antenne 1 (Kathrein 739620)	Vertikaler Öffnungswinkel: 27° Vertikale Abmessung: 0,7 m
Antenne 2 (Kathrein 739684)	Vertikaler Öffnungswinkel: 15° Vertikale Abmessung: 1,3 m
Antenne 3 (Kathrein 739685)	Vertikaler Öffnungswinkel: 9,5° Vertikale Abmessung: 2,0 m
Antenne 4 (Kathrein 739686)	Vertikaler Öffnungswinkel: 7,5° Vertikale Abmessung: 2,6 m
Frequenzband	GSM 900
Eingestellter Downtilt (mech. oder el.)	3°
Horizontale Antennenausrichtung	0°, 120°, 240°
Montagehöhe Antennenunterkante	10 m, 20 m, 40 m

**Tab. 6.4:** Für die Simulation des Einflusses von Antennen mit verschiedenen vertikalen Öffnungswinkeln verwendete Parameter.

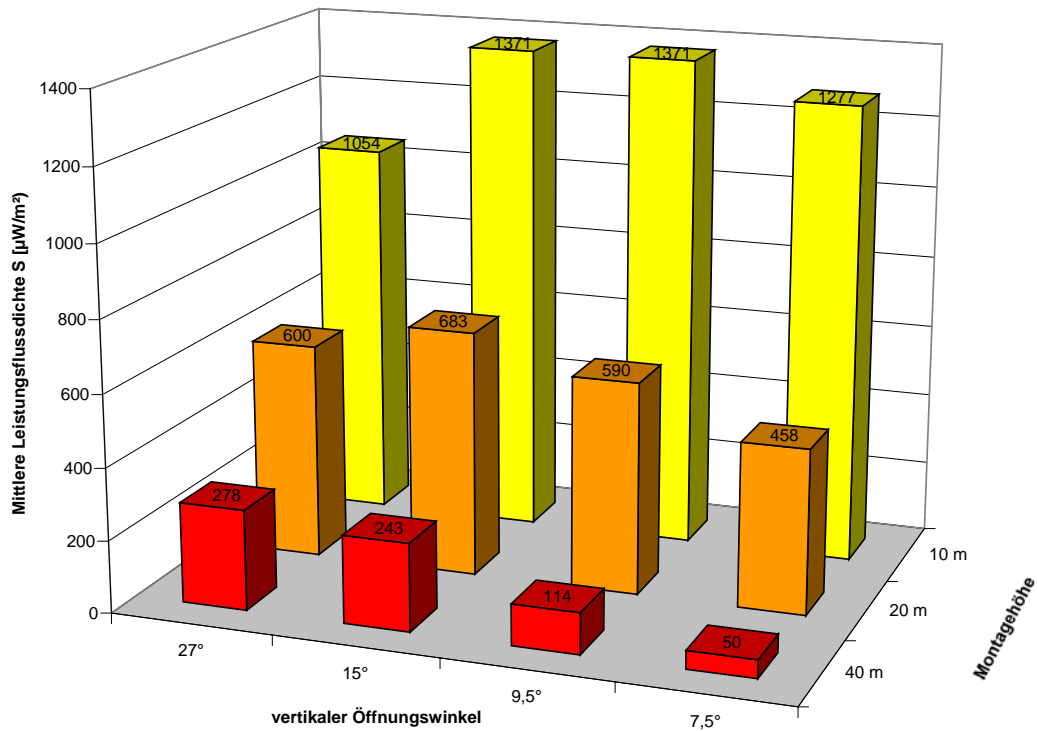
Es handelt sich hier bei allen vier Typen um Antennen mit einem horizontalen Öffnungswinkel von 65°. Als vertikaler Tilt wurde immer 3° gewählt (mechanisch oder, falls möglich, elektrisch eingestellt). Die mechanischen Abmessungen der Antennen sind hingegen sehr unterschiedlich, die Bauhöhe liegt zwischen 70 cm und 2,6 Meter.

In folgender Abbildung sind wieder die entstehenden Immissionen im Umfeld des Antennenstandortes in der betrachteten Höhe von 1,5 Meter über Grund in der Horizontalebene exemplarisch für eine Montagehöhe von 20 Meter farblich dargestellt. Der "Nahbereich" wird durch das innere Quadrat mit 200 Meter Kantenlänge begrenzt, der Rest der Fläche ist der "Fernbereich".



**Abb. 6.15:** Farbliche Darstellung der entstehenden Immission bei Verwendung von Antennen mit unterschiedlichem vertikalen Öffnungswinkel und einer Montagehöhe von 20 Meter (GSM900; Horizontalschnitt in 1,5 Meter über Grund).

Betrachtet man zunächst nur die entstehende mittlere Leistungsflussdichte in Bodennähe (1,5 Meter über Grund) im gesamten Bereich so ergibt sich folgendes Bild:



**Abb. 6.16:** Mittlere Immission (GSM900) in 1,5 Meter über Grund bei Verwendung von Antennen mit unterschiedlichem vertikalen Öffnungswinkel und drei verschiedenen Montagehöhen.

Die bereits bekannte Abnahme der mittleren Immission bei zunehmender Montagehöhe, wird auch hier wieder sichtbar. Allerdings zeigt sich, dass die Stärke der Abnahme erheblich vom vertikalen Bündelungsverhalten der Antenne abhängt, wie folgende Tabelle zeigt:

Vertikaler Öffnungswinkel	Unterschiedsfaktor $S_{10\text{ m}}/S_{40\text{ m}}$	Unterschiedsfaktor in dB
27°	3,8	5,8 dB
15°	5,6	7,5 dB
9,5°	12,0	10,8 dB
7,5°	25,5	14,1 dB

**Tab. 6.5:** Mittlere Immission: Unterschiedsfaktor zwischen 10 m und 40 m Montagehöhe.

Eine Erhöhung des Antennenstandortes zum Zweck der Immissionsminimierung in der Fläche ist also insbesondere bei gut bündelnden Antennen effizient.

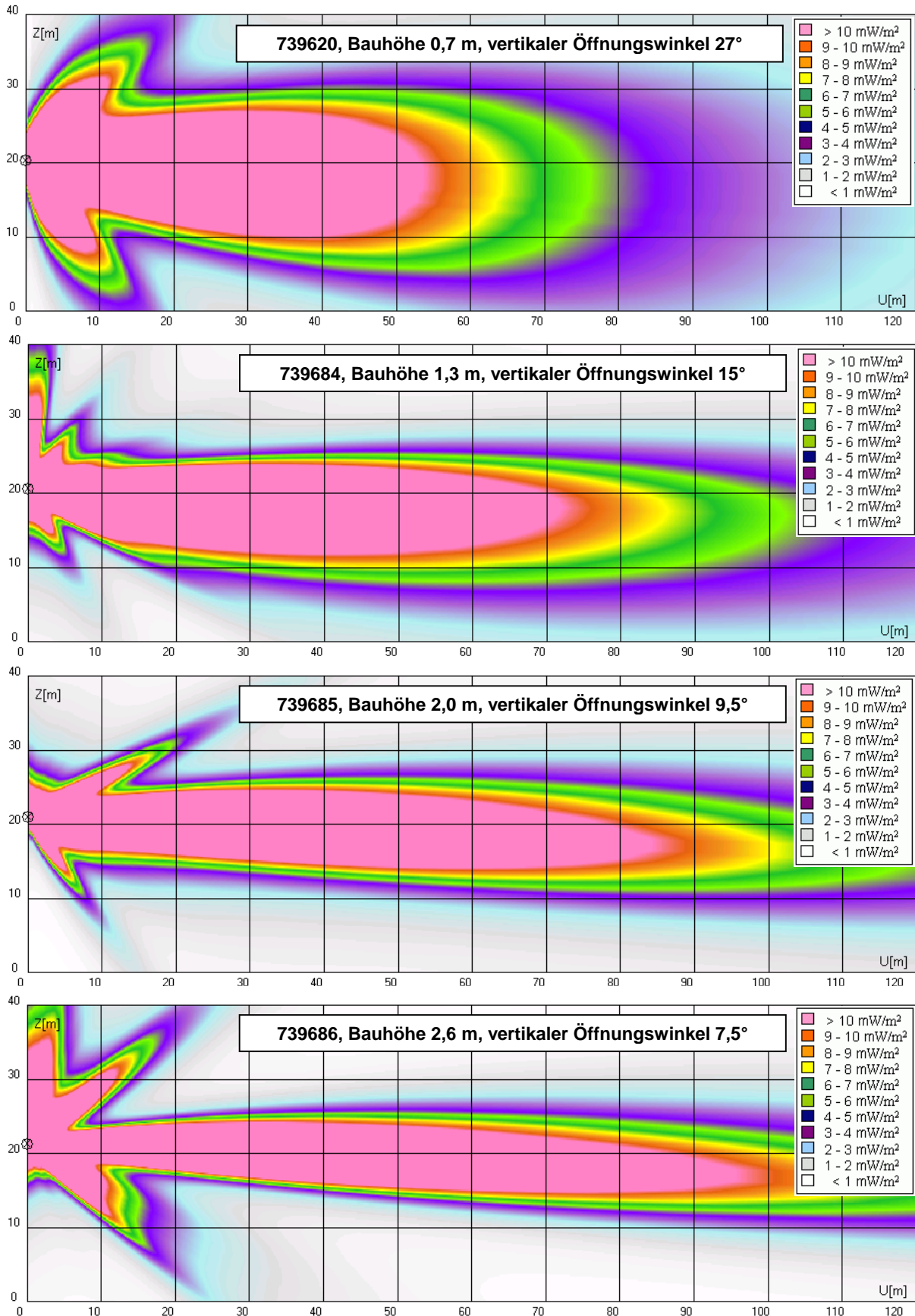
Abbildung 6.16 zeigt aber auch, dass bei niedriger Montagehöhe die Antenne mit dem größten vertikalen Öffnungswinkel die geringste mittlere Immission erzeugt, während sie bei großer Montagehöhe am ungünstigsten erscheint. Der Grund dafür liegt in der Tatsache begründet, dass mit zunehmender Montagehöhe die gut bündelnden Antennen mehr und mehr Energie nach außerhalb des hier betrachteten Umgebungsbereiches der Station schaffen und sie dadurch für eine stärkere Abnahme der mittleren Immission sorgen, als schlecht bündelnde Antennen, die auch bei hoher Montage noch hauptsächlich die hier betrachtete Region beleuchten.

Andererseits ist bei den "kurzen" Antennen die vertikale Bündelung so schlecht ausgeprägt, dass ein nennenswerter Anteil der elektromagnetischen Energie nicht in Richtung zum Boden sondern schräg nach oben abgegeben wird (siehe Abb. 6.17), was sich offensichtlich zumindest bei niedriger Montagehöhe vermindern auf die mittlere Immission der Umgebung auswirkt.

Abbildung 6.17 zeigt im Vertikalschnitt die Ausprägung des Abstrahlverhaltens für die vier hier betrachteten Antennen bei einer Montagehöhe von 20 Meter. Man erkennt einerseits, dass insbesondere bei der Antenne mit 27° Öffnungswinkel relativ viel Energie schräg nach oben abgestrahlt wird und damit nicht als Immission in der Umgebung wirksam wird. Außerdem ist bei den Antennen mit kleinem Öffnungswinkel die Ausprägung des "Nahbereichsschattens" gut erkennbar.

In Abbildung 6.17 wurde aus Darstellungsgründen anstelle der Einheit  $\mu\text{W}/\text{m}^2$  jetzt  $\text{mW}/\text{m}^2$ , wobei gilt:  $1.000 \mu\text{W}/\text{m}^2 = 1 \text{mW}/\text{m}^2$ .





**Abb. 6.17:** Vertikales Immissionsbild in Abhängigkeit von der Vertikalbündelung.

Zusätzlich wird nun noch die Immissionsverteilung im "Nah-" bzw. "Fernbereich" betrachtet. In folgender Tabelle sind die jeweiligen mittleren Immissionen, sowie der Unterschiedsfaktor zwischen "Nah-" und "Fernbereich" für die untersuchten Antennentypen und Montagehöhen dokumentiert:

Öffnungswinkel		Montagehöhe: 10 Meter	Montagehöhe: 20 Meter	Montagehöhe: 40 Meter
27°	"Nahbereich"	3.084 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	1.307 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	278 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	"Fernbereich"	377 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	364 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	278 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	Homogenität <sup>1)</sup>	<b>9,1 dB</b>	<b>5,6 dB</b>	<b>0 dB</b>
15°	"Nahbereich"	3.449 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	1.017 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	154 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	"Fernbereich"	678 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	571 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	273 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	Homogenität <sup>1)</sup>	<b>7,1 dB</b>	<b>2,5 dB</b>	<b>2,5 dB</b>
9,5°	"Nahbereich"	2.561 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	409 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	74 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	"Fernbereich"	975 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	650 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	127 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	Homogenität <sup>1)</sup>	<b>4,2 dB</b>	<b>2,0 dB</b>	<b>2,3 dB</b>
7,7°	"Nahbereich"	1.569 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	182 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	91 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	"Fernbereich"	1.180 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	550 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	37 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	Homogenität <sup>1)</sup>	<b>1,2 dB</b>	<b>4,8 dB</b>	<b>3,9 dB</b>

<sup>1)</sup>: Betrag des Quotienten aus mittleren Immissionen im "Nahbereich" und im "Fernbereich" in dB

**Tab. 6.6:** Immissionsvergleich zwischen "Nah-" und "Fernbereich" bei Verwendung von Antennen mit verschiedenen vertikalen Öffnungswinkeln (GSM900).

In Abbildung 6.16 wurde gezeigt, dass Antennen mit großem vertikalen Öffnungswinkel bei niedriger Montage geringere mittlere Immissionen erzeugen, als die Antennen mit besserer Bündelung wenn man die Gesamtfläche von 400 x 400 Meter betrachtet. Aus Tabelle 6.6 wird allerdings deutlich, dass dafür die Homogenität der Feldverteilung zu Ungunsten des "Nahbereiches" verschoben wird. Die mittleren Immissionen im Nahbereich sind bei den Antennen mit 27° und 15° (niedrige bzw. mittlere Montagehöhe) sowohl von ihrer absoluten Größe als auch relativ gesehen im Vergleich zum "Fernbereich" und auch zur Durchschnittsimmission über die Gesamtfläche ungünstiger. Bei 40 Meter Montagehöhe bzw. bei gut bündelnden Antennen ergibt sich eine homogenere Immissionsverteilung.

**Fazit:** Antennen mit kleiner mechanischer Bauhöhe sind optisch weniger auffällig und können bei niedriger Montagehöhe aufgrund der Tatsache, dass sie einen nicht unerheblichen Teil der eingespeisten Leitung schräg nach oben abstrahlen, auch etwas geringere mittlere Immissionen in der Umgebung erzeugen. Allerdings geschieht dies zu Lasten des Nahbereiches, in dem dann eine überdurchschnittliche Zunahme der Immission zu beobachten ist. Betrachtet man also die Homogenität der Feldverteilung bzw. will man die Spitzenwerte der Immission im Umfeld der Anlage minimieren, sind Antennen mit guter Vertikalbündelung häufig günstiger. Bei Verwendung von Antennen mit kleinem Öffnungswinkel können sich allerdings die Immissionen punktuell an Orten vergrößern, die sich in der Hauptkeule der Antenne befinden.

## 6.5 Einfluss der vertikalen Strahlabsenkung (Downtilt)

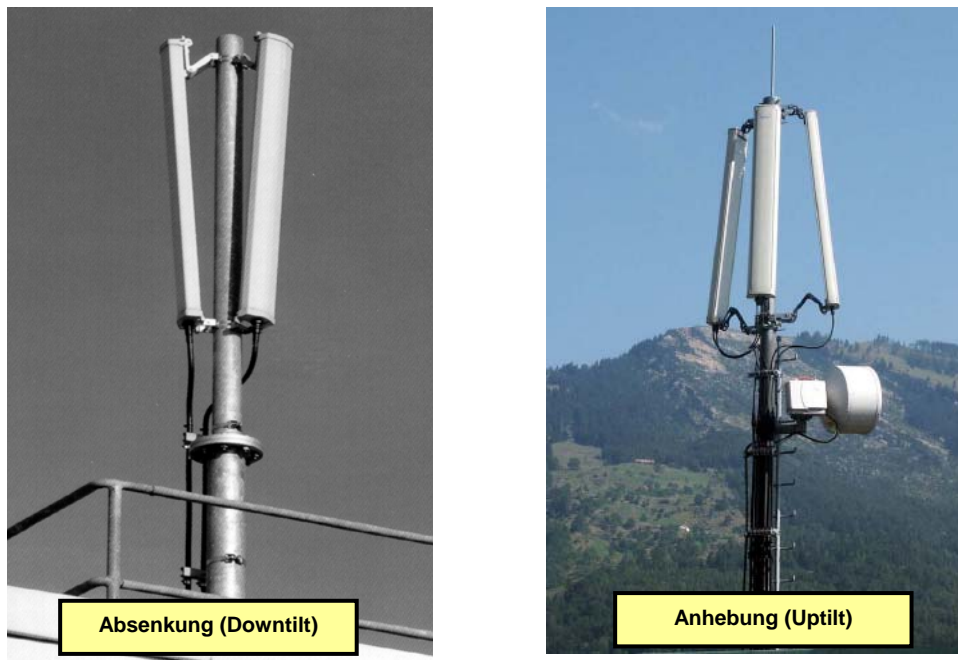
Als weiterer wichtiger Einflussfaktor soll nun noch die Veränderung der mittleren Immission in der Umgebung bei Variation der vertikalen Strahlabsenkung ("Downtilt") untersucht werden.

Durch Änderung der vertikalen Absenkung der Hauptstrahlrichtung beeinflussen die Netzbetreiber die Reichweite der Sendeanlage, d.h. die Ausdehnung der Funkzelle. Im Fall, dass sich Stationen, die mit der gleichen Sendefrequenz arbeiten, gegenseitig stören, kann durch Veränderung des Downtilt eine Verbesserung erzielt werden. Meist besitzen die Antennen von Stationen im ländlichen Umfeld eine geringere vertikale Strahlabsenkung als es in Ballungsräumen der Fall ist.

Auch ist ein Unterschied zwischen GSM und UMTS zu erkennen. Da es sich bei UMTS um ein "Gleichwellennetz" handelt, d.h. alle Stationen arbeiten auf der gleichen Trägerfrequenz, muss die Versorgungsreichweite bei normalen Dach- und Maststandorten sehr sorgfältig eingestellt sein, um Verschlechterungen der Netzqualität, die sich meist in einer Reduktion der Übertragungskapazität bemerkbar machen, zu verhindern. Hier wird die Optimierung u.a. ebenfalls durch ein verstärktes Absenken der vertikalen Hauptsenderichtung der Antennen durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei UMTS-Anlagen (außer bei UHS-Standorten) häufig ein-ige Grad mehr Downtilt eingestellt ist, als bei GSM-Stationen.

Gelegentlich wird die vertikale Hauptsenderichtung auch nach oben angehoben, um die Abstrahlung beispielsweise einem ansteigenden Geländeverlauf anzupassen oder um einen in der Antenne von Hersteller bereits fest eingestellten elektrischen Downtilt zu kompensieren.

Bei älteren Antennentypen konnte ein eingestellter Downtilt noch von außen erkannt werden (siehe Abbildung 6.18). Bei den moderneren Typen wird die Strahlabsenkung oft nicht mehr mechanisch sondern durch elektrische Maßnahmen (phasenverzögerte Ansteuerung der Einzelstrahler) realisiert, so dass die Größe des eingestellten Tilt nicht mehr so einfach von außen erkennbar ist.



**Abb. 6.18:** Mobilfunkantennen mit sichtbarer vertikaler Strahlabsenkung bzw. -anhebung.

Für die Simulation wurden folgende Anlagendaten zu Grunde gelegt:

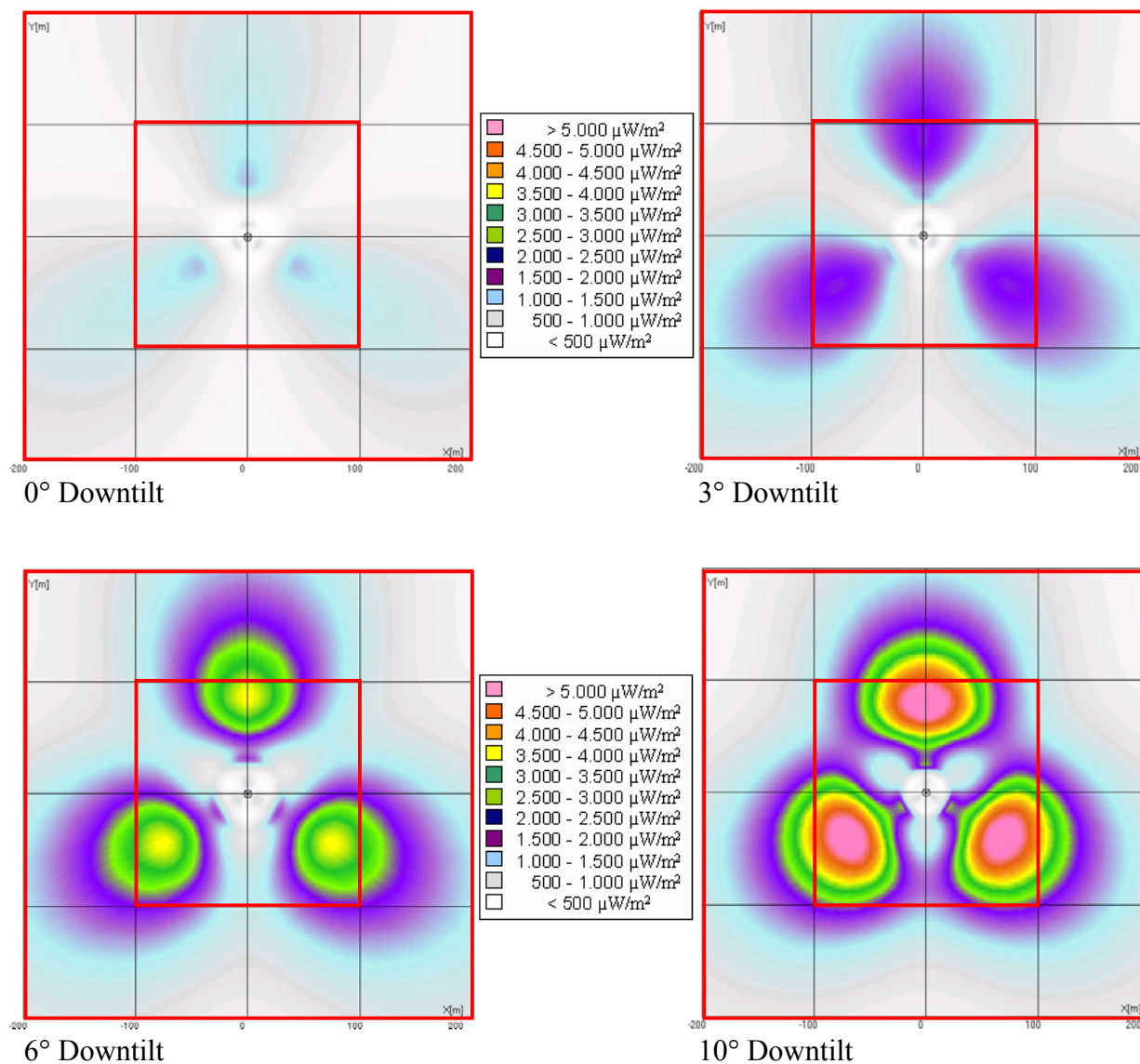
Für die Simulation verwendete Parameter	
Sendeleistung am Antenneneingang	20 Watt
Antennentyp	Kathrein 739684 Horizontaler Öffnungswinkel: 65°; Vertikaler Öffnungswinkel: 15°
Frequenzband	GSM 900
Variation des elektrischen Downtilt	0° bis 10° in 1°-Schritten
Zusätzlicher mechanischer Downtilt	0°
Horizontale Antennenausrichtung	0°, 120°, 240°
Montagehöhe Antennenunterkante	20 m

**Tab. 6.7:** Für die Simulation der Abhängigkeit vom Downtilt verwendete Parameter.

Für die Simulation wurde wieder die Antenne Kathrein 739684 verwendet, die bereits in den vorhergehenden Untersuchungen mehrmals herangezogen wurde. Bei dieser Antenne kann

durch elektrische Einstellungen der Downtilt stufenlos von  $0^\circ$  bis  $14^\circ$  eingestellt werden. Für die Berechnungen wird der Downtilt in  $1^\circ$ -Schritten von  $0^\circ$  bis  $10^\circ$  (Größere Werte sind in der Praxis wenig realistisch) variiert.

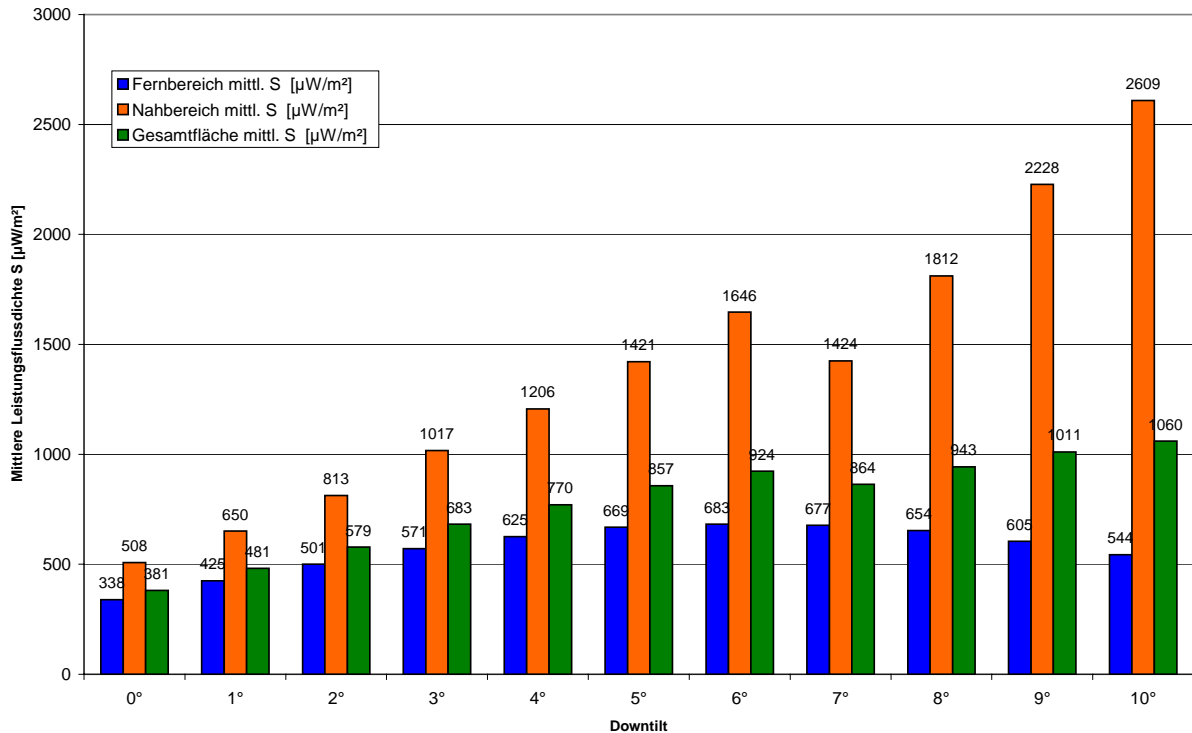
In folgender Abbildung sind die entstehenden Immissionen im Umfeld des Antennenstandortes in der betrachteten Höhe von 1,5 Meter über Grund in der Horizontalebene für vier exemplarische Downtiltwinkel farblich dargestellt. Der "Nahbereich" wird durch das innere Quadrat mit 200 Meter Kantenlänge begrenzt, der Rest der Fläche ist der "Fernbereich".



**Abb. 6.19:** Farbliche Darstellung der entstehenden Immission (Horizontalschnitt in 1,5 Meter über Grund) bei verschiedenen Downtiltwinkeln (GSM900).

Man erkennt an den obigen Bildern, wie die maximal auftretenden Immissionen mit zunehmendem Tiltwinkel größer werden und der Bereich maximaler Immission gleichzeitig nach innen wandert.

Errechnet man nun aus den in Abbildung 6.19 dargestellten flächigen Immissionsverteilungen die entsprechenden Mittelwerte, so ergibt sich folgendes Bild:



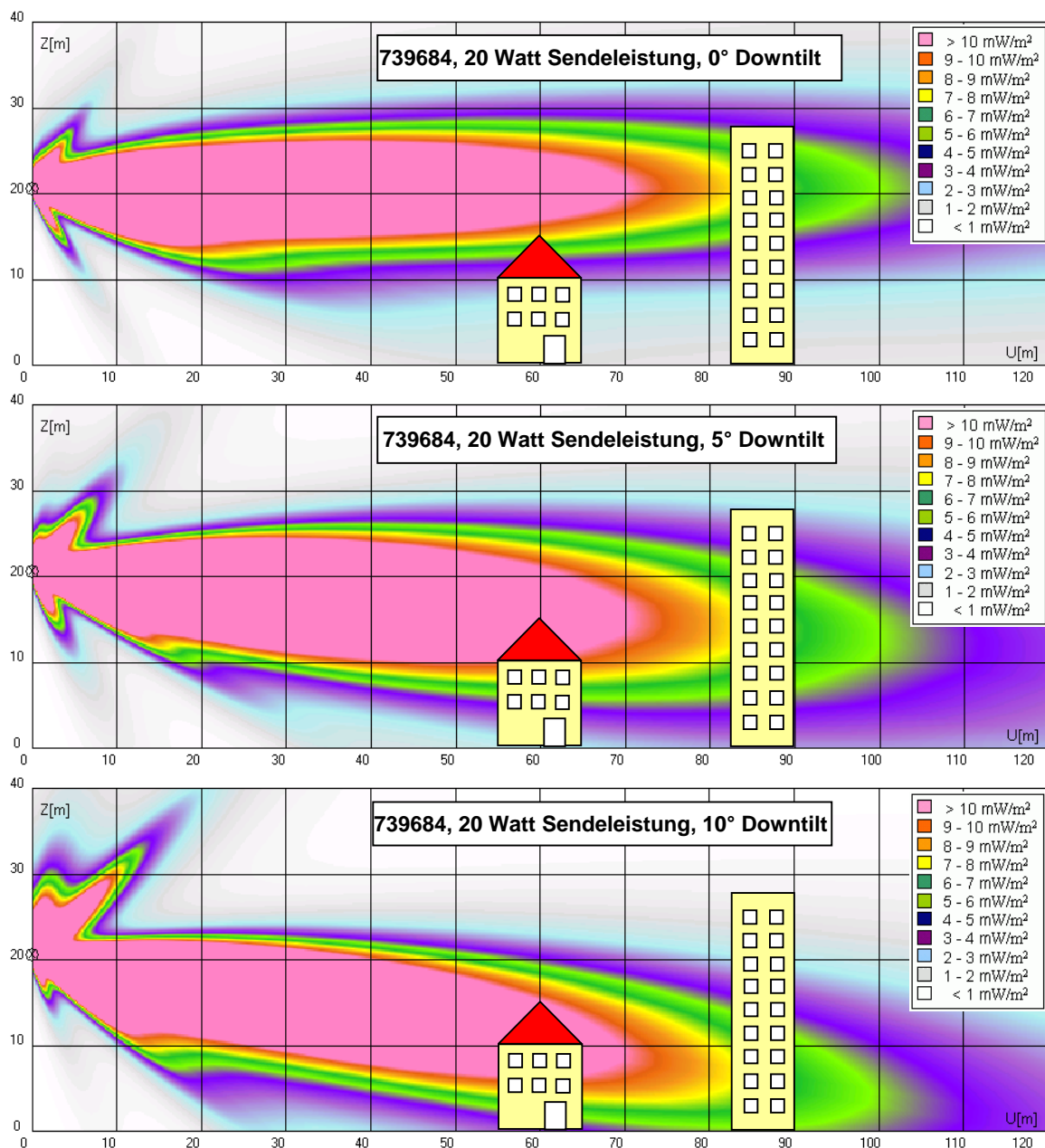
**Abb. 6.20:** Mittlere Immission in 1,5 Meter über Grund bei Variation der vertikalen Strahlabsenkung der Antennen (GSM900, Montagehöhe 20 Meter).

Betrachtet man zunächst nur die Gesamtfläche, ergibt sich eine Zunahme der mittleren Immission mit größer werdendem Downtilt der Antenne, da die Energie mehr und mehr im näheren Bereich um die Antenne konzentriert wird. Der Unterschied zwischen 0° und 10° beträgt 4,4 dB. Betrachtet man ausschließlich den "Nahbereich", kann man eine wesentlich deutlichere Immissionszunahme (7,1 dB) beobachten. Im "Fernbereich" verhält sich die Immission in Abhängigkeit vom Tiltwinkel etwas anders. Es existiert in dieser Region ein Maximum der mittleren Immission bei etwa 6° Downtilt, da für diese Winkel die vertikale Keule am besten in Richtung zum "Fernbereich" zeigt. Bei kleineren Winkeln wird die Energie in größere Entfernungen, bei größeren Winkeln mehr in den Nahbereich abgegeben. Bei anderen Montagehöhen der Antennen sind vergleichbare Verhältnisse zu erwarten, allerdings wird das Maximum im "Fernbereich" je nach Veränderung der Antennenhöhe mehr nach außen bzw. innen wandern.



Die deutliche Zunahme der Immission im "Nahbereich" hat auch Auswirkungen auf die Homogenität der Immission. Am wenigsten differieren die Immissionen zwischen "Nah-" und "Fernbereich" für 0° Tilt (Unterschied: 1,8 dB), während sich bei 10° Downtilt bereits die Immission deutlich zu Ungunsten des "Nahbereiches" verschoben hat (Unterschied: 6,8 dB).

Zur Bewertung der Immissionszunahme, die durch eine Vergrößerung des Downtilts entsteht, muss bei realen Expositionssituationen berücksichtigt werden, in welchen Höhenbereichen sich Menschen in der Umgebung des Standortes aufhalten können. Zur Verdeutlichung dient Abbildung 6.21.



**Abb. 6.21:** Darstellung der vertikalen Immissionsverteilung in Abhängigkeit vom Downtilt.



Man erkennt aus obigem Bild deutlich, dass es sehr stark von der Höhe der umgebenden Gebäude und ihrem Abstand zur Sendeanlage abhängt, ab welchem Downtilt an den Gebäudefassaden mit einer nennenswerten Immissionszunahme gerechnet werden muss. Bei hohen Gebäuden reichen tendenziell bereits geringe Downtiltwinkel, um das Gebäude in die vertikale Hauptsenderichtung und damit in die Zone mit maximaler Immission zu bringen. Andererseits ist es auch möglich, dass bei Hochhäusern einige Stockwerke oberhalb der Hauptsenderichtung liegen, so dass die größten Immissionen bei derartigen Situationen nicht unbedingt in den obersten Stockwerken auftreten.

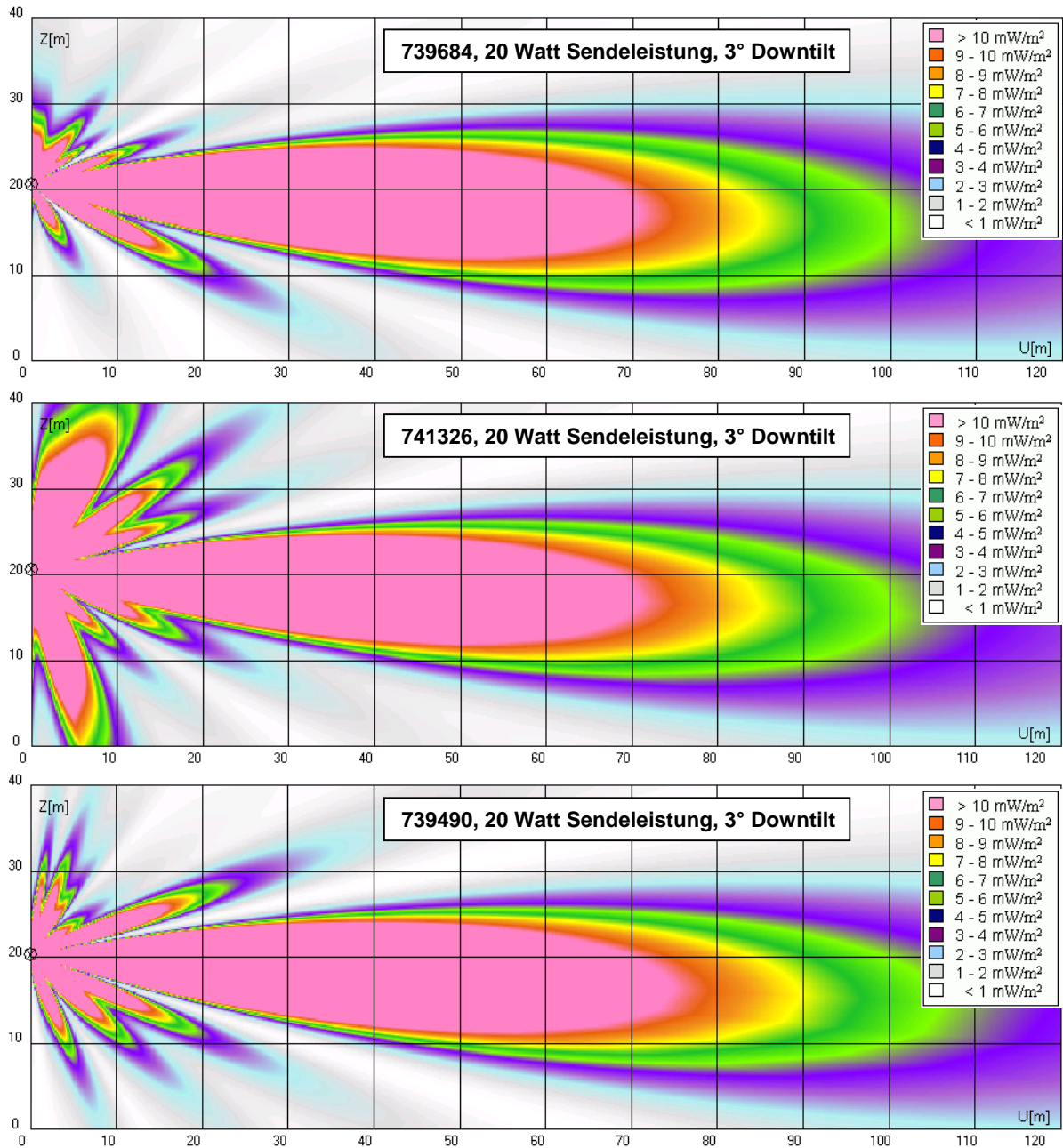
**Fazit:** Eine Variation des Downtiltwinkels hat insbesondere Einfluss auf die Immission im "Nahbereich". Hier muss mit einer Zunahme der mittleren Immission bei größerer Absenkung der vertikalen Hauptsenderichtung gerechnet werden. Wie stark sich eine Veränderung des Downtilt auf die Immission auswirkt, ist sehr von der Höhe der umliegenden Gebäude, der Entfernung zum Standort und der Montagehöhe der Antennen abhängig.

## 6.6 Einfluss unterschiedlich ausgeprägter Nebenkeulen im Vertikaldiagramm

Nachdem bereits in Kapitel 4.1.3 gezeigt wurde, wie sich Nebenkeulen des Antennendiagramms auf die Größe der Immissionsspitzen im Nahbereich auswirken, soll nun auch die Veränderung der mittleren Immission in der Umgebung bei Verwendung von Antennen mit unterschiedlich ausgeprägten Nebenkeulen im Vertikaldiagramm untersucht werden. Unterschiedlich ausgeprägte Nebenkeulen könnten eventuell eine Auswirkung auf die mittlere Immission im "Nahbereich" haben. Neben der bisher verwendeten "Standardantenne" (Kathrein 739684) wurden zwei weitere Antennen (je eine GSM900- und eine GSM1800-Antenne) ausgewählt, die möglichst den gleichen horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel wie die "Standardantenne" besitzen, jedoch deutlich anders ausgeprägte Nebenkeulen im Vertikaldiagramm aufweisen.

Zur Visualisierung der Unterschiede wird zunächst die vertikale Immissionsverteilung für die drei betrachteten Antennen vergleichend gegenübergestellt. Im Gegensatz zu allen anderen bisher vorgestellten Simulationen, wurde hier das unveränderte Originalantennendiagramm des Herstellers (ohne Nullstellenauffüllung) verwendet, um die unterschiedliche Ausprägung der vertikalen Nebenkeulen deutlich zu zeigen.

Abbildung 6.22 zeigt, dass die "Standardantenne" einen recht guten Nahbereichsschatten ausbildet, während insbesondere die Kathrein 741326 im Entfernungsbereich bis 30 Meter durch Nebenkeulen höhere Expositionswerte erzeugt. Die "Standardantenne" wäre also vorzuziehen wenn man in unmittelbarer Nähe des Antennenstandortes die Immissionen besonders minimieren will.



**Abb. 6.22:** Vertikales Immissionsbild dreier Antennen mit unterschiedlich ausgeprägten vertikalen Nebenkeulen (Montagehöhe 20 Meter).

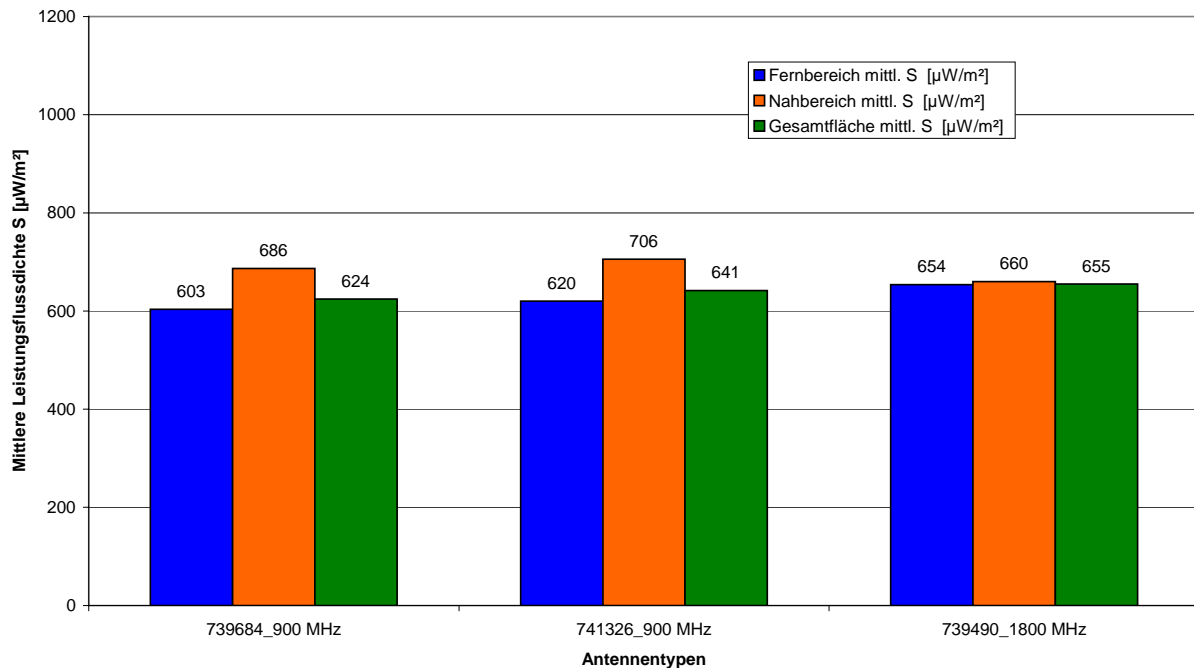
Im folgenden soll nun simuliert werden, wie sich die Unterschiede im Vertikaldiagramm auf die entstehenden mittleren flächenbezogenen Immissionen auswirken.

Für die Simulation wurden folgende Antennen und Anlagendaten zu Grunde gelegt:

Für die Simulation verwendete Parameter	
Sendeleistung am Antenneneingang	20 Watt
Antenne 1: Kathrein 739684 (GSM900)	Horizontaler Öffnungswinkel: 65°; Vertikaler Öffnungswinkel: 15°
Antenne 2: Kathrein 741326 (GSM900)	Horizontaler Öffnungswinkel: 65°; Vertikaler Öffnungswinkel: 14°
Antenne 3: Kathrein 739490 (GSM1800)	Horizontaler Öffnungswinkel: 65°; Vertikaler Öffnungswinkel: 13°
Frequenzband	GSM 900 / GSM1800
Eingestellter Downtilt (mech. oder el.)	3°
Horizontale Antennenausrichtung	0°, 120°, 240°
Montagehöhe Antennenunterkante	20 m

**Tab. 6.8:** Für die Simulation des Einflusses der Nebenkeulen verwendete Antennen und Simulationsparameter.

Errechnet man für diese drei Antennen die entsprechenden mittleren Immissionswerte, so ergibt sich folgendes Bild:



**Abb. 6.23:** Mittlere Immission in 1,5 Meter über Grund bei Antennen mit unterschiedlich ausgeprägten vertikalen Nebenkeulen (Montagehöhe 20 Meter).

Die unterschiedlich ausgeprägten Nebenkeulen üben offensichtlich keinen nennenswerten Einfluss auf die mittlere Immission aus.

Trotz der geringen Immissionen in unmittelbarer Nähe des Antennenstandortes, ergibt sich für die "Standardantenne" eine etwas höhere mittlere Immission, wenn man den gesamten "Nahbereich" (Fläche mit 200 x 200 Meter Seitenlänge) zu Grunde legt. Offensichtlich ist diese Antenne im Bereich zwischen 30 und 100 Meter etwas ungünstiger als die beiden anderen Typen, was ihre bessere Bündelung in Entfernungen bis etwa 30 Meter offensichtlich wieder kompensiert. Man bedenke, dass der Flächenbereich bis 30 Meter nur etwas mehr als 2 Prozent der Gesamtfläche des 200 x 200 Meter-Quadrates darstellt und daher sich durch Nebenkeulen verursachte Unterschiede in der Exposition auf den Mittelwert nur schwach auswirken können.

**Fazit:** Unterschiedlich ausgeprägte vertikale Nebenkeulen üben keinen signifikanten Einfluss auf die entstehende mittlere Immission in der Umgebung eines Standortes aus. Allerdings kann sich durch unterschiedlich stark vorhandene Nebenkeulen der Immissionswert an einem bestimmten Ort (z.B. auf einem Balkon) oder in einer sehr eng begrenzten Region durchaus je nach Ausprägung und Richtung der Nebenkeulen deutlich verändern.

## 6.7 Schlussfolgerungen

Die in diesem Kapitel durchgeführte Immissionsanalyse unter Zuhilfenahme eines vereinfachten Berechnungsmodells liefert einige Resultate, die insbesondere für die flächenorientierte Immissionsminimierung von Bedeutung sein können. Betrachtet wurde hierbei ein 400 x 400 Meter großes Areal in der Umgebung einer Mobilfunksendeanlage, also der Bereich, in dem häufig die größten Immissionen, verursacht durch die Sendeanlage zu erwarten sind. Folgende Erkenntnisse können zusammenfassend festgehalten werden:

- Eine größere Montagehöhe der Mobilfunkantennen verringert die mittlere Immission in Bodennähe: Besonders stark ausgeprägt ist die Abnahme im "Nahbereich", wobei zusätzlich eine homogenere Immissionsverteilung durch höhere Antennenstandorte erzielt werden kann.
- Antennen mit guter vertikaler Bündelung entlasten insbesondere den "Nahbereich" und sorgen für eine relativ homogene Immissionsverteilung in der betrachteten Region. Allerdings besitzen derartige Antennen größere mechanische Abmessungen und fallen daher optisch stärker auf.
- Eine Variation des Downtiltwinkels hat insbesondere Einfluss auf die Immission im "Nahbereich". Hier muss mit einer Zunahme der mittleren Immission bei größerer Absenkung der vertikalen Hauptsenderichtung gerechnet werden. Wie stark sich eine Veränderung des Downtilt auf die Immission auswirkt, ist sehr von der Höhe der umliegenden Gebäude, der Entfernung zum Standort und der Montagehöhe der Antennen abhängig.
- Unterschiedlich ausgeprägte vertikale Nebenkeulen üben keinen signifikanten Einfluss auf die entstehende mittlere Immission in der Umgebung eines Standortes aus. Allerdings kann sich durch unterschiedlich stark vorhandene Nebenkeulen der Immissionswert an einem bestimmten Ort (z.B. auf einem Balkon) oder in einer sehr eng begrenzten Region durchaus je nach Ausprägung und Richtung der Nebenkeulen deutlich verändern.

Zu beachten ist allerdings, dass die hier diskutierten Parameter nicht beliebig gewählt werden können, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Netzqualität ausüben. So wird es beispielsweise nicht möglich sein, alle Mobilfunkantennen ohne vertikalen Downtilt zu betreiben, da dies mit Sicherheit zu starken Beeinträchtigungen der Versorgungsqualität führen würde. Andererseits zeigen die Simulationsrechnungen auch, dass beispielsweise hohe Antennenstandorte, wenn sie verfügbar und von den Betreibern als funktechnisch geeignet eingestuft werden, immer positiv zu bewerten sind, wenn man eine möglichst geringe mittlere Immission in der Umgebung des Standortes wünscht. Dies gilt insbesondere auch für die derzeit neu entstehenden hohen UMTS-Sendestandorte (UHS).