



Elektromagnetische Felder in NRW

**Untersuchung der Immissionen
durch Mobilfunk Basisstationen**

Abschlußbericht zum AP 4 "Einfluss von Grenzwertverschärfungen auf die Gesamtimmission"

**erstellt für das
Ministerium für Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen**

18. März 2002

Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik GmbH
Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2
47475 Kamp-Lintfort

Projektleitung beim Auftragnehmer

Dr. Christian Bornkessel
Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH
Abteilung Antennen & EMVU
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2
47475 Kamp-Lintfort
Tel: 02842/981-383
Fax: 02842/981-399
E-Mail: bornkessel@imst.de

Autoren

Dr. Christian Bornkessel, IMST GmbH
Dr. Jürgen Kunisch, IMST GmbH
Jörg Pamp, IMST GmbH

Projektleitung beim Auftraggeber

Dr. Elke Stöcker-Meier
Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Schwannstraße 3
40476 Düsseldorf
Tel: 0211/4566-710
Fax: 0211/4566-388
E-Mail: elke.stoecker-meier@munlv.nrw.de

Kurzfassung

An Orten, an denen nach Standortbescheinigung ein Aufenthalt von Personen gestattet ist, liegt die ortsbezogene Immission deutlich *unter den Grenzwerten der 26. BImSchV*. Für bestimmte Parameter können jedoch in der Realität Situationen auftreten, an denen die ortsbezogene Immission *über den Schweizer Anlagengrenzwerten* liegt. Solche Parameterkonfigurationen kann es vorrangig in städtischen Gebieten geben.

Zur Reduzierung der ortsbezogene Immission gibt es die folgenden praktikablen Möglichkeiten:

- Reduzierung der Sendeleistung,
- Erhöhung des Antennenstandortes.

Eine Reduzierung der Kanalsendeleistung bei gleichbleibender Kanalzahl pro Anlage führt zu einer Reduzierung des Zellradius und der Zellfläche im Vergleich zum Ausgangszustand. Dies geht mit einer Erhöhung der Anzahl der benötigten Basisstationen einher. Die gesamte Emission, d.h. die Summe der im neuen, dichteren Netz benötigten Sendeleistungen (Netzsendeleistung), und damit auch die Gesamtimmission ist *geringer* als im ursprünglichen Netz. Die flächenbezogene Systemkapazität (maximal mögliche Gesprächsverbindungen pro Fläche) steigt, da für die verringerte Zellfläche gleich viele Kanäle zur Verfügung stehen. In der Praxis kann die Sendeleistung nicht beliebig reduziert werden, da sonst in Teilbereichen Versorgungslücken entstehen.

Die Reduzierung der Anlagensendeleistung kann auch durch eine *Reduzierung der Kanalzahl pro Anlage* erfolgen. Um hierbei die gleiche flächenbezogene Systemkapazität wie für den Ausgangszustand zu erhalten, muss das Mobilfunknetz ebenfalls dichter geplant werden, d.h. die ausgelagerten Kanäle müssen auf neu zu errichtenden Stationen installiert werden. Durch diese Maßnahme wird der Trend der Reduzierung der Gesamtimmission bei Reduzierung der Kanalsendeleistung noch weiter verstärkt.

Eine Teilung von durch mehrere Netzbetreiber gemeinsam genutzten Standorten als Möglichkeit der Reduzierung der Sendeleistung hat keinen Einfluss auf die Gesamtimmission.

Eine Erhöhung der Basisstationshöhe führt zu einer Vergrößerung der Zellen und dementsprechend zu einer Verringerung der notwendigen Zahl der Basisstationen. Auch in diesem Fall sinkt die Gesamtimmission. Im Realfall wird die Erhöhung des Sendestandortes jedoch nicht grenzenlos möglich sein, da dadurch die Interferenz mit den benachbarten Zellen ansteigt und bautechnische Probleme zunehmen.

Eine Grenzwertabsenkung um z.B. 20 dB (Faktor 100 in der Leistung, Schweizer Anlagengrenzwerte) würde sich *nicht* in einer um 20 dB gesenkten Gesamtimmission widerspiegeln, sondern die Reduzierung der Gesamtimmission fällt wesentlich geringer aus.

Durch die teilnehmer- und entfernungsabhängige Leistungsregelung wird das Phänomen, dass eine Grenzwertsenkung um den Faktor x nicht zu einer Reduzierung der Gesamtimmission um den selben Faktor x führt, noch verstärkt, da im zeitlichen Mittel die insgesamt abgestrahlte Leistung kleiner ist als die maximal mögliche. Dadurch ist die tatsächlich vorhandene ortsbezogene Immission noch weiter von den aktuellen Grenzwerten entfernt als bei maximaler Anlagenauslastung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Gliederung des Berichtes	7
3	EMVU Grenzwertsituation bei Mobilfunkfrequenzen	8
3.1	Einleitung.....	8
3.2	Grenzwertsituation in Deutschland.....	9
3.3	Die deutschen Grenzwerte im internationalen Vergleich.....	11
3.4	Die Schweizer NISV Grenzwerte.....	12
4	Bestandsaufnahme: Typische ortsbezogene Immissionen durch bestehende Mobilfunk Basisstationen	14
4.1	Einleitung und Rechenmodell "Freiraum"	14
4.2	Daten der verwendeten Antennen	15
4.3	Berechnung der Immission in der Sektormitte	17
4.3.1	<i>Auswahl der Parameter</i>	17
4.3.2	<i>Prinzipieller Verlauf der ortsbezogenen Immission</i>	18
4.3.3	<i>Variation von Sendeleistung, Höhendifferenz und Downtilt</i>	19
4.4	Einfluss der Variation der Sendeantennen.....	24
4.4.1	<i>Richtdiagramme verschiedener Antennen</i>	24
4.4.2	<i>Auswirkungen verschiedener Antennen auf die ortsbezogene Immission</i>	25
4.5	Zusammenfassung.....	26
5	Möglichkeiten zur Reduzierung der ortsbezogenen Immission ..	27
5.1	Einleitung.....	27
5.2	Reduzierung der maximalen Sendeleistung	28
5.3	Vergrößerung der Höhendifferenz Sender - Immissionsort	28
5.4	Reduzierung des Downtilts.....	28
5.5	Optimierung der Abstrahlcharakteristik der Sendeantennen	29
6	Auswirkungen der Reduzierung der ortsbezogenen Immission auf die Gesamtemission sowie die Struktur des Mobilfunknetzes	29
6.1	Einleitung.....	29
6.2	Prinzipielle Struktur des Mobilfunknetzes.....	30
6.3	Ausbreitungsmodell für städtisches Gebiet.....	31

6.4	Auswirkung einer Reduzierung der Sendeleistung	33
6.4.1	<i>Reduzierung der Kanalsendeleistung bei gleichbleibender Anzahl der Kanäle</i>	34
6.4.1.1	Prinzipielle Auswirkungen.....	34
6.4.1.2	Detaillierte Betrachtung der Abhängigkeiten.....	34
6.4.1.3	Beispiele zu den gezeigten Abhängigkeiten	38
6.4.2	<i>Reduzierung der Kanalsendeleistung bei gleichbleibender Systemkapazität.....</i>	39
6.4.3	<i>Rückbau von gemeinsam genutzten Standorten auf Einfachnutzung.....</i>	40
6.5	Auswirkung einer Erhöhung des Senderstandortes	40
6.5.1	<i>Prinzipielle Auswirkungen</i>	40
6.5.2	<i>Detaillierte Betrachtung der Abhängigkeiten.....</i>	41
6.5.3	<i>Beispiel zu den gezeigten Abhängigkeiten.....</i>	43
6.6	Zusammenfassung.....	44
7	Auswirkungen der Verringerung der ortsbezogenen Immission auf die Gesamtimmission.....	45
7.1	Einleitung.....	45
7.2	Gesamtimmission bei Reduzierung der Sendeleistung.....	46
7.2.1	<i>Ohne Berücksichtigung der Leistungsregelung.....</i>	46
7.2.2	<i>Mit Berücksichtigung der Leistungsregelung</i>	47
7.2.2.1	Einleitung.....	47
7.2.2.2	Funktionsweise der Leistungsregelung	47
7.2.2.3	Auswirkungen der Leistungsregelung.....	50
7.3	Gesamtimmission bei Erhöhung der Senderhöhe.....	51
8	Flächige Darstellung der ortsbezogenen Immission bei Reduzierung von Sendeleistung und Höhenveränderung	52
8.1	Reduzierung der Kanalsendeleistung	53
8.2	Erhöhung des Sendeantennenstandortes.....	56
9	Zusammenfassung.....	59
Anhang A:	COST-Walfisch-Ikegami Wellenausbreitungsmodell	62
Anhang B:	Flächenbezogene Emission als Funktion der Basisstationsleistung	66
Literaturverzeichnis.....		70
Abkürzungsverzeichnis.....		71
Verzeichnis häufig verwendeter Symbole.....		72

1 Einleitung

Der vorliegende Abschlussbericht ist Bestandteil der Studie "Elektromagnetische Felder in NRW- Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen".

Gegenstand der Studie ist der Mobilfunk, der in Deutschland in den letzten Jahren weite Verbreitung gefunden hat. Bestehende Netze werden flächendeckend weiter ausgebaut. Neue Netze, wie etwa das UMTS Netz, befinden sich in der Vorbereitung oder bereits im Versuchsstadium.

Nicht zuletzt durch die neue UMTS Technologie und den damit verbundenen Bedarf an etwa 40.000 neuen Basisstationen allein in Deutschland [SCHÜ 01] ist in den letzten Monaten eine breite öffentliche Diskussion entbrannt. Hauptangriffspunkte sind nicht in erster Linie die mobilen Endgeräte (Handys), sondern die Basisstationen. Auslöser und Gegenstand der öffentlichen Auseinandersetzung sind Presseberichte über wissenschaftliche Studien, die von der Wirkung des Mobilfunks auf Lebewesen berichten, sowie konkrete Fälle, in denen ein Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks und Gesundheitsbeeinträchtigungen vermutet wird. Von einigen Gruppen werden im Sinne der Vorsorge neue, gegenüber den bisherigen Sicherheitswerten verschärfte Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischer Strahlung, wie etwa nach dem Schweizer Modell, gefordert.

Das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen sowie das Landesumweltamt (LUA) Nordrhein-Westfalen, die Bezirksregierungen und die Staatlichen Umweltämter als nachgeordnete Behörden sehen sich täglich einer wachsenden Flut von Anfragen besorgter Bürger bezüglich der Immissionen von nahegelegenen Mobilfunk Basisstationen ausgesetzt. Hier besteht seitens der Behörden wie auch der betroffenen Bürger ein großer Bedarf an einer Abschätzung zu erwartender typischer Immissionswerte im allgemeinen und einer konkreten *messtechnischen* Ermittlung der Immission an als besonders kritisch eingestuften Örtlichkeiten, wie z.B. innerhalb von Wohnungen, Schulen, Kindergärten, Krankenhäusern usw. im besonderen.

Das MUNLV hat deswegen beim Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST GmbH) eine Studie beauftragt, die auf *systematische* Art und Weise die von Mobilfunk Basisstationen hervorgerufene Immissionen generell sowie an den o.g. Einwirkungsorten konkret untersuchen soll.

Im Sinne dieser Studie wird unter *Immission* der *empfängerseitige* elektromagnetische Strahlungspegel verstanden, wohingegen die *Emission* die *senderseitige* Abstrahlung beschreibt.

In der Studie werden vier Arbeitspakete (AP) bearbeitet: Innerhalb von *AP 1* trifft sich regelmäßig ein Arbeitskreis unter Beteiligung der Kommunen. Hier findet ein Erfahrungsaustausch der Kommunen bei der Auseinandersetzung mit Bürgern und Netzbetreibern bezüglich Mobilfunkstandorten statt. Außerdem werden die Ergebnisse der Studie dargestellt und diskutiert sowie Messpunkte für Vorortmessungen der Immission nach *AP 2* und *AP 3* vereinbart. Innerhalb von *AP 2* wird die *Gesamtimmission* unter Berücksichtigung der Mobilfunkimmissionen *an fixen Messpunkten* gemessen, wohingegen in *AP 3* eine systematische messtechnische Untersuchung der *Mobilfunkimmissionen in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen* im Mittelpunkt steht. Eine Kernfrage ist hierbei, inwieweit aus den Gesamtergebnissen der Messungen ein Kriterienkatalog erarbeitet werden kann, der den Kommunen Möglichkeiten auf-

zeigt, wie im Rahmen des Netzausbaus eine Feldstärkeminimierung erreicht werden kann. AP 4 beschäftigt sich mit den Auswirkungen einer Veränderung der Grenzwerte auf die Größe der Gesamtimmission.

Der vorliegende Abschlussbericht bezieht sich auf das Arbeitspaket 4 der Studie. Vor dem Hintergrund der oben dargestellten Diskussion wird untersucht, inwieweit eine Verschärfung der Grenzwerte in Deutschland (z.B. nach dem Schweizer Modell) Auswirkungen auf die Gesamtimmission und die Struktur des Mobilfunknetzes insgesamt hätte. Dabei soll unter *Gesamtimmission* die gesamte in die Umwelt eingestrahlte Leistung verstanden werden (im Gegensatz zur ortsbezogenen Immission, die die Immission an einem fixen Ort beschreibt). Insbesondere soll ermittelt werden,

- in welchem Umfang eine Grenzwertverschärfung tatsächlich zu einer Reduzierung der Gesamtimmission für die Bevölkerung führt (ergibt eine Verschärfung der Grenzwerte um den Faktor 10 auch eine Verringerung der Gesamtimmission um den Faktor 10 gegenüber der ursprünglichen Situation?),
- inwieweit ein konzentriertes (wenige Anlagen hoher Leistung) oder verteiltes (viele Anlagen geringerer Leistung) Senderkonzept bezüglich der Gesamtimmission zu bevorzugen ist, und
- in welchem Ausmaß mit einer Erhöhung der Stationsanzahl zu rechnen ist. Gerade dieses ist ein nicht zu unterschätzender Faktor, da die Angst der Bevölkerung vorrangig mit der Anzahl der sichtbaren Funktürme korreliert.

Es wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Studie sich auf die technischen Fragen in Zusammenhang mit der Grenzwertthematik beschränkt. Biologische sowie politische oder gesellschaftspolitische Fragestellungen sind nicht Gegenstand der Studie.

2 Gliederung des Berichtes

Die Untersuchungen zu den technischen Aspekten des Einflusses von Grenzwertverschärfungen auf die Gesamtimmission wird nach folgender Struktur durchgeführt:

1. Es wird die derzeitige Grenzwertregelung zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern in Deutschland erläutert. Die Grenzwerte in Deutschland werden in Beziehung gesetzt zu Grenzwerten und Grenzwertempfehlungen anderer europäischer und nichteuropäischer Länder. Insbesondere wird dabei auf die häufig zitierten Anlagengrenzwerte und Hintergründe der Schweizer Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) eingegangen [NISV]. Diese Werte werden in der weiteren Untersuchung als Referenz für eine Grenzwertabsenkung angenommen, d.h. es wird hypothetisch betrachtet, welche technischen Auswirkungen es hätte, wenn für Deutschland die gegenüber der 26. BImSchV schärferen Schweizer Anlagengrenzwerte angesetzt werden würden.
2. Daran anschließend folgt eine Untersuchung, ob die in Deutschland derzeit installierten Basisstationen ortsbezogene Immissionen erzeugen, die *das Potenzial haben*, die Schweizer Anlagengrenzwerte zu überschreiten. Parameter der Untersuchungen sind Höhe der Basisstation (BS), Höhe des zu betrachtenden Immissionsortes (Empfänger), Sendeleis-

tung der BS, eingesetzte Sendeantenne und Downtilt Winkel der Sendeantenne. Die Untersuchungen werden rechentechnisch mit einem einfachen Freiraum Wellenausbreitungsmodell durchgeführt, wie es z.B. auch die RegTP bei ihrer Bewertung zur Standortbescheinigung einsetzt (worst case Fall). Es werden bezüglich der Schweizer Verordnung kritische Anlagenkonfigurationen ermittelt.

3. Für die in 2. ermittelten Anlagenkonfigurationen werden *prinzipielle* Möglichkeiten abgeleitet, die zu einer Verringerung der Immission führen.
4. Die prinzipiellen Möglichkeiten werden detailliert untersucht. Hierzu wird ein gegenüber der Freiraumausbreitung realistischeres Wellenausbreitungsmodell verwendet, da die Konsequenzen und Auswirkungen immissionsreduzierenden Maßnahmen auf die GSM Netzstruktur mit dem Freiraummodell nicht sinnvoll darstellbar sind. Unterschiede der ortsbezogenen Immission zwischen neuem Ausbreitungsmodell und Freiraumausbreitung werden erläutert. Für die in 3. abgeleiteten prinzipiellen Möglichkeiten werden die *technischen Auswirkungen auf die Gesamtmission sowie die GSM Netzstruktur* untersucht.
5. Es wird geschlussfolgert, welche Auswirkungen die Veränderung der Parameter im GSM Netz auf die *Gesamtmission* hätten. Diese Untersuchungen werden separat für alle diejenigen Varianten durchgeführt, die sich in 3. als prinzipielle Möglichkeiten der Immissionsreduzierung herausgestellt haben. In die Untersuchungen werden die GSM spezifischen Eigenschaften der teilnehmer- und entfernungsabhängigen Leistungsregelung einbezogen.
6. Die Ergebnisse werden zusammengefasst.

3 EMVU Grenzwertsituation bei Mobilfunkfrequenzen

3.1 Einleitung

Viele Länder, jedoch nicht alle, verfügen über gesetzliche Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. In diesem Kapitel werden die in Deutschland geltenden gesetzlichen Grenzwerte vorgestellt und mit den Grenzwerten anderer europäischer und nichteuropäischer Länder verglichen. Damit soll es ermöglicht werden, die Grenzwertdiskussion in Deutschland im internationalen Umfeld zu sehen.

Berücksichtigt werden hierbei vorrangig *gesetzliche* Grenzwerte bzw. Grenzwertempfehlungen, die von internationalen, allgemein anerkannten Gremien (z.B. ICNIRP) aufgestellt wurden. Grenzwertforderungen von nicht allgemein anerkannten Gruppen oder Organisationen finden hier keine Berücksichtigung.

Die im folgenden vorgestellten Grenzwerte beziehen sich, sofern in den jeweiligen Regelwerken eine Unterscheidung vorgenommen wird, auf eine Exposition der *Allgemeinheit* (Normalbevölkerung). Grenzwerte für die berufliche Exposition bleiben unberücksichtigt, da sie nur für einen speziellen Kreis exponierter Personen oder/und für eine zeitliche begrenzte Exposition gelten. Hierfür sind in der Regel höhere Expositionswerte erlaubt.

Die angegebenen Zahlenwerte sind für den hier interessierenden Frequenzbereich des Mobilfunks aufbereitet. Relevant sind vor allem die Frequenzbereiche, in denen die Basisstationen zum Handy senden (sog. down-link). Im einzelnen werden die Grenzwerte angegeben für:

- GSM 900 (standard): down-link 935 MHz - 960 MHz; Mittenfrequenz 947,5 MHz
- GSM 1800: down-link 1805 MHz - 1880 MHz; Mittenfrequenz 1842,5 MHz
- UMTS (W-CDMA): down-link 2110 MHz - 2170 MHz; Mittenfrequenz 2140 MHz.

In den vorgestellten Grenzwertregelungen finden sich nicht immer die kompletten Informationen zu elektrischer Feldstärke E, magnetischer Feldstärke H und elektrischer Leistungsflussdichte S. Oftmals ist nur E und H angegeben. Aus diesen lässt sich jedoch unter Annahme von Fernfeldbedingungen die Leistungsflussdichte berechnen; dies wird aber in den nachfolgenden Grenzwerttabellen farblich gesondert hervorgehoben.

3.2 Grenzwertsituation in Deutschland

Für den Schutz von Personen vor sowie zur Vorsorge von Personen gegen schädliche Umwelteinwirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder (außermedizinisch) im Hochfrequenzbereich (hier: 10 MHz bis 300 GHz) existiert in Deutschland seit dem 16. Dezember 1996 mit der "Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)" und den darin festgelegten Grenzwerten eine gesetzliche Regelung. Diese Verordnung ist seit dem 01. Januar 1997 in Kraft. Die darin festgelegten Immissionsgrenzwerte basieren auf den international anerkannten Empfehlungen des Komitees für nichtionisierende Strahlen der Internationalen Strahlenschutzvereinigung (IRPA/INIRC), der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierenden Strahlen (ICNIRP), die die Arbeit von IRPA/INIRC fortsetzt, sowie den Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (SSK) und gewährleisten als einzuhaltende Schutzwerte den *Schutz vor bekannten Gesundheitsgefahren* und erheblichen Belästigungen. Die gesetzlichen Grenzwerte sind für ortsfeste Funkseideanlagen mit einer äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP) > 10 W gültig und damit für Mobilfunk Basisstationen (Ausnahme: Richtfunk) voll anzuwenden.

Maßgeblich für die biologischen Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder ist der vom menschlichen Körper aufgenommene Energieanteil. Dominanter Effekt der Hochfrequenzfelder ist die Erwärmung des Gewebes, da der größte Teil der absorbierten Energie in Wärme umgewandelt wird (sog. thermischer Effekt). Der Grenzwertfestsetzung liegt daher die Energieabsorption als Bezugsgröße zugrunde, die als spezifische Absorptionsrate (SAR) in Watt pro Kilogramm Körpermasse angegeben wird. Nach den Empfehlungen von IRPA/INIRC und der SSK dürfen die Immissionen durch hochfrequente elektromagnetische Felder bei Personen der Bevölkerung (nicht beruflich exponierte Personen) einen Ganzkörper-SAR-Wert von 0,08 W/kg nicht überschreiten. Der SAR-Wert basiert auf einer Mittelung über 6-Minuten-Intervalle, da sich im menschlichen Körper mit der thermische Zeitkonstante nach sechs bis zehn Minuten eine stationäre Temperaturverteilung einstellt.

Die SAR-Werte können in der Praxis am Menschen nicht gemessen werden. Aus Praktikabilitätsgründen wurden von IRPA/INIRC aus dem Ganzkörper-SAR-Wert daher die nachfolgend aufgeführten, leicht zu ermittelnden Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke

abgeleitet, die ein Einhalten des SAR-Werts auch unter ungünstigen Expositionsbedingungen garantieren. Für gepulste elektromagnetische Felder besteht eine zusätzliche Begrenzung der elektrischen und magnetischen *Spitzenwerte* auf das 32fache der unten aufgeführten *effektiven* Feldstärkewerte.

Der Festlegung der Grenzwerte für die Bevölkerung liegt die Annahme einer ständigen Exposition zugrunde. Als maßgebliche Einwirkungsorte sind solche Orte bestimmt, die dem nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen, also z.B. Wohngebäude, aber auch Krankenhäuser, Schulen, Kindergärten, Arbeitsstätten, Spielplätze oder sonstige Orte, an denen nach der konkreten bestimmungsgemäßen Benutzung regelmäßig längere Verweilzeiten von Personen auftreten, wobei es sich vor dem Hintergrund der Grenzwertbestimmung zugrundeliegenden Annahmen um Aufenthaltsdauern von mehreren Stunden handelt. Bei der Prüfung auf Einhaltung eines Grenzwertes ist die Vorbelastung durch elektromagnetische Felder einzubeziehen, die von anderen ortsfesten Sendeanlagen ausgehen.

In der 26. BImSchV sind für den Hochfrequenzbereich die Grenzwerte für die elektrischen und magnetischen Feldstärken angegeben. Elektrische und magnetische Feldstärken sind über den Feldwellenwiderstand des Freiraumes, $Z_0 = 377 \Omega$, ineinander überführbar und beinhalten deswegen dieselbe Information. Das Produkt von elektrischer und magnetischer Feldstärke im Fernfeld einer Strahlungsquelle ergibt die elektrische Leistungsflussdichte S . Da auch diese dieselbe Information wie die Feldstärken beinhaltet, wird sie oft alternativ zur elektrischen Feldstärke bei der Grenzwertüberprüfung herangezogen.

Ein Grenzwert ist eingehalten, wenn der gemessene Wert unterhalb des Grenzwertes liegt, bzw. wenn der Quotient aus gemessenem Wert und Grenzwert kleiner Eins ist. Wirken mehrere Felder mit unterschiedlichen Frequenzen zusammen (z.B. unterschiedliche Mobilfunk Sendekanäle oder Anlagen unterschiedlicher Netzbetreiber), dann sind die Quotienten aus den gemessenen Effektivwerten der Feldstärken und den jeweiligen Grenzwerten quadratisch aufzusummieren. Diese Summe darf den Wert Eins nicht überschreiten. Wird die Überprüfung anhand der zulässigen Mittelwerte der Leistungsflussdichten vorgenommen, erfolgt die Aufsummierung linear.

Tabelle 3.1 fasst die relevanten Grenzwerte der 26. BImSchV für die down-link Mittenfrequenzen der Mobilfunkbereiche zusammen.

Deutschland – 26. BImSchV	Elektrische Feldstärke E_{eff} in V/m	Magnetische Feldstärke H_{eff} in A/m	Äquivalente Leistungsflussdichte S in W/m^2
GSM 900	42,3	0,11	4,7
GSM 1800	59,0	0,16	9,2
UMTS	61,0	0,17	10

Tab. 3.1 Grenzwerte für die Mobilfunkfrequenzbereiche in Deutschland nach 26. BImSchV (Werte von S blau hervorgehoben, da nicht originär angegeben, sondern aus E und H berechnet)

3.3 Die deutschen Grenzwerte im internationalen Vergleich

In Abb. 3.1 sind die deutschen Grenzwerte in den Mobilfunkfrequenzbereichen im internationalen Rahmen dargestellt. Der Vergleich erfolgt anhand der elektrischen Leistungsflussdichte S . Neben den schon erwähnten ICNIRP Grenzwerten [ICNIRP] wird auch die EU Ratsempfehlung 1999/519/EG [EU 99] herangezogen. Mit den Grenzwerten der Schweiz [NISV] und Italiens [MUT 01] werden zwei Beispiele angeführt, die in den letzten Monaten zu sehr kontroversen Diskussionen geführt haben. Mit der USA ist ein Vertreter des nichteuropäischen Raumes aufgeführt [FCC 97].

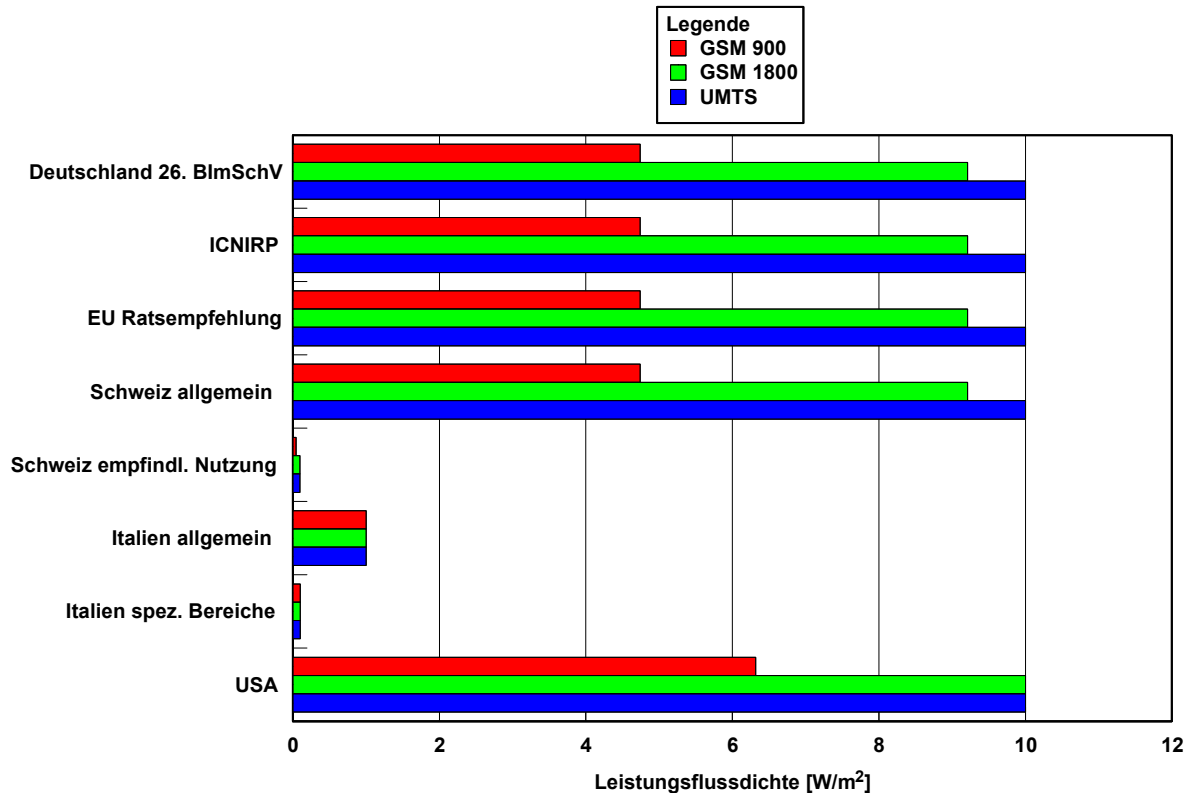


Abb. 3.1 Einordnung der deutschen Grenzwerte in den internationalen Rahmen

Dieser Grenzwertvergleich ist selbstverständlich nicht als erschöpfend anzusehen, zeigt aber bereits wesentliche Grundtendenzen auf. Aus einer ausführlichen Betrachtung der Grenzwertsituation im internationalen Maßstab (z.B. [MUT 01]) kann geschlussfolgert werden, dass es in vielen Ländern gesetzliche Regulierungen der elektromagnetischen Exposition im Hochfrequenzbereich durch Grenzwertsetzungen gibt, wobei sich die Grenzwerte oft an diejenigen der ICNIRP oder der EU Ratsempfehlung orientieren. Darüber hinaus gibt es in einigen Ländern (auch Europa) bislang keine gesetzlich festgesetzten Grenzwerte (z.B. Frankreich, Spanien, Belgien). Einige dieser europäischen Länder haben allerdings die EU Ratsempfehlung mit verabschiedet, die sich auf die ICNIRP Grenzwerte stützt.

Mit den Ländern Italien und Schweiz gibt es bei den westlichen Industrienationen jedoch zwei signifikante Ausnahmen, die schärfere Grenzwerte gesetzlich verankert haben. Hierbei wird, wie noch im nächsten Abschnitt beschrieben wird, eine Vermeidung möglicher Gesundheitsschäden durch thermische Wirkungen als nicht ausreichend erachtet. Nach der Einschätzung dieser Länder können bei dem derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisstand auch Schädigungen durch nichtthermische Effekte bei einer Exposition weit unterhalb der ICNIRP

Grenzwerte nicht mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden. Da vor allem die Schweizer Grenzwerte einen großen Bekanntheitsgrad erlangt haben und in der Öffentlichkeit viel zitiert werden, sollen sie im folgenden detaillierter dargestellt werden.

3.4 Die Schweizer NISV Grenzwerte

Seit dem 1. Februar 2000 ist in der Schweiz die "Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)" anzuwenden. Diese Verordnung regelt die Begrenzung der Emissionen von elektrischen und magnetischen Feldern mit Frequenzen von 0 Hz bis 300 GHz (Strahlung), die beim Betrieb ortsfester Anlagen erzeugt werden, sofern diese Emissionen die Allgemeinbevölkerung betreffen. In Tabelle 3.2 sind die relevanten Grenzwerte dargestellt.

Schweiz – NISV	Elektrische Feldstärke E_{eff} in V/m	Magnetische Feldstärke H_{eff} in A/m	Äquivalente Leistungsflussdichte S in W/m^2
<i>Immissionsgrenzwerte allgemein</i>			
GSM 900	42,3	0,11	4,7
GSM 1800	59,0	0,16	9,2
UMTS	61,0	0,17	10
<i>Anlagengrenzwerte für Orte mit empfindlicher Nutzung</i>			
GSM 900	4,0	0,011	0,042
GSM 1800	6,0	0,016	0,095
UMTS	6,0	0,016	0,095

Tab. 3.2 Grenzwerte für die Mobilfunkfrequenzbereiche in der Schweiz nach NISV

Die Besonderheit ist, dass die Schweizer Verordnung zwei Arten von Grenzwerten definiert:

Der *Immissionsgrenzwert* muss überall und ohne Ausnahme eingehalten werden. Wie aus Abb. 3.1 und Tab. 3.2 ersichtlich ist, stimmen die Immissionsgrenzwerte mit den IRPA Grenzwerten überein, die auch in Deutschland in der 26. BImSchV verankert sind.

Zusätzlich zu den Immissionsgrenzwerten sind u.a. für Sendeanlagen für Mobilfunk und drahtlose Teilnehmeranschlüsse (Äquivalente Strahlungsleistung bezogen auf Halbwellendipol (ERP) > 6 W) auch sog. *Anlagengrenzwerte* einzuhalten, und zwar an "Orten mit empfindlicher Nutzung". Im Sinne der NISV gelten als Orte mit empfindlicher Nutzung:

- Räume in Gebäuden, in denen sich Personen regelmäßig während längerer Zeit aufhalten;
- öffentliche oder private, raumplanungsrechtlich festgesetzte Kinderspielplätze;
- diejenigen Flächen von unüberbauten Grundstücken, auf denen Nutzungen nach den ersten beiden Punkten zugelassen sind.

Die Anlagengrenzwerte für den Mobilfunkbereich sind gegenüber den IRPA Grenzwerten bezüglich der Feldstärke um etwa den Faktor 10 und entsprechend in der Leistungsflussdichte

um den Faktor 100 schärfer, d.h. abgesenkt.

Die Schweizer Festlegung von Anlagengrenzwerten für Orte mit empfindlicher Nutzung stützt sich explizit auf eine Anwendung des Vorsorgeprinzips. D.h., hier sind gegenüber den Schutzzgrenzwerten (Immissionsgrenzwerten), die von der IRPA übernommen werden, spezielle Vorsorgegrenzwerte geschaffen worden. In dem erläuternden Bericht zur NISV [NISV B] wird ausgeführt: "Auch bei schwacher nichtionisierender Strahlung – unterhalb der Immissionsgrenzwerte – treten biologische Wirkungen auf". "Auch wenn von wissenschaftlicher Seite noch weitere Bestätigungen verlangt werden, sind die festgestellten Auswirkungen bereits heute in die vorsorglichen Schutzüberlegungen einzubeziehen". Im Sinne der Vorsorge seien "Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden *könnten*, frühzeitig zu begrenzen".

In Deutschland hat die Schweizer Verordnung sowohl bei denjenigen Teilen der Bevölkerung, die dem Mobilfunk gegenüber kritisch eingestellt sind, als auch bei Gruppierungen, die eine Verschärfung der deutschen Grenzwerte fordern, einen hohen Bekanntheitsgrad erlangt. Gründe hierfür sind sicherlich, dass die Schweizer Anlagengrenzwerte

- schärfer als die ICNIRP Werte sind,
- als *gesetzliche* Grenzwerte
- in einem hochentwickelten westlichen Industriestaat festgesetzt sind und
- gegenüber den Verordnungen anderer Länder vergleichsweise aktuell sind, d.h. den Anschein erwecken, die Verschärfung aufgrund neuester wissenschaftlicher Untersuchungen zu rechtfertigen.

Aufgrund des hohen Bekanntheitsgrades, den die Schweizer NISV in der öffentlichen Diskussion bezüglich der Forderung nach neuen Grenzwerten auch in Deutschland erlangt hat, werden die in ihr enthaltenen technischen Grenzwerte als Referenz für die weiteren Untersuchungen dieser Studie angesetzt. Das bedeutet, es wird hypothetisch betrachtet, welche technischen Konsequenzen sich ergeben würde, wenn für Deutschland die gegenüber der 26. BImSchV schärferen Schweizer Anlagengrenzwerte für den Mobilfunk angesetzt würden.

4 Bestandsaufnahme: Typische ortsbezogene Immissionen durch bestehende Mobilfunk Basisstationen

4.1 Einleitung und Rechenmodell "Freiraum"

In diesem Kapitel wird anhand einfacher Abschätzungen überprüft, wie hoch typische ortsbezogene Immissionen durch bestehende Mobilfunk Basisstationen sind und ob diese Immissionen überhaupt Probleme mit den als Referenz für diese Untersuchungen angesetzten Schweizer Anlagengrenzwerten ergeben würden. Wenn dies der Fall ist, werden die betreffenden Anlagenkonfigurationen ermittelt und dienen als Basis für weitergehende Untersuchungen in den nächsten Kapiteln.

Parameter der Untersuchungen sind

- die Sendeleistung P_S ,
- die Höhe von Basisstationsantenne h_S und Empfänger h_E (Immissionsort) bzw. die Höhendifferenz zwischen beiden sowie
- der Downtilt der Basisstationsantenne.

Die Untersuchungen werden rechentechnisch mit einem einfachen Freiraum Wellenausbreitungsmodell durchgeführt. Dieses hat seine Berechtigung, da

- damit der worst case Fall beschrieben wird, was für die vorgesehenen Untersuchungen angemessen ist, und
- an Orten in unmittelbarer Nähe der Basisstationsantenne, d.h. an denjenigen Orten, in denen die Immission am höchsten ist, wegen meist vorliegender direkter Sichtverbindung zum Sender Freiraumbedingungen angenommen werden können.

Dieses Modell wird auch von der RegTP bei der Bewertung zur Standortbescheinigung eingesetzt.

In Abb. 4.1 ist die Geometrie beschrieben, die den Berechnungen zugrunde liegt.

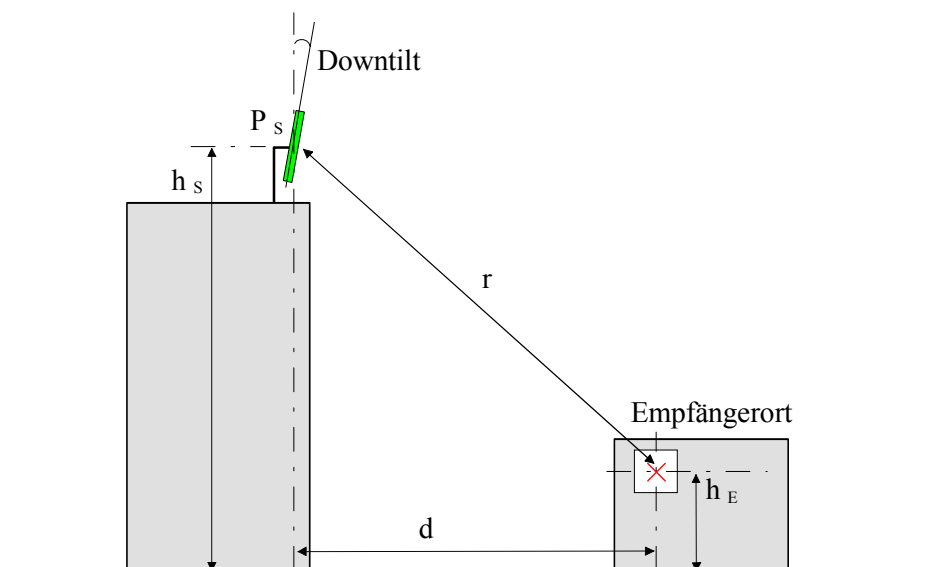


Abb. 4.1 Geometrie für die Berechnungen der Leistungsflussdichte S am Empfängerort

Mit h_S und h_E ist die Höhe von Sender- und Empfängerort über dem Boden beschrieben. d kennzeichnet den lateralen Abstand vom gedachten Fußpunkt der Antenne am Boden, r den radialen Abstand zwischen Sender und Empfänger. Der Empfängerort kann sich sowohl in einem Gebäude, als auch auf dem Erdboden befinden.

Für eine solche Konfiguration berechnet sich die Leistungsflussdichte S als

$$S = P_S \cdot G_S \cdot \frac{C^2(\theta, \psi)}{4\pi r^2}. \quad (4.1)$$

Der radiale Abstand r wird bestimmt durch

$$r = \sqrt{d^2 + (h_S - h_E)^2}. \quad (4.2)$$

Hierbei ist P_S die Sendeleistung der Basisstationsantenne, G_S deren Gewinn und $C(\theta, \psi)$ die normierte Richtcharakteristik der Antenne (vgl. Abschnitt 4.2).

Mobilfunkantennen arbeiten verbreitet mit einem sog. Downtilt. Darunter versteht man eine Abwärtsneigung der Antenne in Richtung Erdboden um wenige Grad. Sinn hierbei ist, dass die Sendeenergie nicht horizontal abgestrahlt werden soll, sondern in Richtung Erdboden. Der Downtilt kann elektrisch (bereits in der Antenne realisiert) oder/und mechanisch (die Antenne wird bei der Installation nach unten gekippt) ausgeführt sein.

4.2 Daten der verwendeten Antennen

Für Mobilfunk Basisstationsantennen werden verbreitet Sektorantennen verwendet. Diese sind Richtantennen. Das heißt, dass sie ihre Energie nicht (wie z.B. eine Glühlampe) in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlen, sondern gerichtet, und zwar

- vertikal (Elevation) in einen sehr schmalen Bereich und
- horizontal (Azimut) in einen etwa 120° breiten Sektor.

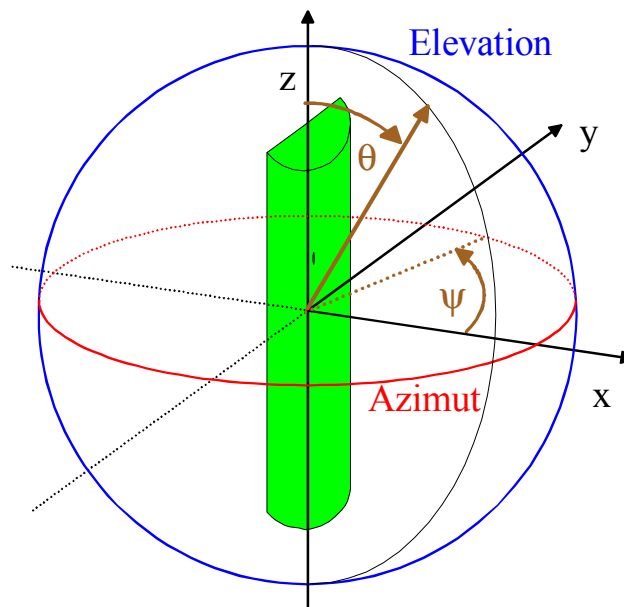


Abb. 4.2 Lage der Antenne im Koordinatensystem für Elevations- und Azimutschnitt

In den Abb. 4.3 und 4.4 ist das Richtdiagramm (zweidimensionale Darstellung der Richtcharakteristik) einer für Mobilfunk typischen Sendeantenne im Elevations- und Azimutschnitt angegeben. Die Lage der Antenne im Koordinatensystem zeigt Abb. 4.2. Die Hauptstrahlrichtung ist die x-Richtung mit $\psi = 0^\circ$ und $\theta = 90^\circ$.

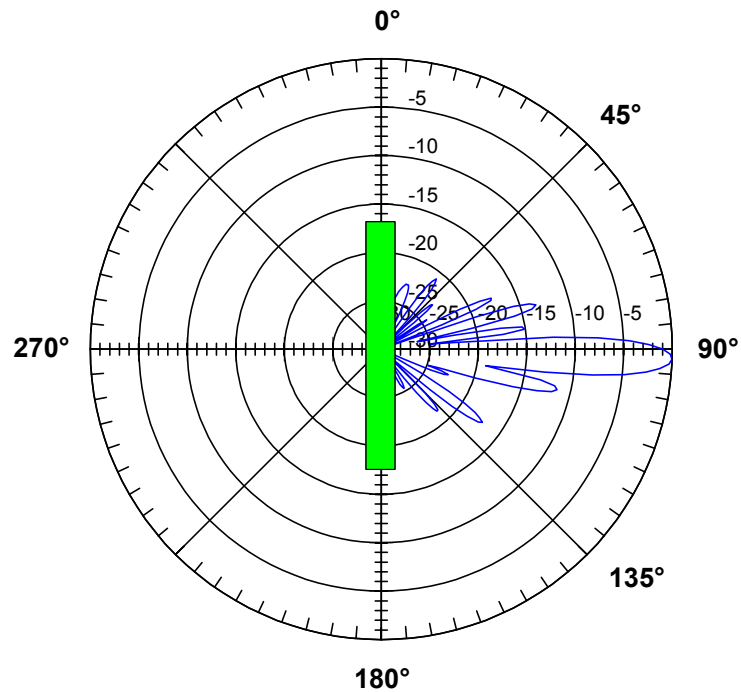


Abb. 4.3 Elevationsdiagramm der verwendeten Antenne K 735 147

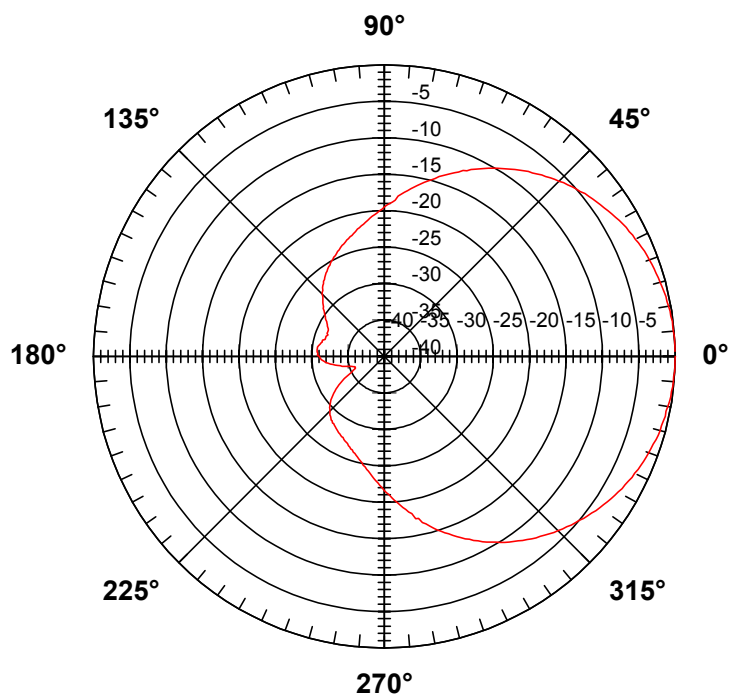


Abb. 4.4 Azimutdiagramm der verwendeten Antenne K 735 147

Elevations- und Azimutschnitt zeigen die relative Intensität der Antennenabstrahlung in den beiden Ebenen. Die Skala ist in logarithmischer Darstellung (dB) (10 dB entsprechen einem Faktor 10, 20 dB einem Faktor 100 und 30 dB einem Faktor 1000 bezüglich der abgestrahlten Leistung). Wie man in Abb. 4.3 sieht, existieren neben der hier nach rechts gerichteten Hauptstrahlung noch zahlreiche Nebenstrahlungen (Nebenzipfel). Ihre Intensität relativ zur Hauptstrahlung lässt sich direkt an der Skala ablesen. Man beachte hier jedoch wiederum die logarithmische Darstellung, durch die die Nebenzipfel überbetont werden. Trotzdem können die Nebenzipfel, wie Kapitel 4 noch zeigen wird, signifikant zur Immission beitragen, und ihre Minimierung wird sich als eines der Potenziale zur Minimierung der ortsbezogenen Immissionen erweisen.

Als Basisstationsantenne wird für die Berechnungen eine Antenne der Fa. Kathrein, Typ K 735 147 verwendet. Die Antenne verfügt über einen Gewinn von 18,0 dBi, eine 3 dB Öffnungsbreite von 7° in der Elevation bzw. 65° im Azimut und einen elektrischen Downtilt von 2°. Dieser Antennentyp ist speziell für den Frequenzbereich von 1710 - 1900 MHz entwickelt und kommt im GSM 1800 Bereich (E-Netze) oftmals zum Einsatz. Im GSM 900 Bereich (D-Netze) werden u.a. Antennen mit ähnlichen technischen Parametern wie bei der hier vorgestellten eingesetzt. Die Richtdiagramme der Kathrein Antennen liegen auf CD ROM vor.

Aus Gründen der Vereinfachung werden die Berechnungen in Kapitel 4 nur in der Mitte des durch eine Basisstationsantenne ausgeleuchteten Sektors, d.h. im Azimut 0° (vgl. Abb. 4.4) durchgeführt. Damit wird wiederum der worst case Fall betrachtet.

Es sei hier der Vollständigkeit halber darauf verwiesen, dass durch Gleichung (4.1) bei der Verwendung des Fernfeld-Gewinns G_S die Leistungsflussdichte in unmittelbarer Nähe der Antenne (bis einige Meter) zum Teil erheblich überschätzt wird [WIE 01]. Da die solchermaßen ermittelten Leistungsflussdichten aber immer größer bzw. gleich den tatsächlich vorliegenden sind, liegt man mit diesen Berechnungen auf der sicheren Seite.

4.3 Berechnung der Immission in der Sektormitte

4.3.1 Auswahl der Parameter

Als Parameter der Berechnung werden variiert:

- Die Sendeleistung P_S . Es werden Werte von 5 W, 20 W, 50 W und 100 W angenommen. Unter Sendeleistung wird hier die in einen Sektor *insgesamt* abgestrahlte, maximale Leistung bei Anlagenvolllast verstanden, d.h. Kanalzahl x Sendeleistung pro Kanal. 5 W und 20 W sind gängige Werte bei vielen Basisstationen. 50 W können auftreten für einzelne Anlagen, die maximal mit Sendekanälen bestückt sind (z.B. [BFS 01]); dies ist aber schon als nicht allgemeiner Fall anzusehen. 100 W sind für eine einzelne Anlage/Sektor sicherlich unrealistisch. Es ist jedoch denkbar, dass ein Standort von zwei Netzbetreibern gleichzeitig genutzt wird bzw. dass ein Netzbetreiber auf einem ihm zur Verfügung stehenden Standort neben der GSM Sendeanlage auch noch eine UMTS Sendeanlage aufbaut. Bei ähnlicher Ausrichtung der Sektorantennen können sich dann die abgestrahlten Leistungen addieren.

- Der Höhenunterschied zwischen Sender- und Empfängerhöhe, siehe Abb. 4.1. Es wird hier als sinnvoll erachtet, nicht mit absoluten Höhen, sondern mit einem Höhenunterschied zu arbeiten. Damit werden mehrere unterschiedliche Konfigurationen gleichzeitig erfasst: Ein Höhenunterschied von 10 m bei der Berechnung kann bedeuten, dass sich der Sender in 10 m Höhe auf einem Wohnhaus oder Mast befindet und die ortsbezogene Immission am Erdboden betrachtet wird. Es kann aber auch bedeuten, dass sich die Sendeantenne in 20 m Höhe (über dem Erdboden) auf einem Hochhausdach befindet und die ortsbezogene Immission in einer Wohnung in 10 m Höhe über dem Erdboden betrachtet wird. Die Ergebnisse werden immer auf Empfängerhöhe dargestellt. Die Höhendifferenz wird variiert wie folgt: 1 m, 5 m, 10 m, 20 m und 50 m. 1 m bis 10 m entsprechen typischen Konfigurationen in Wohngebieten; 20 m ist für die Betrachtung der ortsbezogenen Immission am Erdboden von einer Sendestation auf einem Hochhausdach ebenfalls denkbar. 20 m und 50 m können für die ortsbezogene Immission am Erdboden für Sendestationen auftreten, die auf einem separaten Trägermast installiert sind.
- Der Downtilt-Winkel: Im Elevationsdiagramm nach Abb. 4.3 sieht man, dass die hier betrachtete Antenne einen elektrischen Downtilt von 2° fest voreingestellt hat. Für die Berechnungen wird ein zusätzlicher mechanischer Downtilt von 0° bis 8° in 2° Schritten parametrisiert. Mechanische Downtilts werden zusätzlich zu elektrischen verwendet, um durch stärkere Absenkung des Hauptstrahls die Interferenz mit benachbarten Funkzellen zu begrenzen.

4.3.2 Prinzipieller Verlauf der ortsbezogenen Immission

In Abb. 4.5 ist der prinzipielle Verlauf der ortsbezogenen Immission im Abhängigkeit vom lateralen Abstand d von der Sendeantenne angegeben. Die Darstellung erfolgt in Sektormitte.

Es wird Parametersatz 1 verwendet, der in Tabelle 4.1 zusammengefasst ist.

Parametersatz 1	
Sendeleistung P_S	20 W
Höhendifferenz Sender-Empfänger h_S-h_E	5 m
Antenne	K 735147
elektrischer Downtilt	2°
mechanischer Downtilt	0°
Wellenausbreitungsmodell	Freiraum

Tabelle 4.1 Beschreibung der Parameter für Parametersatz 1

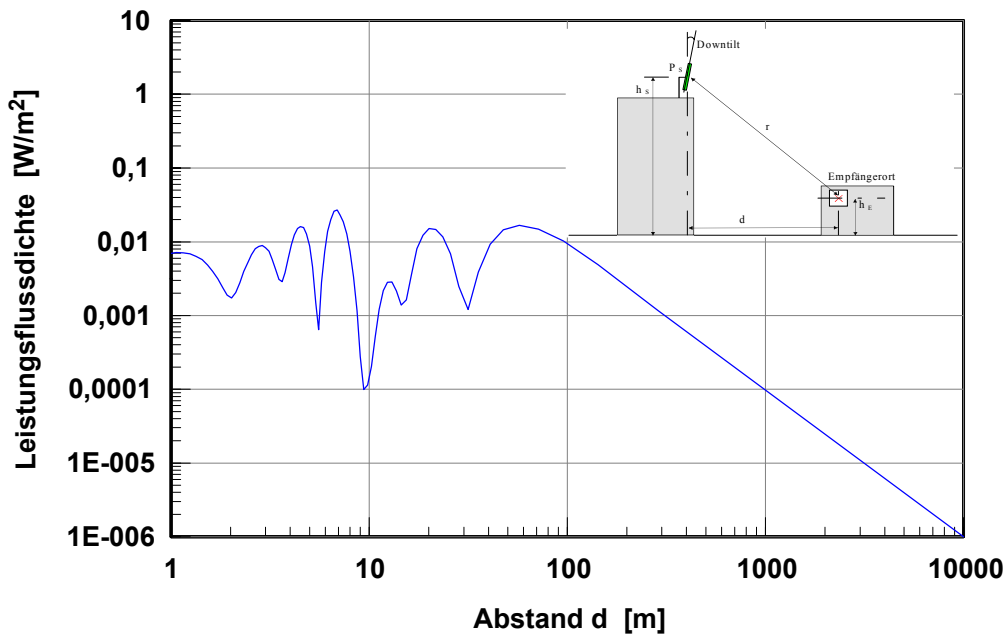


Abb. 4.5 Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand, Parametersatz 1

Abb. 4.5 kann wie folgt interpretiert werden: Bei kleinem lateralem Abstand d befindet man sich nahezu direkt unter der Antenne. Nach Abb. 4.3, Wertebereich 180° bis 135° , ist man noch nicht im Hauptstrahl der Antenne, sondern im Bereich der Nebenzipfel. Diese sind zwar von der Intensität nicht so hoch wie der Hauptstrahl, dafür ist der radiale Abstand von der Antenne relativ gering. Bewegt man sich von der Antenne weg (steigender lateraler Abstand d), durchläuft man in Abb. 4.3 von 180° in Richtung 90° alle Nebenmaxima und Minima und erreicht schließlich an einem genügend großen Abstand den Bereich der Hauptstrahlung. Das "Durchwandern" der Nebenmaxima und -minima ist in Abb. 4.5 als starke ortsabhängige Variation der Leistungsflussdichte im Bereich 1 m bis ca. 50 m zu erkennen. Vergleicht man die Variation in Abb. 4.5 mit der Aufzipfelung des Richtdiagramms in Abb. 4.3 (180° bis 90°), kann genau die Struktur der Nebenmaxima und -minima nachvollzogen werden. Ab etwa 50 m gelangt man in der Bereich der Hauptstrahlung; ab da fällt die Leistungsflussdichte gleichmäßig mit der Entfernung ab, d.h. gemäß dem angenommenen Freiraumausbreitungsmodell proportional zu d^2 .

4.3.3 Variation von Sendeleistung, Höhendifferenz und Downtilt

In den nun folgenden Untersuchungen gilt grundsätzlich Parametersatz 1, wobei ein Parameter variiert wird.

In den Abb. 4.6 bis 4.8 ist die solchermaßen berechnete ortsbezogene Immission in Abhängigkeit vom lateralen Abstand von der Sendeantenne dargestellt. Die Darstellung erfolgt in Sektormitte auf Empfängerhöhe h_e .

Die Ergebnisse können wie folgt interpretiert werden:

Variation der Leistung

Mit veränderter Leistung (Abb. 4.6) ändert sich am prinzipiellen Verhalten der Kurve aus Abb. 4.5 nichts; die Kurven werden einfach parallel nach oben (steigende Leistung) bzw. unten (sinkende Leistung) verschoben. Hier spiegelt sich die Proportionalität zwischen Sendeleistung P_S und Leistungsflussdichte S aus Gleichung (4.1) wider.

In Abb. 4.6 sind sowohl die gesetzlichen Grenzwerte für Deutschland (26. BImSchV), als auch die Schweizer Anlagengrenzwerte (NISV-CH) aufgeführt. Durch die exemplarischen Berechnungen kann bereits jetzt schon eine wichtige Aussage getroffen werden: *Es gibt Konfigurationen bezüglich Leistung, Höhenunterschied und Entfernung zur Antenne, bei denen es zu Konflikten mit den Schweizer Anlagengrenzwerten kommen kann.* Bei der hier verwendeten Antenne sind die ortsbezogenen Immissionen im Bereich der Nebenzipfel der Antenne höher als im Hauptstrahl.

Variation des Höhenunterschiedes

Bei Variation des Höhenunterschiedes (Abb. 4.7) bleibt die prinzipielle Kurvenform ebenfalls erhalten. Mit zunehmendem Höhenunterschied verschieben sich die Kurven im Nah- und mittlerem Abstandsbereich von der Antenne jedoch nach unten und gleichzeitig nach rechts. Die Rechtsverschiebung ist damit erklärbar, dass ein bestimmter Abstrahlwinkel der Antenne bei größerem Höhenunterschied erst in einem größeren Abstand von der Antenne erreicht wird. Durch den größeren Abstand ist auch der Emissionspegel kleiner, da die Leistungsflussdichte im Fernfeld quadratisch mit der Entfernung von der Antenne abnimmt. Abb. 4.7 zeigt deutlich, dass bei geringen Höhenunterschieden (z.B. 1 m) die Schweizer Anlagengrenzwerte deutlich überschritten werden können. Davon sind solche Immissionsorte z.B. innerhalb von Wohnungen betroffen, die sich auf fast derselben Höhe wie die Sendeantenne und vor ihr befinden und relativ dicht (einige Meter) an ihr angrenzen. Bei großen Entfernungen von der Antenne (einige Hundert Meter) spielt die Höhendifferenz keine Rolle mehr, da man dort die Sendeantenne, unabhängig von ihrer Höhe, unter nahezu demselben Winkel sieht und die Hauptstrahlung über diesen Winkelbereich nahezu konstant ist. Deswegen münden die Immissionskurven ineinander ein.

Variation des Downtilts

Für größere Downtilts (Abb. 4.8) verschieben sich die Kurven nach links, und die ortsbezogenen Immissionspegel werden größer. Interessanterweise steigt die im Bereich der Hauptstrahlung liegenden ortsbezogene Immission stärker an als die im Bereich der Nebenzipfel liegenden. Auch für moderate Sendeleistungen (20 W) kommt es bei realistischen Downtilts schon zur Überschreitung der Schweizer Anlagengrenzwerte. Die Kurven münden für große Abstände von der Antenne nicht ineinander, da man dort in einem Winkelbereich des Elevationsdiagramms ist, wo sich die Abstrahlung sehr stark bei minimaler Winkeldifferenz ändert. Für 8° Downtilt wird für große Abstände bereits der erste Nebenzipfel über dem Horizont erreicht, deswegen steigt die Kurve wieder an.

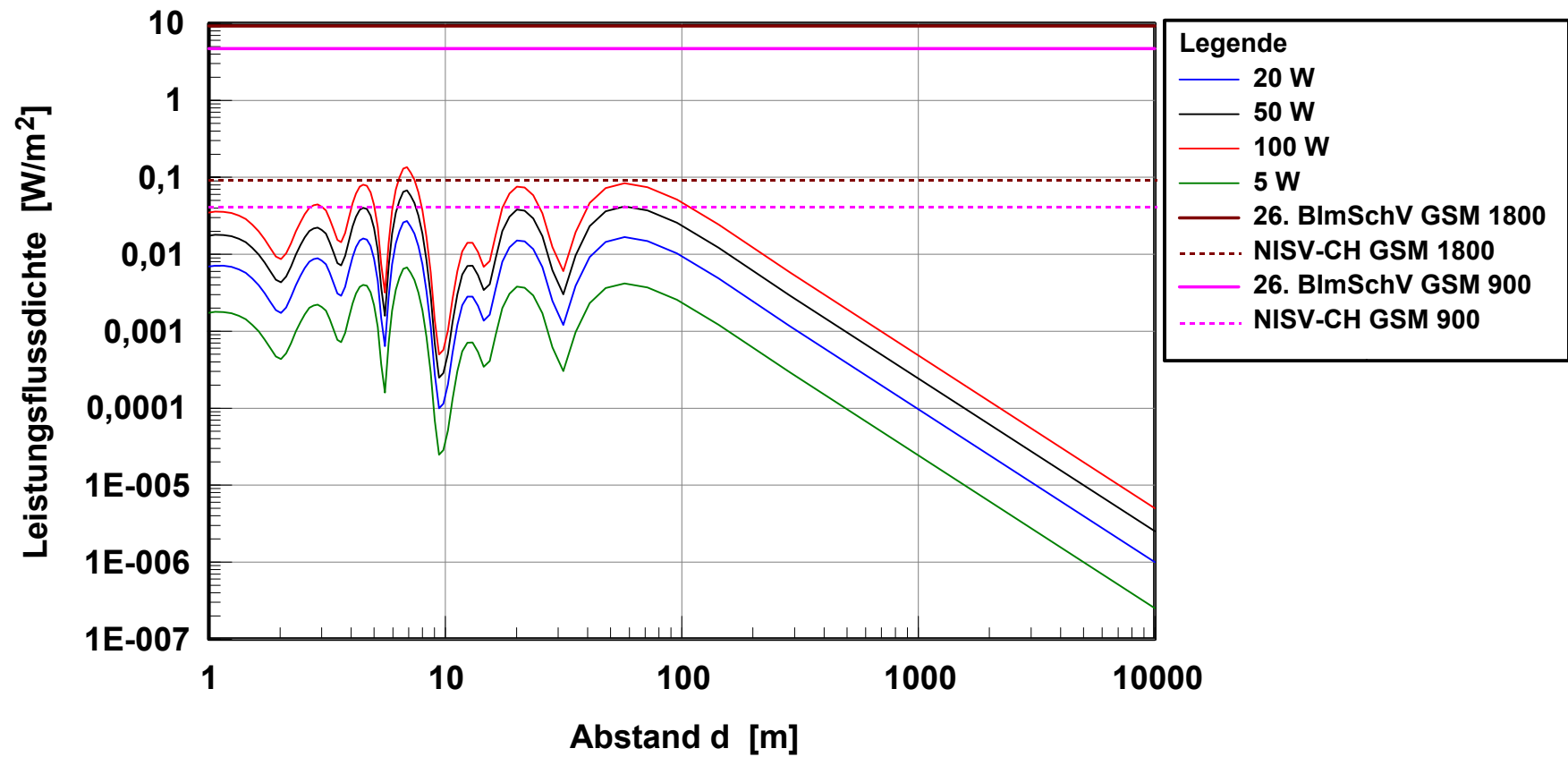


Abb. 4.6

Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation der Sendeleistung P_s

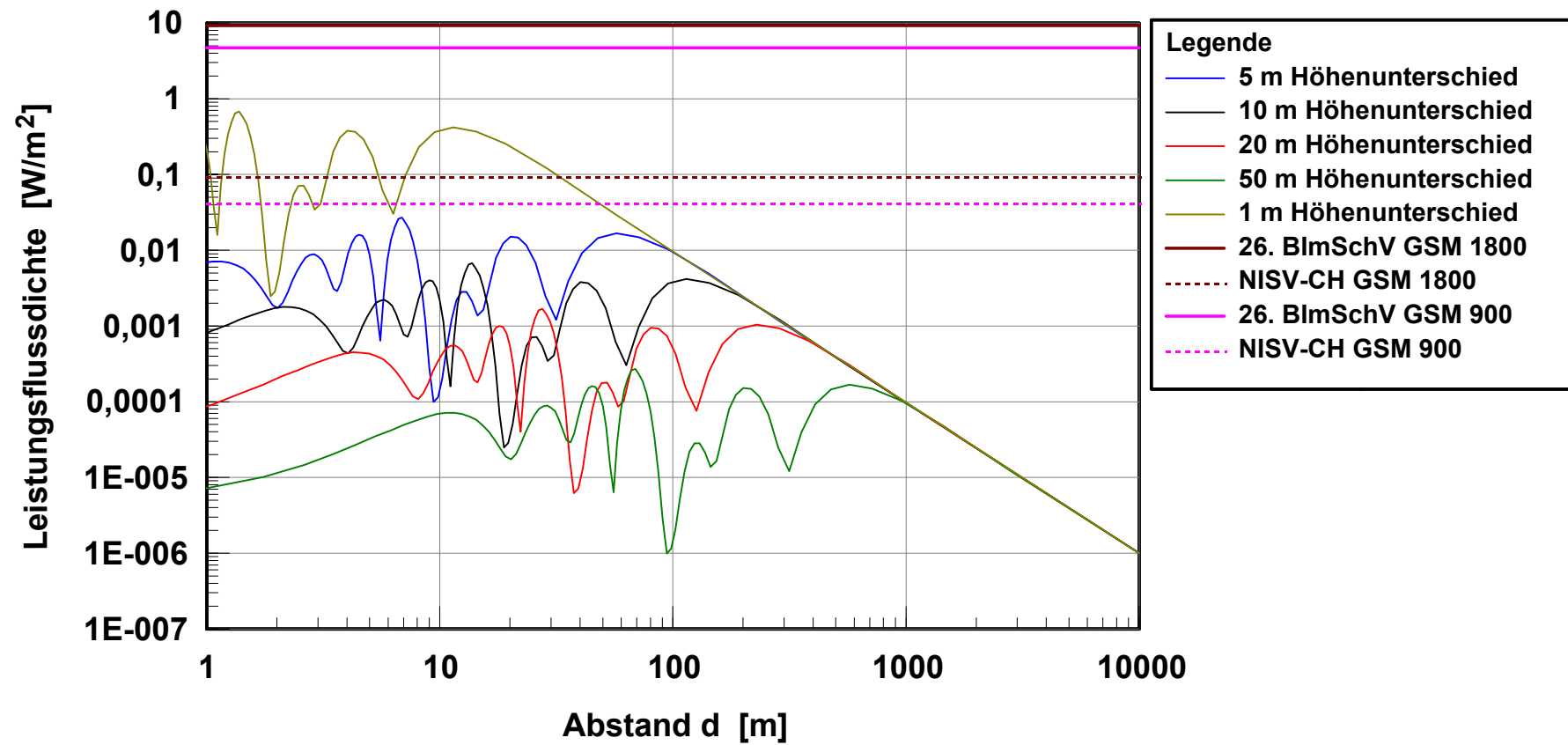


Abb. 4.7

Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation des Höhenunterschieds h_S-h_E

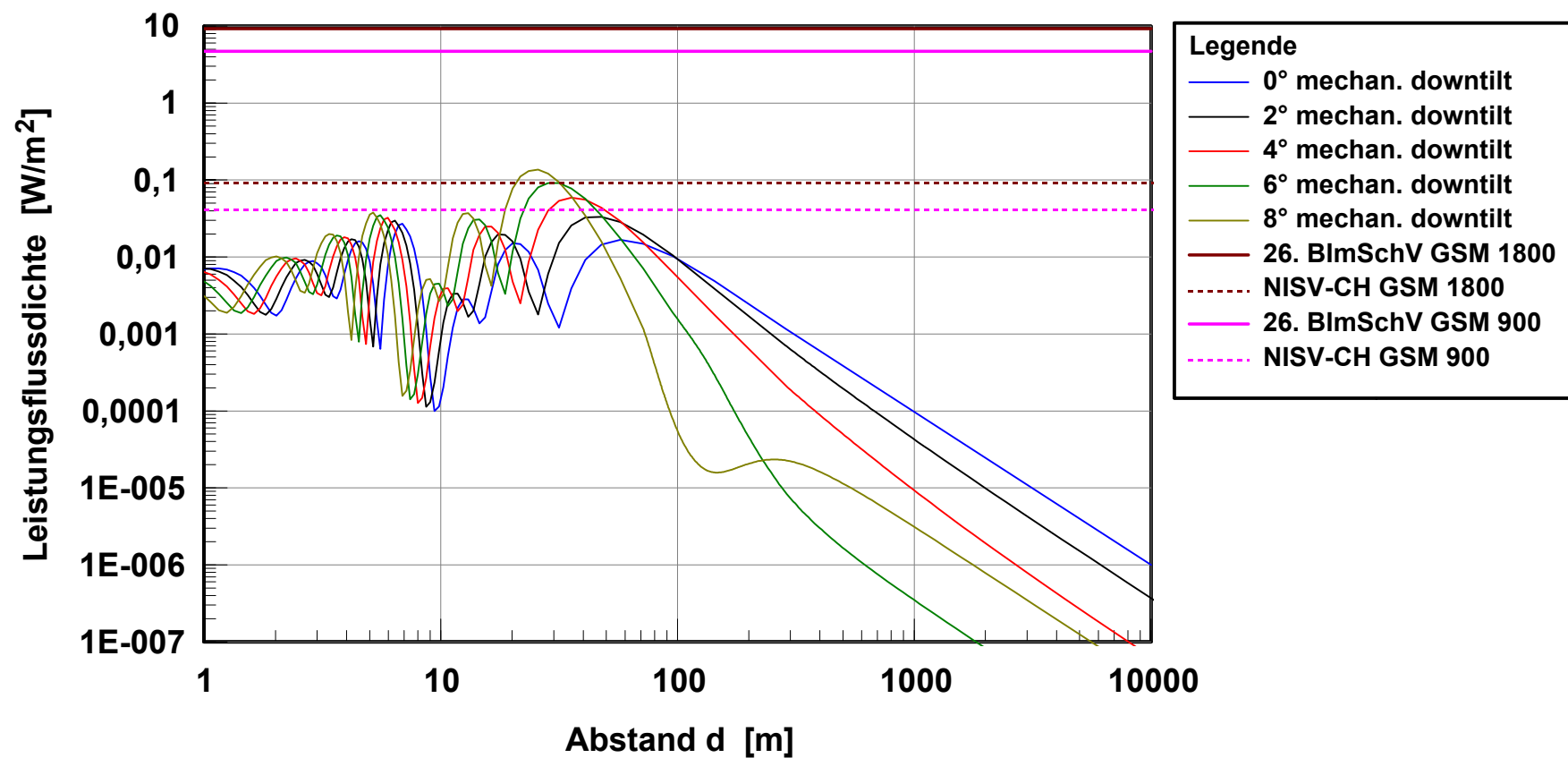


Abb. 4.8 Verlauf der Leistungsfussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation des mechanischer Downtilts

4.4 Einfluss der Variation der Sendeantennen

4.4.1 Richtdiagramme verschiedener Antennen

Die in Abschnitt 4.3 gezeigten typischen Immissionskurven sind für einen Antennentyp gültig, der für Basisstationsantennen gängig ist. Prinzipiell werden selbstverständlich verschiedene Antennentypen verwendet, je nach Netzbetreiber und ausleuchtungstechnischen Anforderungen. In diesem Abschnitt soll kurz darauf eingegangen werden, ob sich die Trends, die sich in Abschnitt 4.3 abzeichnen, auch bei anderen Antennen wiederfinden, oder ob sich die Verhältnisse grundsätzlich ändern.

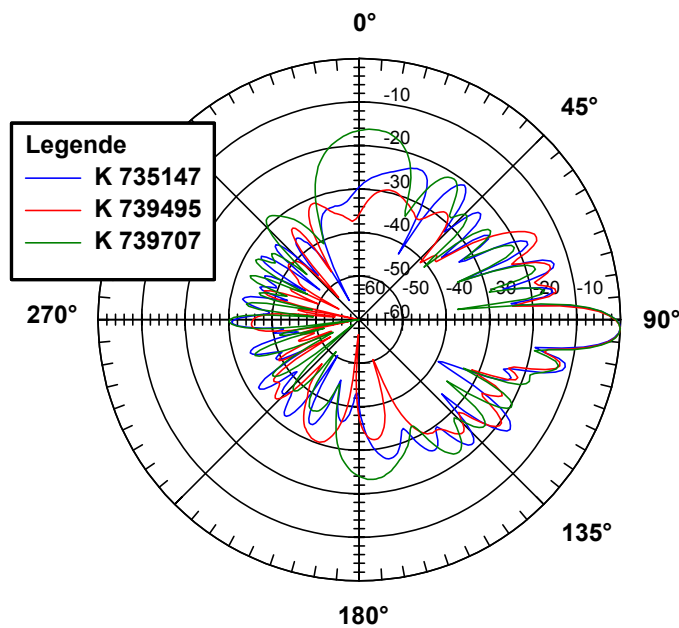


Abb. 4.9 Elevationsdiagramme von drei typischen GSM 1800 Antennen

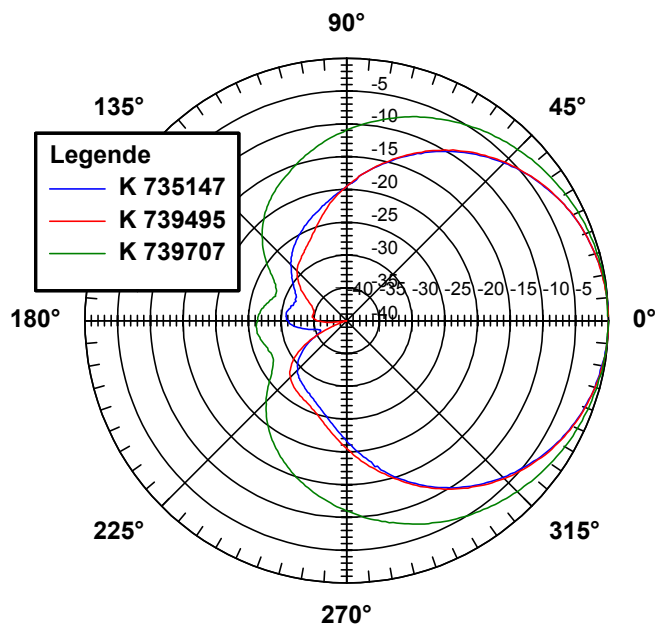


Abb. 4.10 Azimutdiagramme von drei typischen GSM 1800 Antennen

Zu diesem Zweck werden zwei andere Antennen, die ebenfalls im E-Netz Verwendung finden, in die Untersuchungen einbezogen. Abb. 4.9 und 4.10 zeigen die Elevations- und Azimutdiagramme aller drei Antennen im Vergleich.

In den Elevationsdiagrammen (Abb. 4.9) sind im Bereich der Hauptstrahlung alle drei Kurven deckungsgleich. Im Bereich der relevanten Nebenzipfel ($180^\circ - 90^\circ$) ergeben sich jedoch Abweichungen. Unten wird gezeigt, welchen Einfluss dies auf die Immission in Sektormitte hat. Der elektrische Downtilt von 2° ist allen drei Antennen gleich.

Die Azimutschnitte (Abb. 4.10) sind für die K 739 147 und die K 739 495 nahezu identisch. Eine Abweichung gibt es bei der K 739 707, die einen sehr viel breiteren Sektor ausleuchtet. Diese Antenne hat eine 3 dB Öffnungsbreite von 90° (im Gegensatz zu 65° der anderen beiden Antennen), dafür aber nur einen Gewinn von 16,5 dBi (statt 18 dBi).

4.4.2 Auswirkungen verschiedener Antennen auf die ortsbezogene Immission

In Abb. 4.11 ist der Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand für die drei Antennentypen gezeigt. Es gelten wiederum die Angaben von Parametersatz 1, wobei hier der Antennentyp variiert wird. Prinzipiell sind alle drei Verläufe ähnlich: Bis zum Erreichen der Hauptstrahlrichtung der Antennen bei ca. 50 m werden wiederum die Nebenmaxima- und -minima durchlaufen. Da diese für alle drei Antennen unterschiedlich aussehen, siehe Abb. 4.9, differiert der Verlauf der Immission in diesem Bereich. Ab etwa 50 m fallen die Kurven wieder gleichmäßig ab, allerdings ist die Immission durch die Antenne K 739 707 wegen ihres um ca. 1,5 dBi kleineren Gewinns entsprechend niedriger.

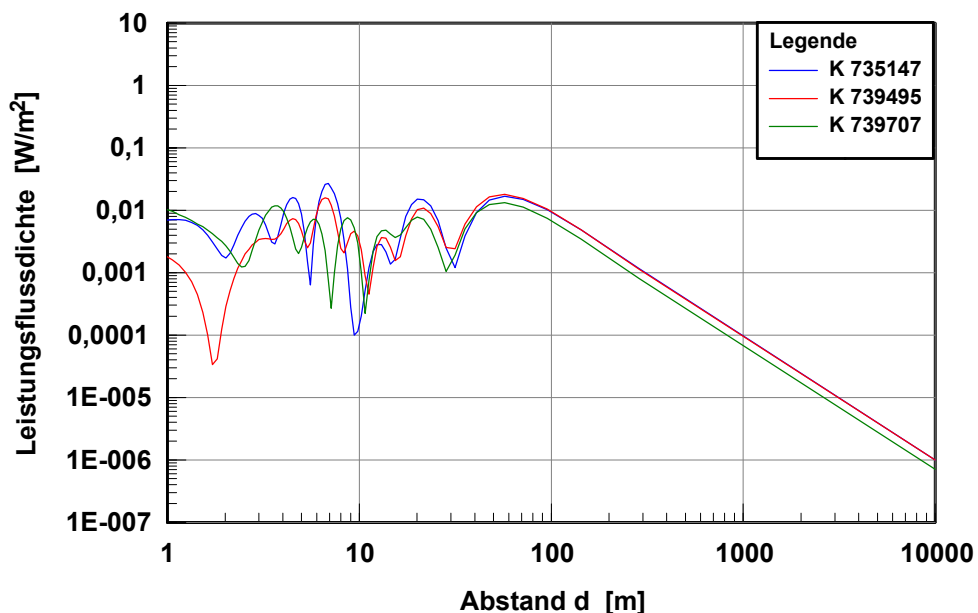


Abb. 4.11 Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation von drei verschiedenen Antennentypen

Somit kann festgestellt werden: Die Wahl der Antenne hat Auswirkungen vor allem auf den Verlauf der ortsbezogenen Immission im Bereich der Nebenzipfel, d.h. je nach Höhe bis zu ca. 50 m (5 m Höhenunterschied) bzw. ca. 500 m Abstand (50 m Höhenunterschied) von der

Antenne entfernt. Hier kann vor allem durch Wahl einer Antenne mit niedrigen Nebenzipfeln die Immission deutlich gesenkt werden (nur bei der Antenne K 735 147 liegt die Immission im Bereich der Nebenzipfel über der Immission in Hauptstrahlrichtung!). Ab Erreichen der Hauptstrahlrichtung verlaufen die Kurven gleich und sind nur noch vom Gewinn der Antenne abhängig. Durch die Antenne verändern sich die in Abschnitt 4.3 festgestellten Trends *nicht*.

4.5 Zusammenfassung

1. Ein einfaches worst case Berechnungsverfahren, das auf einer ungestörten Freiraumausbreitung aufbaut, wurde zur Berechnung der Leistungsflussdichte in der Mitte eines durch eine Mobilfunk Sendeantenne ausgeleuchteten Sektors angewendet. Bei der Berechnung wurde von gemessenen Daten realer Antennen ausgegangen. Als Parameter wurden variiert: Die Sendeleistung (insgesamt, d.h. unter Berücksichtigung mehrerer Kanäle und/oder mehrerer Anlagen an einem Standort), die Höhendifferenz zwischen Sendeantenne und Immissionsort und der Downtilt der Antenne.
2. Als Ergebnis der Berechnungen ergibt sich: Beim Ansatz realistischer Parameter liegt die berechnete Leistungsflussdichte unterhalb desjenigen Wertes, der aus den für Deutschland in der 26. BImSchV gesetzlich festgelegten Grenzwerten für die elektrische und magnetische Feldstärke resultiert (äquivalente Leistungsflussdichte). Diese Aussage wird auch durch zahlreiche Messungen bestätigt, wo es bislang in *keinem* Fall zu einer Überschreitung der Grenzwerte kam.
3. Die Berechnungen zeigen jedoch auch, dass für einige Konfigurationen die äquivalente Leistungsflussdichte *über* den Anlagegrenzwerten der Schweiz liegen kann. Dies tritt auf bei bestimmten Kombinationen von
 - hoher gesamter Sendeleistung (mehrere Sendekanäle und/oder Mehrfachnutzung eines Standortes für verschiedene Sendeanlagen),
 - geringem vertikalen Abstand des Immissionsortes zur Antenne im Meterbereich (Höhendifferenz),
 - geringem horizontalen Abstand des Immissionsortes zur Antenne im Bereich bis einige 10 m,
 - großem Downtilt der Sendeantenne bis einige Grad.

Solche Situationen werden vorrangig in Stadtgebieten anzutreffen sein, wo aufgrund des Ziels, möglichst vielen Teilnehmern gleichzeitig eine Funkverbindung zur Verfügung zu stellen, mit mehreren Frequenzkanälen pro Antenne gearbeitet wird, und wo aufgrund der dichten Besiedlung eine Bebauung in unmittelbarer Nähe der Antenne und damit dicht an die Antenne heranreichende Immissionsorte wahrscheinlich sind (im Gegensatz zum freistehenden hohen Sendemast in ländlichem Gebiet).

4. Aus den in diesem Kapitel präsentierten prinzipiellen Immissionskurven lassen sich auf einfache Weise für beliebige andere Kombinationen von Sendeleistung, Höhendifferenz und Downtilt die jeweiligen Verläufe der Leistungsflussdichte ableiten.
5. Im Nah- und mittleren Abstandsbereich von der Antenne (bis 50 m - 500 m je nach Höhenunterschied) wird die Immission im wesentlichen durch die Nebenzipfel bestimmt.

Diese sind bei verschiedenen Antennen durchaus unterschiedlich stark ausgeprägt. Allerdings ist der Trend der Immissionskurven bei verschiedenen Antennen derselbe. Das bedeutet, dass zum Studium der prinzipiellen Gegebenheiten und Zusammenhänge, so wie es Ziel dieser Studie ist, für die weiteren Betrachtungen von *einem* festen Antennentyp ausgegangen werden kann.

5 Möglichkeiten zur Reduzierung der ortsbezogenen Immission

5.1 Einleitung

In Kapitel 4 wurde festgestellt, dass die Immission durch die derzeit in Deutschland betriebenen Mobilfunk Basisstationen mit einigem Sicherheitsabstand unter den gesetzlichen Grenzwerten der 26. BImSchV liegen. Andererseits konnte jedoch ermittelt werden, dass für einige Konfigurationen von Sendeleistung, Höhenunterschied, Antennenart und Downtilt durchaus Orte existieren, an denen die ortsbezogene Immission die Schweizer Anlagengrenzwerte überschreitet. Dies wird vorrangig bei Basisstationen in städtischen Bereichen auftreten, da die zur Überschreitung führenden Konfigurationen nicht typisch für ländliche Bereiche sind.

Als logische Konsequenz ergibt sich als nächstes die Frage, durch welche senderseitigen Maßnahmen die ortsbezogene Immission an den bezüglich eines Vergleiches mit den Schweizer Anlagengrenzwerten "kritischen Stellen" in welchem Maße reduziert werden kann.

In welchem Maße bei welchem Standort eine solche Reduzierung im Einzelfall *notwendig* ist, kann durch diese Studie detailliert nicht geklärt werden, da hier für die Vielzahl der existierenden Mobilfunkanlagen Sendeleistungen, Antennenhöhen, verwendete Antennen und deren Ausrichtung sowie die Art und Nähe der angrenzenden Bebauung zur Antenne betrachtet werden müssten. Die weiteren Betrachtungen werden jedoch eine Antwort auf die Frage geben, welche Auswirkungen immissionsreduzierende Maßnahmen auf die ortsbezogene Immission, die Gesamtimmission und die Mobilfunk Netzstruktur insgesamt haben würde, ohne jedoch zu ermitteln, für welchen konkreten Standort welche Immissionsreduzierung notwendig ist. Schätzungen der Netzbetreiber gehen davon aus, dass bei einer Verschärfung der Grenzwerte nach dem Schweizer Modell zwischen 30 % und 70 % zusätzliche neue Standorte zu errichten sind [SCHÜ 01].

Als sendeseitige immissionsreduzierende Maßnahmen stehen in Übereinstimmung mit Kapitel 4 folgende prinzipiellen Möglichkeiten zur Verfügung:

- Reduzierung der Sendeleistung
- Vergrößerung der Höhendifferenz Sendeantenne - Immissionsort
- Verringerung des Downtilts
- Optimierung der Abstrahlcharakteristik der Sendeantennen

Diese Möglichkeiten werden im folgenden zunächst allgemein beschrieben.

5.2 Reduzierung der maximalen Sendeleistung

Eine Reduzierung der Sendeleistung führt, wie in Abb. 4.6 gezeigt, zu einer Parallelverschiebung der Immissionskurven nach unten. Bei genügend großer Leistungsreduzierung können Bereiche, die vorher über den Schweizer Anlagegrenzwerten lagen, nun unter die Grenzwertkurve gelangen. Welche Konsequenzen eine Leistungsreduzierung auf die GSM Netzstruktur und folglich auf die Gesamtimmission hat, wird in den Kapiteln 6 und 7 beschrieben.

Hier sei nochmals darauf verwiesen, dass unter Sendeleistung die *gesamte* maximale Sendeleistung für einen Sektor verstanden wird und nicht nur die Sendeleistung für einen Kanal. In die Gesamtsendeleistung gehen sowohl die Gesamtzahl der verwendeten Kanäle ein, sowie Mehrfachnutzung von Standorten.

5.3 Vergrößerung der Höhendifferenz Sender - Immissionsort

Eine Vergrößerung der Höhendifferenz zwischen Sendeantennen und Empfängerort (= Immissionsort) führt ebenfalls zu einer Reduzierung der ortsbezogenen Immission. In welchem Maße die erfolgt, kann direkt aus Abb. 4.7 abgelesen werden. In der Praxis wird die Vergrößerung der Höhendifferenz durch eine Erhöhung des Senderstandortes realisiert werden können. Durch die Abstandsvergrößerung des Immissionsortes zur Antenne erfolgt eine zusätzliche Freiraumdämpfung der Antennenstrahlung, so dass die Immission bis unter die Schweizer Anlagengrenzwerte gesenkt werden kann. Welche Konsequenzen eine Erhöhung des Sendeantennenstandortes auf die GSM Netzstruktur und folglich auf die Gesamtimmission hat, wird in den Kapiteln 6 und 7 beschrieben.

5.4 Reduzierung des Downtilts

Auch der Downtilt hat, wie Abb. 4.8 zeigt, deutlichen Einfluss auf die ortsbezogene Immission. Ein zu großer Downtilt kann die ortsbezogene Immission vor allem in Bereichen, die durch die Hauptstrahlrichtung der Antenne ausgeleuchtet werden, über die Schweizer Anlagengrenzwerte drücken.

In der Praxis werden größere Downtiltwinkel nicht primär zur Verbesserung der Versorgung einer Zelle, sondern zur Verminderung der Gleichkanalinterferenz verwendet. Aus Gründen des begrenzten Frequenzspektrums (besonders kritisch sind hier Bereiche an Ländergrenzen) ist man beim Mobilfunk gezwungen, in einem gewissen Abstand von einer mit dem Frequenzkanal f_1 versorgten Zelle denselben Frequenzkanal wieder zu verwenden. Beide Zellen benutzen den selben Frequenzkanal, dürfen sich aber nicht stören. Durch eine *schärfere Begrenzung* der Ausleuchtung einer Zelle kann man es schaffen, dass der Funkpegel in der benachbarten Zelle rasch abnimmt. Dadurch werden Interferenzen mit derjenigen Zelle, die den selben Frequenzkanal verwendet, effizient minimiert. Solch eine scharfe Zellbegrenzung ist z.B. mit einem größeren Downtilt möglich, siehe Abb. 4.8. Ein größerer Downtilt wird vor allem im städtischen Bereich eingesetzt, wo aus Kapazitätsgründen mehrere Frequenzkanäle erforderlich sind, um viele Teilnehmer zu versorgen.

Die Verwendung eines größeren Downtilts ist also eine Möglichkeit, die Interferenz zu reduzieren und dadurch auch indirekt die Systemkapazität zu erhöhen, da sich der Frequenzwiederholabstand im Netz verringert.

Eine Reduzierung der Interferenz mit benachbarten Zellen ohne Veränderung des Downtilts könnte prinzipiell auch durch eine Reduzierung der Sendeleistung erreicht werden. Eine Reduzierung der Sendeleistung wird aber schon in Abschnitt 5.2 als eigenständige Möglichkeit zur Reduzierung betrachtet.

Da der Downtilt, wie beschrieben, eine kaum frei wählbare Größe ist, sondern aus funklplanungstechnischen Gründen weitgehend vorgegeben ist, soll er für die detaillierte Betrachtung auf die Immission in den weiteren Kapiteln ausgeklammert werden.

5.5 Optimierung der Abstrahlcharakteristik der Sendeantennen

Wie in den Abb. 4.9-4.11 gezeigt, hat die Art der Antenne vor allem auf die ortsbezogene Immission im Nahbereich der Antenne einen Einfluss. Bedeutsam ist hier vor allem die Stärke der Nebenzipfel, die, obwohl sie im Elevationsdiagramm weit unter der Stärke des Hauptstrahls liegen, im Nahbereich u.U. größere ortsbezogene Immissionen hervorrufen können (z.B. Antenne K 735147). Hiermit kann also schon eine wesentliche Reduzierungsmöglichkeit für die ortsbezogene Immission abgeleitet werden: Optimierung der Antennenabstrahlung durch Beamforming (Formung der Richtcharakteristik), vor allem Minimierung der Nebenzipfel und Auffüllen der Nullstellen zwischen den Nebenzipfeln. Allerdings sind der Optimierung der Antennen physikalische Grenzen gesetzt. Trotzdem gibt es hier, wie allein aus dem Vergleich der drei Antennen ersichtlich ist, noch Optimierungsmöglichkeiten. Beispiele sind eine optimierte Belegungsfunktion der Antenne in Kombination mit einer Erhöhung der Einzelstrahler oder eine Konstruktion derart, dass die Nebenzipfel in nicht allgemein zugängliche Bereiche gelenkt werden. Diese Optimierungsmöglichkeiten sollen jedoch nicht Bestandteil dieser Studie sein und werden deswegen in den nachfolgenden Kapiteln nicht weiter untersucht.

6 Auswirkungen der Reduzierung der ortsbezogenen Immission auf die Gesamtmission sowie die Struktur des Mobilfunknetzes

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel sollen die Auswirkungen der aus dem letzten Kapitel abgeleiteten, prinzipiellen Immissionsminderungsmaßnahmen

- Reduzierung der maximalen Sendeleistung und
- Erhöhung des Antennenstandortes

auf die Gesamtmission (und damit auch auf die Gesamtmission) sowie die Struktur des Mobilfunknetzes untersucht werden.

Bei einer Reduzierung der Sendeleistung kann man von vornherein erwarten, dass die Größe der Mobilfunkzellen zurückgehen wird. Bislang ist bei den Betrachtungen vom *Freiraumausbreitungsmodell* ausgegangen worden, wie es für worst case Abschätzungen der *ortsbezogenen Immission* sinnvoll ist. Um jedoch realistische Aussagen über *Zellgrößen* zu erhalten, ist dieses Modell nicht mehr geeignet. Für die Berechnungen in diesem Kapitel wird ein Ansatz gewählt, der die realen Ausbreitungsbedingungen von Mobilfunkwellen in *städtischem Gebiet* (als Kernpunkt potentieller Überschreitungen der Schweizer Anlagengrenzwerte) wesentlich genauer berücksichtigt als das bislang verwendete Freiraumausbreitungsmodell. Das Modell wird in Abschnitt 6.3 vorgestellt.

Um realistische Aussagen über Zellgrößen zu erhalten, darf von nun an nicht mehr von einer Gesamtmission einer Anlage, d.h. Sendeleistung pro Kanal x Kanalzahl, ausgegangen werden. Die Zellgröße bestimmt sich danach, wie weit *ein* Mobilfunkteilnehmer sich von der Basisstation entfernen kann, ohne dass das Gespräch abreißt. Mehr Kanäle, die mehr Emission und zwangsläufig auch mehr Immission bedeuten, gestatten zwar eine höhere Kapazität (Anzahl von Mobilfunkteilnehmern) in der Zelle, erhöhen aber den Zellradius nicht. Das bedeutet, dass für die nachfolgenden Betrachtungen von folgenden Annahmen ausgegangen wird:

- Es muss eine *flächendeckende* Versorgung der Zelle mit Funkwellen gewährleistet sein, d.h. es dürfen (z.B. durch Verkleinerung von Zellen infolge Leistungsminderung) keine Versorgungslücken entstehen.
- Die Zellgröße bestimmt sich aus einer *minimalen Leistungsflussdichte* S_{\min} am Zellrand, die gerade ausreicht, um ein Gespräch zu führen. Für S_{\min} wird hier ein Wert von $-103,4 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ entsprechend -100 dBm Empfangsleistung am Handy angenommen, wie er für E-Netze charakteristisch ist.
- Die Zellgröße wird aus der *maximalen* Sendeleistung *eines* Kanals abgeleitet. Hier wird eine pauschalisierte Sendeleistung pro Kanal von 5 W angesetzt. Die gezeigten Ergebnisse sind auch für andere betriebsübliche Kanalsendeleistungen gültig, da die Veränderungen der Zellstruktur im folgenden *relativ* ermittelt werden.
- Die Berechnungen werden für das GSM 1800 Netz bei der Frequenz $1862,5 \text{ MHz}$ durchgeführt. Das ist die Frequenz, bei der die Richtdiagramme der verwendeten Antennen als Messwerte vorliegen. Die Berechnungen sind auch für andere Frequenzen oder GSM Netztypen gültig, da die Ergebnisse relativ angegeben werden und sich mit der Frequenz trendmäßig nicht verändern.
- *In den nachfolgenden Betrachtungen wird die GSM typische Leistungsregelung vorerst nicht berücksichtigt, da für die Berechnung der Zellgröße die maximale Sendeleistung angesetzt werden muss. Im folgenden wird als "Sendeleistung" immer die maximal mögliche Sendeleistung angenommen. Eine Untersuchung des Einflusses der Leistungsregelung erfolgt in Abschnitt 7.2.2.*

6.2 Prinzipielle Struktur des Mobilfunknetzes

Für die vorliegenden Untersuchungen wird eine hexagonale Struktur des Mobilfunknetzes angenommen. Dies ist ein in der Praxis schwierig zu realisierender Idealfall, da topographische und morphographische Gegebenheiten die Ausbildung eines regelmäßigen hexagonalen

Gitters behindern. Die wesentlichen Effekte der hier untersuchten immissionsreduzierenden Maßnahmen lassen sich jedoch anhand einer hexagonalen Struktur genauso demonstrieren. Abb. 6.1 zeigt die Grundstruktur des Netzes.

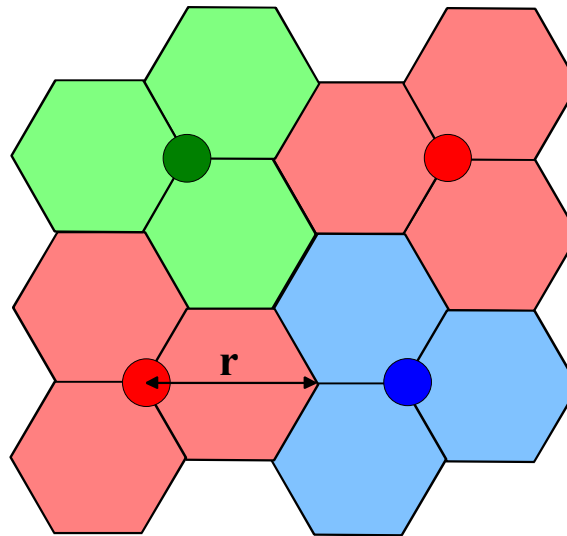


Abb. 6.1 Hexagonale Zellstruktur von Mobilfunknetzen

Eine Basisstation, gekennzeichnet durch den Punkt an der Kreuzungslinie dreier Sektoren, leuchtet mit jeder Antenne einen hexagonalen Sektor aus. In der Regel werden pro Basisstation drei Antennen um 120° versetzt aufgestellt, so dass insgesamt in etwa ein kreisförmiges Gebiet ausgeleuchtet wird. In Abb. 6.1 ist die Versorgung der Zellen durch *eine* Basisstation jeweils farbig gekennzeichnet. Der Zellenradius r ist der Durchmesser des hexagonalen Versorgungsgebietes einer Sendeantenne. Er ist in den nachfolgenden Abschnitten zusammen mit der Zellfläche Gegenstand der Untersuchungen. Die Untersuchungen werden wie bisher an *einer* Antenne in *einem* Sektor durchgeführt. Dies ist für die Untersuchungen hinreichend, da sich die anderen beiden hier nicht betrachteten Sektoren einer Basisstation identisch verhalten. Lediglich bei der Betrachtung der Gesamtemission müssen sowohl die Sendeleistungen der einzelnen Kanäle, als auch die der einzelnen Sektoren aufsummiert werden.

6.3 Ausbreitungsmodell für städtisches Gebiet

Für die Berechnungen der Zellgröße wird das COST-Walfisch-Ikegami (COST-WI) Modell [COS 99] verwendet. Dies ist ein semi-empirisches Wellenausbreitungsmodell, das im Gegensatz zum worst case Freiraumausbreitungsmodell speziell für städtische Umgebung geeignet ist. Das COST-WI Modell ist im Anhang A beschrieben.

Im COST-WI Modell sind in bestimmten Grenzen Parameter frei wählbar, um unterschiedliche Arten von Stadtgebieten nachbilden zu können. Da hier von vornherein noch nicht abgeschätzt werden kann, inwieweit unterschiedliche Parametersätze einen Einfluss auf die generellen Ergebnisse dieses Kapitels haben, wird mit zwei realistischen, von den Werten her gänzlich verschiedenen Eingangsparametern gearbeitet. Diese beiden Parametersätze sind in Tabelle 6.1 und 6.2 beschrieben.

Parametersatz 2: Kleinstadt	
Sendeleistung P_S	5 W
Höhe der Basisstation h_S	15 m
Höhe des Empfängers h_E	1,5 m
Sichtverbindung zum Sender	nein (NLOS)
mittlere Gebäudehöhe	12 m
mittlere Straßenbreite	10 m
mittlerer Gebäudeabstand	20 m
Winkel der Straße gegenüber direktem Pfad	90°
Antenne	K 735 147
elektrischer Downtilt	2°
mechanischer Downtilt	0°
Wellenausbreitungsmodell	COST-WI

Tabelle 6.1 Beschreibung der Parameter für Parametersatz 2

Parametersatz 3: Großstadtzentrum	
Sendeleistung P_S	5 W
Höhe der Basisstation h_S	25 m
Höhe des Empfängers h_E	1,5 m
Sichtverbindung zum Sender	nein (NLOS)
mittlere Gebäudehöhe	20 m
mittlere Straßenbreite	25 m
mittlerer Gebäudeabstand	50 m
Winkel der Straße gegenüber direktem Pfad	90°
Antenne	K 735 147
elektrischer Downtilt	2°
mechanischer Downtilt	0°
Wellenausbreitungsmodell	COST-WI

Tabelle 6.2 Beschreibung der Parameter für Parametersatz 3

In Abb. 6.2 ist dargestellt, dass das COST-WI Modell (hier Parametersatz 2 verwendet) sehr viel größere Dämpfungen liefert als das bislang verwendete Freiraummodell. Die Kurve für das COST-WI Modell beginnt entsprechend der Gültigkeit des Modells erst bei 20 m.

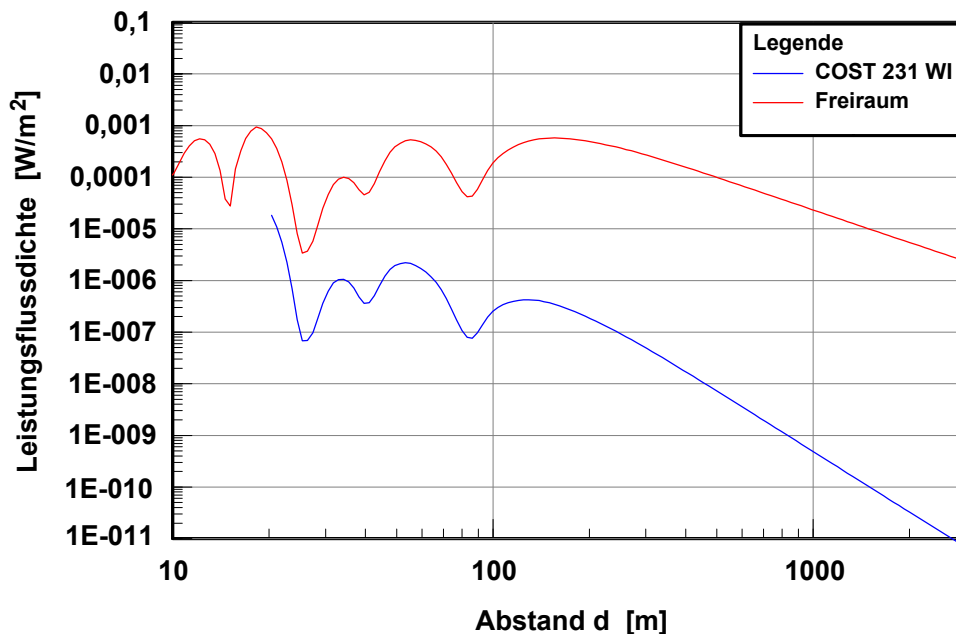


Abb. 6.2 Verlauf der Leistungsfussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 2, Variation des Wellenausbreitungsmodells

6.4 Auswirkung einer Reduzierung der Sendeleistung

Eine Reduzierung der Sendeleistung einer Basisstation kann auf verschiedene Weise erfolgen, und zwar z.B. durch

1. Reduzierung der Kanalsendeleistung bei gleichbleibender Anzahl der Kanäle pro Anlage. Hierbei steigt die flächenbezogene Systemkapazität an, d.h. das Verkehrsaufkommen, das maximal verarbeitet werden kann,
2. Reduzierung der Kanalsendeleistung bei gleichbleibender flächenbezogener Systemkapazität, d.h. durch Reduzierung der Anzahl der Kanäle und Auslagerung auf neue Stationen, und
3. Rückbau von Standorten, die von mehreren Netzbetreibern gemeinsam genutzt werden in der Weise, dass nur noch ein Betreiber pro Standort vorhanden ist.

Im folgenden wird ausführlich auf die erste Möglichkeit eingegangen. Nachfolgend wird beschrieben, welche prinzipiellen Änderungen sich bei einer Reduzierung der Sendeleistung nach Variante 2 und 3 ergeben.

6.4.1 Reduzierung der Kanalsendeleistung bei gleichbleibender Anzahl der Kanäle

6.4.1.1 Prinzipielle Auswirkungen

Bereits in Abb. 4.6 wurde gezeigt, dass eine Verringerung der Sendeleistung mit einer Verringerung der Leistungsflussdichte im zu versorgenden Gebiet einhergeht. Für die weiteren Betrachtungen dieses Kapitels wird angenommen, dass bei einem Funknetz die Zellen so geplant werden, dass am Rand der Zelle gerade die Mindestleistungsflussdichte S_{\min} erreicht wird, die für eine Funkverbindung erforderlich ist. Durch eine Verringerung der Kanalleistung kann S_{\min} am ursprünglichen Zellrand nicht mehr erreicht werden. Der Punkt, an dem S_{\min} bei reduzierter Sendeleistung jetzt auftritt, rückt näher an die Basisstation heran. Der Zellradius verringert sich und mit ihm die Zellfläche: Die Funkzelle wird kleiner. Um trotzdem eine flächendeckende Versorgung gewährleisten zu können, müssen mehr Basisstationen errichtet werden. Um welche Größenordnungen es sich dabei handelt, wird im folgenden gezeigt.

In Abschnitt 6.4.1.2 werden die Ergebnisse der Berechnungen anhand des COST-WI Modells präsentiert. *Die Darstellung erfolgt relativ, d.h. bezogen auf eine Ausgangssituation, bei der eine Basisstation mit $P_0=5\text{ W}$ eine Zelle mit dem Radius r_0 bzw. der Fläche A_0 ausleuchtet. Bei prozentualer Darstellung entspricht 100 % der Ausgangssituation. In Abschnitt 6.4.1.3 erfolgt anhand von Beispielen die Interpretation der Berechnungen.*

6.4.1.2 Detaillierte Betrachtung der Abhängigkeiten

Die Abb. 6.3-6.6 beziehen sich auf Berechnungen mit dem *Parametersatz 2*. In Abb. 6.3 ist noch einmal die Abhängigkeit der Leistungsflussdichte vom lateralen Abstand d gezeigt. Die Leistungsflussdichte ist auf die minimal erforderliche Leistungsflussdichte S_{\min} normiert und logarithmisch als Pegeldifferenz in dB angegeben. Die Kurve entspricht im wesentlichen dem Verlauf von Abb. 6.2. Eine Änderung der Sendeleistung würde gemäß Abb. 4.6 zu einer Vertikalverschiebung der Kurve und damit zu einer Veränderung des Zellradius führen.

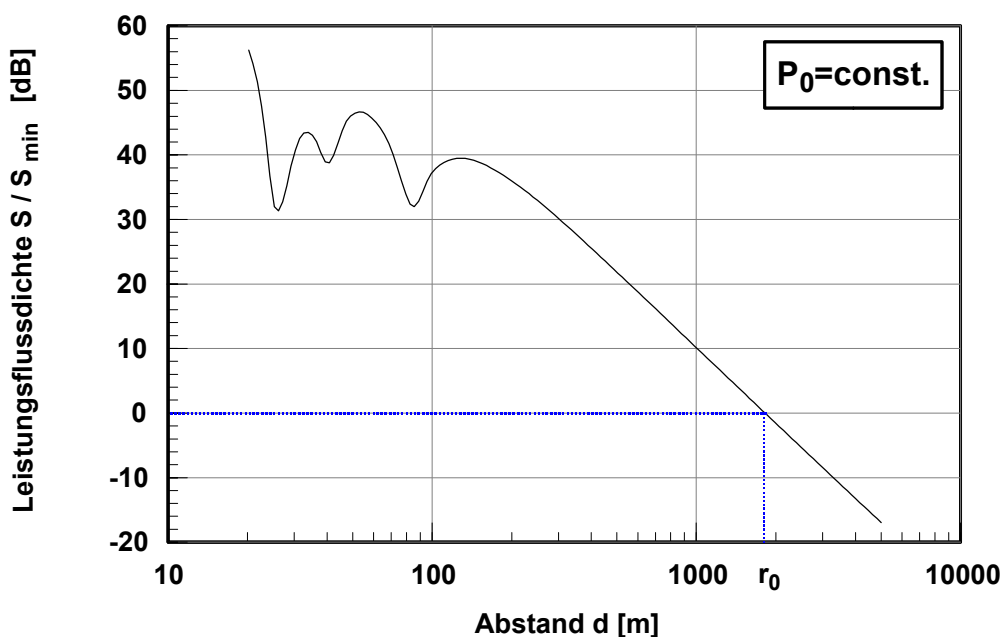


Abb. 6.3

Abhängigkeit der normierten Leistungsflussdichte vom lateralen Abstand, Parametersatz 2

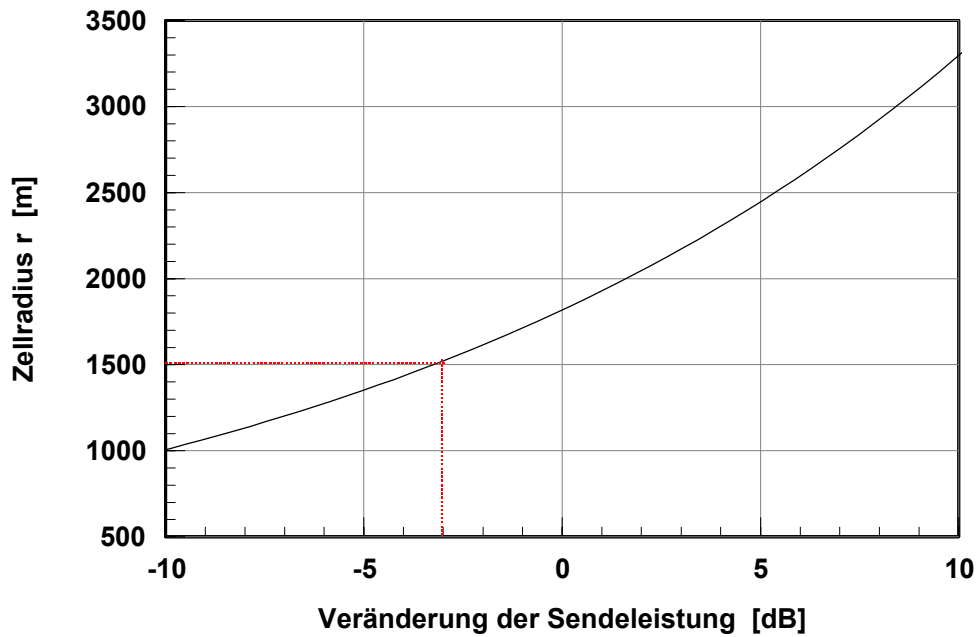


Abb. 6.4 Abhängigkeit des Zellradius von der auf den Referenzwert bezogenen Sendeleistung, Parametersatz 2

In Abb. 6.4 ist die aus einer Änderung der Sendeleistung resultierende Änderung des Zellradius dargestellt. Die Sendeleistung P ist auf diejenige Referenzleistung P_0 normiert, die der Ausgangssituation entspricht.

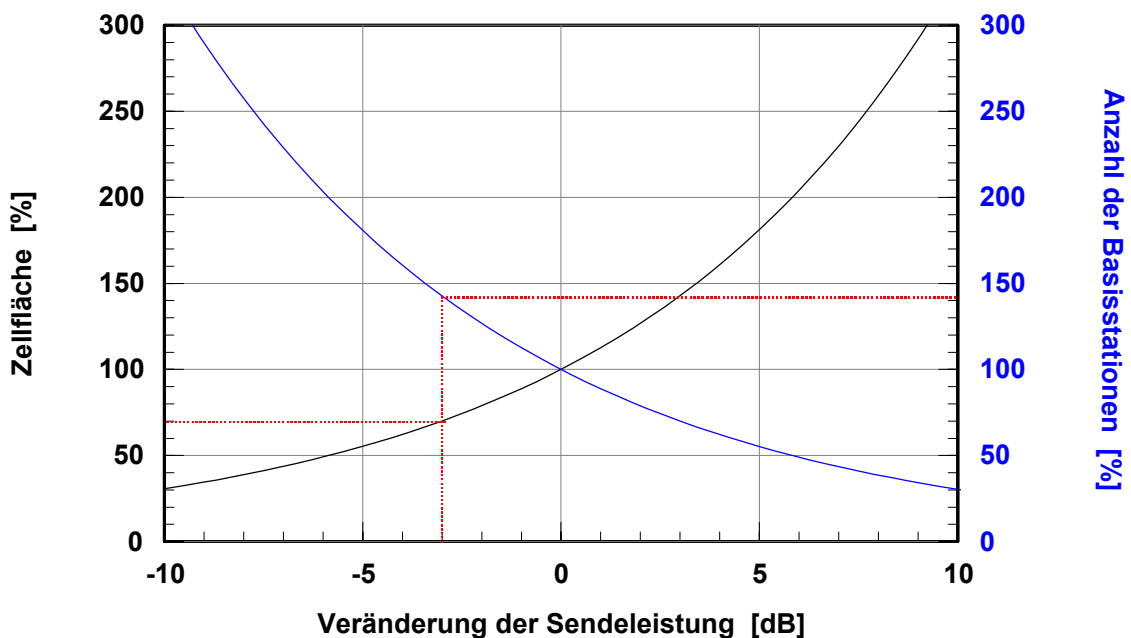


Abb. 6.5 Abhängigkeit der normierten Zellfläche und der normierten Anzahl der notwendigen Basisstationen von der auf den Referenzwert bezogenen Sendeleistung, Parametersatz 2

In Abb. 6.5 ist gezeigt, wie sich die in Abb. 6.4 gezeigte Änderung des Zellradius durch Leistungsänderung in einer Änderung der Zellfläche widerspiegelt. Auch hier erfolgt wieder die Normierung auf den Fall, der sich ohne Leistungsänderung ergeben würde. Die Änderung der Zahl der Basisstationen verhält sich gegenläufig zur Änderung der Zellfläche.

Nachdem bisher Änderungen von Zellradius und Zellfläche als Folge der Veränderung der Sendeleistung gezeigt wurden, wird jetzt eine neue Größe eingeführt: Die *flächenbezogene Emission* P/A beschreibt das Verhältnis von Sendeleistung P zur durch sie ausgeleuchteten Fläche A .

Durch Vergleich der flächenbezogenen Emissionen für verschiedene Sendeleistungen der Basisstation lässt sich direkt ablesen, wie groß die insgesamt benötigte Leistung zum Ausleuchten einer gegebenen Fläche A ist. In diese insgesamt benötigte Leistung geht die gegenüber dem Ausgangszustand (eine Antenne mit P_0 versorgt A_0) erhöhte Anzahl der benötigten Basisstationen mit ein. Wird die flächenbezogene Emission P/A zum Beispiel mit der durch ein Mobilfunknetz insgesamt zu versorgende Fläche A_{Netz} , d.h. der Gesamtnetzfläche multipliziert, beschreibt P die zur Versorgung *insgesamt benötigte Sendeleistung* als Summe der Sendeleistungen der einzelnen Basisstationen. Für *gleiche* Flächen A lässt sich so die Effizienz der Ausleuchtung von konzentrierten (wenige Anlagen hoher Sendeleistung) und verteilten (viele Anlagen geringer Leistung) Senderkonzepten vergleichen. Das in *Verhältnis* der flächenbezogenen Emissionen zwischen Neu- und Altzustand ist demnach identisch mit dem *Verhältnis der Gesamtemissionen*.

Hierdurch kann also bestimmt werden, ob durch die mit einer Leistungsreduzierung einhergehende Erhöhung der Stationsanzahl die Gesamtemission ebenfalls anwächst, konstant bleibt oder sinkt.

Abb. 6.6 zeigt das Verhältnis der flächenbezogenen Emission in Abhängigkeit der Sendeleistung, jeweils bezogen auf die Situation des Ausgangszustandes ohne Leistungsreduzierung.

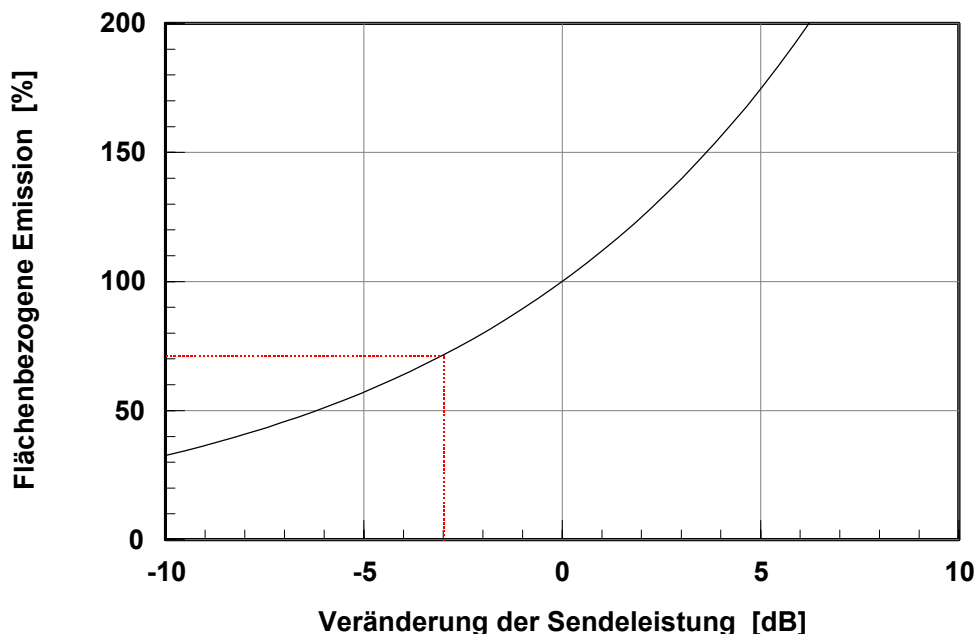


Abb. 6.6 Abhängigkeit der normierten flächenbezogenen Emission von der auf den Referenzwert bezogenen Sendeleistung, Parametersatz 2

Abb. 6.7 bis 6.10 enthalten die Verhältnisse der Abb. 6.3 bis 6.6 für den Parametersatz 3, Großstadtzentrum. Die Darstellungen enthalten im wesentlichen keine neuen Information, die Werte weichen nur geringfügig von denen des Parametersatzes 2 ab.

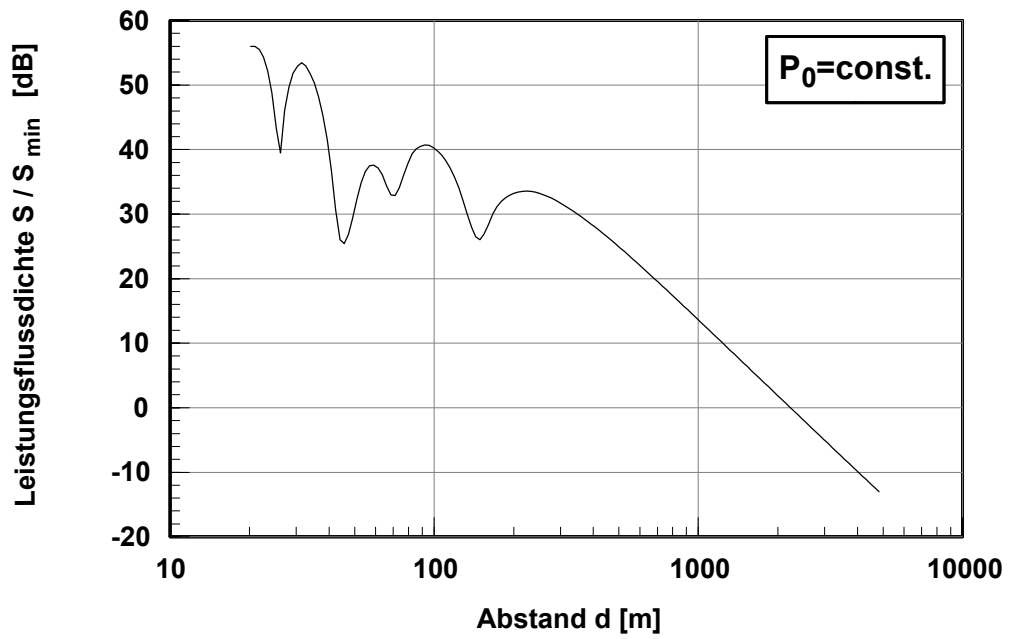


Abb. 6.7 Abhängigkeit der normierten Leistungsflussdichte vom lateralen Abstand, Parametersatz 3

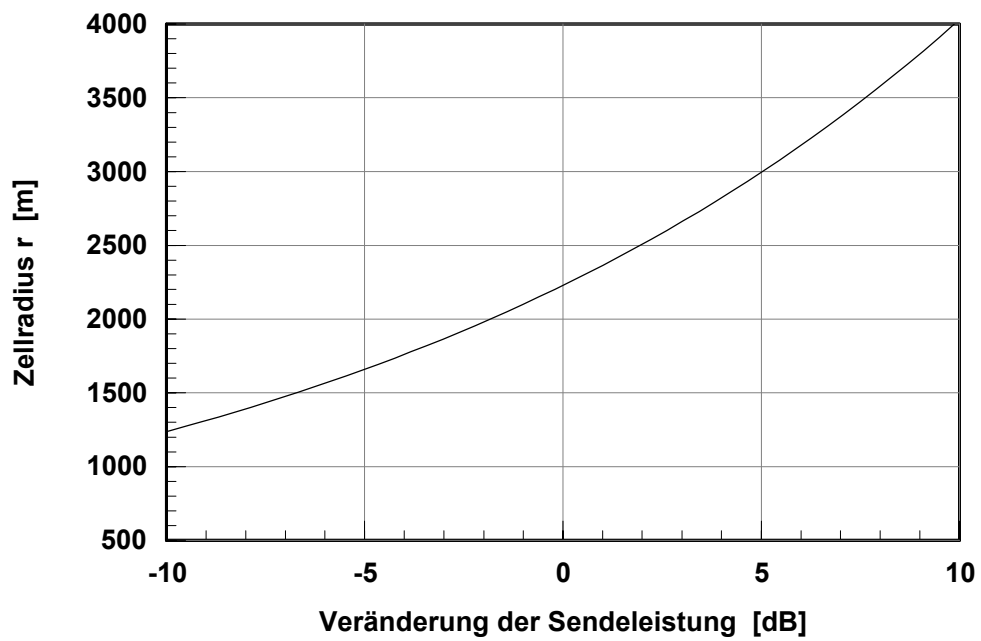


Abb. 6.8 Abhängigkeit des Zellradius von der auf den Referenzwert bezogenen Sendeleistung, Parametersatz 3

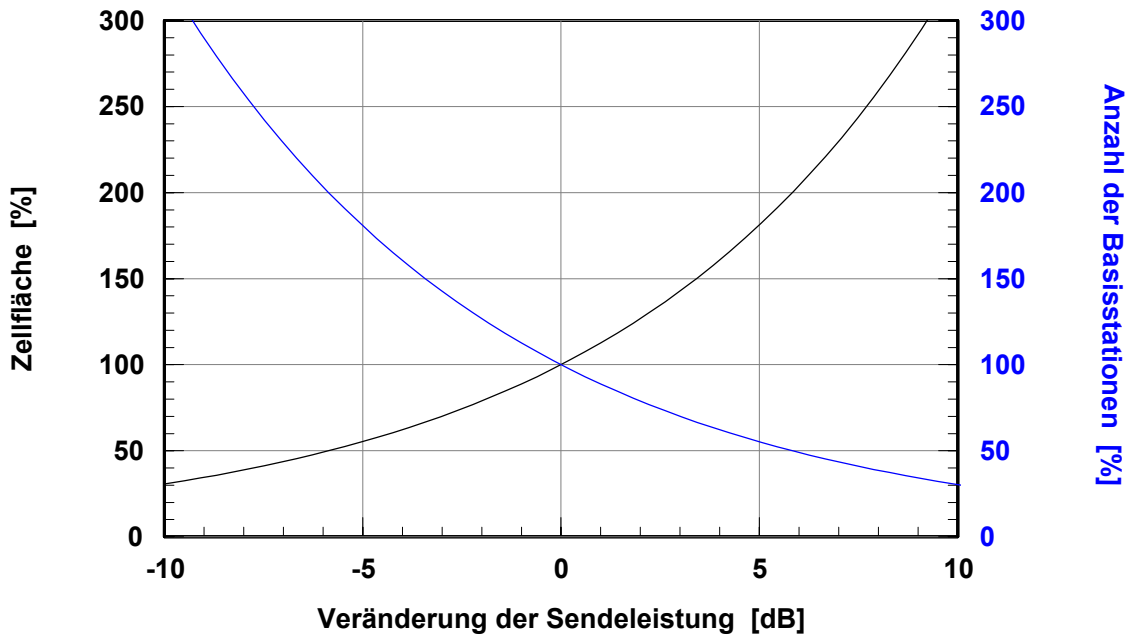


Abb. 6.9 Abhängigkeit der normierten Zellfläche und der normierten Anzahl der notwendigen Basisstationen von der auf den Referenzwert bezogenen Sendeleistung, Parametersatz 3

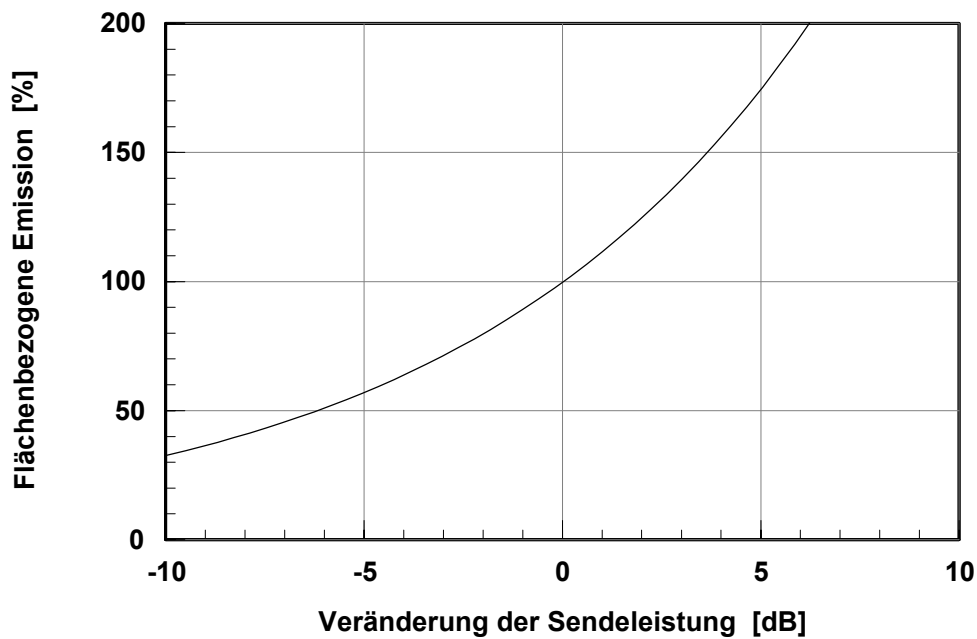


Abb. 6.10 Abhängigkeit der normierten flächenbezogenen Emission von der auf den Referenzwert bezogenen Sendeleistung, Parametersatz 3

6.4.1.3 Beispiele zu den gezeigten Abhängigkeiten

Die Aussagen der dargestellten Abhängigkeiten sollen anhand des Parametersatzes 2, Kleinstadt (Abb. 6.3 bis 6.6) an zwei Beispielen erläutert werden:

Für den Parametersatz 2 kann aus Abb. 6.3 bzw. 6.4 ermittelt werden, dass der Zellradius beim Ausgangszustand, d.h. vor der Reduzierung der Leistung, etwa 1.800 m beträgt (Zellra-

dus für $S/S_{\min} = 0$ dB entsprechend $S = S_{\min}$ in Abb. 6.3 (blau markiert) bzw. für Veränderung der Sendeleistung $P/P_0 = 0$ dB entsprechend $P = P_0$ in Abb. 6.4). Man beachte jedoch, dass je nach Grad der gewünschten Indoorversorgung (Versorgung von Mobilfunkteilnehmern, die sich innerhalb von Gebäuden aufhalten) die resultierenden Zellradien gegenüber den hier dargestellten erheblich reduziert sein können. Um dies zu berücksichtigen, müssten zusätzlich zum verwendeten COST-WI Modell weitere, die Indoorversorgung berücksichtigende Dämpfungsterme berücksichtigt werden. An den in Abb. 6.4-6.6 dargestellten *Trends* ändert das jedoch nichts.

Würde die Sendeleistung nun um 3 dB reduziert, d.h. von 5 W auf 2,5 W, dann sinkt der Zellradius auf etwa 1.500 m (Abb. 6.4, rot markiert). Dies entspricht einer Verkleinerung der Zellfläche auf etwa 70 % des ursprünglichen Wertes (Abb. 6.5, rot markiert). Um weiterhin eine flächendeckende Mobilfunkversorgung zu gewährleisten, müsste die Anzahl der Basisstationen um etwa 40 % steigen. Dadurch würde die Emission pro Flächeneinheit auf ca. 70 % des ursprünglichen Wertes sinken (Abb. 6.6, rot markiert).

Würde die Sendeleistung um 6 dB reduziert, d.h. von 5 W auf 1,25 W, dann sinkt der Zellradius auf etwa 1.270 m (Abb. 6.4). Dies entspricht einer Verkleinerung der Zellfläche auf etwa 50 % des ursprünglichen Wertes (Abb. 6.5). Die Anzahl der Basisstationen müsste um etwa 100 % steigen. Dadurch würde die Emission pro Flächeneinheit auf ca. 50 % des ursprünglichen Wertes sinken (Abb. 6.6).

Vor allem die Aussage von Abb. 6.6 ist höchst bedeutsam: Bereits hier kann man die wichtige Tatsache entnehmen, dass *durch mehrere Basisstationen, die mit gegenüber der Ausgangssituation verringerter Sendeleistung senden, die Gesamtsendeleistung des Netzes sinkt*. Einige wenige Basisstationen mit höherer Sendeleistung führen dagegen zu einer Erhöhung der im Gesamtnetz insgesamt abgestrahlten Leistung, oder anders ausgedrückt: Die Zellgröße steigt nicht in demselben Maße an wie die Sendeleistung, sondern langsamer.

Bemerkung: Hier muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass dies nur für *reale* Dämpfungsverhältnisse, wie im COST-WI Modell berücksichtigt, gilt. Im *Freiraumfall* (ohne Bodenreflexion), der eine Ausnahme darstellt, ist die im Gesamtnetz abgestrahlte Leistung *unabhängig* davon, ob viele leistungsschwache oder wenige leistungsstarke Anlagen eingesetzt werden. Für den interessierten Leser ist die mathematische Herleitung dieser Aussage im Anhang B dargestellt (Abb. B.1).

6.4.2 Reduzierung der Kanalsendeleistung bei gleichbleibender Systemkapazität

Bei den in 6.4.1 durchgeführten Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass die Reduzierung der Sendeleistung einer Anlage durch *Reduzierung der Sendeleistung pro Kanal* erfolgt, wobei die Anzahl der Kanäle pro Anlage unverändert bleibt. D.h. alle Sendekanäle werden gleichmäßig in der Leistung reduziert. Hierbei wird die flächenbezogene Systemkapazität, d.h. die Anzahl möglicher Gesprächsverbindungen pro Fläche, steigen, da sich das Netz bei gleicher Kanalzahl pro Anlage verdichtet.

Soll die *flächenbezogene Systemkapazität* bei einer Reduzierung der Sendeleistung der Anlage *konstant* bleiben, entspricht das dem Fall, dass bei mehrkanaligen Anlagen die Anzahl der

Sendekanäle entsprechend reduziert wird und diese auf neu zu errichtende Füllstationen ausgelagert werden. Kanalleistungsreduzierung und Kanalzahl stehen in einem festen Verhältnis.

Dies führt dazu, dass sich der Trend der *Reduzierung der Gesamtmission* (flächenbezogene Emission) durch Reduzierung der Kanalsendeleistung in Vergleich zu Abb. 6.6 noch *verstärkt* (und jetzt auch gleichermaßen für Freiraumausbreitungsbedingungen gilt). Grund dafür ist, dass zusätzlich zur Verringerung der Gesamtmission aufgrund der Verringerung der Zellfläche nach Abschnitt 6.4.1 auch noch eine Verringerung der Gesamtmission aufgrund der Reduzierung der Kanalzahl erfolgt. Die mathematische Beschreibung hierzu ist in Anhang B enthalten (Abb. B.2).

6.4.3 Rückbau von gemeinsam genutzten Standorten auf Einfachnutzung

Eine Reduzierung der Sendeleistung kann prinzipiell auch dadurch erfolgen, dass bei bislang gemeinsam genutzten Standorten die gemeinsame Nutzung aufgegeben wird und jeder Netzbetreiber sein eigenes, gegenüber dem Netz des anderen Netzbetreibers versetztes Netz aufbaut. Hierbei ändert sich jedoch gegenüber der Ausgangssituation an der Gesamtmission nichts, da Zellradien und netzbetreiberbezogene Sendeleistung pro Station nicht reduziert werden. Aus Sicht der Gesamtmission spielt es keine Rolle, ob die Netze beider Betreiber übereinander liegen oder versetzt aufgebaut sind. Trotzdem wird die Maßnahme an ausgewählten Brennpunkten zu einer Reduzierung der ortsbezogenen Immission führen.

6.5 Auswirkung einer Erhöhung des Senderstandortes

6.5.1 Prinzipielle Auswirkungen

Bereits in Abb. 4.7 wurde gezeigt, dass eine Vergrößerung der Höhendifferenz zwischen Sender und Empfänger, z.B. durch Höhersetzen der Sendeantenne, im lateralen Nah- und mittleren Entfernungsbereich der Antennen die ortsbezogene Immission nach unten verschiebt. Im Fernbereich der Antenne, d.h. ab einigen Hundert Metern, münden die Immissionskurven in eine gemeinsame Kurve ein.

Allerdings sind die Berechnungen in Abschnitt 4 mit dem Freiraum Wellenausbreitungsmodell durchgeführt worden. Es ist zu prüfen, ob durch Ansatz des COST-WI Modells, das die Ausbreitung im mittleren und Fernbereich der Antenne wesentlich realistischer beschreibt, diese Trends erhalten bleiben.

Abb. 6.11 zeigt die Abhängigkeit der Leistungsflussdichte von der Höhe der Basisstation für Parametersatz 2 (Tabelle 6.1), d.h. bei Ansatz des COST-WI Modells. Die Höhe der Basisstation wird von der Ausgangshöhe 15 m über dem Boden in 2 m Schritten variiert.

Hierbei zeigt sich, dass im Unterschied zu den mit dem Freiraumausbreitungsmodell berechneten Abhängigkeiten folgende neuen Trends auftreten:

- die Kurven verschieben sich zwar weiterhin mit wachsender Höhe der Basisstation nach rechts, die Leistungsflussdichten bleiben im Nahbereich (20 m bis 30 m) jedoch gleich und steigen im mittleren Bereich (30 m bis 100 m) sogar leicht an,

- im Fernbereich der Antenne liegen die Kurven nicht mehr übereinander, sondern durch höhere Senderstandorte werden höhere ortsbezogene Immissionen erzeugt.

Diese neuen Trends sind im COST-WI Modell begründet und können wie folgt erklärt werden: Durch ein Höhersetzen der Basisstation wird ihre "Sichtbarkeit" am Erdboden besser (auch wenn weiterhin keine direkte Sicht besteht), und es kann effektiver Leistung in die Straßenzug, in der sich der mobile Teilnehmer befindet, eingekoppelt werden.

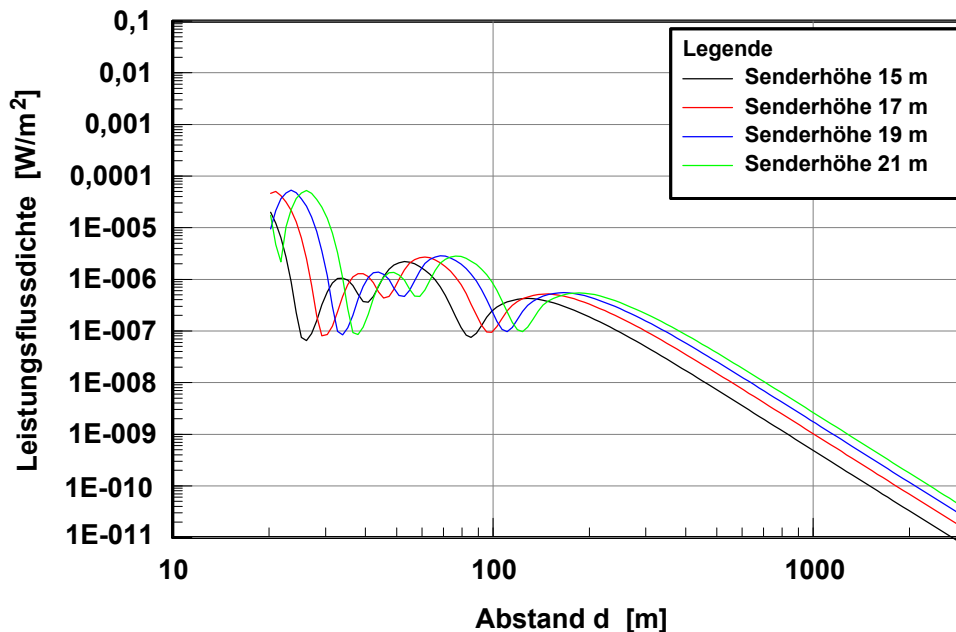


Abb. 6.11 Abhängigkeit der Leistungsfussdichte von der Höhe der Basisstation, Parametersatz 2

Die Trendumkehr im Fernbereich der Antenne bedeutet, dass durch Höhersetzen der Antenne bei gleicher Sendeleistung der Zellradius erhöht wird und sich die ausgeleuchtete Zellfläche entsprechend vergrößert. D.h. hier kann theoretische das Mobilfunknetz "verdünnt", d.h. die Anzahl der Basisstationen verringert werden. Um welche Größenordnungen es sich dabei handelt, wird im folgenden gezeigt.

In Abschnitt 6.5.2 werden die Ergebnisse der Berechnungen anhand des COST-WI Modells präsentiert. Die Darstellung erfolgt relativ, d.h. bezogen auf die Ausgangssituation, bei der eine Basisstation mit $P_0 = 5 \text{ W}$ der Höhe 15 m (Parametersatz 2) eine Zelle mit dem Radius r_0 bzw. der Fläche A_0 ausleuchtet. Bei prozentualer Darstellung entspricht 100% der Ausgangssituation. In Abschnitt 6.5.3 erfolgt anhand von Beispielen die Interpretation der dargestellten Verläufe.

6.5.2 Detaillierte Betrachtung der Abhängigkeiten

Die Abb. 6.12-6.14 beziehen sich auf die Berechnungen mit dem Parametersatz 2.

In Abb. 6.12 ist der Zellradius in Abhängigkeit von einer Erhöhung des Senderstandortes bezogen auf die Ausgangssituation $h_s = 15 \text{ m}$ dargestellt.

In Abb. 6.13 ist gezeigt, wie sich die Erhöhung des Zellradius durch Höhersetzen des Senders in einer Vergrößerung der Zellfläche widerspiegelt. Auch hier erfolgt wieder die Normierung

auf den Fall, der sich ohne Höhenveränderung ergeben würde. Die Verringerung der Anzahl der Basisstationen, die zu einer flächendeckenden Versorgung notwendig sind, ist der Flächenerhöhung proportional.

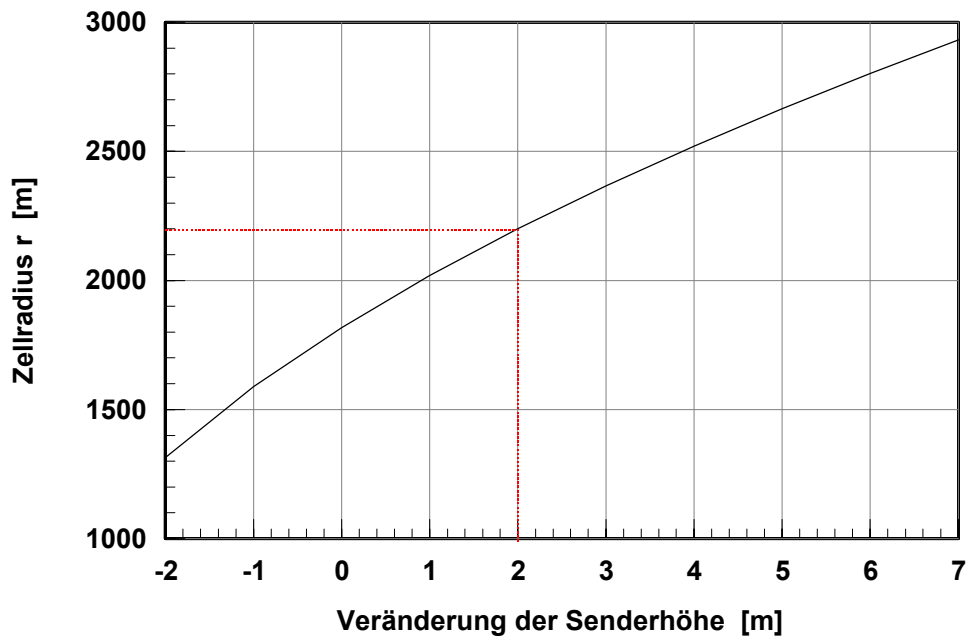


Abb. 6.12 Abhängigkeit des Zellradius von der auf den Referenzwert bezogenen Senderhöhe, Parametersatz 2

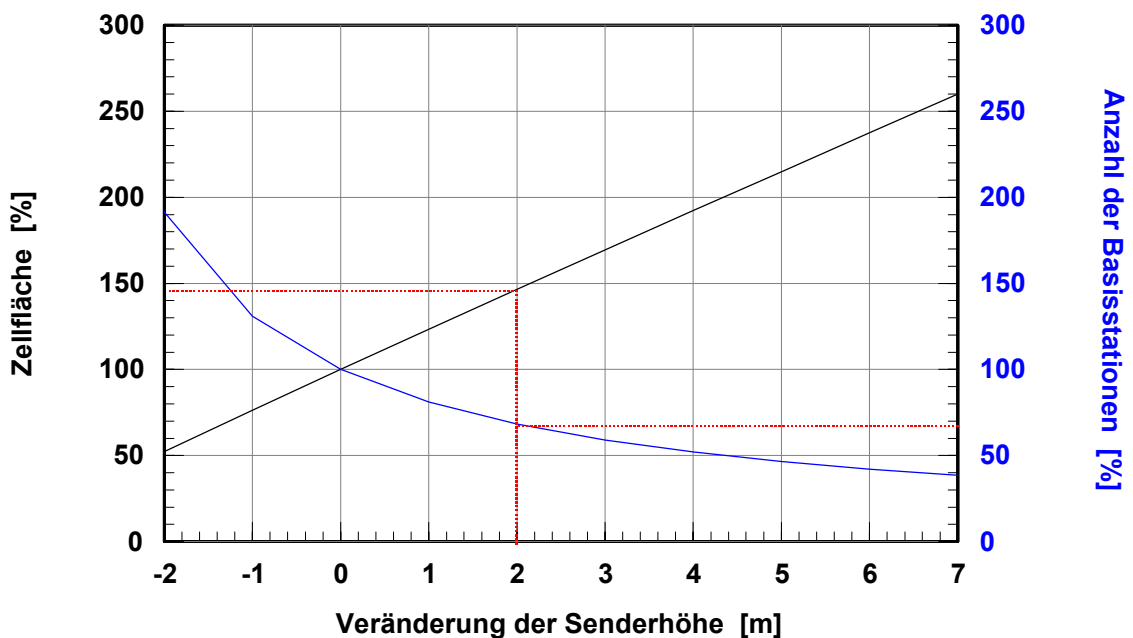


Abb. 6.13 Abhängigkeit der normierten Zellfläche und der normierten Anzahl der notwendigen Basisstationen von der auf den Referenzwert bezogenen Senderhöhe, Parametersatz 2

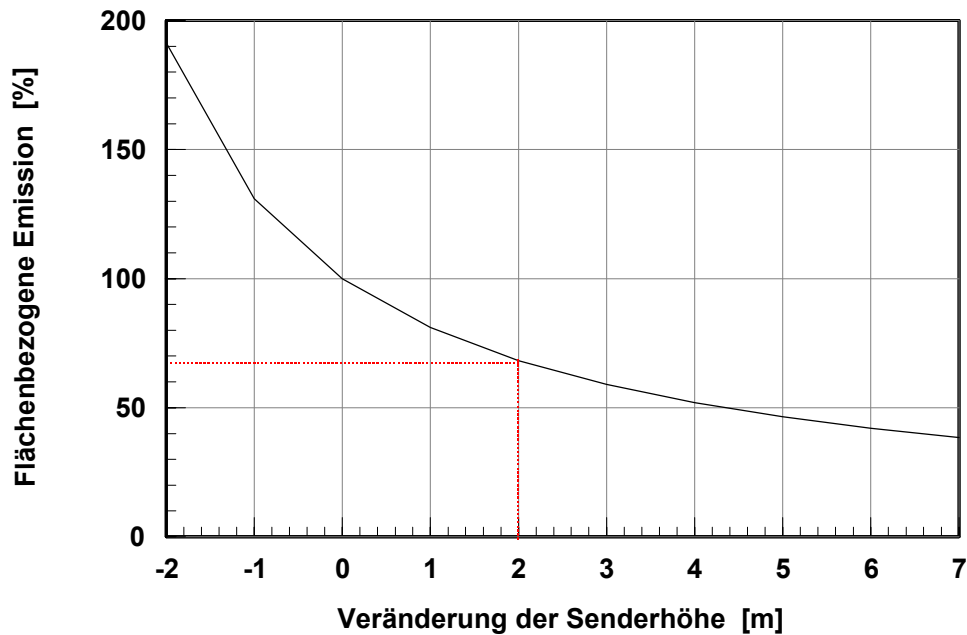


Abb. 6.14 Abhängigkeit der normierten flächenbezogenen Emission von der auf den Referenzwert bezogenen Senderhöhe, Parametersatz 2

Abb. 6.14 zeigt schließlich die Veränderung der flächenbezogenen Emission (Gesamtemission) in Abhängigkeit der Senderhöhe, jeweils bezogen auf den Ausgangszustand ohne Erhöhung der Sendeantenne.

Für Parametersatz 3 ergeben sich die gleichen Trends, deswegen wird auf eine ausführliche Darstellung hier verzichtet.

6.5.3 Beispiel zu den gezeigten Abhängigkeiten

Die Aussagen der dargestellten Abhängigkeiten der Höhenveränderung soll anhand des Parametersatzes 2, Kleinstadt (Abb. 6.11 bis 6.14) an einem Beispiel erläutert werden:

Der Zellradius beim Ausgangszustand, d.h. vor Erhöhung des Senderstandorts, beträgt etwa 1.800 m (Zellradius r bei Veränderung der Senderhöhe = 0 m in Abb. 6.12). Man beachte jedoch auch hier, dass je nach Grad der gewünschten Indoorversorgung die resultierenden Zellradien gegenüber den hier dargestellten erheblich reduziert sein können.

Würde die Senderhöhe nun um 2 m erhöht, d.h. von 15 m auf 17 m, dann steigt der Zellradius auf etwa 2.200 m (Abb. 6.12, rot markiert). Dies entspricht einer Vergrößerung der Zellfläche um etwa 50 % (Abb. 6.13, rot markiert). Die Anzahl der Basisstationen könnte entsprechend auf etwa 70 % des ursprünglichen Wertes reduziert werden. Dadurch würde die Emission pro Flächeneinheit auf ca. 70 % des ursprünglichen Wertes sinken (Abb. 6.14, rot markiert).

6.6 Zusammenfassung

Unter Verwendung eines speziellen Wellenausbreitungsmodells für städtische Gebiete, das wesentlich besser für die Berechnung von Zellgrößen als das in Kapitel 4 angewendete Freiraumausbreitungsmodell geeignet ist, wurde der Einfluss einer Sendeleistungsreduzierung und einer Erhöhung des Senderstandortes auf die GSM Netzstruktur untersucht. Hierbei wurde angenommen, dass sich die Zellgröße primär durch eine Mindestleistungsflussdichte für eine Mobilfunkverbindung am Zellrand bestimmt.

Eine *Verringerung der Kanalsendeleistung* aus Gründen der Verringerung der ortsbezogenen Immission bei Beibehaltung der Kanalanzahl pro Anlage führt zu einer Reduzierung des Zellradius und demzufolge auch zu einer Reduzierung der Zellfläche. In gleichem Maße steigt die Anzahl der Basisstationen an, um eine flächendeckende Versorgung gewährleisten zu können. Die Gesamtmission als Summe der abgestrahlten Sendeleistungen bei einer solchen Verdichtung des Netzes (mehr Basisstationen pro Flächeneinheit als vorher, verteiltes Konzept) ist jedoch geringer als im ursprünglichen Netz, vorausgesetzt, dass man ein realistisches Wellenausbreitungsmodell mit realistischem Dämpfungsverhalten ansetzt. Im Freiraumfall ist die Gesamtmission von verteiltem Konzept (viele leistungsreduzierte Sender) und konzentriertem Konzept (wenige leistungsstarke Sender) gleich.

In obigem Szenario steigt jedoch die flächenbezogene Systemkapazität an. Soll diese konstant bleiben, kann das durch eine entsprechende Verringerung der Kanalsendeleistung bei gleichzeitiger *Reduzierung der Zahl der Frequenzkanäle pro Station* erfolgen. Auch hier steigt die Zahl der Basisstationen bei kleiner werdenden Zellflächen an. Der Trend einer Reduzierung der Gesamtmission bei Zellverkleinerung durch Reduzierung der Kanalsendeleistung und entsprechender Verlagerung von Kanälen auf neue Stationen besteht auch hier und ist gegenüber dem Fall der Verringerung der Kanalsendeleistung bei Beibehaltung der Kanalzahl pro Anlage sogar noch verstärkt; er ist hier auch für den Freiraumausbreitungsfall zutreffend.

Im Realfall wird die Reduzierung der Kanalsendeleistung jedoch nicht grenzenlos möglich sein, da in Teilbereichen der Zelle (Nah- und mittlerer Entfernungsbereich bis ca. 100 m) eine ausreichende Funkversorgung dann nicht mehr gegeben ist.

Eine Teilung des Netzes durch *Auflösung von bislang gemeinsam genutzten Standorten* hat indessen keine Auswirkungen auf die Gesamtmission, da jeder Netzbetreiber sein Netz mit unveränderter Sendeleistung und unveränderten Zellradien betreibt.

Eine *Erhöhung der Basisstationshöhe* führt (im Gegensatz zum Freiraumfall) zu einer Vergrößerung der Zellen und dementsprechend zu einer Verringerung der notwendigen Zahl der Basisstationen. Auch in diesem Fall sinkt die Gesamtmission. Im Realfall wird die Erhöhung des Sendestandortes nicht grenzenlos möglich sein, da dadurch die Interferenz mit den benachbarten Zellen ansteigt und bautechnische Probleme zunehmen.

Beide Szenarien Verringerung der Sendeleistung und Erhöhung des Senderstandortes sind hier isoliert voneinander betrachtet worden. Grundsätzlich bestände die Möglichkeit, beide Varianten

ten zu kombinieren, d.h. bei einer Erhöhung des Sendestandortes die Sendeleistung so zu reduzieren, dass die Zellradien gleich bleiben. Die quantitative Behandlung dieser Option ist jedoch sehr komplex. Sie ist nicht Gegenstand dieser Studie; hier besteht jedoch weiterer Untersuchungsbedarf.

7 Auswirkungen der Verringerung der ortsbezogenen Immission auf die Gesamtimmission

7.1 Einleitung

Im vorangegangenen Kapitel wurde ermittelt, wie sich die beiden Maßnahmen, die primär für eine Reduzierung der ortsbezogenen Immission geeignet sind, auf die *Gesamtemission* sowie die Struktur des Mobilfunknetzes auswirken.

In vorliegendem Kapitel soll nun die Auswirkung der Maßnahmen auf die *Gesamtimmission* betrachtet werden. Dabei wird als Gesamtimmission die *gesamte* auf die Umwelt (d.h. Erdboden, Bäume, Häuser usw.) eingestrahlte Leistung definiert, also quasi die gesamte Umweltbelastung. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zur *ortsbezogenen* Immission, die primär aus regulatorischer Sicht der EMVU Grenzwerteinhaltung von Interesse ist.

Wie groß die insgesamt auf die Umwelt eingestrahlte Leistung (Gesamtimmission) bei vorgegebener Sendeleistung einer Mobilfunk Basisstation (Gesamtemission) ist, lässt sich wie folgt ableiten: Die auf die Umwelt eingestrahlte Leistung ist gleich der insgesamt abgestrahlten Leistung abzüglich der in die Atmosphäre abgestrahlten Leistung. Die Erdkrümmung wird hierbei vernachlässigt, da in der Realität die Zellgrößen vergleichsweise gering sind, so dass die Erdkrümmung hier keine signifikante Rolle spielt.

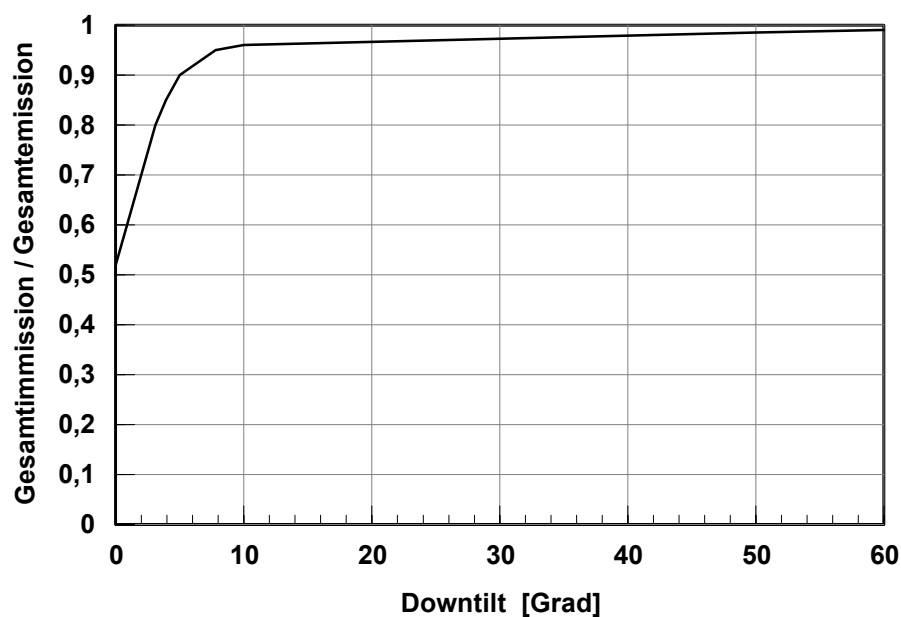


Abb. 7.1 Relative Gesamtimmission als Funktion des Downtilt Winkels, Quelle: [WIE 01]

Die Gesamtmission hängt hauptsächlich vom Downtilt Winkel ab. Man kann die Gesamtmission berechnen, indem man für verschiedene Downtilts die von einer Antenne auf dem Boden erzeugte Leistungsflussdichte über die ausgeleuchtete Fläche aufsummiert. In [WIE 01] ist diese Integration ausgeführt. Abb. 7.1 gibt das Ergebnis für die Antenne K 735147 bei zu 0° gesetztem elektrischen Downtilt an. Hier ist die Gesamtmission relativ zur Gesamtemission aufgetragen.

Die Deutung der Kurve ist einfach: Bei horizontaler Ausrichtung der Antenne (Downtilt 0°) wird etwa die halbe abgestrahlte Leistung in den Boden eingestrahlt, die andere Hälfte geht in die Atmosphäre. Bei wachsendem Downtilt steigt die Kurve sehr stark an; für Downtilts größer als die Halbwertsbreite in Elevationsrichtung wird nahezu die gesamte abgestrahlte Leistung in den Boden eingestrahlt (abzüglich der nach oben gerichteten Nebenzipfel).

Als Ergebnis lässt sich feststellen: Die Gesamtmission ist proportional der Gesamtemission. Der Proportionalitätsfaktor bestimmt sich aus dem Downtilt Winkel und der Richtcharakteristik der Sendeantenne. Für relative Betrachtungen, wie sie in dieser Studie vorgenommen werden, kann aufgrund der Proportionalität die Gesamtmission mit der insgesamt abgestrahlte Leistung gleichgesetzt werden. Damit lassen sich die Ergebnisse für die Gesamtemission aus den vorangegangenen Kapiteln direkt als Gesamtmission interpretieren.

Bereits hier kann aufgrund der vorangegangenen Ergebnisse eine wichtige Kernaussage der Studie getroffen werden:

Eine Grenzwertabsenkung um z.B. 20 dB (Faktor 100 in der Leistung, Schweizer Anlagen-grenzwerte) würde sich nicht in einer um 20 dB gesenkten Gesamtmission widerspiegeln, sondern die Reduzierung der Gesamtmission fällt wesentlich geringer aus.

Grund für diese Aussage ist der Fakt, dass die ortsbezogenen Immissionen je nach Anlage und Art der angrenzenden Bebauung um einige Zehnerpotenzen unter den gesetzlichen Grenzwerten der 26. BImSchV und nur bei einigen Konfigurationen oberhalb der Schweizer Anlagen-grenzwerte liegen (Kapitel 4). Maßnahmen zur Reduzierung der ortsbezogenen Immission wären wegen des großen Sicherheitsabstandes zu den gesetzlichen Grenzwerten

- nur an den Anlagen, die die Schweizer Grenzwerte überschreiten, und
- dort nur in wesentlich geringerem Umfang als die Absenkung der Grenzwerte

notwendig. Eine Grenzwertsenkung um x dB hätte nur dann vollen Durchgriff auf die Gesamtmission, wenn alle Stationen derzeit die gesetzlichen Grenzwerte ohne Sicherheitsreserve einhalten würden. Dies ist aber nachweislich (berechnet in Kapitel 4 und 6, eigene Messerfahrung) nicht der Fall.

Im folgenden wird ausgeführt, welchen zusätzlichen Einfluss die Veränderung der Netzstruktur auf die Aussagen zur Gesamtmission hat.

7.2 Gesamtmission bei Reduzierung der Sendeleistung

7.2.1 Ohne Berücksichtigung der Leistungsregelung

Aufgrund der Tatsache, dass die Gesamtmission proportional zur Gesamtemission ist, können die in Abschnitt 6.4 ermittelten Ergebnisse für das prinzipielle Verhalten der Emission

direkt als Immission interpretiert werden. In der Praxis müssen ab hier die realen Sendeleistungen (d.h. Sendeleistung pro Kanal x Kanalanzahl, drei Antennen pro Basisstation, evtl. Berücksichtigung von mehreren Anlagen an einem Standort) für die Gesamtmission eingesetzt werden, da die Berechnungen in Abschnitt 6.4 lediglich von einem Sendekanal mit 5 W Sendeleistung ausgingen. Da hier jedoch relative Verhältnisse betrachtet werden, ändert das den Trend nicht, und die Ergebnisse aus 6.4 können direkt übernommen werden.

Das heißt, dass für realistische Wellenausbreitungsbedingungen (Dämpfungskoeffizient größer 2) bei einem mit reduzierter Kanalsendeleistung sendenden verdichteten Netz (Kanalzahl pro Anlage unverändert) die Gesamtmission kleiner ist als bei einem konzentrierten Senderkonzept mit wenigen leistungsstarken Basisstationen. Dieser Trend wird noch verstärkt, wenn die Kanalzahl pro Fläche (Systemkapazität) gleich bleibt, d.h. Kanäle ausgelagert werden. Ein Rückbau von Stationen, die von mehreren Netzbetreibern gleichzeitig genutzt wurden, hat indessen keinen Einfluss auf die Gesamtmission.

Selbst wenn dieses verteilte Konzept aus Immissionsicht Vorteile erbringt, darf natürlich nicht vergessen werden, dass dies mit einer signifikanten Erhöhung der Anzahl an Basisstationen einhergeht.

7.2.2 Mit Berücksichtigung der Leistungsregelung

7.2.2.1 Einleitung

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, inwieweit die GSM typische Leistungsregelung einen Einfluss auf die Gesamtmission hat und ob die Leistungsregelung die Aussagen zum Zusammenhang Sendeleistung – Gesamtmission, so wie sie in Abschnitt 7.2.1 getroffen wurden, beeinflusst.

7.2.2.2 Funktionsweise der Leistungsregelung

Moderne Mobilfunknetze arbeiten mit einer Leistungsregelung. Im GSM Mobilfunknetz wird beispielsweise ab dem zweiten Sendekanal eine

- von der Anzahl der Teilnehmer abhängende und
- von der Entfernung des Teilnehmers zur Basisstation abhängende

Leistungsregelung verwendet. Ein Ziel der Leistungsregelung ist die Minimierung der Interferenz mit Nachbarzellen. Sie hat aber auch aus immissionsseitiger Sicht Vorteile.

Abb. 7.2 zeigt die einen möglichen Zeitausschnitt eines Basisstationssignals über der Zeit, aufgelöst in den 8 Zeitschlitzen. Bei Kanal 1 wird als Sendeleistung in allen 8 Zeitschlitzen die maximal mögliche Sendeleistung pro Frequenzkanal abgestrahlt, unabhängig davon, ob und wie viel Teilnehmer in diesem Kanal telefonieren und wie weit sie von der Basisstation entfernt sind. Bei Kanal 1 sind die Zeitschlitze 3-8 für mobile Teilnehmer belegbar; die ersten beiden sind für Signalisierungszwecke reserviert.

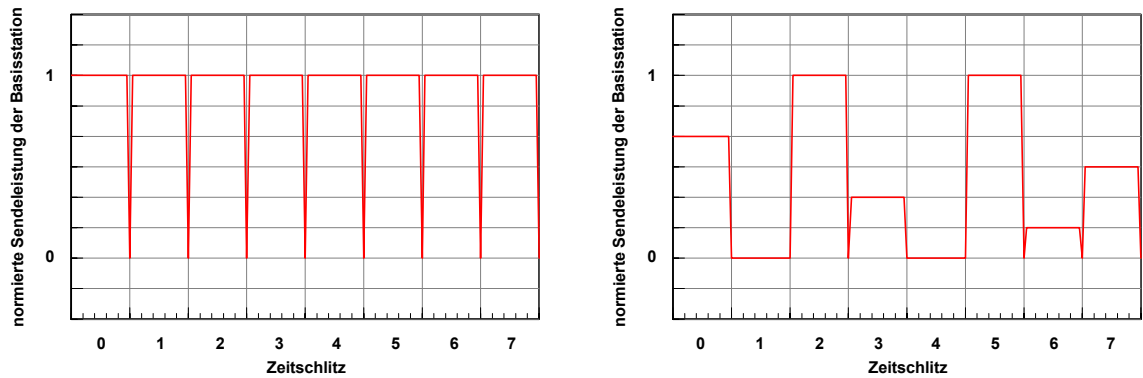


Abb. 7.2 Funktionsweise der GSM Leistungsregelung als Abhängigkeit der normierten Sendeleistung der Basisstation über der Zeitschlitznummer: Kanal 1 (links), Kanal 2 und Folgekanäle (rechts)

Ab Kanal 2 ist das abgestrahlte Sendesignal abhängig von der Zahl der Telefonierenden und ihrem Abstand zur Basisstation. Die Abstandsabhängigkeit ist in der Realität eher eine Abhängigkeit von der Qualität der Funkverbindung, d.h. die Basisstation regelt ihre Sendeleistung derart ein, dass am Handy eine ausreichende Empfangsleistung vorliegt. So kann es in der Praxis vorkommen, dass zu einem nahe der BS befindlichen Teilnehmer, der innerhalb eines Gebäudes telefoniert, eine höhere Sendeleistung im Zeitschlitz zur Verfügung gestellt (z.B. Zeitschlitz 2 oder 5) wird als zu einem Teilnehmer, der sich weiter weg befindet, aber freie Sicht und damit gute Funkverbindung zum Sender hat (z.B. Zeitschlitz 3). In den Zeitschlitz 1 und 4 des zweiten Kanals läuft kein Gespräch, hier wird auch keine Leistung gesendet.

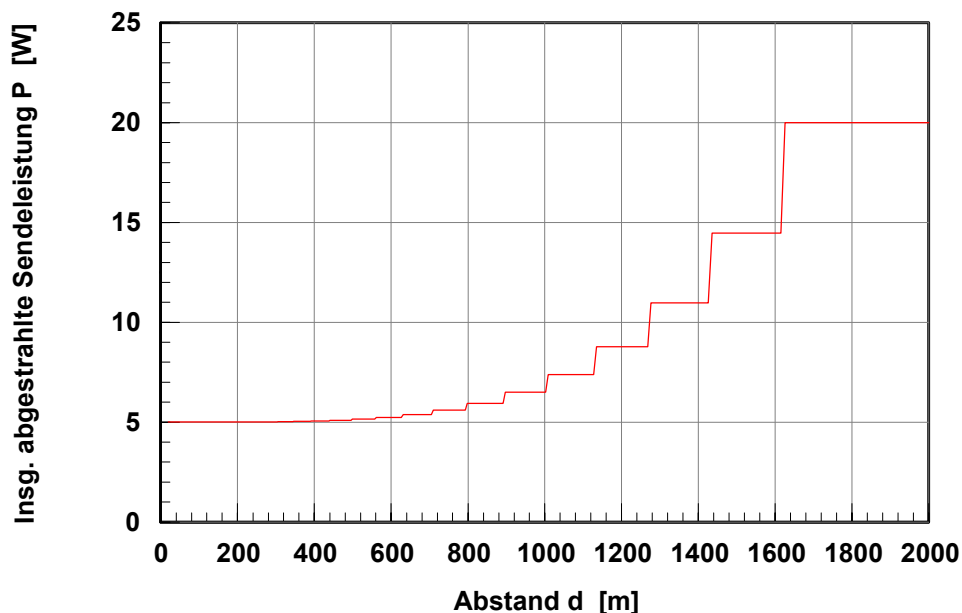


Abb. 7.3 Demonstration der *Entfernungsabhängigkeit* der Leistungsregelung

In Abb. 7.3 ist die *Entfernungsabhängigkeit* der Leistungsregelung demonstriert. Ausgangslage ist, dass 30 Teilnehmer auf insgesamt 4 Kanälen mit je 5 W mobil telefonieren wollen.

Alle Teilnehmer befinden sich auf einem gemeinsamen Radius mit dem lateralen Abstand d von der Basisstation. Die Berechnung erfolgt mit dem COST-WI Modell, Parametersatz 2.

Bis zu einem Abstand von etwa 400 m wird die gesamt abgestrahlte Leistung hauptsächlich durch Kanal 1 bestimmt; die anderen Kanäle liefern wegen der geringen Entfernung der Teilnehmer zur Station kaum einen Beitrag. Mit zunehmender Entfernung erhöht sich die abgestrahlte Leistung; dies erfolgt jedoch nicht kontinuierlich, sondern die Leistung wird in fest eingestellten Stufen sprunghaft erhöht. Dieser Quantisierungseffekt ist gut sichtbar (damit der Quantisierungseffekt nicht durch den Leistungsabfall der Antenne bei Position der Teilnehmer außerhalb der Sektormitte verdeckt wird, wurde hier eine konstante Azimutcharakteristik angenommen). Am Rand der Zelle benötigen alle Teilnehmer die volle Sendeleistung, d.h. alle 4 Kanäle senden mit voller Leistung.

In Abb. 7.4 ist die *Teilnehmerabhängigkeit* der Leistungsregelung demonstriert. Die Ausgangsdaten sind so wie bei der Entfernungsabhängigkeit beschrieben. Jetzt wird jedoch die Zahl der Teilnehmer von 1-30 variiert. Es wird der für die Immission ungünstigste Fall angenommen, und zwar befinden sich die Teilnehmer am Zellrand, fordern also die maximale Leistung der Basisstation an.

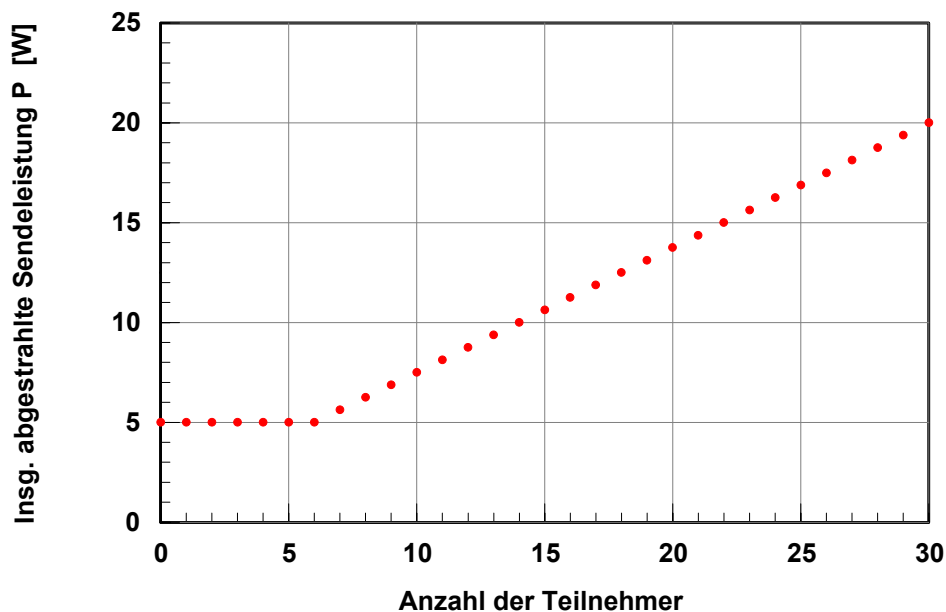


Abb. 7.4 Demonstration der *Teilnehmerabhängigkeit* der Leistungsregelung

Es ist zu sehen dass bei 0-6 Teilnehmer die abgestrahlte Leistung gleich bleibt, da Kanal 1 immer voll abstrahlt, unabhängig von der Anzahl der Teilnehmer. Ab dem zweiten Kanal, d.h. ab dem siebentem Teilnehmer, kommt die teilnehmerabhängige Leistungsregelung zum Tragen. Bei 30 Teilnehmern wird die maximale Sendeleistung der Basisstation 4 Kanäle \times 5 W = 20 W erreicht.

Wie Abb. 7.4 zeigt, hat die Anzahl der Teilnehmer, die gleichzeitig mobil telefonieren wollen, entscheidenden Einfluss auf die tatsächliche Sendeleistung der Basisstation.

In der Realität ist der worst case Fall unrealistisch. Befinden sich die Teilnehmer gleichverteilt in der Zelle, ist die insgesamt abgestrahlte Leistung entsprechend der Entfernungsabhängigkeit von Abb. 7.3 geringer als im worst case Fall.

7.2.2.3 Auswirkungen der Leistungsregelung

Aufgrund der dargestellten Verläufe der Sendeleistung über den Abstand bzw. der Anzahl der Teilnehmer kann geschlussfolgert werden:

In der Praxis liegt die tatsächlich abgestrahlte Sendeleistung im Mittel unterhalb der maximal möglichen Sendeleistung. Die maximal mögliche Sendeleistung wird nur im Extremfall abgestrahlt. Das führt dazu, dass im Realfall auch die tatsächlich vorliegende ortsbezogene Immission und die Gesamtmission nur in Grenzfällen die Werte bei maximaler Anlagenauslastung erreicht, d.h. bei der Auslastung, die bei der regulatorischen Prüfung der Anlage zum Ausstellen der Standortbescheinigung angesetzt wird.

Das bedeutet wiederum, dass im Realfall die in Abschnitt 7.1 getroffene Aussage, dass eine Grenzwertsenkung um den Faktor x nicht zu einer Reduzierung der Gesamtmission um den selben Faktor x führt, noch verstärkt wird, da im zeitlichen Mittel die vorhandene Immission (ortsbezogen und insgesamt) noch weiter von den aktuellen Grenzwerten entfernt ist als bei maximaler Anlagenauslastung.

Die sich daran anschließende Frage ist, ob sich durch die Leistungsregelung Änderungen an den Trends ergeben, die in Abschnitt 6.4 bzw. 7.2.1 für den worst case Fall maximaler Anlagenauslastung herausgearbeitet wurden.

Die Abnahme von Zellradius bzw. Zellfläche und die damit verbundene Erhöhung der Basisstationszahl bleibt bei Reduzierung der Sendeleistung *auch mit Leistungsregelung* in vollem Umfang bestehen, da diese Größen mit dem worst case Ansatz der Versorgung am Zellrand abgeleitet werden müssen. Es ist zu prüfen, ob auch das Verhalten der Veränderung der flächenbezogenen Emission bei Veränderung der Kanalsendeleistung (Abb. 6.6 bzw. 6.10) gleich bleibt. Hierzu wird untersucht, ob die prozentuale Änderung der tatsächlich abgestrahlten Leistung bei Zellverkleinerung gleich der prozentualen Änderung der maximal möglichen Leistung (= Kanalsendeleistung \times Kanalzahl) ist.

Reduzierung der Sendeleistung bei Beibehaltung der Kanalzahl pro Anlage

Unter der Voraussetzung, dass die Zahl der verfügbaren Kanäle in der nun entstehenden kleinen Zelle gleich derjenigen der großen ursprünglichen Zelle ist und unter der Annahme, dass die Aufenthaltsverteilung von Mobilteilnehmern in beiden Zellen die gleiche ist, sind die Verhältnisse der großen Zelle (vor Leistungsreduzierung) direkt auf die der kleinen Zelle übertragbar. Der Einfluss der Leistungsregelung auf die tatsächlich abgestrahlte Leistung wird einfach skaliert: Eine Verringerung der Kanalsendeleistung um 3 dB führt zu einer Verringerung der tatsächlichen Leistung um 3 dB. Die Abhängigkeit der *mittleren* flächenbezogenen Emission (= Gesamtmission) von der maximalen Kanalsendeleistung bleibt unverändert.

Hieran ändert sich nur dann etwas, wenn die Zellen großzügiger dimensioniert wären, als dies aus Gründen der Gewährleistung einer minimalen Leistungsflussdichte am Zellrand erforder-

lich wäre. Dann wäre damit zu rechnen, dass sich eine Reduzierung der Kanalsendeleistung nicht vollständig auf die tatsächlich abgestrahlte Leistung und damit die Gesamtimmission auswirkt, da die verringerte Kanalsendeleistung zumindest teilweise durch ein schnelleres Hochregeln der tatsächlich abgestrahlten Leistung aufgefangen werden würde.

Reduzierung der Sendeleistung bei konstanter Systemkapazität

Es wird der Fall betrachtet, dass sich 30 Teilnehmer *gleichverteilt* in einem Kreissektor mit dem Öffnungswinkel 120° (zur Nachbildung einer Zelle) befinden. Eine Basisstation mit 4 Kanälen, max. 5 W pro Kanal, leuchtet diesen Sektor aus. Es wird das COST-WI Modell mit Parametersatz 2 zur Anwendung gebracht. Betrachtet wird die tatsächlich abgestrahlte Leistung in Abhängigkeit der maximal möglichen Sendeleistung (Abb. 7.5).

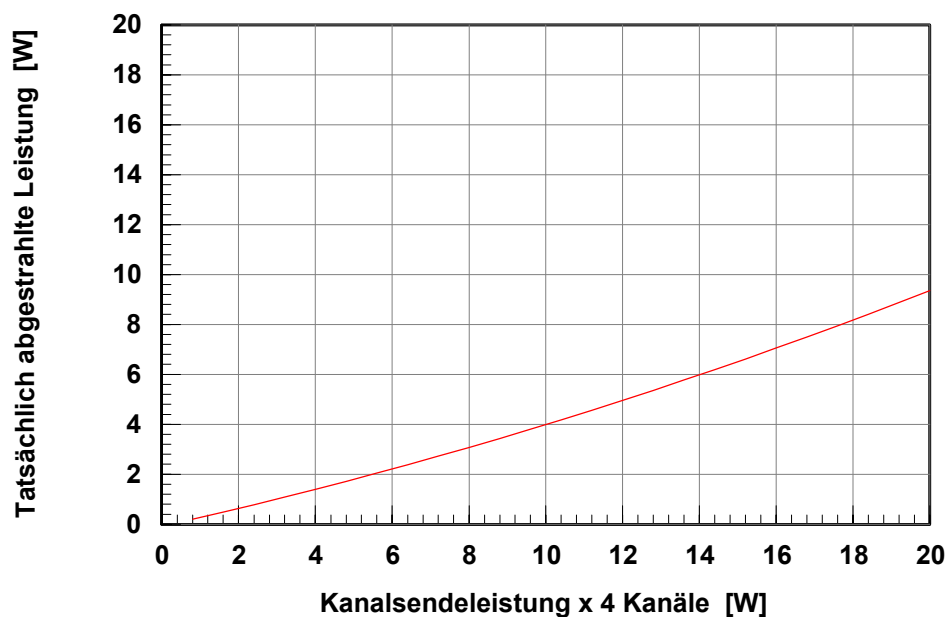


Abb. 7.5 Abhängigkeit der tatsächlich abgestrahlten Leistung von der maximal möglichen Sendeleistung. Gleichverteilung von 30 Teilnehmern (4 Kanäle), Parametersatz 2, Leistungsregelung

Bei einer Kanalsendeleistung von 5 W (= 20 W maximal mögliche Leistung) kommt es durch die Gleichverteilung der Teilnehmer (im Gegensatz zum worst case Ansatz: alle Teilnehmer am Zellrand) nur zu einer im Mittel abgestrahlten Leistung von etwa 9,4 W. Wird die Kanalsendeleistung auf die Hälfte reduziert (2,5 W x 4 Kanäle = 10 W maximal mögliche Leistung) reduziert sich die im Mittel abgestrahlte Leistung um *etwas mehr als die Hälfte* auf 4,0 W. Der in Abb. 7.5 dargestellte Verlauf ist nicht linear; bei höheren Kanalsendeleistungen ist die Kurvensteigung stärker als bei niedrigen. Durch die überproportionale Änderung der tatsächlich abgestrahlten Leistung bei Reduzierung der Kanalsendeleistung wird der Trend der Änderung der flächenbezogenen Immission bei Reduzierung der Leistung weiter verstärkt.

7.3 Gesamtimmission bei Erhöhung der Senderhöhe

Aufgrund der Tatsache, dass die Gesamtimmission proportional zur Gesamtemission ist, können auch hier die in Abschnitt 6.5 ermittelten Ergebnisse für das prinzipielle Verhalten der

Gesamtemission direkt für die Gesamtmission übernommen werden. In der Praxis müssen ab hier wieder die realen Sendeleistungen (d.h. Sendeleistung pro Kanal x Kanalanzahl, drei Antennen pro Basisstation, evtl. Berücksichtigung von mehreren Anlagen an einem Standort) für die Gesamtemission eingesetzt werden, da die Berechnungen in Abschnitt 6.5 lediglich von einem Sendekanal mit 5 W Sendeleistung ausgingen. Da hier jedoch relative Verhältnisse betrachtet werden, ändert das den Trend nicht, und die Ergebnisse aus 6.5 können direkt übernommen werden.

Das bedeutet, dass eine Erhöhung des Basisstationsstandortes zu einer Vergrößerung der Zellen und dementsprechend zu einer Verringerung der notwendigen Zahl der Basisstationen führt. Auch in diesem Fall sinkt die Gesamtemission.

Im Realfall wird die Erhöhung des Sendestandortes jedoch nicht grenzenlos möglich sein, da dadurch die Interferenz mit den benachbarten Zellen ansteigt und bautechnische Probleme zunehmen. Außerdem werden die Antennen dadurch "sichtbarer", was wiederum die Diskussion der Bevölkerung über die Mobilfunkthematik beeinflussen wird.

8 Flächige Darstellung der ortsbezogenen Immission bei Reduzierung von Sendeleistung und Höhenveränderung

Bereits in Kapitel 4 wurde auf die Auswirkungen der Veränderung verschiedener Parameter von Basisstationen auf die ortsbezogene Immission eingegangen mit dem Ziel, deren Größe in Vergleich zu den Schweizer Anlagengrenzwerten zu untersuchen.

In diesem Kapitel sollen beispielhaft einige *flächige* Ergebnisse der Leistungsflussdichte vorgestellt werden, die mit dem ab Kapitel 6 verwendeten *COST-WI Modell* berechnet wurden.

Die Ergebnisse werden jeweils für einen Kreissektor präsentiert, der die von einer Antenne ausgeleuchtete Fläche repräsentiert. Allen Berechnungen liegt Parametersatz 2 zugrunde. Es werden jedoch 4 Kanäle mit je 5 W betrachtet. Die Leistungsregelung ist ausgeschaltet. Es wird

- in Abschnitt 8.1 die Kanalsendeleistung von 5 W über 2,5 W auf 1,25 W reduziert und
- in Abschnitt 8.2 die Höhe der Antenne über dem Boden von 15 m über 17 m auf 19 m verändert.

Die Farbplots sind in $\text{dB(W/m}^2\text{)}$ skaliert. Die eingezeichneten Isolinien kennzeichnen Orte gleicher Leistungsflussdichte. Die Sendeantenne befindet sich bei $x = y = 0$. Entsprechend der Gültigkeit des COST-WI Modells sind die Ergebnisse erst ab einem Abstand von 20 m von der Sendeantenne dargestellt.

Die Abb. 8.1 bis 8.3 zeigen, dass durch Leistungsreduzierung nur die *Größe* der ortsbezogenen Immissionen, aber nicht ihre ortsabhängige Struktur verändert wird.

Die Abb. 8.4 bis 8.6 zeigen, dass durch eine Erhöhung des Sendeantennenstandortes bei gleichbleibender Sendeleistung die Auftrefforte der Nebenzipfel von der Antenne wegrücken und die ortsbezogene Immission an diesen Stellen ansteigt.

8.1 Reduzierung der Kanalsendeleistung

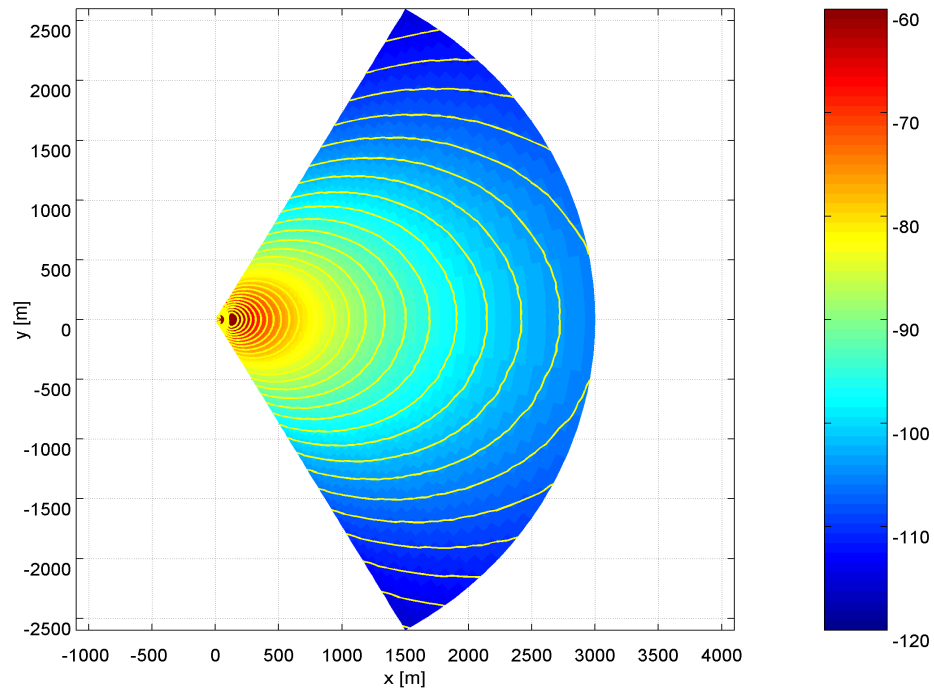


Abb. 8.1a Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Sendeleistung 4 Kanäle x 5 W, Überblicksdarstellung

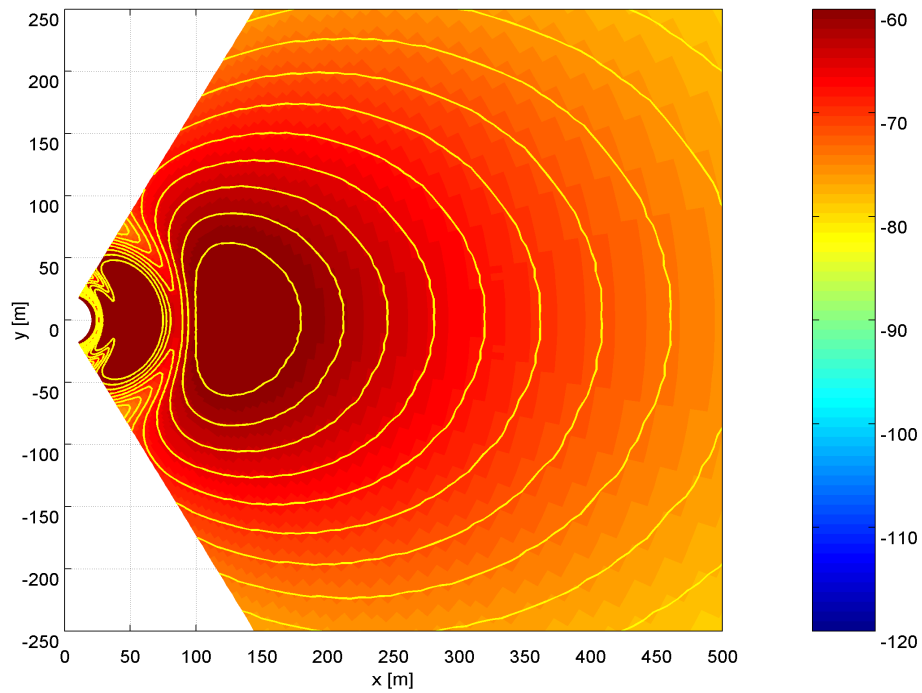


Abb. 8.1b Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Sendeleistung 4 Kanäle x 5 W, Ausschnitt

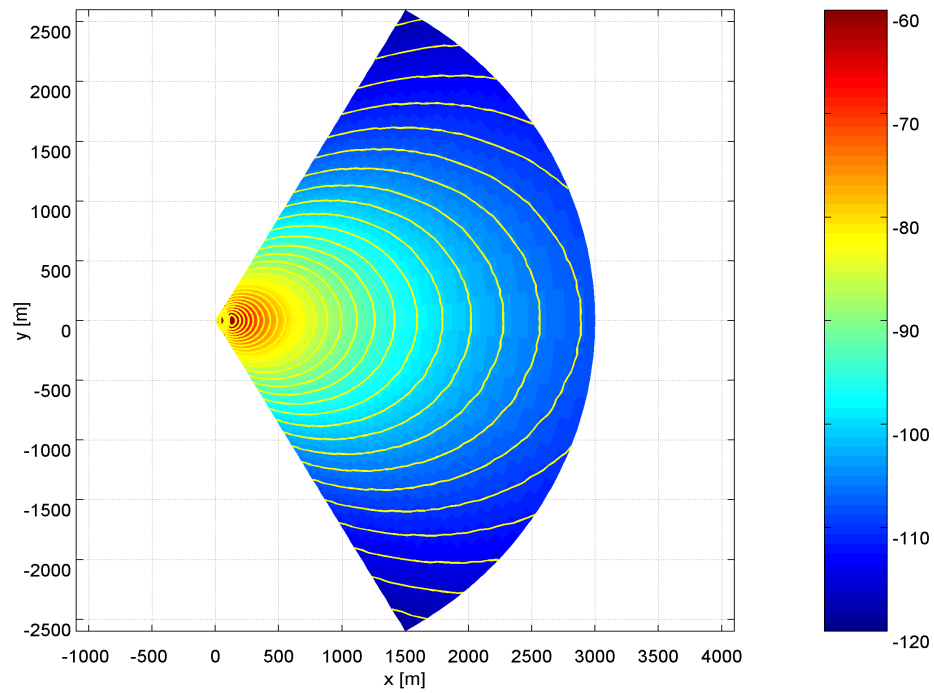


Abb. 8.2a Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Sendeleistung 4 Kanäle x 2,5 W, Überblicksdarstellung

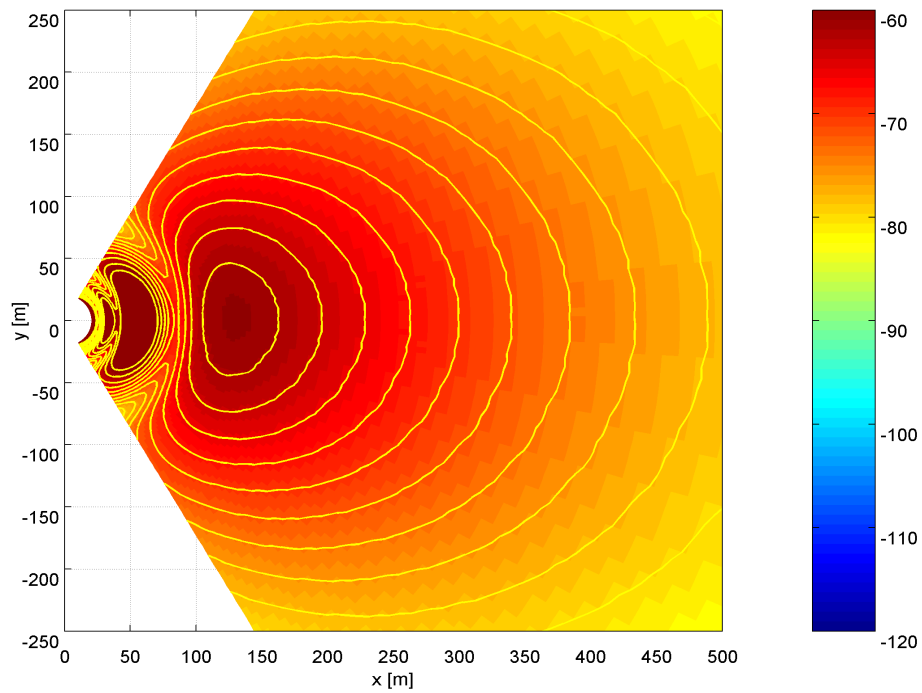


Abb. 8.2b Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Sendeleistung 4 Kanäle x 2,5 W, Ausschnitt

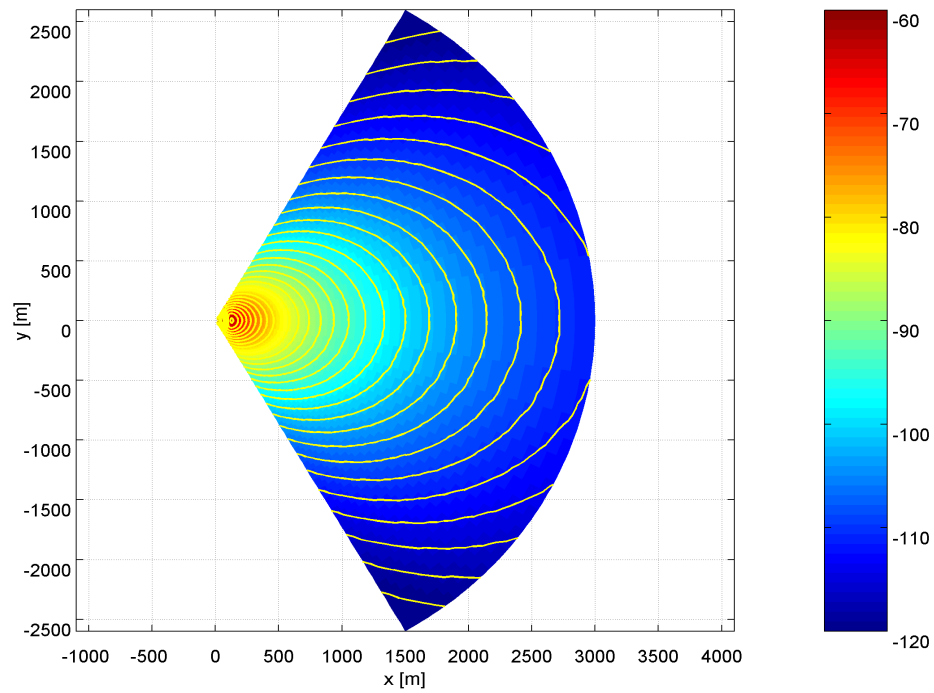


Abb. 8.3a Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Sendeleistung 4 Kanäle x 1,25 W, Überblicksdarstellung

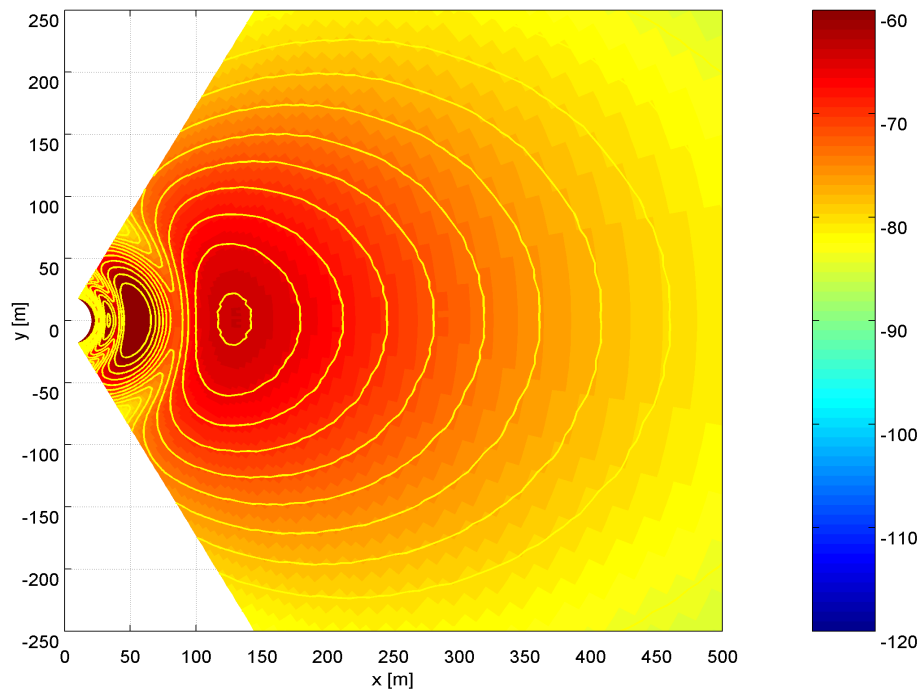


Abb. 8.3b Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Sendeleistung 4 Kanäle x 1,25 W, Ausschnitt

8.2 Erhöhung des Sendeantennenstandortes

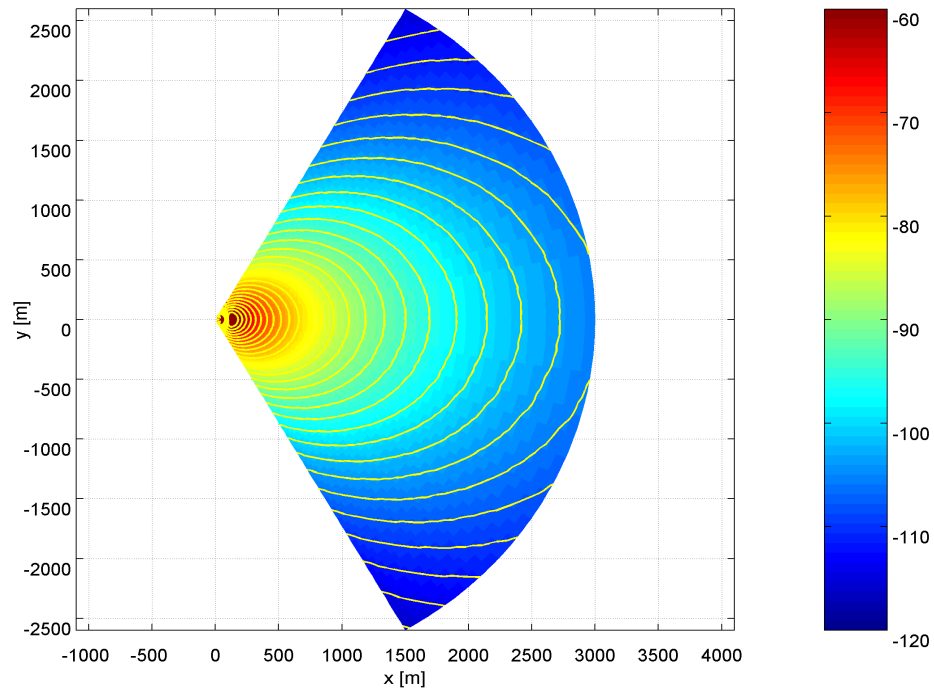


Abb. 8.4a Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Höhe der Sendeantenne 15 m, Sendeleistung 4 Kanäle x 5 W, Überblicksdarstellung

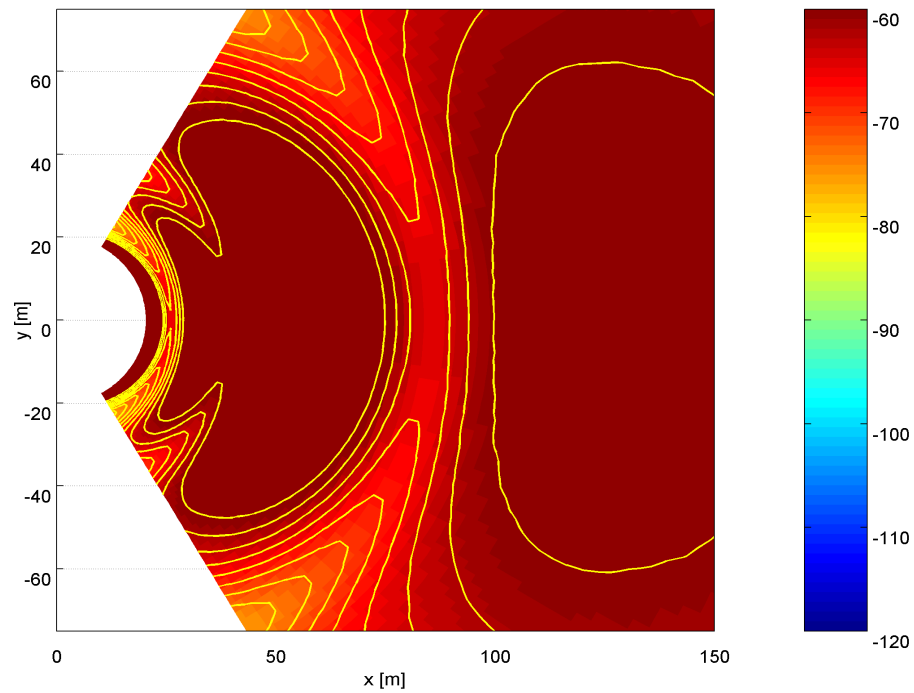


Abb. 8.4b Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Höhe der Sendeantenne 15 m, Sendeleistung 4 Kanäle x 5 W, Ausschnitt

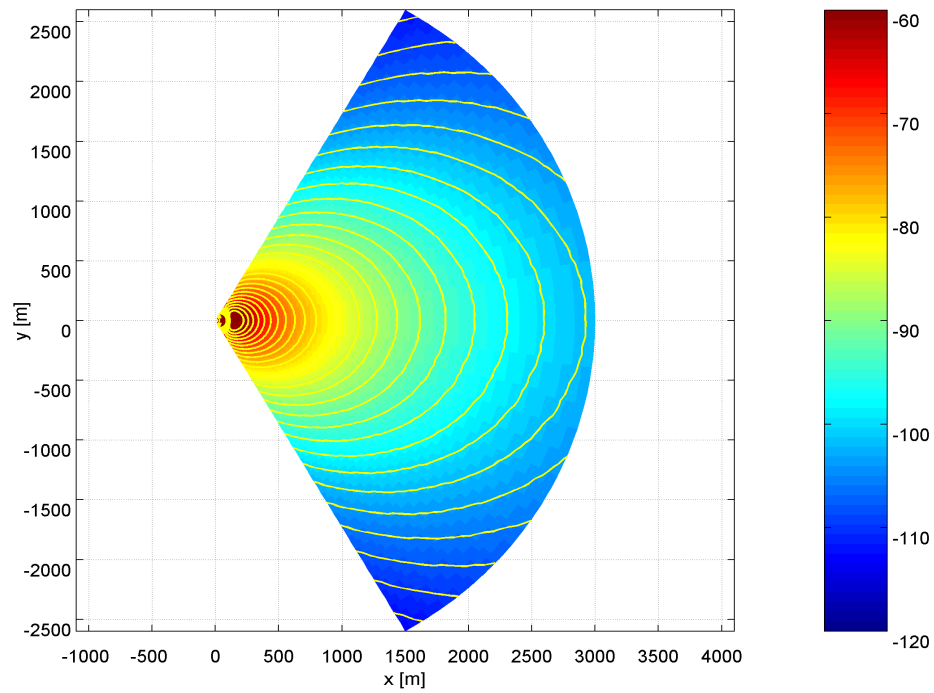


Abb. 8.5a Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Höhe der Sendeantenne 17 m, Sendeleistung 4 Kanäle x 5 W, Überblicksdarstellung

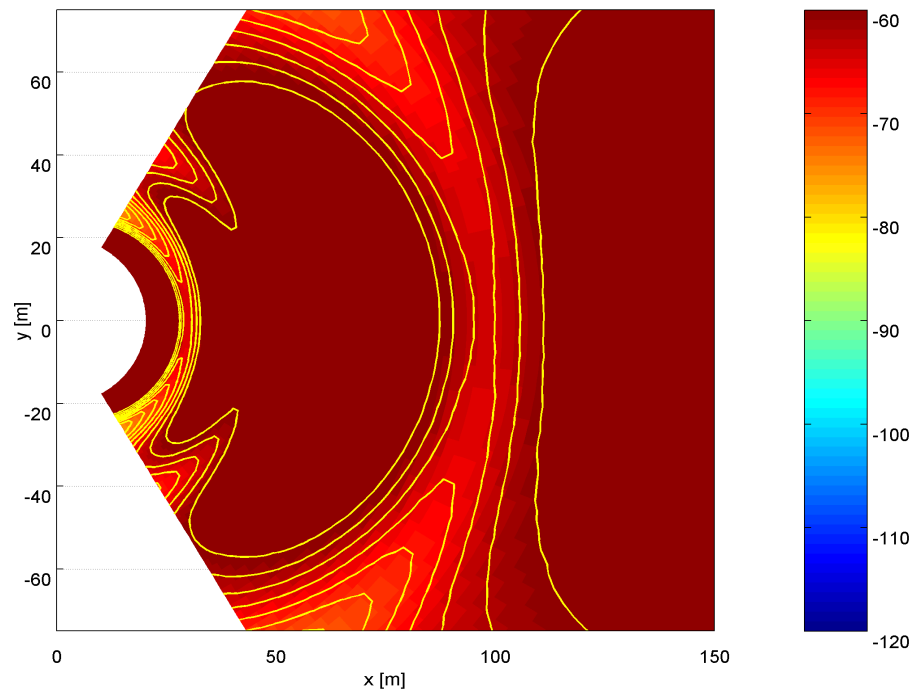


Abb. 8.5b Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Höhe der Sendeantenne 17 m, Sendeleistung 4 Kanäle x 5 W, Ausschnitt

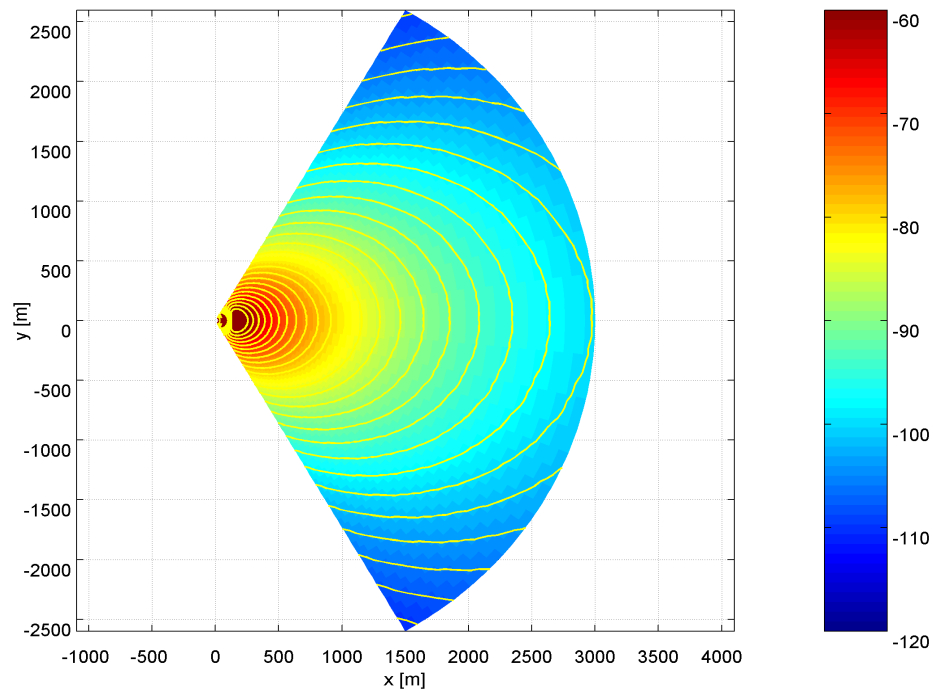


Abb. 8.6a Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Höhe der Sendeantenne 19 m, Sendeleistung 4 Kanäle x 5 W, Überblicksdarstellung

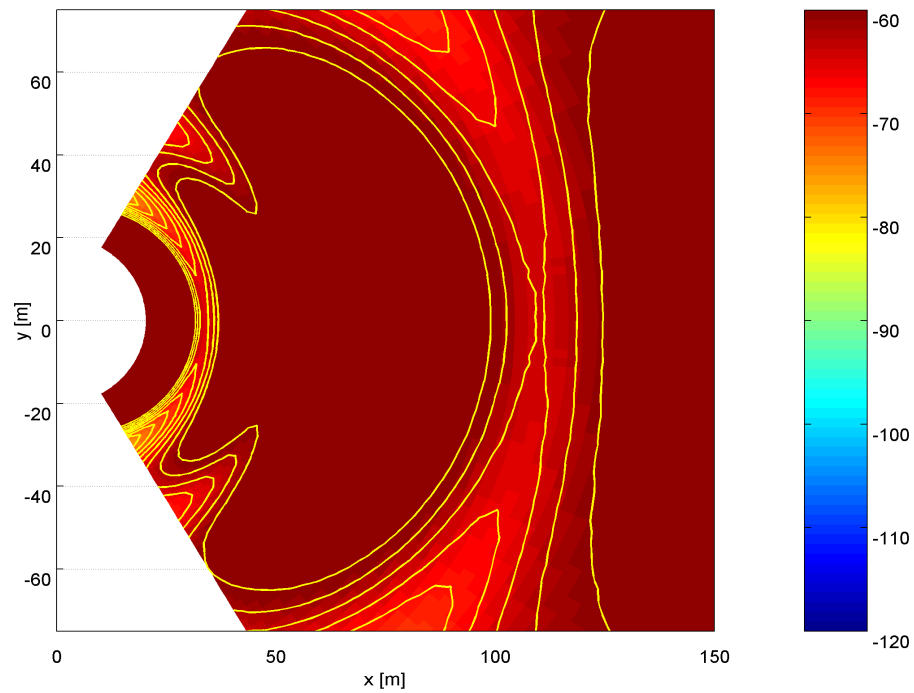


Abb. 8.6b Flächige Darstellung der Leistungsflussdichte auf Berechnungshöhe 1,5 m, Parametersatz 2, Höhe der Sendeantenne 19 m, Sendeleistung 4 Kanäle x 5 W, Ausschnitt

9 Zusammenfassung

1. Die vorliegenden Untersuchungen beziehen sich auf die durch Mobilfunk Basisstationen verursachte elektromagnetische Immission.
2. Viele, jedoch nicht alle Länder haben Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern gesetzlich verankert. Die für Deutschland gesetzlich geltenden Werte der 26. BImSchV bauen, wie in vielen anderen Ländern auch, auf den Empfehlungen von ICNIRP und WHO auf. Im europäischen Raum gibt es jedoch mit der Schweiz und Italien zwei Länder, die ihre Grenzwerte gegenüber ICNIRP und WHO reduziert haben. Hierbei haben besonders die Schweizer Anlagengrenzwerten einen großen Bekanntheitsgrad erreicht. Die Anlagengrenzwerte sind gegenüber den für Deutschland geltenden Bestimmungen um den Faktor 100 bezüglich der Leistungsflussdichte reduziert. Die Schweizer Verordnung stützt sich explizit auf das Vorsorgeprinzip, lässt dabei aber auch technische und wirtschaftliche Aspekte nicht außer Betracht. Es soll untersucht werden, inwieweit eine Grenzwertsenkung für Deutschland nach dem Schweizer Modell die Gesamtimmission beeinflussen würde.
3. Mit einem Freiraum Wellenausbreitungsmodell, wie es auch von der RegTP zur Ausstellung der Standortbescheinigungen Verwendung findet, wird die ortsbezogene Immission in der Umgebung der Basisstation in Sektormitte berechnet. Parameter der Berechnungen sind Sendeleistung, Höhendifferenz zwischen Sender und Empfängerort, Downtilt der Antenne sowie Antennentyp. Bei Annahme realistischer Parameter für derzeit existierende Stationen ergibt sich: An Orten, an denen nach Standortbescheinigung ein Aufenthalt von Personen gestattet ist, liegt die ortsbezogene Immission deutlich *unter den Grenzwerten der 26. BImSchV*. Für bestimmte Parameter können jedoch in der Realität Situationen auftreten, an denen die ortsbezogene Immission *über den Schweizer Anlagengrenzwerten* liegt. Solche Parameterkonfigurationen kann es vorrangig in städtischen Gebieten geben. Das verwendete Freiraum Wellenausbreitungsmodell ist als worst case Abschätzung vor allem im Nahbereich der Antennen, d.h. dort, wo tendenziell die höchsten ortsbezogenen Immissionen auftreten, geeignet.
4. Um an den Orten, wo eine Überschreitung der Schweizer Anlagegrenzwerte vorliegt, die ortsbezogene Immission zu reduzieren, gibt es die folgenden praktikablen Möglichkeiten:
 - Reduzierung der Sendeleistung,
 - Erhöhung des Antennenstandortes.

Durch eine Optimierung der Sendenantennen bezüglich ihrer Richtcharakteristik bestehen ebenfalls Möglichkeiten der Immissionsreduzierung. Auch durch eine Verringerung des Downtilt ließe sich die ortsbezogene Immission begrenzen. Der Downtilt ist jedoch aus technischen Gründen kein frei wählbarer Parameter und soll deswegen von einer weiteren Untersuchung ausgeklammert werden.

5. Die Gesamtimmission, d.h. die von der Gesamtheit der Basisstation in die Umwelt eingestrahelte Leistung, ist zur Gesamtemission, d.h. der Summe der Sendeleistungen der Basisstationen proportional. Da in der Studie nur Verhältnisse bzw. Veränderungen bezogen auf

einen Ausgangszustand diskutiert werden, kann in den weiteren Betrachtungen als Gesamtmission die Gesamtemission angesetzt werden.

6. Eine Grenzwertabsenkung um z.B. 20 dB (Faktor 100 in der Leistung, Schweizer Anlagengrenzwerte) würde sich *nicht* in einer um 20 dB gesenkten Gesamtmission widerspiegeln, sondern die Reduzierung der Gesamtmission fällt wesentlich geringer aus.

Grund für diese Aussage ist der Fakt, dass die ortsbezogenen Immissionen je nach Anlage und Art der angrenzenden Bebauung um einige Zehnerpotenzen unter den gesetzlichen Grenzwerten der 26. BImSchV und nur bei einigen Konfigurationen oberhalb der Schweizer Anlagengrenzwerte liegen. Maßnahmen zur Reduzierung der ortsbezogenen Immission wären wegen des großen Sicherheitsabstandes zu den gesetzlichen Grenzwerten

- nur an den Anlagen, die die Schweizer Grenzwerte überschreiten, und
- dort nur in wesentlich geringerem Umfang als die Absenkung der Grenzwerte

notwendig. Eine Grenzwertsenkung um x dB hätte nur dann vollen Durchgriff auf die Gesamtmission, wenn alle Stationen derzeit die gesetzlichen Grenzwerte ohne Sicherheitsreserve einhalten würden. Dies ist aber nicht der Fall.

7. Eine Reduzierung der Sendeleistung bzw. eine Erhöhung des Antennenstandortes im Sinne der Reduzierung der ortsbezogenen Immission führt zu einer Änderung der Netzstruktur. Die weitere Untersuchung dieser Änderungen werden unter der Annahme durchgeführt, dass sich die Zellgröße durch die Gewährleistung einer minimalen Leistungsflussdichte am Zellrand bestimmt und keine Lücken im Versorgungsgebiet auftreten dürfen. Um diese Änderungen der Netzstruktur korrekt bestimmen zu können, wird ein realistischeres Ausbreitungsmodell, das COST-WI Ausbreitungsmodell, angesetzt. Dies ist speziell für städtisches Gebiet geeignet und berücksichtigt die dort vorliegenden Ausbreitungsverhältnisse wesentlich besser als das Freiraum Ausbreitungsmodell.

7.1 Eine Reduzierung der Sendeleistung wird betrachtet:

Eine Reduzierung der Kanalsendeleistung bei gleichbleibender Kanalzahl pro Anlage führt zu einer Reduzierung des Zellradius und der Zellfläche im Vergleich zum Ausgangszustand. Dies geht mit einer Erhöhung der Anzahl der benötigten Basisstationen einher. Die gesamte Emission, d.h. die Summe der im neuen, dichteren Netz benötigten Sendeleistungen (Netzsendeleistung), und damit auch die Gesamtmission ist *geringer* als im ursprünglichen Netz. Die flächenbezogene Systemkapazität (maximal mögliche Gesprächsverbindungen pro Fläche) steigt, da für die verringerte Zellfläche gleich viele Kanäle zur Verfügung stehen.

Würde bei einem Mobilfunknetz in dem hier betrachteten Kleinstadtszenario die Kanalsendeleistung beispielsweise um 3 dB reduziert, dann sinkt der Zellradius um den Faktor 1,2, d.h. auf etwa 80 % des ursprünglichen Wertes. Dies entspricht einer Verkleinerung der Zellfläche auf etwa 70 % des ursprünglichen Wertes. Um weiterhin eine flächendeckende Mobilfunkversorgung zu gewährleisten, müsste die Anzahl der Basisstationen um ca. 40 % steigen. Dadurch würde die Gesamtemission auf ca. 70 % des ursprünglichen Wertes sinken.

In der Praxis kann die Sendeleistung nicht beliebig reduziert werden, da sonst in Teilbereichen Versorgungslücken entstehen.

Die Reduzierung der Anlagensendeleistung kann auch durch eine *Reduzierung der Kanalzahl pro Anlage* erfolgen. Um hierbei die gleiche flächenbezogene Systemkapazität wie für den Ausgangszustand zu erhalten, muss das Mobilfunknetz ebenfalls dichter geplant werden, d.h. die ausgelagerten Kanäle müssen auf neu zu errichtenden Stationen installiert werden. Durch diese Maßnahme wird der Trend der Reduzierung der Gesamtimmission bei Reduzierung der Kanalsendeleistung noch weiter verstärkt.

Eine Teilung von durch mehrere Netzbetreiber gemeinsam genutzten Standorten als Möglichkeit der Reduzierung der Sendeleistung hat indessen keinen Einfluss auf die Gesamtimmission.

Obschon alle diese Möglichkeiten der Reduzierung der Sendeleistung die ortsbezogene Immission und teilweise auch die Gesamtimmission senken, gehen sie mit einer Erhöhung der Basisstationszahl einher.

7.2 Eine Erhöhung des Antennenstandortes wird betrachtet:

Eine Erhöhung der Basisstationshöhe führt zu einer Vergrößerung der Zellen und dementsprechend zu einer Verringerung der notwendigen Zahl der Basisstationen. Auch in diesem Fall sinkt die Gesamtimmission.

Würde die Senderhöhe in einem typischen Kleinstadtszenario mit etwa 12 m hohen Gebäuden von 3 m (über Gebäudedach) um 2 m erhöht dann steigt der Zellradius um etwa 20 %. Dies entspricht einer Vergrößerung der Zellfläche um etwa 50 %. Die Anzahl der Basisstationen sinkt entsprechend auf etwa 70 % des ursprünglichen Wertes. Dadurch würde die Emission pro Flächeneinheit bzw. die Gesamtimmission auf ca. 70 % des ursprünglichen Wertes sinken.

Im Realfall wird die Erhöhung des Sendestandortes jedoch nicht grenzenlos möglich sein, da dadurch die Interferenz mit den benachbarten Zellen ansteigt und bautechnische Probleme zunehmen.

8. Durch die teilnehmer- und entfernungsabhängige Leistungsregelung wird das Phänomen, dass eine Grenzwertsenkung um den Faktor x nicht zu einer Reduzierung der Gesamtimmission um den selben Faktor x führt, noch verstärkt, da im zeitlichen Mittel die insgesamt abgestrahlte Leistung kleiner ist als die maximal mögliche. Dadurch ist die tatsächlich vorhandene ortsbezogene Immission noch weiter von den aktuellen Grenzwerten entfernt ist als bei maximaler Anlagenauslastung.

Bei Reduzierung der Kanalsendeleistung und Konstanz der Kanalzahl pro Zelle ändert die Leistungsregelung am Trend der Reduzierung der flächenbezogenen Emission nichts. Wird die Kanalzahl so verringert, dass die flächenbezogene Systemkapazität gleich bleibt, verstärkt sich der Trend geringfügig.

Anhang A: COST-Walfisch-Ikegami Wellenausbreitungsmodell

Das COST-Walfisch-Ikegami Modell [COS 99] ist ein semi-empirisches Wellenausbreitungsmodell, das speziell für urbane Umgebung bzw. Makro-Zellen geeignet ist. Die anschließende Beschreibung folgt der Darstellung in [GEN 98].

Um Bebauungsdaten bei der Berechnung der Wellenausbreitung zu berücksichtigen, wurden diverse Modelle entwickelt, die *gemittelte* Werte für *Gebäudehöhe*, *Straßenschluchtbreite* und/oder *Gebäudeabstand* verarbeiten (vgl. [COS 90], [COS 91], [WAL 88]). Damit ist zwar noch keine Modellierung der realen Umgebung möglich, die Ergebnisse sind aber bereits erheblich besser als bei einfachen Modellen, die keinerlei Informationen zur Bebauung verarbeiten können. Viele dieser Modelle basieren auf Untersuchungen von Walfisch u. Bertoni [WAL 88] zur Beugung über Gebäude hinweg. Auf das von Walfisch u. Bertoni beschriebene Ausbreitungsmodell soll hier nicht eingegangen sondern direkt eine der zahlreichen Erweiterungen vorgestellt werden.

Abb. A.1 zeigt die Geometrie, die beim *COST-Walfisch-Ikegami*-Modell verwendet wird (vgl. [COS 90], [COS 91], [IKE 84], [WAL 88]). Die Ausbreitung und die urbane Umgebung werden lediglich durch die folgenden Parameter mit ihren jeweiligen Gültigkeitsgrenzen beschrieben:

Parameter und Gültigkeitsbereich COST-Walfisch- Ikegami-Modell	⇔	Frequenz $f = 800 \dots 2000$ MHz
		Entfernung $d = 20\text{m} \dots 5$ km
		Höhe der Basisstation $\Delta h_{\text{BS}} = 4 \dots 50$ m
		Höhe der Mobilstation $\Delta h_{\text{MS}} = 1 \dots 3$ m
		mittlere Gebäudehöhe Δh (Dachoberkante)
		mittlere Breite der Straßen w
		mittlerer Gebäudeabstand b
		Winkel φ der Straße gegenüber direktem Pfad

Auch das COST-Walfisch-Ikegami-Modell, nachfolgend kurz COST-WI-Modell, ist somit primär empirisch, da es ausschließlich auf diesen statistischen Parametern beruht und nicht wirklich detaillierte Geländehöhen- und/oder Bebauungsdaten berücksichtigt. Sofern Gebäudedaten verfügbar sind, lassen sich aber zumindest die statistischen Parameter Δh , w , b und φ ortsabhängig bestimmen.

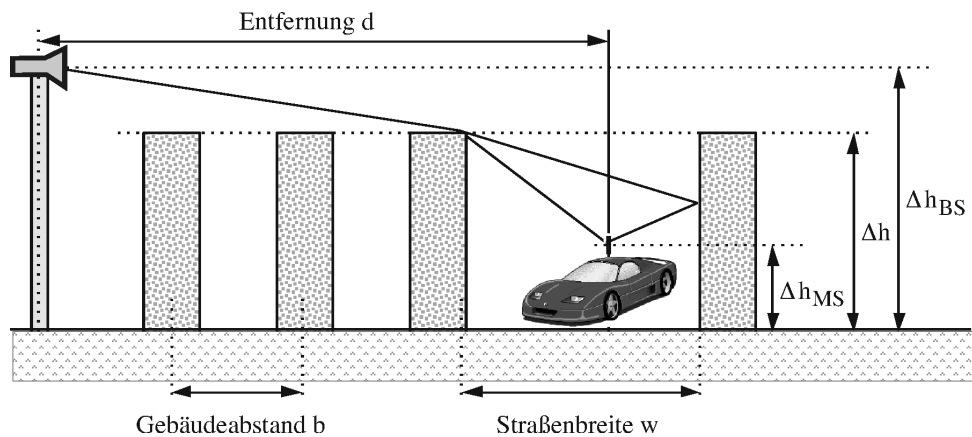


Abb. A.1 Definition der statistischen Beschreibungsgrößen beim COST-Walfisch-Ikegami-Modell; Quelle: [GEN 98]

Das COST-WI-Modell unterscheidet zwischen dem Fall, dass zwischen BS und MS eine Sichtverbindung besteht (LOS: *Line-of-sight*) und dem Fall, dass die direkte Verbindungslinie durch Hindernisse blockiert wird (NLOS: *Non-line-of-sight*). Für LOS mit BS und MS innerhalb einer Straßenschlucht (*Street canyon*) wird die sehr einfache empirische Gleichung

$$\frac{D_{F,LOS}}{dB} = 42.6 + 26 \lg\left(\frac{d}{km}\right) + 20 \lg\left(\frac{f}{MHz}\right) \quad \text{für } d \geq 0.02km = 20m \quad (A.1)$$

verwendet, die auf Messungen innerhalb Stockholms beruht. Die relativ langsame Abnahme mit der Entfernung resultiert aus *Wellenleitereffekten* innerhalb von Straßenschluchten, die durch Mehrfachreflexionen an den begrenzenden Hauswänden beschrieben werden können. Im COST-WI-Modell setzt sich die Funkfeldämpfung für NLOS (keine Sichtverbindung)

$$\frac{D_{F,NLOS}}{dB} = \begin{cases} \frac{D_{F0}}{dB} = 32.4 + 20 \lg\left(\frac{d}{km}\right) + 20 \lg\left(\frac{f}{MHz}\right), & \frac{\Delta D_{F,msd}}{dB} + \frac{\Delta D_{F,rts}}{dB} \leq 0 \\ \frac{D_{F0}}{dB} + \frac{\Delta D_{F,msd}}{dB} + \frac{\Delta D_{F,rts}}{dB}, & \frac{\Delta D_{F,msd}}{dB} + \frac{\Delta D_{F,rts}}{dB} > 0 \end{cases} \quad (A.2)$$

aus der Grundübertragungsdämpfung D_{F0} , einer Zusatzdämpfung $\Delta D_{F,msd}$ für die Beugung über die Gebäude hinweg (*Multiple screen diffraction*) und einer Dämpfung $\Delta D_{F,rts}$ für die Ausbreitung zwischen der letzten beugenden Kante und der MS innerhalb einer Straßenschlucht (*Roof-top-to-street diffraction and scatter loss*) zusammen.

Für die Kopplung der Welle in die Straßenschlucht hinein, in der sich der mobile Teilnehmer befindet, wird die empirische Näherung

$$\frac{\Delta D_{F,rts}}{dB} = -16.9 - 10 \lg\left(\frac{w}{m}\right) + 10 \lg\left(\frac{f}{MHz}\right) + 20 \lg\left(\frac{\Delta h - \Delta h_{MS}}{m}\right) + \begin{cases} -10 + 0.354 \cdot \varphi^\circ & \text{falls } 0 \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075 \cdot (\varphi^\circ - 35) & \text{falls } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114 \cdot (\varphi^\circ - 55) & \text{falls } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (A.3)$$

verwendet, welche auf der mittleren Straßenbreite w und der Orientierung ϕ der Straße gegenüber der Ausbreitungsrichtung basiert. Der Winkel ϕ ergibt sich dabei aus der Projektion des Ausbreitungspfades auf eine horizontale Ebene.

Bei der detaillierten Behandlung der Beugung an mehreren Halbebenen ergibt sich analog zur Beugung an einer Halbebene ein Integral, für welches Walfisch u. Bertoni [WAL 88] eine Näherungslösung für BS-Antennen oberhalb des mittleren Dachniveaus fanden. Im COST-WI-Modell wird diese Näherung durch eine empirische Korrektur auch auf BS unterhalb des mittleren Gebäudeniveaus erweitert, wobei die Basisstationshöhe stets größer als 4m bleiben muss. Für die zugehörige Zusatzdämpfung $\Delta D_{F,msd}$ gilt:

$$\frac{\Delta D_{F,msd}}{dB} = \frac{\Delta D_{F,msd,1}}{dB} + \frac{\Delta D_{F,msd,2}}{dB} + k_d \lg\left(\frac{d}{km}\right) + k_f \lg\left(\frac{f}{MHz}\right) - 9 \lg\left(\frac{b}{m}\right) \quad (A.4a)$$

$$\frac{\Delta D_{F,msd,1}}{dB} = \begin{cases} -18 \lg\left(1 + \frac{\Delta h_{BS} - \Delta h}{m}\right) & , \Delta h_{BS} > \Delta h \\ 0 & , \Delta h_{BS} \leq \Delta h \end{cases} \quad (A.4b)$$

$$\frac{\Delta D_{F,msd,2}}{dB} = \begin{cases} 54 & , \Delta h_{BS} > \Delta h \\ 54 - 0.8 \frac{\Delta h_{BS} - \Delta h}{m} & , d \geq 0.5km \text{ und } \Delta h_{BS} \leq \Delta h \\ 54 - 0.8 \frac{\Delta h_{BS} - \Delta h}{m} \frac{d}{0.5km} & , d < 0.5km \text{ und } \Delta h_{BS} \leq \Delta h \end{cases} \quad (A.4c)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & , \Delta h_{BS} > \Delta h \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_{BS} - \Delta h}{\Delta h} & , \Delta h_{BS} \leq \Delta h \end{cases} \quad (A.4d)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925MHz} - 1\right) & , \text{mittelgroße Stadt / suburbanes Zentrum} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925MHz} - 1\right) & , \text{Großstadtzentrum} \end{cases} \quad (A.4e)$$

Der Summand $\Delta D_{F,msd,2}$ beschreibt die Dämpfungszunahme für BS-Antennen unterhalb des mittleren Gebäudeniveaus.

Obwohl das COST-WI-Modell gemäß dem oben angegebenen Gültigkeitsbereich auch für Basisstationen unterhalb des mittleren Dachniveaus definiert wurde, sind die Fehler für BS-Antennenhöhen $\Delta h_{BS} \approx \Delta h$ und $\Delta h_{BS} \ll \Delta h$ häufig recht groß, d.h. das Modell ist für Mikro-Zellen nicht immer zu gebrauchen. Wegen der Annahme einer mittleren Gebäudehöhe, eines mittleren Gebäudeabstandes und einer mittleren Straßenschluchtbreite ergeben sich insbesondere auch dann Probleme, falls die Art der Bebauung *nicht homogen* ist. Dies ist im Falle historisch gewachsener Städte oft der Fall. Außerdem ist dieses Modell für *ebenes Gelände* definiert, so dass für Städte in hügeligem Gelände eine Anwendung vielfach, d.h. auch für $\Delta h_{BS} \gg \Delta h$, nicht ratsam erscheint.

Abb. A.2 zeigt die Entfernungsabhängigkeit der Funkfelddämpfung nach dem COST-Walfisch-Ikegami-Modell im Vergleich zur Freiraumausbreitung und zur Einhüllenden der

Zweistrahtheorie. Gewählt wurden die in der Bildunterschrift angegebenen Parameter und die Frequenzen $f=915$ MHz (z.B. GSM) und $f=1800$ MHz (z.B. DCS1800). Die Steigung des COST-WI-Modells liegt zwischen jener für die Freiraumausbreitung ($\sim d^2$) und derjenigen für die Zweistrahtheorie ($\sim d^4$) jenseits des Breakpunkts. Für das hier gewählte Beispiel wird eine Entfernungsabhängigkeit proportional zu $d^{3.8}$ verwendet. Die Funkfelddämpfung bei 1800 MHz ist im Mittel um ca. 10 dB höher als bei 915 MHz.

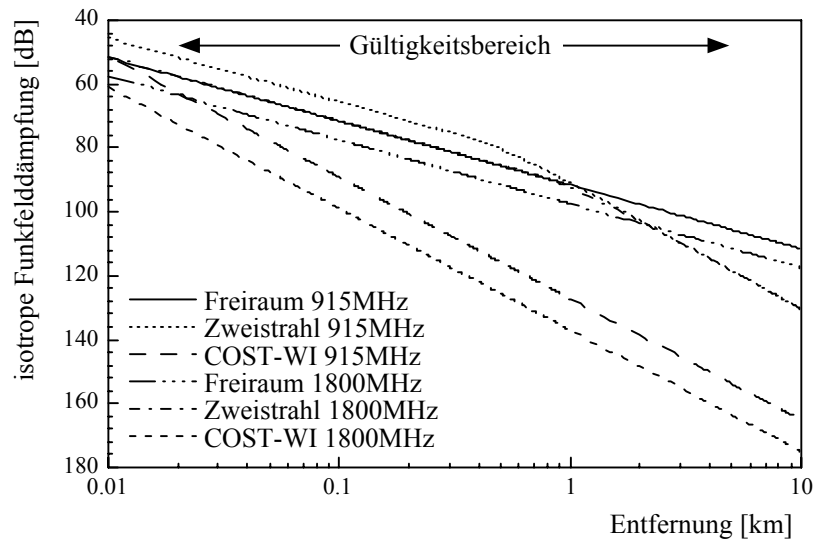


Abb. A.3 Funkfelddämpfung nach COST-WI-Modell im Vergleich zur Freiraumausbreitung und zur Zweistrahtheorie (für kleine Entfernungen Einhüllende) für $\Delta h_{BS}=20$ m, $\Delta h=15$ m, $\Delta h_{MS}=1.5$ m, $w=20$ m, $b=45$ m und $\varphi=90^\circ$ (suburbanes Gelände, NLOS: Non-line-of-sight); Quelle: [GEN 98]

Anhang B: Flächenbezogene Emission als Funktion der Basisstationsleistung

Problem:

Ein Gebiet soll so versorgt werden, dass in jedem Punkt die Mindestleistungsflussdichte S_{\min} erreicht wird. Dazu werden Basisstationen der festen Sendeleistung P gleichmäßig verteilt.

Ausbreitungsmodell:

Für die von einer Basisstation erzeugte Leistungsflussdichte als Funktion des lateralen Abstandes d gilt:

$$S(d) \sim Pd^{-\alpha} . \quad (\text{B.1})$$

Flächenbezogene Emission:

Die durch eine Basisstation der Leistung P mit S_{\min} versorgte Fläche $A(P)$ ist

$$A(P) \sim d^2 \sim \left(\frac{P}{S_{\min}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} . \quad (\text{B.2})$$

Daraus ergibt sich die flächenbezogene Emission

$$P_A = \frac{P}{A(P)} \sim S_{\min}^{\frac{2}{\alpha}} P^{1-\frac{2}{\alpha}} \sim P^{1-\frac{2}{\alpha}} . \quad (\text{B.3})$$

Die folgenden Fälle sind zu unterscheiden:

$$\begin{aligned} \alpha < 2 : & \quad P_A \text{ fällt mit wachsendem } P \\ \alpha = 2 : & \quad P_A \text{ ist konstant} \\ \alpha > 2 : & \quad P_A \text{ wächst mit wachsendem } P \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

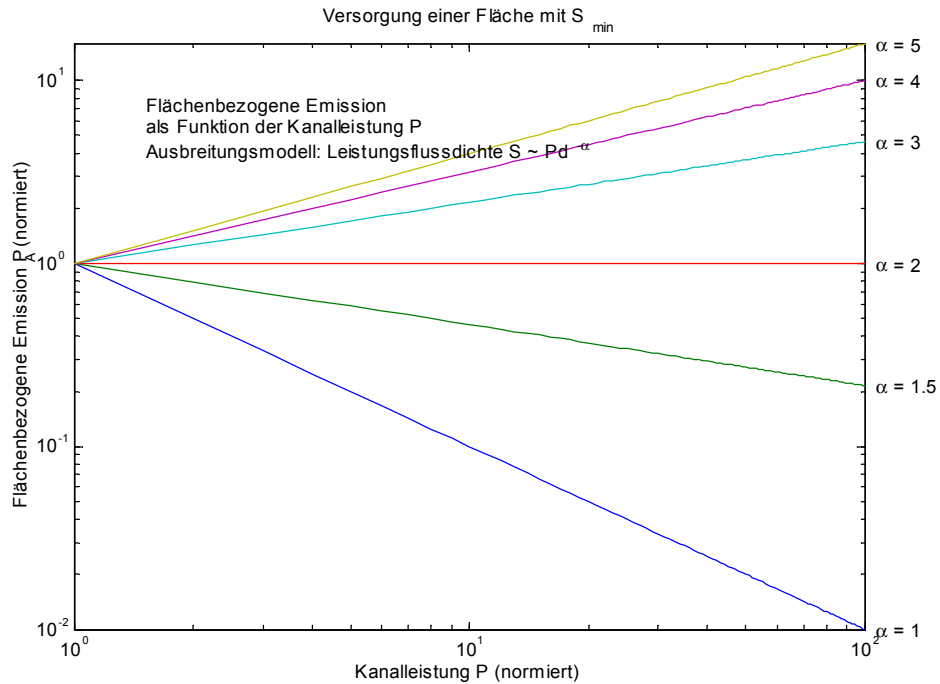


Abb. B.1 Flächenbezogene Emission als Funktion der Kanalleistung P

Für das in Kapitel 6 verwendete COST-WI Modell liegt der Dämpfungsfaktor α etwa bei 3,9 (Steigung der Kurve in Abb. 6.6). Freiraumausbreitung ohne Bodenreflexion ergibt ein α von 2, mit Bodenreflexion (Zweistrahlmmodell) von 4. Dämpfungsfaktoren unter 2 können vereinzelt durch Wellenleitereffekte, so z.B. in Straßenschluchten, auftreten.

Die Basisstationsdichte (Anzahl Basisstationen pro Flächeneinheit) beträgt

$$N_A = \frac{1}{A(P)} \sim \left(\frac{S_{\min}}{P} \right)^{\frac{2}{\alpha}}. \quad (\text{B.5})$$

Unter der Annahme, dass pro Basisstation die Kapazität V verfügbar ist, ergibt sich die von P abhängige flächenbezogene Systemkapazität

$$V_A(P) = V N_A \sim \left(\frac{S_{\min}}{P} \right)^{\frac{2}{\alpha}}. \quad (\text{B.6})$$

Wird eine konstante flächenbezogene Systemkapazität V_0 gefordert, ergibt sich die erforderliche Kapazität V der Basisstation in Abhängigkeit von der Sendeleistung P zu

$$V(P) \sim A(P) \sim \left(\frac{P}{S_{\min}} \right)^{\frac{2}{\alpha}}. \quad (\text{B.7})$$

Die Systemkapazität werde nun durch Verwendung von M Kanälen (pro Basisstation) der festen Kapazität V und Sendeleistung P realisiert (In GSM jedoch: erster Kanal $V = 6$ Erl, alle

weiteren $V = 8$ Erl). Für die erforderliche Anzahl Kanäle $M(P)$ für eine konstante flächenbezogene Systemkapazität folgt dementsprechend

$$M(P) \sim A(P) \sim \left(\frac{P}{S_{\min}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} . \quad (\text{B.8})$$

Damit gilt für die flächenbezogene Emission bei konstanter flächenbezogener Systemkapazität

$$P_A^{V=\text{const}}(P) = \frac{M(P)P}{A(P)} \sim P . \quad (\text{B.9})$$

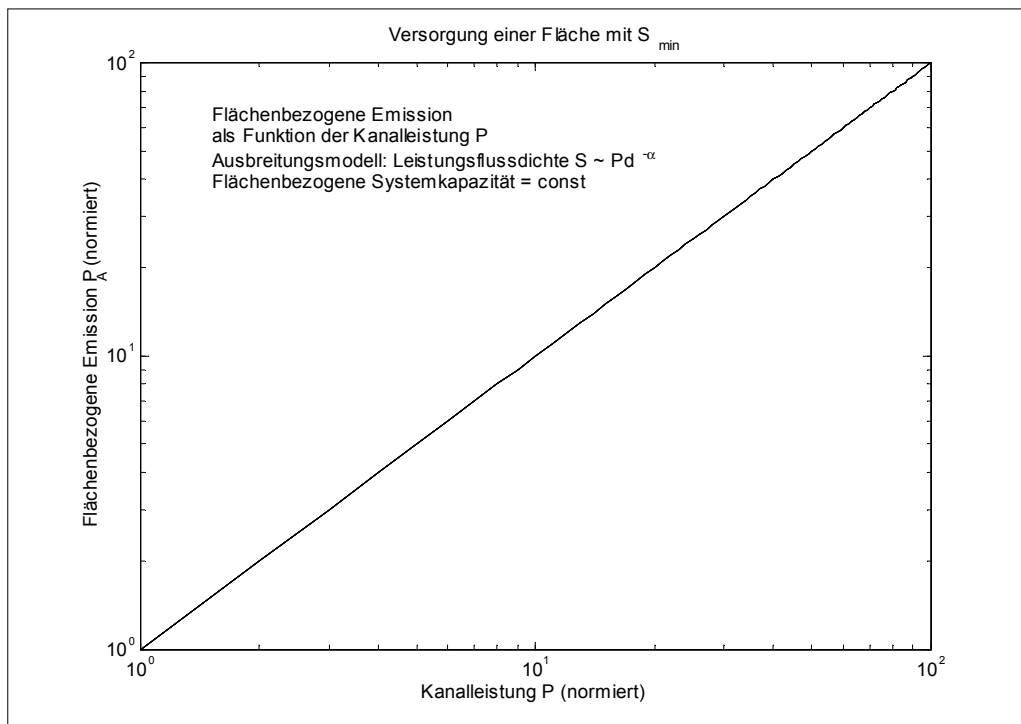


Abb. B.2 Flächenbezogene Emission als Funktion der Kanalleistung P bei konstanter flächenbezogener Systemkapazität

Die Leistung pro Kanal, welche für eine vorgegebene Anzahl Kanäle erforderlich ist, ergibt sich zu

$$P(M) \sim S_{\min} M^{\frac{2}{\alpha}} . \quad (\text{B.10})$$

Daraus folgt die flächenbezogene Emission bei konstanter flächenbezogener Systemkapazität als Funktion der Anzahl Kanäle

$$P_A^{V=\text{const}}(M) = \frac{MP(M)}{A(P(M))} \sim \frac{MS_{\min} M^{-\frac{2}{\alpha}}}{\left(\frac{P}{S_{\min}}\right)^{\frac{2}{\alpha}}} \sim \frac{MS_{\min} M^{-\frac{2}{\alpha}}}{\left(\frac{S_{\min} M^{-\frac{2}{\alpha}}}{S_{\min}}\right)^{\frac{2}{\alpha}}} \sim S_{\min} M^{1-\frac{2}{\alpha}} \quad (\text{B.11})$$

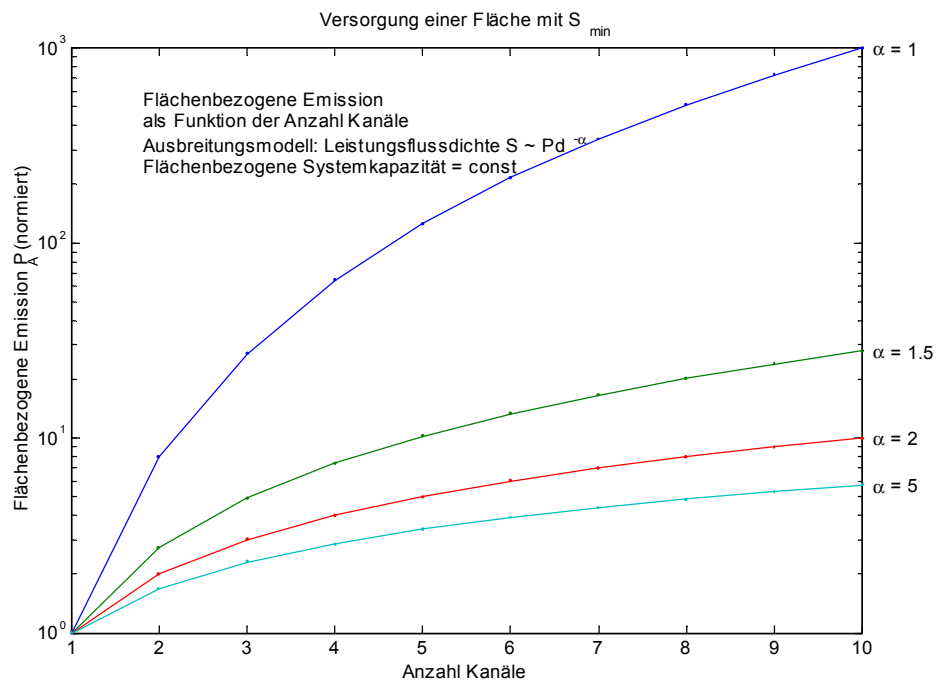


Abb. B.3 Flächenbezogene Emission als Funktion der Anzahl der Kanäle bei konstanter flächenbezogener Systemkapazität

Literaturverzeichnis

- [26. BImSchV] **26. BImSchV**, *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*, BGBl. Jg. 1996 Teil I Nr. 66, 20.12.1996.
- [BFS 01] **Bundesamt für Strahlenschutz**, *Strahlenthema: Mobilfunk und Sendetürme*, November 2001.
- [COS 90] **COST-231**, *Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900- and 1800-MHz Bands (Revision 2)*, COST-231 TD (90) 119, (1990).
- [COS 91] **COST-231**, *Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900- and 1800-MHz Bands*, COST-231 TD (91) 73, (1991).
- [COS 99] **COST-231**, *Digital mobile radio towards future generation systems*, Final report, (1999).
- [EU 99] **1999/519/EG**, *Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz)*. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 199/59-70, 30.07.1999.
- [FCC 97] **FCC Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology**, *Evaluating compliance with FCC guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields*. OET Bulletin 65, August 1997.
- [GEN 98] **N. Geng, W. Wiesbeck**, *Planungsmethoden für die Mobilkommunikation*, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998.
- [ICNIRP] **ICNIRP**, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*. Health Physics, Vol. **74**, No. 4, S. 494-552 (April 1998).
- [MUT 01] **P. M. Wiedmann et al**, *Risikopotenziale elektromagnetischer Felder: Bewertungsansätze und Vorsorgeoptionen*, Forschungszentrum Jülich GmbH, Programmgruppe Mensch, Umwelt, Technik (Mai 2001).
- [NISV] **NISV**, *Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung*, Schweizerischer Bundesrat, 23. Dezember 1999.
- [NISV B] **NISV**, *Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung, Erläuternder Bericht*, BUWAL, 23. Dezember 1999.
- [SCHÜ 01] **T. M. Schüller**, *Stellungnahme auf den gemeinsamen Fragenkatalog zur öffentlichen Anhörung "Mobilfunk"*, Deutscher Bundestag, Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 02.07.2001.
- [WAL 88] **J. Walfisch, H. Bertoni**, *A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. **36**, S. 1788-1796, (1988).
- [WIE 01] **M. Baldauf, A. Herschlein und W. Wiesbeck**, *Schutzabstände in der Mobilkommunikation*, Frequenz, vol. 55, No. 11-12, S. 310-316 (2001).

Abkürzungsverzeichnis

BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BS	Basisstation
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (engl.) → Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung
COST-WI	Cost-Walfisch-Ikegami Wellenausbreitungsmodell
ERP	Effective Radiated Power (engl.) → Äquivalente Strahlungsleistung, bezogen auf den Halbwellendipol
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power (engl.) → Äquivalente isotrope Strahlungsleistung
LOS	Line of Sight (engl.) → Sichtverbindung
MS	Mobilstation
NISV	Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (Schweiz)
NLOS	Non Line of Sight (engl.) → keine Sichtverbindung
IRPA	International Radiation Protection Association (engl.) → Internationaler Strahlenschutzverband
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (engl.) → Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post
SSK	Strahlenschutzkommission

Verzeichnis häufig verwendeter Symbole

b	mittlere Straßenbreite
d	lateraler Abstand
f	Frequenz
h_S	Senderhöhe
h_E	Empfängerhöhe
l	Länge
r	Abstand
w	mittlerer Gebäudeabstand
A	Fläche
A_w	Antennenwirkfläche
D_F	Funkfelddämpfung
E	Elektrische Feldstärke
G	Gewinn
H	Magnetische Feldstärke
L	Länge
M	Anzahl der Kanäle einer Basisstation
N_A	Basisstationsdichte
P	Leistung
P_A	Flächenbezogene Emission
S	Leistungsflussdichte
V	Kapazität
V_A	Flächenbezogene Systemkapazität
Z_A	Eingangsimpedanz einer Antenne
Δh	Antennenhöhe über Grund
φ	Winkel gegenüber dem direkten Pfad
$\lambda_{(0)}$	(Freiraum-) Wellenlänge