

II. Verfahren zur Expositionsabschätzung

**Bearbeitungszeitraum
15. Januar 2005 – 31. Juli 2005**

II.1 Einleitung

Das folgende Kapitel bezieht sich auf Arbeitspaket 2 des Forschungsvorhabens. Gegenstand ist die Definition und die Realisierung eines *Berechnungs- und Messverfahrens zur Expositionsabschätzung*.

Hierfür wird in einem ersten Schritt auf geeignete kommerziell verfügbare Software zurückgegriffen. Es wird jedoch später gezeigt, dass speziell diese Software einen zu hohen Detaillierungsgrad für die detailgetreue Erfassung von Hindernissen im Ausbreitungsweg (Häuser, Bäume usw.) aufweist (siehe hierzu auch [BOR 05]). In wie weit eine Vernachlässigung dieser Detailtreue Grenzen bezüglich des Einsatzes für vorliegende Aufgabenstellung hat wird überprüft.

Es wird ferner ein möglichst einfaches Ausbreitungsmodell entwickelt und auf seine Anwendbarkeit hin untersucht. Das Ausbreitungsmodell soll in der Lage sein, sowohl die maximal möglichen Expositionen in der Nähe der Sendeanlagen wie auch die mittlere Exposition über größere Bereiche (z.B. Versorgungsgebiet eines Senders) zu beschreiben.

Darüber hinaus wird auch ein *Messverfahren zur Expositionsabschätzung* entwickelt und auf seine Anwendbarkeit hin untersucht. Dies betrifft sowohl ein Messverfahren für DAB und DVB-T, sowie auch für die analogen Entsprechungen UKW und Analogfernsehen.

In aktuell vorliegenden Messvorschriften, Normen und Normenentwürfen fehlen teilweise exakte Angaben über die wesentlichen Messgeräteeinstellungen bei frequenzselektiven Messungen oder aber die vorgeschlagenen Parameter werden den komplexen Signalstrukturen der analogen und digitalen Rundfunksignale nicht völlig gerecht. Daher werden für das vorliegende Projekt geeignete Messverfahren und Geräteeinstellungen für die Erfassung von analogen und digitalen Fernseh- und Tonrundfunksignalen erarbeitet. Insbesondere muss geklärt werden, ob die alternativen Messverfahren (Channel-Power-Messung, Messung mit geringer Auflösebandbreite und anschließender Hochrechnung) vergleichbare Ergebnisse liefern wie spektrale Messungen mit korrekter Auflösebandbreite. Von Interesse ist auch die Frage, ob nicht doch eine Erfassung der rauschähnlichen Digitalsignale mit dem Peak-Detektor möglich ist, was dann der Fall wäre, wenn man einen geeigneten Korrekturfaktor zwischen Peak-Messwert und RMS-Wert angeben könnte (siehe auch Kapitel I).

Bei DAB bzw. DVB-T liegen aufgrund der Neuartigkeit dieser Technik noch wenig Erfahrungen bezüglich einer Immissionserfassung der Bevölkerungsexposition vor. Es wird gezeigt, dass ausgehend von der Signalstruktur besondere Anforderungen an Messtechnik (z.B. Bandbreite, Detektor, Messzeiten) und Messverfahren zu stellen sind.

Beim analogen UKW bzw. Analogfernsehen gibt es aufgrund der bisher geringen Nachfrage an entsprechenden Immissionsmessungen nur wenig ausgereifte Messverfahren. Es wird hier geprüft, ob diese Messverfahren anwendbar sind, oder ob ein entsprechend angepasstes Verfahren entwickelt werden muss.

II.2 Berechnungsverfahren zur Expositionsbestimmung bei analogen und digitalen terrestrischen Rundfunksignalen

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Definition und der Realisierung eines Berechnungsverfahrens zur Expositionsabschätzung. Dieses soll das *gesamte Versorgungsgebiet* eines Senders beschreiben können. Darüber hinaus soll es in der Lage sein, sowohl die *maximal möglichen Expositionen* in der Nähe der Sendeanlagen wie auch die *mittlere Exposition* über größere Bereiche zu beschreiben. Es sollen gleichermaßen die Expositionen von analogem UKW-Rundfunk, DAB, analogem und digitalem Fernsehen in vergleichbaren Entfernungsszenarien zu erfassen sein, da in einem folgenden Arbeitsschritt ein Vergleich zwischen analogem und digitalen Sendernetzen bezüglich ihrer Exposition durchgeführt wird.

Generell lassen sich Berechnungsmethoden in analytisch und empirisch bzw. semi-empirisch aufteilen. Aus dem Bereich der analytischen Verfahren haben die Untersuchungen und Erfahrungen aus dem Kapitel I und [BOR 05] gezeigt, dass eine feldtheoretische Modellierung des gesamten Versorgungsgebietes eines Rundfunksenders nicht realistisch ist. Bei den empirischen bzw. semi-empirischen Verfahren ist darauf zu achten, dass sie den gesamten hier zu untersuchenden Frequenzbereich (87,5 MHz bis 1500 MHz) abdecken.

Im Folgenden werden daher zwei Berechnungsmethoden im Hinblick auf die oben beschriebenen Anforderungen näher untersucht. Zum einen werden aus dem Bereich der analytischen Methoden die strahlenoptischen Verfahren betrachtet. Diese sind zwar in erster Linie als Punkt zu Punkt Berechnungsmethoden zu verstehen, werden aber auf ihre Anwendbarkeit für die hier zu untersuchende Thematik untersucht. Eine Berechnung des Feldstärkeverlaufes in einem großen Gebiet wie zum Beispiel in dem gesamten Versorgungsgebiet eines Fernsehsenders wird aufgrund der hohen Anzahl von hierfür benötigten Empfangspunkten eine großen Rechenaufwand nach sich ziehen. Darüber hinaus muss bezüglich einer Modellierung untersucht werden, in wie weit Gebäude bei der Berechnung berücksichtigt werden können.

Dem gegenüber wird ein einfaches auf einer Empfehlung der ITU basierendes semi-empirisches Verfahren entwickelt. Dieses stellt eine Berechnungsmethode dar, die als Ausgangspunkt die Sendeantenne hat und eine Feldstärkeprognose sowohl punktuell als auch für eine Fläche liefert. Diese Berechnungsart bietet den Vorteil, dass sie nur wenige Eingabeparameter und geringe Rechenleistung benötigt.

II.2.1 Strahlenoptische Programme

Aus dem Bereich der strahlenoptischen Programme werden für die hier gestellte Aufgabe kommerziell verfügbare Softwarepakete verwendet. Sie beinhalten oftmals mehrere 10 Mannjahre Entwicklungsarbeit.

Für die hier vorliegende Aufgabenstellung wurden die in folgender Tabelle dargestellten Softwarepakete für die strahlenoptische Berechnungsmethode verwendet.

Programm	Verfahren	Hersteller	Internet
Wireless Insite	strahlenoptisch	Remcom	www.remcom.com
WinProp	strahlenoptisch	AWE-communications	www.awe-communications.com

Tabelle II.2.1: Verwendete kommerziell verfügbare Software

Die Software *Wireless Insite* wurde von der Firma Remcom [WI 04] entwickelt und basiert auf dem strahlenoptischen Wellenausbreitungsmodell. Es ist möglich, eine dreidimensionale Simulationsumgebung zu modellieren. Als Voraussetzungen sind vom Hersteller folgende Parameter angegeben:

- Prozessor: Pentium III 800 MHz (oder vergleichbarer AMD)
- Freier Arbeitsspeicher: Minimum 512 MB
- Grafikkarte: OpenGL Beschleunigung erforderlich
- Freier Festplattenplatz: Minimum 500 MB
- Betriebssystem: Windows 2000 oder XP
- Kosten für eine Einzellizenz: 12.000,- US \$

Die Software *WinProp* wurde von der Firma AWE-Communications [AWE 05] entwickelt. Sie ist modular aufgebaut, so dass der Benutzer das Programm seiner Aufgabenstellung nach entsprechend zusammen setzen kann. Darüber hinaus existieren je nach eingesetztem Modul verschiedene auf das jeweilige Problem optimierte Ausbreitungsmodelle. Als Voraussetzungen sind vom Hersteller folgende Parameter angegeben:

- Prozessor: Intel CPU oder vergleichbar mit min. 1000 MHz
- Freier Arbeitsspeicher: Minimum 256 MB
- Grafikkarte: min. 1024 x 768 Pixel und 65536 Farben
- Freier Festplattenplatz: Minimum 2 GByte
- Betriebssystem: Windows (95/98/ME/NT 4.0/2000/XP)
- Kosten für eine Einzellizenz: stark abhängig von der Anzahl der eingesetzten Module; für die hier zu lösende Aufgabe ca. 6500,- € für eine Jahreslizenz

Die Vorhersagegenauigkeit von strahlenoptischen Verfahren wird in erste Linie durch die Qualität der Eingabedaten bestimmt (vgl. [BOR 02]). Daher werden in den folgenden Abschnitten die für eine Simulation benötigten Eingabedaten näher auf die hier betrachtete Aufgabenstellung hin untersucht.

II.2.1.1 Eingabeparameter

Die erforderlichen Eingabeparameter für die obigen Softwarepakete lassen sich grob in die drei Bereiche Geodaten, Gebäudedaten und anlagenbezogene Parameter aufteilen. Diese werden in diesem Abschnitt im Hinblick auf Verfügbarkeit und Anwendbarkeit in der hier vorliegenden Aufgabenstellung untersucht.

II.2.1.1.1 Geodaten

Wie oben bereits beschrieben, wird in dieser Studie nicht nur die unmittelbare Umgebung (vgl. z.B. [BOR 05]) eines Senders, sondern das gesamte Versorgungsgebiet betrachtet. Die DVB-T Startregion Nürnberg mit den Senderstandorten Nürnberg und Dillberg weist beispielsweise eine Fläche von ca. 13.000 km² auf. Es liegt auf der Hand, dass die Geländeoberfläche in diesem großen Areal einen deutlichen Einfluss auf die Feldstärkeverteilung haben wird. Daher muss diese in den Simulationen berücksichtigt werden.

Es existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Modellen und entsprechenden Datenformaten für die Darstellung von Geländeverläufen. In der folgenden Liste ist eine kleine Auswahl zu sehen.

- USGS¹ Digital Elevation Model (USGS DEM)
- USGS Spatial Data Transfer Standard (SDTS DEM)
- USGS Global 30 Arc Second Elevation Data Set (GTOPO30 DEM)
- NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)
- Digitales Geländemodell (DGM)

In der hier vorliegenden Aufgabenstellung ist es wichtig, dass das verfügbare Datenformat insofern umgewandelt bzw. bearbeitet werden kann, um es einfach mit den jeweiligen Softwarepaketen importieren zu können. Hierzu gibt es eine Reihe von frei verfügbaren Programmen. Für diese Studie werden folgende Programme für die Konvertierung und Bearbeitung der digitalen Elevationsdaten verwendet:

- 3DEM (Visualization Software LLC) [3DEM]

Die Software ist frei verfügbar und es lassen sich Geländedaten verschiedener Datenformate (siehe Bild II.2.1) bearbeiten und in ein GeoTiff, USGS ASCII DEM bzw. eine Matrix konvertieren. Es können zum Beispiel einzelne Bereiche separiert und als neue Datei abgespeichert werden. Auf diese Weise kann nur die zu betrachtende Region in die jeweiligen Programme importiert und somit Speicherbedarf reduziert werden.

¹ USGS: U.S. Geological Survey (engl.) → Geologische Überwachungsbehörde der USA

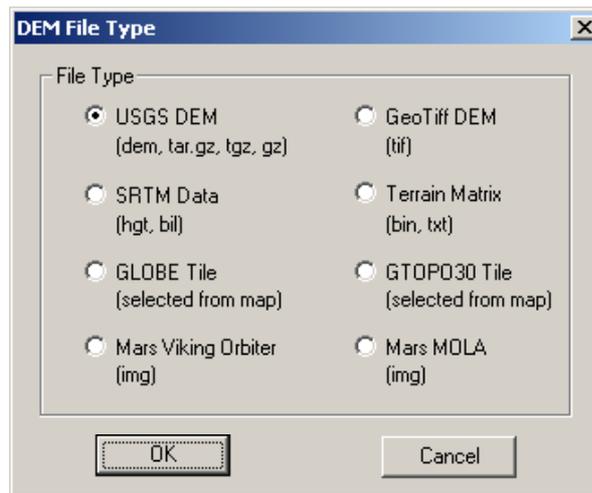


Bild II.2.1: Datenformate, die mit [3DEM] bearbeitet werden können

- VTBuilder [VTP]

Auch das Programm VTBuilder ist kostenlos verfügbar. Verschiedene Datenformate können eingelesen, bearbeitet und konvertiert werden. Darüber ist es auch möglich mehrere Geländedatendateien (sogenannte „Kacheln“) zusammenzufügen.

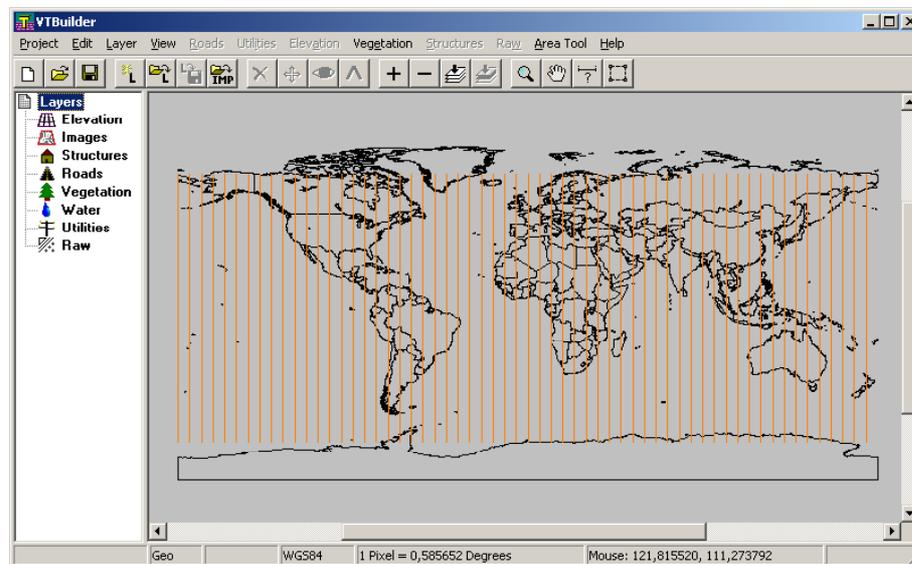


Bild II.2.2: VT-Builder [VTP]

Wie oben bereits beschrieben, gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Datenformaten. Im Folgenden werden mehrere digitale Geländemodelle in Bezug auf Kosten, Verfügbarkeit und Einsatz in den jeweiligen Softwarepaketen untersucht.

Da ein rechentechnischer Vergleich mit Messungen im anschließenden Arbeitspaket an den DVB-T Startregionen Nürnberg und München durchgeführt wird, beschäftigen sich die folgenden Betrachtungen speziell mit digitalen Elevationsdaten für die Region Bayern.

II.2.1.1.1.1 Landesvermessungsamt Bayern

Das Landesvermessungsamt Bayern stellt auf der Internetseite (siehe [BAY]) unter anderem Höhendaten in Form des digitalen Geländemodells (kurz: DGM) in verschiedenen Formaten gebührenpflichtig zur Verfügung.

Das DGM 25 entstand im Zeitraum 1985 bis 1992 für die *gesamte Landesfläche Bayerns*. Es beschreibt Bayern als eine dreidimensionale "Gitter-Landschaft" aus 30 Millionen Punkten. Aus diesen Punkten steht ein Gitter mit 50, 100 bzw. 200 m Kantenlänge zur Verfügung.

Das digitale Geländemodell DGM 5 besteht aus einem engmaschigeren Gitter und eignet sich für Anwendungen, die eine höhere Genauigkeit erfordern. Das DGM 5 beschreibt Bayern als eine dreidimensionale "Gitter-Landschaft", bestehend aus 700 Millionen Punkten und 10 m Kantenlänge. Das DGM 5 gibt es nur für kleinere, unzusammenhängende Teile der Landesfläche.

Seit 1996 wird als grundlegendes Aufnahmeverfahren für die Herstellung der digitalen Geländemodelle das Laserscanningverfahren eingesetzt. Das moderne Laserscanningverfahren liefert eine hohe Punktdichte und genaue Geländehöhen. Vom Flugzeug aus werden pro Sekunde mehrere tausend Lichtblitze zur Erde gesendet, reflektiert und im Flugzeug wieder empfangen. Aus der Zeitdifferenz zwischen gesendetem und empfangenem Signal wird die Entfernung berechnet. Die Daten werden von einem speziellen Programm ausgewertet. Das Ergebnis ist ein digitales Geländemodell, aus dem z.B. Höhenlinien abgeleitet werden können. In Bild II.2.3 ist eine Übersicht über die verfügbaren Geländemodelle und den damit verbundenen Kosten dargestellt.

Produkt	Rabattstapel	Einheit	Einzelplatzlizenz (in EUR)
1.8.2 DGM 5 / 5m-Gitter (für Teilgebiete verfügbar)	1. - 5000. km ²	km ²	30,00
10m-Gitter (für Teilgebiete verfügbar)	1. - 5000. km ²	km ²	20,00
10m-Gitter aus digitalisierten Höhenlinien	1. - 5000. km ²	km ²	15,00
1.8.3 DGM 25			
25m-Gitter (im Aufbau, für Teilgebiete verfügbar)	1. - 5000. km ²	km ²	10,00
	5001. - 25000. km ²	km ²	50% von 10,00
50m-Gitter	1. - 5000. km ²	km ²	3,00
	5001. - 25000. km ²	km ²	50% von 3,00
	25001. - 50000. km ²	km ²	20% von 3,00
	ab dem 50001. km ²	km ²	10% von 3,00
Landesweite Abgabe			66.000
100m-Gitter	1. - 5000. km ²	km ²	1,50
	5001. - 25000. km ²	km ²	50% von 1,50
	25001. - 50000. km ²	km ²	20% von 1,50
	ab dem 50001. km ²	km ²	10% von 1,50
Landesweite Abgabe			33.000
200m-Gitter	1. - 5000. km ²	km ²	0,05
	5001. - 25000. km ²	km ²	50% von 0,05
	25001. - 50000. km ²	km ²	20% von 0,05
	ab dem 50001. km ²	km ²	10% von 0,05
Landesweite Abgabe			1.100
Mindestentgelt pro Bestellung			40,00

Bild II.2.3: Preisliste für digitale Geländedaten, Landesvermessungsamt Bayern

Die Fläche des Untersuchungsgebiets in Nürnberg und Umgebung beläuft sich auf ca. 13.000 km² und die der Startregion München/Südbayern auf ca. 17.000 km². Die Gesamtfläche würde im DGM 25 Format (100m-Gitter) 24.000 € kosten.

II.2.1.1.1.2 Global Topographic Data

Die Global TOPOgraphic Data [G30] – kurz GTOPO30 - sind im Gegensatz zu den digitalen Geländedaten vom bayerischen Landesvermessungsamt *frei verfügbar* und stellen ein globales digitales Elevationsmodell (DEM) mit einem horizontalen Abstand von 30 Bogensekunden dar. Dies entspricht ca. einem Abstand von 1 Kilometer zwischen zwei Gitterpunkten. Für eine einfachere Verbreitung wurden die Daten in sogenannte Kacheln aufgeteilt (siehe Bild II.2.4).

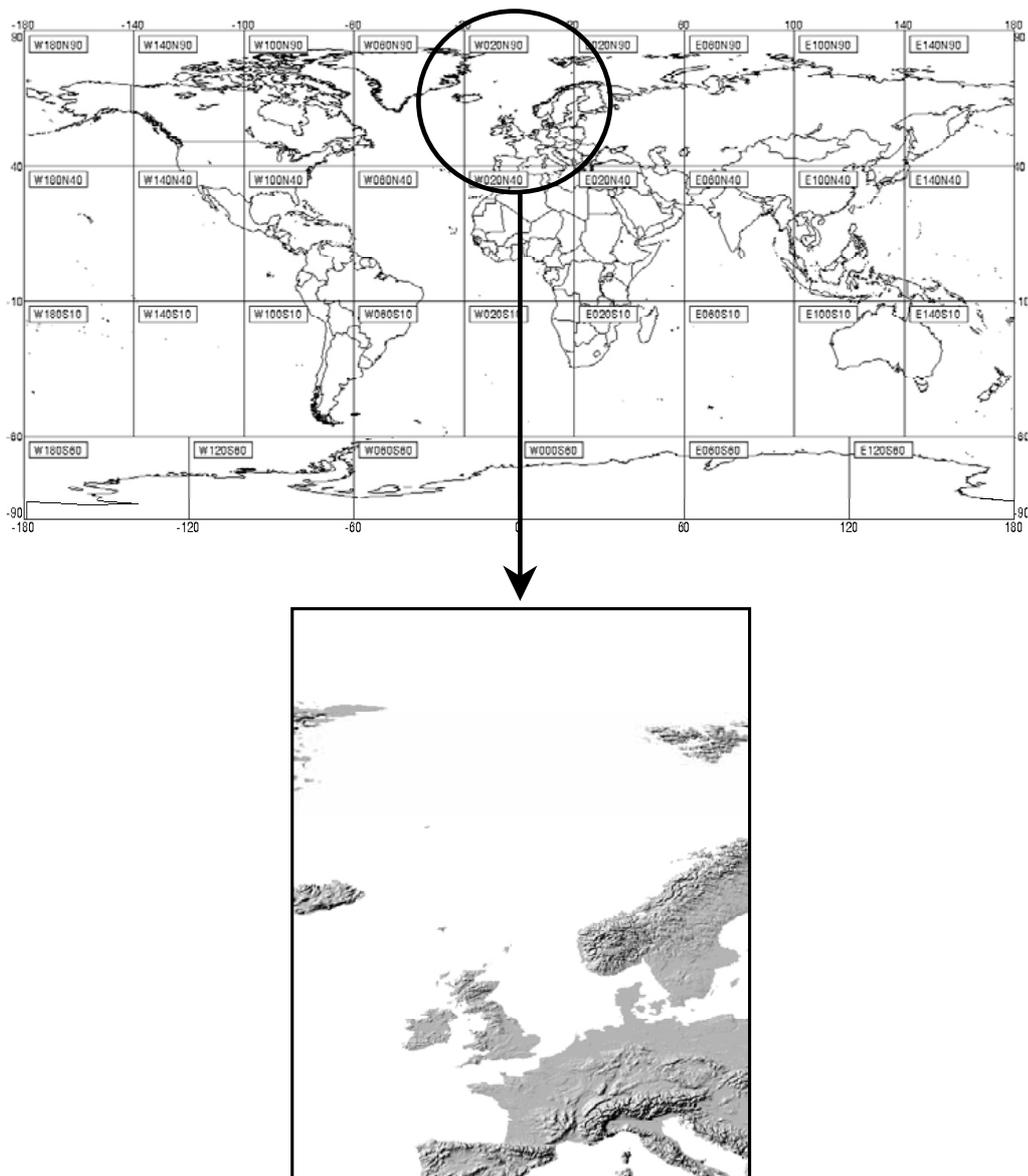


Bild II.2.4: GTOPO30 Kacheln (weltweit und Mitteleuropa) [G30]

Die einzelnen GTOPO30 Kacheln aus Bild II.2.4 können mit dem Programm 3DEM direkt eingelesen und in ein für die strahlenoptischen Programme geeignetes Datenformat umgewandelt werden. Im folgenden Bild ist schon der für diese Studie benötigte geographische Bereich aus der oben dargestellten Kachel mit 3DEM extrahiert.

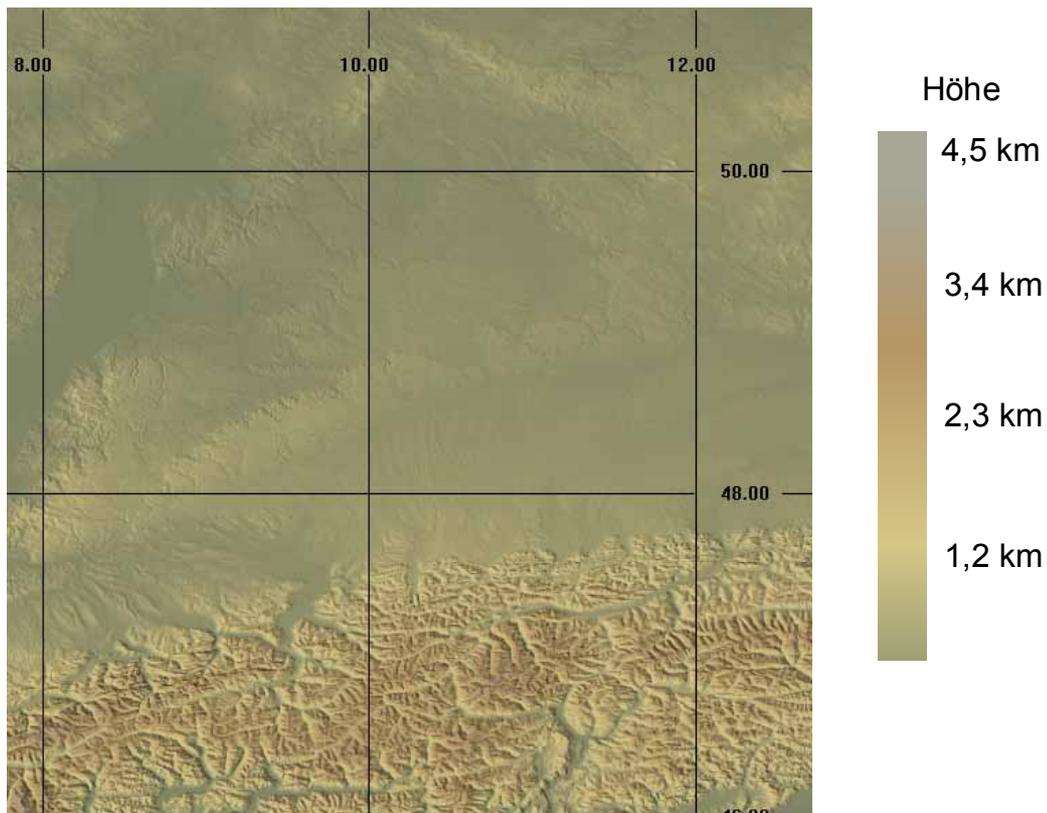


Bild II.2.5: Untersuchungsgebiet: Großraum Bayern

II.2.1.1.1.3 SRTM-90m Höhendaten

Die SRTM Elevationsdaten [SRTM] wurden durch die „Shuttle Radar Topography Mission“ generiert und sind auch frei verfügbar. Sie weisen eine Auflösung von 90 m auf. Die Höheninformation wurde hierbei aus dem vom Spaceshuttle ausgesandten und an der Erdoberfläche rückgestreutem Radarsignal ermittelt. Der Höhendatensatz wurde in geographische Koordinaten transformiert und als sogenannte Kacheln mit einer Seitenlänge von 15'x15' in Länge und Breite (entspricht ca. 28 km x 17,5 km) ausgeliefert. In Bild II.2.6 ist eine dieser Kacheln aus den SRTM-Höhendaten mit dem VTBuilder dargestellt.

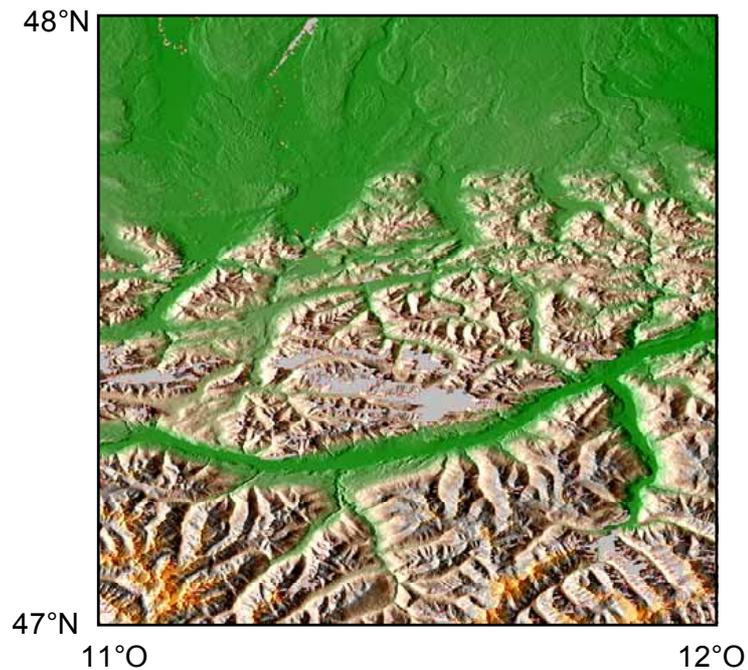


Bild II.2.6: Eine Kachel der SRTM-Daten (Datei: N47E011.hgt)

Die einzelnen Kacheln aus den SRTM-Daten können mittels des frei verfügbaren Programms VTBuilder eingelesen werden. Die grauen Flächen in dem obigen Bild stellen Bereiche dar, die keine Höhendaten enthalten. Diese sogenannten Löcher können mit dem VTBuilder gefüllt bzw. interpoliert werden. Darüber hinaus lassen sich mit dem Programm auch mehrere Kacheln zusammenfügen (vergleiche Bilder II.2.7 – II.2.8)

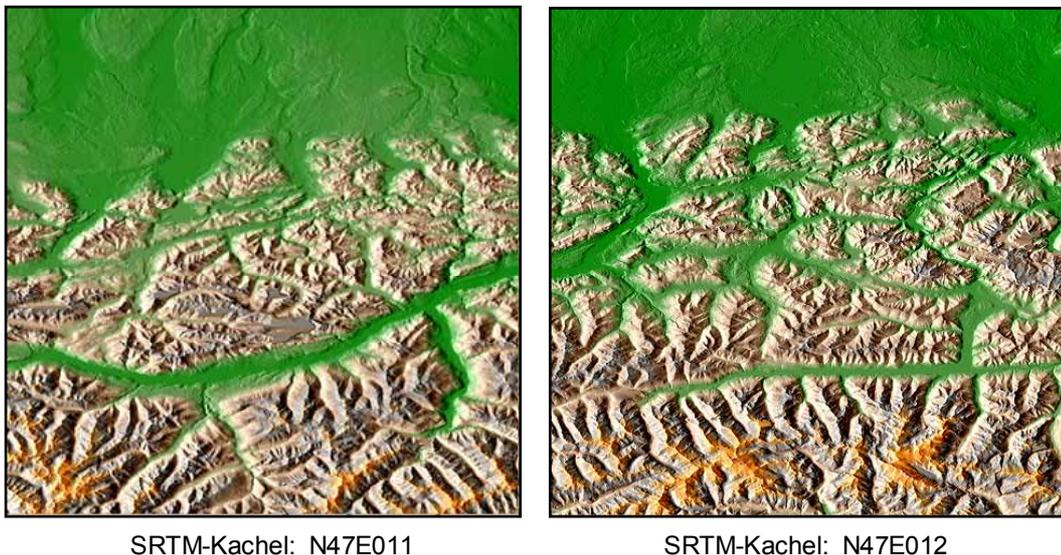


Bild II.2.7: Zwei Einzelkacheln aus den SRTM-Daten

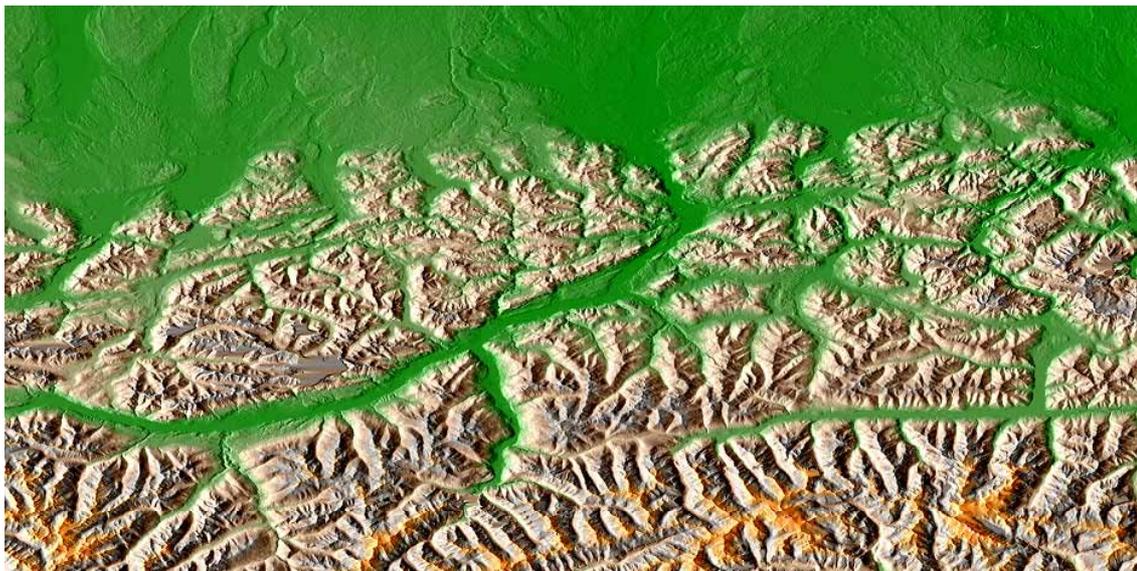


Bild II.2.8: SRTM Kacheln zusammengesetzt mit VTBuilder [VTP]

Die SRTM-Daten sind zu einem frei verfügbar, weisen zum anderen eine ungefähr zehnfach höhere Auflösung als die GTOPO30-Daten auf und werden daher für diese Studie verwendet.

Um nun die SRTM-Daten in das gewünschte USGS DEM ASCII Format, das sowohl mit Wireless Insite als auch mit WinProp importiert werden kann, zu konvertieren ist folgende Vorgehensweise notwendig:

Die mit dem VTBuilder geöffneten bzw. zusammengesetzten Kacheln müssen nach der Auffüllung der oben bereits angesprochenen Löcher im GeoTiff-Format abgespeichert werden. Diese Datei muss anschließend mit 3DEM importiert und von hier letztendlich auf das gewünschte Gebiet reduziert und in das USGS DEM ASCII Format exportiert werden. Dieses kann schließlich mit den beiden strahlenoptischen Programmen geöffnet werden.

II.2.1.1.2 Gebäudedaten

Neben dem Gelände werden natürlich auch Gebäude die Immissionssituation beeinflussen. Grundsätzlich sind die Gebäudegrundrisse zu einem Großteil in den Liegenschaftskatastern der Katasterbehörden der Kreise und kreisfreien Städte enthalten. Darüber hinaus können diese Daten auch aus Satellitenbildern generiert werden. Als grundsätzlicher Nachteil ist hier aber festzuhalten, dass Informationen bezüglich der Höhe der einzelnen Gebäude nicht verfügbar sind. Diese müsste demnach abgeschätzt werden.

Wie oben bereits erwähnt, soll die Immission in dem gesamten Versorgungsgebiet eines Senders berechnet werden können. Für die in dieser Studie betrachteten Regionen entspricht dies einer Gesamtfläche von ca. 30.000 km², in der alle Gebäude einzeln modelliert werden müssten. Um hierbei einen Eindruck der Anzahl zu erhalten, werden im Folgenden zwei Beispiele vorgestellt.

Im Rahmen des COST 231 Projekts wurden im einem Areal von 2,4 km x 3,4 km in München detaillierte Gebäudedaten erstellt (siehe [COST]). Auf dieser ca. 8 km² großen Fläche gibt es

2088 Gebäude mit zusammen 17445 Außenwänden. Legt man diesen Zahlen nun die gesamte Fläche von München zu Grunde würde dies eine gesamte Gebäudezahl von 79344 mit entsprechend 662910 Außenwänden bedeuten, die einzeln modelliert werden müssten.

Als zweites Beispiel sei hier erwähnt, dass in der Katasterdatenbank der Landesvermessungsanstalt für das Bundesland NRW bereits über 3,7 Mio. Gebäude erfasst sind. Im Altstadtgebiet von Köln sind auf einer Fläche von einem Quadratkilometer 1779 Gebäudereferenzen gegeben (<http://www.lverma.nrw.de>).

Diese obigen Beispiele zeigen deutlich, dass die Modellierung aller Gebäude in dem Versorgungsbereich eines Senders äußerst aufwändig und praktisch gesehen nicht möglich ist. An dieser Stelle stößt die Berücksichtigung dieser Daten in den Softwarepaketen, die als Grundlage für die Berechnung eine dreidimensionale möglichst detailgenaue Modellierung der Umgebung haben, an Grenzen. In wie weit die Programme unter Vernachlässigung der Gebäudedaten dennoch für vorliegende Aufgabenstellung geeignet sind, wird im Folgenden anhand von Vergleichsberechnungen untersucht.

In dem weiter unten entwickelten semi-empirischen Programm können die Gebäude durch eine entsprechende Korrektur der berechneten Feldstärke berücksichtigt werden.

II.2.1.1.3 Anlagenbezogene Parameter

Die Anlagenparameter der einzelnen Senderstandorte sind zum großen Teil aus dem Internet (z.B. [BNetzA]) oder aus [WITT 04] zu entnehmen. Hierunter fallen

- Geographische Koordinaten des Senderstandortes
- Höhe der Sendeantenne über Grund
- Sendefrequenzen bzw. Sendekanäle
- Sendeleistungen
- Abstrahlverhalten der Sendeantenne

Die *geographischen Koordinaten* eines Senderstandortes werden in [WITT 04] in Länge und Breite auf Minute gerundet und in [BNetzA] auf Sekunde gerundet angegeben.

Im Folgenden wird hierzu untersucht, mit welchem Fehler in Abhängigkeit der verwendeten Datenbank gerechnet werden muss. Hierfür wird zunächst als Referenz ein Koordinatenpaar zum Beispiel aus der Software D-Sat (beinhaltet Satellitenbilder für Deutschland) [D-Sat] oder [Bay] extrahiert (vgl. Bild II.2.9). Hierbei ist auf jeden Fall festzuhalten, dass diese Vorgehensweise sehr aufwändig ist, da der genaue Senderstandort zunächst auf den Satellitenbildern gefunden werden muss.

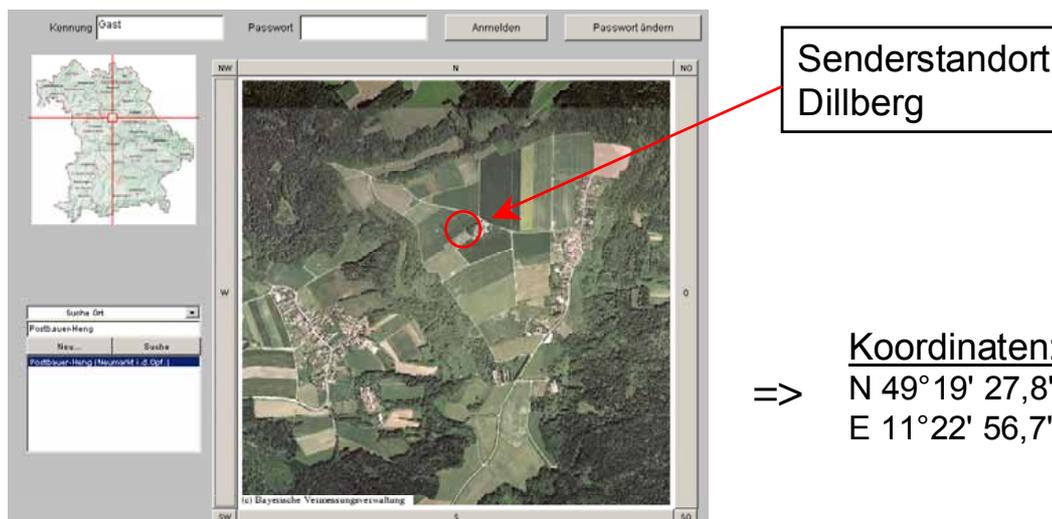


Bild II.2.9: Bestimmung der Koordinaten vom Senderstandort Dillberg mit dem BayernViewer Plus (siehe [BAY])

Exemplarisch für den Senderstandort „Dillberg“ wird in Tabelle II.2.2 die resultierende Abweichung zwischen den gerundeten Koordinaten aus [WITT 04] und denen aus [BAY] bestimmt.

„Referenzkoordinaten“ aus [BAY]		NDR - Hörfunk und Fernsehsender in der BRD [WITT 04]	
Länge	Breite	Länge	Breite
11° 22' 56,7"	49° 19' 27,8"	11° 23'	49° 19'
=> resultierende Abweichung in [m]: 861			

Tabelle II.2.2: Resultierende Abweichung aufgrund von gerundeten Standortkoordinaten aus [WITT 04]

Obige Tabelle zeigt deutlich, dass bei der Verwendung der gerundeten Koordinaten aus [WITT 04] in einer Simulation mit erheblichen Standortabweichungen zu rechnen ist.

Analog werden im Folgenden die Koordinaten aus [BNetzA] mit denen aus [BAY] gegenübergestellt.

„Referenzkoordinaten“ aus [BAY]		Datenbank der BNetzA (vgl. [BNetzA])	
Länge	Breite	Länge	Breite
11° 22' 56,7"	49° 19' 27,8"	11° 22' 57"	49° 19' 28"
=> resultierende Abweichung in [m]: 8,9			

Tabelle II.2.3: Resultierende Abweichung aufgrund von gerundeten Standortkoordinaten aus [BNetzA]

Die Daten aus [BNetzA] zeigen im Gegensatz zu denen aus [WITT 04] eine deutlich bessere Übereinstimmung, so dass die für eine Berechnung benötigten Daten aus [BNetzA] extrahiert werden können.

In der Regel wird für die Sendeleistung der *analoge* Leistungsbezugswert als *Synchronspitzenleistung* (Leistung im Puls für die Zeilensynchronisation) und der *digitale* als *Effektivwert* der Gesamtsendeleistung angegeben. Um die installierten Sendeleistungen für eine Berechnung einsetzen zu können, muss die analoge Synchronspitzenleistung zunächst in eine Effektivleistung umgerechnet werden. Da diese vom übertragenen Bildinhalt abhängt, ist sie in gewissen Grenzen variabel. Bei der Übertragung eines mittleren Bildinhaltes entspricht die mittlere effektive Leistung ca. 37% der Synchronspitzenleistung, also etwa 4 dB weniger (vgl. zum Beispiel [WECK 03]). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Sendeleistung als ERP angegeben wird. Bei Berechnungsprogrammen, bei denen als Eingabeparameter nur die Sendeleistung angegeben werden kann (z.B. Wireless Insite), muss die ERP mittels des jeweiligen Antennengewinns in die entsprechende Sendeleistung umgerechnet werden.

Größere Schwierigkeiten bereiten die Modellierung der eingesetzten Sendeantenne bzw. die dazugehörige Abstrahlcharakteristik. Da diese jeweils auf die vom Kunden angegebenen Anforderungen angepasst wird, gibt es für die gleiche Sendeantenne je nach Konfiguration verschiedene Abstrahlendiagramme. Die Mithilfe der Betreiber ist in diesem Zusammenhang zwingend erforderlich. Darüber hinaus liegen Vertikaldiagramme oftmals gar nicht vor.

Um einen Eindruck von den eingesetzten Antennen und von einem typischen Antennendiagramm eines Rundfunksenders zu bekommen, sind auf den folgenden Bildern exemplarisch zwei Antennenarten mit ihren Charakteristika dargestellt.

Rundfunk-Sendeantenne aus Dipolfeldern (z.B.: K 723137)

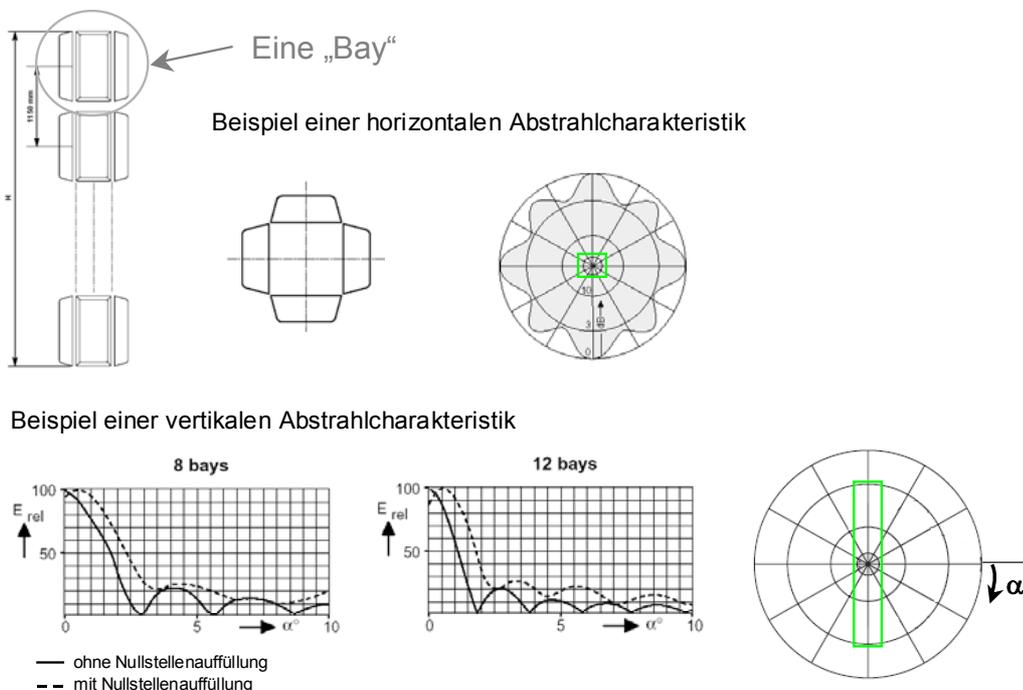


Bild II.2.10: Beispiel einer Rundfunksendeantenne der Firma Kathrein [KAT] Bauart: Dipolfelder; die Antenne ist jeweils mit dem grünen Kasten schematisch angedeutet

Superturndstile Antenne

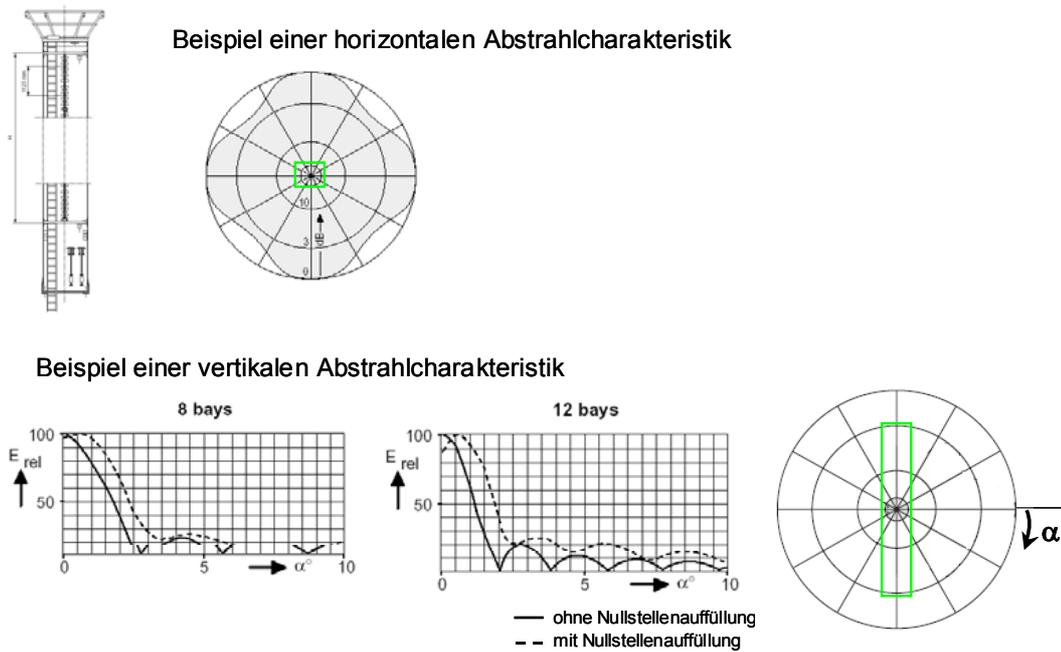


Bild II.2.11: Beispiel einer Rundfunksendeantenne der Firma Kathrein [KAT]
Bauart: Superturndstile; die Antenne ist jeweils mit dem grünen Kasten schematisch angedeutet

Rundfunk-Sendeantenne (z.B.: K 723137)

No. of bays	Panels per bay	Gain* (at mid-band) dB		Weight (without mounting hardware) kg	Antenna height H m	Windload / kN (v = 160 km/h)	
			times			without cylinder	with cylinder 1.6 m Ø
4	2	15.2	33.1	120	4.45	5.2	6.2
	3	13.6	22.9	160		6.4	
	4	12.3	17.0	210		6.2	
8	2	18.2	66.1	240	9.05	10.4	12.7
	3	16.6	45.7	320		12.8	
	4	15.3	33.9	420		12.4	

* Referred to $\lambda/2$ dipole

Superturndstile Antenne

No. of bays	Gain* (at mid-band) dB		Weight (with cylinder) kg	Antenna height H m	Windload (v = 160 km/h) kN
		times			
2	7.0	5.0	400	2.25	3.2
4	10.0	10.0	800	4.5	6.3
8	13.0	20.0	1600	9.0	12.5
12	14.8	30.2	2600	13.5	19.0
16	16.0	39.8	3600	18.0	25.0

* Referred to $\lambda/2$ dipole

Bild II.2.12: Beispiele für die Antennenparameter von zwei verschiedenen Sendeantennen

II.2.2 Berechnungsprogramm FPT

Im Folgenden Abschnitt wird ein einfaches Berechnungsverfahren für die hier vorliegende Aufgabenstellung entwickelt. Das Ausbreitungsmodell soll das gesamte Versorgungsgebiet eines Senders beschreiben können. Darüber hinaus soll es in der Lage sein, sowohl die maximal möglichen Expositionen in der Nähe der Sendeanlagen wie auch die mittlere Exposition über größere Bereiche zu beschreiben.

Die Untersuchungen in [BOR 05] haben gezeigt, dass zur Abschätzung der Immission von Mobilfunkbasisstationen die Methode „Freiraumausbreitung + 3dB“ gut geeignet ist. Da diese Methode frequenzunabhängig ist, könnte sie auch auf die hier vorliegende Aufgabenstellung übertragen werden. Wie in [BOR 05] gezeigt, weist sie gerade an Orten mit direkter Sicht zur Sendeantenne eine gute Übereinstimmung in Relation zu Messwerten auf. Auf der anderen Seite kann die Immission an Orten, an denen keine direkte Sicht zur Sendeantenne herrscht, deutlich überschätzt werden. Betrachtet man die Größe des Versorgungsgebietes eines Senders (z.B. ca. 13.000 km² für die Startregion Nürnberg) zeigt sich sofort, dass eine Vielzahl von Punkten innerhalb dieses Areals keine direkte Sicht zum Sender aufweisen wird. Übertragen auf die hier vorliegende Aufgabenstellung würde die Methode „Freiraumausbreitung + 3dB“ zur Abschätzung der Immission demnach an einem entsprechend großen Flächenanteil die Immission deutlich überschätzen und erscheint für die hier betrachtete Problematik als eher ungeeignet. Daher wird im Folgenden ein anderes Verfahren entwickelt.

Als Grundlage dient hierzu die Empfehlung ITU-R P.1546. Sie stellt eine allgemeine Vorhersagemethode für elektrische Feldstärken in Form von Ausbreitungskurven (siehe Bild II.2.13) dar, die durch eine statistische Auswertung einer großen Anzahl von Messungen ermittelt wurden (vgl. [ITU 1546]). Für Frequenzen, für die keine Ausbreitungskurve existiert, wird der Feldstärkewert von den beiden angrenzenden Kurven interpoliert.

Die ITU-R P.1546 ist eine Methode zur Punkt zu Fläche Feldstärkevorhersage für terrestrische Anwendungen im Frequenzbereich von 30 MHz bis 3000 MHz und ab einer Entfernung von 1 km vom Sender.

Die Methode weist eine einfache Handhabung und einen geringen Rechenzeitbedarf auf, da keine direkte Ausbreitungsberechnung durchgeführt wird, sondern im wesentlichen Tabellenwerte ausgelesen werden. Darüber hinaus kann die Feldstärkeverteilung in einem räumlich großen Gebiet prognostiziert werden.

FIGURE 11
600 MHz, land path, 1% time

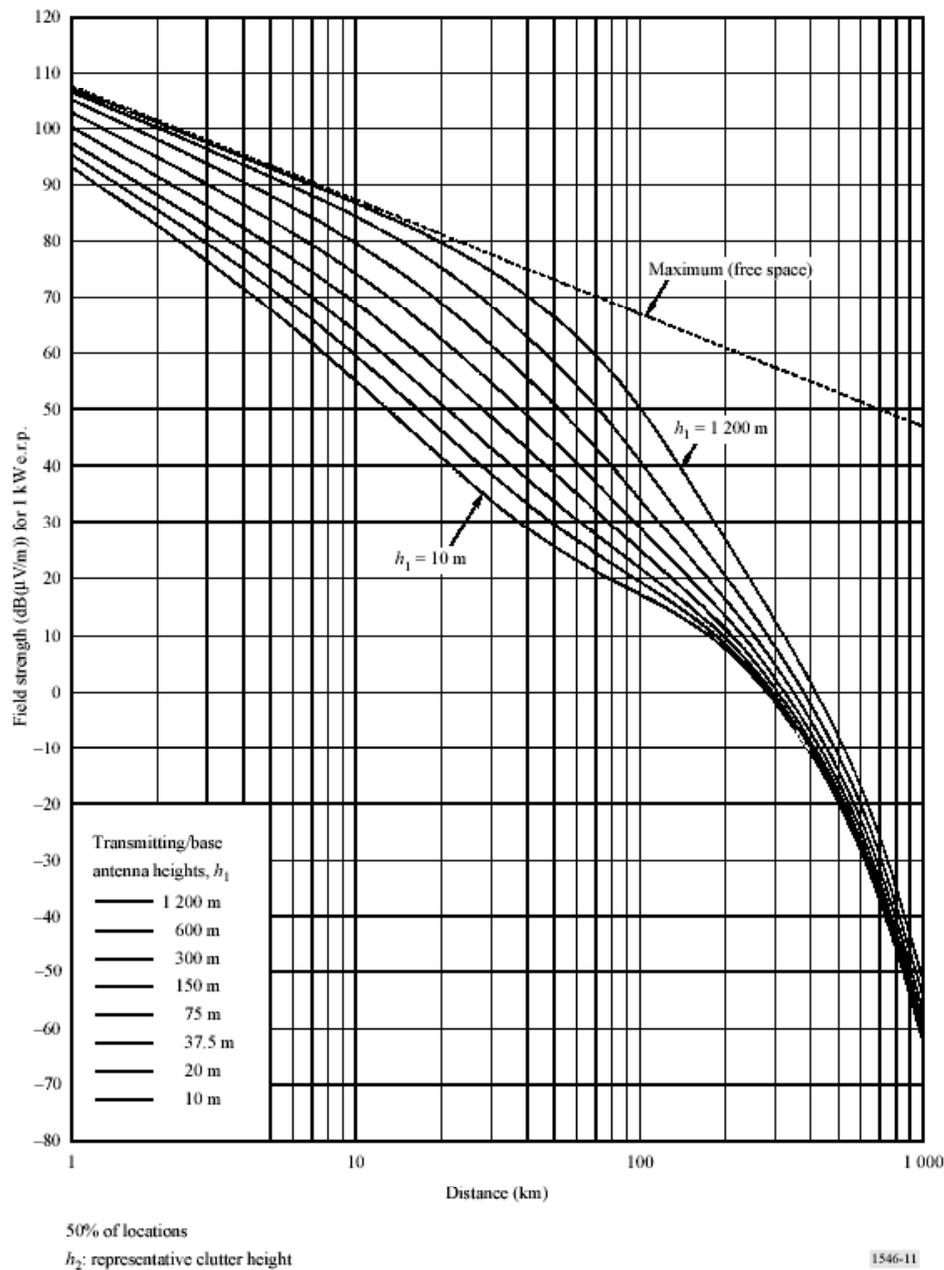


Bild II.2.13: Ausbreitungskurve aus der Empfehlung ITU-R P.1546; in Abhängigkeit des Abstandes und der Höhe der Sendeantenne, 600 MHz, 1% Zeitwahrscheinlichkeit, 1 kW ERP, Ausbreitung über Land

Die in obigen Bild exemplarisch dargestellte Ausbreitungskurve ist auch in Form von Tabellenwerten hinterlegt, was eine rechentechnische Umsetzung vereinfacht. Ein Ausschnitt ist in folgender Tabelle zu sehen.

Abstand [km]	Höhe der Sendeantenne in [m]								Freiraum
	10	20	37,5	75	150	300	600	1200	
1	92,650	94,838	97,048	99,687	102,340	104,589	106,007	106,629	106,900
2	82,390	85,130	87,816	91,033	94,401	97,503	99,622	100,542	100,879
3	76,031	79,199	82,230	85,816	89,602	93,221	95,829	96,974	97,358
4	71,287	74,801	78,119	82,004	86,105	90,104	93,101	94,437	94,859
5	67,459	71,245	74,808	78,950	83,315	87,625	90,956	92,465	92,921
6	64,233	68,233	72,001	76,367	80,963	85,543	89,173	90,848	91,337
7	61,442	65,608	69,545	74,107	78,907	83,727	87,637	89,475	89,998
8	58,981	63,277	67,353	72,083	77,064	82,101	86,274	88,279	88,838
9	56,781	61,178	65,368	70,241	75,382	80,614	85,040	87,217	87,815
10	54,794	59,270	63,553	68,547	73,827	79,235	83,902	86,259	86,900

Tabelle II.2.4: Maximale Feldstärke [dB μ V/m] in Abhängigkeit des Abstandes und der Höhe der Sendeantenne, 600 MHz, 1% Zeitwahrscheinlichkeit, 1 kW ERP, Ausbreitung über Land; Tabellenausschnitt

Die ITU Empfehlung enthält mehrere Ausbreitungskurven gemäß Bild II.2.13. So wird zwischen den Frequenzen 100, 600, und 2000 MHz, Ausbreitungsweg über See oder Land und verschiedenen Zeitwahrscheinlichkeiten (1%, 10% bzw. 50%) unterschieden. Eine Zeitwahrscheinlichkeit von 50% bedeutet in diesem Fall, dass die resultierende Feldstärke in 50% der Zeit erreicht wird.

Die Empfehlung stellt im Gegensatz zu der vorliegenden Aufgabenstellung ein Verfahren zur Netzplanung dar. Es soll eine Versorgungsfeldstärke prognostiziert werden, die möglichst nicht unterschritten wird. Hier soll aber mittels des vereinfachten Verfahrens ein maximaler Feldstärkewert vorhergesagt werden, der in der Realität nicht unterschritten werden sollte. Daher dienen für die vorliegende Aufgabenstellung die Ausbreitungskurven mit 1% Zeitwahrscheinlichkeit als Grundlage, da diese im Gegensatz zu den anderen Kurven höhere Feldstärkewerte beinhalten. Ferner werden die Tabellen für die Ausbreitung über Land verwendet. Das hieraus resultierende Programm heißt FPT (Field Prediction Tool).

Für eine Entfernung kleiner als 1 km Abstand von der Sendeanlage, für die die Empfehlung keine Werte liefert, wird für die Expositionsabschätzung mit reiner Freiraumausbreitung gerechnet.

Da die vertikalen Antennendiagramme laut der Betreiber häufig gar nicht vorliegen und auch nicht wie die horizontale Abstrahlcharakteristik im montierten Zustand vermessen werden können – dies geschieht in der Regel mittels einen Hubschrauberumflugs – wird bei FPT nur das horizontale Antennendiagramm verwendet. Dies hat, wie sich im nächsten Kapitel auch zeigen wird, zur Folge, dass in dem Bereich, in dem ausschließlich mit reiner Freiraumausbreitung gerechnet wird, die tatsächliche Immission deutlich überschätzt wird. Hierfür ist im Programm FPT noch ein Abschlag auf die berechnete Feldstärke vorgesehen, der frei vom Benutzer eingegeben werden kann. Um ein Gefühl zu bekommen welche Größe dieser Abschlag typischerweise aufzuweisen hat, werden auch die im nächsten Arbeitspaket durchzuführenden Messungen herangezogen und mit den jeweiligen Simulationsprognosen verglichen.

In folgendem Bild ist die Benutzeroberfläche von FPT mit den dazugehörigen Eingabeparametern dargestellt.

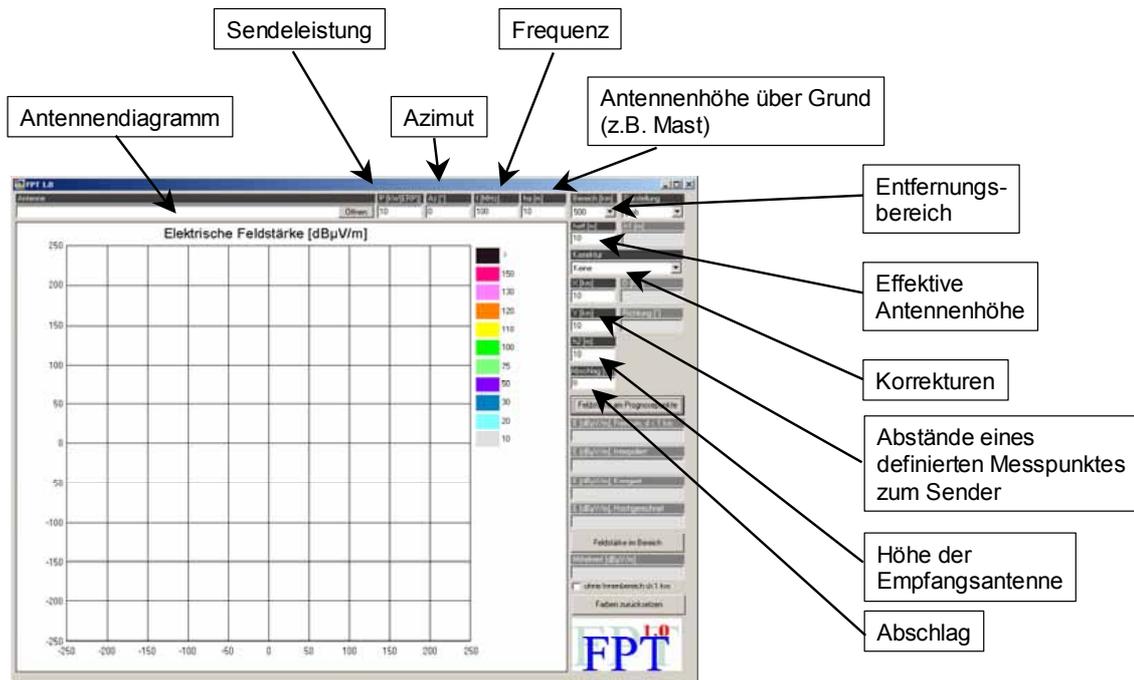


Bild II.2.14: Oberfläche von FPT (Field Prediction Tool) basierend auf der ITU-Empfehlung ITU-R P.1546 (Eingabeparameter)

Im Folgenden werden die Eingabeparameter für das vereinfachte Verfahren zur Expositionsabschätzung beschrieben:

- Horizontales Antennendiagramm

Die Datei mit dem Antennendiagramm muss im MSI-Format vorliegen (vgl. hierzu Antennendiagramme von Mobilfunkantennen [KAT]). Es wird wie in Bild II.2.15 zu sehen als Winkel und entsprechender auf den Gewinn normierter Dämpfung angegeben.

```

NAME [NAME]
FREQUENCY [FREQUENCY]
GAIN [GAIN] dBd
TILT
HORIZONTAL 360
0.0 0.0
1.0 0.02
2.0 0.04
....
....
358.0 0.04
359.0 0.02
VERTICAL 360
0.0 0.0
1.0 0.2
2.0 0.4
....
....
358.0 0.4
359.0 0.2
    
```

Bild II.2.15: Aufbau der Datei der Abstrahlcharakteristik

- Effektive Sendeleistung (in [kW (ERP)])
Die effektive Sendeleistung wird in kW (ERP) angegeben. Diese ist in Beziehung zur Sendeleistung eines $\lambda/2$ -Dipols gesetzt.
- Azimut
„0“ – Grad entsprechen hierbei der Nordrichtung
- Frequenz
Die Frequenz wird in MHz angegeben
- Antennenhöhe über Grund h_a
Die Antennenhöhe h_a ist die Höhe der Sendeantenne (Mitte der Sendeantenne) über Grund wie z.B. die Masthöhe und wird in Metern angegeben.
- Entfernungsbereich
Der Entfernungsbereich kann zwischen 10, 20, 50, 100, 200 und 500 km variiert werden.
- Effektive Antennenhöhe h_{eff}
Die Berücksichtigung der Geländeoberfläche innerhalb der Berechnung wird über die sogenannte Effektive Antennenhöhe realisiert. Per Definition der ITU ist die effektive Antennenhöhe die Höhe der Sendeantenne über Grund gemittelt zwischen Abständen von 3 bis 15 km in die Richtung der Empfangsantenne. Die effektive Antennenhöhe muss entweder geschätzt oder kann aus [BNetzA] entnommen werden.
- Empfangsantennenhöhe h_2
Die Empfangsantennenhöhe ist in der zugrundeliegenden Empfehlung mit 10 m festgelegt. Für abweichende Empfangsantennenhöhen wird ein entsprechender Korrekturterm in der Berechnung berücksichtigt.
- Korrekturen für geänderte Empfangsantennenhöhe h_2
 - Stadt, dicht
Empfangspunkt umgeben von hohen Häusern mit mehreren Stockwerken
 - Stadt,
Empfangspunkt umgeben von niedriger dichter Bebauung
 - Vorstadt
Empfangspunkt umgeben von lockerer Bebauung
 - Ländlich
Dorf
- Korrekturen für Entfernung kleiner 3 km vom Sender innerhalb einer Stadt
 - Stadt, nah

- Abstände zum Sender
Da es sich um ein relativ einfaches Prognoseprogramm handelt, befindet sich der Senderstandort immer im Ursprung. Der laterale Abstand zum Messpunkt kann durch einen x und einen y- Abstand angegeben werden. Diese lassen sich aus den jeweiligen Koordinatenpaaren (Gauß-Krüger-Format) bestimmen.

In Bild II.2.16 ist wiederum die Oberfläche des entwickelten Programms FPT zu sehen. Diesmal werden die Ausgabewerte betrachtet, die im Folgenden näher beschrieben werden.

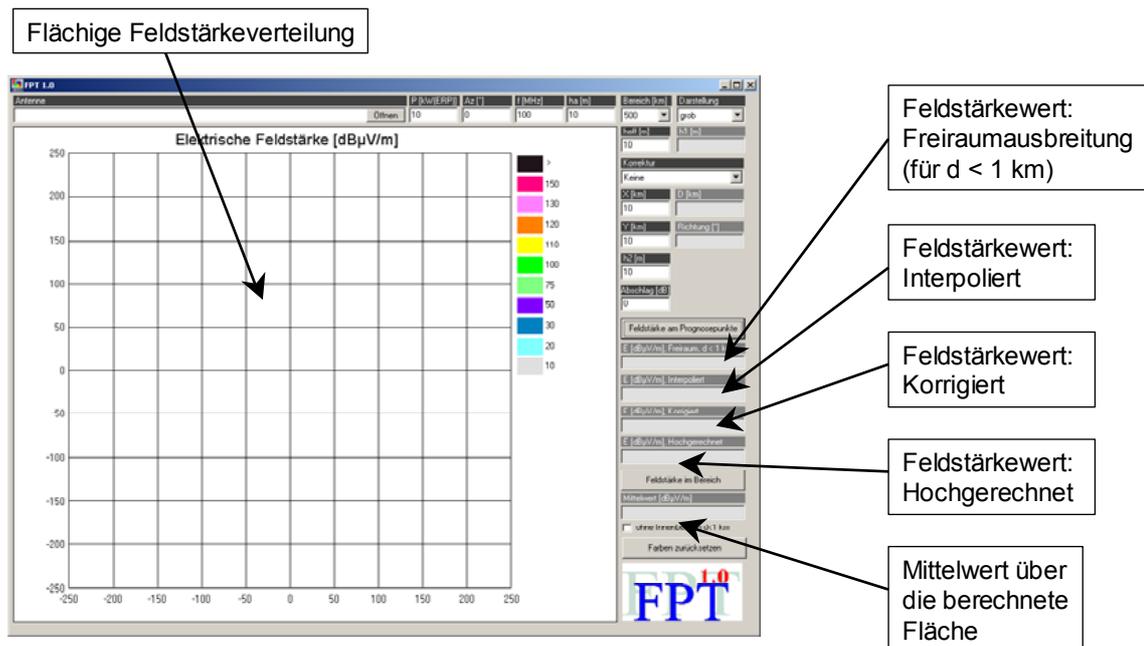


Bild II.2.16: Oberfläche von FPT (Field Prediction Tool) basierend auf der ITU-Empfehlung ITU-R P.1546

- Flächige Feldstärkeverteilung
Hier ist die flächige Verteilung der elektrischen Feldstärke in dBµV/m in entsprechender Farbe je nach Darstellungsart (grob, mittel, fein) zu sehen. Die dazugehörige Farbskala kann frei variiert werden.
- Feldstärkewert (für d<1km) für einen bestimmten Messpunkt
Wie oben bereits erwähnt wird für die Berechnung bei Abständen kleiner als 1 km von der Sendeantenne mit reiner Freiraumausbreitung gerechnet. Da wie oben bereits beschrieben in diesem Bereich mit deutlichen Überschätzungen der realen Feldstärke zu rechnen ist, kann für die prognostizierte Wert noch ein Abschlag berücksichtigt werden. Der so errechnete Wert wird im Feld „Feldstärkewert: Freiraumausbreitung“ angezeigt. Dies ist natürlich nur dann der Fall, wenn sich der Vorhersagepunkt auch in dem Bereich befindet.

- **Feldstärkewert Interpoliert für einen bestimmten Messpunkt**
Der interpolierte Feldstärkewert ist der Wert, der durch die Interpolationen von Frequenz, Sendeantennenhöhe und Abstand für eine Sendeleistung von 1 kW (ERP) direkt aus den Tabellen der ITU-Empfehlung generiert wird.
- **Feldstärkewert Korrigiert für einen bestimmten Messpunkt**
Der korrigierte Feldstärkewert berücksichtigt die Korrekturen für die Empfangsantennenhöhe oder Ausbreitungswege kleiner von 3 km, wenn sich die Sendeantenne innerhalb einer Stadt befindet.
- **Feldstärkewert Hochgerechnet**
Der hochgerechnete Feldstärkewert berücksichtigt weiterhin das horizontale Antennendiagramm und die tatsächliche Sendeleistung.
- **Mittelwert über die berechnete Fläche**
Den Mittelwert über die dargestellte flächige Verteilung der Feldstärke kann auf der einen Seite ohne Berücksichtigung der Ergebnisse bis zum Abstand von 1 km bestimmt werden, da hier wie oben angesprochen mit starken Überschätzungen der realen Feldstärke zu rechnen ist, und auf der anderen Seite mit Berücksichtigung dieser Region. Es sollte immer mit der feinen Auflösung gerechnet werden.

II.2.3 Fazit

In den vorherigen Abschnitten wurden strahlenoptische Programme mit ihrer Vielzahl von detaillierten Eingabedaten und ein einfaches semi-empirisches Verfahren betrachtet.

Eine Berücksichtigung der Gebäudeinformationen bei strahlenoptischen Verfahren hat sich aufgrund der enormen Anzahl innerhalb des Versorgungsbereiches eines terrestrischen Senders als praktisch unmöglich erwiesen. Daher werden in den folgenden Betrachtungen bzw. Simulationen lediglich die Geodaten in Form von digitalen Elevationsmodellen Berücksichtigung finden. In wie weit mit dieser Vorgehensweise eine flächige Verteilung der Feldstärke rechentechnisch bestimmt werden kann, wird in den nachfolgenden Abschnitten untersucht.

Wohingegen strahlenoptische Berechnungsmethoden eher als Punkt zu Punkt Verfahren zu verstehen sind, wurde ein einfaches Punkt zu Fläche Verfahren basierend auf der ITU-R. P.1546 entwickelt.

Durch dieses Ausbreitungsmodell lässt sich das gesamte Versorgungsgebiet eines Senders beschreiben. Ein weiterer Vorteil besteht in der einfachen Handhabung und dem aufgrund der wenigen Eingabeparameter geringen Rechenzeitbedarf.

II.3 Simulationen

Im Folgenden Kapitel werden die oben vorgestellten Softwarepakete auf verschiedene Sender- bzw. Empfängerkonfigurationen angewendet. Hierzu werden bereits die ersten Messergebnisse der im dritten Arbeitspaket durchzuführenden Messkampagne mit berücksichtigt. Für die Bestimmung geeigneter Messpunkte wurde eine Messreihe im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt herangezogen [BER 04]. Deren statistisch unabhängige Messpunkte wurden unter großer Sorgfalt und Berücksichtigung verschiedenster Parameter (wie z.B. der Bevölkerungsdichte) ermittelt und dienen für die hier durchzuführende Messkampagne als Grundlage. Darüber hinaus wurden auch Messungen in der unmittelbaren Senderumgebung durchgeführt, um auch die maximal mögliche Exposition bestimmen zu können.

Da der gesamte Frequenzbereich des analogen und digitalen terrestrischen Rundfunks von den oben vorgestellten Programmen abgedeckt und die Berechnung für alle Systeme in den Programmen gleich behandelt wird, reicht es an dieser Stelle für eine Beurteilung der einzelnen Softwarepakete aus, *ein* terrestrisches System zu betrachten. Die so erzielten Erkenntnisse sind auf die anderen Systeme direkt übertragbar. Daher werden im Folgenden nur die Immissionen vom analogen Fernsehen für die Beurteilung herangezogen.

Im Folgenden Arbeitspaket 3 werden dann die Immissionen des gesamten analogen und digitalen terrestrischen Rundfunks an den jeweiligen Messpunkten mit den entsprechend berechneten Feldstärkewerte verglichen.

Alle Berechnungen wurden auf einem Computer mit folgenden Eckdaten durchgeführt:

- Betriebssystem: Microsoft Windows 2000
- Prozessor: Pentium IV
- Taktfrequenz: 1,8 GHz
- Arbeitsspeicher: 1 GB
- Grafikkarte: Aopen Gforce 4 TI 4200, 64 MB, Open GL

II.3.1 Konfigurationen

Für den späteren Vergleich zwischen rechentechnisch prognostizierter und messtechnisch ermittelter Exposition ist es sinnvoll, verschiedene, praxisrelevante Expositionsszenarien zu definieren. Hierbei werden folgende Konfigurationen berücksichtigt:

- verschiedene Abstände vom Sender
- Nahbereich: direkte Senderumgebung zur Ermittlung der maximalen Exposition
- ländliche Umgebung
- Vorstadt (lockere Bebauung)

- Stadt (dichte niedrige Bebauung)
- Großstadtzentrum (dichte hohe Bebauung)

Da von den Betreibern für den Bearbeitungszeitraum des zweiten Arbeitspakets noch keine konkreten Antennendiagramme zur Verfügung gestellt werden konnten, wird für die folgenden Berechnungen ein typisches Antennendiagramm nach Abschnitt II.2.1.1.3 generiert. Da dies für alle Berechnungsverfahren in gleicher Weise eingesetzt wird, sind die hierbei getroffenen Aussagen mit einander vergleichbar. Das erzeugte Antennendiagramm ist als horizontaler und vertikaler Schnitt im folgenden Bild dargestellt.

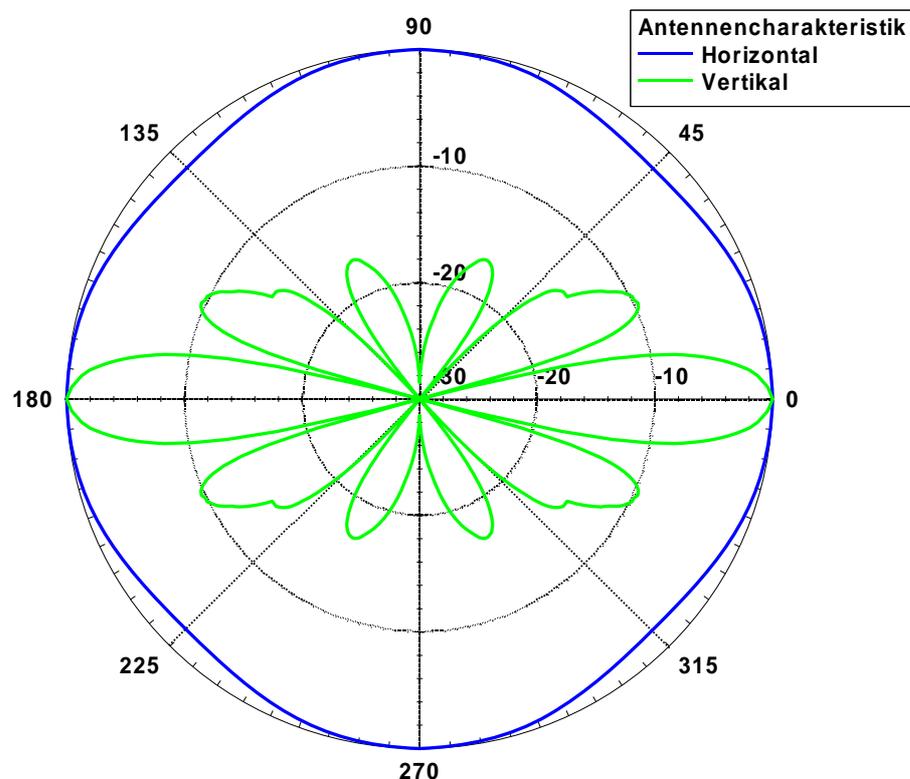


Bild II.3.1: Für die Berechnung verwendete „typische“ Antennencharakteristik basierend auf der Antenne Kathrein „4DR 8 4HO“; der Gewinn wurde nach Abschnitt II.2.1.1.3 auf 15 dBd angepasst

Wie oben bereits beschrieben, sind strahlenoptische Methoden eher als Punkt zu Punkt Berechnungen zu verstehen. Da die Messwerte aufgrund der bei den Messungen eingesetzten Schwenkmethode nicht punktuelle, sondern Maximalwerte in einem bestimmten Volumen darstellen, stellt sich die Frage, in wie weit dieses Volumen rechentechnisch nachzubilden ist.

Exemplarisch sind in der folgenden Tabelle gerechnete Feldstärkewerte in einer Ebene von 1 m² Fläche dargestellt.

Feldstärkewerte in dB μ V/m						
x / y [cm]	0	20	40	60	80	100
0	87,32	87,33	87,34	87,35	87,75	87,88
20	87,32	87,33	87,34	87,35	87,75	87,88
40	87,32	87,33	87,34	87,34	87,74	87,87
60	87,32	87,33	87,33	87,34	87,74	87,87
80	87,32	87,33	87,33	87,34	87,74	87,87
100	87,32	87,33	87,33	87,34	87,74	87,87

Tabelle II.3.1: Feldstärkeverteilung mit Wireless Insite in einem Bereich von 1 m x 1 m

In der obigen Tabelle ist deutlich die geringe Abweichung der berechneten Feldstärkewerte über den Ort zu sehen. Hierbei ist folgendes zu beachten. Die geringe Abweichung innerhalb der Berechnung liegt hauptsächlich darin begründet, dass durch die Anforderungen an das Berechnungsverfahren (Berechnung im gesamten Versorgungsbereich) Vereinfachungen notwendig werden. So werden die Gebäude bei den strahlenoptischen Verfahren nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt II.2.1.1). Dies hat die Folge, dass in der Berechnung (bis auf die Reflexion am Erdboden) kaum Mehrwegeausbreitung auftritt mit der Konsequenz, dass auch das Fading deutlich reduziert wird. Es ist demnach für die hier gestellte Aufgabe nicht notwendig, das Messvolumen durch viele berechnete Empfangspunkte nachzubilden. Hier reicht es aus, die Feldstärke an einem Punkt im Messvolumen zu bestimmen. Dieses Verfahren bietet den großen Vorteil einer deutlichen Reduzierung der Rechenzeit. So betrug die Rechenzeit für die in Tabelle II.3.1 dargestellten Empfangspunkte ungefähr 30 Stunden mit Wireless Insite, wobei ein einzelner Berechnungspunkt ca. 1 Stunde in Anspruch nahm.

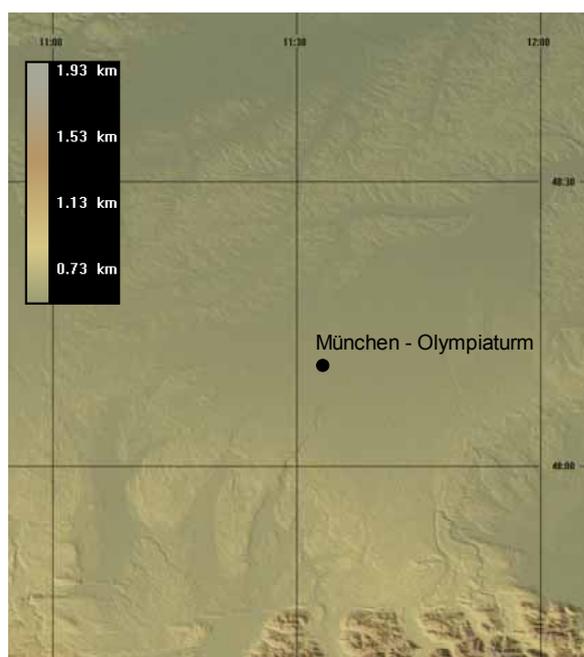
Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse mit realen Messungen verglichen. Hierzu wurden zum einen der Senderstandort Olympiaturm in München und der Dillberg südöstlich von Nürnberg herangezogen.

II.3.2 Senderstandort Olympiaturm, München

Der Senderstandort Olympiaturm in München liegt im Olympiapark im Norden der Stadt. An diesem Standort werden die Konfigurationen

- verschiedene Abstände vom Sender
- Vorstadt (lockere Bebauung)
- Stadt (dichte niedrige Bebauung)
- Großstadtzentrum (dichte hohe Bebauung)

näher untersucht. In Bild II.3.2 sind die digitalen Geländedaten mit dem Programm 3DEM dargestellt.

**München****Standort: Olympiaturm**

• Koordinaten:

E 11°33'13"

N 48°10'28"

• Geländehöhe über NN

511 m

Bild II.3.2: Senderstandort München-Olympiaturm und Umgebung

Die folgende Tabelle zeigt die den folgenden Simulationen zugrunde liegenden Simulationsparameter.

Kanal	Frequenz [MHz]	mittlere Sendeleistung [kW] (ERP)	Sendehöhe ü. Grund	Mittlere effektive Antennenhöhe	Antennengewinn [dBd]
35	583,25	39,8	273 m	300 m	15
56	751,25	39,8	283 m	310 m	15

Tabelle II.3.2: Simulationsparameter

Die angegebene *Frequenz* in der Tabelle entspricht der Frequenz des Bildträgers (vgl. hierzu Kapitel I).

Für die Sendeleistung z.B. aus [WITT 04] wird der *analoge* Leistungsbezugswert als *Synchronspitzenleistung* (Leistung im Puls für die Zeilensynchronisation) angegeben. Dieser muss noch in eine *mittlere Sendeleistung* umgerechnet werden. Da diese vom übertragenen Bildinhalt abhängt, ist sie in gewissen Grenzen variabel. Bei der Übertragung eines mittleren Bildinhaltes entspricht die mittlere effektive Leistung ca. 39,8% der Synchronspitzenleistung, also etwa 4 dB weniger (vgl. zum Beispiel [WECK 03]). Diese Umrechnung wird auch im weiteren verwendet. Darüber hinaus ist in diesem Zusammenhang für eine Simulation die Tatsache zu berücksichtigen, dass die Sendeleistung als ERP angegeben ist. Gegebenenfalls ist noch eine Umrechnung vorzunehmen.

Die mittlere *effektive Antennenhöhe* ist hierbei die über 360° gemittelten effektiven Antennenhöhen und muss entweder vom Benutzer geschätzt werden oder kann auch wie hier geschehen aus [BNetzA] extrahiert werden.

In der folgenden Tabelle sind die Messorte aus der dem Vergleich zu Grunde liegenden Messung mit den jeweiligen Parametern zu sehen, deren Messergebnisse anschließend mit Simulationen verglichen werden.

MP Nr.	Ort	Straße	Nr.	GK-Bessel Hochwert [m]	GK-Bessel Rechtswert [m]	Olympiaturm			Korrektur für FPT
						lat. Abs. [km]	x-Abstand [km]	y-Abstand [km]	
1	München	Batzenhoferstr.	8	5337913	4464468	2,48	-2,44	0,44	Stadt, dicht
2	München	Bingener Str.	4	5338383	4464523	2,55	-2,39	0,91	Stadt
3	München	Eckermannstr.	1	5332944	4462279	6,48	-4,63	-4,53	Stadt
4	München	Clemens-Krauß-Str.	--	5335960	4460358	6,72	-6,55	-1,51	Stadt
5	München	Waldfriedhofstr	33A	5330658	4463763	7,51	-3,15	-6,81	Stadt, dicht
6	München	Silberdistelstr.	69	5332640	4461148	7,52	-5,76	-4,83	Vorstadt
7	München	Silberblattstr.	4	5330252	4461798	8,85	-5,11	-7,22	Stadt
8	München	Aubinger Str.	--	5334954	4457650	9,60	-9,26	-2,52	Stadt
9	München	Bastian-Schmid-Platz	--	5327737	4463926	10,18	-2,98	-9,74	Stadt
10	München	Herterichstr.	9	5326567	4464817	11,10	-2,09	-10,91	Stadt
11	München	Oberstdorfer Str.	27	5327415	4462022	11,18	-4,89	-10,06	Stadt
12	Germering	Pestalozzistr.	--	5330942	4452586	15,74	-14,32	-6,53	Stadt
13	Starnberg	Gradstr.	3	5318559	4451349	24,49	-15,56	-18,91	Stadt

Tabelle II.3.3: Vergleichspunkte, Standort und Abstände

Die Korrekturen für das Programm FPT beziehen sich auf eine Empfangsantennenhöhe von 1,7 m. Ferner sind hierbei folgenden Nomenklaturen zu berücksichtigen:

- **Stadt, dicht:** Messpunkt umgeben von hohen Häusern mit mehreren Stockwerken (entspricht der Konfiguration „Großstadtzentrum“)
- **Stadt:** Messpunkt umgeben von niedriger dichter Bebauung (entspricht der Konfiguration „Stadt“)
- **Vorstadt:** Messpunkt umgeben von lockerer Bebauung (entspricht der Konfiguration „Vorstadt“)
- **Land:** Dorf

Die Lage der einzelnen Messpunkte und der Standort des Olympiaturms in München sind im folgenden Bild zu Überblickszwecken dargestellt. Die Nummerierung der Punkte korrespondiert hierbei mit einem größer werdenden Abstand zum Senderstandort (siehe Tabelle II.3.3).

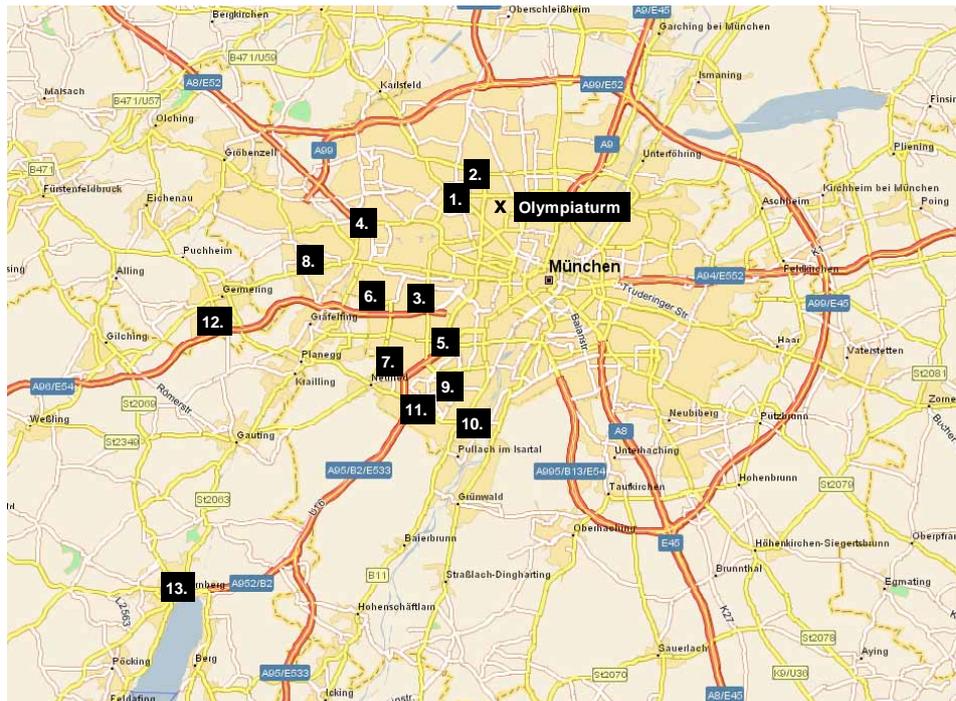


Bild II.3.3: Überblick über die Vergleichspunkte

Bei den Simulationen mit Wireless Insite muss folgender Sachverhalt berücksichtigt werden. Die digitalen Geländedaten werden wie in Bild II.3.4 zu sehen verarbeitet. Zwischen den einzelnen Stützpunkten für die Geländehöhen werden sogenannte „Faces“ (Dreiecke) generiert.

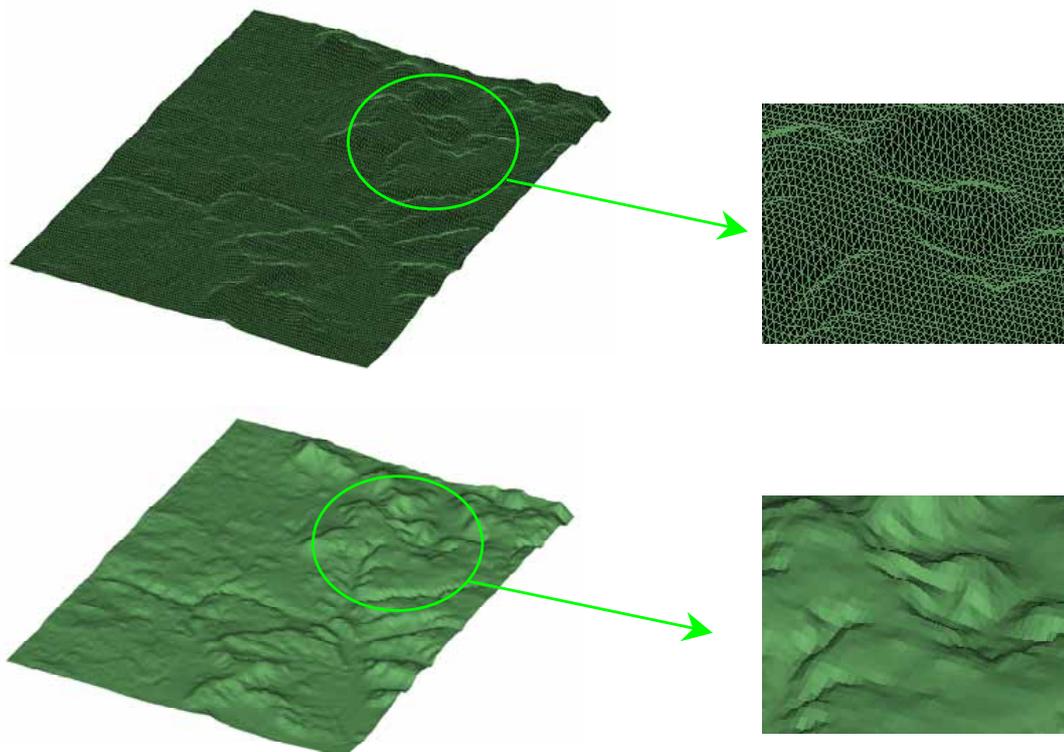


Bild II.3.4: Verarbeitung der Geländedaten in Wireless Insite – Darstellung durch sogenannte „Faces“ (oben: „Drahtdarstellung“; unten: „ausgefüllte Darstellung“)

Die maximale Anzahl dieser Dreiecke ist bei Wireless Insite auf 32000 beschränkt. Dies bedeutet unmittelbar, dass auch der Modellierungsbereich eingeschränkt ist. Bei der Berücksichtigung nur jeden zweiten Punktes aus den SRTM-Elevationsdaten kann eine Fläche von ca. 350 km² nachbildet werden. Es ist demnach an dieser Stelle bereits festzuhalten, dass mit Wireless Insite nicht das gesamte Versorgungsgebiet eines Senders in geeigneter Auflösung der Geländedaten darzustellen ist. Darüber hinaus zeigt sich später, dass aufgrund der enormen Rechenzeit eine Aussage über eine mittlere Feldstärke nicht realistisch ist.

Bild II.3.5 zeigt die Simulationsumgebung von Wireless Insite für den Senderstandort Olympiaturm München. Die Geländehöhen sind als Farbverlauf zweidimensional bzw. dreidimensional dargestellt. Darüber hinaus sind der Sendestandort und die einzelnen Messstandorte gekennzeichnet.

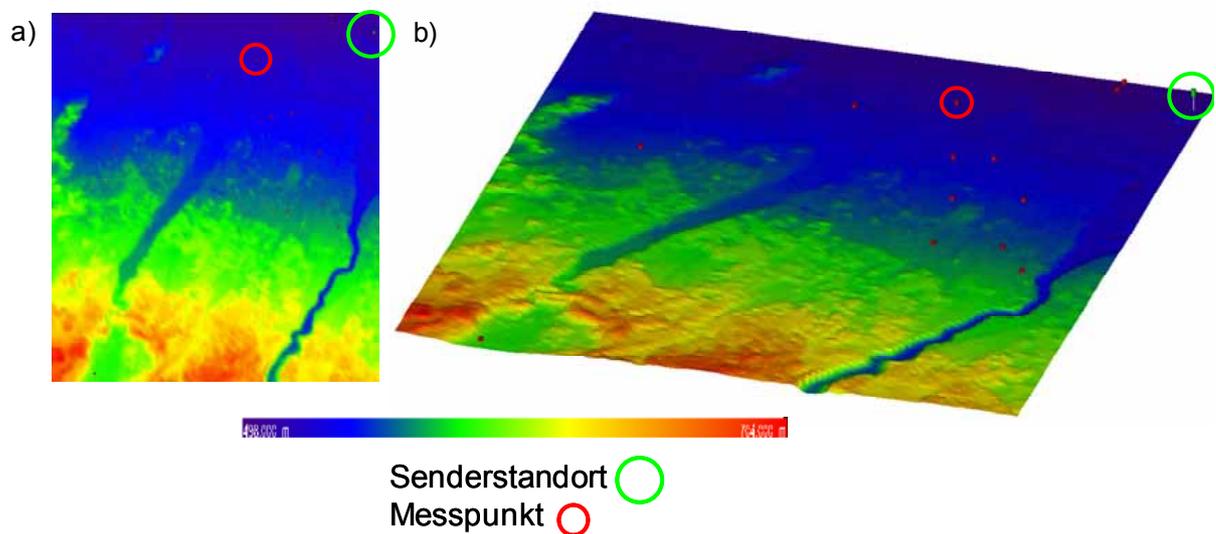


Bild II.3.5: Simulationsraum Wireless Insite
a) 2D
b) 3D

Das Simulationsergebnis in Form von einigen exemplarischen Ausbreitungspfaden und die als dreidimensionale Abstrahlcharakteristik dargestellte Sendeantenne ist in folgendem Bild zu sehen. Hierbei ist zu beachten, dass in der Legende nicht die elektrische Feldstärke, sondern der Wert der Empfangsleistung eines isotropen Kugelstrahlers je Pfad farblich gekennzeichnet ist. Dieser kann aber in eine entsprechende elektrische Feldstärke umgerechnet werden. Für die hier bei dieser Berechnung vorliegenden 26 (2 Kanäle je 13) Vergleichspunkte wurde eine Rechenzeit von ca. 26 Stunden benötigt.

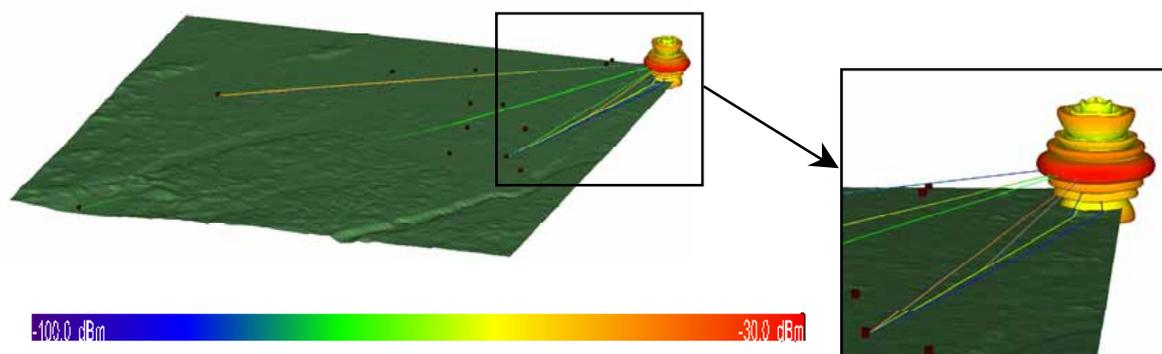


Bild II.3.6: Ausbreitungswege anhand von 3 Beispielpunkten und 3D Antennendiagramm

In der folgenden Tabelle sind die Simulationsergebnisse an den verschiedenen Vergleichspunkten jeweils für die beiden untersuchten Kanäle 35 und 56 zu sehen.

Vergleichspunkt	Kanal 35			Kanal 56		
	Messung [dB μ V/m]	Berechnung [dB μ V/m]	Abweichung [dB]	Messung [dB μ V/m]	Berechnung [dB μ V/m]	Abweichung [dB]
1	73,0	73,0	0,0	79,1	70,4	-8,6
2	84,6	94,9	10,3	80,8	92,6	11,8
3	71,4	90,9	19,5	67,1	86,2	19,1
4	78,3	77,3	-1,0	79,0	77,2	-1,8
5	68,0	77,3	9,3	67,5	77,9	10,4
6	86,7	70,3	-16,4	78,3	70,3	-8,0
7	69,7	70,5	0,8	69,9	67,8	-2,1
8	78,4	81,9	3,5	79,8	81,9	2,1
9	76,9	84,6	7,7	72,4	83,0	10,6
10	67,4	88,2	20,8	69,7	81,9	12,2
11	70,9	76,7	5,8	72,1	76,3	4,2
12	48,8	73,8	25,0	48,6	72,8	24,2
13	62,3	51,1	-17,2	61,9	49,5	-12,4

Tabelle II.3.4: Simulationsergebnisse mit Wireless Insite; Abweichung als „Berechnung minus Messung“

Aus Tabelle II.3.4 wird zunächst einmal direkt ersichtlich, dass kein einheitliches Bild der Simulationsergebnisse vorliegt. Die Abweichungen schwanken zwischen deutlichen Unter bzw. Überbewertungen des Messwertes.

In diesem Zusammenhang werden bewusst nicht die Begriffe Unterschätzung bzw. Überschätzung verwendet, da sich Abweichungen auch aus dem verwendeten Antennendiagramm, dessen Ausrichtung und dem Gewinn ergeben können. Da in diesem Arbeitspaket zunächst einmal nur ein geeignetes Verfahren erwickelt werden soll und allen Berechnungsprogrammen das selbe Antennendiagramm zugrunde liegt, ist diese Ungenauigkeit hier aber zu vernachlässigen.

Als nächstes werden analog zu der vorherigen Vorgehensweise die Simulationen mit dem Softwareprogramm WinProp durchgeführt. Da den Berechnungen die Geländeoberfläche zu Grunde liegt und diese als Pixelinformation vorliegt, bedient sich das Programm WinProp

einer auf diesen Vorgaben optimierten Methode, der sogenannten „Rural Dominant Path“ – Methode. Der Algorithmus für die Strahlensuche arbeitet auch im 3D Modus. Es wird jedoch nur der dominierende Ausbreitungspfad berücksichtigt. Dies hat eine deutliche Reduzierung der Rechenzeit zur Folge. Darüber hinaus werden in einer vorzuziehenden Auflösung Punkte über den gesamten Bereich berechnet, so dass hier auch eine Aussage über eine mittlere Feldstärke möglich ist.

Die Simulationsumgebung von WinProp mit dem farblich dargestellten Höhenverlauf ist in Bild II.3.7 in zwei- bzw. dreidimensionaler Darstellung zu sehen. Wiederum ist der Senderstandort und die dazugehörigen Messpunkte gekennzeichnet.

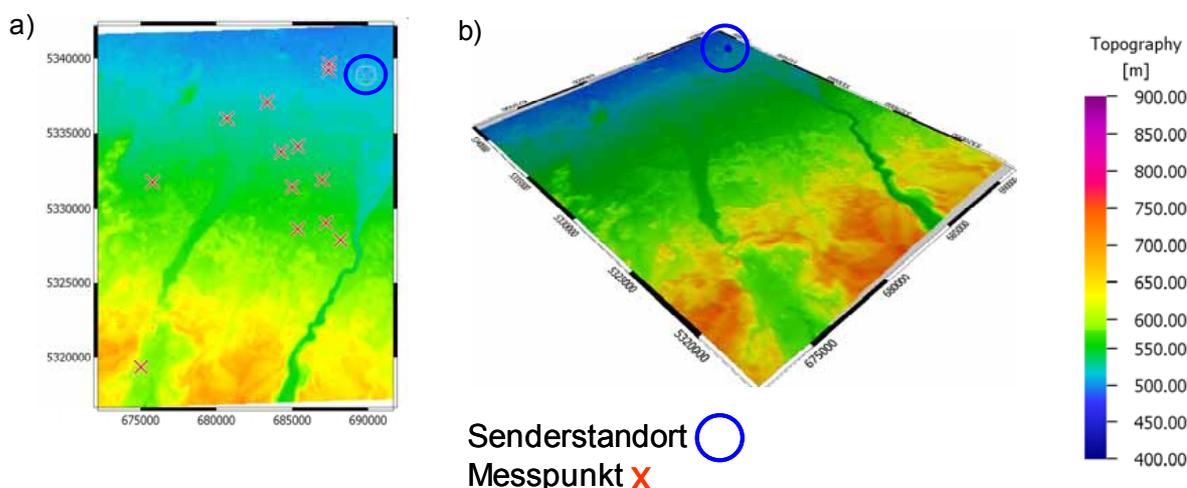


Bild II.3.7: Simulationsraum von WinProp für die Region des Senderstandorts Olympiaturm München
 a) 2D
 b) 3D

Das flächige Simulationsergebnis für die beiden in diesem Abschnitt untersuchten Ausbreitungskanäle 35 und 56 ist in den folgenden Bildern zu sehen. Im Gegensatz zu Wireless Insite betragen die Berechnungszeiten von WinProp für beide Szenarien jeweils ca. 1 Stunde.

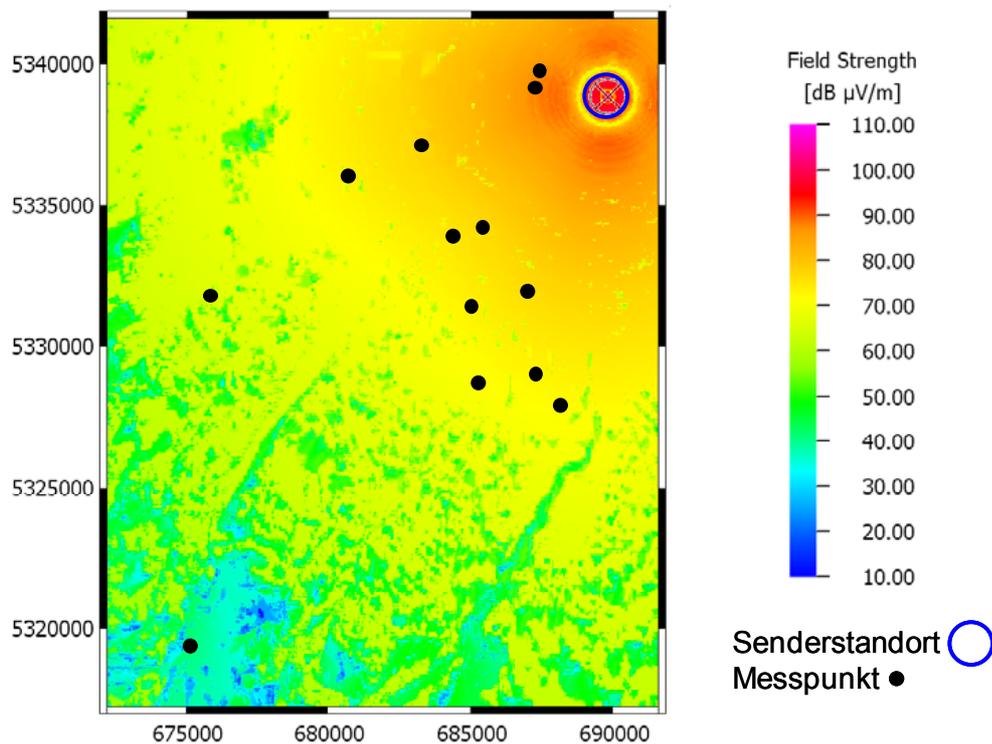


Bild II.3.8: Simulationsergebnis von WinProp für den Senderstandort Olympiaturm, Kanal 35

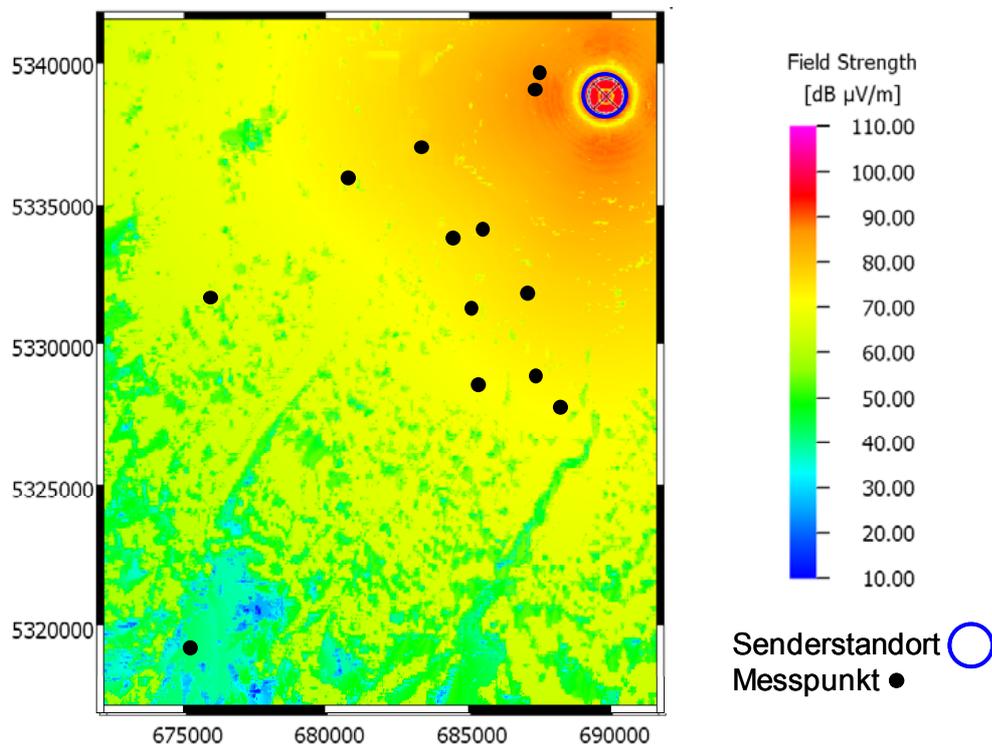


Bild II.3.9: Simulationsergebnis von WinProp für den Senderstandort Olympiaturm, Kanal 56

Die folgende Tabelle enthält analog zu den Ergebnissen von Wireless Insite einen Überblick über die Messpunkte aufgeteilt in Mess- und Berechnungswerte und deren Abweichung für den jeweilig betrachteten Kanal.

Vergleichs- punkt	Kanal 35			Kanal 56		
	Messung [dB μ V/m]	Berechnung [dB μ V/m]	Abweichung [dB]	Messung [dB μ V/m]	Berechnung [dB μ V/m]	Abweichung [dB]
1	73,0	87,6	14,6	79,1	87,7	8,6
2	84,6	86,9	2,3	80,8	86,9	6,1
3	71,4	76,5	5,1	67,1	76,5	9,4
4	78,3	77,1	-1,2	79,0	77,1	-1,9
5	68,0	76,2	8,2	67,5	76,2	8,7
6	86,7	74,9	-11,8	78,3	74,8	-3,5
7	69,7	73,4	3,7	69,9	73,4	3,5
8	78,4	73,4	-5,0	79,8	73,4	-12,4
9	76,9	72,9	-4,0	72,4	72,9	1,5
10	67,4	72,0	4,6	69,7	72,0	2,3
11	70,9	71,3	0,4	72,1	71,3	-0,8
12	48,8	66,8	18,0	48,6	66,8	18,2
13	62,3	42,5	-19,8	61,9	42,6	-19,3

Tabelle II.3.5: Simulationsergebnis WinProp; Abweichung als „Berechnung minus Messung“

Die Ergebnisse von WinProp zeigen ein ähnliches Bild wie die von Wireless Insite. Es liegen sowohl Unterbewertungen als auch Überbewertungen vor.

Das Simulationsergebnis mit dem eigens entwickelten Programm FPT ist in den Bildern II.3.10 und II.3.11 zu sehen. Hierbei ist im ersten Bild der Feldstärkeverlauf ohne Korrektur der Empfangsantennenhöhe und im zweiten Bild mit Korrektur der Empfangsantennenhöhe auf 1,7 m für „Stadt“ zu sehen.

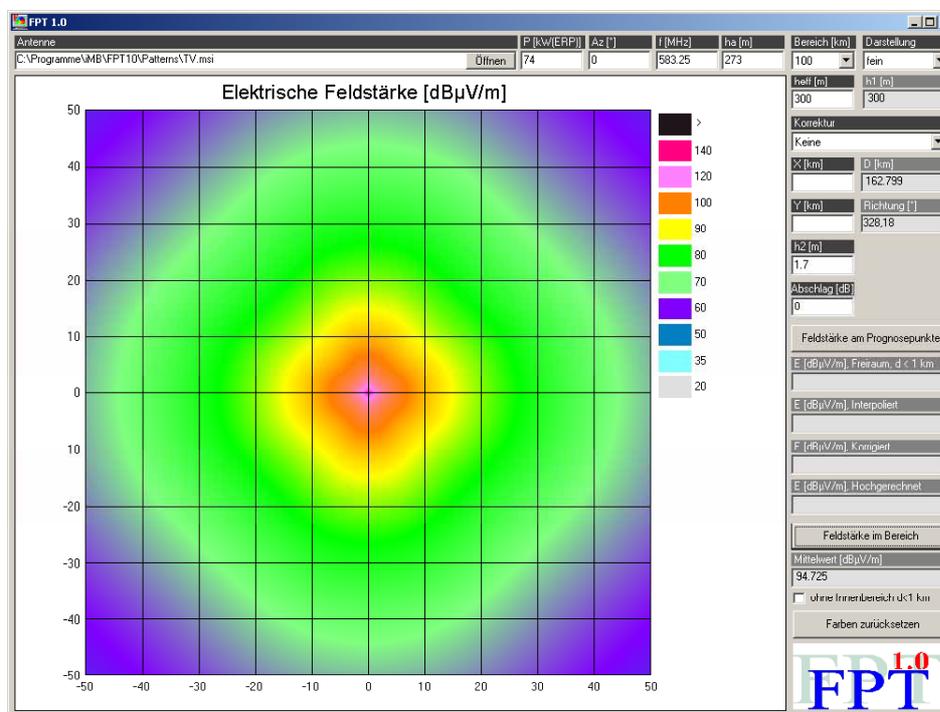


Bild II.3.10: Simulationsergebnisse von FPT ohne Korrektur der Empfangsantennenhöhe und Umgebung, Kanal 35

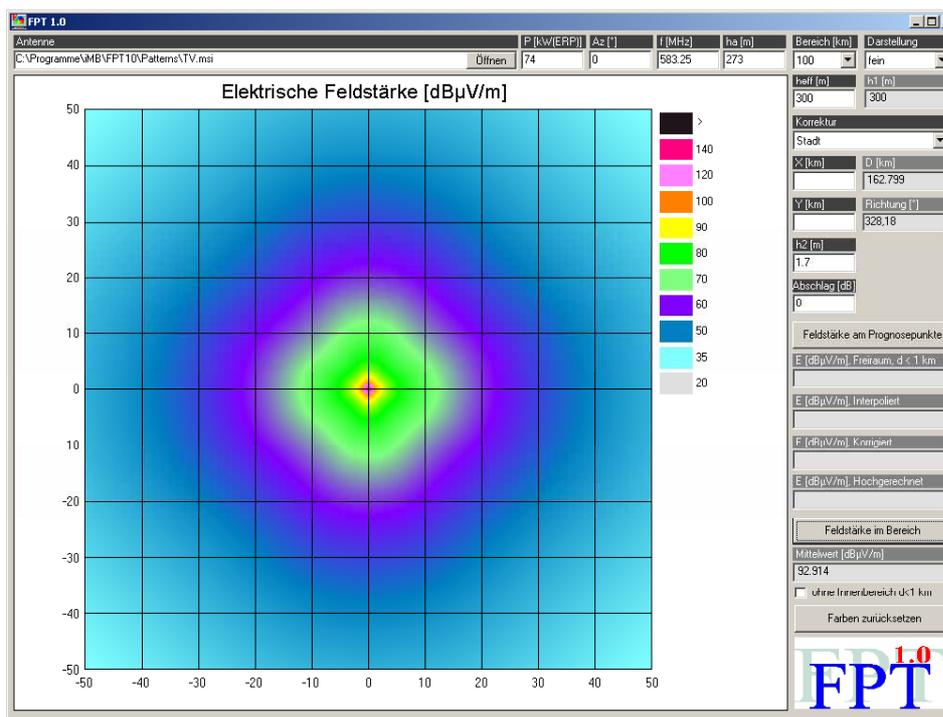


Bild II.3.11: Simulationsergebnisse von FPT mit Korrektur der Empfangsantennenhöhe auf 1,7 m (Korrektur für „Stadt“), Kanal 35

Bei FPT ist die Flächenberechnung und die Berechnung an einzelnen Punkten entkoppelt. Es muss demnach nicht für jeden Betrachtungspunkt die flächige Berechnung durchgeführt werden. Hierdurch kann die geringe Rechenzeit nochmals reduziert werden und die Resultate liegen innerhalb weniger Minuten vor. Hierbei nehmen aber die Eingaben des Benutzers den wesentlich größeren Zeitrahmen ein. Analog zu den vorherigen Softwarepakten sind in der folgenden Tabelle die Simulationsergebnisse für die beiden betrachteten Kanäle dargestellt.

Vergleichspunkt	Kanal 35			Kanal 56		
	Messung [dBµV/m]	Berechnung [dBµV/m]	Abweichung [dB]	Messung [dBµV/m]	Berechnung [dBµV/m]	Abweichung [dB]
1	73,0	87,5	14,5	79,1	86,8	7,7
2	84,6	90,2	5,6	80,8	89,5	8,7
3	71,4	77,1	5,7	67,1	77,5	10,4
4	78,3	76,2	-2,1	79,0	78,8	-0,2
5	68,0	74,2	6,2	67,5	73,5	6,0
6	86,7	83,3	-3,4	78,3	82,6	4,3
7	69,7	74,8	5,1	69,9	74,1	4,2
8	78,4	75,1	-3,3	79,8	74,4	-5,4
9	76,9	74,2	-2,7	72,4	73,5	1,1
10	67,4	73,3	5,9	69,7	72,6	2,9
11	70,9	72,4	1,5	72,1	71,9	-0,2
12	48,8	67,6	18,8	48,6	66,9	18,3
13	62,3	59,0	-3,3	61,9	58,3	-3,6

Tabelle II.3.6: Simulationsergebnis FPT; Abweichung als „Berechnung minus Messung“

Betrachtet man die Tabelle II.3.6, zeigt sich eine ähnliche Verteilung der Abweichung wie bei den oben betrachteten Simulationsergebnissen.

Um einen besseren Überblick über die Berechnungsergebnisse zu erhalten, sind in den folgenden Bildern die einzelnen Simulationsergebnisse in Form der Abweichung von Berechnung und Messung zu sehen. Ein positiver Wert bedeutet hier, dass der Wert der Immissionsprognose über dem Messwert lag.

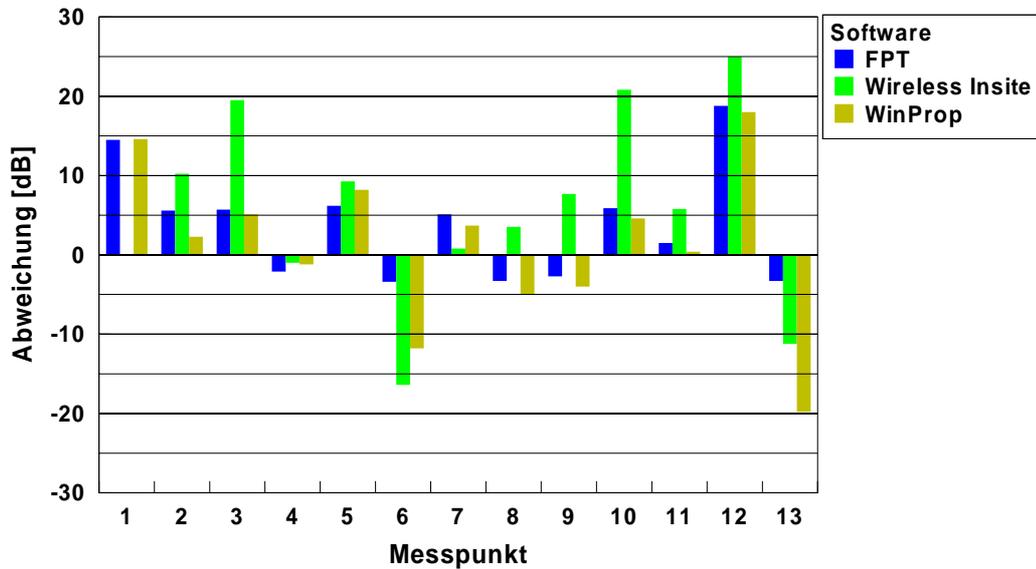


Bild II.3.12: Vergleich zwischen Berechnungsergebnis und Messergebnis, Kanal 35

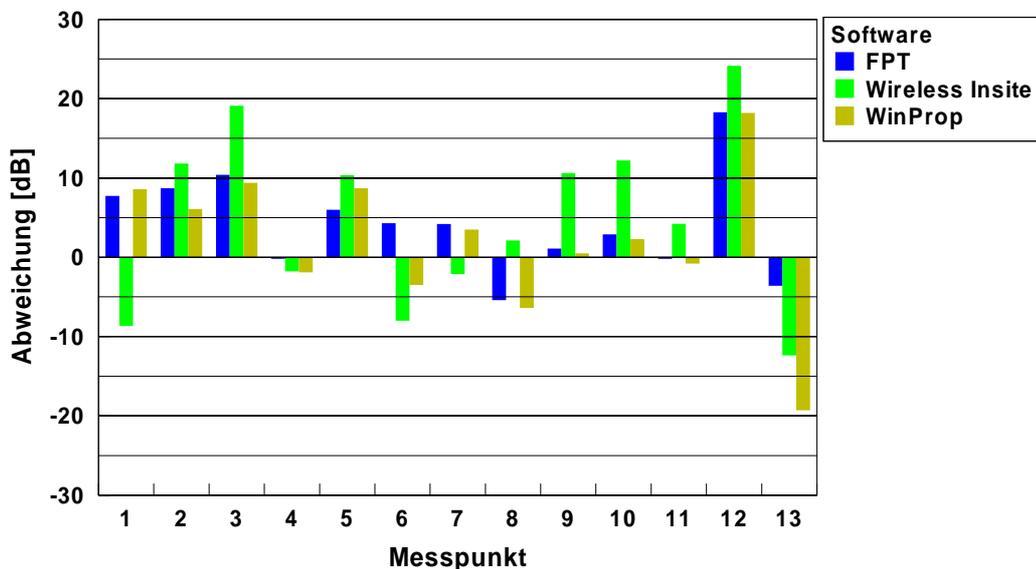


Bild II.3.13: Vergleich zwischen Berechnungsergebnis und Messergebnis, Kanal 56

Der Vergleich der einzelnen Abweichung in Bild II.3.12 und Bild II.3.13 zeigt jeweils ein ähnliches Verhalten. Keines der betrachteten Programme sticht hervor.

Darüber hinaus kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass obwohl bei den strahlenoptischen Programmen keine Gebäudeinformationen berücksichtigt wurden, sich aus den Ergebnissen keine Tendenz bezüglich einer konfigurationsabhängigen Über- bzw. Unterbewertung feststellen lässt. Auch ein konfigurationsabhängiges Verhalten von FTP in der Prognose ist hier nicht festzustellen.

Die über 26 Vergleichspunkte arithmetisch und betragsmäßig gemittelte Abweichung ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

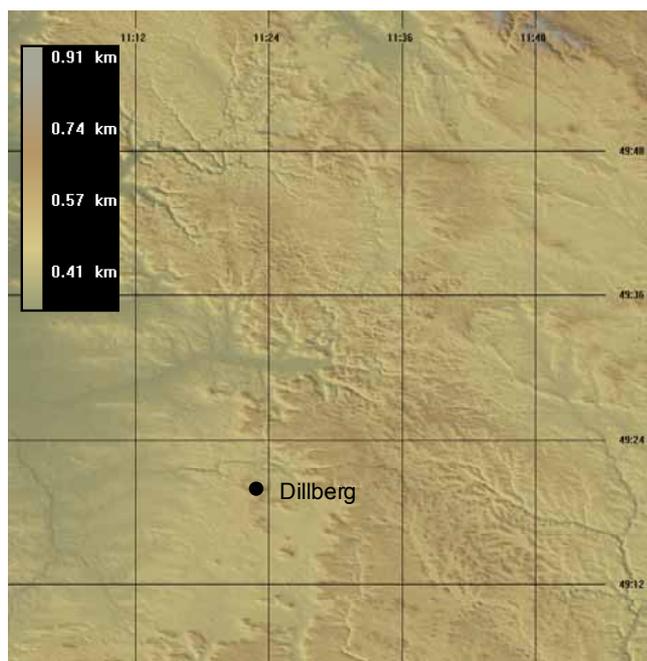
FPT	Wireless Insite	WinProp
5,8 dB	9,9 dB	7,2 dB

Tabelle II.3.17: Mittlere Abweichung der einzelnen Programme über die Vergleichspunkte

Es ist an dieser Stelle festzuhalten, dass das selbst entwickelte Programm FPT im Gegensatz zu den beiden anderen Softwarepakete eine geringere mittlere Abweichung aufweist. In diesem Zusammenhang ist darüber hinaus noch die erheblich geringere Modellierungs- und Rechenzeit von FPT hervorzuheben. Trotz des relativ einfachen Verfahrens sind keine systematischen Unterschiede in den Ergebnissen zu erkennen.

II.3.3 Senderstandort Dillberg

Im Folgenden Abschnitt wird analog zu den vorherigen Betrachtungen der Senderstandort Dillberg südöstlich von Nürnberg betrachtet. Das folgende Bild stellt wieder einen Überblick der Senderumgebung in Form der Geländehöhe dar.



Dillberg

- Koordinaten:
E 11°22'57"
N 49°19'28"
- Geländehöhe über NN
595 m

Bild II.3.14: Senderstandort Dillberg

Bild II.3.15 zeigt den Überblick über die Lage des Senderstandortes und der beiden Vergleichspunkte für die folgenden Betrachtungen.

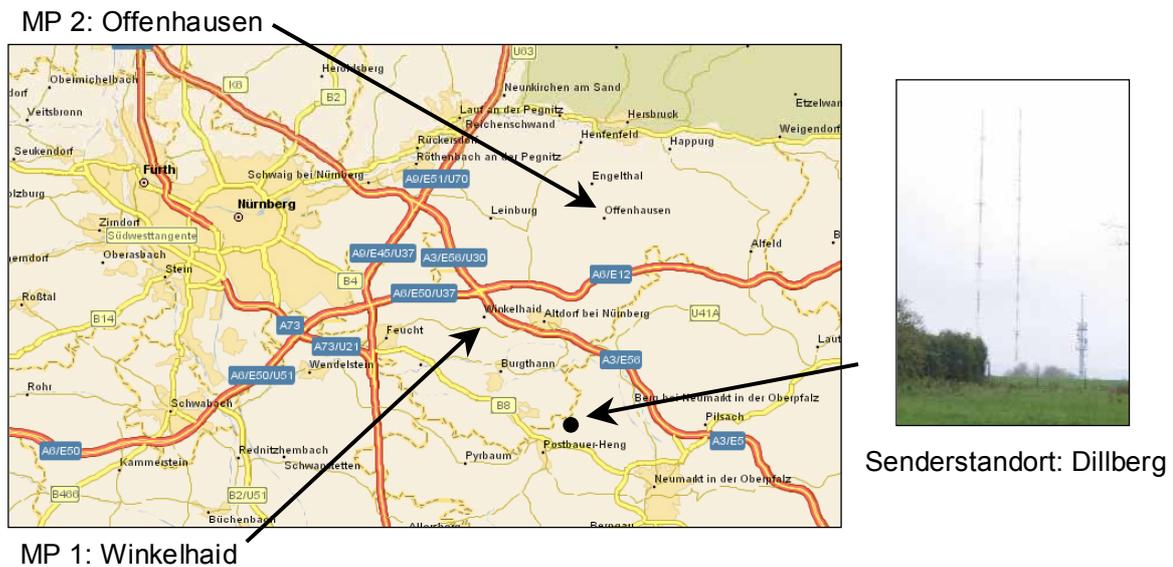


Bild II.3.15: Vergleichspunkte für die Region Nürnberg

Es werden an diesem Standort folgende der oben definierten Konfigurationen untersucht:

- verschiedene Abstände vom Sender
- Stadt: Messpunkt umgeben von niedriger dichter Bebauung
- Vorstadt: Messpunkt umgeben von lockerer Bebauung

Tabelle II.3.8 zeigt die Parameter für die Berechnungsprogramme.

Kanal	Frequenz [MHz]	mittlere Sendeleistung [kW] ERP	Sendehöhe ü. Grund	Mittlere effektive Antennenhöhe	Antennengewinn [dBd]
6	182,25	37	210 m	360 m	15

Tabelle II.3.8: Simulationsparameter

Als Frequenz ist wieder die Frequenz des Bildträgers in MHz angegeben. Wie bereits im obigen Beispiel wurde der analoge Leistungswert aus [Witt 04] in eine effektive Leistung bezogen auf einen $\lambda/2$ -Dipol umgerechnet. Zu beachten ist hierbei erneut die Verwendung in den jeweiligen Programmen. Bei Wireless Insite muss dieser Leistungswert nochmals umgerechnet werden.

In Tabelle II.3.9 sind die beiden Vergleichspunkte mit den jeweiligen Parametern dargestellt.

MP Nr.	Ort	Straße	Nr.	GK-Bessel Hochwert [m]	GK-Bessel Rechtswert [m]	Dillberg			Korrektur für FPT
						lat. Abs. [km]	x-Abstand [km]	y-Abstand [km]	
1	Winkelhaid	Bahnstraße	14	5472827	4449422	9,385	-5,797	7,381	Stadt
2	Offenhausen	Keilbergstr.	10	5479021	4457652	13,791	2,433	13,575	Vorstadt

Tabelle II.3.9: Vergleichspunkte, Standort und Abstände

Zunächst werden die Simulationsergebnisse von dem Softwarepaket Wireless Insite vorgestellt. Das folgende Bild gibt die Simulationsumgebung in zwei- bzw. dreidimensionaler Darstellung wieder. In Bild II.3.17 sind die Ausbreitungswege ausgehend vom Sender und dessen dreidimensionale Abstrahlcharakteristik dargestellt.

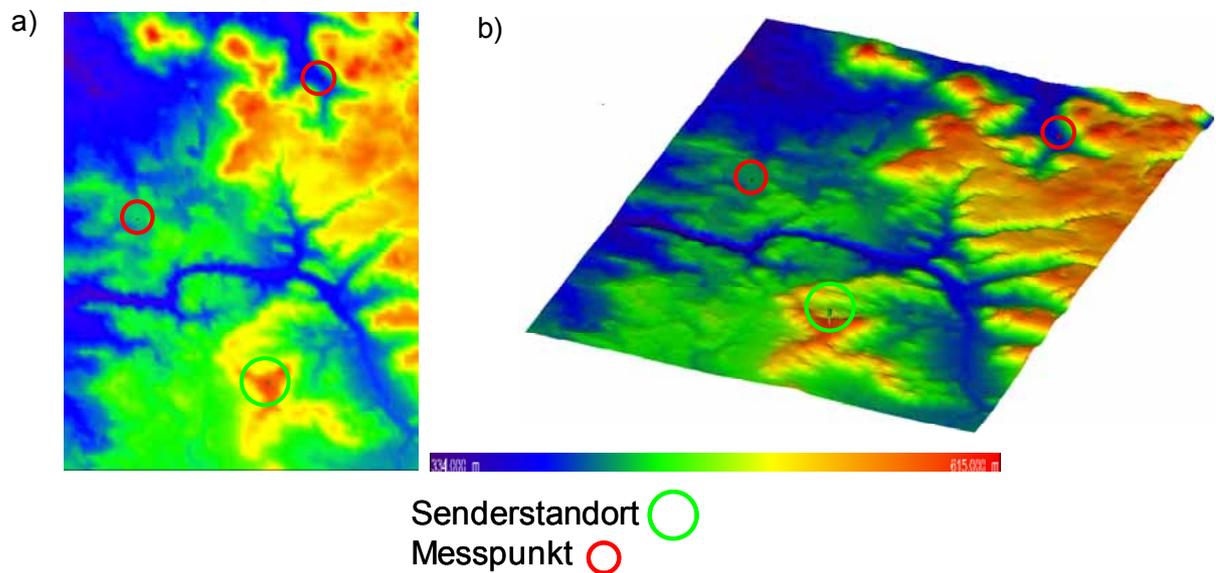


Bild II.3.16: Simulationsraum von Wireless Insite für die Region des Senderstandorts Dillberg
 a) 2D
 b) 3D

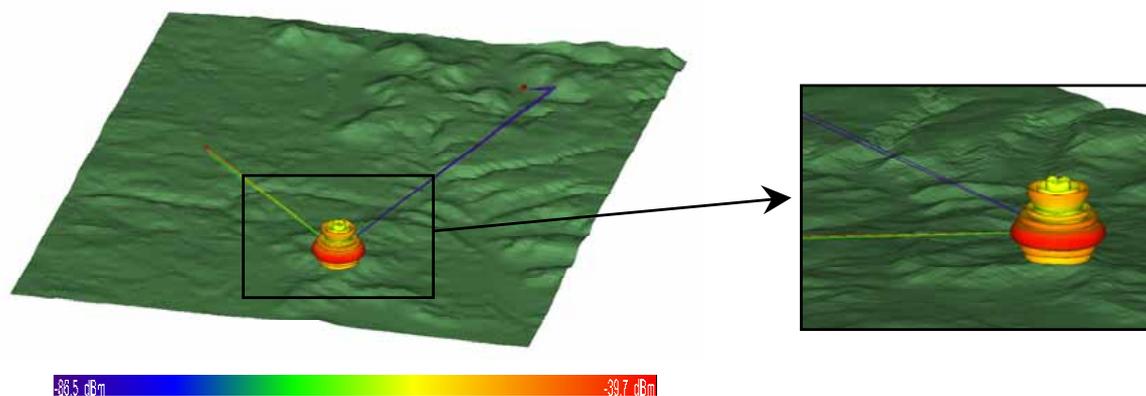


Bild II.3.17: Ausbreitungswege und 3D Antennendiagramm

Der Vergleich zwischen den Simulationen und den Messungen ist analog zu den Betrachtungen im vorherigen Abschnitt in nachfolgender Tabelle zu sehen.

Vergleichspunkt	Kanal 6		
	Messung [dB μ V/m]	Berechnung [dB μ V/m]	Abweichung [dB]
1	83,7	69,8	-13,9
2	69,5	30,8	-38,7

Tabelle II.3.10: Simulationsergebnis mit Wireless Insite

Betrachtet man den Vergleichspunkt 2 auf Bild II.3.16 fällt auf, dass dieser umringt ist von Bergen – er liegt in einer Talmulde und ist auf direktem Weg vom Sender nicht zu erreichen. Zieht man nun das Simulationsergebnis aus Tabelle II.3.10 hinzu, ist an dieser Stelle festzuhalten, dass Wireless Insite gerade bei der hier vorliegenden Konfiguration die gemessene elektrische Feldstärke deutlich unterbewertet. Diese ist auch durch die Abweichungen vom Antennendiagramm nicht mehr zu erklären.

Nachfolgend stehen die Simulationsergebnisse der Software WinProp im Mittelpunkt. Die Simulationsumgebung mit den farblich dargestellten Höhenverteilungen ist in Bild II.3.18 zu sehen.

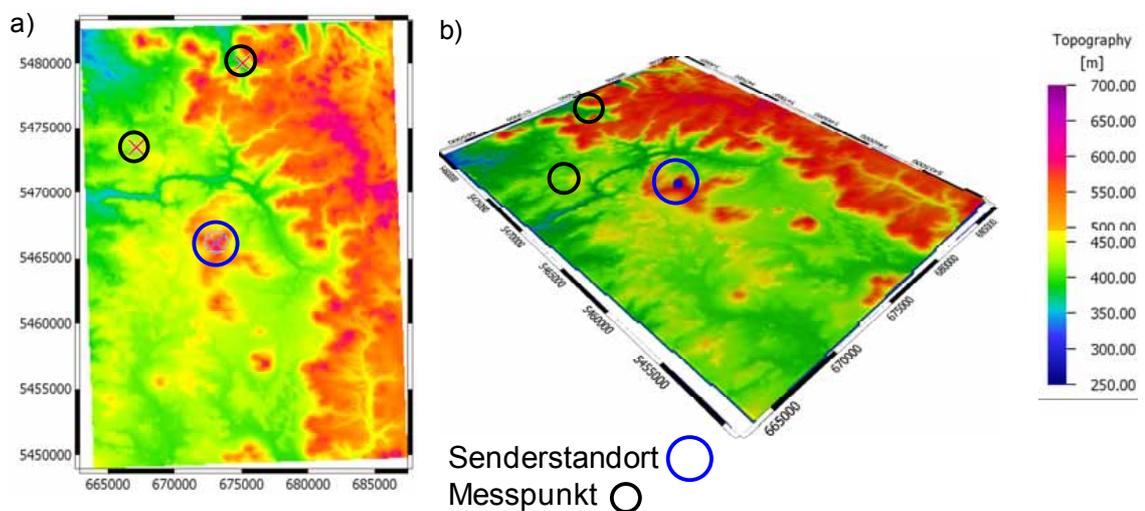


Bild II.3.18: Simulationsraum von Wireless Insite für die Region des Senderstandorts Dillberg
a) 2D
b) 3D

Die aus der Berechnung resultierende flächige Feldstärkeverteilung mit dem Senderstandort und den beiden Messpunkten ist in folgendem Bild zu sehen.

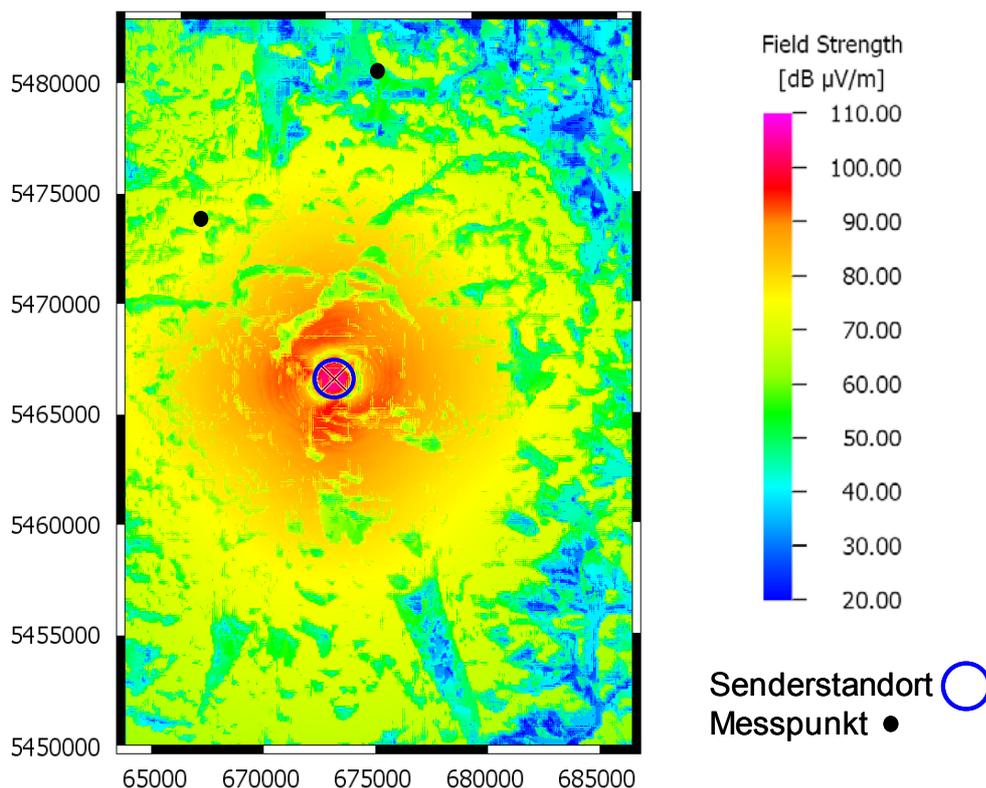


Bild II.3.19: Simulationsergebnis von WinProp für den Dillberg, Kanal 6

Die Ergebnisse der Berechnung sind in folgender Tabelle in bereits bekannter Art und Weise dargestellt.

Vergleichspunkt	Kanal 6		
	Messung [dBµV/m]	Berechnung [dBµV/m]	Abweichung [dB]
1	83,7	73,4	-10,3
2	69,5	53,9	-15,6

Tabelle II.3.11: Simulationsergebnisse WinProp

Beim Vergleich von Messung und Berechnung mit WinProp tritt die gleiche Tendenz zu Tage, wie sie schon bei Wireless Insite aufgetreten ist. Die elektrische Feldstärke wird in Bezug zur gemessenen unterbewertet, allerdings nicht in so großem Maße.

In Tabelle II.3.12 sind die Simulationsergebnisse dargestellt, wie sie mit FPT berechnet wurden. Für den Eindruck einer flächigen Darstellung der Feldstärke sei auf die Bilder II.3.10 und II.3.11 aus dem vorherigen Abschnitt verwiesen.

Vergleichspunkt	Kanal 6		
	Messung [dBµV/m]	Berechnung [dBµV/m]	Abweichung [dB]
1	83,7	79,4	-4,3
2	69,5	83,4	13,9

Tabelle II.3.12: Simulationsergebnis FPT

Die Simulationsergebnisse mit dem Programm FPT zeigen im Gegensatz zu den Resultaten der beiden anderen Programme am Messpunkt 2 keine Unterbewertung.

Um auch hier einen besseren Überblick über die simulierten Ergebnisse zu erhalten, sind im folgenden Bild die Simulationsresultate in Form der Abweichung von Berechnung und Messung zu sehen.

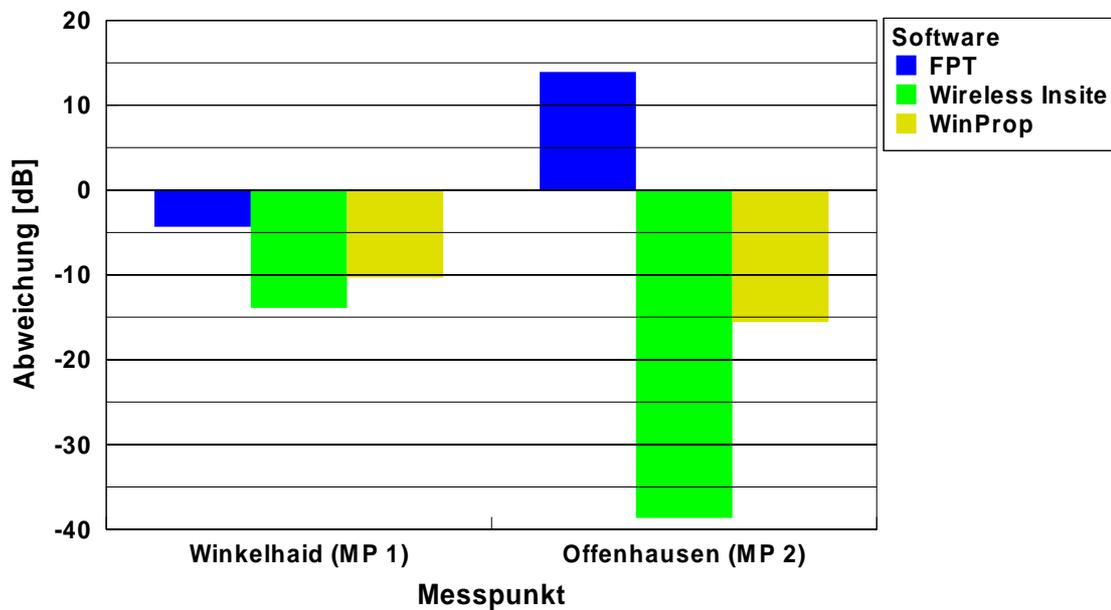


Bild II.3.20: Vergleich zwischen Berechnungsergebnis und Simulationsergebnis, Kanal 9

Wie bei der Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen Programmen angemerkt, hat Wireless Insite besonders an Vergleichspunkt 2 die gemessene Immission deutlich unterbewertet.

Darüber hinaus kann auch hier festgehalten werden, dass obwohl bei den strahlenoptischen Programmen keine Gebäudeinformationen berücksichtigt wurden, sich aus den Ergebnissen keine Tendenz bezüglich einer konfigurationsabhängigen Über- bzw. Unterbewertung feststellen lässt. Auch ein konfigurationsabhängiges Verhalten von FTP in der Prognose ist hier nicht festzustellen.

II.3.4 Direkte Senderumgebung

Im Folgenden Abschnitt liegt das Betrachtungsgebiet in der mehr oder weniger unmittelbaren Umgebung des Senders. Der Untersuchung liegt erneut der Senderstandort Dillberg aus vorherigem Abschnitt zugrunde. Ausgehend vom Sender werden Vergleichspunkte auf zwei Strahlen verteilt. Wie in den Bildern II.3.21 und II.3.22 erkennbar ist dies auch aufgrund von eingeschränkter Erreichbarkeit nur begrenzt zu erreichen.

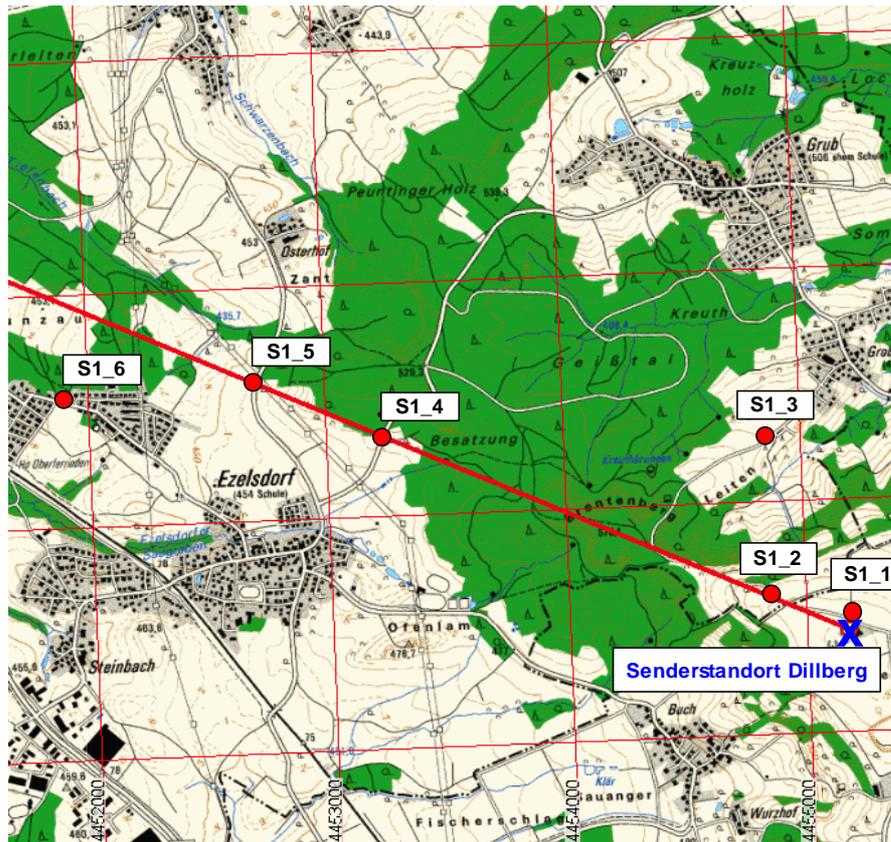


Bild II.3.21: Senderstandort Dillberg mit Vergleichspunkten in der direkten Umgebung Linie 1 (S1)

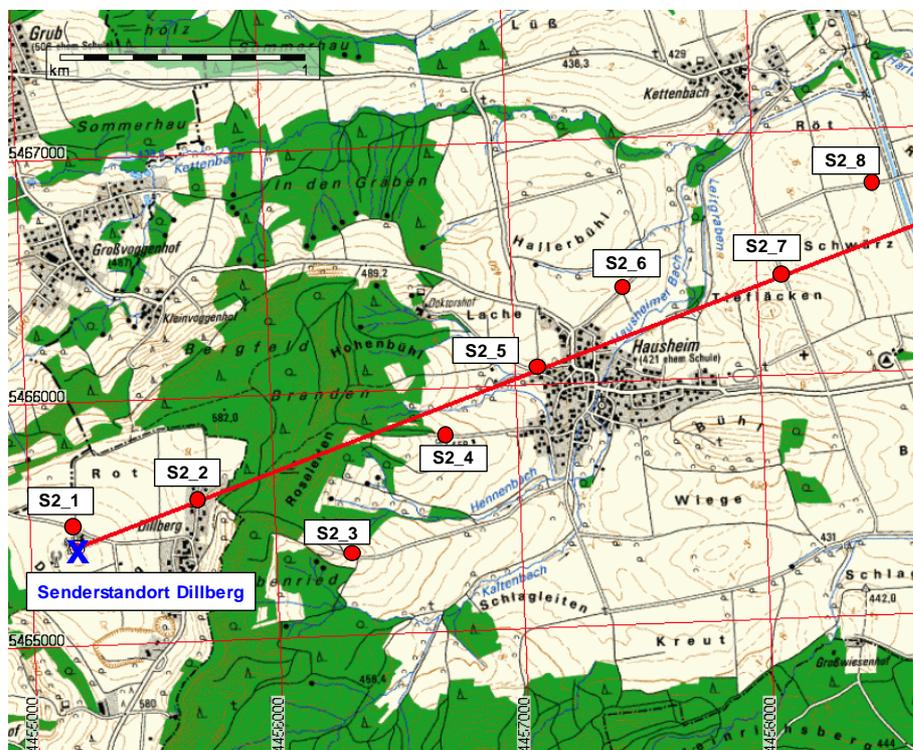


Bild II.3.22: Senderstandort Dillberg mit Vergleichspunkten in der direkten Umgebung Linie 2 (S2)

Durch die auf diesen beiden radial verlaufenden Linien verteilten Messpunkte werden folgende Konfigurationen repräsentiert:

- ländliche Umgebung
- Nahbereich: direkte Senderumgebung zur Ermittlung der maximalen Exposition

Die Punkte mit ihren verschiedenen Parametern und der dazugehörigen Korrektur für FPT (FR steht hierbei für Freiraumausbreitung) sind den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen.

Punkt	Länge [Grad]	Breite [Grad]	Dillberg			Korrektur für FPT
			lateraler Abs. [km]	x-Abstand [km]	y-Abstand [km]	
S1_1	49,32587	11,38340	0,059	-0,036	0,047	d < 1km, FR
S1_2	49,32700	11,37859	0,423	-0,385	0,175	d < 1km, FR
S1_3	49,33303	11,37947	0,901	-0,315	0,845	d < 1km, FR
S1_4	49,33209	11,35582	2,170	-2,035	0,755	Land, offen
S1_5	49,33464	11,34921	2,721	-2,513	1,043	Land, offen
S1_6	49,33447	11,33688	3,562	-3,409	1,032	Land, offen

Tabelle II.3.13: Vergleichspunkte für Linie 1 (S1) mit dem dazugehörigen Abstand vom Senderstandort Dillberg und entsprechender Korrektur für FPT

Punkt	Länge [Grad]	Breite [Grad]	Dillberg			Korrektur für FPT
			lateraler Abs. [km]	x-Abstand [km]	y-Abstand [km]	
S2_1	49,32587	11,38340	0,059	-0,036	0,047	d < 1km, FR
S2_2	49,32596	11,39016	0,458	0,455	0,052	d < 1km, FR
S2_3	49,32453	11,39903	1,105	1,099	-0,112	Land, offen
S2_4	49,32876	11,40608	1,653	1,615	0,355	Land, offen
S2_5	49,33120	11,40913	1,942	1,839	0,624	Land, offen
S2_6	49,33328	11,41315	2,297	2,133	0,853	Land, offen
S2_7	49,33422	11,42357	3,043	2,891	0,952	Land, offen
S2_8	49,33769	11,42959	3,588	3,331	1,335	Land, offen

Tabelle II.3.14: Vergleichspunkte für Linie 2 (S2) mit dem dazugehörigen Abstand vom Senderstandort Dillberg und entsprechender Korrektur für FPT

In Bild II.3.23 ist zunächst einmal die Simulationsumgebung in zwei- bzw. dreidimensionaler Darstellung im Programm Wireless Insite zu sehen. Die Geländehöhen sind durch die entsprechenden Farben in der Legende gekennzeichnet. Darüber hinaus sind erneut der Senderstandort und exemplarisch ein Messpunkt durch die farbigen Kreise hervorgehoben.

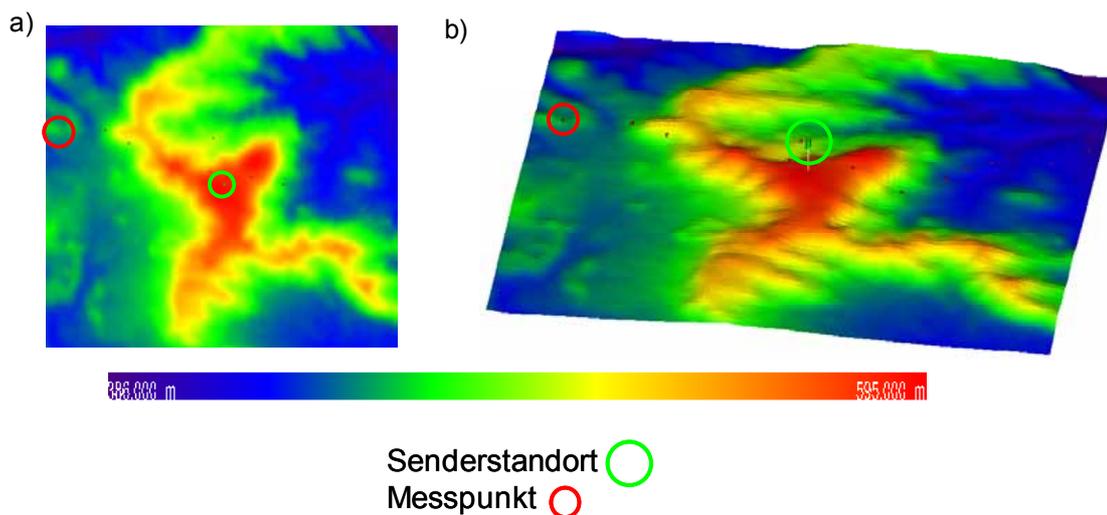


Bild II.3.23: Simulationsraum von Wireless Insite für die direkte Senderumgebung des Senderstandorts Dillberg
a) 2D
b) 3D

Zur besseren Übersicht zeigt das folgende Bild nochmals die genaue Lage der einzelnen Vergleichspunkte in Bezug zum Senderstandort.

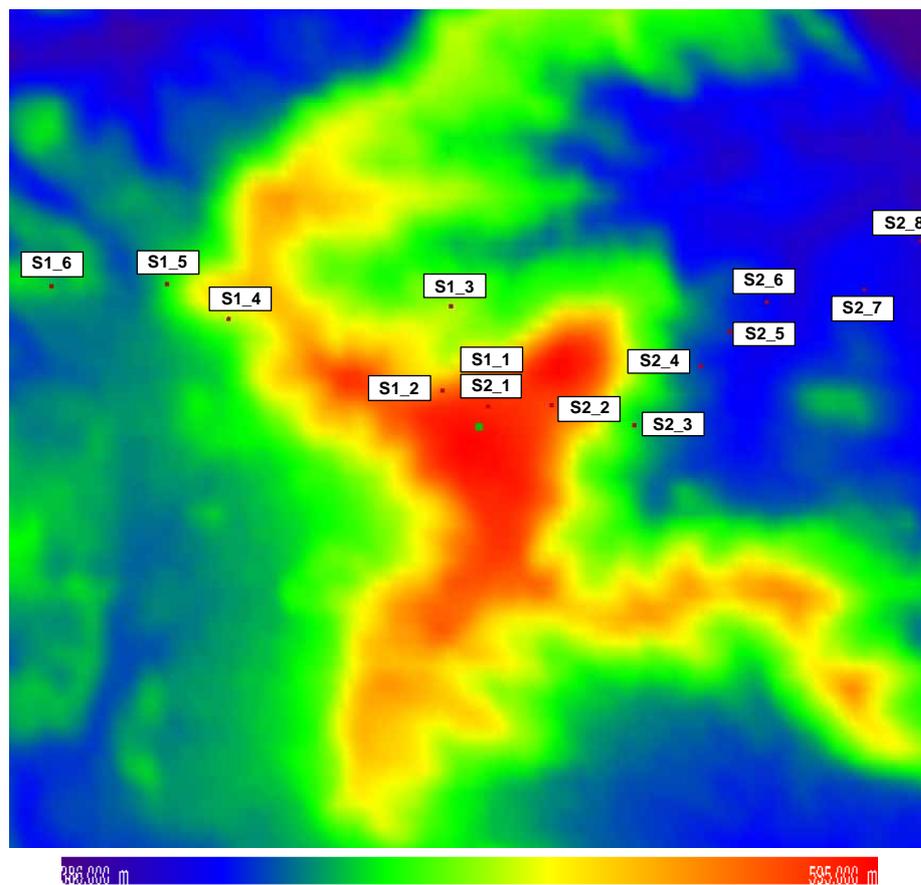


Bild II.3.24: Lage der Vergleichspunkte in Relation zum Senderstandort (grüner Punkt)

Exemplarisch für 3 Punkte sind im folgenden Bild die Ausbreitungswege dargestellt, die mit Wireless Insite berechnet wurden.

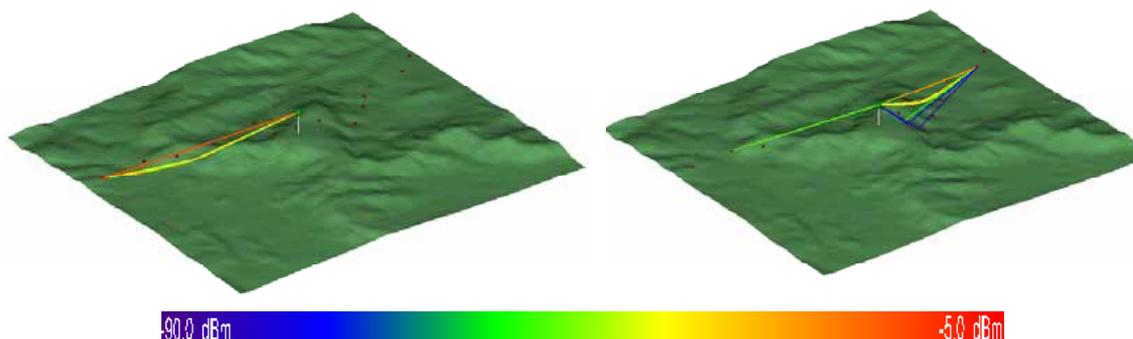


Bild II.3.25: Ausbreitungswege Wireless Insite

Die Tabelle II.3.15 gibt einen Überblick über die genauen Simulationsergebnisse an den jeweiligen Messpunkten. Hier sind für den Kanal 6 einmal der berechnete und der gemessene Wert sowie deren Abweichung zu sehen.

Vergleichspunkt	Kanal 6		
	Messung [dB μ V/m]	Berechnung [dB μ V/m]	Abweichung [dB]
S1_1	100,2	91,6	-8,7
S1_2	98,0	100,0	2,1
S1_3	100,1	89,5	-10,6
S1_4	100,3	105,9	5,6
S1_5	97,4	58,9	-38,5
S1_6	99,6	98,6	-1,0
S2_1	100,2	91,6	-8,7
S2_2	103,6	97,7	-5,9
S2_3	100,4	78,9	-21,5
S2_4	100,5	89,8	-10,8
S2_5	96,0	95,4	-0,5
S2_6	103,8	92,1	-11,6
S2_7	99,0	86,5	-12,6
S2_8	98,0	85,1	-12,9

Tabelle II.3.15: Wireless Insite

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse, die mit der Software WinProp berechnet wurden, dargestellt. Zunächst ist in Bild II.3.26 wie bereits bei den vorangegangenen Darstellungen auch, die Simulationsumgebung mit den entsprechenden Höhenverläufen sowie den dazugehörigen Vergleichspunkten zu sehen. Daran anschließend in Bild II.3.27 ist das flächige Simulationsergebnis dargestellt.

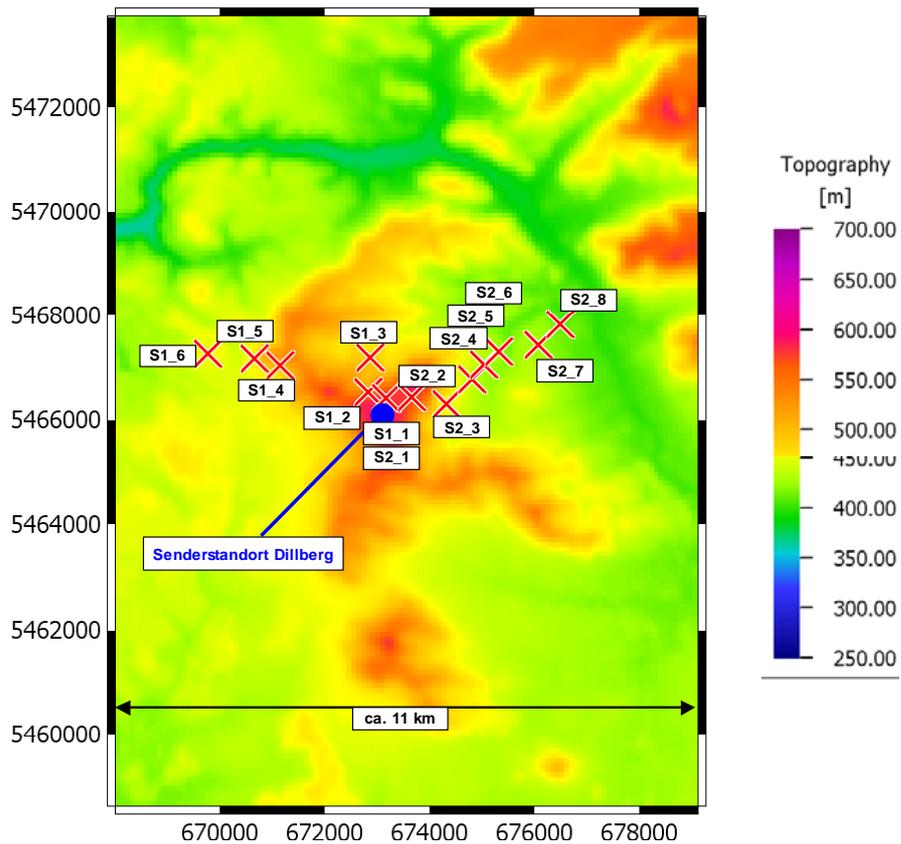


Bild II.3.26: Berechnungspunkte und Simulationsumgebung von WinProp

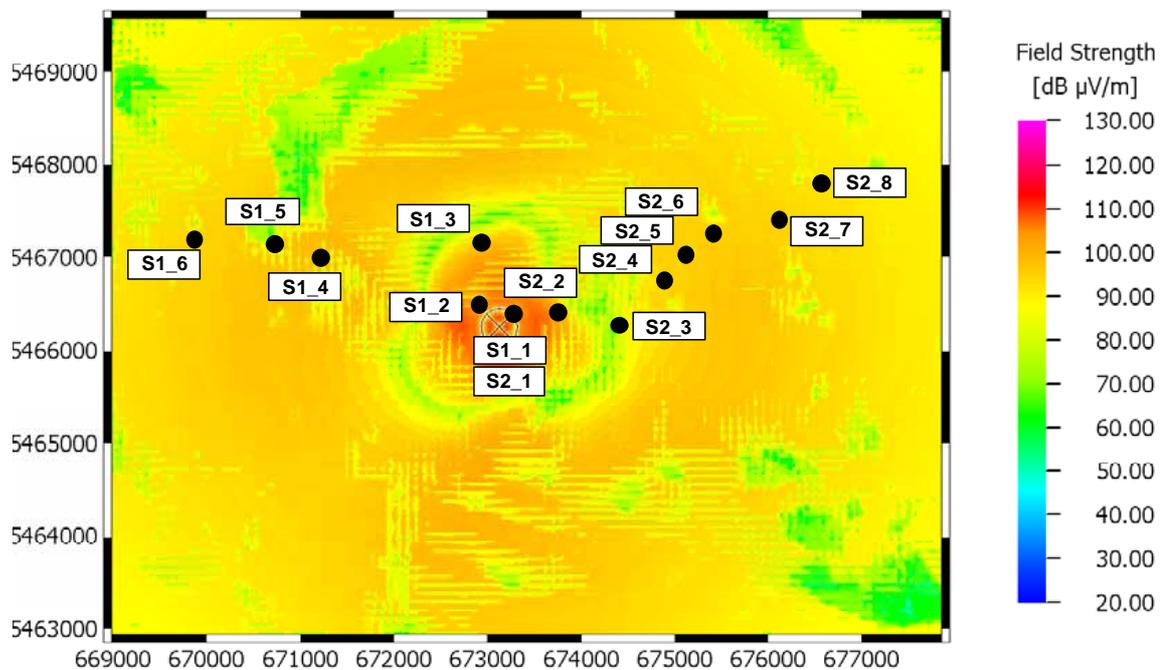


Bild II.3.27: Berechnungsergebnis mit WinProp

Tabelle II.3.16 enthält wie auch schon bei den vorangegangenen Beispielen die Einzelresultate für die jeweiligen Vergleichspunkte aufgeteilt in Messwert, Berechnungswert und Abweichung.

Vergleichspunkt	Kanal 6		
	Messung [dB μ V/m]	Berechnung [dB μ V/m]	Abweichung [dB]
S1_1	100,2	99,8	-0,4
S1_2	98,0	104,8	6,8
S1_3	100,1	93,4	-6,7
S1_4	100,3	98,3	-2,0
S1_5	97,4	84,5	-12,9
S1_6	99,6	93,9	-5,7
S2_1	100,2	99,8	-0,4
S2_2	103,6	103,7	0,1
S2_3	100,4	74,9	-25,5
S2_4	100,5	93,5	-7,0
S2_5	96,0	95,7	-0,3
S2_6	103,8	95,3	-8,5
S2_7	99,0	94,4	-4,6
S2_8	98,0	80,0	-18

Tabelle II.3.16: Simulationsergebnisse WinProp

Die Tabelle II.3.17 enthält die Einzelresultate, die mit der Software FPT berechnet wurden.

Vergleichspunkt	Kanal 6		
	Messung [dB μ V/m]	Berechnung [dB μ V/m]	Abweichung [dB]
S1_1	100,2	130,7	30,5
S1_2	98,0	119,0	21,1
S1_3	100,1	112,8	12,7
S1_4	100,3	97,3	-3,0
S1_5	97,4	94,5	-2,9
S1_6	99,6	91,9	-7,7
S2_1	100,2	130,6	30,4
S2_2	103,6	119,2	15,6
S2_3	100,4	106,2	5,7
S2_4	100,5	100,9	0,4
S2_5	96,0	98,7	2,7
S2_6	103,8	96,5	-7,3
S2_7	99,0	93,4	-5,6
S2_8	98,0	91,5	-6,5

Tabelle II.3.17: Simulationsergebnisse FPT

Zu Überblickzwecken und zusammenfassend werden die Ergebnisse der verschiedenen Softwarepakete an jeden Berechnungspunkt miteinander verglichen. Hierfür wird erneut die Abweichung zwischen Mess- und Berechnungswert herangezogen.

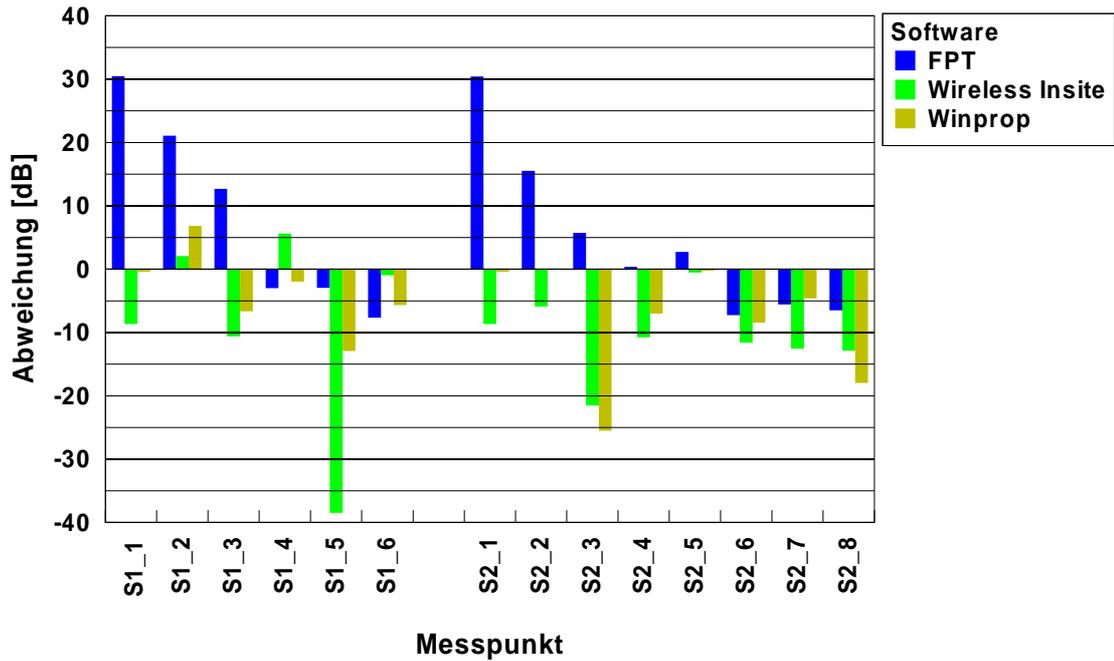


Bild II.3.28: Abweichung zwischen Mess- und Berechnungswert

Bild II.3.28 zeigt wiederum ein ähnliches Resultat wie es schon bei den vorherigen Betrachtungen aufgetreten ist. Keines der betrachteten Programme sticht deutlich hervor.

Im Folgenden werden nur diejenigen Vergleichspunkte behandelt, die weniger als 1 km vom Sender entfernt sind. Hier wird bei dem vereinfachten Prognoseprogramm FPT mit Freiraumsausbreitung unter der Berücksichtigung des horizontalen Abstrahldiagramms gerechnet.

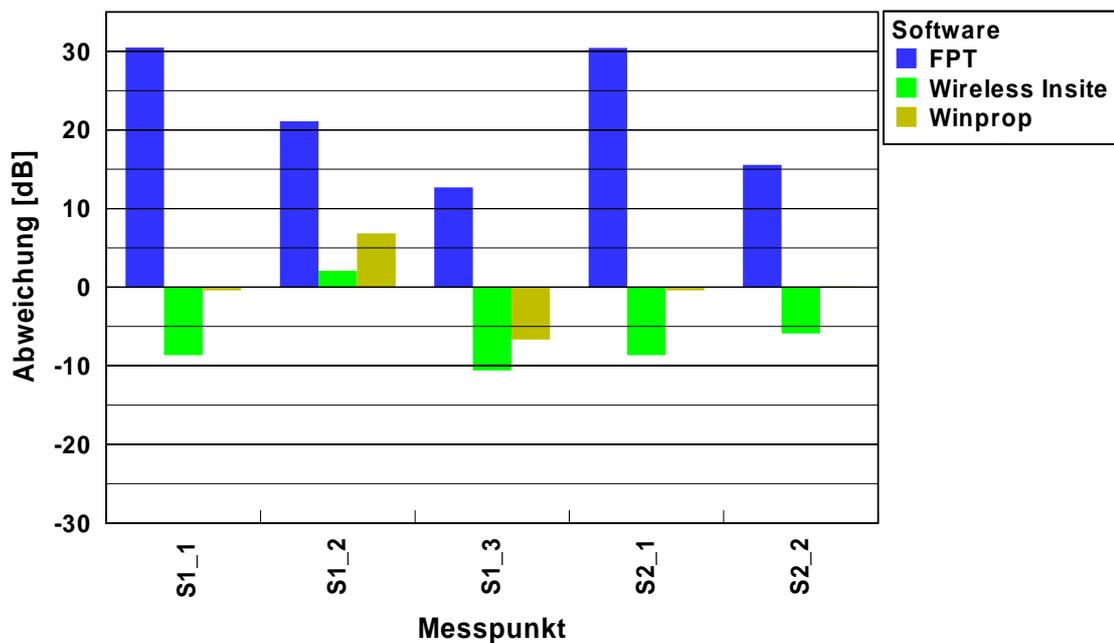


Bild II.3.29: Vergleich der Simulationsergebnisse im Bereich bis 1 km

Aus dem obigen Bild wird deutlich ersichtlich, dass das einfache Programm zur Expositionsabschätzung gerade im direkten Umfeld des Senders die tatsächliche Immission deutlich überbewertet.

Dies wird auch nochmals deutlich, wenn man die mittlere Abweichung der einzelnen Programme miteinander vergleicht. In Tabelle II.3.18 ist zunächst einmal das Ergebnis für alle in diesem Abschnitt betrachteten Punkte zu sehen, wobei Tabelle II.3.19 alle Punkte außerhalb des Bereichs von 1 km, bei dem bei FTP mit Freiraumausbreitung gerechnet wird, berücksichtigt.

FPT	Wireless Insite	WinProp
10,9 dB	10,8 dB	7,1 dB

Tabelle II.3.18: Mittlere Abweichung der einzelnen Programme über aller hier betrachteten Vergleichspunkte

FPT	Wireless Insite	WinProp
4,7 dB	12,8 dB	9,4 dB

Tabelle II.3.19: Mittlere Abweichung der einzelnen Programme über die Vergleichspunkte ab einem Abstand von 1 km zum Sender

Die obigen Tabellen zeigen deutlich, dass die Berechnung mit reiner Freiraumausbreitung unter der Beachtung des horizontalen Abstrahldiagramms im Bereich bis 1 km Entfernung zum Sender deutlich das Gesamtergebnis von FPT beeinflusst. Hier ist demnach festzuhalten, dass für die Kapitel III folgenden Berechnungen auf jeden Fall mit einem Abschlag auf die berechnete Feldstärke gerechnet werden muss.

II.3.5 Fazit

In den vorherigen Abschnitten und Kapiteln wurde die rechentechnische Bestimmung der Expositionssituation durch Rundfunksendeanlagen näher untersucht. Hierbei stand im Vordergrund, verschiedene Berechnungsverfahren zu überprüfen, in wie weit sie sich für einen im Arbeitspaket 3 der vorliegenden Untersuchung rechentechnischen Vergleich von Messungen und Simulation eignen. Neben kommerziell verfügbaren Softwarepaketen sollte auch ein vereinfachtes Verfahren entwickelt werden.

Insgesamt gesehen, konnten durch den Einsatz von strahlenoptischen Verfahren bei Vernachlässigung der unmittelbaren Senderumgebung keine genaueren Ergebnisse erzielt werden als mit dem einfachen Programm FPT. Dies wird auch nochmals durch die über *alle* 42 Vergleichspunkte gemittelte betragsmäßige Abweichung verdeutlicht, die in der folgenden Tabelle dargestellt ist.

FPT	Wireless Insite	WinProp
7,7 dB	11,1 dB	7,7 dB

Tabelle II.3.20: Mittlere betragsmäßige Abweichung der einzelnen Programme über die 42 Vergleichspunkte

Trotzdem bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass die strahlenoptischen Verfahren gerade in der unmittelbaren Umgebung deutlich geringere Abweichungen vorweisen, solange bei FPT nur mit reiner Freiraumausbreitung gerechnet wird. Dies kann aber dadurch kompensiert werden, dass ein Abschlag auf die berechnete Feldstärke angegeben wird. Um hier einen typischen Wert für den Abschlag angeben zu können, wird auch der in Kapitel III durchzuführende Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen herangezogen. So kann eventuell auch ein allgemeingültiger Faktor bestimmt werden.

Bei Wireless Insite besteht die Einschränkung der Annäherung der Geländeoberfläche mit maximal 32000 Dreiecken. Damit ist hiermit nur ein Gebiet von ca. 15 x 15 km darstellbar. Hierdurch und durch die lange Rechenzeit allein für einen einzelnen Punkt kann festgehalten werden, dass gerade für die Berechnung der Feldstärke an einer Vielzahl von Punkten im gesamten Versorgungsgebiet eines Senders Wireless Insite ungeeignet ist.

Das gerade auf die hier vorliegende Aufgabenstellung optimierte Modul für die Berechnung der Feldstärkeverteilung über einer Geländefläche von WinProp bietet im Gegensatz zu Wireless Insite, bei dem bereits für einen Punkt eine Rechenzeit von ca. 1 Stunde verwendet wird, den Vorteil, dass die Feldstärkeverteilung innerhalb des gesamten Versorgungsgebietes eines Senders berechnet und somit auch eine mittlere Feldstärke bestimmt werden kann.

Das eigens entwickelte Programm FPT weist im Vergleich zu den anderen hier betrachteten Softwarepakete eine deutlich geringere Rechenzeit und weniger Eingabeparametern bei mehr oder weniger vergleichbaren Resultaten auf.

In folgender Tabelle sind die jeweiligen Einarbeitungszeiten und die Rechenzeit für ein typisches Szenario zusammengestellt. Hierbei ist nochmals hervorzuheben, dass bei Wireless Insite nicht eine flächendeckende Darstellung der Feldstärke vorliegt, sondern nur einige wenige Punkte.

Softwarepaket	Einarbeitungszeit	Zeit für typisches Szenario
FPT	Stunde	Minuten
Wireless Insite	Tage	Tag
WinProp	Tage	Stunden

Tabelle II.3.21: Vergleich der Einarbeitungszeit bzw. der Zeit für die Modellierung, Berechnung und Auswertung eines typischen Szenarios zwischen den einzelnen Programmen

Abschließend kann somit festgehalten werden, dass für den im Folgenden Arbeitspaket durchzuführenden Vergleich zwischen Messung und Berechnung das Programm FPT heranzuziehen ist.

II.4 Messverfahren zur Expositionsbestimmung bei analogen und digitalen terrestrischen Rundfunksignalen

II.4.1 Grundsätzliches

Nachdem in Kapitel I bereits ausführlich wesentliche Grundanforderungen an die Messtechnik hochfrequenter Felder von analogen und digitalen terrestrischen Rundfunksignalen zusammengestellt und erläutert wurden, werden in diesem Kapitel nun geeignete Messverfahren konkret definiert.

Hierbei geht es einerseits um die Auswahl geeigneter Messausrüstung, die korrekte Einstellung der wesentlichen Messparameter (z.B. Auflösebandbreite, Detektortyp), die Festlegung einer Methode zur Bestimmung der Maximalfeldstärke im Messvolumen sowie um Überlegungen zu Empfindlichkeit und Reproduzierbarkeit.

Bereits vorliegende Messempfehlungen zur Expositionsmesstechnik an Rundfunksendern werden analysiert und bei der Definition der Messverfahren berücksichtigt.

Die im Rahmen dieses Projektes durchzuführenden Messungen dienen dem Zweck, am Messpunkt festzustellen, welche elektrischen Felder durch die einzelnen vorhandenen Signale generiert werden. Konkret besteht die Messaufgabe darin, die vorhandene Feldstärke richtungsunabhängig (d.h. isotrop) zu erfassen, da die Lage des Feldvektors im Raum nicht zuverlässig prognostiziert werden kann. Zu bestimmen ist dabei der Effektivwert (RMS-Wert) des Feldes, da die einschlägigen Grenzwertvorgaben grundsätzlich Effektivwerte als Beurteilungsgrößen für die Exposition der Bevölkerung heranziehen [26. BImSchV], [99/519/EG], [ICNIRP 98]. Zu beachten ist dabei, dass aufgrund dieser leistungsbezogenen Beurteilung (thermische Wirkungen) zur Bestimmung der Summenimmission am Messpunkt die einzelnen gemessenen Feldstärken mit ihrem individuellen Grenzwert gewichtet und anschließend quadratisch summiert werden.

Aufgrund der gestellten Empfindlichkeitsanforderungen, der Frequenzabhängigkeit der Grenzwerte im betrachteten Frequenzbereich sowie der vorgesehenen Auswertungen (Immissionsvergleich zwischen analogen und digitalen Rundfunksignalen) ist auf jeden Fall eine frequenzselektive Messung mit Spektrumanalysator (Messempfänger) und geeigneter Messantenne durchzuführen. Breitbandmessungen scheiden von vorne herein aus und werden im Folgenden auch nicht weiter betrachtet.

II.4.2 Wesentliche Fragestellungen

Im Folgenden werden zunächst die wesentlichen Parameter bzw. mögliche Erfassungsmethoden vorgestellt, die einen Einfluss auf die Größe des Ergebnisses bei der Messung hochfrequenter elektromagnetischer Felder ausüben können.

Erfassungsmethode

Die Messung hochfrequenter Felder mit Spektrumanalysator und kalibrierter Messantenne kann zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen, je nachdem welche Erfassungsmethode verwendet wird.

Die verschiedenen Erfassungsmethoden dienen hauptsächlich einer angemessenen Berücksichtigung der im VHF- und UHF-Bereich typisch anzutreffenden kleinräumigen Feldstärkeschwankungen. Bedingt durch diese Schwankungen (Schwankungsbreite typisch bis zu 30 dB [LEB 91]) ist es schwer, einen für den Messort repräsentativen Expositionswert anzugeben. Wie in Abschnitt II.4.4.1 noch eingehender gezeigt wird, führt die Messung der Feldstärke nur an einem Punkt zu wenig reproduzierbaren Ergebnissen mit hoher Schwankungsbreite. Daher werden meist die folgenden beiden Ansätze zur Findung eines repräsentativen Feldstärkewertes für den Messort als mögliche Lösungsansätze vorgeschlagen:

- Messung der Feldstärke im Messvolumen an einer ausreichenden Anzahl von Einzelpunkten mit anschließender Mittelwertbildung im Volumen ("Spatial Averaging").
- Bestimmung der im Messvolumen vorhandenen Maximalfeldstärke durch geeignete Abtastung des Messvolumens.

Beide Methoden besitzen Vor- und Nachteile in Bezug auf Aufwand und Reproduzierbarkeit. Für die im Rahmen dieses Projektes durchzuführenden Messungen ist eine Methode auszuwählen, die möglichst viele Vorteile auf sich vereint.

Neben der Erfassungsmethode können auch die gewählten Einstellparameter am Messempfänger bzw. Spektrumanalysator einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis ausüben. Würde es sich bei den Aussendungen der Rundfunksender um unmodulierte Signale handeln, so wäre das Messergebnis nicht so stark von der Einstellung des Analysators abhängig. Da jedoch zur Informationsübertragung immer modulierte Signale verwendet werden müssen, die je nach gewähltem Verfahren sehr unterschiedliche Eigenschaften (z.B. Bandbreite, Crestfaktor) besitzen, ist es notwendig, die Einstellparameter am Spektrumanalysator richtig zu wählen, um auch wirklich als Ergebnis den Effektivwert der Feldstärke zu erhalten. Dies gilt insbesondere bei komplexen analogen Signalen (analoges TV) sowie bei den modernen digitalen Übertragungsverfahren (DAB, DVB-T). Bezüglich der korrekten Geräteeinstellung sind also ebenfalls eingehende Untersuchungen notwendig.

Im Folgenden werden die wichtigsten Einstellparameter am Spektrumanalysator vorgestellt, die einen Einfluss auf das Messergebnis haben können. Betrachtet werden dabei ausschließlich moderne Analyser Typen mit digitaler Signalverarbeitung ab der Videoebene. Ältere, rein analoge Spektrumanalysatoren sind für die Erfassung digital modulierter, breitbandiger Signale (DAB, DVB-T) in der Regel nur eingeschränkt brauchbar. Für ein tiefergehendes Studium des Aufbaus und der Eigenschaften moderner Spektrumanalysatoren sei an dieser Stelle auf [RAU 00] verwiesen.

Auflösebandbreite ("Resolution Bandwidth" RBW)

Dieser Parameter legt die 3-dB-Bandbreite des Zwischenfrequenzfilters fest, mit der die Signale im Analysator gemessen werden. Die RBW muss immer mindestens so groß sein, wie die Bandbreite des zu messenden Signals. Ansonsten kommt es zu einem Pegelverlust in der Anzeige, also zu einer Unterbewertung der Immission, da nicht die gesamte Signalenergie das Filter passiert. Wird mit einer zu großen RBW gemessen, kann es vorkommen, dass eventuell vorhandene Nachbarkanäle mit in das Messergebnis einbezogen werden, so dass ein zu großer Wert angezeigt wird. Grundsätzlich sollte also die RBW mindestens so groß wie die Signalbandbreite aber auch nicht wesentlich größer gewählt werden. Bei einigen Spektrumanalysatoren steht kein ausreichend breites ZF-Filter zur Verfügung, um beispielsweise ein DVB-T-Signal korrekt zu erfassen. Hier besteht gegebenenfalls die Möglichkeit, einen geeigneten Korrekturfaktor zu definieren, der den Pegelverlust aufgrund der zu geringen Bandbreite kompensiert.

Videobandbreite ("Video Bandwidth" VBW)

Das Videofilter befindet sich hinter dem Gleichrichter und hat den Zweck, aus dem gleichgerichteten Zwischenfrequenzsignal des Analysators die "Signaleinhüllende" zu extrahieren. Auch die Bandbreite des Videofilters (VBW) sollte nicht kleiner als die RBW gewählt werden, da es sonst ebenfalls zu einem Pegelverlust in der Anzeige kommt. Bei Verwendung des RMS-Detektors muss die VBW sogar deutlich größer als die RBW gewählt werden, damit keine zusätzliche Mittelwertbildung durch das Videofilter entsteht, was die Bestimmung des RMS-Wertes verfälschen würde. Bei vielen modernen Analysatoren kann die VBW an die gewählte RBW bzw. den gewählten Detektor gekoppelt werden, so dass eine diesbezügliche Fehlbedienung von vorne herein vermieden wird.

Sweeptime (SWT) und dargestellter Frequenzbereich (Span)

Im Regelfall wird man bei Expositionsmessungen bestrebt sein, einen möglichst großen Frequenzbereich darzustellen, um beispielsweise gleich alle vorhandenen TV-Signale in den VHF- und UHF-Bändern zu erfassen und die vorhandenen Feldstärkewerte am Analysator ablesen zu können. Aufgrund der begrenzten Auflösung des Analysators sind diesem Wunsch jedoch Grenzen gesetzt. Abhängig von der Zahl der vorhandenen Pixel auf der Frequenzachse (typischer Wert: zwischen 300 und 500 je nach Modell), ergibt sich ein maximal sinnvoll darstellbarer Frequenzbereich, bei dem die einzelnen Funksignale noch vernünftig aufgelöst werden können. Als Faustregel sollte der Quotient aus Span und eingestellter RBW kleiner als die horizontale Pixelanzahl des Analysators sein [RAU 00]. Dies bedeutet zum Beispiel, dass bei einem Spektrumanalysator mit 500 Pixel bei einer RBW von 1 MHz ein Frequenzbereich von maximal 500 MHz sinnvoll dargestellt werden kann.

Gleichzeitig wird meist eine kleine Sweeptime gewünscht, um eine möglichst große Messrate zu erzielen (damit beispielsweise bei Anwendung der "Schwenkmethode" und "normaler" Geschwindigkeit des Abtastvorgangs mit der handgeführten Antenne ausreichend viele Messungen im untersuchten Volumen durchgeführt werden). Allerdings besteht ein Zusammenhang zwischen Sweeptime, RBW und Span: Wird bei kleiner RBW und/oder großem

Span eine zu kleine Sweeptime gewählt, wird der eingestellte Frequenzbereich mit so hoher Geschwindigkeit durchfahren, dass das ZF-Filter nicht mehr ausreichend Zeit hat, vollständig einzuschwingen (die Einschwingzeit eines Filters ist umgekehrt proportional zu seiner Bandbreite), wodurch sich ein Amplitudenverlust in der Anzeige, sowie meist auch noch ein Fehler bei der Frequenzmessung einstellt. Ungeeignete Kombinationen zwischen RBW, Sweeptime und Span werden von modernen Analysatoren in der Regel erkannt und durch einen Warnhinweis (z.B. die Meldung "uncal" auf dem Bildschirm) angezeigt.

Eine zu kleine Sweeptime hat zusätzlich noch einen negativen Einfluss auf den RMS-Detektor. Dieser Einfluss wird bei den derzeit am Markt befindlichen Geräten nach unserer Erfahrung jedoch nicht automatisch vom Gerät signalisiert. Näheres dazu im Abschnitt "Detektortyp".

Eingangsdämpfung (Input Attenuation), Referenzpegel (Ref Lvl)

Grundsätzlich sollte der Referenzpegel so gewählt werden, dass das zu messende Signal den vertikalen Darstellungsbereich des Analysators gut ausnützt, um eine möglichst optimale Ablesbarkeit und Messdynamik sicherzustellen. Mittels der Eingangsdämpfung ist es möglich, starke Signale so weit abzuschwächen, dass es nicht zu Übersteuerungen des Eingangsmischers kommt. Zur Messung besonders schwacher Signale ist es prinzipiell möglich, eine Eingangsdämpfung von 0 dB einzustellen. Hierbei sei allerdings angemerkt, dass es in diesem Fall, insbesondere bei der Verwendung kleiner bikonischer Antennen, zu einer Zunahme der Messunsicherheit kommen kann. Ist die Eingangsdämpfung des Analysators auf 0 dB eingestellt, so wird die Eingangsimpedanz des Analysators durch das Verhalten des ersten Mischers bestimmt. Dessen Eingangsimpedanz schwankt relativ stark über der Frequenz, dadurch wird die Fehlanpassung über der Frequenz ebenfalls ungünstig beeinflusst. Der Effekt eines schwankenden Messergebnisses aufgrund frequenzabhängiger Fehlanpassung wird als ein Beitrag zur Gesamtmessunsicherheit (ΔL : Pegelfehler in dB) des Verfahrens berücksichtigt. Der Pegelfehler ΔL berechnet sich näherungsweise zu [RAU 00]:

$$\Delta L = 20 \cdot \log(1 - r_a r_s) \quad (\text{II.4.1})$$

r_a : Reflexionsfaktor der Antenne

r_s : Reflexionsfaktor des Spektrumanalysatoreingangs

ΔL : Pegelfehler in dB

Der Pegelfehler wird dann besonders groß, wenn man Antennen verwendet, die im Messfrequenzbereich stark fehlangepasst sind ($r_a > 0,5$). Dies ist bei den üblicherweise verwendeten kleinen bikonischen Antennen der Fall, da diese im UKW- und VHF-Bereich deutlich kürzer als die halbe Wellenlänge sind. Eine gut angepasste bikonische Antenne müsste beispielsweise im UKW-Frequenzbereich Abmessungen von etwa 1,5 Meter besitzen, dann wäre sie allerdings sehr unhandlich und im Inneren von Räumen kaum einsetzbar. Verringert werden

kann der Pegelfehler, wenn man sicherstellt, dass der Reflexionsfaktor des Spektrumanalysatoreingangs r_s möglichst gering bleibt. Eine dem ersten Mischer vorgeschaltete Dämpfung von mindestens 10 dB (Input Attenuation) verringert die Fehlanpassung am Eingang des Analysators deutlich ($r_s < 0,1$), so dass deutlich geringere Pegelfehler erwartet werden können als ohne Vordämpfung. Der Preis den man allerdings dafür zahlt, ist ein entsprechender Empfindlichkeitsverlust.

Zusätzlich sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass eine Messung besonders schwacher Signale in Gegenwart von starken Signalen mit einem Spektrumanalysator unter Umständen problematisch ist, da ein Spektrumanalysator üblicherweise kein mitlaufendes Vorselektionsfilter besitzt. Ein starkes Signal kann bei geringer Eingangsdämpfung zu einer Übersteuerung des Eingangsmischers führen, auch wenn der Frequenzbereich des starken Signals am Bildschirm gar nicht dargestellt wird. Vermeidbar sind solche Beeinflussungen durch die Verwendung eines Messempfängers mit mitlaufender Vorselektion.

In der Praxis sind derartige Messfehler allerdings relativ unwahrscheinlich, da bei Vorhandensein eines sehr starken Signals die zusätzlich noch messbaren schwachen Signale (z.B. mehr als 30 dB unter dem dominierenden Signal) keinen nennenswerten Anteil zur Gesamtimmission am Messort beitragen, so dass auf ihre Messung in der Regel verzichtet werden kann.

Detektortyp

Moderne Spektrumanalysatoren stellen dem Nutzer eine Vielzahl verschiedener Detektortypen zur Verfügung. Für die Messung der Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder sind insbesondere die folgenden beiden von Bedeutung:

- Der "Peak-Detektor" (Spitzenwertdetektor, "Max-Peak-Detektor") und
- der "RMS-Detektor" (Effektivwertdetektor; RMS = Root Mean Square)

Mit dem Peak-Detektor, der in allen gängigen Analysatormodellen realisiert ist, ist es möglich bei Signalen mit zeitlich schwankender Hüllkurve den größten Wert der Momentanleistung eines Signals festzustellen. Der RMS-Detektor hingegen ist in der Lage, bei einem zeitlich schwankenden Signal die mittlere Leistung (bzw. den Effektivwert) zu ermitteln. Immer mehr moderne Analysatoren bieten inzwischen auch diesen RMS-Detektor an. Ist die Zuverlässigkeit des Peak-Detektors im Regelfall kein Problem, so sind bei einer Aktivierung des RMS-Detektors einige Randbedingungen zu beachten, um wirklich den Effektivwert eines Signals zu ermitteln. Dazu muss man zunächst verstehen, wie ein RMS-Detektor arbeitet. Im Folgenden ist nur eine relativ kurze Funktionsbeschreibung wiedergegeben, erschöpfende Detailinformationen finden sich in [RAU 00]:

Aus der im Display vorhandenen horizontalen Pixelanzahl und der aktuell eingestellten Sweeptime ergibt sich während des Sweeps eine bestimmte Verweilzeit pro Pixel. Während dieser Verweilzeit nimmt der A/D-Wandler im Spektrumanalysator eine Anzahl an Abtastwerten ("Samples"), die um so größer ist, je höher die Abtastfrequenz des Wandlers bzw. die

Verweilzeit pro Pixel ist. Bei einem Analysator mit beispielsweise 500 Pixel auf der horizontalen Achse, einer Abtastfrequenz von 32 MHz (typischer Wert für aktuelle Geräte) und einer Sweeptime von 100 ms ergeben sich 6.400 Samples pro Pixel.

Ist der Peak-Detektor eingestellt, wird aus diesen 6.400 Abtastwerten der größte ausgewählt und für die Vertikaldarstellung am Bildschirm herangezogen. Ist jedoch der RMS-Detektor aktiviert, so wird in einem schnellen Signalprozessor der quadratische Mittelwert aus allen 6.400 Samples gebildet und dieses Resultat zur Anzeige gebracht.

Die RMS-Bestimmung wird also nicht in einer analogen Schaltung durchgeführt, sondern sie ist das Ergebnis eines Rechenprozesses. Um verlässliche RMS-Werte zu erhalten, muss die Zahl der Samples, aus denen der RMS-Wert berechnet wird, ausreichend hoch sein. Dies bedeutet, dass beispielsweise eine zu kleine Sweeptime eine zu kurze Signalverweilzeit pro Pixel und damit eine zu geringe Anzahl an Abtastwerten verursachen kann, so dass sich gegebenenfalls ein ungenauer RMS-Wert einstellt. Das gleiche kann auftreten, wenn die Abtastfrequenz des Analysators zu niedrig ist.

Es muss daher bei Verwendung eines RMS-Detektors auf jeden Fall immer geprüft werden, ob die gewählten Einstellparameter (insbesondere die Sweeptime) zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen.

Betriebsart "Kanalleistungsmessung"

Moderne Spektrumanalysatoren bieten neben der üblichen frequenzselektiven Messung von Signalleistungen auch die Möglichkeit an, die gesamte in einem definierten Frequenzbereich vorhandene Leistung durch Integration der Messergebnisse eines durchlaufenden schmalbandigen ZF-Filters zu ermitteln. Dieses Verfahren wird "Kanalleistungsmessung" (engl. "Channel Power Measurement") genannt und ermöglicht beispielsweise die Bestimmung der Leistung breitbandiger Signale (wie beispielsweise DVB-T) auch mit Analysatoren, die kein ausreichend breites ZF-Filter besitzen. Dadurch wird im spektralen Mode eine Leistungsmessung ohne Verwendung von Bandbreiten-Korrekturfaktoren ermöglicht. Es ist zu prüfen, ob und bei welchen Signalen dieses Verfahren der gewöhnlichen spektralen Messung vorzuziehen ist.

II.4.3 Auswertung vorhandener Messempfehlungen

Wie bereits in Kapitel I dargestellt, existieren derzeit nur wenige nationale bzw. internationale Messempfehlungen für den Bereich von analogen und digitalen terrestrischen Rundfunksendern, deren Inhalt über allgemeine Hinweise zu Messgeräten und zur Durchführung hinausgeht. Nur die folgenden drei Dokumente liefern tiefer gehende Informationen zur konkreten Messtechnik, allerdings teilweise auch sehr unterschiedlichen Inhalts, so dass zunächst eine vergleichende Gegenüberstellung sinnvoll erscheint. Es handelt sich dabei um folgende Dokumente:

BNetzA -Messvorschrift

Für die messtechnische Erfassung der vor Ort vorhandenen elektromagnetischen Felder und die Bewertung in Bezug zu den Grenzwerten zum Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern hat die BNetzA eine Messvorschrift entwickelt. Die Ergebnisse der Messungen, die nach dieser "Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken" BNetzA MV 09/EMF/3 [BNetzA 03] von der BNetzA durchgeführt werden, sind in der EMF-Datenbank der BNetzA (www.bnetza.de) dokumentiert.

Die BNetzA MV 09/EMF/3 ist, obwohl nicht explizit erwähnt, primär für die Messung im Freien entwickelt. Für die Messungen ist ein Spektrumanalysator mit einer passenden Breitbandantenne einzusetzen. Es muss berücksichtigt werden, dass die BNetzA MV nicht den Anspruch stellt, *eine* spezielle Funkanlage detailliert zu untersuchen (anlagenbezogene Untersuchung). Zweck ist vielmehr ein Monitoring sämtlicher vorhandener Immissionen im Frequenzbereich 9 kHz bis 3 GHz ("Umweltmonitoring"). Das kommt auch darin zum Ausdruck, dass die Ergebnisse der Messungen in der EMF-Datenbank nicht frequenzselektiv bzw. anlagenbezogen, sondern als kumulative Grenzwertausschöpfung aller gemessenen Einzelimmissionen (Gesamtimmission) angegeben wird.

CEPT ECC Recommendation (02)04

Mit der CEPT ECC Recommendation "Measuring non-ionising radiation (9 kHz – 300 GHz)" [CEPT 03] existiert eine Empfehlung, welche die verschiedenen Messverfahren der CEPT-Länder für elektromagnetische Immissionen im Frequenzbereich 9 kHz bis 300 GHz vereinheitlichen soll. Die Messempfehlung ist zwar nicht speziell auf analoge und digitale terrestrische Rundfunksendeanlagen fixiert, enthält im Anhang aber spezielle Anweisungen für die Messung von Analog-TV, DVB-T und DAB. So werden beispielsweise für den Fall, dass der Spektrumanalysator eine zu geringe Bandbreite zur vollständigen Erfassung der Signale aufweist, Kanalleistungsmessungen ("Channel Power Measurement") empfohlen.

Vollzugsempfehlung des Schweizer BUWAL

Schließlich liegt seit Juli 2005 eine Vollzugsempfehlung des Schweizer Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) vor, in der sehr detailliert auf die rechnerische bzw. messtechnische Bestimmung von Immissionen durch Rundfunk- und Funkrufsendeanlagen eingegangen wird [BUWAL 05]. Grund für diese sehr ausführlichen Erläuterungen und Handlungsanweisungen ist hauptsächlich die sehr strenge Schweizer Umweltgesetzgebung, die für bestimmte Bereiche ("Orte mit empfindlicher Nutzung") bezüglich der elektrischen Feldstärke um etwa den Faktor zehn niedrigere Grenzwerte vorgibt, als sie beispielsweise in Deutschland verbindlich sind. Aus diesem Grund sind natürlich auch sehr detaillierte Anweisungen für Messung und Berechnung der Immission notwendig, da es wegen dieser verschärften Grenzwertlage häufiger zu möglichen Überschreitungen, Streitfällen oder behördlichen Auflagen kommen kann, als es beispielsweise in Deutschland der Fall ist. Die Vollzugsempfehlung dient also hauptsächlich der Verbesserung der Rechts- und Planungssicherheit.

Für die hier relevanten Signale UKW, TV analog, DAB und DVB-T finden sich in der Vollzugsempfehlung jeweils separate Einzelkapitel, in denen sehr ausführlich auf geeignete Messausrüstung, Messverfahren und Geräteeinstellungen eingegangen wird. Insgesamt gesehen, handelt es sich bei dieser Empfehlung um die derzeit umfangreichste Quelle über die korrekte Immissionsmesstechnik von Rundfunksignalen.

Allerdings muss im Auge behalten werden, dass es sich hier um eine Messvorschrift handelt, die jeweils die größtmögliche Exposition von Personen vor Auge hat. Dadurch ergeben sich eventuell in Bezug auf das hier zu behandelnde Projekt einige Modifikationen gegenüber den Schweizer Vorschriften.

Im Folgenden werden die wesentlichen Vorgaben dieser drei Messempfehlungen (BNetzA, CEPT, BUWAL) vergleichend gegenübergestellt:

Allgemeines

	BNetzA	CEPT	BUWAL
Zweck der Messung	"Umweltmonitoring", d.h. Ermittlung von Feldstärkewerten, die für den Messort und seine nähere Umgebung charakteristisch sind.	Sowohl "Umweltmonitoring" als auch Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten.	Sowohl "Umweltmonitoring" als auch Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten.
Bevorzugte Lage der Messorte	Outdoor	Out- und Indoor	Out- und Indoor
Erfassungsmethode	Messung an einem Punkt (1,5 m über Grund); Berücksichtigung der Richtwirkung der Messantenne durch 360° Drehung der Antenne ("Drehmethode"); Messung von horizontaler und vertikaler Polarisation mit "Max Hold".	Messung an einem Punkt (1,5 m über dem Boden) oder Mittelwertbildung der Messung von drei übereinander liegenden Punkten (1,1 m, 1,5 m, 1,7 m); Messung von horizontaler und vertikaler Polarisation mit "Max Hold".	"Schwenkmethode", d.h. Maximalwertsuche im Messvolumen (0,5 bis 1,75 m über dem Boden) durch geeignetes Bewegen der Antenne und Variation der Polarisation mit "Max Hold".
Antennen	Breitbanddipolantennen (Bikonische Antennen); ab 1 GHz auch Log-Per-Dipolantennen	Breitbanddipolantennen, Bikonische Antennen, Log-Per-Dipolantennen, Isotrope Antennen ("3-Axis Probes")	Kleine Rahmenantennen, verkürzte Dipolantennen, Bikonische Antennen, Log-Per-Dipolantennen
Messdauer	Keine Angabe	Bei Detailuntersuchungen angepasst an verwendete Grenzwertnorm (d.h. im Regelfall 6 Minuten)	Nicht im Detail spezifiziert; Mittelung über sechs Minuten nicht notwendig.

Tabelle II.4.1: Vergleich der Messempfehlungen von BNetzA, CEPT und BUWAL (Allgemeines)

Messung von UKW-Signalen

Parameter	BNetzA	CEPT	BUWAL
Auflösebandbreite (RBW)	100 kHz	100 kHz	150 kHz (falls nicht vorhanden: nächst höherer Wert)
Detektor	Peak	Peak	Peak oder RMS
Sonstige Hinweise	VBW = 100 kHz	Sweeptime = 100 ms	Auch Kanalleistungsmessung möglich (B = 150 kHz)

Tabelle II.4.2: Vergleich der Messempfehlungen von BNetzA, CEPT und BUWAL (UKW-Signale)

Messung von analogen TV-Signalen

Parameter	BNetzA	CEPT	BUWAL
Auflösebandbreite (RBW)	100 kHz	100 kHz	300 kHz
Detektor	Peak	Peak	Peak
Sonstige Hinweise	VBW = 100 kHz, Messung von Bild- und Tonträger.	Sweeptime = 100 ms bis 1s (je nach Frequenzbereich), Messung von Bild- und Tonträger.	Es wird nur die Feldstärke des Bildträgers gemessen. Von diesem Wert werden 2,2 dB subtrahiert. Dies ergibt den Effektivwert der Exposition bei Ausstrahlung eines schwarzen Bildes (worst case) unter Berücksichtigung der Leistung der Tonträger.

Tabelle II.4.3: Vergleich der Messempfehlungen von BNetzA, CEPT und BUWAL (analoge TV-Signale)

Messung von DAB-Signalen

Parameter	BNetzA	CEPT	BUWAL
Auflösebandbreite (RBW)	2 MHz	Nicht spezifiziert, da Kanalleistungsmessung empfohlen	1,5 MHz
Falls keine ausreichend große RBW verfügbar	Addition eines Korrekturfaktors K (in dB) $K = 10 \cdot \log (B_{\text{Signal}} / B_N)^*$	Kein Korrekturfaktor empfohlen, stattdessen Kanalleistungsmessung	Kein Korrekturfaktor empfohlen, stattdessen Kanalleistungsmessung
Detektor	Peak	Peak	RMS
Sonstige Hinweise	VBW \geq 2 MHz Sweep-time = 1 s	Kanalleistungsmessung sollte angewendet werden, wenn für die frequenzselektive Messung kein geeignetes ZF-Filter verfügbar ist.	Grundsätzlich ist eine Kanalleistungsmessung (B = 1,536 MHz) der frequenzselektiven Messung vorzuziehen

Tabelle II.4.4: Vergleich der Messempfehlungen von BNetzA, CEPT und BUWAL (DAB-Signale)

Messung von DVB-T-Signalen

Parameter	BNetzA	CEPT	BUWAL
Auflösebandbreite (RBW)	10 MHz	Nicht spezifiziert, da Kanalleistungsmessung empfohlen	7 MHz (VHF) 8 MHz (UHF)
Falls keine ausreichend große RBW verfügbar	Addition eines Korrekturfaktors K (in dB) $K = 10 \cdot \log (B_{\text{Signal}} / B_N)^*$	Kein Korrekturfaktor empfohlen, stattdessen Kanalleistungsmessung	Kein Korrekturfaktor empfohlen, stattdessen Kanalleistungsmessung
Detektor	Peak	Peak	RMS
Sonstige Hinweise	VBW \geq 10 MHz Sweep-time = 1 s	Kanalleistungsmessung sollte angewendet werden, wenn für die frequenzselektive Messung kein geeignetes ZF-Filter verfügbar ist.	Grundsätzlich ist eine Kanalleistungsmessung (B = 6,66 bzw. 7,61 MHz) der frequenzselektiven Messung vorzuziehen.

Tabelle II.4.5: Vergleich der Messempfehlungen von BNetzA, CEPT und BUWAL (DVB-T-Signale)

*: Bei gaußförmigen ZF-Filtern entspricht die Rauschbandbreite B_N des ZF-Filters in etwa der Auflösebandbreite RBW (3-dB-Bandbreite). Diese Umrechnungsformel ist streng genommen nur dann korrekt, wenn ein RMS-Detektor verwendet wird [RAU 00].

Die BUWAL-Messempfehlung gibt zusätzlich den Hinweis, dass die Messwerte entsprechend zu korrigieren sind, falls die betrachtete Anlage zum Zeitpunkt der Messung nicht mit ihrer maximal genehmigten Sendeleistung (ERP) arbeitet.

Vergleicht man die verschiedenen Hinweise und Einstellparameter der drei betrachteten Empfehlungen, so ergeben sich nur sehr wenige Übereinstimmungen. Konsens herrscht nur bei den Antennen: Alle drei Empfehlungen sehen bikonische oder kleine Log-Per-Antennen als geeignet für derartige Messungen an. Auch bei der Erfassung von UKW-Signalen herrscht weitgehend Einigkeit. Bei einer Vielzahl von Vorgehensweisen und Einstellparametern sind jedoch erhebliche Differenzen festzustellen, so dass je nach angewandeter Empfehlung deutlich unterschiedliche Messergebnisse zu erwarten sind (Beispielsweise empfehlen BNetzA und CEPT bei digitalen Signalen eine Messung mit Peak-Detektor, während BUWAL den RMS-Detektor zwingend vorschreibt. Dies allein dürfte zu Unterschieden von etwa 10 dB bei der Pegelmessung führen).

Der Grund für diese Unterschiede liegt zu einem nicht unerheblichen Teil im Anwendungsbereich der Empfehlungen: Während insbesondere die BNetzA-Empfehlung hauptsächlich für die effektive und kostengünstige Messung der Umgebungsfeldstärke im Rahmen eines "Umweltmonitoring" geeignet ist, ist der Hauptzweck der BUWAL-Vorschrift die Sicherstellung einer einheitlichen Vorgehensweise zur möglichst exakten Feldstärkebestimmung im Rahmen von Abnahmemessungen und Überprüfungen zur Einhaltung geltender Grenzwerte.

Folgende wesentliche Unterschiede können bei Analyse der obigen Tabellen herausgearbeitet werden. Die sich daraus ergebenden Fragestellungen sollen durch eigene Untersuchungen beantwortet werden, so dass anschließend eine korrekte und effiziente Vorgehensweise bei den Messungen im Rahmen dieses Projektes festgelegt werden kann.

Erfassungsmethode

Hier gehen die Hinweise der drei Empfehlungen sehr weit auseinander. Sie reichen von einer Messung an nur einem Punkt bzw. der Mittelwertbildung über drei Punkte (CEPT) über die Maximalwertsuche mittels der "Drehmethode" in einer definierten Höhe (BNetzA) bis hin zur Maximalwertsuche im Messvolumen mittels der "Schwenkmethode" (BUWAL). Bezüglich Zeitaufwand und Reproduzierbarkeit unterscheiden sich die Verfahren erheblich. Hier gilt es also, eine für die hier vorgesehenen Messungen besonders geeignete Vorgehensweise aus diesen auszuwählen bzw. eine eigene Strategie durch Modifikation dieser Verfahren zu generieren.

Messdauer

Während weder BNetzA noch BUWAL besondere Hinweise zu den Messdauern geben (bei BUWAL wird sogar explizit darauf hingewiesen, dass die Messdauer von untergeordneter Rolle ist und insbesondere eine Mittelung über 6 Minuten nicht erfolgen muss), ist zumindest bei der Messung von digitalen Signalen (DVB-T und DAB) in der CEPT-Empfehlung eine Messzeit im Minutenbereich vorgegeben. Hier ist zu klären, ob derart lange Messzeiten bei der Erfassung von analogen und digitalen Rundfunksignalen wirklich notwendig sind, da dies

eine erhebliche Vergrößerung des Zeitaufwandes bei der in diesem Projekt vorgesehenen Messung an mehr als 200 Punkten bedeuten würde.

Messung von UKW-Signalen

Hier sind noch die unterschiedlichen Auffassungen bei der Wahl der RBW zu klären. Außerdem ist zu untersuchen, ob Peak- und RMS-Detektor identische Messergebnisse liefern, was in der Empfehlung des BUWAL vorausgesetzt wird.

Messung von analogen TV-Signalen

Da, im Gegensatz zu FM, DAB, DVB-T, beim analogen TV die mittlere Immission vom übertragenen Bildinhalt abhängig ist, muss geklärt werden, ob die effektive Signalleistung mittels einer Messung der maximalen Feldstärke, verursacht durch den Bildträger (Zeilen-synchronimpuls) und Anwendung eines Korrekturfaktors zuverlässig bestimmt werden kann. Ein geeigneter Korrekturfaktor ist zu ermitteln, da der in der Messempfehlung des BUWAL angegebene Wert unter "worst-case"-Annahmen für ein Schwarzbild errechnet wurde, während im Rahmen dieser Untersuchungen ein "typischer Bildinhalt" als Referenz für die Immission herangezogen werden soll. Es ist außerdem zu klären, mit welcher RBW die Synchronspitzenleistung gemessen werden sollte.

Messung von DAB- und DVB-T-Signalen

Hier ist zunächst festzustellen, welche Unterschiede die Verwendung von RMS- bzw. Peak-Detektor erzeugen. Für eine frequenzselektive Messung müssen geeignete Auflösebandbreiten definiert werden. Zusätzlich ist zu prüfen, ob bei Nichtvorhandensein geeigneter Auflösebandbreiten die Verwendung des in der BNetzA-Empfehlung vorgeschlagenen Korrekturfaktors zuverlässige Resultate liefert. Außerdem ist die Eignung der Kanalleistungsmessung zur Erfassung breitbandiger Signale zu klären.

II.4.4 Untersuchungen zur Definition eines geeigneten Messverfahrens

II.4.4.1 Erfassungsverfahren

Zur Bestimmung der im Messvolumen vorhandenen Feldstärke existieren, wie bereits mehrfach erwähnt, sehr unterschiedliche Verfahren. Die einfachste Methode ist die Messung an einem definierten Punkt (z.B. in 1,5 Meter Höhe über Grund), wobei die Erfassung isotrop durchgeführt werden muss (d.h. Messung der drei orthogonalen Komponenten des Feldes mit einer geeigneten Antenne oder Positionierungseinrichtung). Geeignete Messeinrichtungen sind seit einigen Jahren auf dem Markt verfügbar.

Der Vorteil des Verfahrens liegt in seiner relativ einfachen und schnellen Durchführbarkeit. Nachteile ergeben sich aufgrund der Tatsache, dass es bei der Wiederholungsmessung nie

hundertprozentig sichergestellt ist, dass die Messungen exakt am gleichen Punkt durchgeführt werden können. Da bei dem hier durchzuführenden Projekt viele Messpunkte sich im Innenstadtbereich befinden, kann es z.B. aufgrund geparkter Kraftfahrzeuge notwendig sein, die zweite Messung einige Meter neben dem ursprünglichen Messpunkt durchzuführen. Welchen Einfluss dies auf die Messergebnisse bei einer Einzelpunktmessung ausübt, soll durch folgendes Experiment dargestellt werden:

Es wurde eine Einzelpunktmessung auf einer Wiese in etwa 7 Kilometer Entfernung zum Nürnberger Fernmeldeturm durchgeführt (Sichtverbindung zum Turm vorhanden). Als Messsystem kam das SRM-3000 mit isotroper Messantenne von Narda zum Einsatz. Die Messung wurde an drei Punkten im 1,5 Meter Höhe über Grund durchgeführt, wobei die Punkte durch die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks mit einem Meter Kantenlänge bestimmt werden. Gemessen wurden zwei analoge und sechs digitale TV-Signale, die alle vom Nürnberger Fernmeldeturm abgestrahlt werden. Die Resultate der Messungen sind in Tabelle II.4.6 wiedergegeben.



Bild II.4.1: Messaufbau "Einzelpunktmessung" mit isotroper Antenne (links) und Fernmeldeturm Nürnberg (rechts)

Kanal	Signalart	Messpunkt 1 [dB μ V/m]	Messpunkt 2 [dB μ V/m]	Messpunkt 3 [dB μ V/m]	Spanne [dB] (Max. - Min)
6	Digital	89,9	93,2	92,0	3,3
34	Digital	99,9	102,2	100,6	2,3
36	Analog	86,7	87,5	85,7	1,8
40	Digital	96,6	96,4	94,6	2,0
53	Analog	86,7	82,9	85,7	3,8
59	Digital	101,3	95,8	97,7	5,5
60	Digital	94,8	92,3	92,9	2,5
66	Digital	98,0	94,7	94,0	4,0

Tabelle II.4.6: Schwankungsbreite von Einzelpunktmessungen

Verursacht durch die interferenzbedingten kleinräumigen Feldstärkeschwankungen ergeben sich selbst bei Messung an drei Punkten mit jeweils etwa nur einem Meter Abstand bereits teilweise relativ große Schwankungsbreiten der Messergebnisse (hier von bis zu 5,5 dB). Dies bedeutet, dass bei einer Messung an nur einem Punkt mit einer großen Unsicherheit aufgrund der begrenzten Reproduzierbarkeit des Messpunktes zu rechnen ist. Zudem muss berücksichtigt werden, dass es selbst bei sehr exakt eingehaltener Messposition zu Unterschieden zwischen Vor- und Nachhermessung kommen kann, da sich die räumliche Verteilung der Feldstärkeamplitude auch zeitlich aufgrund sich verändernder Ausbreitungsbedingungen ändert (Vegetation, Feuchtigkeit, Fahrzeuge etc.).

Es liegt also nahe, für die Definition des Feldstärkewertes am Messort nicht nur an einem Punkt zu messen, sondern die Erfassung auf ein größeres Volumen auszuweiten. Damit kann zum einen die Problematik der nicht immer möglichen hundertprozentigen Reproduzierbarkeit des Messpunktes deutlich abgeschwächt werden, andererseits eröffnet sich die Möglichkeit, einen Feldstärkewert zu definieren, der sich als Ergebnis aus vielen Einzelmessungen darstellt und damit die Problematik der kleinräumigen Feldstärkeschwankungen entschärft.

Eine mögliche Strategie ist die Bestimmung der mittleren Feldstärke aus der Resultaten vieler Einzelpunktmessungen im betrachteten Volumen (CEPT sieht beispielsweise die Mittelwertbildung aus den Ergebnissen der Messungen an drei Punkten vor). Allerdings wurde bereits in [BOR 04] und [BOR 05] die Problematik dieser "Punktrastermethode" diskutiert. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass beispielsweise die Mittelwerte für ein Messvolumen sehr stark von der verwendeten Mittelungsgeometrie abhängen und zusätzlich eine Vielzahl von Punkten in die Mittelwertbildung einfließen müssen, um stabile Ergebnisse zu erhalten.

Ein entscheidender Nachteil dieses Verfahrens liegt im Zeitbedarf für die Messungen begründet. Es ist hier ein Zeitanatz pro Messpunkt zu kalkulieren, der ohne weiteres beim zehn bis zwanzigfachen der Zeit für eine Einzelmessung liegt. Ebenso ist von einem erhöh-

ten Aufwand bei der Auswertung der Messergebnisse (Berechnung des Mittelwertes) auszu-gehen. Da auch Messungen im Gebäudeinneren durchzuführen sind und dabei die sich in diesen Räumen (z.B. in Büros) aufhaltenden Personen möglichst wenig von ihrer eigentli-chen Tätigkeit abgehalten werden sollen, sind Punktrastermessungen wegen ihres Zeitbe-darfs und der Probleme bei der Positionierung der Messantenne (Möbel behindern die Aufstellung eines Stativs) möglichst zu vermeiden.

Einen guten Kompromiss in Bezug auf Zeitbedarf und Erfassung eines größeren Volumens bietet die "Schwenkmethode". Hier werden ebenfalls die Messergebnisse aus einem größe-rem Volumen ausgewertet, jedoch wird kein Mittelwert der Feldstärke berechnet, sondern es wird der Maximalwert jedes vorhandenen Signals zur Beurteilung der Exposition herangezogen. Da die Untersuchungen in [BOR 04] und [BOR 05] gezeigt haben, dass bei interferenz-bedingten Feldstärkeschwankungen die Lage der Feldstärkemaxima zeitlichen Schwankun-gen unterliegen kann, ihr absoluter Wert jedoch häufig relativ stabil bleibt, kann auch der Maximalwert eine Beurteilungsgröße liefern, welche die Problematik der räumlichen und zeitlichen Varianz nur noch in abgemilderter Form beinhaltet.

Zur Überprüfung der Schwankungsbreite der "Schwenkmethode" wurde das oben geschil-derte Experiment an den drei definierten Punkten wiederholt. Allerdings wurde diesmal die isotrope Antenne in die Hand genommen und damit das Messvolumen (Oberfläche eines Zylinders mit etwa zwei Meter Durchmesser im Höhenbereich von zirka ein bis zwei Meter über dem Boden) mit sehr langsamen Bewegungen abgetastet (siehe Bild II.4.2). Das Messgerät wurde im "Max Hold"-Mode betrieben, so dass nach Abschluss der Abtastung die Maximalwerte der einzelnen TV-Signale ablesbar waren. In folgender Tabelle sind wiederum die Einzelergebnisse der Messungen an den drei Punkten wiedergegeben.



Bild II.4.2: Messaufbau "Schwenkmethode" mit isotroper Antenne (links) bzw. bikonischer Antenne (rechts)

Kanal	Signalart	Messpunkt 1 [dBµV/m]	Messpunkt 2 [dBµV/m]	Messpunkt 3 [dBµV/m]	Spanne [dB] (Max. - Min)
6	Digital	98,2	96,3	95,5	2,7
34	Digital	103,8	103,2	103,3	0,6
36	Analog	88,9	87,4	88,1	1,5
40	Digital	97,1	97,9	98,6	1,5
53	Analog	87,6	86,8	87,4	0,8
59	Digital	99,5	99,7	99,0	0,7
60	Digital	95,1	94,8	95,3	0,5
66	Digital	96,3	94,9	95,4	1,4

Tabelle II.4.7: Schwankungsbreite von Messungen mit der "Schwenkmethode" mit isotroper Antenne

Die Ergebnisse aus den Tabellen II.4.6 und II.4.7 sind in folgender Abbildung vergleichend gegenübergestellt:

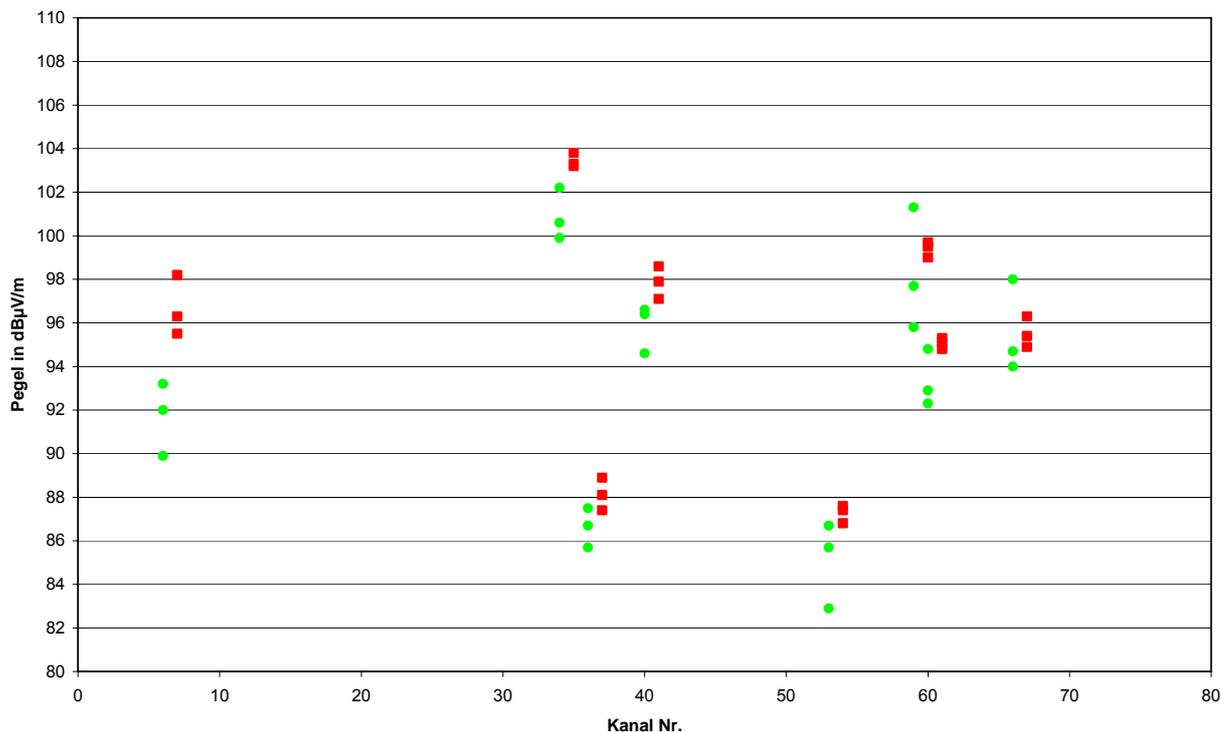


Bild II.4.3: Vergleich der Ergebnisse von Einzelpunktmessungen (grün) und Messungen mit der "Schwenkmethode" mit isotroper Antenne (rot)

Betrachtet man die Darstellung in Bild II.4.3, so ergeben sich die folgenden beiden Erkenntnisse:

- Die Schwenkmethode liefert in der Regel größere Resultate als die Einzelpunktmessung, da bei einer Messung an nur einem Punkt die maximale Feldstärke nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit detektiert wird.
- Zusätzlich zeigt sich bei dreimaliger Durchführung der Messungen eine deutlich geringe Schwankungsbreite bei der "Schwenkmethode" (Mittelwert über die acht Signale: 1,2 dB, im Vergleich zu 3,2 dB bei der Einzelpunktmessung).

Zum Abschluss wurde die "Schwenkmethode" statt mit der isotropen Antenne auch mit einer bikonischen Antenne durchgeführt, da die Isotropantenne des SRM-3000 nicht optimal für die "Schwenkmethode" geeignet ist und zwar aus folgenden Gründen:

- Die Schwenkbewegung muss bei Verwendung der Isotropantenne sehr langsam durchgeführt werden, damit die Messungen der drei orthogonalen Polarisationen möglichst an einem Punkt vorgenommen werden und nicht eine zu große Strecke während der drei Einzelmessungen überstrichen wird, was zu unsinnigen Messergebnissen führen kann. Bei Verwendung einer einachsigen Messantenne entfällt diese Problematik, so dass deutlich schnellere Abtastbewegungen möglich sind, was zum einen den Zeitaufwand für die Messungen herabsetzt und andererseits die nicht zu unterschätzende körperliche Belastung für die messende Person verringert.
- Außerdem ist die Antenne erst für Messungen ab 80 MHz spezifiziert. Erfassungen im TV-Band 1 (47 bis 68 MHz) sind mit dieser also nicht möglich, während die hier verwendete bikonische Antenne (UBA-9116 von Schwarzbeck) bereits ab 25 MHz definierte Messergebnisse liefern kann. Im Rahmen dieses Projektes ist es allerdings auch notwendig, das TV-Band 1 zu messen, da derzeit in Bayern noch drei TV-Grundnetzsender im Band 1 arbeiten.

Tabelle II.4.8 zeigt die Resultate der Messreihe mit bikonischer Antenne:

Kanal	Signalart	Messpunkt 1 [dB μ V/m]	Messpunkt 2 [dB μ V/m]	Messpunkt 3 [dB μ V/m]	Spanne [dB] (Max. - Min)
6	Digital	96,7	99,2	99,1	2,5
34	Digital	106,7	106,4	106,2	0,5
36	Analog	87,5	89,1	87,9	1,6
40	Digital	100,7	101,6	101,0	0,9
53	Analog	87,5	85,4	87,2	2,1
59	Digital	102,6	102,4	100,9	1,7
60	Digital	96,8	97,4	97,3	0,6
66	Digital	97,2	96,7	96,8	0,5

Tabelle II.4.8: Schwankungsbreite von Messungen mit der "Schwenkmethode" mit bikonischer Antenne

Wie aus Tabelle II.4.8 ersichtlich, liefert die "Schwenkmethode" auch bei Verwendung einer bikonischen Antenne eine ähnlich geringe Schwankungsbreite wie sich bei Einsatz der isotropen Antenne ergeben hat (Mittelwert der Schwankungsbreite über die acht Signale: 1,3 dB). Die Tatsache, dass bei der Messung mit der bikonischen Antenne im Mittel immer größere Feldstärkewerte (mittlerer Unterschied etwa 1,7 dB) ermittelt wurden, als mit der isotropen Antenne, liegt vermutlich in der Tatsache begründet, dass beide Antennen in unterschiedlichen Labors kalibriert wurden und auch die Kalibrierverfahren etwas unterschiedlich gestaltet sind.

Fazit:

Aus den oben dargelegten Sachverhalten und den dokumentierten Erprobungsmessungen wird für die durchzuführenden Messungen ein Erfassungsverfahren definiert, das eine Mischung aus dem Verfahren des BUWAL und der Vorgehensweise der BNetzA darstellt:

Mit einer handgeführten bikonischen Messantenne wird die komplette Oberfläche eines Zylinders mit etwa zwei Meter Durchmesser abgetastet, wobei die Abtastung für die Polarisationen horizontal, vertikal und $\pm 45^\circ$ durchgeführt wird. Die Abtastung erfolgt für den Höhenbereich von etwa ein bis zwei Meter über dem Boden. Der Abstand zu Objekten (Fahrzeuge, Bäume, Gebäudemauern etc.) darf 50 cm nicht unterschreiten. Bei Messungen in Innenräumen ist das Abtastvolumen gegebenenfalls so weit zu verringern, dass auch hier ein Abstand von minimal 50 cm zu Wänden und Möbeln sichergestellt ist. Während der Erfassung wird das Messgerät (Spektrumanalysator) im "Max-Hold"-Mode betrieben, so dass am Ende der Messung die jeweiligen Maximalwerte der Einzelimmissionen ablesbar sind. Das Zentrum des Zylinders stellt den Referenzpunkt des Messvolumens dar. Dieser wird dokumentiert. Im

Rahmen der "Nachhermessung" wird versucht, die 360°-Abtastung möglichst am gleichen Referenzpunkt durchzuführen.

Bezüglich der verwendeten Messantenne ist noch eine Modifikation erforderlich: Die Messung der DAB-Signale im L-Band (1,4 bis 1,5 GHz) erfolgt nicht mit der oben erwähnten bikonischen Antenne (UBA-9116), da diese im L-Band nicht mehr spezifiziert ist. Stattdessen wird hier eine kleine logarithmisch periodische Dipolantenne (USLP-9142) eingesetzt.

II.4.4.2 Messdauer

Das thermische Wirkungsmodell, das den Grenzwertempfehlungen von ICNIRP zu Grunde liegt, fordert bei zeitlich schwankender Exposition eine zeitliche Mittelung, angepasst an die thermische Zeitkonstante des menschlichen Körpers. Es ergibt sich dabei eine Mittelungszeit von sechs Minuten. An diese Zeitkonstante angepasste Messzeiten sind jedoch nur bei Quellen von Bedeutung, die eine zeitlich schwankende Leistungsabgabe besitzen. Dies ist beispielsweise bei GSM- und UMTS-Sendern der Fall, wobei auch hier in der Praxis eine andere Vorgehensweise als die zeitliche Mittelung gewählt wird [BOR 05], [WUS 02], [WUS 04].

Bei den im Rahmen dieses Projektes zu untersuchenden Quellen handelt es sich fast ausschließlich um solche mit konstanter Leistungsabgabe. Nur die momentane Sendeleistung des Bildsignals beim analogen TV schwankt in Abhängigkeit vom momentanen Bildinhalt Kapitel I. Die Schwankungsbreite zwischen Maximal- und Minimaexposition beträgt hierbei etwa 5 dB.

Die bei DAB-Signalen vorhandene Austastlücke (1 bzw. 0,25 ms je Rahmen) hat keinen nennenswerten Einfluss auf die mittlere Immission und kann daher vernachlässigt werden. Die mittlere Leistung verringert sich gegenüber der Dauerabstrahlung um weniger als 0,1 dB.

Zur Erfassung der typischen Exposition ist es dennoch nicht notwendig, eine Messung über sechs Minuten durchzuführen, da ein anderes Verfahren verlässlichere Ergebnisse liefert. Das gleichzeitige Durchführen der Erfassung mit der "Schwenkmethode" und einer zeitlichen Mittelung führt zu einem sehr komplexen Messaufbau, da mit gewöhnlichen Analysatoren nicht gleichzeitig eine "Max-Hold"-Erfassung und eine zeitliche Mittelwertbildung durchgeführt werden kann. Eine softwaregesteuerte Messung mit Zwischenspeicherung wäre notwendig. Außerdem müsste sichergestellt werden, dass durch die Mittelwertbildung wirklich die *zeitlichen* Schwankungen der Sendeleistung erfasst werden und nicht etwa nur die aufgrund der Antennenbewegung entstehenden *räumlichen* Signalpegelvariationen gemittelt werden.

Wie in Abschnitt II.4.4.4 noch näher erläutert wird, bedient man sich bei der Expositionsmessung von analogen Fernsehsignalen stattdessen eines zeitlich konstanten Signals (Bildträger), aus dem die mittlere Exposition mittels eines Korrekturfaktors errechnet wird, so dass es auch hier nicht notwendig ist, über einen längeren Zeitraum zu messen.

Fazit:

Die für die Erfassung der vorhandenen Feldstärkewerte notwendige Messzeit wird ausschließlich durch den Zeitbedarf für die sorgfältige Durchführung der Maximalwertsuche ("Schwenkmethode") bestimmt. Wie auch in der Messempfehlung des BUWAL ausgeführt, ist die Einhaltung einer bestimmten Mindestmesszeit im Minutenbereich nicht notwendig.

Natürlich ist zu beachten, dass nicht alle Signale im Rahmen eines 360°-Schwenks gleichzeitig erfasst werden können, da der Frequenzbereich (48 bis 860 MHz) für eine vernünftig ablesbare Darstellung zu groß wäre (Die DAB-Signale im L-Band müssen wegen des notwendigen Antennenwechsels sowieso im Rahmen einer separaten Erfassung bestimmt werden). Zusätzlich müssen je nach Signalart auch unterschiedliche Einstellungen am Analysator vorgenommen werden, so dass es notwendig wird, z.B. analoge und digitale TV-Signale in separaten Erfassungen zu messen.

II.4.4.3 Messung von UKW-Signalen

Mittels eines Signalgenerators (SMR-20 von Rohde & Schwarz) wurde ein frequenzmoduliertes Signal im UKW-Frequenzbereich generiert (Trägerfrequenz: 100 MHz, Frequenzhub: 75 kHz, modulierendes Signal: Sinus mit $f = 1$ kHz, Mono). Dieses Signal wurde über eine kurze Koaxialleitung direkt mit dem Eingang eines Spektrumanalysators (FSP-7 von Rohde & Schwarz) verbunden. Die eingestellte Signalleistung betrug -20 dBm.

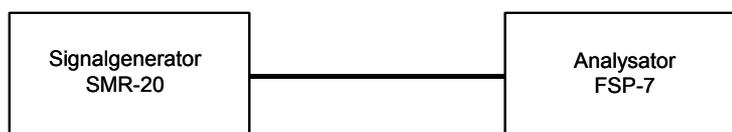


Bild II.4.4: UKW-Signale: Messaufbau

Zur Klärung eventuell vorhandener Abhängigkeiten wurden die Parameter Span, RBW und Detektortyp verändert und die sich jeweils ergebenden Anzeigewerte notiert. Die Resultate der Untersuchungen sind in folgender Tabelle wiedergegeben:

Span	RBW	Detektortyp	Anzeigewert [dBm]
1 MHz	100 kHz	Peak	-20,1
1 MHz	200 kHz	Peak	-19,9
1 MHz	200 kHz	RMS	-20,1
20 MHz	100 kHz	Peak	-20,1
20 MHz	200 kHz	Peak	-19,9
20 MHz	200 kHz	RMS	-20,2

Tabelle II.4.9: Ergebnis der spektralen Messung eines frequenzmodulierten Signals bei Variation verschiedener Einstellparameter am Analysator (P = -20 dBm)

Es können also folgende Erkenntnisse festgehalten werden:

- Wie nicht anders zu erwarten, hat die Wahl des Detektortyps keinen Einfluss auf das Messergebnis, da frequenzmodulierte Signale eine konstante Hüllkurve besitzen.
- Eine Messbandbreite von 100 oder 200 kHz liefert keine signifikant anderen Messergebnisse.
- Das Ergebnis ist auch nicht vom dargestellten Frequenzbereich abhängig. Es ist also möglich, den UKW- Frequenzbereich in einem Durchgang zu erfassen. Allerdings ist je nach verwendetem Analysatormodell zu prüfen, ob die bereits erwähnte Bedingung

$$\text{Span/RBW} < \text{horizontale Pixelzahl}$$

(II.4.2)

noch erfüllt ist. Bei dem hier verwendeten Gerät mit einer horizontalen Pixelzahl von 501 ist dies kein Problem.

Abschließend wurde mit einer Livemessung in der Nähe des mit mehreren UKW-Sendern bestückten Regensburger Fernmeldeturms (Entfernung zirka drei Kilometer) geprüft, ob bei den realen, etwas breitbandigeren UKW-Stereosignalen ein Unterschied zwischen einer RBW von 100 kHz bzw. 300 kHz feststellbar ist. Dazu wurden die Feldstärkewerte von sechs UKW-Programmen mittels der Schwenkmethode (Max-Hold, Peak-Detektor) jeweils drei Mal mit den beiden unterschiedlichen Auflösebandbreiten gemessen. Die Resultate können den folgenden drei Tabellen entnommen werden.

Frequenz [MHz]	Messung 1 [dB μ V/m]	Messung 2 [dB μ V/m]	Messung 3 [dB μ V/m]	Quadr. Mittelwert [dB μ V/m]
89,7	83,0	85,2	84,3	84,3
91,1	81,7	83,0	83,8	82,9
95,5	86,9	88,7	88,0	87,9
98,2	86,1	87,9	87,7	87,3
103,0	105,9	105,9	105,5	105,8
107,5	83,1	87,9	87,9	86,8

Tabelle II.4.10: Ergebnis der spektralen Messung von sechs UKW-Signalen (RBW = 100 kHz; VBW = 300 kHz)

Frequenz [MHz]	Messung 1 [dB μ V/m]	Messung 2 [dB μ V/m]	Messung 3 [dB μ V/m]	Quadr. Mittelwert [dB μ V/m]
89,7	83,8	84,1	84,8	84,3
91,1	82,2	82,6	82,7	82,5
95,5	87,5	88,4	88,1	88,0
98,2	86,6	87,8	87,9	87,5
103,0	106,6	106,6	106,9	106,7
107,5	86,7	88,0	88,7	87,9

Tabelle II.4.11: Ergebnis der spektralen Messung von sechs UKW-Signalen (RBW = 300 kHz; VBW = 1 MHz)

Frequenz [MHz]	RBW = 300 kHz [dB μ V/m]	RBW = 100 kHz [dB μ V/m]	Differenz [dB]
89,7	84,3	84,3	0,0
91,1	82,5	82,9	-0,4
95,5	88,0	87,9	0,1
98,2	87,5	87,3	0,2
103,0	106,7	105,8	0,9
107,5	87,9	86,8	1,1

Tabelle II.4.12: Vergleich der quadratischen Mittelwerte aus Tabelle II.4.10 und 4.11

Offensichtlich ist es für das Messergebnis im wesentlichen unerheblich, ob eine RBW von 100 kHz oder 300 kHz gewählt ist.

Fazit:

Für die Erfassung von frequenzmodulierten Signalen des UKW-Rundfunks ist der RMS-Detektor nicht notwendig. Die Auflösungsbandbreite (RBW) sollte zwischen 100 und 300 kHz liegen. Bei Analysatoren mit relativ geringer horizontaler Pixelzahl ist es günstiger, mit etwas größerer RBW (300 kHz) zu messen, damit die einzelnen Signale noch vernünftig dargestellt werden können. Allerdings kann es dabei zu Überbewertungen bei Signalen kommen, die weniger als 300 kHz Abstand zu einander besitzen. Als guter Kompromiss erscheint die Verwendung einer RBW von 200 kHz, die inzwischen bei immer mehr Geräten (wegen der Messung von GSM-Signalen) zur Verfügung gestellt wird.

II.4.4.4 Messung von analogen TV-Signalen

In einem ersten Schritt sollen die in Kapitel I angegebenen Unterschiede zwischen Bildträgerleistung bzw. den Leistungswerten bei verschiedenartigen Bildinhalten mittels eines Leistungsmessgerätes überprüft werden. Die dafür notwendigen Messungen konnten im Prüffeld des Werkes Teisnach von Rohde & Schwarz durchgeführt werden. Rohde & Schwarz ist einer der weltweit führenden Hersteller analoger und digitaler terrestrischer Fernsehsender. In Teisnach werden Fernsehsender aufgebaut und einer Werksabnahme im Prüffeld unterzogen. Für die folgenden Messungen stand ein analoger Fernsehsender (Kanal 51, d.h. Bildträgerfrequenz = 711,25 MHz) zur Verfügung. Gemessen wurde ein Signal, das über einen Richtkoppler direkt vom Antennenausgang des Senders entnommen wird und an einem speziellen Testausgang eine Leistung von einigen Milliwatt besitzt.

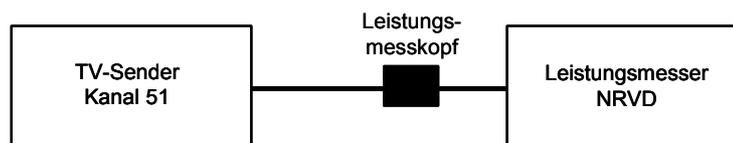


Bild II.4.5: Messungen am Ausgang eines analogen TV-Senders

Zur Bestimmung der Synchronspitzenleistung wurde zunächst ein Diodenmesskopf zur Bestimmung der Spitzenleistung (PEP = Peak Envelope Power) verwendet. Anschließend wurden für verschiedene Bildinhalte mit einem thermischen Messkopf die mittlere Signalleistung gemessen. Das Tonsignal war während der Messungen ausgeschaltet. Es ergaben sich dabei die in folgender Tabelle dokumentierten Messergebnisse:

Bildinhalt	Mittlere Leistung am Testausgang [dBm]	Differenz zur Synchronspitzenleistung [dB]	Theoretische Differenz [dB] nach Kapitel I
Schwarz	7,6	2,6	2,5
Weiß	2,6	7,6	7,5
Grau (50%)	4,8	5,4	-
Testbild (FuBK)	5,7	4,5	-
Synchronspitzenleistung	10,2 (PEP)	-	-

Tabelle II.4.13: Vergleich von Synchronspitzenleistung und mittlerer Sendeleistung bei verschiedenen Bildinhalten

Die in Kapitel I angegebenen Differenzen zwischen Synchronspitzenleistung (Bildträgerleistung) und mittlerer Leistung stimmen für die beiden Extremfälle (Schwarzbild bzw. Weißbild) sehr gut mit den Messergebnissen überein. Auch die in [Weck 03] genannte Differenz zwischen Synchronspitzenleistung und mittlerer Sendeleistung bei Übertragung eines realen Fernsehprogramms mit etwa 4 dB lässt sich messtechnisch gut nachvollziehen. Bei Einspeisung eines typischen Testbildes ergab die Messung eine Differenz von 4,5 dB zur Synchronspitzenleistung.

Interessant ist auch die Tatsache, dass sich keine nennenswerte Änderung bei den Messergebnissen ergab, wenn der Farbhilfsträger ein oder ausgeschaltet wird. Dies ist auch nicht verwunderlich, da der Farbhilfsträger um 18 dB gegenüber dem Bildträger abgesenkt ist, so dass er eine Zunahme der Gesamtleistung von weniger als 0,1 dB verursacht.

Betrachtenswert ist auch die Frage nach dem Einfluss der beiden Tonträger auf die Gesamtleistung des analogen TV-Signals. Diese sind um 13 bzw. 20 dB schwächer als der Bildträger, d.h. sie besitzen in der Summe 6 Prozent der Bildträgerleistung. Aufgrund des verwendeten Modulationsverfahrens (FM) sind im Tonsignal keine zeitlichen Signalschwankungen vorhanden.

Geht man davon aus, dass ein typischer Bildinhalt eine mittlere Leistung erzeugt, die 4 dB unter der Bildträgerleistung liegt (also einen Wert von 40 Prozent der Bildträgerleistung darstellt), so entspricht die Leistung des Tonsignals etwa 15 Prozent der mittleren Leistung des typischen Bildinhaltes. 15 Prozent bedeutet einen Aufschlagsfaktor von 0,6 dB.

Nimmt man hingegen an, dass die mittlere Leistung eines typischen Bildes 5 dB unter der Synchronspitzenleistung liegt, entspricht das Tonsignal etwa 19 Prozent der mittleren Bildsignalleistung. Es ergibt sich dann ein Aufschlagsfaktor von 0,8 dB.

Theoretisch resultiert also ein Aufschlagsfaktor auf die mittlere Signalleistung eines typischen Fernsehbildes von etwa 0,6 bis 0,8 dB, wenn man das Tonsignal mit berücksichtigt.

Auch dieser Sachverhalt wurde durch Messung am realen TV-Sender überprüft. Dabei wurden für die vier in Tabelle II.4.13 bereits verwendeten Bildinhalte die mittleren Signalleistung auch bei eingeschaltetem Tonsignal gemessen und dem Ergebnis bei ausgeschaltetem Ton gegenübergestellt. Es ergeben sich dabei die folgenden Resultate:

Bildinhalt	Mittlere Leistung bei ausgeschaltetem Tonsignal [dBm]	Mittlere Leistung bei eingeschaltetem Tonsignal [dBm]	Differenz [dB]
Schwarz	7,6	8,0	0,4
Weiß	2,6	3,8	1,2
Grau (50%)	4,8	5,6	0,8
Testbild (FuBK)	5,7	6,3	0,6

Tabelle II.4.14: Mittlere Sendeleistung bei ein- bzw. ausgeschaltetem Tonsignal und verschiedenen Bildinhalten

Erwartungsgemäß ist der Einfluss des Tonsignals um so geringer, je größer die mittlere Sendeleistung des Bildsignals ist (Vergleiche z.B. Schwarz- und Weißbild). Die Messergebnisse bei Grau bzw. dem Testbild decken sich sehr gut mit den oben theoretisch abgeschätzten Korrekturfaktoren.

Fazit:

Die Messungen an einem realen analogen Fernsehsender bestätigen, dass die mittlere Immission durch Messung der Feldstärke, verursacht durch den Zeilensynchronimpuls gewonnen werden kann, wenn man den Messwert anschließend um etwa 4 bis 5 dB verringert.

Weiterhin kann auf eine separate Messung der Tonsignale verzichtet werden (Zeitersparnis), wenn man die mittlere Immission wieder um etwa 0,7 dB vergrößert. Insgesamt erhält man somit einen Faktor von etwa 3,3 bis 4,3 dB, um den der gemessene Synchronspitzenleistungswert zu verringern ist, wenn man die mittlere Immission eines analogen TV-Signals inklusive Tonträger erhalten will.

Diese Vorgehensweise deckt sich mit der BUWAL-Empfehlung, der einzige Unterschied besteht darin, dass das BUWAL als Beurteilungswert das Schwarzbild (d.h. die maximal mögliche mittlere Immission) heranzieht und nicht den typischen mittleren Bildinhalt, so dass das BUWAL zu einem kleineren Korrekturfaktor kommt (2,2 dB).

Im Folgenden Punkt ist nun zu klären, bei welchen Geräteeinstellungen mit einem Spektrumanalysator (ESPI-3 von Rohde & Schwarz) die Synchronspitzenleistung bestimmt werden kann. Hierzu wurde ein Spektrumanalysator an den Testausgang des Senders angeschlossen und mittels des Peak-Detektors die Synchronspitzenleistung gemessen.

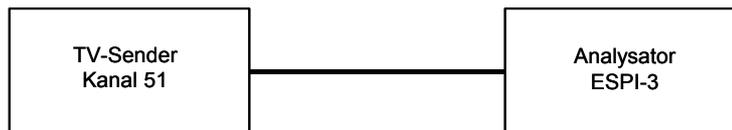


Bild II.4.6: Spektrale Messung am Ausgang eines analogen TV-Senders

Folgende Abbildung zeigt zwei typische Messergebnisse:

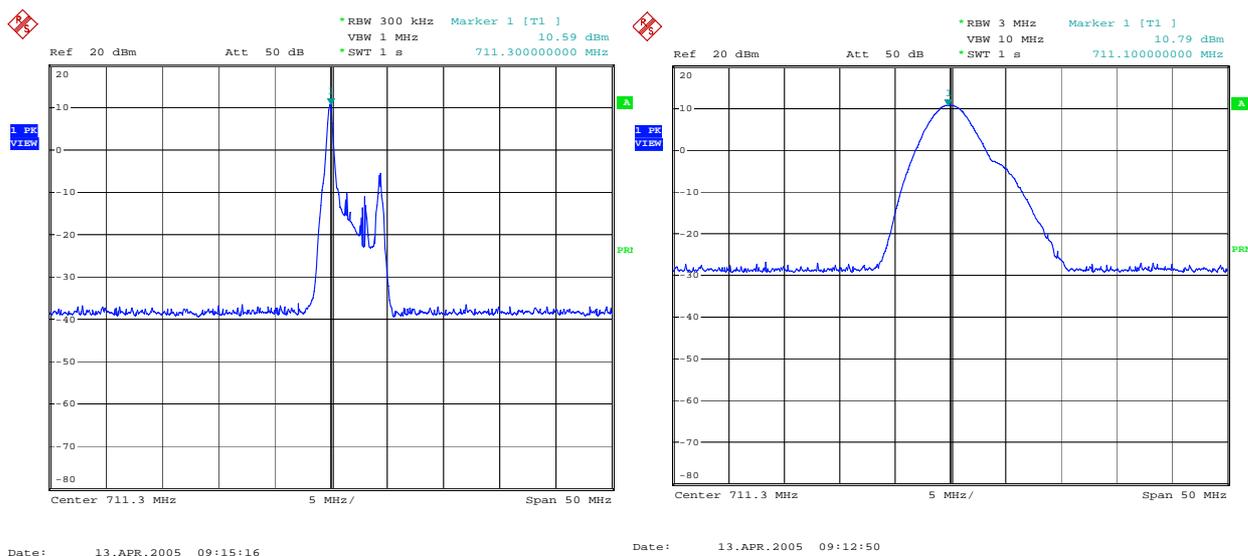


Bild II.4.7: Spektren eines analogen TV-Signals (links: RBW = 300 kHz; rechts: RBW = 3 MHz)

Bei Messung mit kleiner RBW sind Bild- und Tonträger gut zu unterscheiden, während bei einer großen RBW die Einzelkomponenten des TV-Signals nicht mehr aufgelöst werden können. Der Amplitudenwert der Synchronspitzenleistung (siehe Marker) wird allerdings von der gewählten RBW nicht beeinflusst.

In folgender Tabelle sind die gemessenen Werte der Synchronspitzenleistung in Abhängigkeit verschiedener Parameter angegeben. Die mit einem Spitzenleistungsmesser gemessene Referenzwert beträgt 10,2 dBm.

Bildart	RBW	VBW	Sweep-time	Span	Messwert
Schwarzbild	300 kHz	1 MHz	1 s	50 MHz	10,6 dBm
Schwarzbild	1 MHz	3 MHz	1 s	50 MHz	10,9 dBm
Schwarzbild	3 MHz	10 MHz	1 s	50 MHz	10,8 dBm
Schwarzbild	1 MHz	3 MHz	0,1 s	200 MHz	10,3 dBm
Weißbild	1 MHz	3 MHz	0,1 s	50 MHz	10,3 dBm

Tabelle II.4.15: Ergebnis der spektralen Messung der Bildträgerleistung eines analogen TV-Signals (Referenzwert: 10,2 dBm)

Messungen mit anderen Analysatortypen (FSH-3 von Rohde & Schwarz; SRM-3000 von Narda) liefern vergleichbare Ergebnisse.

Tabelle II.4.15 liefert folgende Erkenntnisse:

- Die gewählte RBW hat keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis, Messbandbreiten zwischen 0,3 und 3 MHz sind möglich.
- Auch der dargestellte Frequenzbereich (Span) ist unkritisch, so lange er nicht zu groß gewählt wird (Span/RBW < Pixelanzahl).
- Als Messzeit kann 0,1 s gewählt werden, so dass zehn Messungen pro Sekunde durchgeführt werden, was erfahrungsgemäß für die "Schwenkmethode" eine ausreichend große Zahl darstellt, um ein lückenloses Abtasten des Volumens sicherzustellen.
- Auch kann keine Abhängigkeit des Messergebnisses vom Bildinhalt festgestellt werden, die Messung der Synchronspitzenleistung ist also zuverlässig.

Natürlich ist es prinzipiell auch möglich, die mittlere Leistung mit dem RMS-Detektor zu bestimmen, wie folgende Livemessung zeigt. Diese wurde wiederum in Regensburg (Sichtverbindung zum etwa drei Kilometer entfernten Fernmeldeturm, auf dem TV-Grundnetzsender installiert sind) durchgeführt. Es handelte sich hierbei um ein Signal im Kanal 42 (Bildträgerfrequenz 639,25 MHz).

Detektor	Messung 1 [dB μ V/m]	Messung 2 [dB μ V/m]	Messung 3 [dB μ V/m]	Messung 4 [dB μ V/m]	Messung 5 [dB μ V/m]	Quadr. Mittelwert [dB μ V/m]
RMS	96,4	96,3	96,6	98,0	97,2	96,9
Peak	101,6	100,8	100,9	100,0	100,2	100,7
Differenz [dB]	5,2	4,5	4,3	2,0	3,0	3,8

Tabelle II.4.16: Ergebnis der spektralen Messung eines analogen TV-Signals (Livemessung)

Vergleicht man die Messergebnisse mit Peak- und RMS-Detektor, so ergibt sich eine relativ große Schwankungsbreite (hier > 3 dB). Eine Mittelung über die fünf durchgeführten Einzelmessungen ergibt mit 3,8 dB einen Unterschiedsfaktor, der wiederum sehr gut mit dem theoretischen Wert bei einem allgemeinen TV-Bild (etwa 4 dB) übereinstimmt.

Mittelt man also über mehrere Messungen, so liefert der RMS-Detektor recht gut die mittlere Signalleistung.

In der Praxis sollte allerdings aus folgenden Gründen der Peak-Detektor dem RMS-Detektor vorgezogen werden:

- Das Messergebnis ist bei Verwendung des RMS-Detektors vom momentanen Bildinhalt abhängig. Daher kommt es in diesem Fall zu einer Zunahme der Messunsicherheit aufgrund der Möglichkeit, dass zum Zeitpunkt der Messung gerade ein nicht "repräsentatives" Bild abgestrahlt wird. Zuverlässiger werden die Messergebnisse nur durch mehrmaliges Wiederholen und Mittelwertbildung, was allerdings den Zeitbedarf für Messung und Auswertung erhöht.
- Das Messergebnis ist bei Verwendung des Peak-Detektors unabhängig vom momentanen Bildinhalt. Außerdem reagiert der Peak-Detektor weniger empfindlich auf die übrigen Einstellparameter des Analysators (insbesondere Sweeptime und RBW) als der RMS-Detektor.

Fazit:

Die einfachste und zuverlässigste Methode zur Bestimmung der effektiven Immission bei analogen TV-Signalen entspricht im wesentlichen der Empfehlung des BUWAL:

Spektrale Messung der Feldstärke, verursacht durch den Zeilensynchronimpuls, mit dem Peak-Detektor. Berücksichtigung eines Korrekturfaktors von etwa 4 dB zur Ermittlung der mittleren Immission unter Einschluss der Tonsignale.

Um möglichst viele TV-Kanäle mit einem Sweep zu erfassen, kann der Span entsprechend groß gewählt werden, so weit die Pixelanzahl des Analysators es zulässt. Um einen größeren Frequenzbereich darstellen zu können, sollte die RBW nicht unbedingt zu 300 kHz gewählt, sondern größer eingestellt werden (z.B. 1 MHz). In der Praxis bewährt hat sich beispielsweise die Unterteilung des TV-Bandes in vier Teilbereiche:

- Messung 1:** Kanal 2 bis 4 (47 - 68 MHz)
Messung 2: Kanal 5 bis 12 (174 - 230 MHz)
Messung 3: Kanal 21 bis 40 (470 - 629 MHz)
Messung 4: Kanal 41 bis 60 (629 - 790 MHz)

Die Schwenkmethode muss also insgesamt vier Mal durchgeführt werden, um alle eventuell vorhandenen analogen TV-Signale zu erfassen (Die Kanäle 61 bis 69 sind in Deutschland nicht mit analogen TV-Signalen belegt).

II.4.4.5 Messung von DAB- und DVB-T-Signalen

Zur Messung der mittleren Leistung bei rauschähnlichen Signalen, wie sie bei DAB bzw. DVB-T vorkommen, ist im Spektrumanalysator der RMS-Detektor unverzichtbar. Folgende beiden Bilder zeigen den Unterschied zwischen den beiden Detektoren an Hand einer Messung eines DVB-T-Signals, das wiederum von einem realen DVB-T-Sender bei Rohde & Schwarz, Teisnach abgenommen wurde. Der Sender arbeitet im Kanal 54 (Mittenfrequenz: 738 MHz).

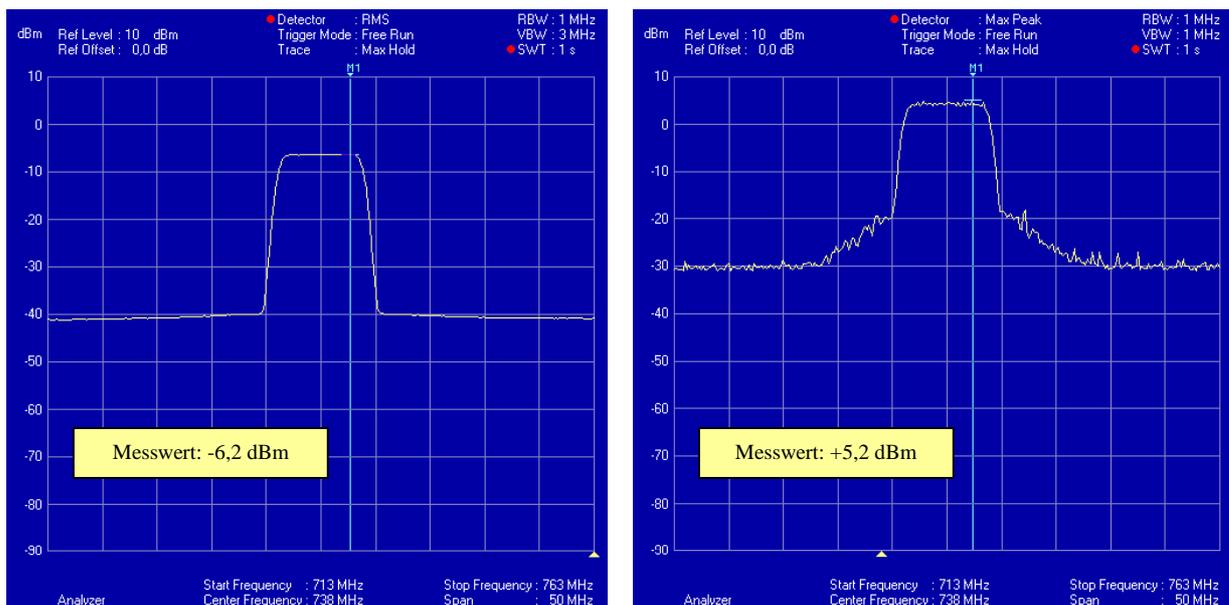


Bild II.4.8: Spektren eines DVB-T-Signals, gemessen mit RMS-Detektor (links) bzw. Peak-Detektor (rechts). Messgerät: FSH-3 von Rohde & Schwarz

In diesem Beispiel liefert der Peak-Detektor einen 11,4 dB höheren Messwert als der RMS-Detektor. Der Unterschied zwischen beiden Messungen entspricht in etwa dem Crestfaktor des Signals, der hier mit einem geeigneten Messgerät (EFA von Rohde & Schwarz) zu 12,2 dB bestimmt wurde. Der in Bild II.4.8 dargestellte RMS-Messwert entspricht noch nicht der mittleren Leistung, da nur mit einer RBW von 1 MHz gemessen wurde, das verwendete DVB-T-Signal jedoch eine Bandbreite von 7,6 MHz besitzt. Näheres zu dieser Problematik folgt weiter unten.

Wie bereits erwähnt, zeigt der RMS-Detektor nur dann die mittlere Leistung an, wenn er den Mittelwert aus einer genügend großen Anzahl an Abtastwerten errechnen kann. Dies bedeutet, dass es bei sehr kurzen Sweepzeiten zu Messfehlern kommen kann. Dieser Sachverhalt wurde ebenfalls am realen DVB-T-Sender mittels einer Messreihe untersucht. Ein Spektrumanalysator (ESPI-3) wurde direkt mit dem Testausgang des Senders verbunden. Bei eingeschaltetem RMS-Detektor wurden Span und Sweeptime variiert und die sich ergebenden Messergebnisse notiert. Sie sind in folgender Tabelle dargestellt. Als Referenzwert wurde die mittlere Leistung am Testausgang vorher mit einem thermischen Leistungsmesser zu 2,3 dBm bestimmt.

Sweeptime	Span	Messwert
1 s	50 MHz	2,2 dBm
1 s	200 MHz	2,2 dBm
100 ms	50 MHz	2,4 dBm
100 ms	200 MHz	2,5 dBm
2,5 ms	50 MHz	5,0 dBm
5 ms	200 MHz	3,4 dBm

Tabelle II.4.17: Messung eines DVB-T-Signals mit unterschiedlichen Sweepzeiten und dargestellten Frequenzbereichen (RBW = 10 MHz, RMS-Detektor); Referenzwert: 2,3 dBm

Es zeigt sich also, dass der Messwert nur wenig vom eingestellten Frequenzbereich (Span) abhängt (so lange er allerdings nicht zu groß gewählt wird). Zu kurze Sweepzeiten führen jedoch zu einer signifikanten Überbewertung der Immission. Die Ursache dafür liegt in der nicht ausreichend guten Mittelung aufgrund zu geringer Verweilzeit pro Pixel, so dass sich ein "Signalplateau" ergibt, das nicht ausreichend geglättet ist, sondern noch eine signifikante Welligkeit mit kleineren "Spitzen" besitzt. Die größte dieser "Spitzen" wird dann durch den Marker (Max Peak) ausgelesen und als Beurteilungswert herangezogen, was zur beobachteten Überbewertung führt.

Am hier verwendeten Analysator sollten keine Sweepzeiten kleiner 100 ms bei der Messung mit dem RMS-Detektor gewählt werden. Bei anderen Modellen können sich auch andere Mindestsweepzeiten ergeben, da diese stark von den Geräteparametern (insbesondere Pixelanzahl und Abtastrate) abhängen. Der verwendete Analysator besitzt eine Abtastrate von 32 MHz. Es existieren auf dem Markt jedoch auch Modelle mit weniger als 1 MHz Abtastrate, so dass sich bei diesen Typen um mehr als den Faktor 30 geringere Samples pro Pixel einstellen, was gleichzeitig bedeutet, dass an derartigen Modellen (falls die Pixelanzahl bei beiden Geräten gleich ist) eine um den Faktor 30 größere Sweeptime eingestellt werden muss.

Eine weitere zu klärende Fragestellung ergibt sich aus der Bandbreite des zu messenden Signals. Bei der spektralen Messung darf die RBW nicht kleiner sein als die Signalbandbreite, ansonsten ergibt sich eine Unterbewertung der Immission, da niemals die komplette

Signalleistung das Zwischenfrequenzfilter passiert. Folgendes Bild zeigt das Spektrum eines realen DVB-T-Senders gemessen mit verschiedenen großen Auflösbandbreiten:

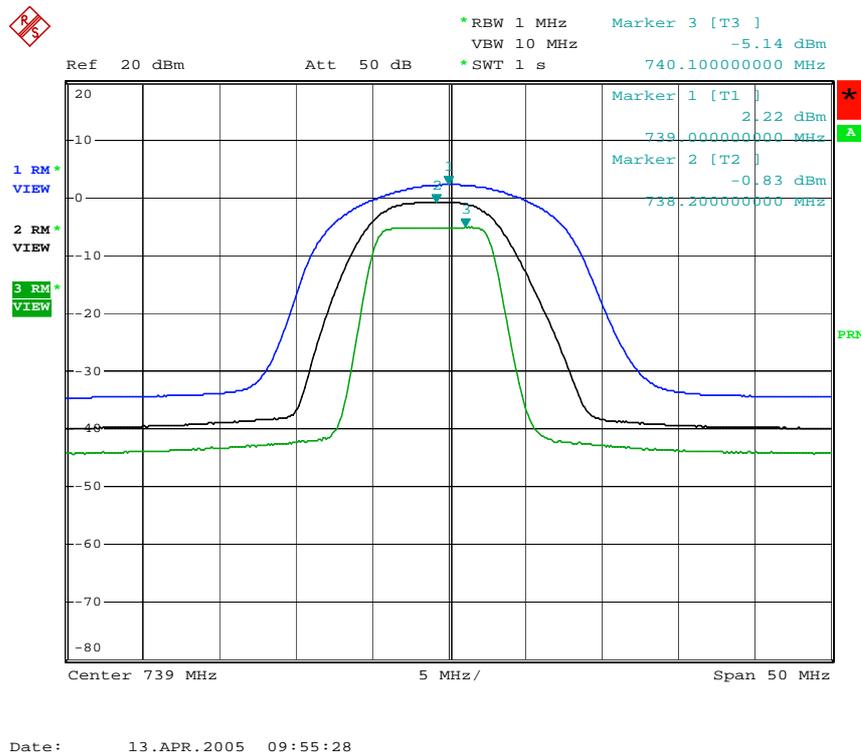


Bild II.4.9: Spektren eines DVB-T-Signals, gemessen mit RBW = 1 MHz (grün), 3 MHz (schwarz) und 10 MHz (blau); RMS-Detektor

Bei der Messung breitbandiger, rauschähnlicher Signale ist also eine ausreichend große RBW sicherzustellen. Allerdings sind bei vielen Analysatoren (insbesondere kleine, tragbare Modelle, die ansonsten sehr gut für Feldstärkemessungen im Freien geeignet sind) häufig keine so großen Auflösbandbreiten im Gerät realisiert (Notwendig wären: 1,5 MHz bei DAB, 6,6 MHz bei DVB-T im VHF- und 7,6 MHz im UHF-Band). Es stellt sich daher die Frage, ob der Amplitudenverlust aufgrund der zu geringen RBW durch einen geeigneten Korrekturfaktor kompensiert werden kann. Der Korrekturfaktor K errechnet sich für den hier interessierenden Fall ($B_{\text{Signal}} \gg B_R$) mittels folgender Formel [RAU 00]:

$$K = 10 \cdot \log(B_{\text{Signal}}/B_R). \quad (\text{II.4.3})$$

B_{Signal} ist dabei die Rauschbandbreite des zu messenden Signals, während B_R die Rauschbandbreite des Zwischenfrequenzfilters darstellt. Bei den meisten Spektrumanalysatoren werden Gaussfilter verwendet, bei denen die Rauschbandbreite in erster Näherung der 3-dB-Bandbreite (RBW) des Filters entspricht. Obige Formel wird auch in der Messempfehlung der BNetzA zur Berechnung des Bandbreitenkorrekturfaktors vorgeschlagen.

Zur Überprüfung, ob obige Formel zuverlässige Korrekturfaktoren liefert, wurde eine Messreihe mit zwei verschiedenen Spektrumanalysatoren (FSP-3 bzw. FSH-3 von Rohde & Schwarz) durchgeführt. Beim FSP-3 handelt es sich um ein typisches Mittelklasse-

Laborgerät (Preis zirka 20.000,- €), während der FSH-3 zur Gruppe der preisgünstigen, batteriebetriebenen Portabelgeräte zählt (Preis zirka 6.000,- €). Allerdings wurde hier nicht ein realer DVB-T-Sender, sondern ein Signalgenerator (SFQ von Rohde & Schwarz) verwendet.

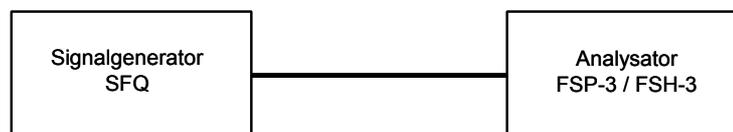


Bild II.4.10: Spektrale Messung eines künstlich erzeugten DVB-T-Signals

Eingestellt wurde ein DVB-T-Signal im Kanal 34 (Mittenfrequenz 578 MHz) mit einer Ausgangsleistung von -20 dBm (überprüft mit einem thermischen Leistungsmesser). Die digitale Modulation wurde entsprechend der in Bayern vorgesehenen Modulationskennwerte parametrisiert (16-QAM, 8k-Mode, Coderate 2/3). Gemessen wurde anschließend mit RMS-Detektor und verschiedenen Auflösungsbandbreiten. Die Ergebnisse der Messreihe sind in folgender Tabelle wiedergegeben:

RBW	Messwert FSP-3	Messwert FSH-3	Korrekturfaktor K	Korrigierter Messwert FSP-3	Korrigierter Messwert FSH-3
100 kHz	-38,0 dBm	-38,2 dBm	18,8 dB	-19,2 dBm	-19,4 dBm
1 MHz	-28,7 dBm	-28,3 dBm	8,8 dB	-19,9 dBm	-19,5 dBm
3 MHz	-23,8 dBm	-	4,0 dB	-19,8 dBm	-
5 MHz	-21,7 dBm	-	1,8 dB	-19,9 dBm	-

Tabelle II.4.18: Messung eines DVB-T-Signals mit unterschiedlicher Auflösungsbandbreite (RBW)

Die Verwendung des Korrekturfaktors ist also offensichtlich eine geeignete Methode zur Kompensation des Messfehlers bei zu geringer Bandbreite des verwendeten ZF-Filters. Allerdings sollte immer die größte im Gerät vorhandene RBW gewählt werden, so dass sich ein möglichst kleiner Korrekturwert ergibt. Wie weiter unten noch gezeigt wird, unterliegt der Korrekturfaktor bei realen Feldstärkemessungen allerdings einer nicht zu vernachlässigbaren Unsicherheit.

Anschließend wurden einige Parameter der Modulation verändert. Es wurde auf 2k-Mode bzw. auf 64-QAM umgeschaltet. Außerdem wurde die übertragene Datenrate vergrößert. Dabei konnten jedoch keine Veränderungen der gemessenen mittleren Leistung (weder am Power Meter noch am Spektrumanalysator) festgestellt werden. Die Modulationsparameter haben also offensichtlich keinen Einfluss auf die mittlere abgegebene Leistung.

Zusätzlich wurde noch eine Livemessung im Gelände (am gleichen Ort in der Nähe des Nürnberger Fernmeldeturmes wie bei den Untersuchungen zur Erfassungsmethode) durchgeführt. Hier wurde neben einem Spektrumanalysator (ESPI-3 von Rohde & Schwarz) auch das speziell für EMVU-Messungen konzipierte Messgerät SRM-3000 von Narda eingesetzt.

Bei beiden Geräten wurde mit einer bikonischen Antenne ein DVB-T-Signal im Kanal 34 (574 - 582 MHz) gemessen ("Schwenkmethode"). Es ergaben sich dabei die folgenden Resultate:

RBW	Messwert ESPI-3 (Peak-Detektor)	Messwert ESPI-3 (RMS-Detektor)	Messwert SRM-3000	Korrekturfaktor K	Korrigierter Messwert ESPI-3 (Peak-Detektor)	Korrigierter Messwert ESPI-3 (RMS-Detektor)
1 MHz	107,2 dB μ V/m	97,4 dB μ V/m	102,8 dB μ V/m	8,8 dB	116,0 dB μ V/m	106,2 dB μ V/m
3 MHz	111,3 dB μ V/m	101,2 dB μ V/m	103,4 dB μ V/m	4,0 dB	115,3 dB μ V/m	105,2 dB μ V/m
5 MHz	112,8 dB μ V/m	103,2 dB μ V/m	108,5 dB μ V/m	1,8 dB	114,6 dB μ V/m	105,0 dB μ V/m

Tabelle II.4.19: Live-Messung eines DVB-T-Signals mit unterschiedlicher Auflösungsbreite (RBW)

Vergleicht man die Ergebnisse der Livemessung mit Peak- und RMS-Detektor, so ergibt sich hier ein relativ konstanter Unterschiedsfaktor von etwa 10 dB. Vergleichbare Messungen am realen TV-Sender (in Teisnach) ergaben Unterschiedsfaktoren zwischen 11 und 12 dB. Für überschlägige Messungen ist also auch die Verwendung eines Peak-Detektors bei DVB-T-Signalen möglich. Das damit gefundene Messergebnis muss dann um etwa 10 bis 12 dB verringert werden, wenn man die mittlere Exposition erhalten will. Der Korrekturfaktor ist allerdings mit einer deutlichen Unsicherheit beaufschlagt. Dies liegt unter anderem daran, dass der Crestfaktor am Ausgang des Senders z.B. herstellerspezifisch gewissen Toleranzen unterliegt (beispielsweise kann ein dem Sender nachgeschaltetes Kanalfilter den Crestfaktor beeinflussen). Für möglichst genaue Messungen sollte also auf jeden Fall der RMS-Detektor verwendet werden.

Eine weitere Erkenntnis kann aus Tabelle II.4.19 gewonnen werden. Die Messergebnisse des SRM-3000 liegen zwischen den Resultaten des ESPI-3 mit Peak- bzw. RMS-Detektor. Versucht man also, mit diesem Gerät im spektralen Mode mittels der "Schwenkmethode" (Max Hold) im spektralen Mode die im Volumen herrschende Maximalfeldstärke zu erfassen, ergibt sich ein nicht korrektes Ergebnis. Die Messung der Spitzenleistung analoger Signale (UKW, TV) kann hingegen im spektralen Mode mit dem SRM-3000 problemlos durchgeführt werden.

Schließlich muss noch untersucht werden, ob das alternative Messverfahren "Kanalleistungsmessung" ("Channel-Power Measurement") Resultate liefert, die der mittleren Signalleistung entsprechen.

Kanalleistungsmessungen sind in vielen modernen Geräten als spezielle Messverfahren vordefiniert. Die Anzeige des Analysators bei einer derartigen Messung hat etwa das folgende Aussehen:

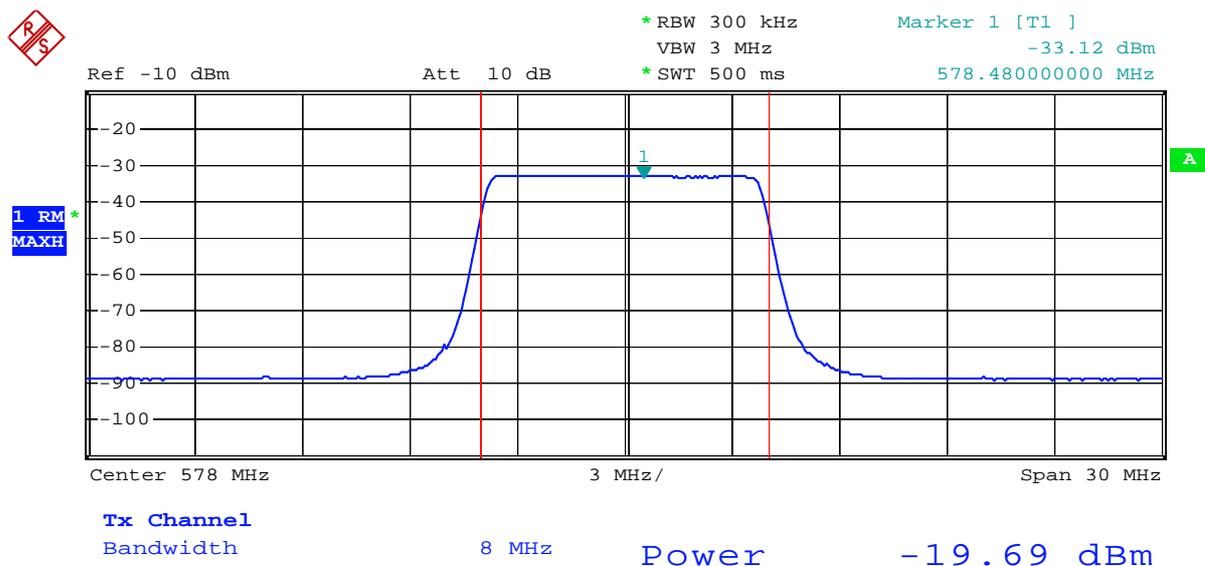


Bild II.4.11: Kanalleistungsmessung mit einem Spektrumanalysator

Für korrekte Messergebnisse ist auch hier der RMS-Detektor notwendig. Die Bandbreite, über welche die Kanalleistungsmessung (Integration) durchgeführt wird, kann typischerweise mit Markern am Gerät eingestellt werden (siehe senkrechte rote Linien in Bild II.4.11). Für eine korrekte Kanalleistungsmessung sind folgende Messbandbreiten notwendig:

DAB:	1,5 MHz
DVB-T (Band 3):	6,6 MHz
DVB-T (Band 4+5):	7,6 MHz

Auch die Kanalleistungsmessung wurde mit einer kleinen Messreihe näher untersucht. Es wurden drei verschiedene Geräte (FSP-3, FSH-3, SRM-3000) verglichen. Gemessen wurde, wie in Bild II.4.10 dargestellt, das Ausgangssignal eines Signalgenerators im Kanal 34 mit einer mittleren Leistung von -20 dBm. Untersucht werden sollte, welche Auflösebandbreiten (RBW) und Sweepzeiten für die Kanalleistungsmessung geeignet sind.

Die Messergebnisse sind in folgender Tabelle dargestellt:

RBW	Sweeptime	Messwert FSP-3	Messwert FSH-3	Messwert SRM-3000
30 kHz	500 ms	-18,9 dBm	-19,2 dBm	-
100 kHz	500 ms	-19,6 dBm	-19,5 dBm	-13,9 dBm
300 kHz	500 ms	-19,7 dBm	-19,7 dBm	-13,7 dBm
30 kHz	100 ms	-17,0 dBm	-17,5 dBm	-
100 kHz	100 ms	-18,2 dBm	-18,7 dBm	-
300 kHz	100 ms	-19,0 dBm	-19,1 dBm	-

Tabelle II.4.20: Messung eines DVB-T-Signals mit der Betriebsart "Kanalleistungsmessung"

Die Auswertung von Tabelle II.4.19 bringt folgende Erkenntnisse:

- Das Verfahren der "Kanalleistungsmessung" ist grundsätzlich für die Bestimmung der mittleren Leistung geeignet.
- Die RBW sollte nicht zu klein gewählt werden, ansonsten muss mit einer Überbewertung der Immission gerechnet werden. Günstig ist eine RBW von etwa zehn Prozent der Signalbandbreite.
- Je kleiner die RBW desto größer muss die Sweeptime gewählt werden, wenn man einen korrekten mittleren Leistungswert bestimmen will.
- Das SRM-3000 liefert auch in der Betriebsart "Kanalleistungsmessung" bei Geräteeinstellungen, wie sie für die Durchführung der "Schwenkmethode" üblich sind ("Max Hold") einen Messwert, der weder die Peak- noch die RMS-Leistung darstellt.

Die Kanalleistungsmessung stellt also eine durchaus brauchbare Alternative zur spektralen Messung breitbandiger Signale dar. Das Problem der nicht verfügbaren ausreichend breiten ZF-Filter, wie sie bei der spektralen Messung bei manchen Geräten auftritt, ist in der Betriebsart "Kanalleistungsmessung" nicht gegeben.

Allerdings hat dieses Messverfahren einen erheblichen praktischen Nachteil: Es kann immer nur ein Signal gemessen werden, während bei einer spektralen Messung durch Darstellung eines entsprechend großen Frequenzbereichs (natürlich innerhalb der gerätebedingten Auflösungsgrenzen) gleich mehrere digitale Emissionen erfasst werden können. Im Rahmen dieses Projektes müssten die sechs zu messenden DVB-T-Kanäle jeweils mit sechs "Channel-Power"-Einzelmessungen erfasst werden, während bei der spektralen Messung drei Einzelmessungen (siehe Tabelle II.4.21) ausreichend sind. Daher ist die spektrale Messung der Kanalleistungsmessung bei vielen Geräten vorzuziehen.

Das bereits erwähnte EMF-Messgerät SRM-3000 von Narda bietet allerdings eine neuartige Art der Kanalleistungsmessung an, bei der in einem Messdurchgang gleichzeitig mehrere frei definierbare Bänder durch Integration leistungsrichtig gemessen werden können, so dass der

gesteigerte Zeitbedarf als Nachteil der Kanalleistungsmessung entfällt. Diese Betriebsart wird bei diesem Gerät "Safety-Evaluation" genannt. Der Hersteller gibt in einer aktuellen Firmenschrift an, dass mittels dieser Betriebsart auch die "Schwenkmethode" erfolgreich durchgeführt werden kann [KEL 06].

Nachdem eine Überprüfung mit einem leitungsgeführten synthetischen Signal (Signalgenerator) bestätigte, dass bei der Betriebsart "Safety-Evaluation" (im Gegensatz zur spektralen Messung und zur Kanalleistungsmessung) das SRM-3000 bei Konfiguration, wie sie für die "Schwenkmethode" notwendig ist ("Max Hold") in der Tat den RMS-Wert liefert, wurde die Zuverlässigkeit des Verfahrens zusätzlich mit einer Livemessung eingehend untersucht. Es wurden fünf DVB-T-Signale am bereits bekannten Ort in der Nähe des Nürnberger Fernmeldeturms gemessen (Bikonische Antenne, Schwenkmethode), allerdings diesmal an zwei verschiedenen Punkten: Einer mit direkter und einer ohne direkte Sicht zum Turm, was bedeutet, dass im zweiten Fall mit einer größeren Inhomogenität der räumlichen Feldverteilung gerechnet werden muss.

Als Referenz diente jeweils eine spektrale Messung mit dem ESPI-3 mit einer Auflösungsbandbreite von 10 MHz, anschließend wurde mit dem gleichen Analysator die Messung mit einer RBW von 1 MHz wiederholt, um zu überprüfen, ob durch Anwendung des Bandbreitenkorrekturfaktors das gleiche Resultat gefunden wird, wie bei der Messung mit der korrekten RBW. Zum Schluss fand eine Messung mit dem "Safety-Evaluation"-Mode des SRM-3000 statt. Um auch Aussagen über die Reproduzierbarkeit (Spannweite der Messergebnisse) zu erhalten, wurde jede der drei Messungen drei mal hintereinander durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den folgenden beiden Tabellen wiedergegeben:

Frequenz	Referenzmessung			"Safety Evaluation" mit SRM-3000		
	Spannweite der drei Messungen	Messung mit RBW = 1MHz	Differenz zur Referenzmessung	Spannweite der drei Messungen	Differenz zur Referenzmessung	
184,5 MHz	0,3 dB	0,3 dB	1,5 dB	0,2 dB	-2,0 dB	
578 MHz	0,8 dB	1,0 dB	1,9 dB	0,3 dB	-1,2 dB	
626 MHz	0,8 dB	1,8 dB	2,7 dB	0,9 dB	-1,1 dB	
778 MHz	0,2 dB	1,3 dB	1,6 dB	0,7 dB	-1,1 dB	
834 MHz	0,5 dB	1,2 dB	2,0 dB	0,2 dB	-1,5 dB	
Mittelwerte	0,5 dB	1,0 dB	1,9 dB	0,5 dB	-1,4 dB	

Tabelle II.4.21: Vergleich: Spektrale Messung und "Safety-Evaluation" bei Sichtverbindung

Bezüglich der Reproduzierbarkeit erreicht man mit dem SRM-3000 in etwa die gleiche Qualität, wie bei der bandbreitenrichtigen Erfassung mit dem Spektrumanalysator. Auch die schmalbandige Messung mit anschließender Bandbreitenkorrektur liefert eine vergleichbare Schwankungsbreite bei mehrfacher Wiederholung der Messungen. Bezüglich der Differenz zur Referenzmessung erscheint eine Erfassung mit der Betriebsart "Safety-Evaluation" allerdings günstiger: Aus Tabelle II.4.21 ergibt sich, dass bei einer RBW von 1 MHz und

anschließender Bandbreitenkorrektur im Mittel etwa 1,9 dB mehr gemessen wird, als bei der Referenzmessung (Die leitungsgeführte Messung am Generator ergab hier eine geringere Differenz; siehe Tabelle II.4.18.). Die Ursache für diesen Effekt ist vermutlich in den stärker ausgeprägten Pegelschwankungen bei schmalbandiger Erfassung eines Funksignals in einem realen Umfeld mit Mehrwegeausbreitung zu sehen.

Die mittlere Abweichung von -1,4 dB bei der Messung mit dem SRM-3000 ist in Wirklichkeit sogar noch geringer ausgeprägt, da eine nachträglich durchgeführte Vergleichsmessung der Absolutpegelanzeigen des ESPI-3 und des SRM-3000 (CW-Signal vom Signalgenerator) zeigte, dass der ESPI-3 im Mittel etwa um 0,8 dB höhere Messwerte anzeigt als das SRM-3000 (unvermeidbare systematische Fehler aufgrund der Kalibrierung der Geräte in unterschiedlichen Labors). Somit ergibt sich eine Abweichung zwischen Referenzmessung und der Betriebsart "Safety-Evaluation" im Mittel von nur etwa 0,6 dB.

Tabelle II.4.22 zeigt die Ergebnisse der gleichen Messreihe an einem Punkt ohne Sichtverbindung zum Fernmeldeturm:

Frequenz	Referenzmessung	Messung mit RBW = 1MHz		"Safety Evaluation" mit SRM-3000	
		Spannweite der drei Messungen	Differenz zur Referenzmessung	Spannweite der drei Messungen	Differenz zur Referenzmessung
184,5 MHz	0,2 dB	0,3 dB	3,0 dB	0,8 dB	-1,5 dB
578 MHz	0,4 dB	0,3 dB	2,8 dB	0,9 dB	-1,1 dB
626 MHz	1,4 dB	0,6 dB	2,1 dB	0,7 dB	-1,4 dB
778 MHz	0,8 dB	1,4 dB	2,5 dB	0,2 dB	-0,7 dB
834 MHz	1,0 dB	1,2 dB	1,7 dB	0,7 dB	-0,4 dB
Mittelwerte	0,8 dB	0,7 dB	2,4 dB	0,6 dB	-1,0 dB

Tabelle II.4.22: Vergleich: Spektrale Messung und "Safety-Evaluation" bei fehlender Sichtverbindung

Die Reproduzierbarkeit bleibt bei nicht vorhandener Sichtverbindung offensichtlich in vergleichbarer Größenordnung, wie am Punkt mit Sicht. Im Vergleich zur Referenzmessung macht sich bei der Messung mit einer RBW von 1 MHz allerdings der oben bereits erläuterte Effekt einer Überbewertung noch deutlicher bemerkbar, während die Betriebsart "Safety-Evaluation" weiterhin Ergebnisse liefert, die sehr gut mit der Referenzmessung übereinstimmen (Berücksichtigt man wieder die 0,8 dB systematische Differenz zum ESPI-3, beträgt der mittlere Unterschied zwischen beiden Messungen diesmal sogar nur 0,2 dB).

Fazit:

Für die Messung der mittleren Immission breitbandiger Rundfunk- und TV-Signale (DAB und DVB-T) müssen folgende Punkte besonders beachtet werden:

- Die Messungen sind mit dem RMS-Detektor durchzuführen. Der Peak-Detektor führt zu einer Überbewertung der mittleren Immission um etwa die Größenordnung des Crestfaktors. Je nach verwendetem Messgerät ist auf eine ausreichend große Sweeptime zu achten, da der RMS-Detektor bei zu kleinen Sweepzeiten zu hohe Messergebnisse liefert.
- Eine an die Signalbandbreite angepasste RBW ist einzustellen. Stehen derart große Auflösebandbreiten am Messgerät nicht zur Verfügung, kann auch mit der höchsten verfügbaren Bandbreite gemessen werden und eine Ergebniskorrektur mittels der in der Empfehlung der BNetzA [BNetzA 03] angegebenen Korrekturformel durchgeführt werden. Allerdings führt diese Art der Erfassung in realen Szenarien mit Mehrwegeausbreitung zu einer gewissen Überbewertung der Exposition.
- Die "Kanalleistungsmessung" ist bei korrekter Einstellung der RBW und der Sweeptime als alternative Messmethode ebenso geeignet. Der Zeitaufwand für die Erfassung der einzelnen Signale ist bei den meisten Geräten gegenüber der spektralen Messung deutlich höher. Allerdings sind seit kurzem Messgeräte verfügbar, die eine echte Kanalleistungsmessung gleichzeitig für mehrere frei definierbare Frequenzbereiche korrekt und schnell durchführen, so dass der Nachteil des größeren Zeitbedarfs entfällt. Ein derartiges Gerät wird auch im Rahmen der hier durchzuführenden Messungen für die Erfassung der digital modulierten Signale eingesetzt.

II.4.5 Für die durchzuführenden Messungen gewählte Geräte und Einstellparameter

II.4.5.1 Messgeräte

Die Messungen wurden aufgrund der größtmöglichen Flexibilität mit batteriebetriebenen Geräten durchgeführt. Im Rahmen der ersten Messkampagne ("Vorhermessung") wurde das SRM-3000 von Narda zur Messung der analogen UKW- und TV-Signale verwendet. Allerdings wurde nicht die isotrope Sonde des Gerätes, sondern eine bikonische Messantenne (UBA-9116 von Schwarzbeck) verwendet, da mit dieser die für die Erfassung vorgesehene "Schwenkmethode" (siehe Abschnitt II.4.4.1) optimal durchgeführt werden konnte und außerdem die Isotropsonde des SRM-3000 erst für Frequenzen ab 80 MHz spezifiziert ist.

Bei den "Nachhermessungen" wurde wiederum das SRM-3000 für die analogen Signale eingesetzt. Auch für die Erfassung der digital modulierten Signale konnte das SRM-3000 verwendet werden, allerdings nicht in der Betriebsart "Spektrumanalyse", sondern im Mode "Safety-Evaluation", da nur in dieser Betriebsart der RMS-Wert der einzelnen Signale korrekt gemessen wurde (siehe Abschnitt II.4.4).

Die digitalen Signale wurden ebenfalls mit der bikonischen Messantenne erfasst. Nur die Felder von DAB-Sendern im L-Band wurden mit einer kleinen logarithmisch-periodischen Dipolantenne (USLP-9142 von Schwarzbeck) gemessen.

Für beide Messkampagnen wurde also identisches Gerät eingesetzt, so dass systematische Fehler aufgrund der Kalibrierabweichungen einzelner Labors entfallen.

Es sei hierbei noch einmal darauf hingewiesen, dass die korrekte messtechnische Erfassung auch mit Geräten anderer Hersteller möglich ist, sofern die in Abschnitt II.4.4 abgeleiteten Einstellparameter berücksichtigt werden. Die konkrete Geräteauswahl für die im vorliegenden Projekt durchzuführenden Messungen erfolgt u.a. vor dem Hintergrund, dass die effektive Bearbeitung einer mehrere Hundert Messpunkte umfassenden Messreihe handliche, batteriebetriebene Messgeräte mit kurzen Einschaltzeiten sowie weitgehend softwareunterstützter Aufarbeitung der Messwerte erfordert.



Bild II.4.12: Verwendeter Analysator: Narda SRM-3000

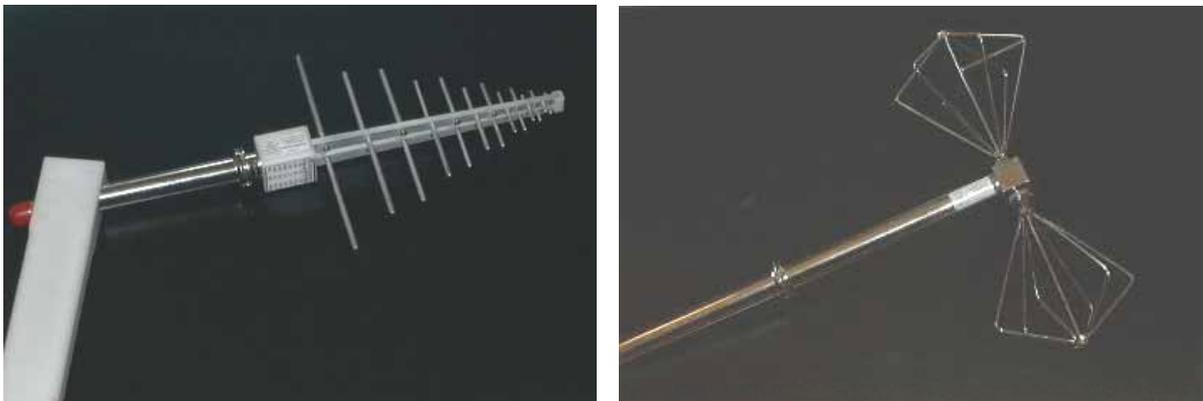


Bild II.4.13: Verwendete Messantennen: Schwarzbeck USLP-9142 (links) und UBA-9116 (rechts)

Für Langzeitmessungen wurden Spektrumanalysatoren von Rohde & Schwarz (z.B. FSH-3, FSP oder ESPI) in Verbindung mit einer Isotropsonde verwendet (Messsystem TS-EMF, Bild II.4.14). Mit der firmeneigenen Software RFEX lassen sich einzelne Messpakete mit spezifischen Einstellparametern definieren, die dann durch das Messsystem sequenziell abgearbeitet und bis zu einer angegebenen Endzeit ständig wiederholt wurden. Für jeden spezifischen Funkdienst nach Tabelle II.4.23 wurde ein separates Messpaket definiert. Die Messergebnisse wurden auf dem Rechner gespeichert, der auch zur Softwaresteuerung der Messungen diente.



Bild II.4.14: Langzeitmessungen: Isotropes Messsystem TS-EMF von Rohde & Schwarz

II.4.5.2 Einstellparameter der Messgeräte

Folgende Tabelle gibt die konkreten Einstellparameter wieder, die als Ergebnis der Untersuchungen in Abschnitt II.4.4 zur Erfassung der verschiedenen analogen Funksignale im Rahmen der für dieses Projekt durchzuführenden Messungen gewählt wurden.

Funkdienst	Startfrequenz [MHz]	Stopfrequenz [MHz]	RBW [MHz]	VBW [MHz]	Detektor	Sweepzeit [ms]
UKW-Radio	87,5	108,0	0,2	-*	Peak	200
Analog-TV (Band 1)	47,0	68,0	2,0	-*	Peak	200
Analog-TV (VHF)	174,0	230,0	2,0	-*	Peak	200
Analog-TV (UHF 1)	470,0	629,0	2,0	-*	Peak	200
Analog-TV (UHF 2)	629,0	790,0	2,0	-*	Peak	200

Tabelle II.4.23: Gewählte Einstellparameter für die Messung von analogen Rundfunk- und TV-Signalen für den Spektrumanalysator Narda SRM-3000

*: Die Videobandbreite wird bei dem hier verwendeten Analysator (SRM-3000) automatisch an die RBW angepasst.

Die Messung der digitalen Signale wird, wie bereits erwähnt, nicht im spektralen Mode sondern in Form von Kanalleistungsmessungen im Mode "Safety Evaluation" durchgeführt. Es werden hierzu Bänder definiert, deren Mittenfrequenz und Bandbreiten an die entsprechenden DAB- bzw. DVB-T-Signale angepasst sind. Zusätzlich wird darauf geachtet, dass die vom Gerät gewählte RBW kleiner als ein Prozent der Signalbandbreite ist. Damit die Sweepzeiten wieder für die Schwenkmethode ausreichend kurz sind, wird der betrachtete TV-Frequenzbereich, wie bei der Messung der analogen Signale, in drei Teilbereiche unterteilt (VHF, UHF1 und UHF2). Zusätzlich erfolgt noch eine Messung der DAB-Signale im L-Band.

Bei der "Vorhermessung" muss somit an jedem Messpunkt fünf Mal die Schwenkmethode durchgeführt werden, um alle analogen Signale zu erfassen. Im Rahmen der "Nachhermessung" ist es sogar erforderlich, insgesamt acht Mal zu schwenken, da sowohl die analogen als auch die digitalen Signale zu messen sind (Zwei Einsparungen sind möglich: Die DAB-Signale im VHF-Band werden gleichzeitig mit der Messung der DVB-T-Signale in diesem Frequenzbereich abgedeckt, außerdem braucht das TV-Band 1 im Rahmen der "Nachhermessung" nicht mehr betrachtet werden, da bei der ersten Kampagne an keinem der Punkte ein nennenswertes Signal erfasst wurde).

Die UKW-Signale werden bei der "Nachhermessung" bewusst nochmals erfasst, um durch den Vergleich mit der "Vorhermessung" einen Eindruck über die Wiederholgenauigkeit derartiger Messungen sowie eventuell auftretende jahreszeitliche Schwankung der Immission zu gewinnen (Im Unterschied zu analogem TV und DVB-T wurden an den UKW-Sendern im Sommer 2005 keine nennenswerten Veränderungen vorgenommen).

II.4.6 Nachweisgrenzen

In diesem Abschnitt wird die Empfindlichkeit der im Abschnitt II.4.4 als grundsätzlich geeignet eingestuften Messgeräte in Zusammenhang mit den abgeleiteten Einstellparametern bezüglich aller in vorliegendem Projekt zu messenden Funkdienste untersucht.

Die Empfindlichkeit eines Messsystems ist von folgenden Faktoren abhängig:

II.4.6.1 Spektrumanalysator

Die Empfindlichkeit des Spektrumanalysators kann als diejenige Anzeige des Gerätes aufgefasst werden, die sich ergibt, wenn kein Signal am Eingang anliegt. Es können nur solche Signale erfasst werden, die größer als dieses Grundrauschen sind; kleinere Signale werden nicht erkannt. Neben dem gewählten Gerätetyp und der Aktivierung eventuell optional vorhandener Vorverstärker sind hier vor allem die Einstellparameter entscheidend, und zwar insbesondere Auflösebandbreite und Detektortyp. Einen Einfluss auf die erzielbare Empfindlichkeit haben weiterhin die Größe des Referenzpegels (hierüber wird die ZF-Verstärkung variiert) und die gewählte Eingangsdämpfung. Bei dem für vorliegende Messreihe konkret gewählten Gerätetyp Narda SRM-3000 und z.B. auch beim Gerät Rohde & Schwarz FSH-3 lassen sich Referenzpegel und Eingangsdämpfung nicht separat voneinander wählen, sondern sie sind verkoppelt. Bei der Auswahl niedriger Referenzpegel wird die Eingangsdämpfung geräteintern bis auf 0 dB reduziert, wohingegen bei größeren Referenzpegeln stufenweise Eingangsdämpfungsglieder in den Messkreis zugeschaltet werden. Der gewählte Frequenzbereich oder der Span hingegen haben im hier betrachteten Frequenzbereich keinen Einfluss auf die Mindestempfindlichkeit des Spektrumanalysators.

Für die nach Tabelle II.4.23 für UKW gewählten Einstellparameter (RBW=0,2 MHz, Peak-Detektor, 200 ms Sweeptime) beträgt beispielsweise beim Gerät Narda SRM-3000 die Empfindlichkeitsschwelle beim kleinsten durch das System zugelassenen Referenzpegel etwa 18 dB μ V.

Bei den Betrachtungen zur Empfindlichkeit soll noch auf zwei Aspekte aufmerksam gemacht werden:

- Werden vergleichsweise große Immissionen gemessen, wird der Referenzpegel bzw. die Eingangsdämpfung automatisch oder manuell so angehoben, dass diese Signale noch gut auf der Bildschirmanzeige des Gerätes dargestellt werden können und nicht „über den oberen Bildrand hinausragen“. Dies ist notwendig, um den Eingangsmischer des Analysators vor Übersteuerung oder gar Zerstörung zu schützen. Dies geht nach den obigen Betrachtungen mit einer Reduzierung der Empfindlichkeit einher. Somit können dann ebenfalls im Spektrum vorhandene, vergleichsweise kleine Signale nicht mehr aus der erhöhten Rauschschwelle aufgelöst werden können. Dies ist aber nicht als kritisch anzusehen, da die Gesamtmission in diesem Falle von den starken Eingangssignalen dominiert wird und der Beitrag der nicht mehr auflösbaren Signalanteile zur Gesamtmission vernachlässigt werden kann.

- Bereits im Abschnitt II.4.2 bei der Beschreibung von Eingangsdämpfung und Referenzpegel wurde erläutert, dass Eingangsdämpfungen von 0 dB vor allem bei der Verwendung von kleinen bikonischen Antennen aufgrund der Fehlanpassung zwischen Antenne und Eingangsmischer zu einer Erhöhung der Messunsicherheit führen, weswegen beispielsweise eine Eingangsdämpfung von 10 dB empfohlen wurde. Hier ist also ein Kompromiss zwischen Messempfindlichkeit und Messunsicherheit zu suchen.

II.4.6.2 Antenne

Neben dem Spektrumanalysator bestimmt vor allem die angeschlossene Messantenne die Empfindlichkeit des gesamten Messsystems. Der hierfür maßgebliche Parameter ist der so genannte Antennenfaktor K. Der Antennenfaktor bezeichnet als Wandlungsmaß das Verhältnis zwischen der elektrischen Feldstärke, in der sich die Antenne befindet, zur anliegenden Hochfrequenzspannung U am Antennenfußpunkt:

$$K = E / U \quad . \quad (II.4.4)$$

Ein hoher Antennenfaktor bedeutet, dass bei gleicher vorhandener Feldstärke eine in das Feld gebrachte Antenne eine geringere Fußpunktspannung liefern würde als bei einer Antenne mit niedrigerem Antennenfaktor; d.h. die Antenne ist weniger empfindlich.

Die Antennenfaktoren sind stark frequenzabhängig, so dass hiermit (im Gegensatz zu den Einstellparametern des Spektrumanalysators) eine frequenzabhängige Komponente in die Betrachtung der Nachweisgrenzen hinzukommt.

In den Bildern II.4.14 und II.4.15 sind die Antennenfaktoren der für vorliegende Messungen ausgewählten Antennen Schwarzbeck UBA-9116 sowie USLP-9142 im relevanten Frequenzbereich dargestellt. Darüber hinaus beinhalten die Bilder II.4.16 und II.4.17 die Antennenfaktoren derjenigen isotropen Sonden, die standardmäßig zu den Messsystemen Narda SRM-3000 bzw. Rohde & Schwarz TS-EMF angeboten werden. Bei der Isotropsonde für das TS-EMF sind die Faktoren jeweils für die x-, y- und z-Achse angegeben.

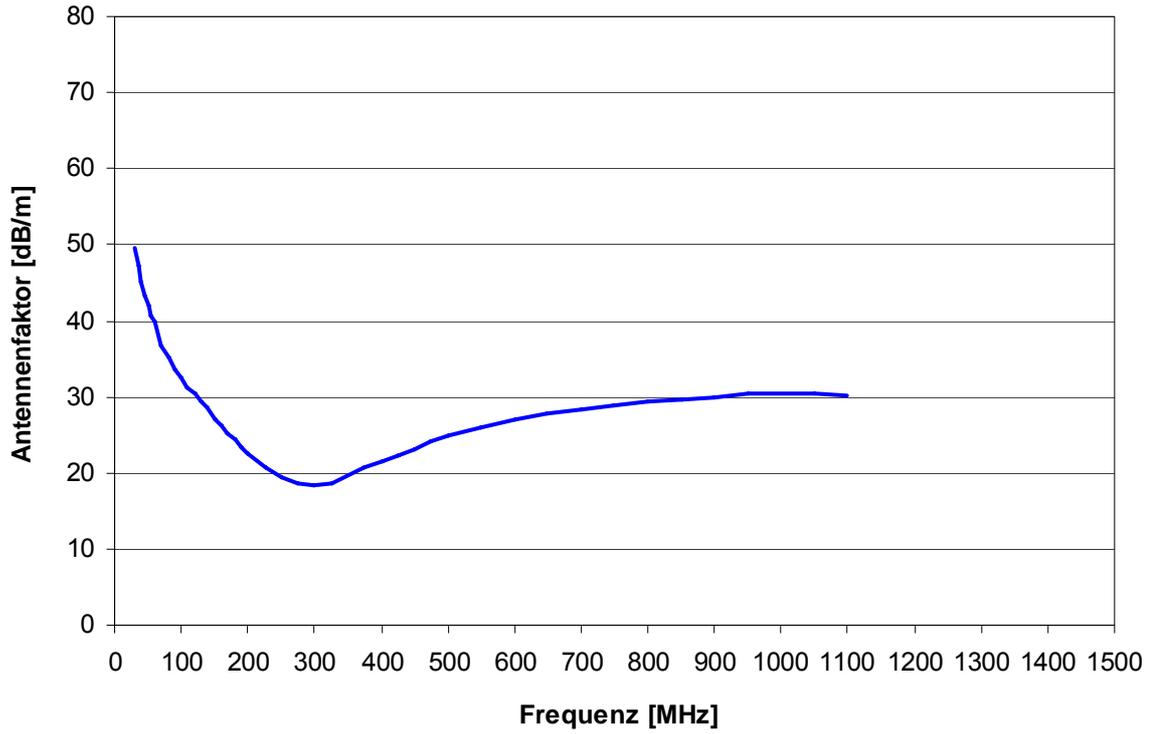


Bild II.4.15 Antennenfaktor bikonische Antenne Schwarzbeck UBA-9116

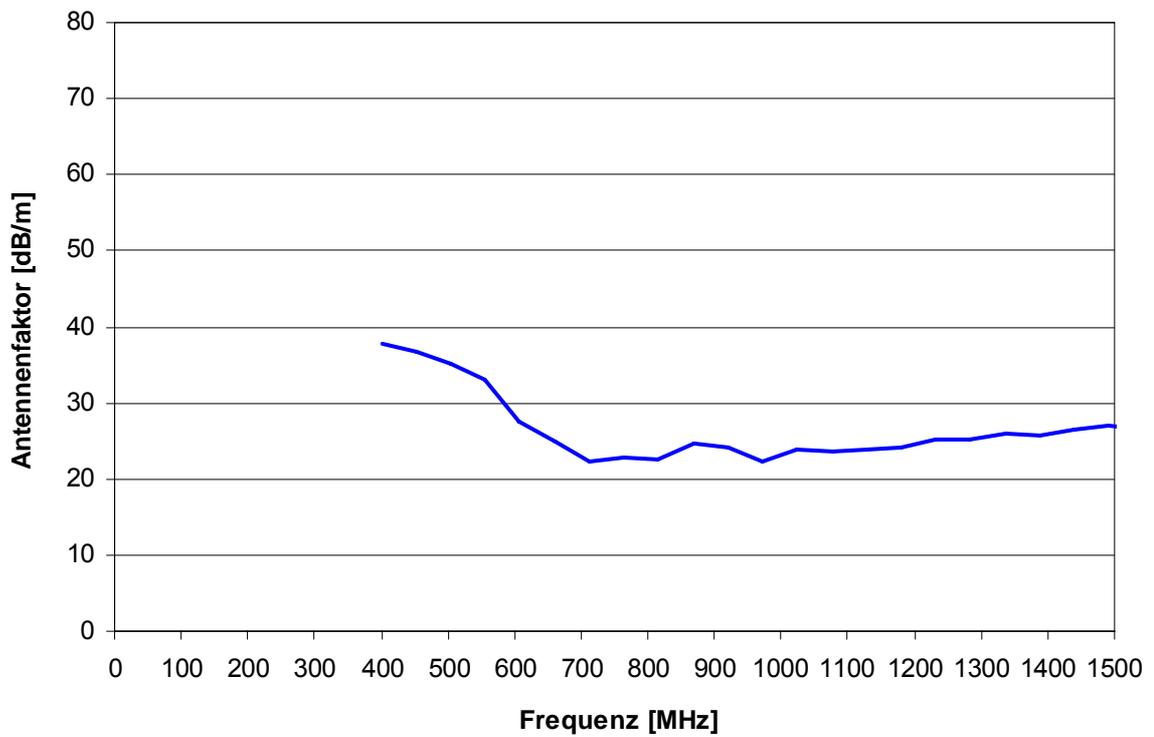


Bild II.4.16 Antennenfaktor logarithmisch-periodische Antenne Schwarzbeck USLP-9142

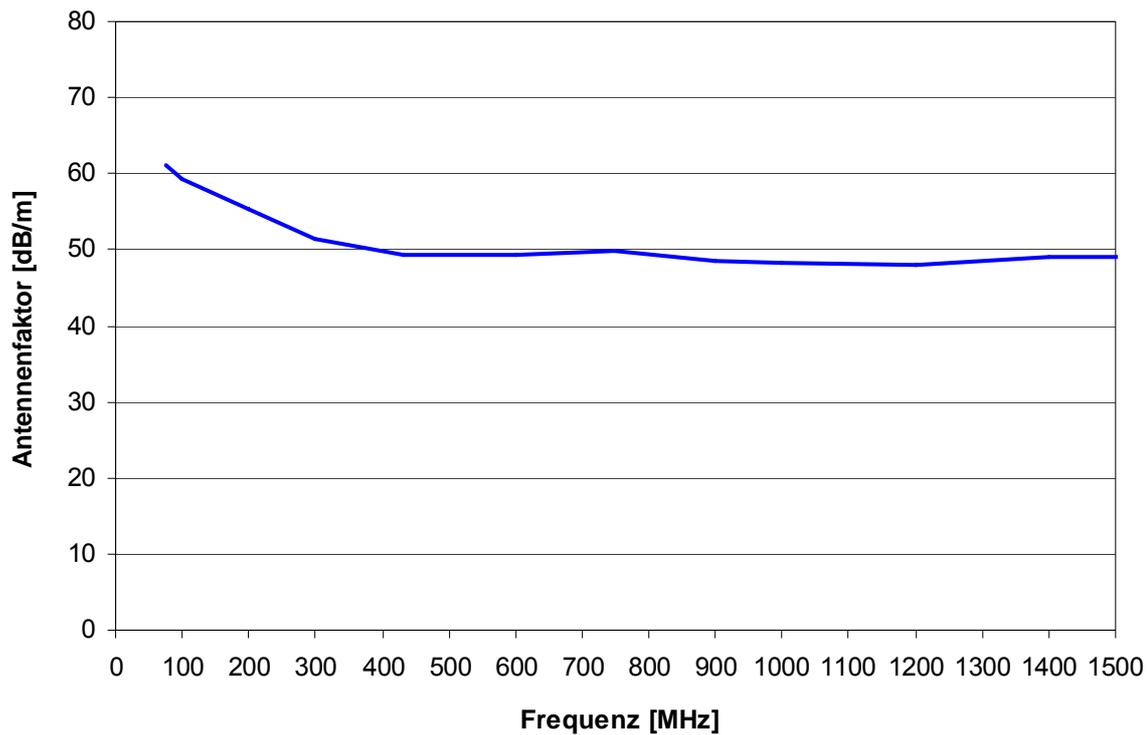


Bild II.4.17 Antennenfaktor Isotropsonde Messsystem Narda SRM-3000

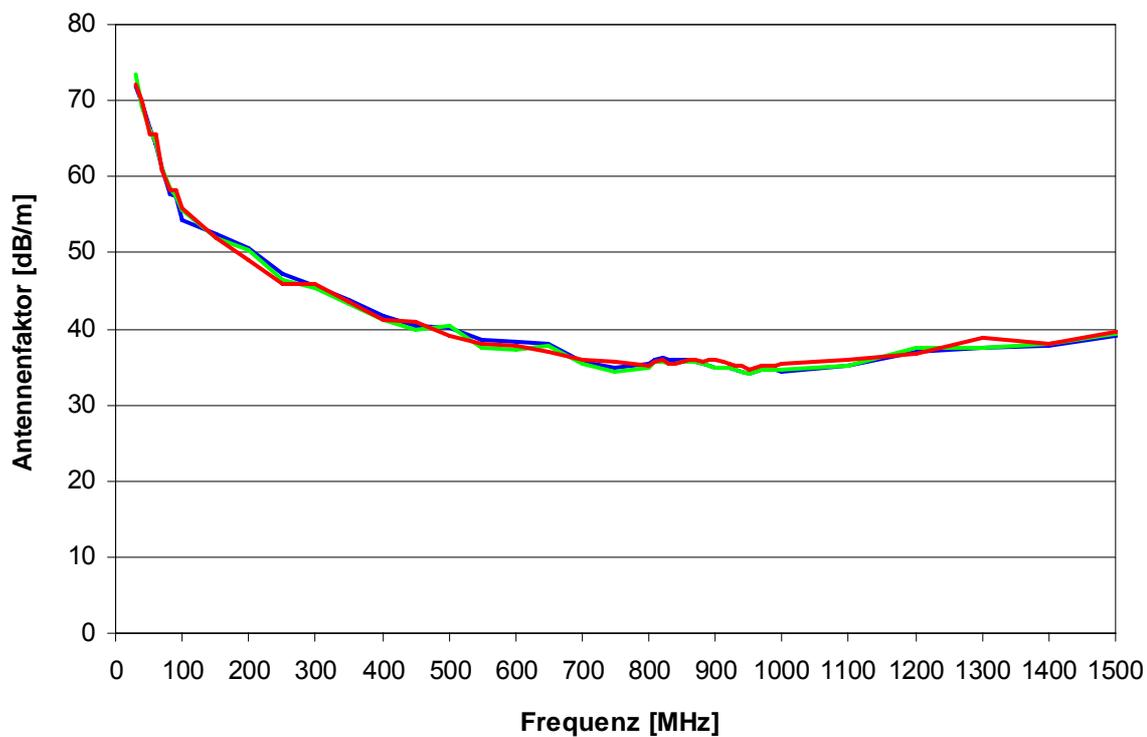


Bild II.4.18 Antennenfaktor Isotropsonde Messsystem Rohde & Schwarz TS-EMF; die drei dargestellten Kurven entsprechend den Antennenfaktoren der drei Messachsen

Folgende Erkenntnisse können aus den Bildern gewonnen werden:

- Die Isotropsonden haben in allen Frequenzbereichen einen wesentlich größeren Antennenfaktor als die logarithmisch-periodische bzw. die bikonische Antenne. Beispielsweise besteht für den UKW-Bereich zwischen den Isotropsonden für das Messsystem TS-EMF bzw. Narda SRM-3000 und der UBA-9116 ein Unterschied von etwa 20 dB. Für den UHF-Bereich von Analog-TV und DVB-T ist der Unterschied zwischen der UBA-9116 und der Narda-Isotropsonde sogar größer als 20 dB. Das entspricht einer um den entsprechenden Faktor besseren Empfindlichkeit des Messsystems unter Verwendung der Antenne UBA-9116. Dies ist (neben der nicht unproblematischen Anwendung der Schwenkmethode bei den Isotropsonden durch sequenzielles Zuschalten der drei Sondenachsen) der Grund dafür, dass die hier vorzunehmenden Messungen nicht mit den „messgeräte-eigenen“ Isotropsonden, sondern mit den empfindlicheren bikonischen bzw. logarithmisch-periodischen Antennen durchgeführt werden.
- Die bikonische Antenne UBA-9116 ist nur für Frequenzen bis 1100 MHz spezifiziert, weswegen für die DAB-Messungen im L-Band die logarithmisch-periodische Antenne USLP-9142 eingesetzt wird.

II.4.6.3 HF-Kabel

Neben dem Spektrumanalysator und der verwendeten Messantenne spielt auch das eingesetzte Hochfrequenzkabel bei der Untersuchung der Messempfindlichkeit eine Rolle. Die Empfindlichkeit verbessert sich, wenn ein dämpfungsarmes Kabel verwendet wird. Hier ist allerdings ebenfalls ein Kompromiss zu suchen, da folgende Faktoren eine Rolle spielen:

- Hochfrequenzkabel mit einer besonders niedrigen Dämpfung sind oftmals unflexibel bzw. anfällig für mechanische Beanspruchungen, was sie für den „Vor-Ort-Einsatz“ nicht optimal geeignet erscheinen lässt.
- Eine gewisse Dämpfung kann sich, wie oben beschrieben, positiv auf die Messunsicherheitsbetrachtungen auswirken, da durch höhere Dämpfungen Fehlanpassungen zwischen Antenne und Spektrumanalysator verringert werden.

Allerdings ist der Einfluss des Hochfrequenzkabels nicht so groß wie bei den Einflussgrößen Spektrumanalysator und Antennentyp, da Kabellänge und die dazugehörige Kabeldämpfung hier im Allgemeinen begrenzt sind.

Typische Kabeldämpfungen von geeigneten Messkabeln (Länge z.B. 3 m) betragen bei 100 MHz (UKW) wenige Zehntel dB und steigen bis 1,5 GHz (DAB L-Band) auf Werte zwischen 1 und 2 dB an.

II.4.6.4 Nachweisgrenzen der für die Messungen gewählten Geräte

Mit den obigen Betrachtungen ist es möglich, die erzielbaren Nachweisgrenzen in Abhängigkeit des zu messenden Funkdienstes zu spezifizieren. Diese können dann mit den aus der Versorgungsplanung stammenden Versorgungsfeldstärken bzw. mit den gesetzlichen Grenzwerten der 26. BImSchV verglichen werden. Die nachfolgenden Betrachtungen in Tabelle II.4.25 beziehen sich sowohl auf den im vorliegenden Projekt konkret eingesetzten Spektrumanalysatortyp Narda SRM-3000 in Verbindung mit den in Abschnitt II.4.5 definierten Einstellparametern. Darüber hinaus werden jedoch auch Werte für ein alternativ verwendbares Laborgerät, den Spektrumanalysator Rohde & Schwarz FSP-7, angegeben. Für die Einstellparameter des FSP-7 gelten die Ausführungen nach Abschnitt II.4.4; sie sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Funkdienst	Startfrequenz [MHz]	Stopfrequenz [MHz]	RBW [MHz]	VBW [MHz]	Detektor	Sweeptime [ms]
UKW-Radio	87,5	108,0	0,2	1,0	RMS	100
Analog-TV (Band 1)	47,0	68,0	1,0	3,0	Peak	200
Analog-TV (VHF)	174,0	230,0	1,0	3,0	Peak	200
Analog-TV (UHF 1)	470,0	629,0	1,0	3,0	Peak	200
Analog-TV (UHF 2)	629,0	790,0	1,0	3,0	Peak	200
DAB (VHF)	174,0	230,0	1,5	10,0	RMS	100
DAB (L-Band)	1.450,0	1.500,0	1,5	10,0	RMS	100
DVB-T (VHF)	174,0	230,0	10,0	10,0	RMS	100
DVB-T (UHF 1)	570,0	700,0	10,0	10,0	RMS	100
DVB-T (UHF 2)	740,0	840,0	10,0	10,0	RMS	100

Tabelle II.4.24: Einstellparameter für die Messung von analogen und digitalen Rundfunk- und TV-Signalen für den Spektrumanalysator Rohde & Schwarz FSP-7

Funkdienst	Spektrum-analysator	Messantenne	erzielbare Empfindlichkeit [dB μ V/m]	Mindest-Versorgungsfeldstärke [dB μ V/m]	Grenzwert nach 26. BImSchV [dB μ V/m]
UKW-Radio	SRM-3000	UBA-9116	52 ... 50	54 (Land), 74 (Stadt)	149
	FSP-7		40 ... 38		
Analog-TV (Band 1)	SRM-3000	UBA-9116	68 ... 64	48	149
	FSP-7		67 ... 61		
Analog-TV (VHF)	SRM-3000	UBA-9116	52 ... 48	55	149
	FSP-7		50 ... 45		
Analog-TV (UHF)	SRM-3000	UBA-9116	52 ... 57	70	149 ... 152
	FSP-7		49 ... 55		
DAB (VHF)	SRM-3000	UBA-9116	45 ... 40	37	149
	FSP-7		39 ... 34		
DAB (L-Band)	SRM-3000	USLP-9142	46 ... 47	37	154
	FSP-7		42 ... 43		
DVB-T (VHF)	SRM-3000	UBA-9116	50 ... 45	49 (fixed antenna) 68 (portable outdoor) 78 (portable indoor)	149
	FSP-7		48 ... 43		
DVB-T (UHF 1)	SRM-3000	UBA-9116	51 ... 53	57 (fixed antenna) 82 (portable outdoor) 94 (portable indoor)	150 ... 151
	FSP-7		49 ... 51		
DVB-T (UHF 2)	SRM-3000	UBA-9116	54 ... 55	57 (fixed antenna) 82 (portable outdoor) 94 (portable indoor)	151 ... 152
	FSP-7		52 ... 53		

Tabelle II.4.25: Erzielbare Empfindlichkeiten für die zu messenden Funkdienste für die Analytoren Narda SRM-3000 und Rohde & Schwarz FSP-7 bei minimal möglichem Referenzpegel

Fazit:

- Bei den Diensten UKW-Radio, Analog-TV (VHF und UHF) sowie DVB-T ist die Nachweisgrenze der vorgestellten Messtechnik im selben Bereich oder sogar unterhalb der für eine gute Versorgung benötigte Funkfeldstärke. Damit ist das untersuchte Messsystem empfindlich genug, um Immissionen in den Größenordnungen, wie sie im gesamten Versorgungsgebiet auftreten können, durchgängig erfassen zu können.
- Für die Dienste Analog-TV (Band 1) sowie DAB liegen die Nachweisgrenzen oberhalb der Mindest-Versorgungsfeldstärke. Das bedeutet, dass es vor allem am Rande des Ver-

sorgungsgebietes möglich sein kann, dass diese Funkdienste mit der Messtechnik nicht mehr aufgelöst werden können, obwohl an diesen Stellen ein Rundfunkempfang noch möglich ist. Aus Sicht des Immissionsschutzes ist dies allerdings unkritisch, da für diese Funkdienste z.B. beim für die Messreihe konkret eingesetzten Messsystem Narda SRM-3000 die Nachweisgrenzen immer noch mindestens um den Faktor 80 dB (Analog-TV Band 1) bzw. 100 dB (DAB) unter den Grenzwerten der 26. BImSchV liegen. Das bedeutet, dass hiermit Immissionen, die feldstärkebezogen 0,01 % (Analog-TV Band 1) bzw. 0,001 % (DAB) des Grenzwertes ausschöpfen, noch nachgewiesen werden können.

- Beim Vergleich zwischen beiden Gerätetypen Narda SRM-3000 bzw. Rohde & Schwarz FSP-7 mit identischen Antennen zeigt sich, dass in Einzelbereichen (z.B. DAB) mit dem Laborgerät FSP-7 geringfügig höhere Empfindlichkeiten erzielbar sind. Dem gegenüber stehen jedoch die bereits in Abschnitt II.4.5 angesprochenen Vorteile des handbetriebenen Narda-Gerätes bezüglich Flexibilität und softwareunterstützter Aufarbeitung der Messwerte bei vorliegender umfangreicher Messreihe.

II.4.7 Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit

Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit sind vor folgendem Hintergrund sinnvoll: Einerseits kann durch mehrfache Messung an ein und demselben Messpunkt überprüft werden, inwieweit die Schwenkmethode sowie die oben abgeleiteten Einstellparameter des Spektrumanalysators zuverlässig den Maximalwert im Messvolumen ermitteln können bzw. wie groß die auftretenden Messwertschwankungen hierbei sind. Andererseits wird hiermit ein Wert für die verfahrensbedingte Messunsicherheit bzw. die Messunsicherheit der Probennahme ermittelt, der in die Aufstellung einer Messunsicherheitsbetrachtung einfließt.

Zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

Es wurden die Funkdienste UKW, Analog-TV, DAB und DVB-T zehn mal hintereinander an identischen Messpunkten in vier unterschiedlichen Szenarien gemessen. Die vier Szenarien sind:

- indoor, mit Sicht zum die Immission maßgeblich bestimmenden Sender
- indoor, ohne Sicht zum Sender
- outdoor, mit Sicht zum Sender, und
- outdoor, ohne Sicht zum Sender.

Mit diesen Umgebungsklassen wird eine Vielzahl von praktisch auftretenden Messszenarien erfasst.

An den Messungen waren jeweils zwei bis drei Personen beteiligt, um auch eine Streuung durch z.B. unterschiedliche Ausführung der Schwenkmethode einbeziehen zu können.

Die Messungen ohne Sicht zum Sender wurden in zwei Büroräumen der IMST GmbH (indoor) sowie auf einem Feldweg in der Nähe der IMST GmbH (outdoor) durchgeführt. Für die Immissionen sind hier vier Sendeanlagen bestimmend, und zwar Wesel (18 km), Düsseldorf (33 km), Essen (32 km) und Langenberg (44 km).

Die Messungen mit Sicht zum Sender erfolgten in unmittelbarer Nähe des Senders Langenberg. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass von diesem Sender sowohl UKW, als auch Analog-TV, DAB und DVB-T abgestrahlt wird. Bild II.4.19 zeigt das Szenario der Messung „outdoor, mit Sicht“. Im Hintergrund des Bildteils rechts unten ist der Sender Langenberg zu erkennen.

Für die Messungen wurden die Spektrumanalysatoren Rohde & Schwarz FSP-7 und FSH-3 eingesetzt.

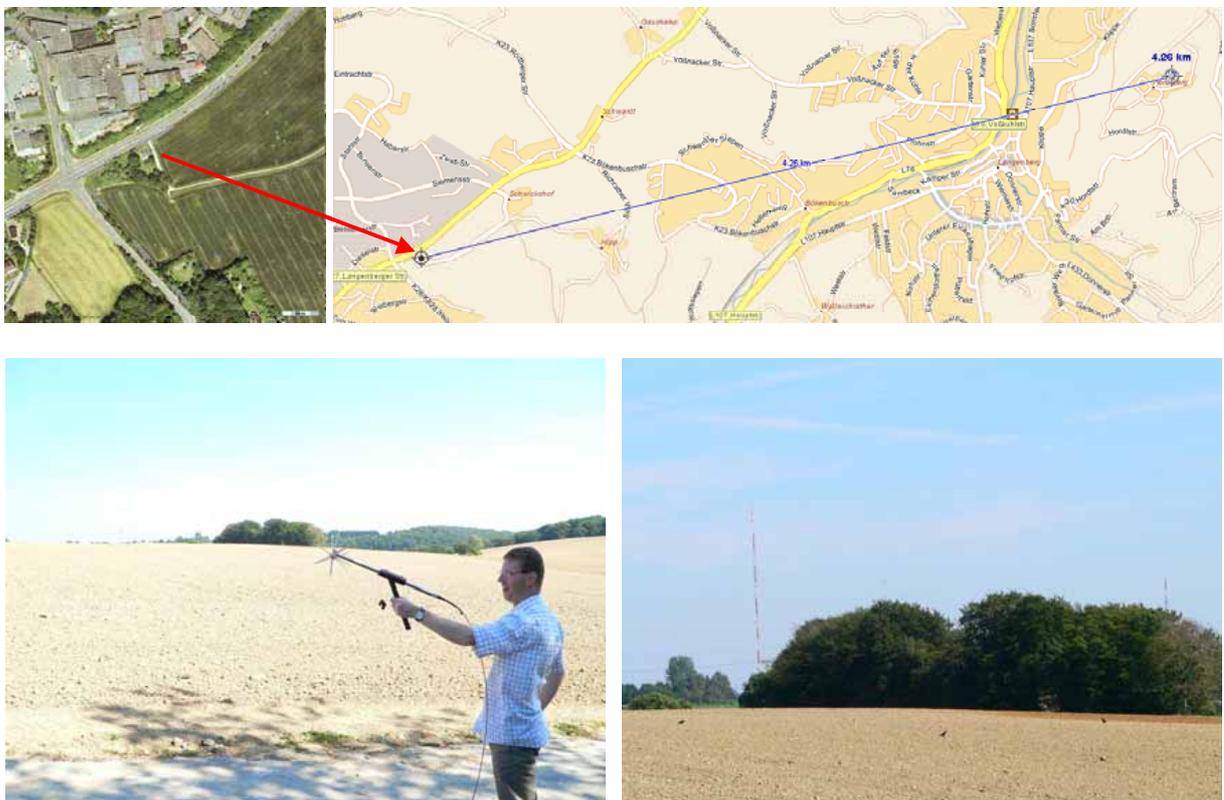


Bild II.4.19: Messort für das Szenario outdoor mit Sicht zum Sender; Entfernung zum Sender Langenberg etwa 4,3 km

Im Einzelnen wurden folgende Signale gemessen:

Indoor, mit Sicht:

- UKW: 88,8 MHz, 95,1 MHz, 99,2 MHz, 101,3 MHz, 103,3 MHz, 106,7 MHz
- Analog-TV: Kanal 9
- DAB: 229,07 MHz
- DVB-T: Kanäle 25, 29, 35, 46, 52, 55 und 64

Indoor, ohne Sicht:

- UKW: 95,1 MHz, 96,5 MHz, 99,2 MHz, 101,3 MHz, 103,3 MHz, 106,7 MHz
- Analog-TV: Kanal 9
- DAB: 229,07 MHz
- DVB-T: Kanäle 29, 35, 46, 52, 55 und 64

Outdoor, mit Sicht:

- UKW: 88,8 MHz, 95,1 MHz, 96,5 MHz, 99,2 MHz, 101,3 MHz, 103,3 MHz, 106,7 MHz
- Analog-TV: Kanal 9
- DAB: 229,07 MHz
- DVB-T: Kanäle 25, 29, 35, 46, 52, 55 und 64

Outdoor, ohne Sicht:

- UKW: 88,8 MHz, 95,1 MHz, 99,2 MHz, 101,3 MHz, 102,8 MHz, 103,3 MHz, 105,7 MHz, 106,7 MHz
- Analog-TV: Kanal 9
- DAB: 229,07 MHz
- DVB-T: Kanäle 29, 35, 46, 52, 55, 59 und 64

Für jeden einzelnen Funkdienst wurde jeweils die Summenimmission als quadratische Summation aller am Messpunkt einzeln gemessenen Feldstärken der Einzelsignale gebildet.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Messungen dokumentiert.

Messung Nr.	Summenimmission [dB μ V/m]			
	UKW	Analog-TV	DAB	DVB-T
1	117,5	107,7	91,3	113,9
2	119,0	107,1	91,7	113,7
3	118,0	106,8	92,2	113,6
4	118,2	106,7	91,9	113,8
5	118,7	107,8	92,0	113,6
6	118,5	107,2	90,6	113,3
7	118,1	106,4	91,2	113,3
8	118,4	107,5	92,2	113,3
9	118,3	106,7	92,2	113,9
10	118,1	107,6	91,4	113,5
Vertrauensgrenze (P=95 %)	$\pm 0,8$ dB	$\pm 0,9$ dB	$\pm 1,0$ dB	$\pm 0,5$ dB

Tabelle II.4.26: Indoor, mit Sicht zum Sender

Messung Nr.	Summenimmission [dB μ V/m]			
	UKW	Analog-TV	DAB	DVB-T
1	72,4	64,0	60,8	83,3
2	72,9	64,3	61,0	83,2
3	72,6	64,7	61,6	83,0
4	72,2	64,8	60,9	82,7
5	72,7	63,7	60,8	82,7
6	72,7	65,8	60,6	82,9
7	72,7	63,8	60,2	84,1
8	72,2	63,7	60,7	83,7
9	72,9	64,0	60,5	84,1
10	72,6	63,7	60,4	83,8
Vertrauensgrenze (P=95 %)	$\pm 0,5$ dB	$\pm 1,4$ dB	$\pm 0,8$ dB	$\pm 1,0$ dB

Tabelle II.4.27: Indoor, ohne Sicht zum Sender

Messung Nr.	Summenimmission [dB μ V/m]			
	UKW	Analog-TV	DAB	DVB-T
1	111,7	107,8	81,9	112,1
2	112,0	108,1	81,4	111,6
3	111,3	107,7	81,5	112,1
4	111,1	108,0	81,8	112,0
5	111,3	107,6	81,4	111,9
6	111,4	108,4	81,9	112,0
7	111,3	107,5	81,5	111,9
8	111,4	108,7	81,6	112,0
9	111,4	108,4	81,4	112,3
10	111,0	108,5	81,4	112,0
Vertrauensgrenze (P=95 %)	$\pm 0,6$ dB	$\pm 0,8$ dB	$\pm 0,4$ dB	$\pm 0,4$ dB

Tabelle II.4.28: Outdoor, mit Sicht zum Sender

Messung Nr.	Summenimmission [dB μ V/m]			
	UKW	Analog-TV	DAB	DVB-T
1	80,4	71,6	61,2	86,9
2	80,4	70,8	60,1	87,6
3	81,2	71,5	59,4	87,1
4	80,6	70,2	60,4	87,5
5	80,8	70,9	60,8	86,9
6	80,4	70,5	59,8	87,2
7	80,6	71,7	60,6	87,1
8	80,1	70,8	59,8	87,7
9	80,2	70,4	59,9	87,4
10	80,1	70,8	59,1	87,2
Vertrauensgrenze (P=95 %)	$\pm 0,7$ dB	$\pm 1,0$ dB	$\pm 1,2$ dB	$\pm 0,6$ dB

Tabelle II.4.29: Outdoor, ohne Sicht zum Sender

Mit diesen Messergebnissen ist es möglich, die Reproduzierbarkeit zu quantifizieren. Dafür wird die so genannte Vertrauensgrenze verwendet, die in den obigen Tabellen einzeln ausgewiesen ist. Die Vertrauensgrenze bestimmt sich wie folgt:

Bei konstanten Bedingungen und genügend häufiger Wiederholung einer Messung ergibt sich eine Verteilung der Messresultate, die der Normalverteilung entspricht. Die Verteilungskurve ist die Gaußkurve mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ .

Die Vertrauensgrenze kennzeichnet den Bereich um den Mittelwert, in dem sich mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (hier 95 %) der Messwert befindet. Üblicherweise wird die Vertrauensgrenze aus der Standardabweichung σ einer großen Zahl von Messwerten berechnet. Dazu wird die Standardabweichung mit einem so genannten Erweiterungsfaktor k multipliziert:

$$P(x\%) = \sigma \cdot k \quad (II.4.5)$$

Für eine Wahrscheinlichkeit von 95 % ist der Erweiterungsfaktor $k=1,96$. Das bedeutet, dass der Messwert sich mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit im Bereich $\mu \pm 1,96 \cdot \sigma$ befindet.

Die Gesetzmäßigkeiten der Normalverteilung gelten streng genommen nur bei Vorhandensein einer unendlich großen Zahl an Messwerten. Wenn die Messreihe so wie im vorhandenen Beispiel klein ist, muss man mit einer höheren Unsicherheit rechnen. Dies wird berücksichtigt, indem man anstelle der Normalverteilung die t-Verteilung verwendet, bei der die konkrete Anzahl der vorliegenden Messwerte in die Berechnung einfließt. Statt dem Erweiterungsfaktor k wird dann ein Studentfaktor t verwendet, der für eine 95 %ige Wahrscheinlichkeit den Wert 2,26 (statt 1,96 bei der Normalverteilung) annimmt.

Die hier durchgeführten Reproduzierungsmessungen wurden nach dieser Methodik ausgewertet, wobei die Berechnungen von Mittelwert und Standardabweichung leistungsflussdichtebezogen erfolgten. Die ausgewiesene Vertrauensgrenze ($P=95\%$) ist dann ein Maß für die Schwankung der Messwerte um den Mittelwert bzw. ein Maß für die Reproduzierbarkeit der Messungen.

Folgende Erkenntnisse können aus den berechneten Vertrauensgrenzen gezogen werden:

- Die Reproduzierbarkeit kann als sehr gut bezeichnet werden. Die Vertrauensgrenzen als Maß für die Wiederholpräzision liegen je nach Szenario und Funkdienst im Bereich zwischen $\pm 0,4$ dB und $\pm 1,4$ dB.
- Die Reproduzierbarkeit ist bei UKW und DVB-T oftmals geringfügig besser als bei Analog-TV und DAB, da hier durch die Aufsummierung mehrerer Einzelsignale zusätzlich ein glättender Effekt auf die Messergebnisse erreicht wird.
- Die beste Reproduzierbarkeit ergibt sich im Szenario outdoor mit Sicht zur Sendeanlage. Hier zeigt sich offensichtlich, dass bei einem dominanten Ausbreitungsweg bzw. dem Fehlen von (sich u.U. zeitlich verändernden) Mehrwegeausbreitungen das Messverfahren besonders unkompliziert anwendbar ist.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Messverfahren bzw. die abgeleiteten Einstellparameter sehr gut für die Erfassung der Signale UKW, Analog-TV, DAB und DVB-T unter realen Bedingungen geeignet ist. Die mittlere „erweiterte Messunsicherheit“ (d.h. Vertrauensgrenze $P=95\%$) wird zu $\pm 1,0$ dB abgeschätzt.

II.4.8 Unsicherheitsbetrachtungen

Jedes Messergebnis ist mit einer Messunsicherheit behaftet. Diese Messunsicherheit muss durch das Messlabor bestimmt werden und ist im Prüfbericht anzugeben.

Die gesamte Messunsicherheit setzt sich aus zwei Beiträgen zusammen:

- Messunsicherheit der Messeinrichtung: Hier werden alle instrumentbedingten Unsicherheiten zusammengefasst, also z.B. Messunsicherheiten des Messgerätes und von Zuleitungskabeln bzw. Antennen.
- Methodenbedingte Unsicherheit: Diese umfasst die Unsicherheit der Probennahme, die sich z.B. aus individuell unterschiedlichen Vorgehensweisen verschiedener Messpersonen bei der Abtastung des Messvolumens ergeben. Außerdem werden Unsicherheiten, die sich durch Verwendung der Messgeräte (insbesondere Antennen) nicht unter Laborbedingungen, sondern in realen Umgebungen ergeben, berücksichtigt.

Die konkrete Vorgehensweise zur Berechnung der Messunsicherheit bei Immissionsmessungen ist ausführlich z.B. in [BOR 05] beschrieben. Für vorliegende Untersuchungen sollen deswegen nur kurz diejenigen Teilbeiträge aufgelistet werden, die in die Berechnung der Gesamtmessunsicherheit eingehen.

Messgerät

Hier werden diejenigen Unsicherheitsbeiträge primär bezüglich der Amplitudengenauigkeit übernommen, die der Hersteller in der Produktdokumentation spezifiziert hat.

Antenne

Ausschlaggebend ist hier die Kalibrierengenauigkeit der Antenne, die dem jeweiligen Kalibrierbericht zu entnehmen ist. Antennen werden aber in der Regel nur bei einigen ausgewählten Frequenzpunkten kalibriert, weswegen sich bei der Interpolation für dazwischen liegende Werte auch eine Unsicherheit ergibt.

Kabel

Hier gilt das für die Antennen Gesagte.

Zusätzlich ergeben sich, wie bereits im Abschnitt II.4.2 erläutert, durch Anschluss des Kabels an Antenne und Spektrumanalysator Fehlanpassungen, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Eine Beschreibung zum speziellen Vorgehen ist z.B. in [BUWAL 05] enthalten.

Für das bei vorliegender Messreihe eingesetzte Messsystem (Spektrumanalysator Narda SRM-3000, bikonische Antenne Schwarzbeck UBA-9116) kann beispielsweise folgendes Messunsicherheitsbudget nach Tabelle II.4.30 aufgestellt werden. Auf zwei Unsicherheitsbeiträge soll an dieser Stelle gesondert eingegangen werden:

Antennentyp

Bei den Untersuchungen zu Mess- und Berechnungsverfahren für Mobilfunk-Immissionen [BOR 05] wurde herausgearbeitet, dass vor allem bei bikonischen Antennen der Einfluss des Messenden, abhängig von Frequenz, Abstand, Polarisation und Bodenbeschaffenheit, einen Einfluss auf das Messergebnis hat, der in ähnlich gelagerten Publikationen zu dieser Thematik, z.B. [BUWAL 02], nicht ausgewiesen wird. Für vorliegendes Projekt wurden überblicksmäßig ähnliche Untersuchungen durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich die Rückwirkung durch den Messenden auch in den Frequenzbereichen, die durch digitalen und analogen Rundfunk belegt werden, wieder finden lässt. Hierbei näherte sich eine Messperson in einer reflexionsarmen Umgebung (Absorberkammer) stetig an die Messantenne an, währenddessen ein Spektrumanalysator die Ausgangsspannung der Antenne durch ein im Raum appliziertes Erregerfeld maß. Es konnte bestätigt werden, dass der Messende einen ähnlich großen Einfluss hat wie in [BOR 05] dokumentiert. Deswegen wird hier dieser Einfluss ebenfalls mit 2 dB abgeschätzt, wobei hierin sowohl die Faktoren Einfluss des Messenden, inkorrekte Berücksichtigung aller Empfangsrichtungen und mögliche Unterschiede des Freifeldantennenfaktors in realen Umgebungen berücksichtigt werden.

Probennahme

Zur Reproduzierbarkeit sind im vorangegangenen Abschnitt ausführliche Untersuchungen vorgestellt worden. Als Ergebnis wird für die Unsicherheit durch die Probennahme ein Beitrag von 1,0 dB berücksichtigt.

Komponente	Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit [dB]	Verteilung	Divisor	Standardunsicherheit [dB]
SRM-3000	Fehler der Pegelanzeige	1,1	Normal	2	0,55
Kabel	Absolutkalibrierung	0,2	Normal	2	0,10
Kabel	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
UBA-9116	Absolutkalibrierung	1,5	Normal	2	0,75
UBA-9116	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
Fehlanpassung	Kabel/SRM-3000	0,2	U-förmig	1,41	0,14
Fehlanpassung	UBA-9116/Kabel	0,2	U-förmig	1,41	0,14
Fehlanpassung	UBA-9116/SRM-3000	0,6	U-förmig	1,41	0,43
UBA-9116	Umgebung	2,0	Normal	2	1,0
Probennahme	Reproduzierbarkeit	1,0	Normal	2	0,5
Kombinierte Standardunsicherheit					1,54
Erweiterte Messunsicherheit (k=2)					3,08

Tabelle II.4.30 Beispiel für Messunsicherheitsbudget Messungen mit SRM-3000 und UBA-9116

Die erweiterte Messunsicherheit für ein Vertrauensintervall von 95 % beträgt für dieses Beispiel 3,1 dB. Diese Unsicherheit bewegt sich damit im für Hochfrequenz-Immissionsmessungen üblichen Bereich.