



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

BESTIMMUNG DER EXPOSITION DER BEVÖLKERUNG IN DER UMGEBUNG VON DIGITALEN RUNDFUNK- UND FERNSEHSENDERN

BMU - 2007 - 706



BMU – 2007-706

**„Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung
von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern“**

**IMST GmbH
Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2
47475 Kamp-Lintfort**

IMPRESSUM

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BMU übereinstimmen.

Herausgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS I 2

Postfach 12 06 29

53048 Bonn

ISSN 1612-6386

Erscheinungsjahr: 2007

Bestimmung der Exposition der
Bevölkerung in der Umgebung von
digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern

Abschlussbericht

erstellt für das
Bundesamt für Strahlenschutz

18. Juli 2006

Projektleitung beim Auftragnehmer

Markus Schubert
Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH
Abteilung Prüfzentrum
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2
47475 Kamp-Lintfort
Tel: 02842/981-384
Fax: 02842/981-399
E-Mail: schubert@imst.de

Prof. Dr. Matthias Wuschek
EM-Institut GmbH
Carlstraße 5
93049 Regensburg
Tel.: 0941/298365-0
Fax: 0941/298365-2
E-Mail: matthias.wuschek@em-institut.de

Autoren

Dr. Christian Bornkessel, IMST GmbH
Markus Schubert, IMST GmbH
Prof. Dr. Matthias Wuschek, EM-Institut GmbH
Peter Schmidt, EM-Institut GmbH

Projektleitung beim Auftraggeber

Dirk Geschwentner
Bundesamt für Strahlenschutz
Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit
Ingolstädter Landstraße 1
85764 Oberschleißheim
Tel: 01888/333-2148
Fax: 01888/333-2305
E-Mail: DGeschwentner@bfs.de

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Kurzfassung

DAB und DVB-T sollen als neue digitale Technologien mittelfristig die bestehende analoge terrestrische Radio- und Fernsehübertragung ersetzen. Welche Auswirkungen dies in Bezug auf die Exposition der Bevölkerung durch hochfrequente elektromagnetische Felder haben wird, ist derzeit weitgehend ungeklärt.

Mittels Rechnersimulation und Messkampagnen war die von DAB und DVB-T Sendeanlagen verursachte Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetischer Felder in den jeweiligen Frequenzbändern zu quantifizieren und hinsichtlich einschlägiger Normen zu bewerten. Die ermittelten Immissionen wurden mit den durch die bislang vorherrschenden analogen Fernseh- und Tonrundfunknetze hervorgerufenen Expositionen in identischen Bereichen verglichen.

Die Messungen für die Expositionserhebung wurden in den Startregionen von DVB-T in Nord- bzw. Südbayern durchgeführt. Durch eine Messung vor der Umstellung (nur Analogbetrieb; Messungen im April / Mai 2005) und nach der Umstellung (nur Digitalbetrieb; Messungen im September / Oktober 2005) ist eine direkte Vergleichbarkeit der Immissionssituation gewährleistet. Die Vergleichsmessungen an ein und derselben Region haben zudem den Vorteil, dass die Ergebnisse nicht durch topographische oder morphographische Unterschiede verfälscht werden. Insgesamt wurden im Rahmen des Projektes an über 300 Messpunkten "Vorher-Nachher"-Untersuchungen durchgeführt. Diese setzen sich zum einen aus ca. 200 statistisch unabhängig in den zwei betrachteten Regionen verteilten Messpunkten und zum anderen aus ungefähr 100 Messpunkten aus systematischen Messungen wie Abstandsmessungen und Messungen zur Ermittlung der Höhenabhängigkeit der Immission zusammen.

Der Vergleich der Ergebnisse der "Vor-" bzw. "Nachhermessungen" an den Messpunkten zeigt eine Zunahme der mittleren Exposition. Gründe für die Erhöhung liegen zum einen in der Verlagerung der TV-Sender im Rahmen der Umstellung auf DVB-T und zum anderen an der Zunahme der ERP der Sendeanlagen nach der Einführung von DVB-T in den betrachteten Gebieten. Daher sind die Ergebnisse aber nicht allgemein auf andere Startregionen übertragbar.

Ein Vergleich zwischen UKW- und DAB-Signalen ergibt eine deutliche Dominanz der UKW-Signale (Unterschiedsfaktor im Mittel größer als 10 dB). Zukünftig vorgesehene Leistungserhöhungen bei DAB werden diesen aktuellen Unterschied allerdings verkleinern.

Nachdem ein einfaches auf der ITU-R P.1546 basierendes Berechnungsprogramm entwickelt worden war, wurden die messtechnisch erhobenen Immissionen auch mit entsprechenden Berechnungen verglichen. Eine Optimierung dieser Berechnungsergebnisse resultierte in einer mittleren Abweichung von 7,3 bis 11,5 dB je nach betrachtetem System. Vor dem Hintergrund einer Messunsicherheit von ungefähr ± 3 dB zeigte diese Methode eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung in 78-83% aller Punkte. Eine andere Optimierung im Hinblick darauf, dass die rechentechnisch prognostizierte Immission an allen Punkten oberhalb der gemessenen Immission liegt, zeigte eine mittlere Abweichung von 20-30 dB.

Abstract

DVB-T and DAB are supposed to replace the existing analogue television and FM-radio broadcast in the near future. In this context it is unclear, which effects this changeover has on the public exposure situation concerning RF electromagnetic fields from broadcast transmitters.

Therefore extensive measurements on 200 identical points in two DVB-T starting-areas were performed before the changeover (analogue broadcast) and accordingly after the changeover (digital broadcast) to determine possible changes.

The statistical analysis of the results of both measurement campaigns ("before-after") leads to an increasing of the mean exposure. The reasons for this increase are on the one hand the displacement of the TV-transmitters during the changing to DVB-T and on the other hand the increase of the ERP at the transmitter stations with introduction of DVB-T in the considered areas. Because of both reasons the findings are not generally transferable to other starting areas.

The comparison of analogue FM-radio- and DAB-signals shows a clear dominance of the FM-signals (mean difference more than 10 dB). The planned increasing of DAB-transmitter power will reduce this present difference.

After developing a simple calculation program based on the ITU-R P.1546, the measured immissions were compared to corresponding calculations. Optimizing the results leads to mean deviations from 7.3 to 11.5 dB depending on the considered broadcast system. This method shows a good prediction with a deviation of ± 3 dB in 78-83% of all points. Another optimization with regard to an overestimation of the measured immissions at all considered points however leads to a mean deviation of 20-30 dB.

Zusammenfassung

Vorliegender Abschlussbericht bezieht sich auf das Forschungsvorhaben „Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern“ des Bundesamtes für Strahlenschutz. Nachdem sowohl ein rechentechnisches Verfahren und ein messtechnisches Verfahren zur Expositionsabschätzung der terrestrischen Rundfunkdienste entwickelt wurde, wurde ein Vergleich der Immissionen von DAB und DVB-T mit ihren analogen Pendanten durchgeführt. Darüber hinaus wurden die messtechnisch erhobenen Immissionen auch mit entsprechenden Berechnungen verglichen.

Bezüglich *Messverfahren* wurden Untersuchungen zur Auswahl geeigneter Messausrüstung, korrekter Einstellung der wesentlichen Messparameter (z.B. Auflösungsbreite, Detektortyp), Festlegung einer Methode zur Bestimmung der Maximalfeldstärke im Messvolumen sowie Überlegungen zu Empfindlichkeit und Reproduzierbarkeit durchgeführt. Als Methode zur Bestimmung der Maximalfeldstärke im Messvolumen wird die Schwenkmethode angewendet.

Für die Erfassung von frequenzmodulierten Signalen des *UKW-Rundfunks* ist der RMS-Detektor nicht notwendig. Die Auflösungsbreite (RBW) sollte zwischen 100 und 300 kHz liegen.

Bei *analogen TV-Signalen* erfolgt die Ermittlung der mittleren Immission durch Messung der Synchronspitzenleistung mit Peak-Detektor unter Anwendung eines Korrekturfaktors von etwa 4 dB zur Berücksichtigung eines mittleren Bildinhalts unter Einschluss der Tonsignale.

Bei *DAB und DVB-T Signalen* sind die Messungen unbedingt mit dem RMS-Detektor durchzuführen. 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.

Die Messunsicherheit unter Berücksichtigung von messeinrichtungsbedingter und methodenbedingten Faktoren liegt im Bereich von 3 dB (Vertrauensintervall 95 %) und damit im üblichen Bereich für Hochfrequenz-Immissionsmessungen.

Im Rahmen der *Expositionserhebung* wurden Messungen an mehr als 300 Punkten in den DVB-T-Startregionen München und Nürnberg durchgeführt. Für 200 Messpunkte, die sich in Wohngebieten befinden, wurden umfangreiche- "Vor-Nachher"-Untersuchungen vorgenommen, um eine mögliche Expositionsveränderung durch die Einführung von DVB-T zu erkennen. Zusätzlich wurden Messungen entlang definierter Linien sowie Untersuchungen innerhalb von Gebäuden durchgeführt.

Die gefundenen Expositionswerte besitzen eine große Spannweite bezüglich ihrer absoluten Höhe von mehr als 50 dB. Bezüglich der Grenzwertausschöpfung ergab sich am Punkt mit den höchsten Summenimmissionen ein leistungsflussdichtebezogener Ausschöpfungsgrad von nur etwa 3 Promille.

Analysiert man die statistische Verteilung der Resultate beider Messkampagnen, so ergibt sich eine mittlere Zunahme der festgestellten Expositionswerte in den Kernbereichen der Versorgungsinseln. Allerdings ist die Situation in den beiden untersuchten Regionen nicht gleich, sondern es zeigen sich Unterschiede bezüglich der Höhe der Veränderung. Wie sich die Expositionssituation in den Randregionen ändern wird, wenn die dort derzeit noch

vorhandenen Analogsender auf digital umgestellt worden sind, kann derzeit nicht gesagt werden, denn die Änderung hängt davon ab, ob die zukünftige Leistung der dortigen Digital-sender höher oder niedriger als die bisherige Analogleistung sein wird.

Ein Vergleich der Ergebnisse der "Vor-" bzw. "Nachhermessungen" an den Messpunkten in der Region Nürnberg zeigt eine deutliche Zunahme der Gesamtexposition im Bereich der Stadtgebiete Nürnberg / Fürth / Erlangen (mittlere Zunahme: 6,8 dB). Grund dafür ist die Verlagerung der TV-Sender im Rahmen der Umstellung auf DVB-T vom Heidenberg südlich Schwabach zum Fernmeldeturm Nürnberg. Im Bereich "Dillberg" ist nur eine moderate Expositionszunahme von 1,5 dB feststellbar. Die Messpunkte außerhalb der Versorgungs-kategorie "portable indoor" zeigen keine signifikante Veränderung der mittleren Gesamtexposition.

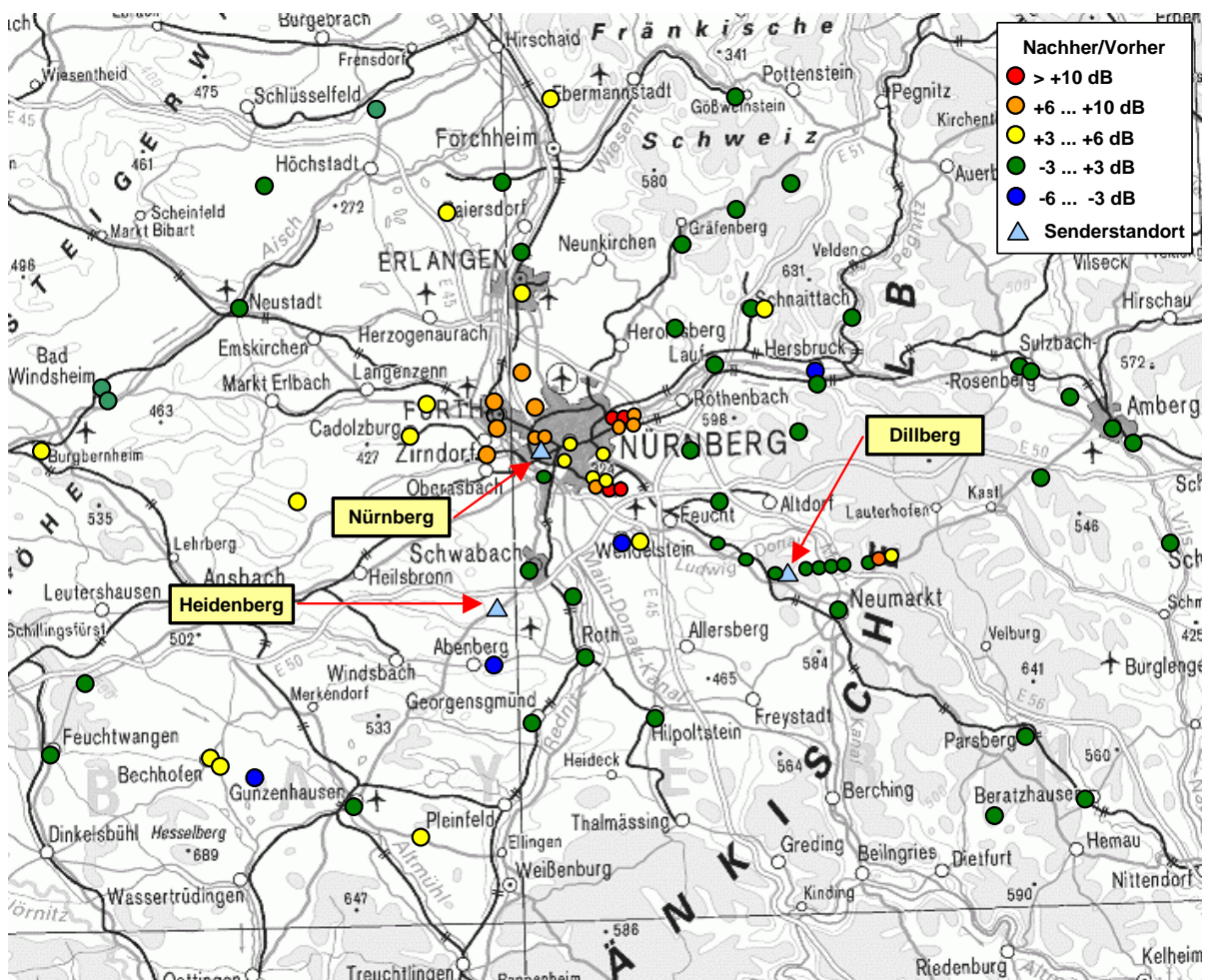


Bild: Quotient der Leistungsflussdichtewerte (Gesamtimmision Ton- und Fernseh-rundfunk) aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB für die 87 Messpunkte im Raum Nürnberg (Darstellung in fünf Klassen)

Ein Vergleich der Ergebnisse der "Vorher-" bzw. "Nachhermessungen" an den Messpunkten in der Region München zeigt eine signifikante Immissionszunahme im Stadtgebiet von München und im Bereich der direkt benachbarten Landkreise bis hin zum Wendelstein (mittlere Zunahme: 6,5 dB). Grund dafür sind einerseits die Zunahme der ERP am Wendelstein und am Olympiaturm in München durch die Einführung von DVB-T als auch eine veränderte Montagehöhe der Antennen am Olympiaturm in München im Vergleich zur

"Vorhermessung". In größerer Entfernung zum Olympiaturm in München bzw. Wendelstein ist keine signifikante Veränderung der Exposition mehr feststellbar.

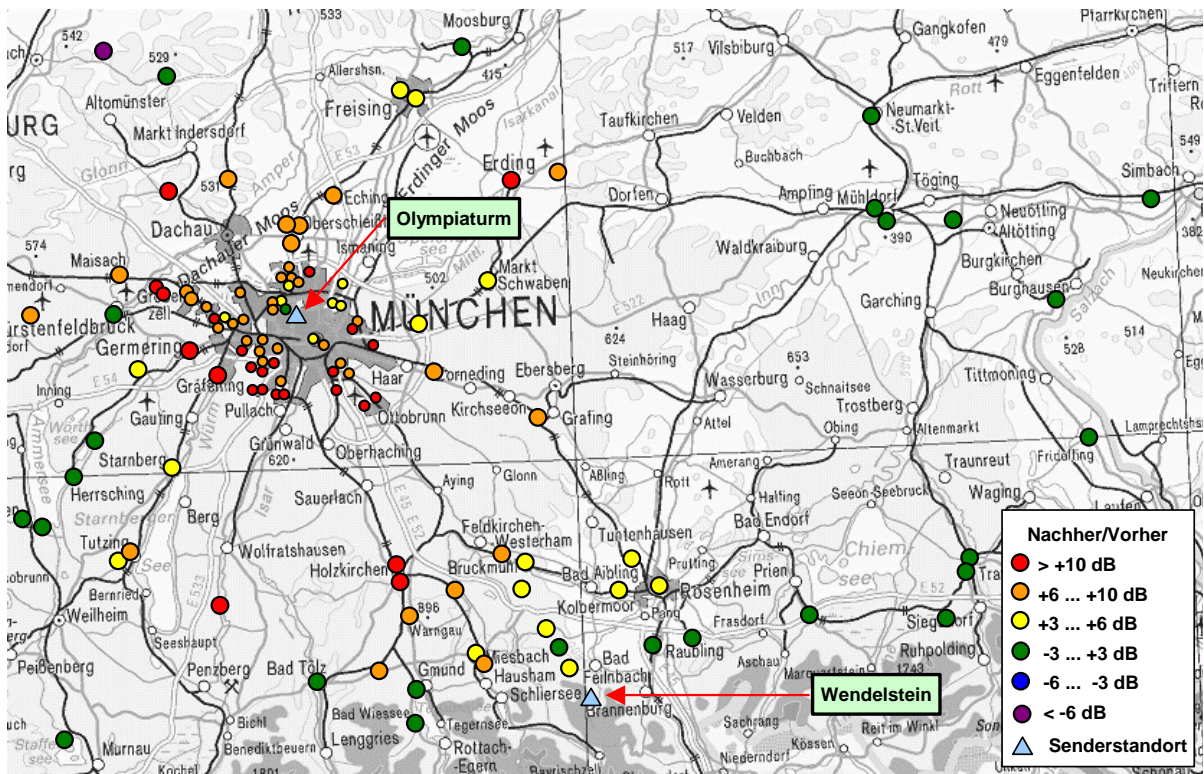


Bild: Quotient der Leistungsflussdichtewerte (Gesamtimmission Ton- und Ferns Rundfunk) aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB für die 113 Messpunkte im Raum München (Darstellung in sechs Klassen)

Die Veränderung der ERP an dem für die betrachtete Region jeweils verantwortlichen Senderstandort kann als grober Indikator für die mittlere Expositionsänderung herangezogen werden. In der Region "Dillberg" stimmen ERP-Zunahme und mittlere Expositionsänderung sehr gut überein, während im Bereich "Wendelstein" und "München" mittlere Expositions Zunahme und ERP-Veränderung um 3 bis 4 dB differieren.

Region	Zahl der Messpunkte	Zunahme der ERP	Mittlere Zunahme TV-Exposition	Mittlere Zunahme der Gesamtexposition
Dillberg	13	5,0 dB	4,5 dB	1,5 dB
Wendelstein	20	11,5 dB	5,9 dB	4,7 dB
München	55	5,1 dB	9,2 dB	7,1 dB

Tabelle: Mittlere Veränderung der Exposition (Nachher / Vorher in dB) in den drei besonders betrachteten Untersuchungsteilgebieten im Vergleich zur Veränderung der ERP

Will man die hier gefundenen Ergebnisse auf andere Regionen in Deutschland übertragen, gilt das oben gesagte analog: Nur in den "portable indoor"-versorgten Regionen der aktuell in

Deutschland vorhandenen DVB-T-Inseln ist derzeit eine belastbare Aussage über die mittlere Expositionsänderung möglich, da nur dort der Wechsel von analoger auf digitale Versorgung nahezu vollständig stattgefunden hat. Ein ERP-Vergleich der für die Versorgung verantwortlichen Standorte kann in erster Näherung Aufschluss über eine gegebenenfalls vorhandene Expositionsänderung geben. Zusätzlich sollte jedoch nie vergessen werden, dass noch andere Faktoren als die ERP einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Exposition ausüben können.

Die Messergebnisse in Bayern zeigen eine Zunahme der mittleren Exposition in den "portable-indoor"-versorgten Bereichen um die Senderstandorte durch die Einführung von DVB-T auf. Dies muss jedoch nicht in allen Regionen Deutschlands, in denen bereits auf DVB-T umgestellt wurde, so der Fall sein, denn die beispielhaft durchgeführten überschlägigen ERP-Betrachtungen für zwei andere Regionen Deutschlands zeigen, dass, abhängig von der ERP der Digitalsender im Vergleich zu den abgeschalteten Analogsendern, sowohl eine Zunahme als auch eine Abnahme der mittleren Exposition durch die Einführung von DVB-T in der Umgebung von Senderstandorten möglich ist.

Ein Vergleich zwischen UKW- und DAB-Signalen ergibt eine deutliche Dominanz der UKW-Signale (Unterschiedsfaktor im Mittel größer als 10 dB). Zukünftig vorgesehene Leistungserhöhungen bei DAB zur Gewährleistung einer zuverlässigeren Indoorversorgung werden diesen aktuellen Unterschied allerdings verkleinern.

Die in vier Hochhäusern durchgeführten Untersuchungen der Höhenabhängigkeit der Immission, verursacht durch die im Abstand von etwa ein bis sechs Kilometer befindlichen Rundfunksendetürme zeigen ebenfalls die tendenzielle Erhöhung der Immission nach Einführung von DVB-T. An zwei der vier Gebäude konnte außerdem eine signifikante Zunahme der Immission in den höheren Stockwerken, verursacht durch die dort vorhandenen günstigeren Sichtverhältnisse zum Sendeturm, nachgewiesen werden. Die Messungen in den beiden Gebäuden mit weniger als 2 Kilometer Abstand zum Olympiaturm in München zeigen hingegen keine ausgeprägte Höhenabhängigkeit der Immission.

Die exemplarischen Untersuchungen zur Dämpfung durch Gebäudemauern an drei Gebäuden brachten teilweise sehr unterschiedliche Resultate: Der mittlere Unterschied zwischen dem Messwert an der Gebäudefassade und dem Wert im Gebäudeinneren betrug bei einem Gebäude zirka 12 dB, während die Dämpfung des zweiten untersuchten Gebäudes mit etwa 30 dB deutlich stärker ausgeprägt war. Die drei untersuchten Fenster brachten mit 3, 10 und 21 dB ebenfalls sehr unterschiedliche Dämpfungswerte.

Das Ausbreitungsmodell für die *rechentechnische Expositionsabschätzung* sollte in der Lage sein, sowohl die maximal möglichen Expositionen in der Nähe der Sendeanlagen wie auch die Exposition über größere Bereiche (z.B. Versorgungsgebiet eines Senders) zu beschreiben. In einem ersten Schritt wurde auf geeignete kommerziell verfügbare Software zurückgegriffen. Darüber hinaus wurde ein einfaches Ausbreitungsmodell selbst entwickelt und auf seine Anwendbarkeit hin untersucht.

Die *erforderlichen Eingabeparameter* für eine strahlenoptische Berechnung lassen sich grob in die drei Bereiche Geodaten, Gebäudedaten und anlagenbezogene Parameter aufteilen.

Bezüglich der Verwendung von digitalen Geländemodellen hat sich gezeigt, dass eine Vielzahl von unterschiedlichen Formaten existiert. Zur Bearbeitung und Konvertierung dieser Daten sind externe frei verfügbare Programme notwendig, um die digitalen Elevationsmodelle zum Import in die jeweiligen Berechnungsprogramme aufzubereiten.

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass eine Berücksichtigung der Gebäudeinformationen aufgrund der enormen Anzahl von Gebäuden innerhalb des Versorgungsbereiches eines terrestrischen Senders praktisch unmöglich ist.

Im Bereich der anlagenbezogenen Parameter können zwar einige Daten z.B. aus [WITT 04] oder [BNetzA] entnommen werden, aber die Mithilfe der Betreiber ist an dieser Stelle unumgänglich.

Als Grundlage für das selbst entwickelte Programm (FPT) diente die Empfehlung ITU-R P.1546 der International Telecommunications Union. Diese stellt eine allgemeine Vorhersagemethode für elektrische Feldstärken in Form von Ausbreitungskurven dar, die durch eine statistische Auswertung einer großen Anzahl von Messungen ermittelt wurden. Diese Methode wurde an die hier vorliegende Problematik angepasst und darüber hinaus noch in der Art erweitert, dass auch Aussagen über die Immissionen in einer Entfernung unterhalb von 1 km vom Sender möglich sind. Sie zeichnet sich durch eine einfache Handhabung und einen geringen Rechenzeitbedarf aus.

Ein Vergleich zwischen rechenstechnisch mit den einzelnen Programmen ermittelten Immissionen mit Messwerten an 42 Punkten zeigte, dass insgesamt durch den Einsatz von strahlenoptischen Verfahren keine genaueren Ergebnisse erzielt werden konnten als mit dem einfachen Programm FPT. Darüber hinaus erforderten die kommerziellen Softwarepakete eine deutlich längere Rechenzeit und einen größeren Modellierungsaufwand.

Daher wurde für den Vergleich zwischen den gemessenen Immissionswerten vom analogen Fernsehen, DVB-T, UKW und DAB und den entsprechend rechenstechnisch prognostizierten Werten ausschließlich das einfache Programm FPT verwendet. Hierzu standen insgesamt 5180 Vergleichspaare zur Verfügung.

Das Berechnungsprogramm wurde anhand der folgenden Anforderungen näher betrachtet:

- Das Berechnungsprogramm soll eine möglichst geringe mittlere betragsmäßige Abweichung bezüglich entsprechender Messwerte liefern, d.h. der betragsmäßige Unterschied zwischen der rechenstechnisch ermittelten und messtechnisch erfassten Immission soll möglichst gering sein. Dies ist als ein Maß für die *Genauigkeit* der rechenstechnischen Prognose anzusehen.
- Das Berechnungsprogramm soll an möglichst allen Vergleichspunkten einen höheren Immissionswert liefern, als der bei der Messung ermittelt wurde. Die Differenz zwischen Berechnung und Messung soll demnach immer größer „0“ sein bzw. der berechnete Wert soll den Messwert möglichst an allen Vergleichspunkten überbieten (dies entspricht der *100%igen Überbewertung*). Auf diese Weise kann das Verfahren als eine Worst Case - Berechnung angesehen werden.

Wünschenswert wäre die Tatsache, dass beide oben genannten Anforderungen innerhalb von einem Berechnungsschritt erreicht werden können, somit die Berechnung eine *einzig*e *Feldstärke* liefert, die zum einen eine möglichst geringe Abweichung zu den Messungen erreicht und zum anderen immer möglichst knapp oberhalb der gemessenen Immission liegt. Es hat sich während der Berechnungen mit FPT gezeigt, dass sowohl die mittlere Abweichung als auch die möglichst 100%ige Überbewertung in dieser Berechnungsmethode keine voneinander unabhängigen Größen darstellen und somit die obige Anforderung nicht gleichzeitig erreicht werden kann.

Die Berücksichtigung eines Korrekturfaktors für eine von 10 m geänderte Empfangsantennenhöhe (laut ITU-Empfehlung) in die rechen-technisch prognostizierte Immission zeigte eine geringere mittlere Abweichung zu den Messwerten als eine Berechnung ohne Korrektur, die aber einen deutlich höheren Anteil an Punkten lieferte, an denen die berechnete Immission oberhalb der messtechnisch bestimmten lag.

Daher wurde zunächst die Berechnung mit Berücksichtigung einer Korrektur anhand eines konfigurationsabhängigen Zuschlags die mittlere Abweichung betreffend optimiert und anschließend die Berechnung ohne Berücksichtigung einer Korrektur anhand eines konfigurationsabhängigen Zuschlags in der Art optimiert, dass möglichst alle Vergleichspunkte eine höhere berechnete Immission aufwiesen als die messtechnisch bestimmt.

Die einzelnen Konfigurationen und die zugehörigen Zuschläge für die Optimierung auf eine möglichst geringe mittlere Abweichung sind in folgender Tabelle aufgeteilt nach jeweiligem System dargestellt.

Konfiguration	Zuschläge für die Optimierung der mittleren Abweichung in [dB]				
	Analog-TV	DVB-T	UKW	DAB (landesweit)	DAB (lokal)
Stadt, dicht	8	4	6	15	13
Stadt	7	1	5	15	11
Vorstadt	2	4	-1	8	7
Land, offen	2	5	3	10	4

Tabelle: Konfigurationsabhängige Zuschläge zur Optimierung der mittleren Abweichung zwischen Berechnungen und entsprechenden Messungen

Die Resultate dieser Vorgehensweise für die gesamte mittlere Abweichung sind in folgender Tabelle dargestellt. Darüber hinaus ist auch noch die entsprechende Standardabweichung zu sehen.

System	Korrektur	Anzahl der Punkte	Mittlere Abweichung in [dB] (inklusive des jeweiligen Zuschlags)	Standardabweichung in [dB]
Analog TV	ja	1135	9,0	12,2
DVB-T	ja	948	11,5	16,2
UKW	ja	2804	8,3	13,8
DAB (landesweit)	ja	181	7,3	9,9
DAB (lokal)	ja	112	7,8	10,2

Tabelle: Mittlere Abweichung zwischen Berechnungen und entsprechenden Messungen

Insgesamt kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die Prognose mit dem Programm FPT aufgrund der Größe der mittleren Abweichung nur eingeschränkt geeignet ist, die Immissionen durch Rundfunksender genau zu berechnen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass je nach betrachtetem Rundfunkdienst zwischen 78 und 83 % aller Punkte eine maximale Abweichung von nur ± 3 dB zeigten. Für diese Punkte, die im gesamten jeweiligen Versorgungsgebiet verteilt lagen, liefert FPT trotz der wenigen Eingabeparameter eine vor dem Hintergrund der Messunsicherheit gute Immissionsprognose. Da es aber auch Punkte gibt, an denen zum Teil auch durch ihre geographische Lage begründet mit deutlichen Über- bzw. Unterschätzungen gerechnet werden muss, ist das Verfahren in der Praxis nur eingeschränkt geeignet, da auf Messungen nicht verzichtet werden kann.

Darüber hinaus zeigte sich, dass die Immissionsprognose für Punkte in ebenem Gelände in den meisten Fällen eine geringere mittlere Abweichung aufwies als für Punkte in bergigem Gelände.

Anschließend wurde die Optimierung der prozentualen Überbewertung durchgeführt, deren Grundlage die Berechnungsergebnisse ohne Korrektur bildeten. Ziel hierbei war, an allen Punkten eine maximale Unterbewertung der gemessenen Immission im Bereich der Messunsicherheit zu erhalten. Auch hierfür wurden die Ergebnisse anhand einen konfigurationsabhängigen Zuschlages im Hinblick auf eine maximale Unterbewertung optimiert. Die Werte für diese Zuschläge sind in folgender Tabelle aufgeteilt nach jeweiligem System und Konfiguration dargestellt.

Konfiguration	Zuschläge für die Optimierung der Anzahl der Punkte mit Überbewertungen [dB]				
	Analog-TV	DVB-T	UKW	DAB (landesweit)	DAB (lokal)
Stadt, dicht	7	1	0	2	0
Stadt	3	0	14	1	0
Vorstadt	2	3	9	6	0
Land, offen	6	5	12	11	6

Tabelle: Konfigurationsabhängige Zuschläge zur Optimierung der mittleren Abweichung zwischen Berechnungen und entsprechenden Messungen

Die Ergebnisse dieser Vorgehensweise sind in folgender Tabelle.

System	Korrektur	Anzahl der Punkte	Anzahl der Punkte (in [%]) mit Überbewertungen (inklusive des jeweiligen Zuschlags)	Maximale Unterbewertung in [dB] (inklusive des jeweiligen Zuschlags)
Analog TV	nein	1135	98,8	2,9
DVB-T	nein	948	97,8	3,0
UKW	nein	2804	99,4	2,3
DAB (landesweit)	nein	181	93,3	2,9
DAB (lokal)	nein	112	97,4	2,3

Tabelle: Auswertung für den Worst Case Ansatz

Die Berechnungsmethode Worst Case Ansatz kann unter der Vorgabe eines zu berücksichtigenden Zuschlags für die Immission für alle betrachteten Rundfunkdienste als geeignet

angesehen werden. Hierdurch konnte demnach im gesamten Versorgungsgebiet eines Senders eine Immission prognostiziert werden, die messtechnisch vor dem Hintergrund der Messunsicherheit nicht unterschritten wurde. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass die mittlere Abweichung stark ansteigt und mit Werten von 20 - 30 dB gerechnet werden muss.

Vor dem Hintergrund, dass innerhalb des Vergleichs von Messung und Berechnung sowohl bergiges als auch ebenes Gelände berücksichtigt wurde, beinhalten die Zuschläge beide Konfigurationen, natürlich optimiert auf die Topographie in den Vergleichsregionen. Generell sind diese Zuschläge zwar auf andere Regionen übertragbar – dennoch muss in derartigen Fällen aber mit differierenden Abweichungen gerechnet werden.

Da die ITU-Empfehlung erst Immissionswerte ab einem Abstand von 1 km zum Sender liefert, wurde für den Bereich bis zu einem Abstand von 1 km mit reiner Freiraumausbreitung in Hauptstrahlrichtung gesehen gerechnet. Dies resultierte darin, dass gerade bei Senderstandorten, die durch eine ländlich geprägte Umgebung charakterisiert werden können, deutliche Überbewertungen vorlagen. Abschläge von 10 - 25 dB auf den berechneten Wert sind in Abhängigkeit des Systems sinnvoll, um eine möglichst geringe mittlere Abweichung zu erhalten. Im Fall einer Worst Case Betrachtung ergaben sich 5 – 10 dB.

Im Gegensatz dazu gestalteten sich die Resultate für einen Senderstandort im städtischen Gebiet für eine Auswertung schwieriger. Ein allgemeingültiger Faktor für einen typischen Abschlag kann für derartige Szenarien nicht angegeben werden.

Ein Vergleich der Immissionsverläufe anhand von radial vom Sender ausgehenden Linien hat gezeigt, dass gerade in Konfigurationen, in denen das Gelände bei weiterer Entfernung vom Standort stark ansteigt, das Programm FPT an seine Grenzen stößt. Dies liegt darin begründet, dass der Geländeverlauf nur durch eine einzelne Größe – der mittleren effektiven Höhe -berücksichtigt wird. Hierbei berechnet die Methode „optimierte mittlere Abweichung“ zum Teil einen deutlich niedrigeren Wert im Vergleich zum gemessenen. Der Worst Case Ansatz kann zwar auch leichte Unterbewertungen liefern, diese liegen aber in der Größenordnung der Messunsicherheit. Bei anderen Konfigurationen (z.B. „Linienmessung“ ausgehend vom Wendelstein) spiegelten die Immissionsverläufe die folgenden Resultate wieder:

- Die Berechnungsmethode „Optimierte mittlere Abweichung“ weist im Mittel eine genauere Prognose auf; Unterschätzungen zum Messwert sind aber möglich.
- Die Worst Case Berechnung überbewertet die gemessenen Immissionen; hierbei ist aber mit teilweise hohen Überschätzungen der tatsächlichen Feldstärke zu rechnen.

Summary

The final report refers to the research project "Determination of the public exposure due to electromagnetic fields of digital broadcast transmitters" initialized by the German federal office for radiation protection. After a calculation as well as a measurement method was developed, a comparison of the exposure of DAB and DVB-T broadcast transmitter stations and their analogue counterparts was accomplished. Furthermore a comparison of computational predicted exposure levels with corresponding measurements was performed.

Concerning the measurement methods, examinations about the selection of suitable measurement instruments (spectrum analyzer), the correct adjustment of the main measurement parameters (e.g. resolution bandwidth, kind of detector), the definition of a method for detection of maximum fieldstrength value in the measurement volume and considerations about the sensitivity and reproducibility were done. For detection of maximum fieldstrength in the measurement volume the "scanning method" was applied.

For the measurement of FM-signals (FM-radio) the RMS-detector is not necessary. Resolution bandwidth (RBW) should be adjusted between 100 and 300 kHz.

RMS-value of analogue TV-transmitters is calculated from the measured synch-peak-power with the peak-detector of the analyzer by applying a correction factor of 4 dB (including mean picture brightness and the sound signals).

DAB and DVB-T signals must be measured by using the RMS-detector. The sweep time must be sufficient long (depending on type of measuring instrument). If the sweep time is too short, the RMS-detector gives too high measurement results. RBW has to be adapted to the signal bandwidth.

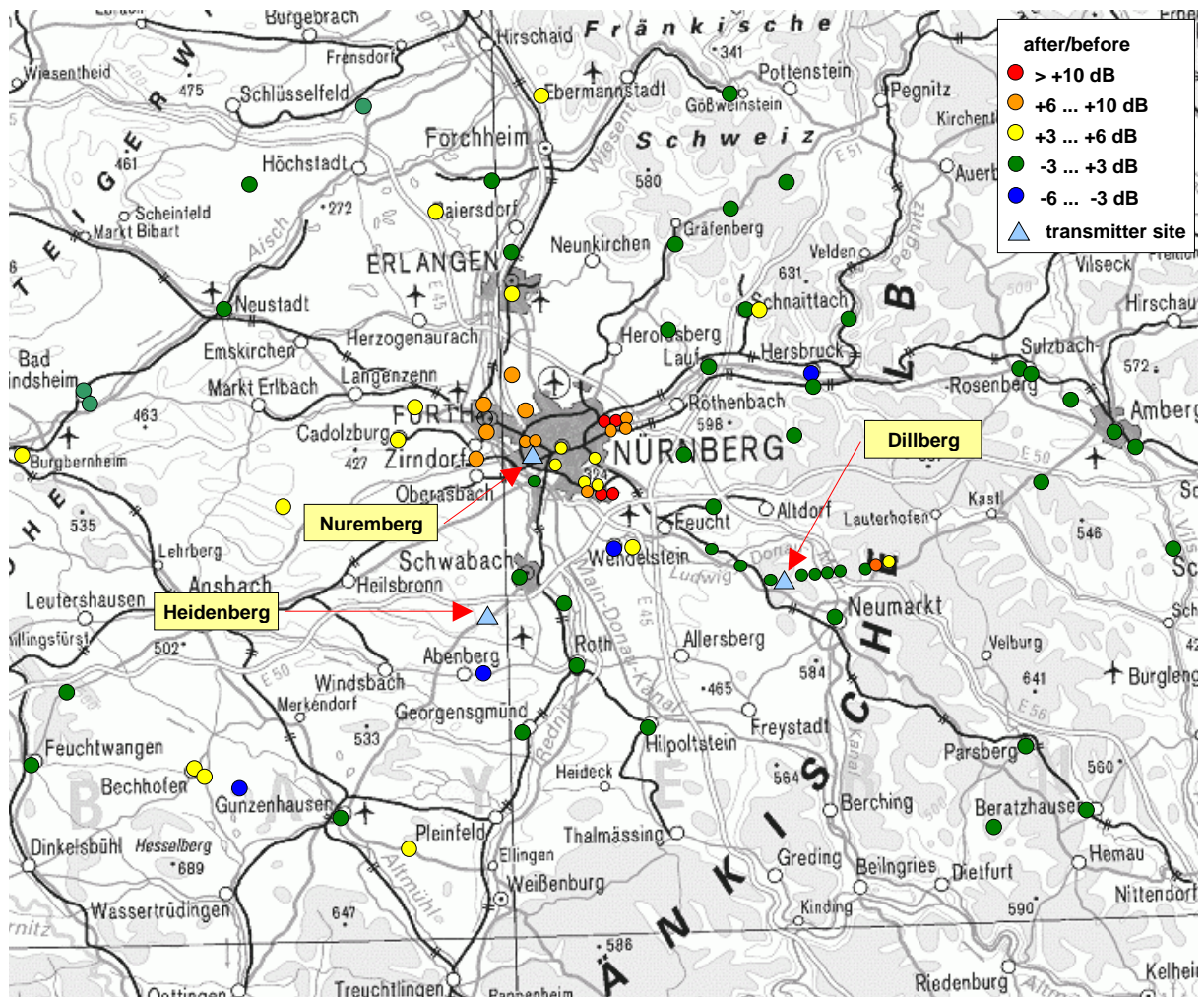
Measurement uncertainty by considering of factors, caused by the measurement instruments and caused by the measuring methods as well, will be roughly 3 dB (95 % confidence interval) and is therefore in the typical dimension of this kind of RF-exposure measurements.

For the exposure determination, measurements at more than 300 points in the DVB-T start regions Munich and Nuremberg were performed. On 200 measurement points, which all are located in residential areas, extensive "before-after"-measurements were performed, to determine a possible change of exposure situation, caused by the introduction of DVB-T. Additional measurements along defined lines and inside buildings were also done.

The exposure values, which were found, have a big dynamic of more than 50 dB. At the point with the biggest sum-exposure, 3 ‰ of the maximum allowed level was reached.

The statistical analysis of the results of both measurement campaigns ("before-after") leads to a mean increasing of the exposure values in the centre areas of the "coverage- islands", but in the two examined regions different increasing factors were found. The kind of exposure changing in the border areas can not be predicted yet, because the changing depends on the fact, if the digital power, which will be transmitted by the stations there, will be more or less than the present analogue power.

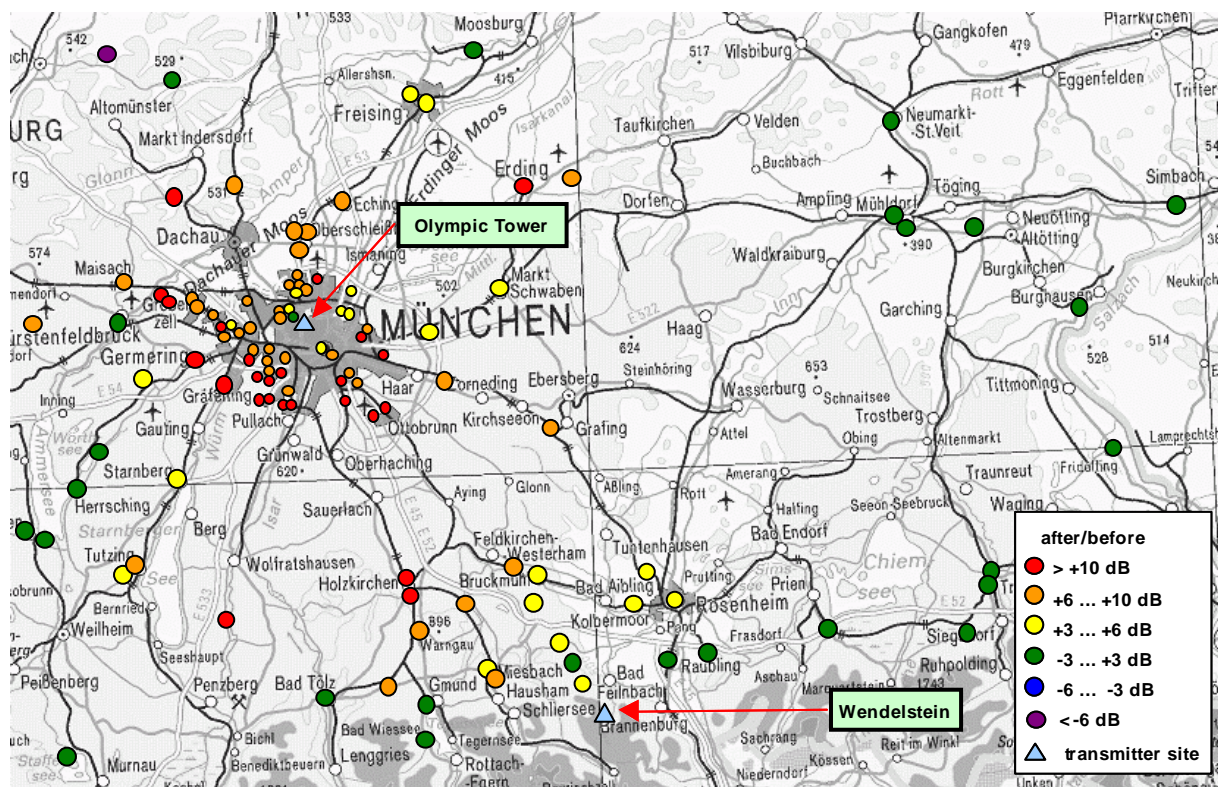
A comparison of the results of the "before-after"-measurements at the measurement points in the Nuremberg region showed a clear increasing of the total exposure in the area of the towns Nuremberg, Fürth and Erlangen (mean increasing factor: 6.8 dB). The reason for this increasing is the displacement of the TV-transmitters during the changing to DVB-T from the Heidenberg south of Schwabach to the TV-transmitting tower Nuremberg. In the "Dillberg" region only a moderate increasing of exposure (1.5 dB) was found. The measurement points outside the "portable indoor" region showed no significant change of mean exposure.



Picture: Quotient of power density (Total exposure, caused by sound and picture broadcast transmitters) taken from "before-after" measurements in dB for 87 measurement points in the Nuremberg area (visualization by five classes)

A comparison of the results of the "before-after"-measurements at the measurement points in the Munich region showed a significant increasing of the exposure in the town of Munich and the area of the neighbourhood counties up to the Wendelstein mountain (mean increasing

factor: 6.5 dB). Main reason for this is on one side the increasing of the ERP at the Wendelstein and the Olympic Tower transmitter stations with introduction of DVB-T and on the other side a increasing of the antenna height at the Olympic Tower for DVB-T. On the measurement points with bigger distance to the Olympic Tower and the Wendelstein, no significant change of mean exposure was found.



Picture: Quotient of power density (Total exposure, caused by sound and picture broadcast transmitters) taken from "before-after" measurements in dB for 113 measurement points in the Munich area (visualization by six classes)

The changing of ERP at the transmitter, which is responsible for the coverage of the considered region, can be taken as a coarse indicator for the mean change of exposure. In the "Dillberg" region ERP-increase and mean exposure-change fit very good. In the "Munich" and "Wendelstein" region, mean exposure-change and ERP-change differ by 3 to 4 dB.

Area	Number of measurement points	Increasing of ERP	Mean increasing of TV-exposure	Mean increasing of total exposure
Dillberg	13	5,0 dB	4,5 dB	1,5 dB
Wendelstein	20	11,5 dB	5,9 dB	4,7 dB
Munich	55	5,1 dB	9,2 dB	7,1 dB

Table: Mean changing of exposure (after/before in dB) in the three areas which were examined in detail, compared to the changing of ERP

It is also possible to transfer the facts, found above, to other parts of Germany: Only in the "portable-indoor" regions of the momentary existing DVB-T-"islands" a valid statement about mean exposure-change is possible, because only there the change from analogue to digital coverage is nearly finished. A "before-after" ERP-comparison of the stations, which are responsible for the coverage, can provide rough information about possible change of exposure. Additionally it should never be forgotten, that also other factors besides the ERP may have a significant influence on the mean exposure.

The measurement-results in Bavaria show an increasing of mean exposure in the areas with "portable indoor" coverage around the transmitter sites caused by the introduction of DVB-T. But this must not be the fact in all regions of Germany, where DVB-T is already introduced, because additional performed coarse ERP-considerations for two other regions in Germany show, that both increasing or decreasing of mean exposure, caused by the introduction of DVB-T, is possible in the vicinity of transmitter stations.

The comparison of analogue FM-radio- and DAB-signals showed a clear dominance of the FM-signals (mean difference more than 10 dB). But increasing of DAB-transmitter power, which is planned for the future to improve DAB-indoor-coverage, will reduce this present difference.

Measurements, done in four high-altitude buildings for studying the height-dependence of exposure, caused by transmitters with one to six kilometres distance showed also a tendency to increasing of exposure after the introduction of DVB-T. At two of the four buildings a significant increasing of exposure in the higher floors was found because of the typical better sight-conditions to the transmitter location there. The measurements inside the two buildings with less than two kilometres distance to the Olympic Tower showed no significant height-dependence of exposure.

Some exemplary studies of attenuation caused by walls of buildings, done at three buildings, showed partly very different results: The mean difference between the measuring result at the façade of the building and the value inside the building was 12 dB in one building. The attenuation in the other building was bigger (30 dB). Three examined windows showed very different attenuation-values of 3, 10 and 21 dB.

Concerning to computational exposure prediction the propagation model should be able to determine the maximal immission values in the vicinity of broadcasting stations as well as the medial ones in larger regions (e.g. coverage area of a broadcast transmitter station). Commercially available software was used in a first step. Additionally a simple propagation tool was developed and tested in terms of its applicability.

The required input parameters for ray-optical calculations can approximately be divided into the three categories geographic data, building data and transmitter based data.

Concerning digital elevation models many different formats exists. To be able to import these data into calculation programs it is often necessary to convert these formats with external software.

Due to the tremendous amount of buildings in a coverage area of a terrestrial broadcast transmitter, it was shown that it is in practice impossible to consider building data for calculation.

Concerning transmitter based data a few information are stated in [WITT 04] or [BNetzA] but overall the support of operators is essential.

The basis for the self developed program FPT is a recommendation of the International Telecommunications Union called ITU-R P.1546. It is a general prediction method in terms of propagation curves, that were determined on the basis of a huge number of statistically independent measurements. This method was fit to the present questions and in a second step enhanced, so that even exposure calculation in a distance smaller than 1 km to the broadcast transmitter is possible. The advantages are the simplicity in handling and very short calculation times.

A comparison of exposure values calculated with different programs with corresponding measurements at 42 points has shown, that the ray-optical software does not result in a more accurate prediction than the calculation with the simple program FPT. Furthermore the commercial software required a longer calculation time and more effort due to the modelling.

Therefore FPT was used for the comparison of measured immissions of analogue TV, DVB-T, FM-Radio and DAB with its corresponding predicted calculation values. Altogether there were 5180 pairs of calculation and measurement available.

The calculation program was investigated with focus on the following requirements:

- The calculation program should show a preferably small mean deviation concerning the difference between measured and calculated immission values. This can be treated as a dimension of accuracy of the prediction.
- The calculation program should provide an higher exposure value at all points than the measurement showed. The difference between calculation and measurement should therefore be higher than "0" respectively the calculation should overestimate the measured value at all points (this corresponds with an *overestimation of 100%*). In this context this method could be stated as a worst case procedure.

In the calculation a correction factor concerning the height of the receiving antenna as it is stated in the ITU-R P.1546 was considered. After that the results of the first calculation were optimized with an additional scenario depending factor concerning the mean deviation. The corresponding additional factors are shown in the following table.

scenario	Additional factors for optimizing the mean deviation [dB]				
	Analogue-TV	DVB-T	FM-Radio	DAB (countrywide)	DAB (local)
Town, dense	8	4	6	15	13
Town	7	1	5	15	11
Suburb	2	4	-1	8	7
Land, open	2	5	3	10	4

Table: Scenario depending factors for optimizing the mean deviation between calculation and measurement

The results concerning the mean deviation are shown in the following table.

System	Correction	Number of points	Mean deviation [dB] (considering the additional factors)	Standard deviation in [dB]
Analogue TV	yes	1,135	9.0	12.2
DVB-T	yes	948	11.5	16.2
FM-Radio	yes	2,804	8.3	13.8
DAB (countywide)	yes	181	7.3	9.9
DAB (regional)	yes	112	7.8	10.2

Table: Mean deviation of the calculated values corresponding to measurements

Due to the dimension of the mean deviation the accuracy of exposure estimations with the simple program can only be stated with reservations. In this context it has to be pointed out, that depending on the broadcast service the maximal deviation of 78 to 83% of all compared points showed values of ± 3 dB. Against the background of measurement uncertainty the predicted exposure is very accurate in these cases. The high over- and respectively underestimation in the other points are to some extent founded in their geographical position. For this reason the program has reservations for the practice, so that measurements are not dispensable.

As the first calculation with considering of a height correction factor shows only at the half of all points overestimations a second calculation was accomplished *without* considering of the height correction factor. After this the percentage of the overestimation was optimized considering an additional factor based on the calculations without correction. The aim was getting a maximal value of underestimation that corresponds to the measurement uncertainty. The additional factors for the different systems are shown in the following table

scenario	Additional factors for optimizing the percentage of the point number with overestimations in [dB]				
	Analogue-TV	DVB-T	FM-Radio	DAB (countrywide)	DAB (local)
Town, dense	7	1	0	2	0
Town	3	0	14	1	0
Suburb	2	3	9	6	0
Land, open	6	5	12	11	6

Table: Scenario depending factors for optimizing the percentage of overestimations between calculation and measurement

The corresponding results are shown in the following table.

System	Correction	Number of points	Point number with overestimations in [%] (with an additional factor)	Maximal Underestimation in [dB] (with an additional factor)
Analogue TV	no	1,135	98.8	2.9
DVB-T	no	948	97.8	3.0
FM-Radio	no	2,804	99.4	2.3
DAB (countywide)	no	181	93.3	2.9
DAB (regional)	no	112	97.4	2.3

Table: Worst case method

The table shows, that the calculation method „worst case“ is well suited considering an additional value. But it has to be kept in mind, that in this case the mean deviation results in values of 20 - 30 dB.

In the context that the above comparisons of measurements with calculation values are based on mountainous as well as smooth regions the additional factors contain both configurations. Therefore these additional values are in general transferable to other regions – but other mean deviations have to be taken into account in this case.

A comparison of immission measurements and calculation in distances to 1 km to the transmitter (calculation with free-space in main-lop-direction) showed - dependent on the calculation method for this area - that in the vicinity of transmitter stations, that can be characterized with a rural vicinity, one has to face huge overestimations. Therefore system dependent reductions of 10 – 25 dB to the calculated values do make sense to get a preferable small mean deviation. In a Worst Case calculation the reductions can be stated with 5 – 10 dB.

In contrast the analysis of a broadcast station that can be characterized with an urban vicinity was more difficult. A general reduction factor for the calculated immissions could not be deduced for such configurations.

A comparison of the exposure distribution on lines beginning at a broadcast station demonstrated, that in scenarios, in which the terrain height increases at further distances from the station, the calculation program showed its limitations. These are based on the treatment of the terrain in the program, which is represented by only one parameter – the mean effective height. In this context the method “optimized mean deviation” underestimates the measured value clearly. The worst case method can also result in weak underestimations, but these are in same dimension as the measurement uncertainty. In other scenarios (e.g. lines beginning at the broadcast station Wendelstein) the exposure distribution showed following results:

- The calculation method „optimized mean deviation“ showed a more precise estimation of the immission, but underestimations are possible.
- The worst case method overestimates the measured exposure values in most cases; the mean deviation showed values of around 20 dB in this case.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Abstract	4
Zusammenfassung	5
Summary	13
Zielsetzung des Forschungsvorhabens	25
Hintergrund des Forschungsvorhabens	25
I. Bestandsaufnahme	29
I.1 Einleitung	30
I.2 Übertragungstechniken	31
I.2.1 Digitales TV nach dem DVB-T-Standard	31
<i>I.2.1.1 Übertragungsverfahren</i>	<i>31</i>
<i>I.2.1.2 Modulationsverfahren bei DVB-T</i>	<i>33</i>
<i>I.2.1.3 DVB-T-Signal im Zeitbereich</i>	<i>35</i>
I.2.2 Digitaler Tonrundfunk (DAB)	37
I.2.3 Analoges Fernsehen	40
I.2.4 Analoger UKW-Tonrundfunk	45
I.3 Berechnungsverfahren für den analogen und digitalen terrestrischen Rundfunk	47
I.3.1 Grundlagen der Funkwellenausbreitung	47
<i>I.3.1.1 Ausbreitungserscheinungen</i>	<i>47</i>
<i>I.3.1.2 Mehrwegeausbreitung</i>	<i>48</i>
<i>I.3.1.3 Wellenausbreitung innerhalb von Gebäuden</i>	<i>49</i>
I.3.2 Wellenausbreitungsmodelle	49
<i>I.3.2.1 Empirische und semi-empirische Modelle</i>	<i>50</i>
<i>I.3.2.2 Analytische Modelle</i>	<i>56</i>
<i>I.3.2.2.1 Strahlenoptische Ausbreitungsmodelle</i>	<i>56</i>
<i>I.3.2.2.2 Feldtheoretische Modellierung</i>	<i>58</i>
I.3.3 Fazit	58
I.4 Messverfahren für den analogen und digitalen terrestrischen Rundfunk	60
I.4.1 Einleitung	60

I.4.1.1	Grundsätzliche Einteilung von Messaufgabenstellungen.....	60
I.4.1.2	Vorgehensweise bei der Untersuchung der Messverfahren.....	61
I.4.2	Anforderungen an Messverfahren	61
I.4.3	Überblick über die Normungssituation	63
I.4.3.1	Einleitung.....	63
I.4.3.2	Normungssituation in Deutschland	64
I.4.3.3	Normungssituation in Europa.....	67
I.4.3.4	Normungssituation in den USA	69
I.4.4	Beschreibung der vorhandenen Messverfahren	69
I.4.4.1	Grundsätzliche Messverfahren.....	69
I.4.4.2	Auswahl der Messpunkte	71
I.4.4.3	Messgeräte und Hilfsmittel	72
I.4.4.3.1	Frequenzselektives Messverfahren	72
I.4.4.3.2	Breitbandiges Messverfahren	73
I.4.4.3.3	Kalibrierung der Messgeräte	74
I.4.4.3.4	Nahfeld-Fernfeld Problematik	75
I.4.4.4	Wahl der Messparameter.....	75
I.4.4.5	Messdurchführung.....	77
I.4.4.6	Auswertung	77
I.4.4.7	Dokumentation	78
I.4.5	Eignung der verschiedenen Messverfahren	79
I.5	Literaturstudie zu ähnlichen Projekten	81
I.5.1	Projekte im Ausland	81
I.5.1.1	Messungen in den USA	81
I.5.1.2	Messung der hochfrequenten Hintergrundbelastung in der Schweiz	81
I.5.1.3	Messung der hochfrequenten Felder im Schweizer Kanton Schwyz.....	82
I.5.1.4	Expositionsmessungen der französischen Regulierungsbehörde.....	82
I.5.1.5	Expositionsmessungen des englischen NRPB.....	82
I.5.2	Projekte in Deutschland.....	83
I.5.2.1	Feldstärkemonitoring der BNetzA (EMF-Datenbank).....	83
I.5.2.2	Funkwellenmessprojekt Baden-Württemberg	83
I.5.2.3	EMF-Monitoring Bayern.....	86
I.5.2.4	Immissionsdatenbank Bayern	88
I.5.2.5	EMF-Messprojekt Berlin	88
I.5.3	Fazit	89
I.6	Senderdichte und installierte Sendeleistungen	91

I.6.1	Analoge und digitale terrestrische Fernsehübertragung.....	91
I.6.1.1	DVB-T in Bayern.....	93
I.6.1.1.1	DVB-T Startinsel Nürnberg	93
I.6.1.1.2	DVB-T Startinsel München / Südbayern	97
I.6.1.1.3	Zusammenfassung für die Startinseln in Bayern	100
I.6.1.2	DVB-T in der Region Berlin / Brandenburg.....	100
I.6.1.3	DVB-T in der Region Bremen / Unterweser	106
I.6.1.4	Fazit.....	110
I.6.2	Analoge und digitale terrestrische Radioübertragung.....	111
I.6.2.1	Nordrhein-Westfalen.....	112
I.6.2.2	Bayern	113
I.6.2.3	Fazit.....	115
II.	Verfahren zur Expositionsabschätzung	116
II.1	Einleitung.....	117
II.2	Berechnungsverfahren zur Expositionsbestimmung bei analogen und digitalen terrestrischen Rundfunksignalen	118
II.2.1	Strahlenoptische Programme.....	118
II.2.1.1	Eingabeparameter.....	120
II.2.1.1.1	Geodaten	120
II.2.1.1.2	Gebäudedaten	126
II.2.1.1.3	Anlagenbezogene Parameter	127
II.2.2	Berechnungsprogramm FPT	131
II.2.3	Fazit	137
II.3	Simulationen.....	138
II.3.1	Konfigurationen.....	138
II.3.2	Senderstandort Olympiaturm, München	140
II.3.3	Senderstandort Dillberg.....	151
II.3.4	Direkte Senderumgebung.....	156
II.3.5	Fazit	164
II.4	Messverfahren zur Expositionsbestimmung bei analogen und digitalen terrestrischen Rundfunksignalen.....	167
II.4.1	Grundsätzliches.....	167

II.4.2	Wesentliche Fragestellungen	167
II.4.3	Auswertung vorhandener Messempfehlungen.....	172
II.4.4	Untersuchungen zur Definition eines geeigneten Messverfahrens	179
II.4.4.1	<i>Erfassungsverfahren</i>	<i>179</i>
II.4.4.2	<i>Messdauer</i>	<i>186</i>
II.4.4.3	<i>Messung von UKW-Signalen.....</i>	<i>187</i>
II.4.4.4	<i>Messung von analogen TV-Signalen.....</i>	<i>190</i>
II.4.4.5	<i>Messung von DAB- und DVB-T-Signalen.....</i>	<i>196</i>
II.4.5	Für die durchzuführenden Messungen gewählte Geräte und Einstellparameter	205
II.4.5.1	<i>Messgeräte</i>	<i>205</i>
II.4.5.2	<i>Einstellparameter der Messgeräte.....</i>	<i>207</i>
II.4.6	Nachweisgrenzen	209
II.4.6.1	<i>Spektrumanalysator.....</i>	<i>209</i>
II.4.6.2	<i>Antenne.....</i>	<i>210</i>
II.4.6.3	<i>HF-Kabel</i>	<i>213</i>
II.4.6.4	<i>Nachweisgrenzen der für die Messungen gewählten Geräte.....</i>	<i>214</i>
II.4.7	Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit	216
II.4.8	Unsicherheitsbetrachtungen	222
III.	Expositionserhebung	225
III.1	Einleitung	226
III.2	Ergebnisse der vergleichenden Feldstärkemessungen.....	230
III.2.1	<i>Messgeräte, Messdurchführung</i>	<i>230</i>
III.2.2	<i>Problematik des Vergleichs der Ergebnisse zweier Messkampagnen</i>	<i>231</i>
III.2.3	<i>Reproduzierbarkeit der Messung im UKW-Frequenzbereich.....</i>	<i>232</i>
III.2.4	<i>Gesamtexposition und Verteilung auf die verschiedenen Funkdienste... </i>	<i>237</i>
III.2.5	<i>Nähere Betrachtung der Region Nürnberg</i>	<i>249</i>
III.2.6	<i>Nähere Betrachtung der Region München</i>	<i>251</i>
III.2.7	<i>Zusammenfassung der Messresultate an den 200 "Zufallspunkten"</i>	<i>255</i>
III.2.8	<i>Auswertung der systematischen "Linienmessungen"</i>	<i>257</i>
III.2.9	<i>Auswertung der Gebäudemessungen</i>	<i>260</i>
III.2.9.1	<i>Höhenabhängigkeit der Immission.....</i>	<i>260</i>
III.2.9.2	<i>Untersuchungen zur Abschätzung der Gebäudedämpfung</i>	<i>270</i>
III.2.10	<i>Zusammenfassende Bewertung</i>	<i>275</i>
III.3	Langzeitmessungen	278

III.3.1	<i>Colonus in Köln</i>	278
III.3.2	<i>IMST in Kamp-Lintfort</i>	281
III.3.3	<i>Fernmeldeturm "Regensburg" und UKW-Sender "Hohe Linie"</i>	284
III.3.1	<i>Fazit</i>	288
III.4	Vergleich von Messungen und Berechnungen	289
III.4.1	<i>Berechnungen für das analoge Fernsehen</i>	291
III.4.2	<i>Berechnungen für das digitale Fernsehen</i>	296
III.4.3	<i>Berechnungen für UKW</i>	301
III.4.4	<i>Berechnungen für DAB</i>	305
III.4.5	<i>Immissionen in der Senderumgebung</i>	311
III.4.5.1	Bestimmung eines Abschlagswertes	311
III.4.5.2	Linienmessungen in Nordbayern	316
III.4.5.3	Linienmessungen in Südbayern.....	325
III.4.6	<i>Fazit</i>	328
	Danksagung	332
	Literaturverzeichnis	333
	Abkürzungsverzeichnis	340
	Verzeichnis häufig verwendeter Symbole	343

Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Unter dem Schlagwort „DVB-T: Das ÜberallFernsehen“ werden derzeit bundesweit Sendeanlagen für die terrestrische Verbreitung digitaler Fernsehprogramme aufgebaut. Der digitale Tonrundfunk DAB kann mit entsprechend ausgerüsteten Empfangsgeräten bereits nahezu flächendeckend empfangen werden. DAB und DVB-T sollen als neue digitale Technologien mittelfristig die bestehende analoge terrestrische Radio- und Fernsehübertragung ersetzen.

Die Sendeanlagen von DVB-T und DAB unterliegen dem Standortbescheinigungsverfahren [BEMFV] der Bundesnetzagentur (BNetzA). Damit ist gewährleistet, dass in allgemein zugänglichen Aufenthaltsbereichen die Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern eingehalten werden [99/519/EG, 26.BImSchV]. Über diese Feststellung hinaus liegen aber nur wenig belastbare Informationen über die Größe der elektromagnetischen Immissionen in allgemein zugänglichen Aufenthaltsbereichen vor.

Ziel des Vorhabens ist es deshalb, mittels Rechnersimulation und Messkampagnen die von DAB und DVB-T Sendeanlagen verursachte Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetischer Felder in den jeweiligen Frequenzbändern zu quantifizieren und hinsichtlich einschlägiger Normen zu bewerten. Hierbei wird der durch die BNetzA festgelegte Sicherheitsabstand ausdrücklich ausgeklammert, d.h. die Untersuchungen erstrecken sich auf den Entfernungsbereich jenseits des Sicherheitsabstandes bis zur Grenze des Versorgungsgebietes. Die ermittelten Immissionen werden mit den durch die bislang vorherrschenden analogen Fernseh- und Tonrundfunknetze hervorgerufenen Expositionen in identischen Bereichen verglichen. Auf den in der Übergangsphase beabsichtigten parallelen Betrieb analoger und digitaler Sendeanlagen wird eingegangen.

Bezüglich der Nomenklatur wird im Folgenden unter dem Begriff Rundfunk sowohl der Fernseh- als auch der Tonrundfunk gemeinsam verstanden.

Hintergrund des Forschungsvorhabens

Für die Verbreitung von terrestrischem Fernseh- und Tonrundfunk in Deutschland stehen nach dem Frequenznutzungsplan der "Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen" die in Tabelle 1 dargestellten Frequenzbereiche zur Verfügung [BNetzA 2003].

Kanäle	Band	Frequenz	Kanalanzahl	Nutzung
Kanal 2-4	Band I	47-68 MHz	3 Kanäle	analog
Kanal 5-11	Band III	174-223 MHz	7 Kanäle	analog, digital *
Kanal 21-60	Band IV/V	470-790 MHz	40 Kanäle	analog, digital
Kanal 61-69	Band V	790-862 MHz	9 Kanäle	digital

Tabelle 1: Frequenzbereiche für den terrestrischen Fernseh Rundfunk
 (* im Kanal 11 hat der digitale terrestrische Tonrundfunk Vorrang gegenüber dem Fernseh Rundfunk)

Für die Verbreitung des digitalen terrestrischen Fernsehens (DVB-T) ist in Deutschland nahezu das selbe Frequenzspektrum vorgesehen wie für die analoge Übertragung. Als Unterschied bleibt neben den neu für den digitalen Fernseh Rundfunk hinzugekommenen Kanälen 61 – 69 fest zu halten, dass die vollständige Schließung des Bandes I für die Rundfunkverbreitung spätestens mit Beendigung der Umstellung auf digitale Fernsehübertragung erfolgt.

Auf der europäischen CEPT Planungskonferenz in Chester im Jahr 1997 wurde eine multilaterale Vereinbarung bezüglich der internationalen Frequenzsituation in obigen Spektrum und deren Behandlung getroffen [CEPT 95]. Hierin sind die Koordinierungen für neue DVB-T Nutzungen, aber auch die Umstellung analoger terrestrischer Fernsehsender auf digitale festgelegt.

So kann ein analoger Sender direkt ohne Absprache mit der Bundesnetzagentur auf einen digitalen umgestellt werden, wenn die neue Sendeleistung mindestens 18 dB (ERP) unter der alten liegt.

Wird die Umstellung eines analogen Fernsehsenders auf einen digitalen mit einer Leistungsreduzierung von 7 bis 18 dB (ERP) vorgenommen, muss der alte Antrag für den analogen Senderstandort bei der Bundesnetzagentur lediglich geändert werden.

Hieraus kann demnach festgehalten werden, dass durch die reine Umstellung von analogen auf digitale Sender unter den oben genannten Bedingungen die gesamte installierte Sendeleistung reduziert wird. Weiterhin bleibt aber zu beachten, dass sofern die obigen Bedingungen nicht erfüllt sind (d.h. Leistungsreduzierung kleiner 7 dB), die entsprechenden Sender *neu* beantragt werden müssen (vgl. hierzu [CEPT 00]).

Auf der Planungskonferenz für DVB-T in Chester wurden drei Versorgungsstandards definiert:

- Portable indoor (Empfang mit kleiner Zimmerantenne möglich)
- Portable outdoor (Empfang mit kleiner Stabantenne außerhalb von Gebäuden möglich)
- Fixed antenna (Empfang nur mit Richtantenne auf Gebäudedach möglich)

Die vorherrschende analoge Versorgung war auf den stationären Empfang mit einer Dachantenne ausgelegt. Durch die Zielsetzung eines digitalen Empfanges in Gebäuden muss im Gegensatz dazu die Gebäudedämpfung überwunden werden, was wiederum in einer Steigerung der Sendeleistung resultieren müsste.

Ein weiterer Unterschied der digitalen zur analogen Fernsehverbreitung liegt darin, dass das Programmangebot deutlich gesteigert wird.

Zusammenfassend bleibt an dieser Stelle fest zu halten, dass eine allgemeingültige Aussage bezüglich der zu erwartenden Expositionssituation durch die Umstellung auf digitales Fernsehen gegenüber der analogen Verbreitung aus den dargestellten Aspekten nicht abzuleiten ist.

Im Gegensatz zum digitalen terrestrischen Fernsehen, bei dem aufgrund der nahezu gleichen Frequenzbereiche analoge Sender abgeschaltet bevor digitale in Betrieb genommen werden, wird der digitale Tonrundfunk (DAB) *parallel* zum analogen (UKW) in anderen Frequenzbändern betrieben. Auf der internationalen CEPT Planungskonferenz für DAB im Juli 1995 in Wiesbaden wurden für die digitale Verbreitung der überwiegenden Zahl von Radioprogrammen folgende Frequenzbereiche fest gelegt [CEPT 95].

Kanal	Band	Frequenz	Nutzung
Kanal 5-10	Band III	174-216 MHz	DVB-T, DAB
Kanal 11	Band III	216-223 MHz	DAB Vorrang vor DVB-T
Kanal 12	Band III	223-230 MHz	DAB
	L-Band	1452 - 1492 MHz	DAB

Tabelle 2: Frequenzbereiche für den digitalen terrestrischen Tonrundfunk

Der momentan landesweit in Deutschland genutzte Kanal 12 [DIG] wird hierbei in die vier Frequenzabschnitte 12A-D mit je 1,5 MHz Bandbreite aufgeteilt, in denen jeweils ein Ensemble von Programmen übertragen werden kann. Diese sind hierbei für eine flächendeckende Versorgung reserviert, während die Übertragung im 1,5 GHz Band für lokale Programmangebote (z.B. Ballungsräume) vorgesehen ist.

Die Einflüsse auf die Exposition durch die Umstellung auf digitale Verbreitung von Fernseh- und Tonrundfunk wird in der hier durchzuführenden Studie mittels Berechnungsprogrammen bzw. konkreten Vergleichsmessungen der Immissionen durch die jeweilige Übertragungstechnik genau analysiert. Während die Immissionen durch den terrestrischen Tonrundfunk infolge des derzeit parallelen Betriebs gleichzeitig verglichen werden können, wird die Änderung der Expositionssituation durch den terrestrischen Fernsehrundfunk mittels eines Vergleichs vor und nach der Umstellung vorgenommen.

Bezüglich einer *Berechnung* der vorliegenden Immissionen sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Ausbreitung elektromagnetischer Felder unter Berücksichtigung von Reflexions-, Streu- und Dämpfungsmechanismen seit längerem bekannt und wissenschaftlich umfassend erforscht. Danach lässt sich die Feldverteilung im Raum mit Hilfe bekannter

physikalischer Zusammenhänge vollständig beschreiben. In der Praxis scheitert eine analytische oder numerische Lösung aber an den komplexen, zum Teil nicht ausreichend erfassbaren Parametern. Aus diesem Grund sind Berechnungen in der Praxis meist ungenau. Die Hochfrequenzmesstechnik ist prinzipiell ebenfalls gut entwickelt. Es stehen für den gesamten Frequenzbereich grundlegende Messverfahren zur Verfügung. Diese sind jedoch oftmals nur sehr allgemein einsetzbar und nicht für ein spezielles Anwendungsgebiet, wie etwa für die Bestimmung von Immissionen durch analoge oder digitale Fernsehsender angepasst.

Im Hinblick auf die Verbreitung von digitalem terrestrischen Tonrundfunk sei an dieser Stelle hinzukommend folgender Punkt angemerkt: Im Zusammenhang mit der Einführung von DAB gibt es hin und wieder Pressemitteilungen, in denen eine Einstellung von DAB gefordert wird. So schlug der Rat der Medienanstalt von Berlin-Brandenburg Ende November 2004 vor, den bisherigen Ansatz von DAB für digitales terrestrisches Radio aufzugeben. Ein Neubeginn biete nicht nur mehr Radiovielfalt zu geringeren Kosten, sondern auch Synergien zwischen digitalem Fernsehen und digitalem Radio und Vorteile durch die Verbindung von Rundfunk, Mobiltelefonie und Internet für mobile und portable Geräte (vgl. hierzu [MABB], [RAD 04]).

In diesem Zusammenhang hat sich laut [DIG] die Direktorenkonferenz der Landesmedienanstalten (DLM) zur Digitalisierung auch der Hörfunkübertragungswege bekannt und mehrheitlich die bundesweite Position zum DAB-System bekräftigt. Die Medienkommission der Landesanstalt für Medien NRW (LfM) hat sich auch klar für die Einführung des DAB-Standards ausgesprochen und in zehn Thesen Feststellungen und Forderungen formuliert [LFM]. Die Organisation WorldDAB bezeichnete als Reaktion auf diese Stellungnahme der Landesmedienanstalt Berlin-Brandenburg einen Ausstieg aus DAB als kurzfristig und ökonomisch gefährlich. Die MABB sei mit ihrer Meinung aufgrund der inzwischen eingetretenen Realität sowohl international als auch national zunehmend isoliert [DIG].

Zunächst werden im Kapitel „I“ einige Vorbetrachtungen für das vorliegende Projekt und dessen Aufgabenstellung durchgeführt. Im anschließend mit „II“ gekennzeichneten Kapitel werden Verfahren zur Expositionsabschätzung auf Grundlage der Vorbetrachtungen getroffen. Im Kapitel „III“ wird daran anknüpfend die Expositionserhebung durchgeführt. Diese besteht zum einen aus einem Vergleich der Messungen von Immissionen digitaler Rundfunksendern mit deren analogen Pendanten und zum anderen aus einem Vergleich der Messergebnisse mit rechen-technisch prognostizierten Werten.

I. Bestandsaufnahme

Bearbeitungszeitraum
01. Oktober 2004 – 15. Januar 2005

I.1 Einleitung

Das folgende Kapitel bezieht sich auf das Arbeitspaket 1 des Forschungsvorhabens. Im Sinne einer *Bestandsaufnahme* wurden innerhalb dieses Arbeitspaketes die im weiteren beschriebenen Punkte bearbeitet.

Zunächst werden die Übertragungstechniken des DAB und DVB-T Standards dargestellt. Dem geringen öffentlichen Interesse an einer detaillierten Kenntnis der Immission durch analoge Rundfunksendeanlagen in der Vergangenheit Rechnung tragend, wurde unter Betrachtung der analogen Übertragungstechniken überprüft, ob bislang eingesetzte Messverfahren dazu geeignet waren, die Immission korrekt zu erfassen. Hier spielte auch die Schwankungsbreite der Immission bei verschiedenen Bildinhalten von analogen Fernsehsignalen eine Rolle. Vor diesem Hintergrund wurden unterschiedliche Anforderungen an die Messtechnik zur Erfassung von analogen und digitalen TV- und Tonrundfunk-Signalen herausgearbeitet, die in den folgenden Arbeitspaketen für die Entwicklung eines Messverfahrens für DVB-T und DAB verwendet wurden.

Anschließend erfolgt eine Übersicht über den aktuellen Stand der zur Zeit zur Verfügung stehenden Mess- und Berechnungsverfahren im Frequenzbereich der analogen und digitalen Rundfunkübertragung. Es wurde insbesondere diskutiert, in wie weit derzeit verfügbare Verfahren für eine Erhebung der tatsächlich vorliegenden Immissionen geeignet sind. Ausgangspunkt der Diskussion ist die Definition der Anforderungen, die sich aus den spezifischen Betriebsbedingungen der Sendeanlagen ergeben.

Im Rahmen einer Literaturstudie wird daran anschließend auf abgeschlossene und noch laufende Projekte (national und international) zum Thema des hier vorliegenden Forschungsprojektes eingegangen. Hierbei wird insbesondere das Projekt „EMF Monitoring in Bayern“ einbezogen.

Abschließend wird ein Vergleich der Senderdichte und der installierten Sendeleistungen zwischen digitalem und analogem terrestrischen Rundfunk dargestellt. Dieser wurde an den Regionen Nürnberg und Bayern, in denen das digitale Fernsehen im Mai 2005 gestartet ist und an zwei weiteren Regionen durchgeführt, an denen die analoge Verbreitung zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits eingestellt war. Hinsichtlich DAB wurde ein Vergleich mit der Senderdichte und der installierten Sendeleistungen des bestehenden analogen UKW-Rundfunknetzes durchgeführt.

I.2 Übertragungstechniken

Im Folgenden werden die bei DVB-T und DAB verwendeten Übertragungsverfahren kurz vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die Eigenschaften der hochfrequenten Sendesignale eingegangen, so weit dies für die messtechnische Ermittlung der Exposition von Bedeutung ist. Als Ergänzung werden zum Vergleich auch die Signalstrukturen des analogen TV und der Tonrundfunksignale im UKW-Bereich vorgestellt.

I.2.1 Digitales TV nach dem DVB-T-Standard

I.2.1.1 Übertragungsverfahren

Im Gegensatz zum bisher üblichen Analog-TV liegt die zu übertragende Programminformation bei DVB in digitaler Form vor (kodiert und komprimiert nach dem MPEG-2-Standard). Es handelt sich dabei um ein Multiplexsignal, das komprimierte Video- und Audiodaten, sowie sonstige Nutzdaten (z.B. Videotext), Synchronisationsinformationen und Fehlerschutzbits beinhaltet (MPEG = **M**oving **P**ictures **E**xperts **G**roup).

Die Übertragung des digitalen Transportstroms erfolgt beim europäischen DVB (**D**igital **V**ideo **B**roadcasting) nach den Richtlinien des European Telecommunications Standards Institute (ETSI), wobei folgende Systeme innerhalb der DVB-Familie unterschieden werden:

- DVB-S (digitales TV über Satellit)
- DVB-C (digitales TV über Kabel)
- DVB-H (digitales TV für mobile Endgeräte, z.B. Mobiltelefone)
- DVB-T (digitales TV für die terrestrische Versorgung)

Diese vier Verfahren unterscheiden sich in Bezug auf Übertragungsraten, angewendete Modulationsverfahren und Aufwand beim Fehlerschutz sehr deutlich, da es sich hierbei um unterschiedlich stark gestörte Übertragungskanäle handelt. Die Übertragung des digitalen TV-Signals über Kabel gestaltet sich beispielsweise deutlich unproblematischer als die terrestrische Versorgung.

Im Folgenden wird ausschließlich auf die Eigenschaften von DVB-T-Signalen eingegangen.

Ein wichtiges Ziel bei der Entwicklung von DVB-T war es, einige entscheidende Nachteile der analogen TV-Übertragung zu vermeiden. Hierbei sei insbesondere erwähnt:

- Die spektrale Effizienz der analogen TV Übertragung ist relativ gering. Zur Übertragung eines Fernsehprogramms wird eine Bandbreite von etwa 5,5 MHz benötigt, d.h. in einem TV-Kanal (Bandbreite 7 MHz im VHF-Band bzw. 8 MHz im UHF-Band) kann auch nur ein Programm übertragen werden. Mittels DVB-T sind innerhalb eines Kanals mehrere Pro-

gramme gleichzeitig übertragbar. Typisch ist derzeit ein „Bouquet“ von 4 Programmen je Kanal.

- Analoge Fernsehsignale reagieren sehr empfindlich auf Interferenzen, die durch Mehrwegeempfang entstehen. Teilsignale, die durch Reflexionen an Bergen oder Gebäuden eine größere Laufzeit besitzen, als auf dem direkten, kürzesten Pfad, können starke Störungen im Fernsehbild erzeugen („Geisterbilder“). Daher ist es notwendig, mittels gut bündelnder Richtantennen möglichst nur den direkten Signalpfad zu empfangen und die Echo- bzw. Mehrwegepfade hinreichend auszublenden. Mittels der digitalen Technik sollen derartige Probleme vermieden werden, so dass beispielsweise auf die aufwändigen Richtantennen verzichtet werden kann und der Empfang bereits bei Verwendung einer einfachen Stabantenne zufriedenstellend möglich wird.
- Der Verzicht auf Richtantennen öffnet weiterhin auch die Tür für einen mobilen Empfang von Fernsehsignalen, was bei der analogen Technik nicht vernünftig realisierbar ist.
- Das bei DVB-T verwendete Modulationsverfahren bietet nicht nur einen effizienten Schutz gegen die negativen Effekte, die durch Mehrwegeausbreitung verursacht werden, sondern darüber hinaus die Möglichkeit, die vorhandenen Mehrwegesignale effektiv zu nutzen, denn der hochratige Bitstrom wird durch die Modulation quasi in eine Vielzahl paralleler Bitströme mit entsprechend niedrigerer Bitrate und damit auch längerer Symboldauer umgewandelt (vgl. Abschnitt 1.2.1.2). Die typischen Umweglaufzeiten sind dadurch deutlich kleiner als die Symbolauern, so dass es nicht mehr zu einer völligen „Überdeckung“ eines Bits durch die Mehrwegesignale des vorherigen Bits kommen kann. Vielmehr können die Mehrfachsignalanteile sogar noch verstärkend auf das resultierende Empfangssignal wirken. Wählt man ein ausreichend großes „Schutzintervall“ am Beginn jedes Bit, so ist es sogar möglich, ein „Gleichwellennetz“ aufzubauen. Das bedeutet, dass Nachbarsender auf der gleichen Frequenz senden können, wenn sie nicht zu weit von einander entfernt sind, so dass die Verzögerung, mit der das Signal vom Nachbar-sender eintrifft nicht größer ist als das gewählte „Schutzintervall“. In diesem Fall entsteht wiederum eine konstruktive Überlagerung im resultierenden Empfangssignal. Beim digitalen TV entfällt also eine komplexe Frequenzplanung der einzelnen Standorte. Bereiche mit ungünstiger Empfangssituation im analogen Fall können ihr resultierendes Empfangssignal gegebenenfalls als Summe mehrerer einfallender Signale von verschiedenen Sendern bilden, so dass sich eine insgesamt günstigere Versorgungssituation ergibt, als beim analogen TV. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Sender nicht zu weit auseinander liegen (maximal etwa 60 km) und alle Sender zeitlich auf eine Referenz synchronisiert sind.

Der digitale terrestrische Fernsehfunk bietet also eine ganze Reihe von wesentlichen Verbesserungen in Bezug auf Kapazität, Störfestigkeit und Versorgungsgüte.

I.2.1.2 Modulationsverfahren bei DVB-T

Bei DVB-T kommt eine Mehrträgermodulation nach dem OFDM-Verfahren zum Einsatz (**Orthogonal Frequency Division Multiplexing**). Der Gesamtdatenstrom mit einer Bitrate r_{Bit} wird auf eine große Zahl von N einzelnen Teildatenströmen aufgeteilt. Jeder Teildatenstrom moduliert einen eigenen Träger, wodurch auf jedem Träger nur noch ein Datenstrom von r_{Bit}/N übertragen wird. Somit kann die Symboldauer um den Faktor N vergrößert werden. Es entsteht dadurch ein sehr breites Spektrum, was wiederum zu einer großen Festigkeit gegenüber selektivem Schwund führt, da sich dieser dann nur noch auf einige wenige Träger und niemals auf das gesamte Spektrum auswirken kann. Ausfälle bei einzelnen Trägern können jedoch durch geeignete Kanalcodierung (Interleaving, Fehlerschutz) ausgeglichen werden. Man spricht dann von „**Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing**“ (COFDM). In Bild I.2.1 ist der prinzipielle Übergang von Einträger- zu Mehrträgermodulation dargestellt.

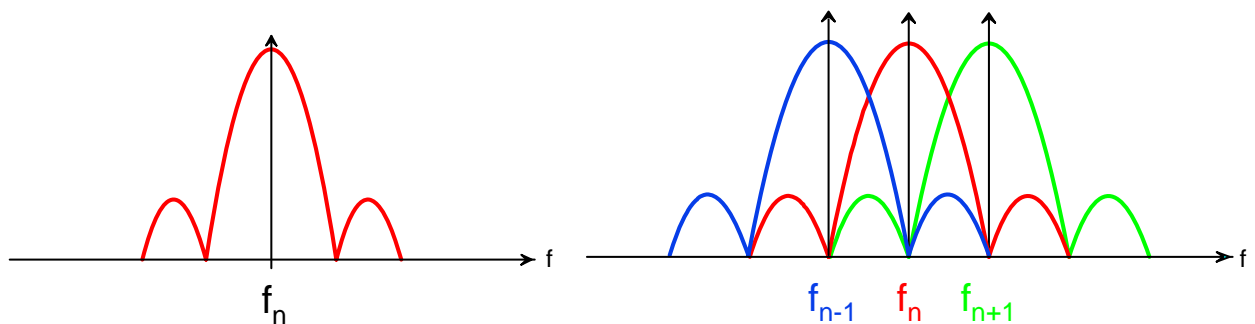


Bild I.2.1: Spektrum bei Einträgermodulation (links) und orthogonaler Mehrträgermodulation (rechts)

Damit jedoch trotz der überlappenden Einzelspektren keine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Teilsignale auftritt, muss die sogenannte „Orthogonalitätsbedingung“ eingehalten werden. Diese ist erfüllt, wenn der Abstand der einzelnen Träger genau dem Kehrwert der Symboldauer des Teildatenstroms entspricht. In diesem Fall fällt das Maximum jedes Einzelträgerspektrums auf Nullstellen seiner Nachbarn.

Zu beachten ist, dass bei DVB-T drei Möglichkeiten der Modulation der Einzelträger zugelassen sind:

- 4-PSK (QPSK): Zwei Bit des ursprünglichen Teildatenstroms werden zu einem HF-Symbol zusammengefasst, somit ergibt sich eine HF-Symboldauer $T_{\text{Symbol}} = 2 \cdot T_{\text{Bit}}$.
- 16-PSK: Vier Bit des ursprünglichen Teildatenstroms werden zu einem HF-Symbol zusammengefasst, somit ergibt sich eine HF-Symboldauer $T_{\text{Symbol}} = 4 \cdot T_{\text{Bit}}$.
- 64-QAM: Sechs Bit des ursprünglichen Teildatenstroms werden zu einem HF-Symbol zusammengefasst, somit ergibt sich eine HF-Symboldauer $T_{\text{Symbol}} = 6 \cdot T_{\text{Bit}}$.

Die mögliche Anzahl N der Einzelträger wird bestimmt durch die technische Realisierung des OFDM-Verfahrens. Bei DVB-T stehen die folgenden beiden Möglichkeiten zur Wahl:

- 2k-Modus mit theoretisch 2048 Einzelträgern (jedoch nur 1705 genutzt)
- 8k-Modus mit theoretisch 8192 Einzelträgern (jedoch nur 6817 genutzt)

Allerdings werden nur 1512 bzw. 6048 Träger mit eigentlichen Nutzdaten belegt, die restlichen Träger dienen entweder als Referenzsignale mit einer dem Empfänger bekannten Information oder zur Übertragung von Signalisierungs- und Synchronisationsmustern [MÄU 03]. Bild I.2.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines DVB-T-Spektrums, während in Bild I.2.3 ein real gemessenes Spektrum dargestellt ist.

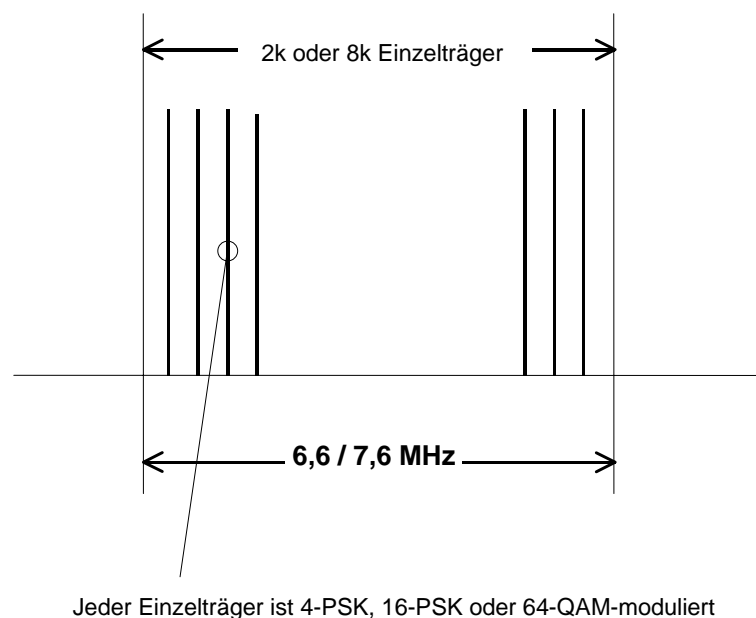


Bild I.2.2: DVB-T: Prinzipieller Aufbau des Spektrums

Da im 2k- bzw. im 8k-Modus der Abstand der Trägerschwingungen um den Faktor vier unterschiedlich gewählt wird (4,464 kHz bzw. 1,116 kHz), ergibt sich bei beiden Modi eine Bandbreite des OFDM-Signals von etwa 7,6 MHz (siehe Bild I.2.3). Falls ein DVB-T-Signal im VHF-Band übertragen werden soll, muss es etwas anders parametrisiert werden, damit seine Bandbreite geringer ausfällt (ca. 6,6 MHz), denn im VHF-Band beträgt die Breite eines Kanals nur 7 MHz.

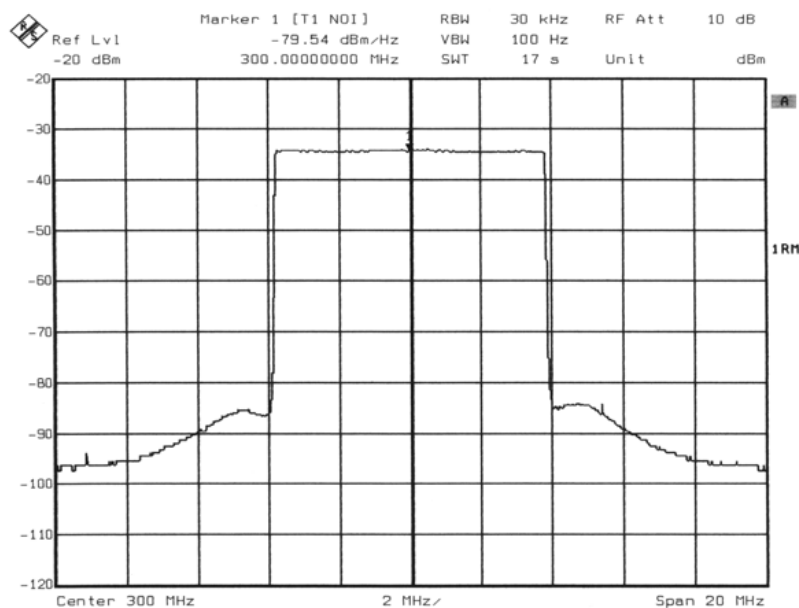


Bild I.2.3: Real gemessenes Spektrum eines DVB-T-Signals (UHF-Band)

Wie Bild I.2.3 zeigt, ergibt sich demnach ein Spektrum, das dem von bandbegrenzten weißen Rauschen sehr stark ähnelt.

I.2.1.3 DVB-T-Signal im Zeitbereich

Die große Bandbreite des DVB-T-Signals hat natürlich entsprechende Konsequenzen für die korrekte Erfassung im Rahmen einer spektralen Messung der Exposition. Auf die sich daraus ergebende Problematik wird in Kapitel I.4 noch genauer eingegangen.

Zusätzlich zum spektralen Aussehen, ist es allerdings auch notwendig, das DVB-T-Signal im Zeitbereich zu analysieren, da sich hier ebenfalls einige Besonderheiten ergeben, die von großer Wichtigkeit bei der messtechnischen Erfassung derartiger Signale sind.

Stellt man ein DVB-T-Signal im Zeitbereich dar (beispielsweise mit einem schnellen Oszilloskop oder einem Spektrumanalysator im „Zero-Span-Betrieb“) so ergibt sich ein rauschähnlicher Signalverlauf (Bild I.2.4).

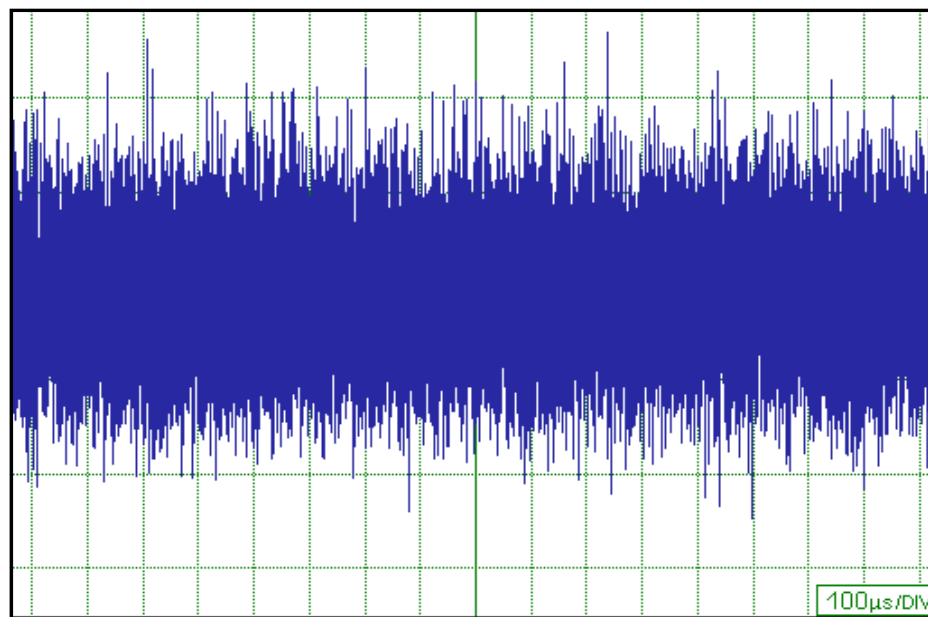


Bild I.2.4: Prinzipieller Zeitverlauf eines DVB-T-Signals (Vertikalachse: Spannung im linearen Maßstab)

Typisch für rauschähnliche Signale ist der große Unterschied zwischen kurzfristig auftretenden Maxima U_{Peak} und dem Effektivwert U_{RMS} des Signals. Beschrieben wird dieser Unterschied durch den sogenannten „Crestfaktor“ C , der meist in dB angegeben wird und sich nach folgender Formel errechnet:

$$C = 20 \cdot \log (U_{\text{Peak}}/U_{\text{RMS}})$$

Anmerkung:

Ebenso gebräuchlich ist die Definition des Crestfaktors als der Logarithmus des Verhältnisses der über eine Trägerperiode gemittelten Spitzenleistung zur Durchschnittsleistung. Verwendet man diese Definition, ergibt sich bei sinusförmigen Trägersignalen ein um 3 dB niedrigerer Wert für den Crestfaktor.

Theoretisch ergibt sich bei OFDM im 8k-Mode ein Crestfaktor von 41 dB, im 2k-Mode sind es noch 35 dB [FIS04]. Derartig hohe Crestfaktoren können die Senderendstufen allerdings nicht verarbeiten, denn dazu müssten sie für Spitzenleistungen ausgelegt werden, die bis zum 10.000-fachen der Durchschnittsleistung des Senders betragen. In der Praxis treten aufgrund von Signalclipping und dem begrenzten Auflösungsvermögen der digitalen Signalverarbeitung derart hohe Crestfaktoren nicht auf, derzeit liegen realistische Werte etwa zwischen 10 und 12 dB [DAM 97].

Für die Expositionsmesstechnik ist es allerdings von entscheidender Bedeutung, dass die mittlere Leistung gemessen wird, da diese aufgrund des thermischen Wirkungsmodells die korrekte Beurteilungsgröße für die Einhaltung der abgeleiteten Grenzwerte darstellt. Eine Messung der Spitzenleistung eines DVB-T-Signals führt demnach zu einer deutlichen

Überbewertung der Exposition. Näheres zur korrekten Expositionsmessung bei DVB-T-Signalen findet sich in Kapitel I.4.

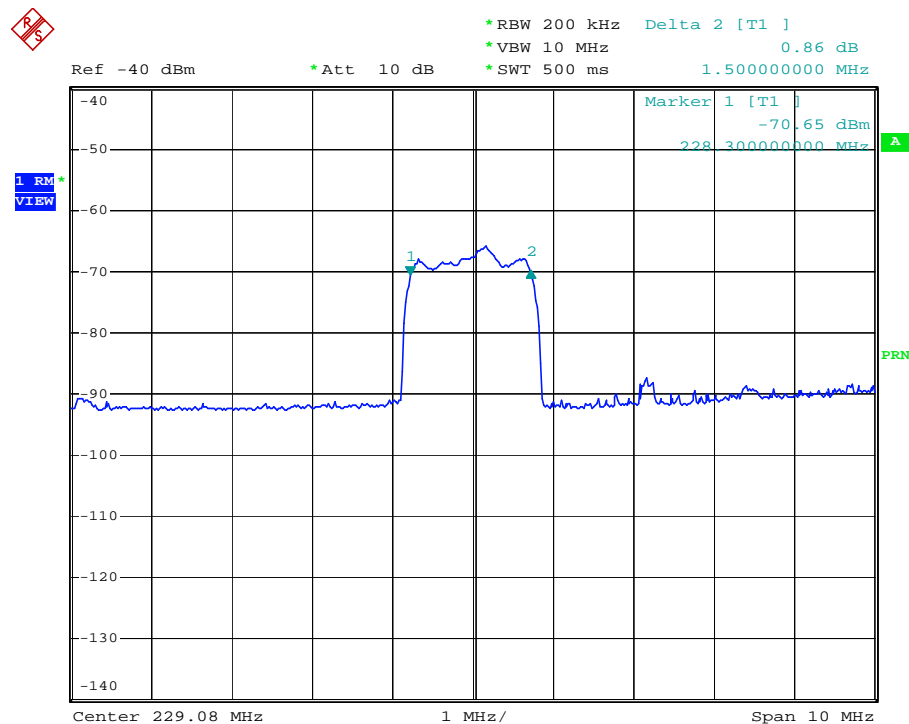
Anzumerken ist an dieser Stelle noch, dass sich die Leistungsangaben bei DVB-T-Sendern immer auf die mittlere (effektive) Leistung beziehen. Dies ist bei analogen TV-Sendern nicht der Fall. Dort gibt man die größte auftretende Leistung, nämlich die „Synchronspitzenleistung“ an, also die Leistung mit welcher der Zeilensynchronimpuls abgestrahlt wird. Üblicherweise wird in den einschlägigen Sendertabellen, z.B. in [WITT 04] noch der Gewinn der installierten Sendeantenne (bezogen auf den Halbwellendipol) berücksichtigt, so dass die dort angegebenen Leistungen (analog wie digital) der äquivalenten Strahlungsleistung der Anlage bezogen auf den Halbwellendipol (ERP) und nicht der Leistung der Senderendstufen entsprechen.

I.2.2 Digitaler Tonrundfunk (DAB)

Bei der Analyse des bereits seit einigen Jahren flächendeckend in Deutschland eingeführten digitalen Hörrundfunks (DAB, Digital Audio Broadcasting) kann an vielen Stellen auf die in vorherigen Kapitel erarbeiteten Eigenschaften von DVB-T-Signalen zurückgegriffen werden.

Auch bei DAB wird ein digitaler Bitstrom übertragen, der ein Multiplexsignal aus codierten Audiodaten (nach dem MUSICAM-Verfahren) und anderen Zusatzinformationen darstellt (MUSICAM = **M**asking pattern-adapted **U**niversal **S**ubband **I**ntegrated **C**oding **A**nd **M**ultiplexing). Ähnlich wie bei DVB-T werden auch bei DAB mehrere Programme in einen Datenstrom gemultiplext.

Auch bei DAB wird COFDM als Modulationsverfahren benutzt. Der Datenstrom eines Kanals (2,4 Mbit/s) wird auf viele Einzelträger aufgeteilt, die selbst jeweils DQPSK-moduliert werden (DQPSK = Differential QPSK). Es ergibt sich wiederum ein Spektrum ähnlich zu dem von DVB-T, nur mit einer geringeren Bandbreite von etwa 1,5 MHz (siehe Bild I.2.5).



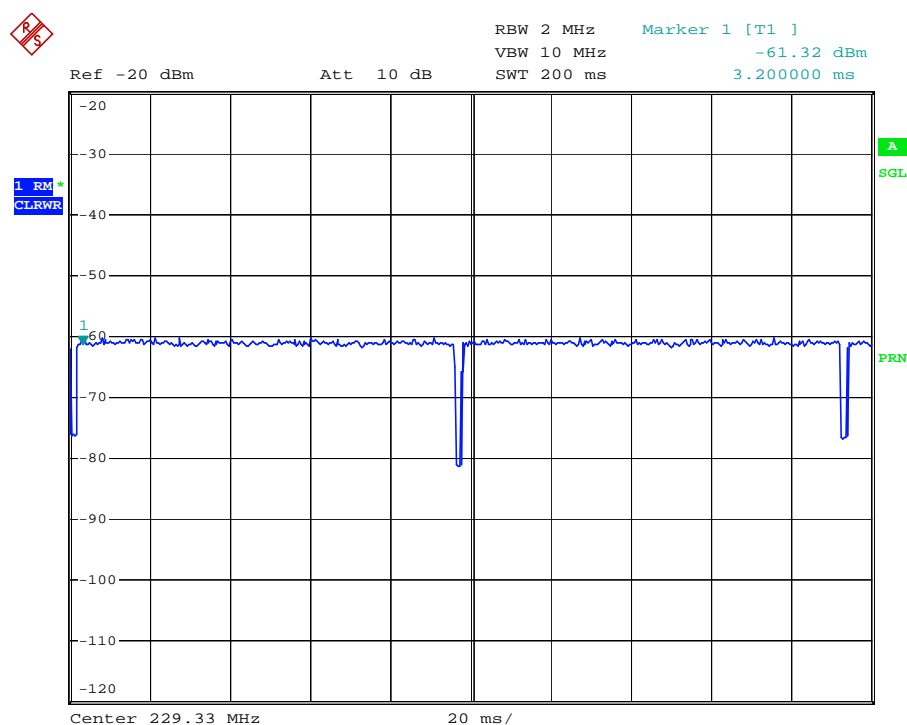
Date: 13.JAN.2005 16:18:05

Bild I.2.5: Real gemessenes Spektrum eines DAB-Senders

Für die terrestrische DAB-Versorgung sind zwei Betriebsarten (Modi) standardisiert: Mode 1 für die flächendeckende DAB-Versorgung und Mode 2 für lokale DAB-Netze beispielsweise in Ballungszentren. Es existiert zusätzlich noch der Mode 3, der allerdings ausschließlich für die DAB-Versorgung über Satellit spezifiziert ist und daher hier nicht näher betrachtet werden muss.

Im Zeitbereich betrachtet, ergibt sich daher bei DAB die gleiche Problematik, wie bei DVB-T: Auch das DAB-Signal hat einen rauschähnlichen Verlauf mit einem Crestfaktor von etwa 10 dB.

Ein Unterschied im Zeitverhalten zwischen DVB-T und DAB ist allerdings feststellbar: Während das DVB-T-Signal keine sichtbaren periodischen Anteile aufweist, wird bei DAB zum Zweck der Synchronisation am Anfang jedes Rahmens (d.h. alle 96 ms im Mode 1) die Sendeleistung für die Zeitdauer des „Nullzeichens“ (d.h. für 1 µs im Mode 1) reduziert (siehe Bild I.2.6).



Date: 13.JAN.2005 16:06:10

Bild I.2.6: DAB-Signal (Mode 1): Zeitlicher Verlauf der Sendeleistung

Auch bei DAB kann ein Gleichwellennetz realisiert werden, wobei die Flächenversorgung in Deutschland durch Signale im VHF-Band (hauptsächlich im Kanal 12), teilweise jedoch auch in den Kanälen 5 bis 8 bzw. im Kanal 11 sichergestellt wird. Für den Mode 2 werden in Deutschland Kanäle im Bereich um 1460 MHz (L-Band) bereitgestellt [WITT 04]. Die wesentlichen Unterschiede zwischen Mode 1 und Mode 2 sind in folgender Tabelle zu sehen [DAM 95].

Parameter	Mode 1	Mode 2
Frequenzbereich	< 375 MHz	< 1,5 GHz
Applikation	Flächenversorgung	Lokale Netze
Rahmendauer	96 ms	24 ms
Nullzeichen	1 ms	0,25 ms
Anzahl Einzelträger	1536	384

Tabelle I.2.1: DAB: Vergleich zwischen Mode 1 und 2

Innerhalb eines Kanals im VHF-Bereich (Bandbreite = 7 MHz) können also vier DAB-Blöcke mit jeweils 1,5 MHz Bandbreite untergebracht werden. Jeder Einzelblock ist in der Lage, mehrere Programme gleichzeitig zur Verfügung zu stellen (ein typisches „Ensemble“ beinhal-

tet 5 bis 9 Programme plus einiger Zusatzinformationen). Die Belegung eines Kanals ist beispielhaft in Bild I.2.7 dargestellt.

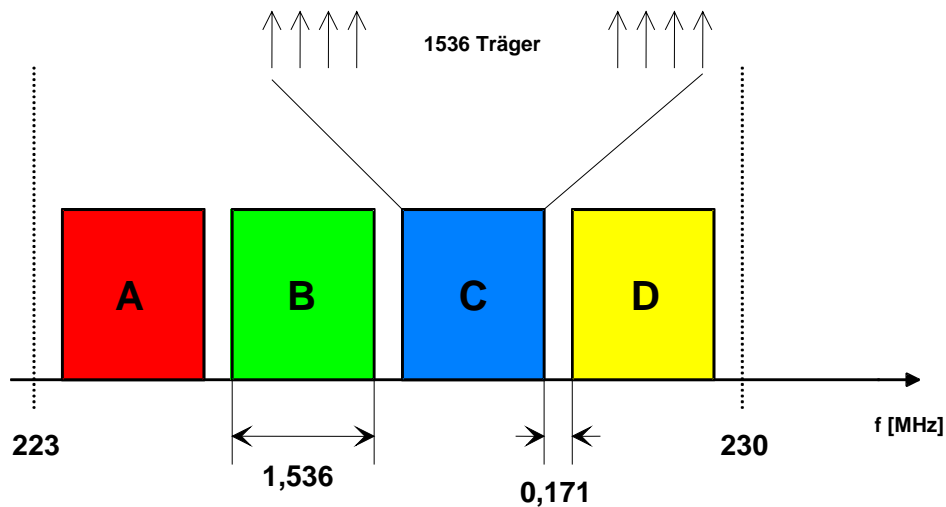


Bild I.2.7: Belegung des Kanals 12 mit vier DAB-Blöcken

I.2.3 Analoges Fernsehen

In Deutschland wird zur Übertragung analoger Fernsehprogramme der CCIR-Standard B (im VHF-Band) bzw. G (im UHF-Band) verwendet. Ein analoges TV-Signal stellt genau genommen die Summe dreier Einzelsignale dar:

- Das die Schwarzweißinformation (Luminanz) und die Zeilen- bzw. Bildsynchronisation tragende BAS-Signal (**B**ildsignal, **A**ustastsignal, **S**ynchronsignal).
- Das die Farbartinformation tragende Chrominanzsignal (**F**arbartsignal). Luminanz und Chrominanzsignal bilden zusammen das FBAS-Signal.
- Zusätzlich wird ein Signal übertragen, das die Toninformation des Programms enthält.

Diese drei Signale werden mit unterschiedlichen Modulationsverfahren auf unterschiedliche Träger aufmoduliert.

Das BAS Signal wird mittels der „Restseitenbandmodulation“ (eine spezielle Form der Amplitudenmodulation) auf den „Bildträger“ aufmoduliert. In der HF-Ebene ergibt sich dabei ein stark schwankender Zeitverlauf, bei dem die alle 64 μ s auftretenden Zeilensynchronimpulse den Sender auf 100 Prozent der Sendeleistung tasten, während die zwischen zwei Synchronimpulsen herrschende Momentanleistung stark vom Inhalt der zu übertragenden Bildzeile abhängt. Ein schwarzer Bildinhalt steuert den Sender auf 53 Prozent seiner maximalen Sendeleistung auf, während ein rein weißer Bildinhalt nur zu einer Sendeleistung von

einem Prozent des Maximalwertes führt. Der prinzipielle Verlauf des hochfrequenten Sendesignals (BAS-Signal) ist in Bild I.2.8 dargestellt.

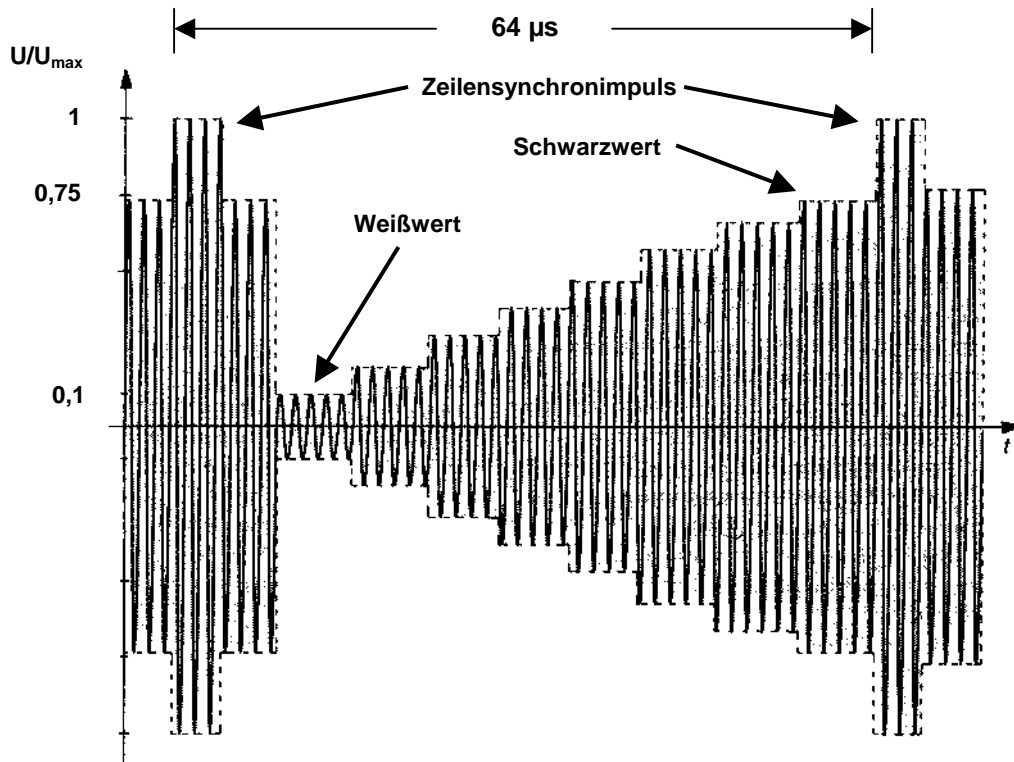


Bild I.2.8: Modulation des Bildträgers durch das BAS-Signal

Das hier dargestellte Signal einer Zeile würde, wenn es in jeder Zeile wiederholt wird, am Bildschirm acht senkrechte Balken erzeugen. Der Balken ganz links im Bild ist weiß, nach rechts werden die Balken immer dunkler, der rechte Balken ist schwarz.

Folgendes Bild zeigt zwei real gemessene Zeitverläufe der momentanen Sendeleistung eines TV-Senders (Kanal 21). Der linke Ausschnitt zeigt drei Zeilen mit unterschiedlichem Bildinhalt, während im rechten Ausschnitt neun Zeilen aus dem Bereich des nicht sichtbaren Fernsehbildes (vertikale Austastlücke) zu sehen sind: Die ersten drei Zeilen tragen speziell genormte Prüfsignale, mit denen eine automatische Überwachung des Übertragungskanals möglich wird. In den nächsten drei Zeilen werden mittels digitaler Modulation Zusatzdaten (Videotext) übertragen. Daran anschließend folgen Zeilen mit konstantem schwarzen Bildinhalt. Schön zu sehen ist auf dem rechten Ausschnitt, dass ein weißer Bildinhalt 20 dB weniger Momentanleistung bedeutet, als beim Zeilensynchronimpuls abgestrahlt wird.

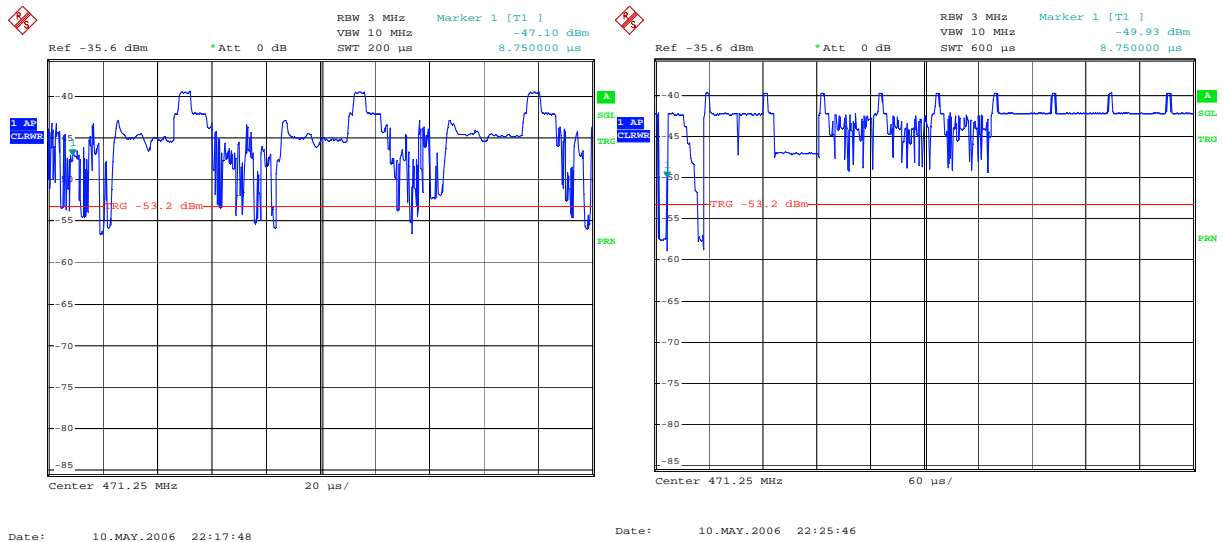


Bild I.2.9: Zwei real gemessene Zeitverläufe der Sendeleistung eines analogen TV-Bildsignals

Bei Übertragung eines rein schwarzen Bildinhaltes über längere Zeit ergibt sich somit die größtmögliche mittlere Sendeleistung. Sie liegt etwa 2,5 dB unter der Synchronspitzenleistung. Die geringste mittlere Sendeleistung ergibt sich bei Übertragung eines weißen Bildes. Da weiterhin die Zeilen- und Bildsynchronisationsimpulse übertragen werden müssen, liegt diese nicht 20 dB sondern nur etwa 7,5 dB unter der Synchronspitzenleistung. Nach [Weck 03] ergibt sich bei einem zufälligen Bildinhalt eine mittlere Sendeleistung, die etwa 4 dB unter der Synchronspitzenleistung liegt. Diese Grundtatsachen sind wiederum zu beachten, wenn es um die korrekte Messung der Exposition bei analogen TV-Sendern geht, insbesondere, wenn man die Vergleichbarkeit zu den digitalen Sendern gewährleisten will.

Die Bandbreite des modulierten BAS-Signals beträgt theoretisch etwa 6 MHz (5 MHz für das obere Seitenband plus etwa 1 MHz für den Rest des unteren Seitenbandes), wobei (im Unterschied zum Spektrum des DVB-T-Signals) ein starker Amplitudenabfall bei den Spektralanteilen mit zunehmender Entfernung zum Träger feststellbar ist. Offensichtlich wird der überwiegende Teil der Signalenergie von den Spektralanteilen nahe des Bildträgers transportiert (Bild I.2.10).

Das Farbartsignal (genau genommen handelt es sich um zwei Signale, was jedoch für die hier angestellten Betrachtungen unerheblich ist) wird auf den „Farbhilfsträger“ aufmoduliert (mittels der so genannten „Quadraturamplitudenmodulation“). Der Farbhilfsträger befindet sich in der HF-Ebene etwa 4,43 MHz oberhalb des Bildträgers (beim in Deutschland üblichen PAL-Verfahren). Gemäß CCIR-Standard ist der Farbhilfsträger gegenüber dem Bildträger um 18 dB abgesenkt. Spektral gesehen ergibt sich eine Vermischung des BAS- und des Farbspektrums (Bild I.2.10), was jedoch bei genauerer Analyse nicht der Fall ist, da es sich sowohl beim Luminanz- als auch beim Chrominanzsignal um ein Linienspektrum handelt. Die wesentlichen Spektralanteile des Luminanzsignals treten bei Vielfachen der Zeilenfrequenz f_h ($f_h = 15,625$ kHz) auf. Der Farbhilfsträger ist nun so gewählt, dass dessen Seitenlinien, die ebenfalls periodisch mit der Zeilenfrequenz auftreten, genau in die Lücke zwischen zwei Luminanzlinien fallen (Bild I.2.11).

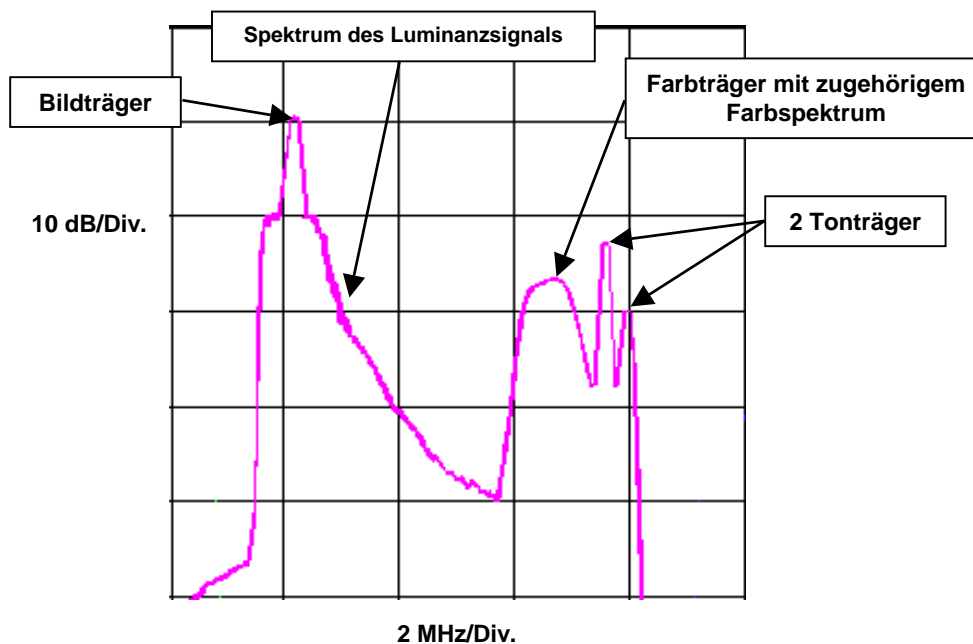


Bild I.2.10: Prinzipielles Aussehen des Spektrums eines analogen TV-Signals

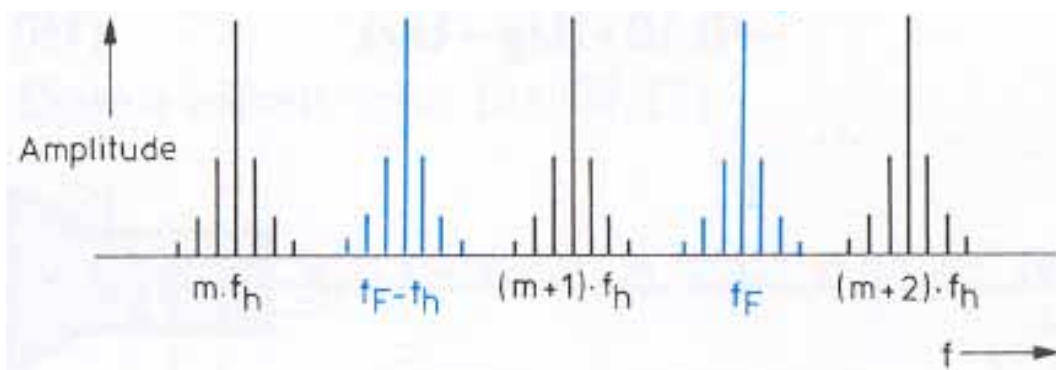


Bild I.2.11: Prinzip der spektralen Verschachtelung von Luminanz- und Chrominanzsignal (f_F = Farbhilfsträgerfrequenz; f_h = Zeilenfrequenz) [MÄU 98]

Wie aus Bild I.2.10 hervorgeht, ist der Anteil des Farbartsignals an der Gesamtleistung des analogen TV-Signals offensichtlich nicht allzu hoch, da im Vergleich zum Bildträger, der Farbhilfsträger deutlich abgeschwächt ist.

Bild I.2.12 zeigt das prinzipielle Aussehen des Zeitverlaufs einer Zeile eines FBAS-Signals. Wird dieses Signal permanent wiederholt, ergeben sich auf dem Bildschirm acht vertikale Balken mit den angegebenen Farben.

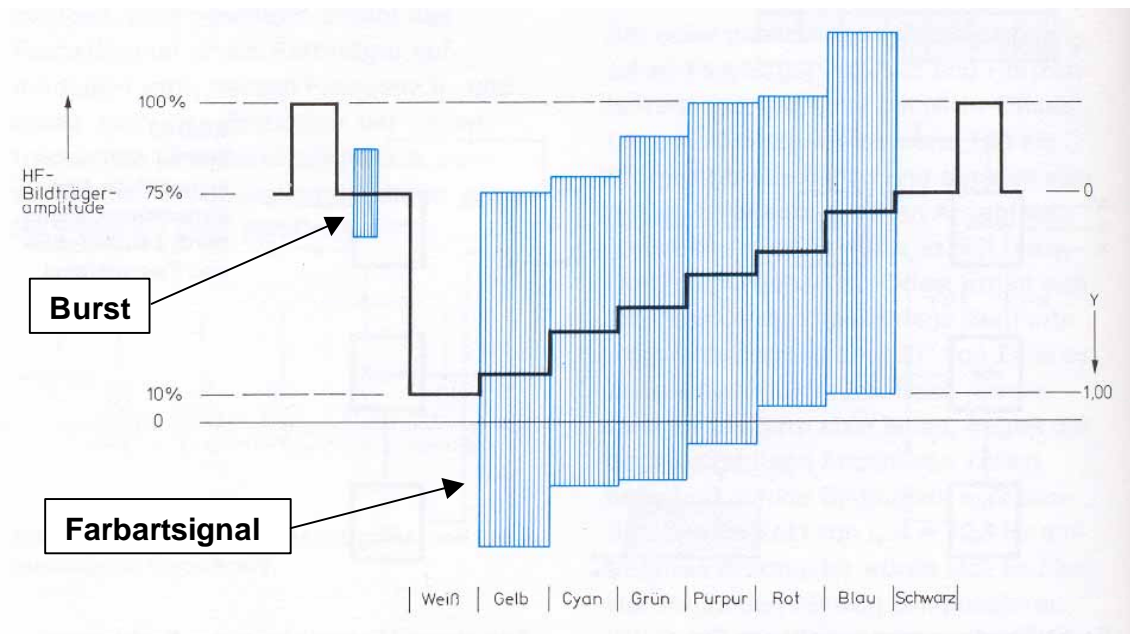


Bild I.2.12: Ideales FBAS-Signal zur Darstellung einer Farbbalkenfolge [MÄU 98]

Bild I.2.12 stellt ein Signal mit 100 Prozent Farbsättigung dar (Die Farbsättigung wird durch die Amplitude der Farbträgerschwingung, die dem BAS-Signal überlagert ist, festgelegt). Die Phase der Farbträgerschwingung trägt die Farbtoninformation. Als Referenzphase wird nach jedem Zeilensynchronimpuls auf der hinteren Schwarzschulter der so genannte „Burst“ übertragen.

In der Realität wird dieses Signal jedoch so nicht auftreten, da die großen Pegel des Farbsignals zum einen zu Amplitudenwerten größer als die Bildträgeramplitude, andererseits zu Unterschreitungen der 10-Prozent Bildträgeramplitude führen würden. Aus diesem Grund wird in der Realität die Amplitude des Farbsignals geeignet reduziert, so dass es bei typischen Bildsignalen nicht mehr zu nennenswerten Übermodulationen kommt [MÄU 98].

Das Tonsignal wird durch Frequenzmodulation eines „Tonträgers“, der 5,5 MHz oberhalb des zugehörigen Bildträgers liegt, übertragen. Der Frequenzhub beträgt maximal 50 kHz, so dass das modulierte Signal im Vergleich zum Bildsignal ein sehr schmales Spektrum besitzt (Bandbreite etwa 150 kHz). Da das Verhältnis von Tonträger zu Bildträgerleistung auf 1:20 (d.h. -13 dB) eingestellt ist, hat auch das Tonsignal nur einen relativ geringen Anteil an der gesamten Sendeleistung eines analogen TV-Signals. Wird ein Stereoprogramm oder ein Zweittonprogramm (z.B. mit fremdsprachigem Ton auf dem zweiten Kanal) ausgestrahlt, so wird die Zusatzinformation auf einen zweiten Tonträger aufmoduliert (FM), der 250 kHz oberhalb des ersten Tonträgers liegt. Dieser zweite Tonträger ist nochmals um 6 dB gegenüber dem ersten Träger in der Leistung abgesenkt (siehe Bild I.2.10).

Zum Vergleich ist in Bild I.2.13 das Spektrum eines analogen TV-Signals dargestellt, das als oberen und unteren Nachbarn jeweils ein digitales DVB-T-Signal besitzt, so dass die Unterschiede im Spektrum zwischen analogem und digitalem TV nochmals deutlich hervortreten.

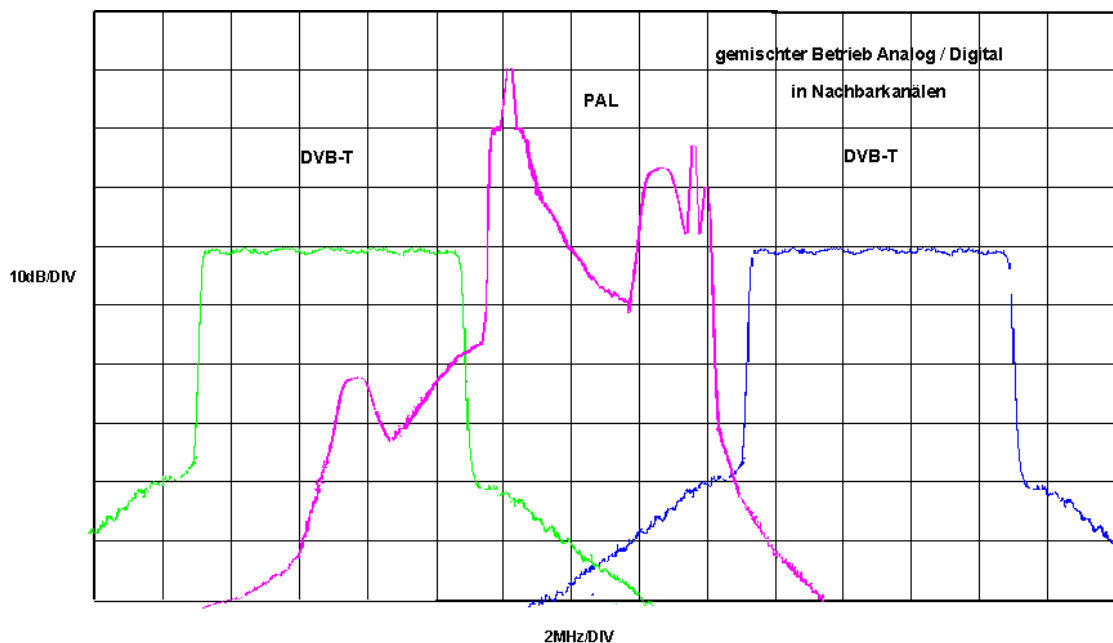


Bild I.2.13: Spektrum eines analogen TV-Signals, eingebettet zwischen zwei DVB-T-Spektren

I.2.4 Analoges UKW-Tonrundfunk

Tonrundfunkprogramme im UKW-Frequenzbereich (87,5 - 108 MHz) werden frequenzmoduliert übertragen. Dies gewährleistet eine im Vergleich zum AM-Rundfunk (LMK-Frequenzbereich: 150 kHz - 30 MHz) deutlich verbesserte Störfestigkeit bei gleichzeitig besserer Tonqualität und Stereoübertragung. Zusätzlich zum eigentlichen Tonsignal werden von UKW-Sendern in der Regel noch digitale Daten, wie Senderkennung oder Verkehrsfunkinformationen (RDS = Radio Data System) übertragen.

Da bei Frequenzmodulation (FM) die niederfrequente Information die momentane Frequenz des Trägersignals beeinflusst und nicht dessen Amplitude, ergibt sich ein Sendesignal mit konstanter Leistung, so dass für die Bestimmung der zeitgemittelten Immission keine Korrekturen wie beim analogen TV vorgenommen werden müssen.

In Bild I.2.14 ist das typische Spektrum eines UKW-Stereosendesignals dargestellt (Trägerfrequenz: 96 MHz; Frequenzhub: 75 kHz; moduliert mit einem Stereo-Rauschsignal nach ETS 300 384).

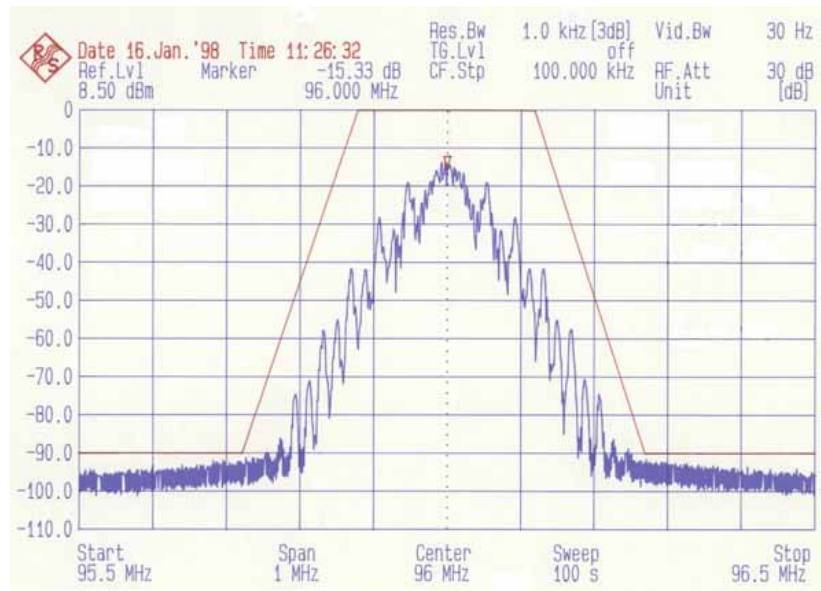


Bild I.2.14: Spektrum eines UKW-Stereosignals (Mit freundlicher Genehmigung der Firma Rohde & Schwarz)

Aus dem Spektrum erkennt man, dass UKW-Signale eine HF-Bandbreite von etwa 200 kHz besitzen. Dies ist kein Widerspruch zum Kanalraster im UKW-Bereich, das 100 kHz beträgt. Das Kanalraster sagt nur aus, dass die Mittenfrequenzen der einzelnen Sendestationen bei $87,5 \text{ MHz} + n \cdot 0,1 \text{ MHz}$ ($n = 1 \dots 204$) liegen. Die Tatsache, dass die Signalbandbreite größer ist als das Kanalraster bedeutet, dass die Sendefrequenzen in Deutschland derart geplant werden müssen, dass die einzelnen Programme in einer Region nie über direkt benachbarte Kanäle abgestrahlt werden dürfen, da es sonst zu spektraler Überlappung und damit zu Störungen beim Empfang der Programme kommen würde.

I.3 Berechnungsverfahren für den analogen und digitalen terrestrischen Rundfunk

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über existierende Berechnungsmethoden für elektromagnetische Feldstärken in den Frequenzbereichen vom analogen und digitalen terrestrischen Rundfunk. Die vorgestellten empirischen und semi-empirischen Berechnungsmodelle wurden vorwiegend zur Feldstärkeprognose bei der Planung der Flächenversorgung (vielfach auch als Coverage bezeichnet) entwickelt.

I.3.1 Grundlagen der Funkwellenausbreitung

I.3.1.1 Ausbreitungserscheinungen

Unter idealen Bedingungen breitet sich eine Funkwelle im Freiraum vom Sender gleichmäßig und geradlinig in alle Richtungen und ohne jede Beeinflussung durch die Umgebung aus. Dadurch verteilt sich die Sendeleistung mit zunehmendem Abstand vom Sender über eine immer größer werdende Kugeloberfläche. In diesem Zusammenhang wird von der sogenannten Übertragungs- oder Freiraumdämpfung zwischen Sender und Empfänger gesprochen. Durch die Umgebungseinflüsse in realen Funksystemen wird die Wellenausbreitung sehr viel komplizierter und resultiert in einer zusätzlichen Dämpfung. Die oben angesprochene Freiraumdämpfung kann demnach als eine Art Mindestdämpfung verstanden werden, die alleine durch den räumlichen Abstand zwischen dem Sender und dem Empfänger hervorgerufen wird. Nur in sehr seltenen Fällen sind auch Feldstärken über dem Freiraumwert möglich.

Die folgenden Umgebungseinflüsse können die Funkwellen auf folgende unterschiedliche Art und Weise ablenken bzw. abschwächen:

- *Abschattung* – tritt auf, wenn die Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger durch ein Hindernis unterbrochen wird. Bereiche im Funkschatten eines Hindernisses erreicht elektromagnetische Energie nur indirekt, z.B. über Reflexionen an anderen Hindernissen.
- *Beugung* – tritt auf, wenn die Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger durch eine scharfe Kante (z.B. von Hauswänden oder -dächern) unterbrochen wird. Eine einfallende Funkwelle wird um die Kante herum gebeugt, d.h. die Welle ändert ihre Richtung und erreicht Bereiche, welche ohne Kantenbeugung vom Hindernis abgeschattet sind.
- *Dämpfung* – tritt auf, wenn eine Funkwelle auf ein Hindernis trifft, welches für elektromagnetische Strahlung nur teilweise durchlässig ist. Die im Hindernis absorbierte Energie wird in Wärme umgewandelt. Trifft eine Funkwelle beispielsweise auf eine Wand, absorbiert und reflektiert sie Teile der einfallenden Energie. Die verbleibende Energie wird durch die Wand transmittiert. Auch Vegetation und Lebewesen absorbieren elektromagnetische Energie. Der Absorptionsgrad ist abhängig von den elektrischen Materialeigenschaften, der Dicke und dem inneren Aufbau des Hindernisses.
- *Reflexion* – tritt auf, wenn eine Funkwelle auf ein glattes Hindernis trifft, welches sehr groß gegenüber ihrer Wellenlänge ist (z.B. Häuserwände). Der Reflexionsgrad ist abhän-

gig von den elektrischen Materialeigenschaften, der Oberflächenrauigkeit des Hindernisses dem Einfallswinkel und der Polarisierung der Funkwelle.

- *Streuung* – tritt auf, wenn eine Funkwelle auf ein Hindernis trifft, welches kleiner als oder vergleichbar groß mit ihrer Wellenlänge ist. Wellen werden auch an rauen bzw. ungleichmäßigen Oberflächen gestreut. Die Natur des Phänomens ist ähnlich der Reflexion, mit der Ausnahme, dass sich die einfallende Funkwelle nach dem Auftreffen auf das Hindernis nicht in eine, sondern in viele Richtungen gestreut ausbreitet. Die Art und Weise dieser Streuung ist abhängig von den elektrischen Materialeigenschaften, der Oberflächenrauigkeit des Hindernisses und dem Einfallswinkel der Funkwelle.
- Regen oder Schnee, d.h. der Wassergehalt, können Materialeigenschaften und damit das Reflexions-, Beugungs- und Dämpfungsverhalten verändern.

I.3.1.2 Mehrwegeausbreitung

Die Ausbreitung von Funkwellen insbesondere in städtischen Gebieten ist ein komplexes Phänomen. Eine vom Sender ausgestrahlte Welle breitet sich über verschiedene Pfade in der natürlichen Umgebung aus und erreicht den Empfänger u.U. aus mehreren verschiedenen Richtungen; man spricht von Mehrwegeausbreitung. Am Empfänger addieren sich die einzelnen Beiträge der Teilwellen vektoriell (nach Amplitude, Phase und Polarisierung) zu einer Gesamtfeldstärke. Diese Überlagerung bewirkt eine Veränderlichkeit der resultierenden Feldstärke mit lokalen Maxima und Minima, die räumlich nur wenige Wellenlängen auseinander liegen.

Häufig verändern die die Mehrwegeausbreitung hervorrufenden Inhomogenitäten des Ausbreitungsmediums ihre Eigenschaften oder ihre räumliche Lage mit der Zeit. Die Kombination der Teilwellen und damit die resultierende Feldstärke am Beobachtungsort ist daher auch einer zeitlichen Änderung unterworfen.

Entlang der Ausbreitungspfade spielen neben der Freiraumausbreitung die bereits erwähnten Ausbreitungserscheinungen eine im Hinblick auf die Berechnung der Immission unterschiedlich bedeutsame Rolle:

- Beobachtungspunkt mit Sichtverbindung zum Sender (LOS)

Hier dominiert der Anteil der direkten Welle, d.h. die ungestörte Ausbreitung entlang der Sichtlinie zwischen Sender und Empfänger. Die Anteile der reflektierten oder gebeugten Wellen sind dagegen deutlich kleiner.

- Beobachtungspunkt ohne Sichtverbindung zum Sender (nLOS)

In diesem Bereich wird die Feldstärke durch die Überlagerung reflektierter und um die Hindernisse herum gebeugter Wellen ohne den Anteil der direkten Welle bestimmt.

I.3.1.3 Wellenausbreitung innerhalb von Gebäuden

Funkwellen werden durch Gebäudewände abhängig von den verwendeten Baumaterialien gedämpft. Die Transmissionsdämpfung ist auch vom Einfallswinkel der Wellen abhängig und kann zwischen streifendem und senkrechtem Einfall große Unterschiede aufweisen. Darüber hinaus dringen die Funkwellen durch vorhandene Öffnungen wie Fenster und Türen ins Gebäude ein.

Die Wellenausbreitung im Inneren des Gebäudes wird dann im wesentlichen durch Mehrfachreflexionen an Wänden, Böden, Decken usw. bestimmt und führt zu sehr starken örtlichen Schwankungen der Immission. Auch Personen oder die Inneneinrichtung beeinflussen die resultierenden Feldstärkewerte. Jegliche Umstellung von Mobiliar und sonstigen Gegenständen führt zu einer neuen Immissionslage; die lokalen Maxima werden verschoben und auch im Pegel verändert.

I.3.2 Wellenausbreitungsmodelle

Für die Planung von Funksystemen wurden Modelle zur Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens elektromagnetischer Wellen entwickelt. Deren Einsatzbereich reicht von der Planung der Flächenversorgung (vielfach als Coverage bezeichnet) über die Abschätzung der Frequenzabhängigkeit des Funkkanals durch Mehrwegeausbreitung bis hin zur Analyse der Interferenzen im Netz. Die Modelle treffen Aussagen

- über die mittlere elektrische Feldstärke, als auch
- über das zeitvariante und frequenzabhängige Verhalten des Funkkanals,

von denen jedoch nur die elektrische Feldstärke für die hier vorliegende Aufgabenstellung interessiert. Die Umgebung, in der die Ausbreitungsmodelle eingesetzt werden sollen, variiert sehr stark. Da die relevanten Einflussfaktoren in ausgedehnten ländlichen Gebieten, in urbanen (städtischen) Bereichen und bei der Ausbreitung innerhalb von Gebäuden (Inhaus, Indoor) erheblich differieren, ist es bislang noch nicht gelungen, ein allumfassendes Modell zu entwickeln. Abhängig vom Frequenzbereich, der Ausbreitungs Umgebung (Land, Stadt, Inhaus) und dem Verwendungszweck (Rundfunk, Mobilfunk, Richtfunk etc.) existiert daher eine Vielzahl verschiedener Modelle.

Für eine rechen-technische Erfassung der Immissionslage wäre es optimal, wenn es gelingen würde, die das Problem beschreibenden Maxwellschen Gleichungen unter Erfüllung aller Randbedingungen (z.B. Grenze Luft-Erdboden, Grenzflächen Luft-Hauswände) exakt zu lösen. Die hierfür notwendige feldtheoretische Lösung ist aber nur numerisch und mit immensm Aufwand möglich. Die Komplexität des Problems lässt sich unter gewissen vereinfachenden Voraussetzungen allerdings soweit reduzieren, dass eine feldtheoretische Lösung auch für die Praxis interessant wird. Ohne vereinfachende Annahmen ist eine feldtheoretische Lösung heute nur dann möglich, wenn das betrachtete Volumen bezogen auf die verwendete Wellenlänge recht klein ist.

Häufig genügt es jedoch bereits alle relevanten Übertragungswege zwischen Sender und Empfänger zu suchen und deren Zusammenwirken zu analysieren. Hierzu muss davon

ausgegangen werden, dass die Ausbreitungsmechanismen getrennt voneinander betrachtet werden können. Dies ist nur der Fall, sofern die Abmessungen aller Hindernisse deutlich größer als die Wellenlänge sind. Die Felder können dann in Analogie zur Optik in Form von Strahlen beschrieben werden. Auf diesen Annahmen basierende strahlenoptische Modelle lassen sich für die Ausbreitung in ländlichen und urbanen Gebieten sowie zur Ausbreitungsmodellierung innerhalb von Gebäuden einsetzen.

Vielen Anwendern sind aber auch die gegenüber feldtheoretischen Verfahren bereits deutlich einfacheren und erheblich schnelleren strahlenoptischen Modelle noch zu aufwändig, weshalb trotz der immensen Steigerung der verfügbaren Rechenleistung auch heute noch sogenannte empirische und semi-empirische Verfahren überwiegen. Rein empirische Verfahren basieren auf der statistischen Auswertung vieler Messungen und der Wahl geeigneter Näherungsfunktionen, um die Messwerte möglichst gut zu approximieren. Die Physik spielt bei diesen Verfahren keine bzw. wenn überhaupt eine untergeordnete Rolle. Semi-empirische Verfahren verwenden einfache theoretische Ansätze, wie z.B. die Abschätzung der Beugungsdämpfung durch Multiple-knife-edge-Modelle oder die Zweistrahtheorie in Kombination mit empirischen Korrekturen. Damit ist in begrenztem Maße eine Berücksichtigung der realen Ausbreitungs Umgebung, d.h. von Geländehöhe oder Bebauung, möglich.

I.3.2.1 Empirische und semi-empirische Modelle

Die Prognose der mittleren elektrischen Feldstärke und Funkfelddämpfung wird aufgrund von wenigen benötigten Eingabeparametern und einfacher Handhabung vielfach mit Hilfe empirischer Modelle durchgeführt. Mit einer Ausnahme sind diese Verfahren allerdings nicht in der Lage, die Beugungsdämpfung bei der Ausbreitung über Hindernisse hinweg abzuschätzen. Daher sind sie nur für eine mehr oder weniger flache Umgebung zu gebrauchen. Zur Einbeziehung der Beugung lassen sich diese empirischen Modelle z.B. mit den Multiple-knife-edge-Modellen von Epstein u. Peterson [EPS 53], Deygout [DEY 66, DEY 91] oder Giovanelli [GIO 84] koppeln. Durch die Verschmelzung von deterministischen Ansätzen, durch welche die Gelände- oder Gebäudehöhen in die Berechnung einbezogen werden, und empirischer Methoden, die anhand umfangreicher Messungen gewonnen wurden, ergeben sich *semi-empirische* Verfahren.

Der fundamentale Ausbreitungsmechanismus ist die reine Freiraumausbreitung, d.h. eine absolut ungestörte Übertragung zwischen einer isotropen Sende- und einer isotropen Empfangsantenne. Die Empfangsfeldstärke nimmt hier linear mit dem Abstand ab. Da eine reine Freiraumausbreitung in der Realität nicht auftritt, wurde ein sehr einfaches Ausbreitungsmodell, die sog. Zweistrahtheorie, entwickelt. Für Sende- und Empfangsantenne über einer ideal ebenen Grenzfläche überlagern sich die Anteile einer direkten und einer bodenreflektierten Teilwelle.

I.3.2.1.1 Okumura-Hata-Modell

Das Okumura-Hata-Modell ist ein rein empirisches Berechnungsverfahren, das auf der Auswertung umfangreicher Messungen basiert. Die Grundlage hierzu legte Okumura für den Frequenzbereich von 200 MHz bis 2 GHz [OKU 68].

Für diese Messwerte wurden von Hata [HAT 80] für den Teilfrequenzbereich bis 1500 MHz Näherungsgleichungen zur Berechnung der isotropen Funkfelddämpfung angegeben. Die Näherungsgleichungen benötigen lediglich folgende vier Parameter: die Frequenz, die Entfernung und die Antennenhöhen. Das Okumura-Hata-Modell darf dabei allerdings nur innerhalb der folgenden Grenzen angewendet werden:

Frequenz	150 .. 1500 MHz
Entfernung	1 .. 20 km
Höhe der Sendeantenne	30 .. 200 m
Höhe der Empfangsantenne	1 ..10 m

Tabelle I.3.1 Gültigkeitsbereich des Okumura-Hata-Modells

Ausgegangen wird beim Okumura-Hata-Modell von einer Basisdämpfung für urbanes Gebiet über quasi-ebenem Gelände. Zur Berücksichtigung der Höhe der Empfangsantenne wird ein Korrekturterm abhängig von der Art der Umgebung (Kleinstadt oder Großstadt) gewählt. Zusätzlich zur Geländeklasse urban kennt das Okumura-Hata-Modell die Klassen suburban (z.B. Dorf) und ländlich offen (z.B. Wiese oder Acker). Für diese Klassen ergibt sich die isotrope Funkfelddämpfung aus der Basisdämpfung durch Hinzufügen von konstanten und frequenzabhängigen Korrekturen.

Die gegenüber der Freiraumausbreitung und Zweistahltheorie im Mittel erhöhten Dämpfungswerte resultieren daraus, dass stets Hindernisse die Ausbreitung behindern, was zusätzliche Verluste hervorruft.

I.3.2.1.2 Die Modelle ITU-R P.370 und ITU-R P.1546

Die ITU-R (International Telecommunications Union – Radio Communications Sector) stellt je nach Frequenzbereich Methoden zur Verfügung, mit denen eine Planung für die Flächenversorgung durchgeführt werden kann.

So ist die Empfehlung ITU-R P.370 [ITU 370] eine allgemeine Vorhersagemethode für elektrische Feldstärken in Form von Ausbreitungskurven. Diese geben die Feldstärkewerte als eine Funktion von verschiedenen Parametern wieder. So unterscheiden sich die Kurven zum Beispiel, ob eine Ausbreitung über Land oder Wasser vorliegt.

Die Ausbreitungskurven wurden durch eine statistische Auswertung einer großen Anzahl von Messungen ermittelt, die hauptsächlich in gemäßigten Temperaturzonen und Landschaften vorgenommen wurde, wie sie in Europa und Nordamerika vorherrschen. Sie sind für Entfernungen zwischen 10 km und 1000 km gültig [TREP 4, RTCG 99].

Die Ausbreitungskurven repräsentieren hierbei Feldstärkewerte mit einer Ortswahrscheinlichkeit von 50 % innerhalb eines Gebietes von ungefähr 100 m x 100 m, was bedeutet, dass der Feldstärkewert an der Hälfte der Punkte innerhalb dieses Areal erreicht wird. Darüber hinaus existieren die Ausbreitungskurven auch für unterschiedliche Zeitwahrscheinlichkeiten, die analog zu den Ortswahrscheinlichkeiten zu verstehen sind. Sie korrespondieren zu unterschiedlichen Sendeantennenhöhen und Empfangsantennenhöhen von 10 m. Die Unterscheidung verschiedener Zeit- und auch Ortswahrscheinlichkeiten berücksichtigt, dass der Pegel sowohl zeitlich, als auch örtlich schwankt.

In der multilateralen Vereinbarung von Chester [CEPT 97] wird diese Methode zur Prognose der Flächenversorgung bei terrestrischem Fernsehen vorgeschlagen.

Die neue momentan als Punkt zu Fläche empfohlene ITU-R P.1546 [ITU 1546], die eine Verschmelzung der ITU-R P.370 und ITU-R P.529 (Ausbreitungskurven für mobile Services) darstellt, vergrößert den Frequenzbereich bis 3000 MHz. Darüber hinaus werden auch von 10 m verschiedene Empfangsantennenhöhen integriert. Diese fließen als Korrekturfaktoren in Abhängigkeit der direkten Umgebung (ländlich, vorstädtisch, städtisch usw.) in den aus den Ausbreitungskurven bestimmten Wert ein [NES 00]. Darüber hinaus kann die Beschaffenheit der Landfläche in der betrachteten Region durch den sogenannten „Clearance Angle“ (Freiwinkel) berücksichtigt werden [vgl. Bild I.3.1].

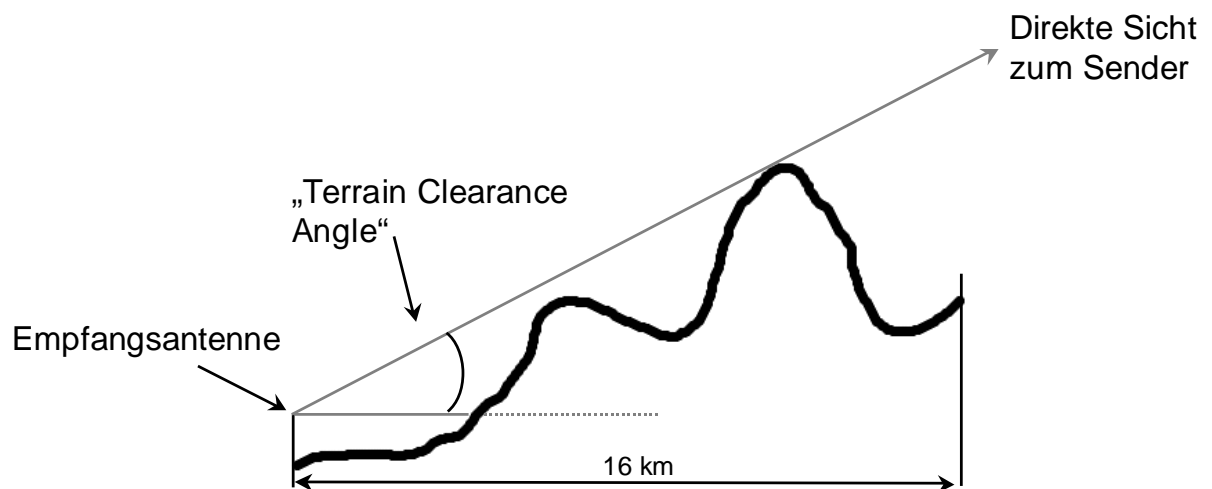


Bild I.3.1: Bedeutung „Clearance Angle“ (Freiwinkel)

Der Vorteil der oben beschriebenen Methoden ist die einfache Handhabung und der geringe Rechenzeitbedarf, da keine direkte Ausbreitungsberechnung durchgeführt wird, sondern im wesentlichen Tabellenwerte ausgelesen werden. Darüber hinaus kann die Feldstärkeverteilung in einem räumlich großen Gebiet prognostiziert werden.

1.3.2.1.3 Einfache Beugungsmodelle

Da die Beugung elektromagnetischer Wellen an Hindernissen (Topographie, Bebauung) ein wichtiger Ausbreitungsmechanismus ist, wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl einfacher Verfahren zur Berechnung der Beugungsdämpfung entwickelt. Nahezu alle basieren auf der Knife-edge-Beugung. Bei diesen einfachen Verfahren zur Berechnung der Beugungsdämpfung wird das Pfadprofil, d.h. der Verlauf der Gebäudehöhen zwischen Sender und Empfänger, durch eine endliche Zahl von Ersatzhindernissen ersetzt (siehe Bild 1.3.2), und danach für diese Anordnung der Ersatzhindernisse die Beugungsdämpfung ermittelt.

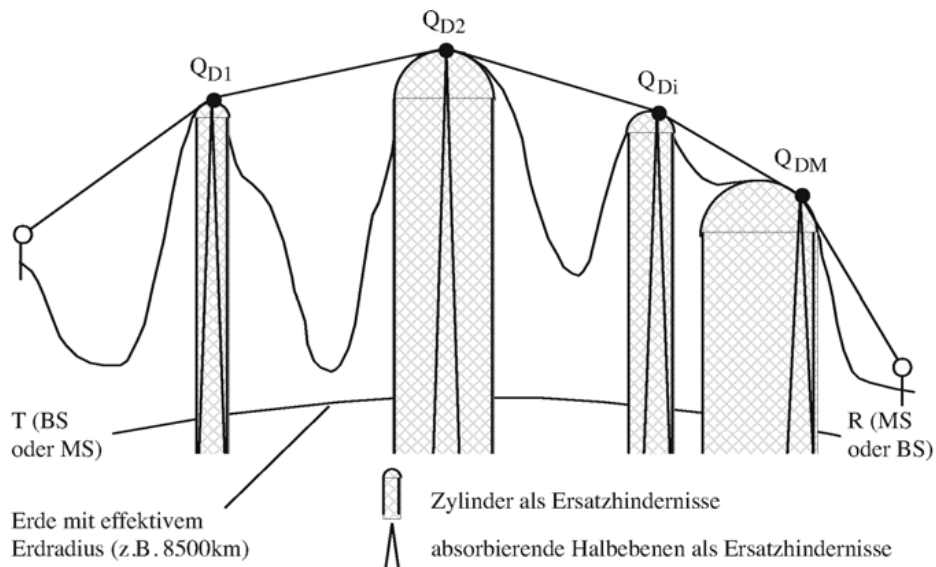


Bild 1.3.2 Geländeprofil zwischen Sender und Empfänger und Ersatzhindernisse (Halbebenen für Multiple-knife-edge-Modelle, Zylinder für Cascaded-cylinder-Modelle)

Nachfolgend wird das prinzipielle Vorgehen für die vielfach verwendeten Knife-edge-Modelle nach Epstein u. Peterson [EPS 53], Deygout [DEY 66], [DEY 91] und Giovaneli [GIO 84] erläutert. Die Bedeutung für den Einsatz von Halbebenen als Ersatzhindernisse ist in folgendem Bild veranschaulicht.

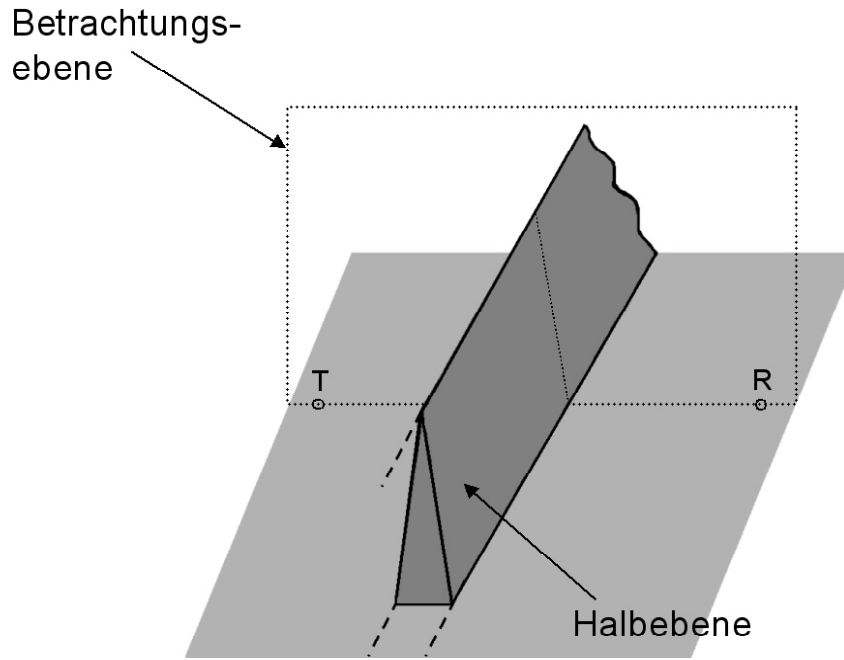


Bild I.3.3 Bedeutung einer Halbebene als Ersatzhindernis

Die benötigten Geometrieparameter für die oben genannten Modelle sind in Bild I.3.4 für die Beugung an zwei Halbebenen skizziert. Mit „s“ sind hierbei jeweils die Ausbreitungswege vom Sender T zum Empfänger R gekennzeichnet.

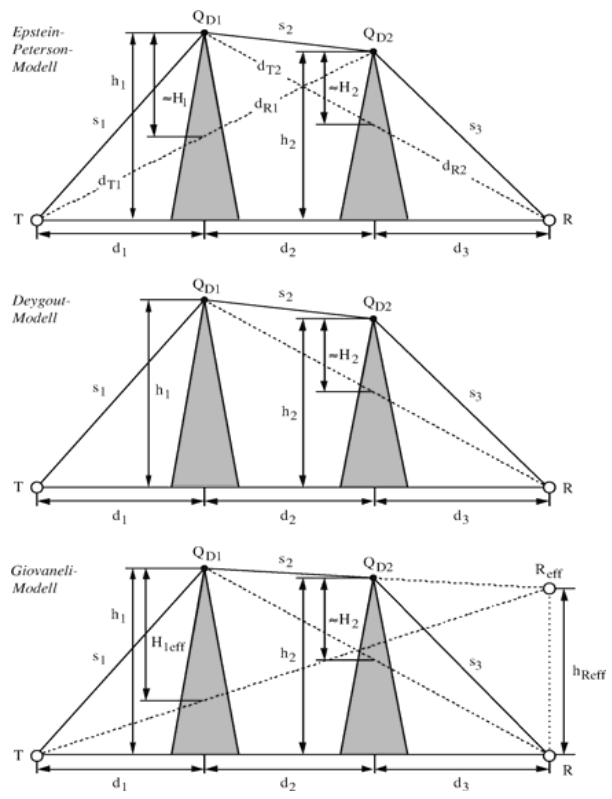


Bild I.3.4 Geometrie für die Multiple-knife-edge-Modelle nach Epstein u. Peterson [EPS 53], Deygout [DEY 66], [DEY 91] und Giovaneli [GIO 84] am Beispiel der Beugung an zwei absorbierenden Halbebenen

1.3.2.1.4 Epstein-Peterson-Modell

Das Modell nach Epstein u. Peterson [EPS 53] ersetzt den gesamten Ausbreitungspfad vom Sender T zum Empfänger R nach Bild I.3.4 ($s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3$) durch eine Sequenz von Teilstrecken (hier: $TQ_{D_1}Q_{D_2}$ bzw. $Q_{D_1}Q_{D_2}R$), welche jeweils eine einzelne Halbebene enthalten. Der Gesamtübertragungsfaktor ergibt sich für dieses Modell einfach aus dem Produkt der einzelnen Übertragungsfaktoren. In diesen sind die weiteren Größen (wie z.B. die Abstände d_{T_1} , d_{R_1} , d_{T_2} , d_{R_2} usw.) berücksichtigt. Das Epstein-Peterson-Modell verwendet keinerlei Korrektur zur Reduzierung der vielfach sehr großen Fehler. Zur Darstellung wird meist die Beugungsdämpfung D_B , d.h. das Betragsverhältnis der Feldstärke ohne und mit Hindernissen, verwendet. Bei der Berechnung wird davon ausgegangen, dass die horizontalen Entfernungen sehr viel größer sind als die Höhen der Halbebenen. Nebenhindernisse zwischen den Haupthindernissen, d.h. Hindernisse unterhalb der jeweiligen Verbindungslinie zwischen den Haupthindernissen, dem Sender und dem Empfänger, werden im Originalmodell von Epstein u. Peterson nicht explizit berücksichtigt.

1.3.2.1.5 Deygout-Modell

Das Modell nach Deygout [DEY 66], [DEY 91] ist rekursiv. Zunächst wird das Haupthindernis (in Bild I.3.4 ist dies Q_{D_1}) und die zugehörige Beugungsdämpfung für die Übertragungstrecke $TQ_{D_1}R$ ermittelt. Das Haupthindernis ist dabei jenes, für das bei Berücksichtigung nur einer einzigen Halbebene zwischen Sender und Empfänger die größte Beugungsdämpfung resultieren würde. Zur Beugungsdämpfung für das Haupthindernis wird die Beugungsdämpfung für die weiteren Teilstrecken TQ_{D_1} und $Q_{D_1}R$ hinzu addiert. Für TQ_{D_1} besteht nach Bild I.3.4 Sichtverbindung, so dass die Zusatzdämpfung für diese Teilstrecke verschwindet. Auf der zweiten Teilstrecke $Q_{D_1}R$ muss hingegen noch eine zusätzliche Dämpfung durch die zweite Halbebene berücksichtigt werden.

Dieses Vorgehen würde die Beugungsdämpfung erheblich überschätzen, weshalb Korrekturterme für Hindernisse auf Teilstrecken abgezogen werden. Das Modell von Deygout lässt sich schrittweise in mehreren Ebenen anwenden, wobei in der Regel vier Ebenen völlig ausreichen.

1.3.2.1.6 Giovanelli-Modell

Das Modell nach Giovanelli [GIO 84] ist wie das Deygout-Modell rekursiv, verwendet jedoch eine davon abweichende Methode, um das Überschätzen der Beugungsdämpfung zu korrigieren. Für einen Ausbreitungspfad mit zwei Halbebenen nach Bild I.3.4 wird zunächst wiederum die Auswirkung des Haupthindernisses ermittelt. Allerdings wird nicht der wirkliche Ort des Empfängers, sondern ein davon abweichender Ort (in Bild I.3.4 R_{eff}) verwendet. Dieser ergibt sich durch die Verlängerung der Strecke Q_{D_1} und Q_{D_2} . Zur Ermittlung der Beugungsdämpfung wird daher auch die effektive Höhe des Haupthindernisses eingesetzt, die aus der zweifachen Anwendung des Strahlensatzes folgt. Die gesamte Beugungsdämpfung ergibt sich wiederum aus der Addition der Teilpfade.

Die empirische Korrektur ist nicht wie beim Deygout-Modell in einem additiven (negativen) Dämpfungsterm, sondern in der veränderten effektiven Höhe enthalten. Für die Beugung an

zwei Halbebenen liegt die mit dem Giovaneli-Modell prognostizierte Dämpfung in der Regel zwischen den Werten des Epstein-Peterson-Modells und des Deygout-Modells ohne Berücksichtigung des Korrekturterms.

I.3.2.2 Analytische Modelle

Empirische oder semi-empirische Modelle berücksichtigen nicht die wirkliche Lage, Orientierung, Form und Größe der Gebäude und die Materialeigenschaften der Wände. Zahlreiche Arbeiten der letzten Jahre [CIC 93, CIC 94, LEV 92, MAT 95, RIZ 97, RUS 93, VAN 93, VAN 93a, VAN 93b, VAN 94] hatten daher das Ziel, Modelle zu entwickeln, die Ausbreitungsmechanismen mittels mathematischer Methoden zu beschreiben, die gut für die Berechnung mit Computern geeignet sind und bei denen möglichst die gesamte Information zur Bebauung detailliert berücksichtigt wird. In der Regel wird zusätzlich zu diesen Bebauungsdaten auch die Geländehöhe benötigt, denen die Gebäudehöhe überlagert werden muss. Dies geht aber naturgemäß einher mit einem entsprechend steigendem Rechenaufwand. Die Güte der Modellierung hängt allerdings von der Qualität der zugrunde liegenden digitalen Datenbanken ab. Diese Datenbanken müssen sowohl Höhendaten (Topographie), als auch Informationen über Bebauung (Gebäudegrundrisse, Gebäudehöhen, Dachformen, Materialparameter) und Bewuchs (Morphographie) in einer Auflösung und Genauigkeit zur Verfügung stellen, die gut genug ist, eine detaillierte Modellierung zu gewährleisten.

Die analytischen Modellen werden grundsätzlich in strahlenoptische und feldtheoretische Modelle unterschieden. Für beide Klassen gilt, dass für steigende Genauigkeitsansprüche an die Berechnung die Modellierungstiefe und damit der benötigte Rechenaufwand ansteigt.

I.3.2.2.1 Strahlenoptische Ausbreitungsmodelle

Strahlenoptische Ausbreitungsmodelle ermöglichen genaue Berechnungen bei vertretbarem Rechenzeitaufwand (je nach geforderter Auflösung/Genauigkeit). Darüber hinaus ist durch den physikalisch theoretischen Ansatz ein breites Anwendungsgebiet bezüglich der Frequenz (Hochfrequenzbereich) und der Ausbreitungs Umgebung gegeben [DOT 00].

Eine typische Ausbreitungssituation, die aus einer Kombination aller wichtigen Ausbreitungsmechanismen (vgl. Abschnitt I.3.1.1) besteht, ist in Bild I.3.5 zu sehen.

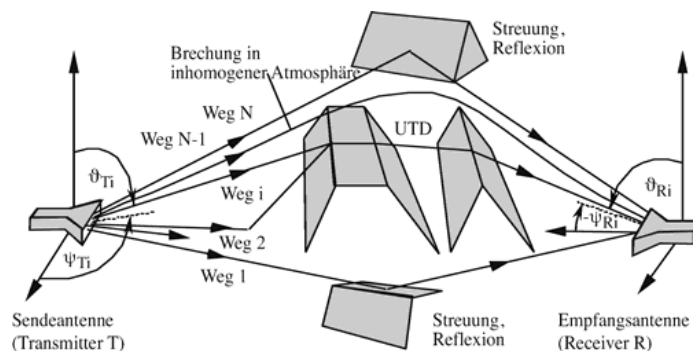


Bild I.3.5: Mehrwegeausbreitung und Deutung einzelner Übertragungswege als Strahlenbahnen

Hieraus sind unmittelbar die wesentlichen Schritte innerhalb eines Modells, bei dem die einzelnen Übertragungswege unabhängig voneinander als Strahlen gedeutet werden, ersichtlich.

- Suche aller relevanten Ausbreitungspfade unter Berücksichtigung der Bebauung und der Geländehöhe (Strahlensuche),
- Berechnung des Übertragungsverhaltens aller Pfade, und
- Verwendung der Parameter aller Ausbreitungspfade zur Berechnung der Empfangsleistung.

Bei der Wechselwirkung des Strahls mit einem Hindernis wird die Richtung, die Amplitude, die Phase und/oder die Polarisation der Welle verändert. Eventuell muss der einzelne Strahl auch in mehrere aufgespaltet werden. Dies ist für die Reflexion/Transmission unmittelbar ersichtlich. Bei der Beugung muss ein eintreffender Strahl im Prinzip sogar in unendlich viele Strahlen aufgespaltet werden, da alle möglichen Beugungsrichtungen lediglich dadurch charakterisiert sind, dass sie den Beugungskegel bilden. In der Praxis wird dieser Beugungskegel aus einer endlichen Anzahl von Strahlen angenähert, die anschließend weiter verfolgt werden. Letztendlich wird nur der Strahl berücksichtigt, der auch am Empfängerort eintrifft.

Da die neben der Freiraumausbreitung dominierenden Ausbreitungsmechanismen (Dämpfung, Streuung, Reflexion, Beugung) durch Objekte mit gegenüber den benutzten Wellenlängen großen geometrischen Abmessungen hervorgerufen werden, werden Methoden zur Vereinfachung der Ausbreitungsberechnung ausgenutzt (asymptotische Hochfrequenzmethoden [LUE 82]). Die wichtigsten Methoden sind hier:

- Geometrische Beugungstheorie, Geometrical Theory of Diffraction (GTD), bzw. Verallgemeinerte geometrische Beugungstheorie, Uniform Theory of Diffraction (UTD),
- Physikalische Optik, Physical Optics (PO),
- Physical Theory of Diffraction (PTD) bzw. Method of Equivalent Currents (MEC).

Mit der Kombination von GO mit GTD/UTD kann die Auswirkung vieler verschiedener Objekte auf die Wellenausbreitung auf der gleichen theoretischen Basis, der Strahlenoptik, beschrieben werden und ist wohl etabliert.

Allerdings müsste für die genaue Bestimmung der Feldstärke angenommen werden können, dass das Verhalten aller Ausbreitungspfade insbesondere der Phasen aller Teilwellen exakt bekannt ist. Bereits Ungenauigkeiten der Datenbanken in der Größenordnung einer Wellenlänge sowie die zeitlichen Änderungen in der Ausbreitungs Umgebung verursachen erheblichen Schwankungen der Phasen mit der Folge, dass Feldstärkeunterschiede zwischen Simulation und den tatsächlichen Verhältnissen entstehen. Dies kann insofern umgangen werden, dass man die variierenden Phasen vernachlässigt und lediglich die Leistungen der

einzelnen Mehrwegesignale (inkohärente Überlagerung) addiert. Dies entspricht einem maximal zu erreichenden Prognosewert.

Die Rechenzeiten werden vornehmlich durch die Strahlsuche bestimmt und können bei Berücksichtigung von Interaktionen höherer Ordnung schnell sehr lang werden.

Hierbei ist zu beachten, dass die Strahlensuche zwischen Sender und Empfänger geschieht. Es handelt sich demnach um eine Punkt zu Punkt Betrachtung. Berechnungsvorhersagen für den terrestrischen Rundfunk haben im Gegensatz dazu eine Punkt zu Fläche Betrachtung als Basis.

1.3.2.2 Feldtheoretische Modellierung

Die genauesten Ergebnisse einer Berechnung ließen sich mit feldtheoretischen Modellen erzielen.

Die direkte numerische Lösung der Maxwell'schen Gleichungen mit Hilfe von Integral- oder Differentialgleichungssystemen wird bei Strukturen mit Abmessungen von *wenigen* Wellenlängen erfolgreich eingesetzt (elektronische Bauteile, Antennen). Allerdings ist der Aufwand hierfür erheblich. Eine Verwendung für die Berechnungen der Wellenausbreitung in Gebäuden oder gar in Städten benötigt immens viel Rechenleistung und Speicherplatz.

Da der Raum für die Berechnungen in dieser Studie nicht die unmittelbare Umgebung der Sendeanlagen, sondern im Bezug zur Wellenlänge ein sehr großes Versorgungsgebiet darstellt, werden die feldtheoretischen Methoden an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Ein Überblick über Feldtheoretische Modellierungsmethoden wie zum Beispiel die „Finite Elemente Methode (FEM)“, die „Finite Differenzen Methode (FDM)“, die Finiten Differenzen im Zeitbereich (Finite Difference Time Domain, FDTD) oder die Integralgleichungsmethode (Integral Equations, IE) ist in [BOR 02] zu finden.

1.3.3 Fazit

Für alle Modelle, die zum Zwecke der Rundfunknetzplanung entwickelt wurden, gilt gemeinhin eine Vorhersagegenauigkeit von 6 dB als ausreichend [COS 99]. Darüber hinaus liefern diese Modelle in der Regel Vorhersagen über Mittelwerte innerhalb eines bestimmten Gebietes, da die feinräumige Struktur des Feldes für die Funknetzplanung nicht von Bedeutung ist. D.h. das Simulationsergebnis entspricht einer Prognose für den über eine gewisse Zeit und/oder einen gewissen Raumbereich gemittelten Wert. Lokal, sowohl zeitlich als auch räumlich, kann die prognostizierte elektrische Feldstärke größer oder auch kleiner als dieser Mittelwert sein.

Die Genauigkeit von empirischen und semi-empirischen Verfahren ist in diesem Zusammenhang also begrenzt. Eine Verbesserung ist unter Einbezug der terrestrischen Umgebung möglich. Die für die Rundfunkplanung eingesetzten empirischen und semi-empirischen Modelle stellen eine Berechnungsmethode dar, die als Ausgangspunkt die Sendeantenne

hat und eine Feldstärkeprognose für eine Fläche liefert. Die Berechnung benötigt wenige Eingabeparameter und wenig Rechenleistung. Laut [PAU 84], [NES 96] wird die Berechnung mit dem sogenannten „Clearance Angle“ als eine gute Vorhersagemethode angesehen.

Dem gegenüber ist die Vorhersagegenauigkeit der analytischen Verfahren in erster Linie durch die Qualität der Eingabedaten wie Geländedaten (Digitales Höhenmodell), Gebäudeumrisse und Höhe, Technische Anlagendaten, Materialparameter usw. bestimmt (vgl. [BOR 02]).

Strahlenoptische Verfahren sind in erster Linie als Punkt zu Punkt Berechnungsmethoden zu verstehen. Zwischen dem Sender und einem Empfänger werden alle relevanten Ausbreitungspfade bestimmt und die daraus resultierende Empfangsfeldstärke bestimmt.

Eine Berechnung des Feldstärkeverlaufes in einem großen Gebiet wie zum Beispiel in dem gesamten Versorgungsgebiet eines Fernsehsenders zieht auf Grund der hohen Anzahl von hierfür benötigten Empfangspunkten einen großen Rechenaufwand nach sich. Um die gewünschten präzisen Resultate zu erhalten, müssen die Daten für die Modellierung mit großer Sorgfalt erfasst und eingelesen werden. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass in der Region alle Gebäude modelliert werden müssen.

Als Beispiel sei hier erwähnt, dass in der Katasterdatenbank der Landesvermessungsanstalt allein 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>).

I.4 Messverfahren für den analogen und digitalen terrestrischen Rundfunk

I.4.1 Einleitung

I.4.1.1 Grundsätzliche Einteilung von Messaufgabenstellungen

Messaufgabenstellungen zur Beurteilung der Exposition durch analoge und digitale terrestrische Rundfunkanlagen in allgemein zugänglichen Bereichen lassen sich prinzipiell in verschiedene Klassen einteilen:

1. Messungen zur Überprüfung der Einhaltung gesetzlicher Regularien

Solche Zulassungsmessungen können durch nationale Gesetzgeber gefordert sein oder werden zur Schaffung einer Basis für die Risikokommunikation benötigt. Grundlage für die Zulassungsmessungen sind die jeweiligen nationalen Grenzwerte. Hierbei wird ein worst case Ansatz verfolgt, d.h. die maximale Expositionssituation wird untersucht. Der Bereich der Messungen erstreckt sich hauptsächlich auf das unmittelbare Umfeld der Anlage, z.B. wird der festgelegte Sicherheitsabstand messtechnisch überprüft.

2. Messungen auf Anfrage / nach Bedarf

Initiatoren für diese Messungen sind die allgemeine Öffentlichkeit, Bürgerinitiativen, Behörden oder Netzbetreiber. Hierbei wird die Messung an einer definierten Örtlichkeit verlangt, die aber oft nicht den am stärksten exponierten Bereich darstellt. In Abhängigkeit vom Messauftrag kann sowohl die Messung einer speziellen Anlage separat, als auch die Messung der Gesamtexposition durch Hochfrequenzquellen gefordert sein.

3. Vergleichsmessungen

Die Exposition an einem definierten Ort wird mit der Exposition an anderen Orten verglichen oder es erfolgt ein Vergleich der Exposition durch eine Quelle „vor Ort“ mit der „Hintergrundbelastung“.

4. Messungen für wissenschaftliche Zwecke

Der wissenschaftliche Hintergrund solcher Messungen kann die allgemeine Risikobewertung, das zeitliche Monitoring der Bevölkerungsexposition oder Messungen zur Expositionserfassung für epidemiologische Studien sein. Neben worst case Ansätzen zur Untersuchung der Immissionsverteilung im Umfeld der Anlage werden hier auch Durchschnittswerte bzw. repräsentative Szenarien anstelle von worst case Situationen gewählt. Es erfolgt nicht generell eine Bestimmung aller Quellen.

Vorliegende Aufgabenstellung stellt eine Kombination verschiedener Kategorien dar: Eine Überprüfung der Grenzwerteinhaltung nach Kategorie 1 ist zwar wünschenswert, allerdings

nicht primäres Ziel vorliegenden Projektes, da die Grenzwerteinhaltung bereits im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens von der BNetzA überprüft wird.

Insbesondere soll das Verfahren nicht nur eine Aussage „Grenzwert überschritten“ oder „Grenzwert eingehalten“ treffen, sondern muss auch in der Lage sein, die Immissionen im Umfeld der Anlage an beliebigen Orten zuverlässig zu bestimmen (Kategorie 2, 3 und 4).

Eine Motivation für das vorliegende Forschungsprojekt stellt sicherlich auch eine Erweiterung der Wissensbasis über die Größe, Verteilung und Erfassbarkeit der elektromagnetischen Immissionen dar, die letztlich auch einer Risikokommunikation und -bewertung dient (Kategorie 1 und 4).

I.4.1.2 Vorgehensweise bei der Untersuchung der Messverfahren

Ausgangspunkt für die Beurteilung von existierenden Messverfahren bilden die Anforderungen, die allgemein an Messverfahren zur Ermittlung der Exposition durch analogen und digitalen terrestrischen Rundfunk in Innenräumen und im Freien zu stellen sind. Diese Anforderungen werden im Abschnitt I.4.2 definiert.

Basis für die nachfolgende Übersicht über existierende Messverfahren bilden Normen, Empfehlungen oder Entwürfe, die ansatzweise im nationalen und internationalen Rahmen existieren. Abschnitt I.4.3.2 widmet sich diesbezüglich vorhandenen Regularien in Deutschland, die Abschnitte I.4.3.3 und I.4.3.4 stellen internationale Arbeiten vor.

Abschnitt I.4.4 enthält dann eine detailliertere Darstellung und Bewertung der einzelnen Teilaspekte der Messverfahren (Messtechnik, Messdurchführung, Auswertung usw.). In Abschnitt I.4.5 erfolgt die Beurteilung der Eignung der vorhandenen Verfahren im Hinblick auf die in I.4.2 definierten Anforderungen.

I.4.2 Anforderungen an Messverfahren

An ein Messverfahren zur korrekten Ermittlung der Immissionen durch analogen und digitalen terrestrischen Rundfunk sind folgende Anforderungen zu stellen. Manche Anforderungen sind eng miteinander verknüpft, d.h. sie können nicht unabhängig voneinander erfüllt werden; andere sind gegenläufig.

Hohe Empfindlichkeit: Das Verfahren sollte idealerweise über eine solche Empfindlichkeit verfügen, dass Immissionen der Größe, wie sie im Versorgungsbereich von analogen und digitalen terrestrischen Rundfunkanlagen vorliegen, noch darstellbar sind.

Für DVB-T ist nach Planungsunterlagen für die Planungskonferenz RRC06 für die z.B. in Bayern vorgesehene DVB-T Variante (16 QAM-2/3) für das Versorgungsziel „fixed antenna“ ein guter Empfang ab Versorgungsfeldstärken von etwa 49 dB μ V/m im Band III, (entsprechend 0,0003 V/m bzw. $2 \cdot 10^{-10}$ W/m²) bis 57 dB μ V/m im Band V (entsprechend 0,0007 V/m bzw. $1 \cdot 10^{-9}$ W/m²) möglich. Beim Versorgungsziel „portable outdoor“ steigert sich die Mindest-Empfangsfeldstärke auf 68 dB μ V/m im Band III (0,0025 V/m bzw. $2 \cdot 10^{-8}$ W/m²) bis 82 dB μ V/m im Band V (0,01 V/m bzw. $4 \cdot 10^{-7}$ W/m²). Beim Versorgungsziel „portable indoor“

sind Feldstärken zwischen 78 dB μ V/m im Band III (0,008 V/m bzw. $2 \cdot 10^{-7}$ W/m²) bis 94 dB μ V/m im Band V (0,05 V/m bzw. $7 \cdot 10^{-6}$ W/m²) für einen guten Empfang notwendig. Dem gegenüber ist laut ITU-R BT.417 für Analog-TV eine Feldstärke zwischen 55 dB μ V/m im Band III (0,0006 V/m bzw. $8 \cdot 10^{-10}$ W/m²) bis 70 dB μ V/m im Band V (0,003 V/m bzw. $3 \cdot 10^{-8}$ W/m²) angegeben.

Für T-DAB ist ein Empfang ab Versorgungsfeldstärken von etwa 37 dB μ V/m (entsprechend 0,00007 V/m bzw. $1 \cdot 10^{-11}$ W/m²) möglich. Für UKW-Rundfunk sind in Rec. ITU-R BS.412-9 Werte zwischen 54 dB μ V/m in ländlichen Gebieten (entsprechend 0,0005 V/m bzw. $7 \cdot 10^{-10}$ W/m²) bis 74 dB μ V/m in Innenstädten (0,005 V/m bzw. $7 \cdot 10^{-8}$ W/m²) angegeben.

Diese Intensitätsbereiche stellen hohe Anforderungen an die Empfindlichkeit entsprechender Messgeräte. Insbesondere die Verwendung von Personenschutzdosimetern bzw. in der EMV-Messtechnik verwendeten Feldsonden zur Störfestigkeitsmessung ist hier nicht mehr ausreichend. Vor allem in der direkten Umgebung der Sender werden allerdings wesentlich höhere Feldstärken vorliegen. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass die einschlägigen Grenzwerte in den durch analogen und digitalen terrestrischen Rundfunk belegten Frequenzbereichen 149 dB μ V/m bis etwa 155 dB μ V/m betragen und somit prinzipiell zu klären ist, welche Empfindlichkeit aus Sicht der Expositionskontrolle für eine messtechnische Erfassung überhaupt relevant ist.

Frequenzselektivität: Das Messverfahren muss die von analogen und digitalen terrestrischen Rundfunkanlagen ausgehenden Immissionen von anderen hoch- und niederfrequenten Immissionen (z.B. von Mobilfunkanlagen) trennen können, da hier nicht die kumulative Immission, sondern separat die der Rundfunkanlagen ermittelt und untersucht werden soll. Bei verschiedenen Messkampagnen (z.B. [BOR 04]) hat sich beispielsweise gezeigt, dass vor allem im innerstädtischen Bereich in direkter Umgebung von Mobilfunkanlagen die Gesamtmission im hochfrequenten Bereich überwiegend von der Immission durch die Mobilfunk-Basisstationen dominiert wird. Ein Messverfahren, das die Immission durch analoge und digitale terrestrische Rundfunkanlagen nicht von der durch Mobilfunkanlagen trennen könnte, wäre dann für vorliegende Aufgabenstellung nicht einsetzbar.

Einbeziehung aller relevanter Anlagen: Die Gesamtmission durch analoge und digitale terrestrische Rundfunkanlagen an einem Messpunkt wird sich oftmals als Überlagerung aus den Einzelbeiträgen verschiedener, örtlich getrennter Rundfunksender zusammensetzen. Das Messverfahren muss in der Lage sein, die Immissionen durch alle Anlagen, die am Messpunkt einen relevanten Beitrag liefern, zu ermitteln und diese zu einer Gesamtmission zusammenzufassen.

Grenzwertüberprüfung: Das Verfahren muss in der Lage sein, verlässliche Messwerte zu liefern, die direkt mit den normativen Grenzwerten verglichen werden können. Hierzu sind die in der jeweiligen Personenschutznorm festgelegten Bedingungen bezüglich Erfassung, Gültigkeit und Interpretation der Grenzwerte zu beachten.

Praktikabilität: Das Messverfahren muss praktikabel und nicht nur für den Einsatz unter Laborbedingungen geeignet sein. Besonders berücksichtigt werden muss der Umstand, dass die relevanten Messpunkte sich auch innerhalb von Gebäuden und nicht nur im Freien befinden können. Bezüglich der Praktikabilität müssen auch Aufwandsbetrachtungen berücksichtigt werden: Eine Messung, die an einem Messort mehrere Stunden in Anspruch

nimmt, kann nicht mehr als praktikabel bezeichnet werden. Die „Bezahlbarkeit“ der Messung seitens des Auftraggebers ist ebenso Voraussetzung wie eine möglichst geringe zeitliche Störung der Anwohner am Messort.

Maximalwertsuche: Aus Immissionsuntersuchungen an Mobilfunk-Basisstationen (z.B. [BOR 04]) ist bekannt, dass die Immission vor allem in Innenräumen kleinstskalig von Messort zu Messort beträchtlich schwanken kann. Es wird damit gerechnet, dass dies auch bei analogen und digitalen terrestrischen Rundfunkanlagen zutrifft. Das Messverfahren muss in der Lage sein, mittels einer besonderen Methodik der Messdurchführung einen definierten Wert, möglichst den Maximalwert der vorliegenden Immission in einem räumlich ausgedehnten Messvolumen (z.B. Zimmer), zu ermitteln und als Ergebnis der Messung zu protokollieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Feldstärkevektor beliebig im Raum liegen kann; dieser muss bei der Messung korrekt erfasst werden.

Genauigkeit: Das Messverfahren muss hinreichend genau und die Messunsicherheit begrenzt sein, so dass sich eine verlässliche Aussage bezüglich des Abstandes der Messwerte zu den Grenzwerten machen lässt.

Reproduzierbarkeit: Das Messverfahren muss reproduzierbare Ergebnisse liefern, d.h. die Messergebnisse sollten bei Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten bzw. durch unterschiedliche Messinstitutionen nicht zu weit differieren, da sonst das Vertrauen in die Korrektheit der ermittelten Werte nicht mehr gegeben ist.

Dokumentation: Die Dokumentation der Ergebnisse hat so zu erfolgen, dass eine Nachvollziehbarkeit der Messungen gewährleistet ist.

Qualifizierung des Messpersonals: Wünschenswert wäre es ein Messverfahren derart zu finden, das nicht nur durch hochqualifiziertes Fachpersonal im Bereich Hochfrequenzmesstechnik, sondern auch durch Kontroll- und Überwachungsorgane (z.B. Umweltbehörden, Strahlenschutzbehörden usw.) durchführbar ist. Allerdings ist hierbei aufgrund der sehr komplexen und nicht trivialen Problemstellung der Hochfrequenzmesstechnik unter Umständen mit Einschränkungen zu rechnen.

I.4.3 Überblick über die Normungssituation

I.4.3.1 Einleitung

Dieses Kapitel enthält eine Aufstellung von Normen, Normentwürfen, Empfehlungen und anderen relevanten Arbeiten auf dem Gebiet der Messung elektromagnetischer Immissionen von analogen und digitalen terrestrischen Rundfunkanlagen. Dabei wird zuerst die Situation in Deutschland betrachtet. Anschließend wird kurz die europäische und US-amerikanische Normungssituation beleuchtet.

Die Überprüfung der einschlägigen Arbeiten wird nach folgenden Kriterien durchgeführt:

- Existiert eine Messvorschrift speziell für die Erfassung von Immissionen durch analoge und digitale terrestrische Rundfunkanlagen?

- Falls nein, existiert eine Vorschrift für die Erfassung von hochfrequenten Immissionen im allgemeinen und lässt sich diese Vorschrift in Teilen auch für die Erfassung der Immissionen durch analoge und digitale terrestrische Rundfunkanlagen anwenden?
- Welche Messgeräte werden definiert? Gibt es eine Rangfolge für den Einsatz unterschiedlicher Messgeräte? Werden Messparameter festgelegt?
- Gibt es Vorgaben für die Auswahl der Messpunkte?
- Vor allem in Innenräumen schwankt die Immission räumlich sehr stark. Ist ein Verfahren zur Ermittlung der maximalen örtlichen Immission beschrieben?
- Wird als maßgeblicher Immissionsmesswert der örtliche Maximalwert verwendet oder erfolgt eine räumliche Mittelung?
- Gibt es Aussagen bezüglich der Messunsicherheit?

Es wird darauf hingewiesen, dass im Abschnitt I.4.3 vorerst nur die Kernaussagen der relevanten nationalen und internationalen Arbeiten vorgestellt werden sollen. Die detaillierte Darstellung der einzelnen Aspekte der unterschiedlichen Messverfahren erfolgt ausführlich im Abschnitt I.4.4.

I.4.3.2 Normungssituation in Deutschland

26. BImSchV

Grenzwerte zum Schutz der Allgemeinheit vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch elektromagnetische Felder von fest installierten Hochfrequenzanlagen mit einer Sendeleistung von 10 W EIRP oder mehr werden in Deutschland in der Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) geregelt [26. BImSchV]. Die 26. BImSchV gilt nur für Funksendeanlagen, die gewerblichen Zwecken dienen oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden. Die Funksendeanlagen der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten werden von ihr nicht erfasst. Deswegen ist diese Verordnung auf diejenigen analogen und digitalen Rundfunk-Sendeanlagen, die von öffentlich-rechtlicher Seite betrieben werden, nicht anwendbar. Allerdings werden in vielen Regionen auch Programme privater Programmanbieter terrestrisch verbreitet.

Die 26. BImSchV definiert kein konkretes Messverfahren zur Erfassung der Immissionen. Trotzdem finden sich einige für die Messung relevante Anmerkungen: So ist die Immission bei höchster Anlagenauslastung und unter Berücksichtigung der Immission anderer ortsfester Sendeanlagen zu bestimmen. Die Messungen haben am Einwirkungsort mit der stärksten Exposition zu erfolgen. Eine räumliche Mittelung der Messwerte ist nicht erwähnt; lediglich bei Niederfrequenzanlagen sind kleinräumige Überschreitungen gestattet. Bezüglich einer Messvorschrift wird auf den datierten Entwurf der Norm DIN VDE 0848 Teil 1 vom Mai 1995 verwiesen [0848-1_1995]. Mittlerweile liegt eine aktualisierte Normfassung vom August 2000 vor [0848-1_2000].

Vom Arbeitskreis „Elektromagnetische Strahlung“ des Länderausschusses für Immissionsschutz wurden Hinweise zur Durchführung dieser Verordnung erarbeitet [LAI 04]. Diese präzisieren die Angaben der 26. BImSchV um einige messtechnische Details: Bezüglich Messungen und Berechnungen wird freigestellt, ob die Anwendung der 0848 Teil 1 in der Fassung von 1995 oder 2000 erfolgt. Für die Messung können sowohl breitbandige, als auch frequenzselektive Messgeräte eingesetzt werden. Für eine Maximalwertsuche ist die sog. Schwenkmethode anzuwenden (s. unten), allerdings auf einer fixen Höhe von 1,5 m. Der Spektrumanalysator soll im Modus „Maxhold“ betrieben werden. Bezüglich konkreter Messgeräteeinstellungen, auch bezüglich DVB-T und DAB, wird auf entsprechende Angaben der BNetzA MV 09/EMF/3 (s. unten) verwiesen.

BEMFV

Mit der „Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV)“ [BEMFV] existiert eine Verordnung, die das Nachweisverfahren für ortsfeste Sendeanlagen zur Gewährleistung des Personenschutzes regelt. Die BEMFV ist für ortsfeste analoge und digitale terrestrische Rundfunkanlagen (öffentlich-rechtlich und private Programmanbieter) voll anwendbar. In ihr finden sich keine konkreten Hinweise auf Messverfahren; es wird auf die DIN VDE 0848 Teil 1 (Ausgabe 2000) verwiesen. Für die Grenzwertüberprüfung werden die Grenzwerte nach 26. BImSchV bzw. der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG [99/519/EG] angesetzt.

DIN VDE 0848 Teil 1

Die Norm DIN VDE 0848 Teil 1 [0848-1_2000] beschreibt Mess- und Berechnungsverfahren zur Beurteilung der Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz. Allerdings ist sie ihrem Anwendungsbereich entsprechend sehr allgemein gehalten.

Bei inhomogenen Feldern, wie sie zum Beispiel in Innenräumen auftreten können, verlangt sie die Messung in drei verschiedenen Höhen. Es ist der Messperson freigestellt, ob frequenzselektive oder breitbandige Messgeräte zum Einsatz kommen. Die Felder sind isotrop zu messen (entweder mit isotroper Sonde oder eindimensionalen Aufnehmern in allen drei orthogonalen Raumrichtungen und nachträglicher Verknüpfung). Konkrete Geräteeinstellungen vor allem für frequenzselektive Geräte, deren Nichtbeachtung eine potenzielle Fehlerquelle darstellt, werden nicht angegeben. Insgesamt wird eingeschätzt, dass die DIN VDE 0848 Teil 1 für die hier vorliegende Aufgabenstellung zu unspezifisch ist und zu viele Freiheitsgrade bezüglich der Messung offen lässt.

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.

Der zu untersuchende Frequenzbereich erstreckt sich von 9 kHz bis 3 GHz und umfasst somit neben anderen Hochfrequenzsendeanlagen auch Analog-TV, DVB-T, DAB und UKW-Sender.

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. Hervorzuheben ist hier, dass in Abhängigkeit vom zu untersuchenden Frequenzbereich konkrete Einstellparameter des Spektrumanalysators angegeben werden. Das festgelegte Vorgehen zur Maximierung der Immissionen innerhalb eines begrenzten Volumens (feststehende Höhe der Messantenne von 1,5 m, Drehung der Antenne) sind primär für Messungen im Freien tauglich und nicht ohne weiteres auf die Messung in Innenräumen übertragbar.

Unter Abschnitt I.4.2.2 der MV 09 finden sich unter „besondere Aussendungen“ konkrete Messhinweise für die Erfassung von DAB und DVB-T Signalen. Insbesondere wird hier darauf verwiesen, dass diese Signale mit einer der Signalbandbreite entsprechenden Auflösesebandbreite analysiert werden müssen. Ist die Bandbreite des Messgerätes nicht ausreichend groß, darf mit einer geringeren Bandbreite gemessen werden. Die Messwerte sind dann mit einem das Verhältnis von Signal- und Messbandbreite berücksichtigenden Faktor zu korrigieren.

Im UKW-Band ist mit einer Auflösesebandbreite von 100 kHz zu messen. Für Analog-TV finden sich keine spezifischen Angaben.

Der Spektrumanalysator ist mit einem Spitzenwert-Detektor (Peak-Detektor) im Maxhold-Modus zu betreiben.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass die Messanweisung der BNetzA wesentlich detailliertere Angaben gerade bezüglich konkreter Einstellungen der Messgeräte beinhaltet als die Ausführungen der DIN VDE 0848 Teil 1. Diese Vorgaben sind im weiteren Verlauf des Projektes auf ihre Anwendbarkeit für vorliegende Aufgabenstellung hin zu untersuchen.

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. 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.

BGV/BGR

Mit der BG-Vorschrift BGV B11 Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder [BGV] bzw. den BG-Regeln BGR B11 Elektromagnetische Felder [BGR] bestehen weitere Regeln bezüglich des Personenschutzes in elektromagnetischen Feldern, hier jedoch primär am Arbeitsplatz im Sinne einer Arbeitsschutz und/oder Unfallverhütungsvorschrift. Wohingegen

in der BGV B11 keine Angaben zu Messverfahren enthalten sind, verweist die BGR B11 auf die DIN VDE 0848 Teil 1. Auch hier wird die Messung bei der maximal auftretenden betrieblichen Leistung der Anlage gefordert bzw. es ist eine entsprechende Hochrechnung der gemessenen Werte vorzunehmen. Die Vorschriften sind sehr stark an Arbeitsplätze orientiert; d.h. die Messungen haben ohne örtliche Maximalwertsuche an einem festen Ort zu erfolgen. Für Steh- und Sitzarbeitsplätze sind Messebenen vorgegeben; es ist jedoch keine örtliche Mittelung der Messwerte durchzuführen. Für die Immissionen durch analoge und digitale Rundfunkanlagen sind keine speziellen Messvorgaben enthalten.

I.4.3.3 Normungssituation in Europa

EN-Vornormen prEN50413, 50420 und 50421

Zusätzlich zu den nationalen Normungsbestrebungen gibt es relevante Aktivitäten bezüglich Messverfahren elektromagnetischer Felder auf europäischer Ebene.

Personenschutzgrenzwerte im europäischen Rahmen werden in der EU-Ratsempfehlung 99/519/EG „Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz)“ [99/519/EG] empfohlen. In der Ratsempfehlung gibt es jedoch keine Hinweise auf Messverfahren.

Mit der prEN 50413 „Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)“ [prEN 50413] soll eine Grundnorm entstehen, die in etwa vergleichbar mit der DIN VDE 0848 Teil 1 ist. Diese Vornorm ist eine bezüglich der Anlagenart nicht spezifische Norm, die allerdings grundlegende Anforderungen an Messungen definiert. So ist z.B. sicherzustellen, dass der Maximalwert gemessen wird, allerdings unter normalen Betriebsbedingungen der Sendeanlage (keine Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung). Die Maximalwertsuche kann entweder durch vorausgehende Übersichtsmessungen in den die Quelle umgebenden Bereichen erfolgen oder durch Abtastung einer zwei- oder dreidimensionalen Punktmatrix. In demjenigen Bereich, in dem das Maximum festgestellt wurde, sind detaillierte Messungen durchzuführen.

Die Messung kann entweder mit Breitbandmessgeräten oder frequenzselektiven Messgeräten (Spektrumanalysatoren oder Messempfänger) erfolgen.

Zur Ermittlung der Immission speziell von Rundfunksendeanlagen existieren die Vornormen prEN 50420 „Basic standard for the evaluation of human exposure to electromagnetic fields from a stand alone broadcast transmitter (30 MHz – 40 GHz)“ [prEN 50420] und prEN 50421 „Product standard to demonstrate the compliance of stand alone broadcast transmitter with the reference levels or the basic restrictions related to human exposure to radio frequency electromagnetic fields (30 MHz – 40 GHz)“ [prEN 50421]. Bei der prEN 50420 geht es allerdings primär um mess- oder rechentechnische Methodiken zur Ermittlung des *Sicherheitsabstandes* um die Sendeanlage. Die Messungen finden dabei in einer künstlichen reflexionsarmen Umgebung (Absorberkammer) statt. Vorortmessungen an beliebigen Orten im Umfeld einer operativen Sendeanlage sind in der Vornorm nicht berücksichtigt.

Die prEN 50421 ist der zur prEN 504520 gehörende Produktstandard und verweist in den messtechnisch relevanten Aspekten auf die prEN 50420. Die prEN 50420 und prEN 50421

sind damit für Vorortmessungen der Immission durch analoge und digitale terrestrische Rundfunksendeanlagen nicht geeignet.

CEPT ECC Recommendation (02)04

Schließlich existiert mit der CEPT ECC Recommendation „Measuring non-ionising radiation (9 kHz – 300 GHz)“ [CEPT 03] eine Empfehlung, die 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 Immissionen. So werden beispielsweise für den Fall, dass der Spektrumanalysator eine zu geringe Bandbreite zur vollständigen Erfassung der Signale aufweist, Kanalleistungsmessungen (channel power) empfohlen.

Allgemein erlaubt die CEPT Recommendation alleinige Messungen von elektrischer Feldstärke (E) oder magnetischer Feldstärke (H) schon bei Abständen von einer Wellenlänge vom Sender. Messpunkte sind die am stärksten exponierten Orte, an denen sich Personen über längere Zeit aufhalten. Der Expositionsgrad wird durch Vormessungen oder theoretische Abschätzungen beurteilt. Die Messungen sollen an jeweils einem Punkt in 1,5 m Höhe durchgeführt werden. Sofern der Messwert eine sog. „Entscheidungsschwelle“ (Schwelle x dB unter dem Grenzwert, in Abhängigkeit von der Messunsicherheit) erreicht oder überschreitet, wird die Messung an zwei Punkten wiederholt, die sich in 1,1 m und 1,7 m Höhe unter bzw. über dem 1,5 m hohen Messpunkt befinden. Das Ergebnis wird über die drei Punkte gemittelt. Es werden drei Messfälle diskutiert:

1. Sofern die Gesamtmission durch alle Sendeanlagen das Messziel ist, sind hierfür Breitbandmessgeräte mit isotropen Sonden einzusetzen.
2. Ein variabler Frequenzscan ist durchzuführen, wenn die Immissionspegel nach Frequenz unterschieden werden sollen. Hierzu sind Spektrumanalysatoren bzw. Messempfänger mit geeigneten Empfangsantennen zu verwenden. Das Messgerät ist mit einem Peak Detektor in der Betriebsart „Maxhold“ zu betreiben. Die Antenne muss in horizontaler und vertikaler Polarisation verwendet werden. Angaben zu Maximierungsmethoden sind nicht enthalten. In den für vorliegende Untersuchungen relevanten Frequenzbereichen ist eine Auflösungsbandbreite von 100 kHz zu verwenden.
3. Eine detaillierte Untersuchung ist dann durchzuführen, wenn die ersten beiden Methoden nicht anwendbar sind. Beispiele für die Anwendung sind Nahfeldmessungen, die Messung starker elektrischer oder magnetischer Felder sowie Nicht-Standard Messungen (gepulst, breitband, diskontinuierliche Signale, ...). Laut Einteilung fallen Messungen an Analog-TV, DVB-T und DAB-Sendeanlagen unter diesen Anwendungsfall. Eine Maximierungsroutine ist nicht beschrieben. Die Messdauer soll sich nach der verwendeten Grenzwertnorm richten; im Falle der EU-Ratsempfehlung 99/519/EG wären dies 6 Minuten.

Außerdem sind Angaben zu Messunsicherheiten enthalten.

I.4.3.4 Normungssituation in den USA

Grenzwerte zum Personenschutz werden in den USA im OET-Bulletin 65 [FCC 97] und in der IEEE C95.1 [IEEE C95.1] geregelt. Erwähnenswert hierbei ist, dass laut [IEEE C95.1] bei inhomogenen Feldern die an einem festen Ort vorliegenden Feldstärke- bzw. Leistungsflussdichtewerte die (abgeleiteten) Grenzwerte übersteigen dürfen, solange der räumliche Mittelwert unterhalb der Grenzwerte bleibt. Hierbei ist die räumliche Mittelung über eine Fläche, die äquivalent mit dem vertikalen Körperquerschnitt ist (Projektionsfläche), zu bilden.

Im OET-Bulletin 65 ist ein eigenes Messtechnik-Kapitel enthalten, das aber eher allgemeine Aussagen enthält. Immerhin sind aber ausführliche Anforderungen an Messgeräte sowie Hinweise zu Fehlerquellen bei der Messung enthalten.

Bezüglich der Messung wird explizit auf die IEEE C95.3 verwiesen [IEEE C95.3]. Diese ist ein allgemeiner Messstandard für elektromagnetische Felder, vergleichbar z.B. mit der deutschen DIN VDE 0848 Teil 1. Die IEEE C95.3 geht auf prinzipielle Messprobleme ein, die zu beachten sind (Abstand, Polarisierung, Nahfeld/Fernfeld, Kabelführung, ...).

Im Falle des Vorhandenseins einer dominanten Quelle ist wegen der Mehrwegeausbreitung die Messung an mehreren Messpunkten innerhalb einer Fläche mit 1 m oder 2 m Kantenlänge durchzuführen. Hierbei sollte ein Mindestabstand von 20 cm zu reflektierenden Objekten eingehalten werden. Die Messwerte sind zu mitteln und mit den Grenzwerten zu vergleichen. Als Messgeräte sind frequenzselektive Geräte oder Breitbandsonden einzusetzen.

Im Falle des Vorhandenseins mehrerer Quellen mit unbekanntem Sendeparametern sind die Messpunkte über ein dreidimensionales Gitter mit 1 m Abstand zwischen den Gitterpunkten aufzunehmen. Hier soll ein Breitbandmessgerät mit isotroper Sonde verwendet werden.

I.4.4 Beschreibung der vorhandenen Messverfahren

I.4.4.1 Grundsätzliche Messverfahren

Bei der Messung hochfrequenter Immissionen wird grundsätzlich zwischen breitbandigen und frequenzselektiven Messverfahren unterschieden. Der Hauptunterschied besteht darin, dass breitbandige Verfahren einen Gesamtwert für die Immission innerhalb eines durch das Messgerät festgelegten Frequenzbereiches ermitteln, wobei nicht zugeordnet werden kann, wie sich die Immissionsanteile frequenzmäßig und damit auch emittentenbezogen aufteilen. Dadurch wird bei Vorhandensein mehrerer Signale in verschiedenen Frequenzbereichen die Bewertung mit den zugehörigen (teilweise frequenzabhängigen) Grenzwerten erschwert oder sogar unmöglich. Demgegenüber kann durch den Einsatz frequenzselektiver Verfahren ermittelt werden, welche Immissionen am Messort bei welcher Frequenz vorliegen. Durch die Frequenzinformation ist in vielen Fällen eine Zuordnung zur Quelle der Immission möglich.

Für breitbandige Messungen werden Handmessgeräte mit Breitbandsonden eingesetzt. Bei frequenzselektiven Messungen finden üblicherweise Spektrumanalysatoren oder Messempfänger sowie passende Empfangsantennen und HF-Kabel Verwendung. Die jeweiligen Messgeräte und Hilfsmittel werden in Abschnitt I.4.4.3 ausführlich vorgestellt.

In einigen der vorgestellten Normen konzentriert sich der Einsatz der breitbandigen Sonden auf drei Gebiete:

1. Übersichtsmessungen,
2. Ermittlung des am höchsten exponierten Ortes, an dem dann eine frequenzselektive Feinmessung durchgeführt wird,
3. Messungen in unmittelbarer Nähe der Sendeanlage (Bereich des Sicherheitsabstandes). Dort ist davon auszugehen (bzw. mit einem frequenzselektiven Messgerät zu überprüfen), dass die Immission durch die Sendeanlage vor Ort gegenüber Immissionen von umliegenden Sendeanlagen dominiert. Somit ist eine frequenzmäßige Aufspaltung der Gesamtmission nicht mehr notwendig.

Die Dominanz der Immissionen der Anlage vor Ort ist jedoch bei Messungen an beliebigen Orten im Umfeld der Anlage nicht immer gegeben, da oftmals die Immissionen von anderen Sendeanlagen (DECT-Telefone in der Wohnung, umliegende Mobilfunksender) gleich groß oder höher als die Immissionen der analogen und digitalen Rundfunkanlagen sein können.

Heutzutage verfügbare Breitbandmessgeräte sind zwar empfindlich genug, um Feldstärkewerte in der Größenordnung der Grenzwerte sicher detektieren zu können. Feldintensitäten von unter 1 V/m werden aber oftmals gar nicht bzw. inkorrekt angezeigt. In Abhängigkeit vom Hersteller existieren stellenweise auch Spezialsonden mit höheren Empfindlichkeiten, z.B. 0,2 V/m. Diese Empfindlichkeit erscheint zwar zur reinen Grenzwertüberprüfung als völlig ausreichend. Allerdings ist die vorliegende Aufgabenstellungen so ausgerichtet, dass die tatsächlich vorhandene Immission an beliebigen Orten im Umfeld der Sendeanlage ermittelt werden soll, unabhängig davon, ob und wie weit sie unter dem Grenzwert liegt.

Dem gegenüber sind Spektrumanalysatoren in der Regel so empfindlich, dass unter Verwendung von geeigneten Richtantennen Immissionen gemessen werden können, die je nach Frequenzbereich bezüglich der elektrischen Leistungsflussdichte um mindestens acht Größenordnungen unter den einschlägigen Grenzwerten liegen [BOR 96]. In Zusammenhang mit ihrer Frequenzselektivität sind sie daher bevorzugt für die Detailmessungen einzusetzen. In wieweit diese Empfindlichkeit für eine zuverlässige Ermittlung der Immissionen an beliebigen Orten im gesamten Versorgungsbereich von analogen und digitalen Rundfunksendern ausreicht, wird im anschließenden Kapitel II untersucht.

Den Vorteilen der frequenzselektiven Verfahren (Frequenzselektivität, Empfindlichkeit) steht ein deutlicher Nachteil gegenüber: Frequenzselektive Messungen sind ungleich aufwändiger als breitbandige Messungen. Das betrifft sowohl die finanzielle Seite des Messequipments, die Messdurchführung sowie das erforderliche Know How der mit der Messung Beauftragten. Überblicksmessungen oder das Absuchen großer Areale auf Maximalwerte mit dem frequenzselektiven Verfahren stellen beispielsweise einen beträchtlichen Aufwand dar, der oftmals nicht praktikabel ist. Dem gegenüber sind Breitbandsonden handlich, schnell und unkompliziert einsetzbar. Es ist daher von der konkreten Messaufgabenstellung abhängig, ob Breitbandsonden, frequenzselektive Geräte oder eine Kombination von beiden einzusetzen sind.

I.4.4.2 Auswahl der Messpunkte

Die Auswahl der Messpunkte richtet sich nach der Frage, wie die Messaufgabenstellung definiert ist. Hierfür gibt es im wesentlichen zwei Ansatzpunkte:

1. Der Messort ist im Vorhinein fest definiert, z.B. ein Arbeitsplatz oder ein Zimmer. Unter Umständen ist hierbei sogar der räumliche Bereich noch weiter eingegrenzt, z.B. auf einen Punkt. In diesem Fall braucht der Messort nicht gesondert ausgewählt zu werden.
2. Der Messort ist vor Beginn der Messungen noch nicht definiert, sondern erst festzulegen. Es soll z.B. überprüft werden, ob an irgendeiner (allgemein zugänglichen) Stelle im Umfeld einer Sendeanlage die Grenzwerte überschritten werden oder es soll der Sicherheitsabstand ermittelt oder das Maximum der Immission im Umfeld der Anlage an allgemeinen Aufenthaltsorten von Personen bestimmt werden.

Sind die Messpunkte, so wie im letzteren Falle, erst noch zu bestimmen, bestehen grundsätzlich folgende Möglichkeiten:

- Überblicksmessungen: Mit einem breitbandigen Feldstärkemessgerät können potenzielle Messpunkte vorab überprüft werden. Obwohl mit dem Feldstärkemessgerät, wie bereits in Abschnitt I.4.4.1 beschrieben, keine Feinmessungen möglich sind, eignen sie sich jedoch hervorragend dazu, einen Überblick über die Immissionsverteilung zu bekommen und diejenigen Orte mit maximaler Immission zu bestimmen, die in einem nachfolgenden Durchlauf mit dem frequenzselektiven Gerät fein vermessen werden.
- Orte mit potenziell hoher Immission: Aus der Sendertopologie oder aus der Erfahrung des Messpersonals sind diejenigen Orte zu bestimmen, an denen mit einer maximalen Immission zu rechnen ist. Dies ist, insbesondere bei Vorhandensein mehrerer Sender bzw. bei größerer Entfernung vom Sender, eine nicht triviale Aufgabe. In den Normungsansätzen sind konkrete, praktisch umsetzbare Handlungsanweisungen hierfür nicht enthalten.
- Sensible Orte: Obwohl nicht immer durch das Vorhandensein von maximalen Immissionen begründet, sondern eher der öffentlichen Diskussion zu dieser Thematik Rechnung tragend, ist oftmals eine Auswahl des Messpunktes an sensiblen Orten sinnvoll. Hierunter sind zu verstehen:
 - Kindergärten, Kindertagesstätten, Schulen,
 - Seniorenheime, Pflegeheime,
 - Krankenhäuser,
 - die Bereiche innerhalb von Wohnungen, an denen man sich nicht nur vorübergehend aufhält, also z.B. Schlaf-, Kinder- und Wohnzimmer.

I.4.4.3 Messgeräte und Hilfsmittel

I.4.4.3.1 Frequenzselektives Messverfahren

Für die Durchführung von frequenzselektiven Messungen wird benötigt:

- ein Spektrumanalysator oder Messempfänger,
- eine auf den zu untersuchenden Frequenzbereich abgestimmte Empfangsantenne (mit Kalibrierkurve als Antennenfaktoren oder Gewinnfaktoren),
- HF-Kabel zur Verbindung der Antenne mit dem Spektrumanalysator (mit Kalibrierkurve als Dämpfungswerte),
- ggf. Speichermedien zum Abspeichern der aufgenommenen Spektren.

Mit der Antenne wird dem elektromagnetischen Strahlungsfeld Energie entnommen und über das Kabel dem Spektrumanalysator zugeleitet. Mit diesem wird die Empfangsleistung spektral aufgespalten, d.h. es wird bestimmt, wie groß die gemessenen Immissionen bei welcher Frequenz sind.



Bild I.4.1 Frequenzselektives Messverfahren mit Spektrumanalysator und Messantenne

Vereinfacht kann man sich diese Aufspaltung im Spektrumanalysator so vorstellen, dass im gesamten eingestellten Frequenzbereich ein Filter mit einer bestimmten Bandbreite („Auflösebandbreite“, RBW) den Frequenzbereich durchläuft. Bei jeder Frequenz wird derjenige Beitrag, der durch das Filter umfasst wird, als Anzeigewert dargestellt. Gerade die Messungen mit dem Spektrumanalysator verlangen Kenntnisse der Signalcharakteristika der zu messenden Immission sowie ein Verständnis der grundlegenden Funktionsweise eines Spektrumanalysators. Werden Messparameter falsch gewählt, können damit die Immissionen wesentlich fehlerhaft bewertet werden.

Selbstverständlich muss der Spektrumanalysator bzw. Messempfänger für den zu untersuchenden Frequenzbereich geeignet sein. Gut einsetzbar für vorliegende Aufgabenstellung sind beispielsweise Geräte, die den Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz umfassen.

Auch das Hochfrequenzzuleitungskabel und vor allem die Empfangsantennen müssen für den zu untersuchenden Frequenzbereich geeignet sein. Als Empfangsantennen für den durch die analogen bzw. digitalen Fernsehsender und zusätzlich noch die DAB- und UKW-Anlagen abgedeckten Frequenzbereich (48 MHz bis 1,5 GHz) kommen prinzipiell Richtantennen, wie z.B. logarithmisch-periodische Antennen, oder auch dipolartige Antennen mit schwacher Richtwirkung, wie z.B. bikonische Antennen, in Frage. Richtantennen haben den Vorteil, dass die Beeinflussung durch den Messenden nicht so stark ist wie bei Antennen mit schwacher Richtwirkung. Dafür gestaltet sich hier die Maximalwertsuche der Immission etwas aufwändiger. Außerdem ist streng genommen nur mit dipolartigen Antennen eine Bestimmung der Lage des Feldvektors im Raum aus aufeinander folgenden Messungen in den drei orthogonalen Raumkomponenten möglich.

1.4.4.3.2 Breitbandiges Messverfahren

Messgeräte zur breitbandigen Messung bestehen in der Regel aus einer Anzeigeeinheit, auf die eine je nach Frequenzbereich und Feldart (elektrisches Feld E oder magnetisches Feld H) passende Messsonde aufgesteckt wird. Wichtig ist, dass die Sonde den Frequenzbereich der relevanten zu erfassenden Quellen umfassen muss. Für den Hochfrequenzbereich werden oft Sonden verwendet, die mindestens den Frequenzbereich von 100 kHz bis 2,5 GHz abdecken. In der Regel ist eine E-Feld Sonde hinreichend; auf diese Problematik wird später detailliert eingegangen.

Bild I.4.2 zeigt als Beispiel für ein breitbandiges Messgerät das Gerät EMR-300 der Firma Narda Safety Test Solutions mit aufgesteckter E-Feldsonde Typ 8.

Als Empfangselemente werden bei E-Feld Sonden im Sondenkopf in der Regel elektrisch kurze Dipole eingesetzt, wobei die Empfangsspannung am Dipol detektiert und über eine hochohmige Ableitung der Auswerte- bzw. Anzeigeeinheit zugeführt wird.

Sonden unterscheiden sich grundsätzlich danach, ob sie nur eine Raumkomponente des (elektrischen) Feldes aufnehmen oder eine isotrope Feldmessung vornehmen. Isotrope Sonden sind in der Regel praktikabler, da hierbei die Messung der Feldstärke in den drei orthogonalen Raumrichtungen und die Ermittlung der resultierenden Feldstärke automatisch vorgenommen wird. Dadurch vereinfacht sich der Messaufwand beträchtlich.



Bild I.4.2 Breitbandiges Feldstärkemessgerät mit aufgesteckter Messsonde

Auf der Geräteanzeige wird, jeweils wählbar als Effektiv- oder Spitzenwert, die (elektrische) Feldstärke angezeigt. Bei einigen Geräten kann eine Umschaltung der Anzeige auf die elektrische Leistungsflussdichte erfolgen.

Die absoluten Anzeigen von Breitbandsonden sollten bei komplexen Signalen mit hohem Crestfaktor immer besonders kritisch betrachtet werden, da es hier zu deutlichen pegelabhängigen Fehlbewertungen der Exposition kommen kann [KEL 96].

1.4.4.3 Kalibrierung der Messgeräte

Breitbandmessgeräte, Spektrumanalysatoren, Messempfänger, Empfangsantennen und Zuleitungskabel müssen kalibriert sein. Die Kalibrierung ist in regelmäßigen Abständen zu wiederholen.

Kalibrierung bedeutet:

- bei Breitbandmessgeräten, Spektrumanalysatoren und Messempfängern: Zuordnung zwischen den ausgegebenen Werten des Messgerätes (z.B. 6,8) zu einer durch ein Bezugsnormale dargestellten Größe (z.B. (1) V/m),
- bei Empfangsantennen: Bestimmung von frequenzabhängigen Gewinn- bzw. Antennenfaktoren,
- bei Zuleitungskabeln: Bestimmung der frequenzabhängigen Dämpfungsfaktoren.

Das Kalibrierintervall richtet sich nach der Art und Historie des Messgerätes bzw. Hilfsmittels, der Benutzungshäufigkeit und der Einsatzumgebung. Sicherlich werden die verwendeten

Gerätschaften bei Vorortmessungen stärker belastet als unter Laborbedingungen. Einige Normempfehlungen sprechen von mindestens einer Kalibrierung pro Jahr bzw. sogar von zusätzlichen Überprüfungen vor jedem Messprojekt.

1.4.4.3.4 Nahfeld-Fernfeld Problematik

Ein wichtiger Aspekt bei der Messung ist die Frage, inwieweit die Komponenten des elektrischen (E) und magnetischen (H) Feldes getrennt zu erfassen sind oder ob die Erfassung einer der beiden Komponenten hinreichend ist. Dieses ist in erster Linie von der Art der Sendeantenne und vor allem vom Abstand des Messortes von der Sendeantenne abhängig.

Hierfür definieren die nationalen und internationalen Normen unterschiedliche Kriterien: Oftmals wird gefordert, zur Erfassung von lediglich einer der beiden Komponenten E oder H mindestens die Entfernung r

$$r > \frac{2D^2}{\lambda_0} \quad (1.4.1)$$

(Fernfeld) einzuhalten, wobei D die maximale geometrische Ausdehnung der Antenne beschreibt und λ_0 die Freiraumwellenlänge ist. Andere Arbeiten halten bereits ab Entfernungen von einer Wellenlänge (strahlendes Nahfeld) von der Anlage die Erfassung lediglich einer der Feldkomponenten E oder H für hinreichend. Für die Immissionsmessung im Umfeld der hier betrachteten analogen und digitalen terrestrischen Rundfunksender werden allgemein zugängliche Messpunkte in der Regel außerhalb des durch Formel (4.1) definierten Abstandes liegen, so dass die Messung z.B. der elektrischen Feldkomponente hinreichend ist.

1.4.4.4 Wahl der Messparameter

Bei Messungen mit Breitbandmessgeräten sind die Möglichkeiten der Auswahl unterschiedlicher Geräteeinstellungen begrenzt und entsprechend die Fehlermöglichkeiten gering. Bei den frequenzselektiven Verfahren hingegen ist eine richtige Wahl der Messparameter bzw. Geräteeinstellungen relevant und zur Ermittlung eines korrekten Messergebnisses eminent wichtig. Dies betrifft vor allem die Bandbreiten vom Mess- und Videofilter (RBW und VBW) sowie den Frequenzbereich (Span), die Durchlaufzeit des Messfilters durch den eingestellten Frequenzbereich (Sweepzeit) und den gewählten Detektortyp (Peak, RMS).

Die in Abschnitt 1.2 vorgestellten grundlegenden Signalparameter von DVB-T, DAB und analogem Fernsehen machen deutlich, dass hier mit sehr großer Auflösebandbreite (RBW und VBW) gemessen werden muss. Bei DVB-T ergibt sich eine Messbandbreite von etwa 7,6 MHz im UHF-Bereich, bei Signalen im VHF-Bereich genügen 6,6 MHz. DAB-Blöcke sind mit 1,5 MHz-Bandbreite zu messen [WUS 04]. Auch das analoge TV-Signal sollte mit einer geeigneten Bandbreite gemessen werden. Die Tonsignale sind dabei gegebenenfalls separat zu erfassen. Moderne Spektrumanalysatoren bieten spezielle Kanalfilter, die für gängige Funktechniken optimierte Auflösebandbreiten zur Verfügung stellen.

Stehen diese großen Bandbreiten nicht zur Verfügung (viele ältere Geräte besitzen als Maximalwert eine RBW von 1 MHz), ergeben sich zwei alternative Möglichkeiten:

1. Man nutzt den bei modernen Analysatoren vorhandenen Channel-Power-Messmode, bei dem das vorhandene Spektrum mit kleiner Auflösebandbreite abgetastet wird und anschließend für einen vom Benutzer definierten Bereich durch Integration die gesamte Empfangsleistung des Kanals errechnet wird. Nachteil des Verfahrens ist der Zeitaufwand, denn es kann immer nur ein Kanal ausgemessen werden. Bei Vorhandensein von beispielsweise fünf DVB-T-Blöcken ist demnach ein fünfmaliges Wiederholen der Messung notwendig.
2. Eine andere Alternative bietet sich zumindest bei den rauschähnlichen Signalen (DVB-T und DAB) mit konstanter Leistungsdichte im Spektrum. Hier kann man das Signal auch schmalbandiger erfassen und anschließend mittels eines Korrekturfaktors, der sich aus der Bandbreite des zu messenden Signals und der äquivalenten Rauschbandbreite des verwendeten Selektionsfilters errechnet, auf den wahren Wert der vorhandenen Exposition schließen [BNetzA 03].

Als Detektor ist bei DVB-T und DAB ein RMS-Detektor (Effektivwertdetektor) zu wählen, da es bei Verwendung eines Peak-Detektors zu einer erheblichen Überbewertung der Exposition in der Größenordnung des Crestfaktors kommt. Bei analogem TV ist es gegebenenfalls günstiger, den Peak-Detektor zu verwenden, um so die Synchronspitzenleistung zu ermitteln und anschließend mittels eines geeigneten Reduktionsfaktors auf die vorhandene mittlere Exposition herunterzurechnen.

Wie bereits oben beschrieben, fehlen in den aktuell vorliegenden Messvorschriften, Normen und Normenentwürfen 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 erschien es notwendig und sinnvoll, im Rahmen von AP 2 vorliegenden Projektes geeignete Messverfahren und Geräteeinstellungen für die Erfassung von analogen und digitalen Fernseh- und Tonrundfunksignalen zu erarbeiten. Insbesondere musste geklärt werden, ob die oben angegebenen alternativen Messverfahren (Channel-Power-Messung, Messung mit geringer Auflösebandbreite und anschließender Hochrechnung) vergleichbare Ergebnisse liefern wie spektrale Messungen mit korrekter Auflösebandbreite. Von Interesse war 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. Zur Klärung dieser und noch weiterer messtechnischer Fragen werden im Kapitel II eingehende Untersuchungen durchgeführt.

I.4.4.5 Messdurchführung

Die Notwendigkeit einer Vorschrift für eine detaillierte Messdurchführung erwächst aus der Notwendigkeit, an einem räumlich ausgedehnten Messort das Maximum der Immission zu bestimmen, da gerade in Innenräumen die Immission örtlich sehr stark schwanken kann. Erfolgt die Messwertaufnahme lediglich an einem festen Punkt, sind Unterbewertungen der Immission von mehreren Größenordnungen (!) möglich.

Im Projekt „Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk-Basisstationen“ im Deutschen Mobilfunkforschungsprogramm (<http://www.deutsches-mobilfunk-forschungsprogramm.de>) wurden hierfür mit der Schwenkmethode, der Drehmethode und der Punktrastermethode verschiedene Maximierungstechniken eingehend auf ihre Anwendbarkeit für Immissionsmessungen unter besonderer Berücksichtigung von Messungen in Innenräumen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Schwenkmethode am besten für die Aufgabenstellung der messtechnischen Erfassung des Maximalwertes der Immission geeignet ist. Bei der Schwenkmethode wird das ganze Messvolumen mit einer handgeführten Messantenne abgetastet, wobei gleichzeitig die Vorzugsrichtung und die Polarisationsrichtung der Messantenne variiert werden. Der Schwenkbereich erstreckt sich vorrangig bis in ca. 1,75 m Höhe. Während des ganzen Suchvorgangs wird das Spektrum mit der „Maxhold“ Funktion des Messgerätes kontinuierlich erfasst. Es resultiert ein „Maxhold“ Spektrum, aus dem für jeden einzelnen Sendekanal die zugehörige Feldstärke abgelesen werden kann. Die Bewegung der Antenne muss bezogen auf die Sweeptime des Spektrumanalysators langsam erfolgen.

Mit der Schwenkmethode sind allerdings keine räumlichen Mittelwertbildungen der Immission, z.B. an den Punkten eines Messgitters, möglich, wie es etwa in [CEPT 03] beschrieben ist. Allerdings wurde in o.g. Projekt festgestellt, dass die Ergebnisse von solchen Mittelwertbildungen sehr stark von der verwendeten Mittelungsgeometrie und dem vorliegenden Expositionsszenario abhängen. Eine „allgemein gültige“ Geometrie, die für jedes Expositionsszenario anwendbar ist, konnte nicht gefunden werden. Deswegen wurde eingeschätzt, dass nicht eine Mittelwertbildung, sondern eine räumliche Maximalwerterfassung derzeit die am besten geeignete Erfassungsmethode für die messtechnische Immissionsbestimmung von hochfrequenten Funksendeanlagen ist.

Prinzipiell ist die Schwenkmethode sowohl für die Messung mit Breitbandsonden, als auch mit Spektrumanalysatoren geeignet.

I.4.4.6 Auswertung

Die sich an die Messung anschließende Auswertung umfasst im wesentlichen eine Umrechnung der originär mit dem Spektrumanalysator gemessenen Spannungs- bzw. Leistungspegel in die als Referenzwerte der einschlägigen Personenschutznorm gebräuchliche Feldstärke- oder Leistungsflussdichtewerte sowie eine Aufsummierung der Einzelimmissionen zu einer Gesamtimmission. Bei der Umrechnung sind die Antennenfaktoren der Messantenne sowie Kabeldämpfungen zu berücksichtigen. Um eine Auswertung nach der Messung zu vereinfachen, können bei vielen Geräten die Korrekturfaktoren für die Antenne und das

Kabel direkt in das Gerät eingegeben werden, so dass die Geräteanzeige z.B. hier direkt die elektrische Feldstärke ausgibt. Eine Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung, so wie z.B. in der 26. BImSchV gefordert, ist hier entbehrlich, da die Sendeleistung der analogen und digitalen Rundfunk-Sendeanlagen zeitlich nicht schwankt.

I.4.4.7 Dokumentation

Zur Dokumentation der Messungen ist ein Messbericht anzufertigen. Dieser sollte so aufbereitet sein, dass

- für den Auftraggeber das Ergebnis der Messungen klar und verständlich dokumentiert ist, und
- für Fachleute alle technischen und administrativen Informationen derart enthalten sind, dass das Vorgehen der Messung, die Rohergebnisse und die Auswertung der Messdaten nachvollziehbar sind.

Es sollten wenigstens folgende Angaben enthalten sein:

- Administrative Angaben,
- Gegenstand der Messung,
- Beschreibung der untersuchten Sendeanlage,
- Auswahl der Messpunkte,
- Verwendete Messgeräte,
- Messverfahren,
- Messergebnisse,
- Grenzwerte und Vergleich der Messergebnisse mit den Grenzwerten, und
- Messunsicherheit.

Vor allem bezüglich der Behandlung der Messunsicherheit bestehen unterschiedliche Ansätze. Hier muss grundsätzlich entschieden werden, ob

- die Messunsicherheit zum gemessenen Wert addiert wird (additive approach to uncertainty) oder, sofern z.B. eine maximale Messunsicherheit nicht überschritten wird, diese nicht extra vorgehalten werden muss (typisches Verfahren in der EMV-Messtechnik, shared risk approach to uncertainty);
- nur die gerätebedingte, oder auch die verfahrensbedingte Messunsicherheit (prinzipielles Messverfahren, Einfluss des Messenden, Reproduzierbarkeit usw.) einbezogen wird.

I.4.5 Eignung der verschiedenen Messverfahren

In Tabelle I.4.1 wird die Eignung der vorgestellten Messverfahren gegenüber den in Abschnitt I.4.2 definierten Anforderungen zusammengefasst.

Aus einer Übersicht vorhandener Verfahren wird ersichtlich, dass für vorliegende Aufgabenstellung primär frequenzselektive Messungen sinnvoll sind. Diese Verfahren weisen Vorteile vor allem bezüglich Empfindlichkeit und Frequenzselektivität auf, so dass sie vorrangig für Fein- bzw. Detailmessungen eingesetzt werden. Breitbandmessungen werden nur in unmittelbarer Nähe vom Sender vorrangig zu Überblickszwecken bzw. eingeschränkt auch für worst case Abschätzungen sinnvoll sein; sie haben dann vor allem Vorteile hinsichtlich Messaufwand und Qualifizierung des Personals.

Forschungsbedarf besteht vor allem hinsichtlich korrekter Einstellungen der Messparameter bei den frequenzselektiven Messungen, da hier die Gefahr einer Fehlerfassung der Immissionen aufgrund der neuartigen Signalstrukturen sehr groß ist.

Kriterium	Breitbandig (Breitbandgerät mit isotroper Sonde)	Frequenzselektiv (Spektrumanalysator / Messempfänger mit Antenne)
Empfindlichkeit	gering (typisch ab 1 V/m, selten auch schon ab 0,2 V/m)	hoch (im hier betrachteten Frequenzbereich etwa 60 dB μ V/m)
Frequenzselektivität	nicht vorhanden (es wird ein Wert angezeigt, der der Summe der Immissionen im spezifizierten Frequenzbereich der Sonde entspricht)	vorhanden (durch Wahl von Frequenzbereich und Auflösebandbreite RBW können die Immissionen durch einzelne Anlagen bzw. Kanäle beliebig voneinander oder von anderen Immissionen separiert werden)
Einbeziehung aller relevanter Anlagen	im Rahmen der Anzeigeschwelle (Mindestempfindlichkeit) gegeben; Trennung der Anteile der Anlage vor Ort von anderen Anlagen aber nicht möglich	vollständig gegeben
Grenzwertüberprüfung	Einschränkungen aufgrund nicht vorhandener Frequenzselektivität und beim Vorhandensein relevanter anderer, auslastungsabhängiger Immissionen (z.B. Mobilfunk-Basisstationen) wegen eingeschränkter Extrapolationsmöglichkeiten	vollständig geeignet
Aufwand	gering bis moderat (Preis der Messgeräte moderat, Messaufwand gering)	hoch bis sehr hoch (Preis der Messgeräte sehr hoch, Messaufwand hoch)
Praktikabilität: Messung nicht im Labor, sondern vor Ort	hoch (Messequipment für Innen- und Außeneinsatz geeignet, Umstellung von Mobiliar nicht zwingend erforderlich)	moderat (Messequipment für Innen- und Außeneinsatz geeignet, gewisse Einschränkungen durch Witterung beim Außeneinsatz, Umstellung von Mobiliar nicht zwingend erforderlich)
Maximalwertsuche möglich?	ja	ja
Genauigkeit	vergleichbar	
Qualifizierung des Messpersonals	gering (keine große Erfahrung des Messpersonals notwendig)	hoch (große Messerfahrung des Personals notwendig)
Eignung für Überblicksmessungen	hoch	gering (hoher Messaufwand)
Eignung für Feinmessungen	gering (fehlende Frequenzselektivität und Empfindlichkeit)	hoch
Isotrope Messung möglich?	ja (mit isotroper Sonde)	nur mit hohem Aufwand (sequentielle Messung in allen drei Raumrichtungen mit dipolartiger Antenne); mittlerweile auch erste Sonden verfügbar, die Umschaltung von drei orthogonalen Dipolen automatisch machen, dadurch Aufwandsreduzierung

Tabelle I.4.1 Vergleich der grundlegenden Messverfahren: Breitbandig gegenüber frequenzselektiv

I.5 Literaturstudie zu ähnlichen Projekten

In diesem Abschnitt sollen Projekte aus dem In- und Ausland vorgestellt werden, die sich ebenfalls mit der Ermittlung der Exposition der Bevölkerung bezüglich der Felder von Ton- und Fernseh Rundfunksendern befassen. Allerdings beschäftigen sich die bisher durchgeführten Untersuchungen in der Regel nur mit den Immissionen von analogen Sendern, da die digitale Technologie erst kürzlich in der Fläche eingeführt wurde (DAB) bzw. sich derzeit noch in der Einführungsphase befindet (DVB-T).

Viele Messprojekte in den letzten Jahren wurden durch den flächenhaften Ausbau des digitalen Mobilfunks angestoßen und haben daher häufig die Immissionen der Mobilfunksender im Fokus, so dass bei manchen Studien die Felder der Tonrundfunk- und TV-Sender nur nebenbei mit gemessen wurden. Insbesondere aufgrund der bei einigen Studien eindeutig auf die Nähe zu Mobilfunkanlagen ausgerichteten Messpunktauswahl können die Messergebnisse der Ton- und Fernseh Rundfunksender nicht mit besonders großer Aussagekraft bezüglich der typischen Exposition der Bevölkerung glänzen. Allerdings existieren einige Ausnahmen, bei denen durchaus aus den Messresultaten Rückschlüsse auf die mittlere Exposition durch Ton- und Fernseh Rundfunksender gezogen werden können.

I.5.1 Projekte im Ausland

Aus dem Ausland sind nur einige kleinere Messkampagnen bekannt, bei denen explizit die Exposition durch Ton- und Fernseh Rundfunksender erfasst wurde. Auch außerhalb Deutschlands konzentriert sich das öffentliche Interesse und dadurch auch die messtechnische Aktivität mehr auf die digitalen Mobilfunknetze. Die folgenden Untersuchungen aus den letzten Jahren sind typisch:

I.5.1.1 Messungen in den USA

Im Rahmen einer Untersuchung aus dem Jahr 1980 wurden Messungen in den 15 größten Städten der USA durchgeführt, um die Größenordnung der Felder von Ton- und Fernseh Rundfunksendern näher zu quantifizieren, denen die Bevölkerung ausgesetzt ist [TELL 80]. Man stellte dabei fest, dass 90 Prozent der betrachteten Bevölkerung einer Leistungsflussdichte unter $500 \mu\text{W}/\text{m}^2$ und 99 Prozent unter $10 \text{mW}/\text{m}^2$ ausgesetzt sind.

I.5.1.2 Messung der hochfrequenten Hintergrundbelastung in der Schweiz

Im Jahr 1999 wurden im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) frequenzselektive Messungen zur Erfassung der Hintergrundbelastung im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz unter besonderer Berücksichtigung der Mobilfunkbänder vorgenommen. Im Rahmen dieser Messungen wurde die hochfrequente Expositionssituation an vier Messpunkten im städtischen sowie an zwei Punkten im ländlichen Gebiet untersucht [MON 00]. Fünf Messpunkte befanden sich im Freien in Bodennähe, eine Messung wurde auf einer Dachterrasse durchgeführt. Die Messergebnisse wurden sowohl als

Summenwert als auch aufgeteilt nach Verursachergruppen angegeben. Die Summenfeldstärke im Frequenzbereich 30 MHz bis 1 GHz (ohne GSM 900) ergab an den sechs Messpunkten zwischen 0,06 und 0,38 Volt/m. Für belastbare Aussagen zur typischen Immission der Bevölkerung ist allerdings die Zahl der Messpunkte zu gering.

I.5.1.3 Messung der hochfrequenten Felder im Schweizer Kanton Schwyz

Eine ähnliche Erhebung wurde im Schweizer Kanton Schwyz im Jahr 2003 durchgeführt. Um sich einen besseren Überblick über die Situation der nichtionisierenden Strahlung auf dem Kantonsgebiet zu verschaffen, wurden von der Kantonsverwaltung umfangreiche Messprojekte vergeben. Im Rahmen eines Teilprojektes wurden an 21 Messpunkten im Freien, die auf verschiedene Gemeinden im Kanton verteilt waren, die dort vorhandene Exposition durch hochfrequente Felder erfasst [ASEB 03]. Auch hier wurden die Messergebnisse sowohl als Gesamtsumme als auch aufgeteilt nach Verursachergruppen angegeben. Die Summenimmission durch regionale Ton- und Fernsehrundfunksender lag zwischen 0,03 und 0,41 V/m. Zum Zeitpunkt der Messung wurden in der Region keine DVB-T-Sender betrieben. Auch der DAB-Rundfunk war im Kanton nicht flächendeckend vorhanden. Die Messergebnisse dienen der Kantonsverwaltung als Basiswert und eröffnen die Möglichkeit, die Messungen in einigen Jahren zu wiederholen, um z.B. Immissionsveränderungen durch die Umstellung auf digitale Sender zu erkennen.

I.5.1.4 Expositionsmessungen der französischen Regulierungsbehörde

In einem aktuellen Papier der französischen Regulierungsbehörde ANFR [ANF 04] wird über die Ergebnisse von regelmäßigen Feldstärkemessungen in Frankreich berichtet. Auch hier wird nicht nur die Summenexposition dargestellt, sondern es wird auch die Verteilung der Exposition auf die wichtigsten Verursachergruppen (Ton- und Fernsehrundfunk, Radar, Mobilfunk) verdeutlicht. Im Durchschnitt ergab sich bei 3838 Messungen (davon 2590 outdoor), die in den Jahren 2001 bis 2004 durchgeführt wurden, eine durchschnittliche Exposition bei analogen Fernsehsendern von etwa 0,8 Prozent vom Grenzwert nach EU-Ratsempfehlung [99/519/EG].

Expositionsmessungen bei DVB-T-Sendern werden in diesem Dokument nicht erwähnt.

I.5.1.5 Expositionsmessungen des englischen NRPB

Auch das britische National Radiological Protection Board (NRPB) hat in den letzten Jahren einige Expositionsmessungen im Hochfrequenzbereich durchgeführt und teilweise auf seiner Homepage (www.nrpb.org) publiziert. Als Beispiel sei hier eine Messkampagne in Leeds genannt, bei der die Immissionen nach Verursachern aufgegliedert dargestellt sind, so dass daraus auch die Exposition durch Ton- und Fernsehrundfunksender erkennbar wird [FUL 02]. Die Messungen ergaben an den acht untersuchten Punkten (Messpunkte im Freien und im Gebäude) Summenimmissionen zwischen 0,1 und 3,7 Prozent (bezogen auf die elektrische Feldstärke) der ICNIRP-Empfehlung. Der Anteil der Ton- bzw. Fernsehrund-

funksender an der Gesamtimmission lag zwischen 14 und 60 Prozent. Für belastbare Aussagen zur typischen Immission der Bevölkerung ist allerdings die Zahl der Messpunkte zu gering.

I.5.2 Projekte in Deutschland

In Deutschland wurden in den letzten Jahren einige Projekte durchgeführt, bei denen aufgrund der großen Zahl an Messpunkten belastbare statistische Aussagen zur typischen Exposition der Bevölkerung möglich werden.

I.5.2.1 Feldstärkemonitoring der BNetzA (EMF-Datenbank)

Die Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA) bietet auf Ihrer Homepage (www.bnetza.de) eine umfangreiche EMF-Plattform an, auf der neben Informationen über ortsfeste Funksendeanlagen auch eine sehr große Zahl von Messergebnissen hochfrequenter Exposition zugänglich sind. Es handelt sich hierbei um mehr als 2500 Messpunkte aus den Messkampagnen der BNetzA von 1996/97 bzw. 1999/2000. Die seit 2003 kontinuierlich durchgeführten Messungen (etwa 2000 Messpunkte jährlich) werden ebenfalls in die Datenbank eingepflegt. Die Messorte wurden teilweise durch die BNetzA selbst festgelegt, wobei diese meist besonderes Augenmerk auf die Nähe zu ortsfesten Funksendeanlagen legt. Die Messpunkte befinden sich im Freien an öffentlich zugänglichen Orten oder in Bereichen mit besonderem öffentlichen Interesse (z.B. Schulen, Kindergärten, Krankenhäuser). Der Rest der Messpunkte wird durch die Landesumweltministerien festgelegt.

Die BNetzA führt die Expositionsmessungen gemäß der Messvorschrift BNetzA MV 09/EMF/3 [BNetzA 03] durch und gibt für jeden Messpunkt leider jeweils nur die dort vorhandene Summenexposition an. Es ist also nicht möglich aus den Informationen der BNetzA-Datenbank quantitative Aussagen über die Exposition durch Ton- und Fernsehgrundfunksender zu erhalten.

I.5.2.2 Funkwellenmessprojekt Baden-Württemberg

Von Herbst 2001 bis Frühjahr 2003 wurde im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg eine umfangreiche Messkampagne durchgeführt, deren Zweck es war, genauere Informationen über die Immissionssituation der Bevölkerung Baden-Württembergs durch hochfrequente elektromagnetische Felder zu erhalten [MEN 04].

Um repräsentative Aussagen treffen zu können, wurde bei der Auswahl der Messpunkte ein

flächenorientierter Ansatz gewählt. Die Messpunkte befanden sich im Freien auf einem regelmäßigen Raster von 2 x 2 km, wobei große, besonders dicht besiedelte Teile von Baden-Württemberg abgedeckt wurden. Die insgesamt 895 Messpunkte lagen in den Regionen Heidelberg/Mannheim, Freiburg, Oberschwaben und im Großraum Stuttgart (siehe Bild I.5.1).

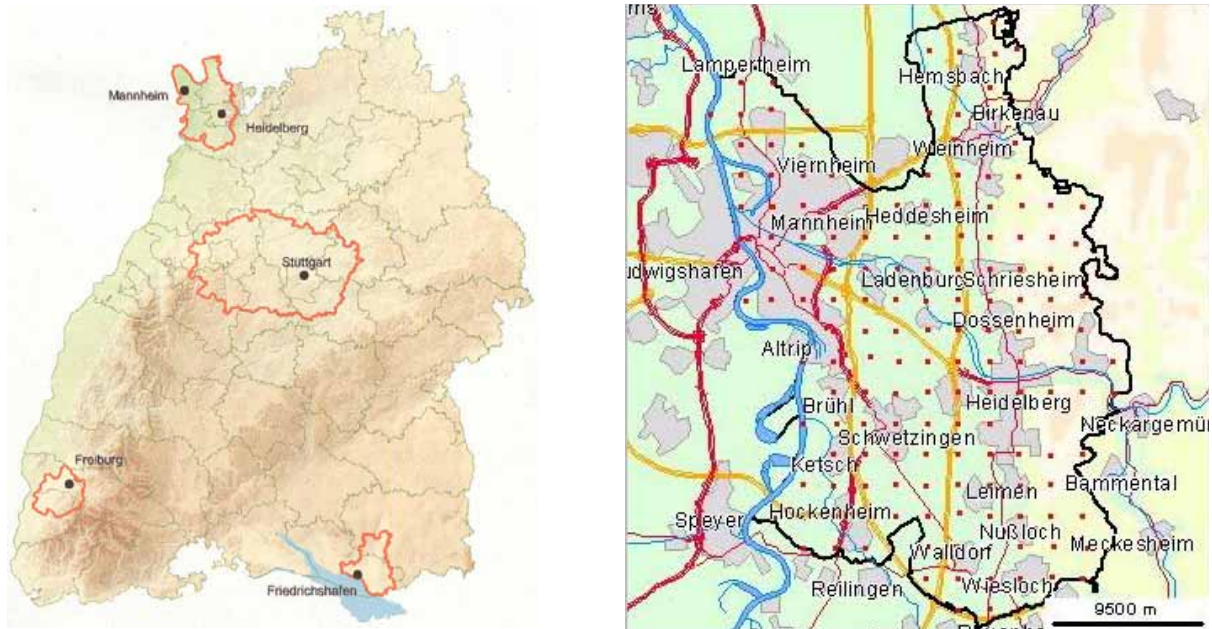


Bild I.5.1: Die vier Untersuchungsgebiete (links) und das Messpunktraster im Untersuchungsgebiet "Heidelberg/Mannheim" (rechts)

Die Durchführung der Messungen orientierte sich an Messvorschriften der BNetzA [BNetzA 03] und des Schweizer Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft [BUWAL 02]. Gemessen wurde in einer Höhe von 1,5 Meter über dem Boden, die lokalen Feldstärkeschwankungen wurden durch Anwenden der "Drehmethode" berücksichtigt. Die Bewertung der gefundenen Feldstärkewerte erfolgte nach den Vorgaben der 26. BImSchV [26. BImSchV] und der EU-Ratsempfehlung [99/519/EG]. Allerdings wird hier, im Unterschied zur EMF-Datenbank der BNetzA, nicht nur die Summenexposition angegeben, sondern es ist auch dargestellt, wie sich diese auf wichtige Funkdienste (LMK, UKW, TV, Mobilfunk) verteilt. Dadurch wird es möglich, aus den Resultaten dieser Untersuchung beispielsweise die an den Messpunkten herrschende durchschnittliche Exposition bezüglich UKW-Radio und TV herauszulesen.

Im Durchschnitt über alle 895 Messpunkte ergab sich eine feldstärkebezogene Summenimmission von etwa einem Prozent des Grenzwertes. Knapp die Hälfte dieser Exposition wird im Mittel von LMK-Signalen verursacht, während UKW bzw. TV mit 15 bzw. 18 Prozent an der mittleren Summenimmission beteiligt sind. Der Rest wird durch den Mobilfunk generiert (Bild I.5.2).

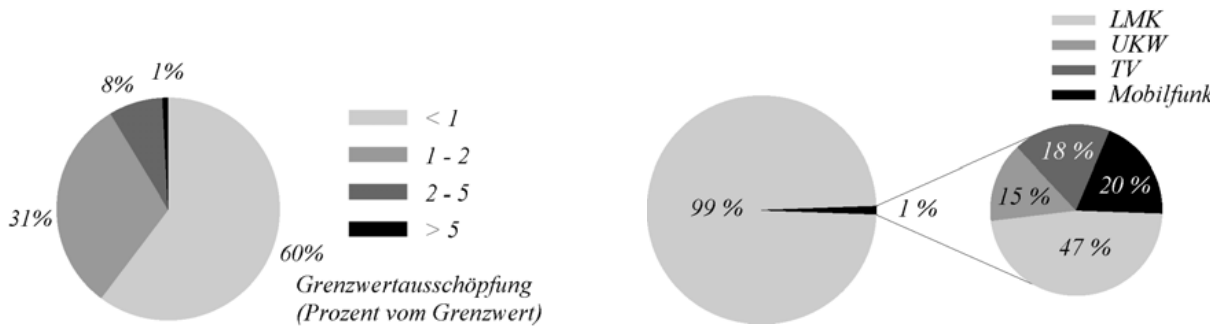


Bild I.5.2: Verteilung der Summenimmission (prozentuale Angabe bezogen auf die elektrische Feldstärke) aller Messpunkte (links) und Anteile der einzelnen Funkdienste an der mittleren Summenimmission (1 %)

Im Rahmen der Auswertung der Messergebnisse wurde auch untersucht, ob ein Unterschied in der prozentualen Immissionsverteilung zwischen den Messpunkten innerhalb von Ortschaften und solchen außerhalb existiert. Es zeigte sich dabei, dass außerorts im Mittel etwas größere Immissionen durch Rundfunk und TV feststellbar sind, als innerhalb von geschlossener Bebauung (Bild I.5.3).

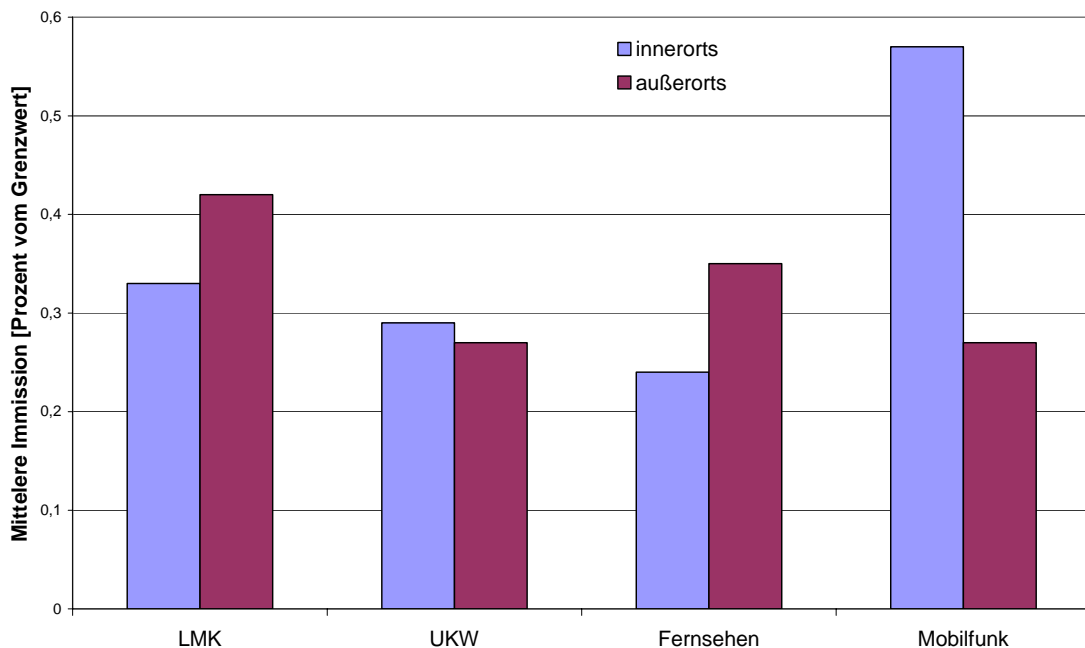


Bild I.5.3: Mittlere Immission der verschiedenen Funkdienste innerorts und außerorts im Vergleich (in % vom Grenzwert bezogen auf die elektrische Feldstärke)

Falls in einigen Jahren diese sehr aufwändige und qualitativ hochwertige Messkampagne wiederholt werden sollte, können durch Vergleich mit den vorliegenden Ergebnissen Schlüsse über die Veränderung der Größe hochfrequenter Immissionen bzw. der Immissionsverteilung in der Fläche gezogen werden. Derzeit ist jedoch nicht bekannt, ob diese Messkampagne in den nächsten Jahren wiederholt wird.

Ausführliche Ergebnisdarstellungen der Messkampagne und Hintergrundinformationen sind im Internet unter www2.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/funkwellen abrufbar.

I.5.2.3 EMF-Monitoring Bayern

Ein ähnliches Messprojekt zur Erfassung der Exposition der Bevölkerung bezüglich hochfrequenter Felder wird derzeit in Bayern durchgeführt [BER 04]. Auch hier wurde ein relativ großes Projekt aufgelegt, um sowohl die Summenimmission als auch die Immissionsverteilung auf die wesentlichen Funkdienste im Umfeld des Menschen zu ermitteln. Im Vergleich zum Funkwellenprojekt Baden-Württemberg sind jedoch beim "EMF-Monitoring Bayern" einige Unterschiede im Versuchsdesign und in der Messdurchführung bemerkenswert:

- Die 400 Messpunkte sind nicht nur auf einzelne Regionen des Landes beschränkt, sondern verteilen sich über die gesamte Fläche Bayerns.
- Die Messpunktauswahl erfolgte nicht durch ein festes Raster, vielmehr wurde ein reines Zufallsverfahren realisiert. Die Wahrscheinlichkeit für einen Messpunkt in einer beliebigen Kommune wurde hierbei mit deren Einwohnerzahl gewichtet, so dass besonders viele Messpunkte in die dicht besiedelten Regionen Bayerns zu liegen kamen (Bild I.5.4). Die Messpunkte befinden sich alle im Freien in Bodennähe in öffentlich zugänglichen Bereichen mit Wohnbebauung.
- Auch bezüglich der Durchführung der Expositionsmessungen ergibt sich ein wesentlicher Unterschied zum Funkwellenmessprojekt Baden-Württemberg: Statt mit Spektrumanalysator und geeigneten Messantennen eine Kurzzeitmessung durchzuführen (unter geeigneter Berücksichtigung der lokalen Feldstärkeschwankungen), wurde in Bayern ein eigens dafür konzipiertes automatisches Messsystem entwickelt, das den Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz frequenzselektiv mittels eines komplexen Antennenaufbaus abtastet und die vorhandenen hochfrequenten Felder automatisch erfasst. An jedem der 400 Messpunkte wurde eine Erfassung über einen Zeitraum von einer Stunde durchgeführt.
- Im Gegensatz zu Baden-Württemberg ist in Bayern eine Wiederholung der Messkampagne vorgesehen (voraussichtlich zwischen Herbst 2005 und Herbst 2006), so dass nach Abschluss des zweiten Durchlaufs gegebenenfalls vorhandene Veränderungen des Immissionsbildes aufgezeigt werden können.

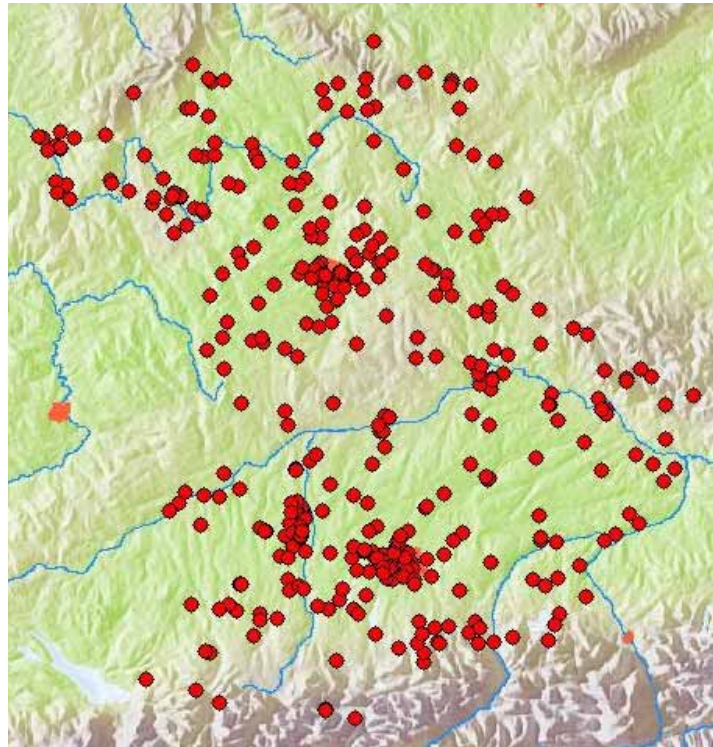


Bild I.5.4: EMF-Monitoring Bayern: Verteilung der 400 Messpunkte

Die erste Messkampagne des EMF-Monitorings wurde zwischen Juli 2002 und August 2003 durchgeführt. Grundlage für die Bewertung der Feldstärken waren die 26. BImSchV [26. BImSchV] und die EU-Ratsempfehlung [99/519/EG]. Die wesentlichen Ergebnisse der Messungen liegen bereits vor.

In Bayern ergab sich mit 0,54 Prozent vom Grenzwert (feldstärkebezogen) eine etwas geringere mittlere Summenimmission als in Baden-Württemberg (was eventuell durch die andersartige Messpunktauswahl und Messdurchführung bedingt sein kann). TV-Sender trugen mit 12 Prozent zu diesem Summenwert bei, der Anteil des UKW-Rundfunks an der mittleren Exposition lag bei etwa 41 Prozent [BER 04].

Es ist vorgesehen, die für das EMF-Monitoring Bayern gewählten Messpunkte im Raum München/Oberbayern bzw. im Großraum Nürnberg auch für die im Rahmen dieses Projektes geplanten Expositionsmessungen in diesen Regionen heranzuziehen, da zum einen durch die zufällige Auswahl der Punkte eine gute Repräsentativität gewährleistet wird und die Messpunkte ausschließlich in Bereiche mit Wohnbebauung gelegt wurden. Besonders viele Messpunkte finden sich außerdem in den Bereichen, in denen nach Start von DVB-T eine "portable indoor"-Versorgung sichergestellt wird, also die höchsten Feldstärkewerte zu erwarten sind. Da diese Messpunkte im Rahmen des EMF-Monitorings sehr gut durch Koordinatenangabe und Photos dokumentiert sind, kann damit der Aufwand für die Messpunktsuche für dieses Projekt deutlich verringert werden. Das Bayerische Landesamt für Umwelt hat sich bereiterklärt, die notwendigen Messpunktdaten zur Verfügung zu stellen.

I.5.2.4 Immissionsdatenbank Bayern

Im Rahmen eines Ende 2004 abgeschlossenen Projektes des Bayerischen Landesamtes für Umwelt zur Untersuchung der Immissionen von Mobilfunkanlagen wurde aus den Resultaten von 109 kleineren bzw. mittelgroßen Messkampagnen (hauptsächlich aus Bayern) eine umfangreiche Immissionsdatenbank erstellt, in der im Moment etwa 1250 Messpunkte dokumentiert sind [WUS 04-2]. An 166 Messpunkten wurde neben dem Mobilfunk auch die dort herrschende Immission, verursacht durch Tonrundfunk- und TV-Sender, ermittelt, wobei bereits auch schon einige Punkte mit DAB- bzw. DVB-T-Messergebnissen vorhanden sind. Die gefundenen Messwerte liegen zwischen 0,01 und 3,06 V/m. Angemerkt werden muss allerdings, dass bei der Auswahl der Messpunkte häufig die besondere Nähe zu Mobilfunksendern im Vordergrund stand und daher aus den Messergebnissen sicherlich keine belastbaren Informationen über die typische Exposition bezüglich Tonrundfunk- und Fernsehsender gewonnen werden können.

I.5.2.5 EMF-Messprojekt Berlin

Im Dezember 2004 wurden die Ergebnisse einer im Stadtgebiet von Berlin durchgeführten Messkampagne veröffentlicht [WUS 04-3]. Bei dieser Messkampagne wurden im Frühjahr 2004 an insgesamt 55 Messpunkten, die sich auf 25 Messorte in Berlin verteilen, umfangreiche Expositionsmessungen mit Schwerpunkt auf dem GSM- bzw. UMTS-Mobilfunk, durchgeführt (Bild I.5.5). Allerdings wurden an 46 der 55 Punkte auch die Felder gemessen, die dort durch Ton- und Fernsehrundfunksender erzeugt werden. Diese Messungen sind insbesondere deshalb interessant, da in Berlin zum Zeitpunkt der Messungen keine analogen TV-Sender, sondern nur noch digitale Anlagen in Betrieb waren, so dass hier erstmalig im größeren Stil Expositionsmessungen im Umfeld einer reinen digitalen TV-Versorgung vorgenommen wurden. Ein Vergleich der Immission von analogem TV mit DVB-T konnte allerdings natürlich nicht mehr durchgeführt werden.

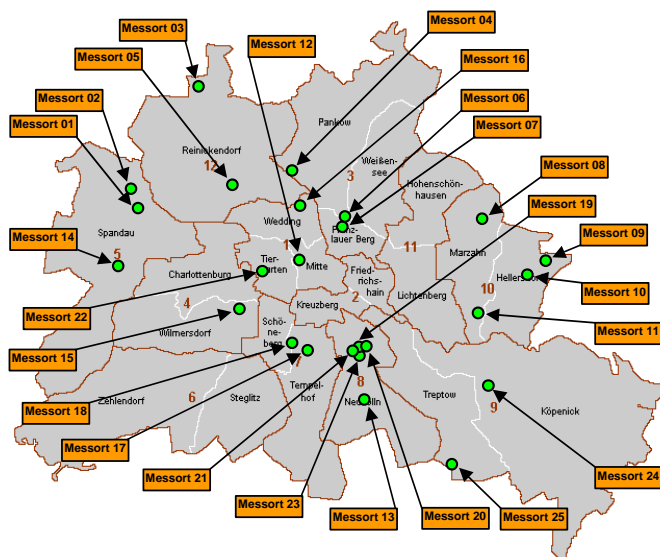


Bild I.5.5: EMF-Messprojekt Berlin: Verteilung der Messorte auf das Stadtgebiet

Leider sind die Resultate dieser Messkampagne nicht für repräsentative Aussagen verwendbar, da die Messpunkte auch hier nicht zufällig ausgewählt wurden, sondern ein deutlicher Schwerpunkt auf die Nähe zu Mobilfunksendeanlagen gelegt ist. Allerdings können die Erfahrungen die bei der technischen Durchführung der Expositionsmessungen im Frequenzbereich der DVB-T-Signale gewonnen wurden, nutzbringend in die für dieses Projekt geplanten Messungen einfließen.

Ergänzend sind in der folgenden Tabelle einige wesentliche Ergebnisse der Immissionsmessungen von Ton- und Fernseh Rundfunksendern aus der Berliner Messkampagne dargestellt.

Anzahl der untersuchten Messpunkte	46 Messpunkte
Größter Immissionswert	3,99 % vom Grenzwert (hauptsächlich erzeugt durch den Mittelwellensender Berlin-Britz)
Kleinster Immissionswert	0,07 % vom Grenzwert
Spannweite zwischen kleinster und größter Immission	Ca. 35 dB (Faktor 57)
Im Mittel vorhandene Immission	1,19 % vom Grenzwert
Verantwortlich für den größten Immissionsbeitrag	UKW/DAB/DVB-T an 35 Punkten Langwelle/Mittelwelle an 11 Punkten

Tabelle I.5.1: EMF-Messprojekt Berlin: Wichtige Ergebnisse der Messungen von Immissionen, verursacht durch Ton- und Fernseh Rundfunksender (Angaben in Prozent vom Grenzwert für die elektrische Feldstärke)

Ausführliche Ergebnisdarstellungen der Messkampagne und Hintergrundinformationen sind im Internet unter <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltratgeber/de/emf> abrufbar.

I.5.3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich bei Bewertung der in jüngster Zeit durchgeführten Messkampagnen festhalten, dass die Vergleichbarkeit der einzelnen Resultate nur teilweise gegeben ist, da häufig unterschiedliche Messverfahren angewendet wurden bzw. eine stark differierende Vorgehensweise bei der Messpunktauswahl eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse nicht mehr zulässt.

Im Moment existieren nur relativ wenig Ergebnisse von Feldstärkemessungen in der Umgebung von digitalen Rundfunksendern. Eine umfangreiche Vergleichsmessung der Immission vor und nach Umstellung von analogem TV zu DVB-T fehlt bisher gänzlich.

Nur die Messkampagnen in Baden-Württemberg und Bayern liefern aufgrund des gewählten Versuchsdesigns einige belastbare Informationen zur derzeitigen typischen Expositionssituation der Bevölkerung bezüglich Tonrundfunk- und Fernsehsendern. Veränderungen der Feldstärken durch die Einführung von DVB-T sind in beiden Untersuchungen (noch) nicht betrachtet worden.

I.6 Senderdichte und installierte Sendeleistungen

In diesem Abschnitt liegt der Schwerpunkt der Betrachtungen auf einem Vergleich der Senderdichte und der installierten Sendeleistungen zwischen der analogen und der digitalen terrestrischen Rundfunkübertragung.

Hierbei werden die Verbreitung von Tonrundfunk und Fernsehen getrennt voneinander untersucht. Im Rahmen der Umstellung auf DVB-T in Deutschland wird zunächst die terrestrische Fernsehübertragung betrachtet.

Im Anschluss daran wird hinsichtlich des digitalen terrestrischen Tonrundfunks, der bereits nahezu flächendeckend in Deutschland vorhanden ist, ein Vergleich bezüglich der Senderdichte und der installierten Sendeleistung mit dem bestehenden analogen UKW Rundfunknetz durchgeführt.

Um in diesem Zusammenhang morphographische sowie topologische Unterschiede, die direkten Einfluss auf zu untersuchenden Parameter haben, ausschließen zu können, wird der Vergleich beider Zustände jeweils anhand ein und derselben Region durchgeführt.

Die Angabe der relevanten Daten beruht auf öffentlichen Senderstandort- und Leistungsangaben sowie auf Informationen der Landesmedienanstalten.

I.6.1 Analoge und digitale terrestrische Fernsehübertragung

Bis etwa zum Jahr 2010 wird die bislang analoge terrestrische Fernsehübertragung in der gesamten Bundesrepublik Deutschland in mehreren Schritten durch eine digitale Verbreitungsweise ersetzt.

Diese Umstellung wird zunächst durch einen sogenannten inselförmigen Umstieg durchgeführt, der sich auf die Ballungszentren beschränkt. Gründe hierfür liegen unter anderem in der Nutzung des gemeinsamen Frequenzbandes, der Reduzierung der Netzinvestitionen, der Vermeidung von logistischen Problemen bei der Versorgung von Empfangsgebieten usw. (vgl. [DEU 00]).

Am 1.11.2002 fiel der Startschuss in der Region Berlin / Brandenburg, in der nach einer Übergangsphase die analoge terrestrische Fernsehübertragung bereits eingestellt ist.

Im folgenden Bild ist der derzeit geplante Umstieg von der analogen auf die digitale Fernsehübertragung für Deutschland zu sehen.

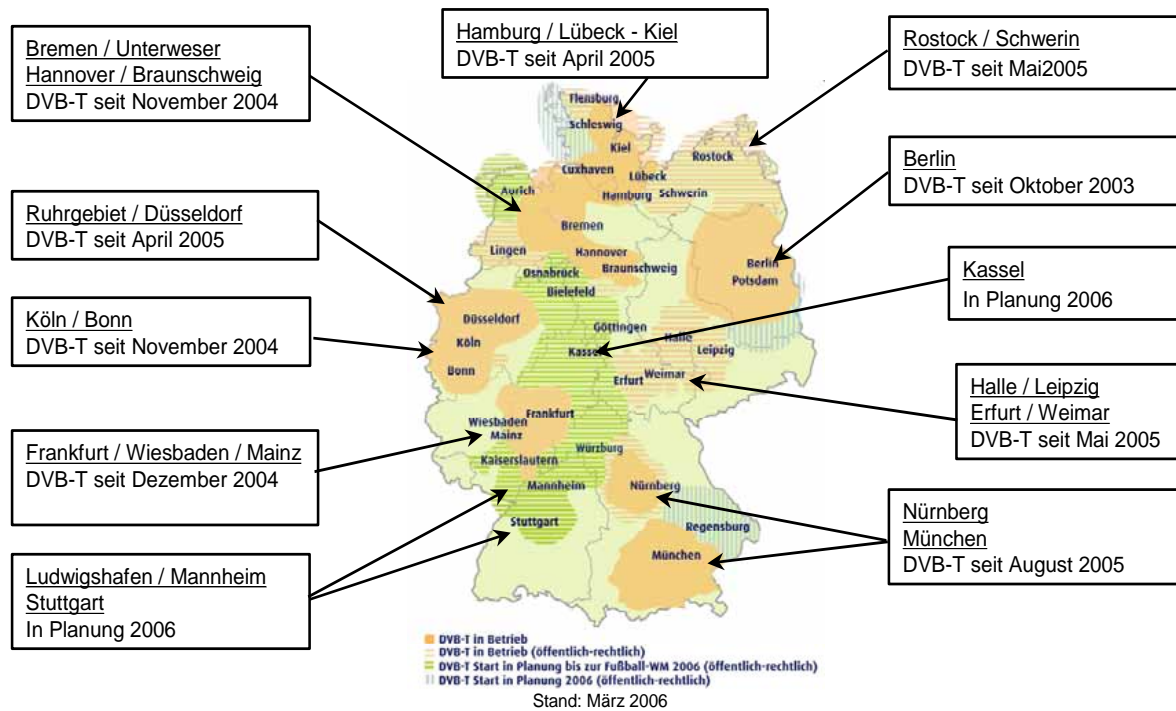


Bild I.6.1: Regionen und Zeitpläne für die Umstellung auf DVB-T in Deutschland, Stand März 2006 (siehe [UEB])

Damit ein Vergleich bezüglich der Senderdichte und der installierten Sendeleistungen der analogen gegenüber der digitalen terrestrischen Fernsehübertragung durchgeführt werden kann, wird eine Referenzfläche, auf die diese Parameter bezogen werden, benötigt. Da die Umstellung auf digitale terrestrische Fernsehverbreitung nur inselförmig und nicht flächendeckend vorgenommen wird, kann hierfür nicht ein gesamtes Bundesland, sondern nur das für den DVB-T Empfang prognostizierte Versorgungsgebiet herangezogen werden (vgl. Bild I.6.1).

Der Vergleich wird in den folgenden Abschnitten zunächst für die Regionen Nürnberg und München betrachtet, da hier die in den weiteren Arbeitspaketen folgenden Immissionsmessungen durchgeführt werden. Darüber hinaus werden anschließend zusätzlich noch zwei weitere Regionen untersucht, in denen die Simulcastphase, d.h. die parallele Ausstrahlung von analogem und digitalem Fernsehen, bereits vollständig abgeschlossen ist: Hierfür werden die Startinseln Berlin/Brandenburg bzw. Bremen/Unterweser betrachtet (vgl. Bild I.6.1).

I.6.1.1 DVB-T in Bayern

Im Bundesland Bayern existieren zwei Startinseln für die Umstellung auf digitales terrestrisches Fernsehen. Sowohl in der Region Nürnberg als auch in München / Südbayern wurde am 31. Mai 2005 die Simulcastphase gestartet. Nach einer Übergangszeit von drei Monaten wurde schließlich die analoge Verbreitung in den Regionen abgeschaltet.

Im folgenden Bild ist ein Überblick über die prognostizierten Empfangsgebiete für digitales Fernsehen in Bayern schematisch dargestellt.

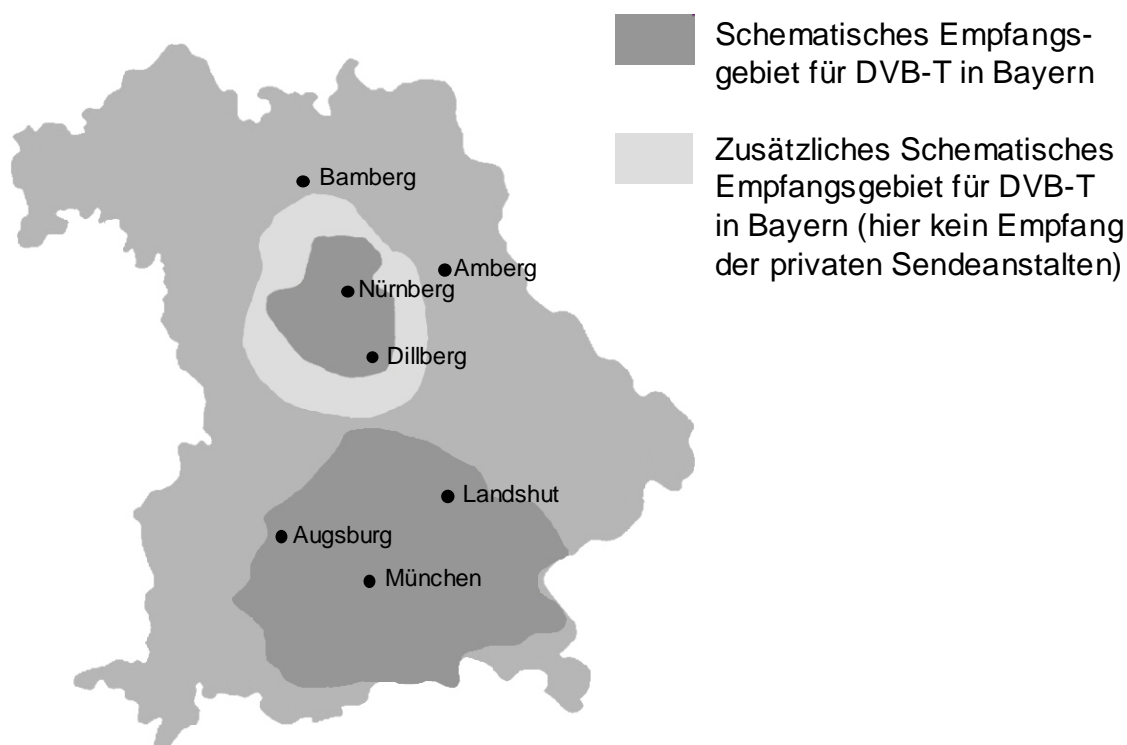


Bild I.6.2: Bundesland Bayern mit den schematischen Empfangsgebieten für DVB-T in den Regionen Nürnberg und München ab 31. Mai 2005

Auf die beiden Regionen wird im weiteren einzeln eingegangen, spezifische Besonderheiten werden aufgezeigt.

I.6.1.1.1 DVB-T Startinsel Nürnberg

Für die Region Nürnberg ist in Bild I.6.3 die für den angestrebten Vergleich herangezogene Referenzfläche, also das prognostizierte Empfangsgebiet für das terrestrische digitale Fernsehen, zu sehen. Hierin sind zunächst einmal die analogen Senderstandorte vor der Umstellung und die jeweils abgestrahlten Programme dargestellt.



Bild I.6.3: Analoges Sendernetz VOR der Umstellung auf Digital-Fernsehen in Nürnberg; für die öffentlich rechtlichen Programme sind nur die Grundnetzsender dargestellt

Das Senderkonzept der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten ist grundsätzlich anders als das der privaten Anbieter. Während sich diese auf eine Versorgung der Ballungsräume konzentrieren, müssen die öffentlich rechtlichen eine flächendeckende Versorgung der Bevölkerung sicher stellen.

Aus diesem Grund besteht das Sendernetz der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten neben Grundnetzsendern (vgl. Bild I.6.3) auch aus sogenannten Füllsendern bzw. Umsetzern. Mit diesen Begriffen sind Fernsehsender kleiner Leistung gemeint, welche die bei terrestrischer Übertragung entstehenden Versorgungslücken, z.B. in engen Tälern, schließen.

Zu beachten ist bei dem obigen Bild, dass zur besseren Übersichtlichkeit nur die Grundnetzsender abgebildet sind. In der betrachteten Region sind zusätzlich noch weitere 36 Füllnetzsenderstandorte der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten installiert. Diese werden jeweils aus einer Kombination von ARD, ZDF und Bayerischem Rundfunk betrieben.

Im Gegensatz hierzu zeigt das nachfolgende Bild die Situation nach der Umstellung auf digitales Fernsehen.

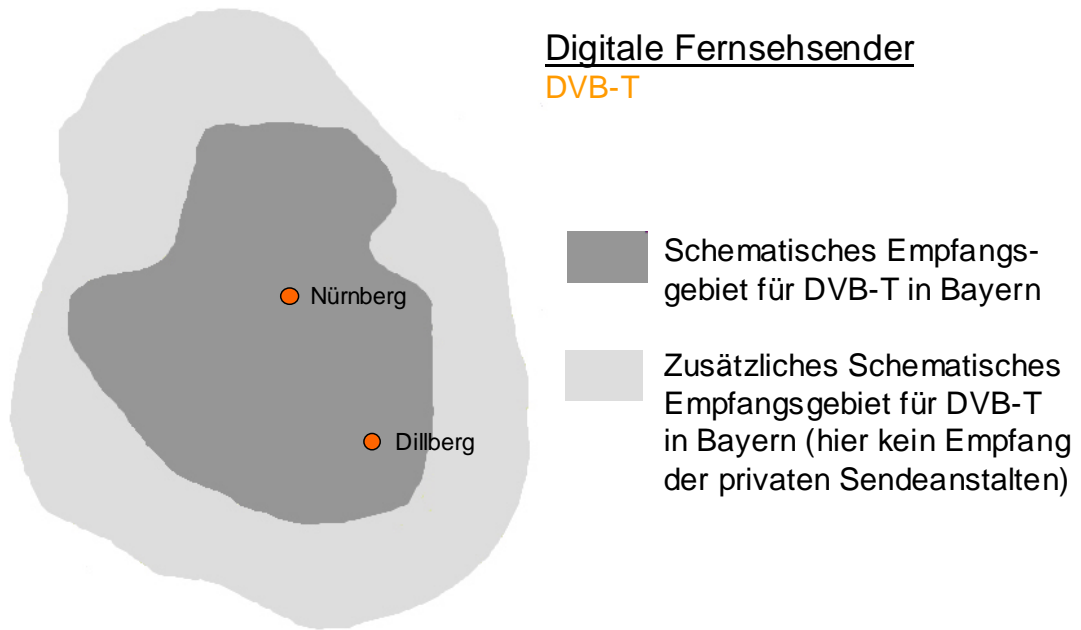


Bild I.6.4: Sendernetz NACH der Umstellung auf Digital-Fernsehen in der Region Nürnberg

Bei einem Vergleich der beiden Bilder scheint auf den ersten Blick eine deutliche Reduzierung der Senderanzahl sichtbar zu werden. Hierbei ist aber zu beachten, dass die Darstellung vor der Umstellung auf digitales Fernsehen nicht nur nach Senderstandorten, sondern auch nach Programmanbietern aufgeschlüsselt war. Bei Bild I.6.4 ist demgegenüber zu beachten, dass über einen digitalen Senderstandort mehrere Programmangebote abgestrahlt werden. Diese Vielzahl ist in folgendem Bild zu sehen.

Kanal 6 MUX 1	Kanal 34 MUX 2	Kanal 59 MUX 3	Kanal 66 MUX 4	Kanal 40 MUX 5	Kanal 60 MUX 6	Kanal 64 (Reserve)
	 <small>ZDF Infokanal</small>	 <small>www.br-alpha.de</small>				
	 <small>ZDF dokukanal</small>					
		 <small>hessen fernsehen</small>				

* MHP-Datendienst

Bild I.6.5: Programmmultiplexe und Kanalbelegung in der Region Nürnberg, Stand Dezember 2004

Es ist in Bild I.6.4 ferner zu beachten, dass der ZDF-, ARD- und BR-Multiplex (MUX 1 - 3) sowohl vom Sender in Nürnberg als auch vom Standort Dillberg abgestrahlt werden, während die Multiplexe der privaten Anbieter (MUX 4 - 6) nur vom Senderstandort in Nürnberg verbreitet werden. Hierdurch ergibt sich auch die unterschiedliche Versorgungssituation.

Für einen Vergleich der Senderdichte kann an dieser Stelle nur festgehalten werden, dass die analoge Verbreitung der privaten Programmanbieter vollständig zum Start von DVB-T abgeschaltet wird.

In der nachfolgenden Tabelle ist ein Überblick über die gesamt installierten Sendeleistungen der einzelnen Standorte *vor und nach* der Umstellung auf digitales Fernsehen in der hier betrachteten Region zu sehen.

Senderstandort	VOR der Umstellung auf DVB-T				NACH der Umstellung auf DVB-T			
	Anzahl d. Progr.	Spitzenleistung ERP [kW]	mittlere Leistung ERP [kW]	Technik	Anzahl d. Progr.	Spitzenleistung ERP [kW]	mittlere Leistung ERP [kW]	Technik
Nürnberg	7	895,3	331,3	analog	24		185,0	digital
Dillberg	1	100,0	39,8	analog	12		125,0	digital
Ansbach	1	0,05	0,019	analog				

Tabelle I.6.1: Vergleich der installierten Sendeleistungen, Senderstandorte und Programme VOR und NACH der Umstellung auf digitales terrestrisches Fernsehen in der Region Nürnberg.

In der Tabelle ist folgender wichtiger Zusammenhang zu beachten:

In der Wittsmoorliste [WITT 04] wird der *analoge* Leistungsbezugswert als *Synchronspitzenleistung* (Leistung im Puls für die Zeilensynchronisation) und der *digitale* als *Effektivwert* der Gesamtsendeleistung angegeben. Um die installierten Sendeleistungen besser vergleichen zu können, wird die analoge Synchronspitzenleistung zunächst in eine Effektivleistung umgerechnet. Da diese vom übertragenden 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.

Die folgende Tabelle zeigt eine Gesamtbetrachtung der installierten Sendeleistungen in der Region Nürnberg.

Nürnberg	VOR der Umstellung auf DVB-T	NACH der Umstellung auf DVB-T
Anzahl der Programme	7	24
mittlere Sendeleistung ERP [kW]	369,7	310
Technik	analog	digital

Tabelle I.6.2: Vergleich der gesamten installierten mittleren Sendeleistungen und Programmanzahl VOR und NACH der Umstellung auf DVB-T in der Region Nürnberg.

Laut obiger Tabelle geht in der Region Nürnberg die Einführung des digitalen Fernsehens mit einer deutlichen Vergrößerung des Programmangebotes auf der einen und auf der anderen Seite mit einer Reduzierung der mittleren installierten Sendeleistung einher. Da sich aus einem Beispiel keine allgemeingültige Aussage ableiten lässt, wird im Folgenden die Startregion Südbayern betrachtet.

I.6.1.1.2 DVB-T Startinsel München / Südbayern

Als Bezugsfläche für den Vergleich in der Region München / Südbayern gilt auch hier wieder das prognostizierte Versorgungsgebiet für den Empfang von digitalem Fernsehen (vgl. Bild I.6.2). Die anschließenden Grafiken zeigen die verschiedenen Senderstandorte mit den ausgestrahlten Programmen *vor* bzw. *nach* der Umstellung auf die digitale terrestrische Übertragung.

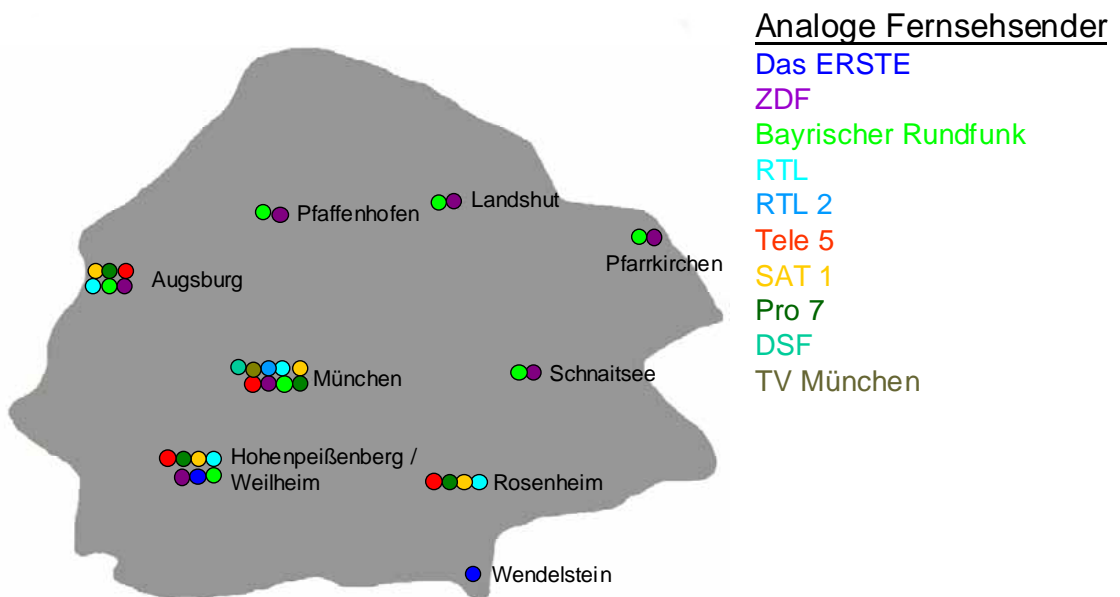


Bild I.6.6: Analoges Sendernetz VOR der Umstellung auf Digitales terrestrisches Fernsehen in der Region München, für öffentliche rechtliche Programme sind nur die Grundnetz-sender dargestellt

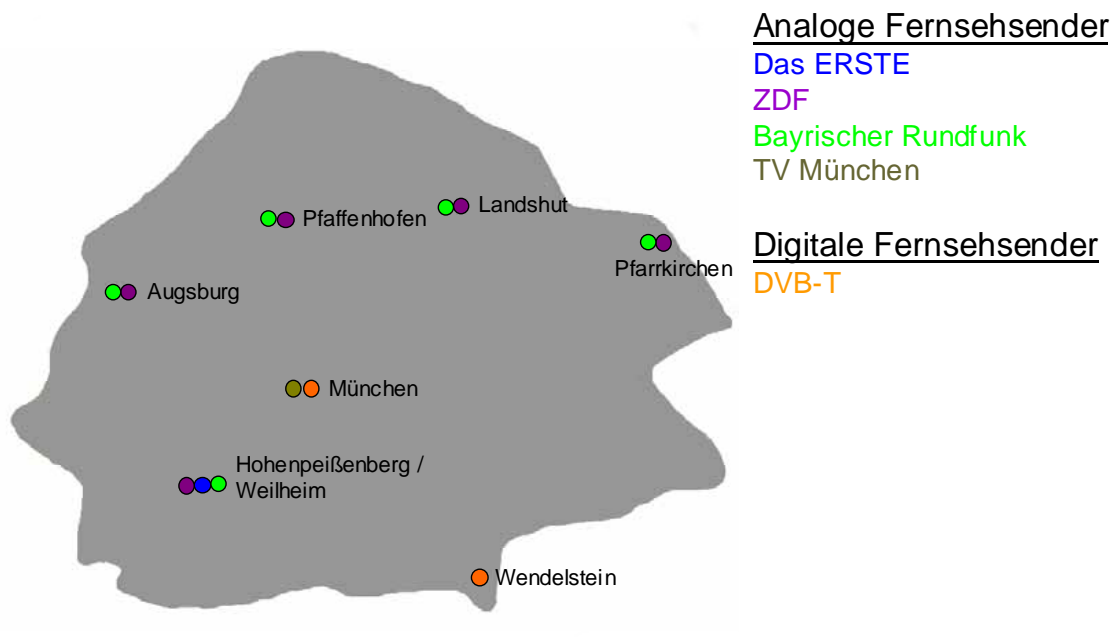


Bild I.6.7: Sendernetz NACH der Umstellung auf Digitales terrestrisches Fernsehen in der Region München, für öffentlich rechtliche Programme sind nur die Grundnetzsender dargestellt

Ein Vergleich der Bilder I.6.6 und I.6.7 zeigt, dass die analoge Verbreitung der Programme der privaten Fernsehanstalten in der gesamten Region vollständig eingestellt wird. Darüber hinaus fällt auf, dass in den Randbereichen des neuen digitalen Versorgungsgebietes die analogen Sender der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten weiter betrieben werden, so dass hier ein Empfang von beiden Übertragungsvarianten (analog und digital) möglich ist. Dies liegt darin begründet, dass über das Prognosegebiet für den Empfang von digitalem Fernsehen hinaus die weiterhin analoge terrestrische Versorgung mit dem existierenden Sendernetz sichergestellt werden muss.

Ferner ist erneut die Problematik der Sendernetzstruktur zwischen den privaten und den öffentlich rechtlichen Anbietern zu beachten. Zur besseren Übersichtlichkeit sind auch hier nur die Grundnetzsender abgebildet. In der betrachteten Region sind zusätzlich noch weitere 30 analoge Füllsenderstandorte der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten installiert.

Über die digitalen Senderstandorte wird in der Region München folgendes Programmangebot verbreitet:

Kanal 10	Kanal 35	Kanal 56	Kanal 34	Kanal 48	Kanal 66	Kanal 64 (Reserve) ^{***}
Das Erste®	ZDF	BAYERISCHES FERNSCHEN	RTL	SAT.1	TELE 5	
PHOENIX	Bsat ZDFinfokanal	alpha	RTL	7	EUROSPORT	
arte	KIKA ZDFdokukanal	SÜDWEST Fernsehen	VOX			
	ZDFdigitext*	hr	super CUB	N24	vodafone** Telefonie-Präferenznummer 0187 T-Systems**	

- * MHP-Datendienst
- ** Mediendienste
- *** Reservekanal (nur für Standort München)

Bild I.6.8: Digitale Programmmultiplexe der einzelnen Kanäle in der Region München, Stand Dezember 2004

In der nachfolgenden Tabelle ist ein Überblick über die gesamt installierten Sendeleistungen der einzelnen Standorte *vor* und *nach* der Umstellung auf digitales Fernsehen in der hier betrachteten Region zu sehen. In Fettschrift sind diejenigen Standorte gekennzeichnet, bei denen sich nach der Umstellung auf DVB-T Änderungen ergeben haben.

Senderstandort	VOR der Umstellung auf DVB-T				NACH der Umstellung auf DVB-T			
	Anzahl d. Progr.	Spitzenleistung ERP [kW]	mittlere Leistung ERP [kW]	Technik	Anzahl d. Progr.	Spitzenleistung ERP [kW]	mittlere Leistung ERP [kW]	Technik
Augsburg	6	842,1	311,6	analog	2	820	303,4	analog
Hohenpeißenb. / Weilheim	7	754,0	279,0	analog	3	750	277,5	analog
Landshut	2	94,0	34,8	analog	2	94,0	34,8	analog
München	9	438,5	162,3	analog	24		520,0	digital
Pfaffenhofen	2	920,0	340,4	analog	2	920,0	340,4	analog
Pfarrkirchen	2	440,0	162,8	analog	2	440,0	162,8	analog
Rosenheim	4	0,8	0,3	analog				
Schnaittsee	2	860,0	318,2	analog				
Wendelstein	1	100,0	39,8	analog	22		525,0	digital

Tabelle I.6.3: Vergleich der installierten Sendeleistungen, Senderstandorte und Programme VOR und NACH der Umstellung auf digitales terrestrisches Fernsehen in der Region München.

Bei den Angaben in der obigen Tabelle ist wiederum zu beachten, dass die analoge mittlere Sendeleistung hierbei 39,8% der Spitzenleistung entspricht.

Die folgende Tabelle zeigt eine Gesamtbetrachtung für die hier betrachtete Region.

München	<i>VOR</i> der Umstellung auf DVB-T	<i>NACH</i> der Umstellung auf DVB-T
Anzahl der Programme	9	24
mittlere Sendeleistung ERP [kW]	1648,0	2163,9
Technik	analog	Digital + Analog

Tabelle I.6.4: Vergleich der gesamten installierten mittleren Sendeleistungen und Programmanzahl VOR und NACH der Umstellung auf DVB-T in der Region München.

Laut obiger Tabelle geht in der Region Südbayern die Einführung des digitalen Fernsehens mit einer deutlichen Vergrößerung des Programmangebotes auf der einen und auf der anderen Seite mit einer Erhöhung der mittleren installierten Sendeleistung einher. Bei der Verteilung der installierten analogen Sendeleistung ist zu beachten, dass sie nicht homogen über den gesamten Versorgungsraum für DVB-T (portable indoor, portable outdoor, fixed antenna) verteilt ist. Die weiterhin analogen Sender befinden sich ausschließlich in den Außenbereichen („fixed antenna“ Region). In den Gebieten „portable indoor“ und „portable outdoor“ werden die analogen Sender vollständig abgeschaltet.

1.6.1.1.3 Zusammenfassung für die Startinseln in Bayern

Zusammenfassend für die oben betrachteten Startinseln bezüglich der Einführung von digitalem terrestrischen Fernsehen in Bayern kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die analoge Verbreitung der privaten Programme im Zuge der Umstellung komplett eingestellt wird. Ferner wird durch die Umstellung das Programmangebot in beiden betrachteten Regionen vergrößert. Darüber hinaus hat ein Vergleich bezüglich der Senderdichte und der insgesamt installierten Sendeleistungen vor bzw. nach der Einführung der digitalen terrestrischen Übertragung gezeigt, dass keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden können.

1.6.1.2 DVB-T in der Region Berlin / Brandenburg

In der Region Berlin / Brandenburg wurde die gemeinsame Verbreitung von digitalen und analogen Fernsehsignalen bereits am 4.10.2003 beendet. Als Bezugsfläche wird für den folgenden Vergleich erneut die Prognosefläche für den digitalen Fernsehempfang herangezogen. Darüber hinaus werden noch Aussagen getroffen, die sich auf die gesamte Fläche Berlin / Brandenburg beziehen.

In der anschließenden Grafik sind zunächst einmal die verschiedenen Senderstandorte vor dem Beginn der Umstellung auf digitale terrestrische Fernsehübertragung dargestellt. Zudem beinhaltet sie für die öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten noch die Information, ob es sich bei dem Standort um einen Grundnetzsender oder Füllsender handelt. Es ist ferner zu

beachten, dass zur besseren Übersicht die Standorte der beiden Fernsehanstalten SFB und ORB bereits als RBB zusammengefasst sind. Diejenigen Senderstandorte, die sich außerhalb des prognostizierten digitalen Versorgungsgebietes befinden, sind in den folgenden Bildern in grauer Schrift dargestellt.

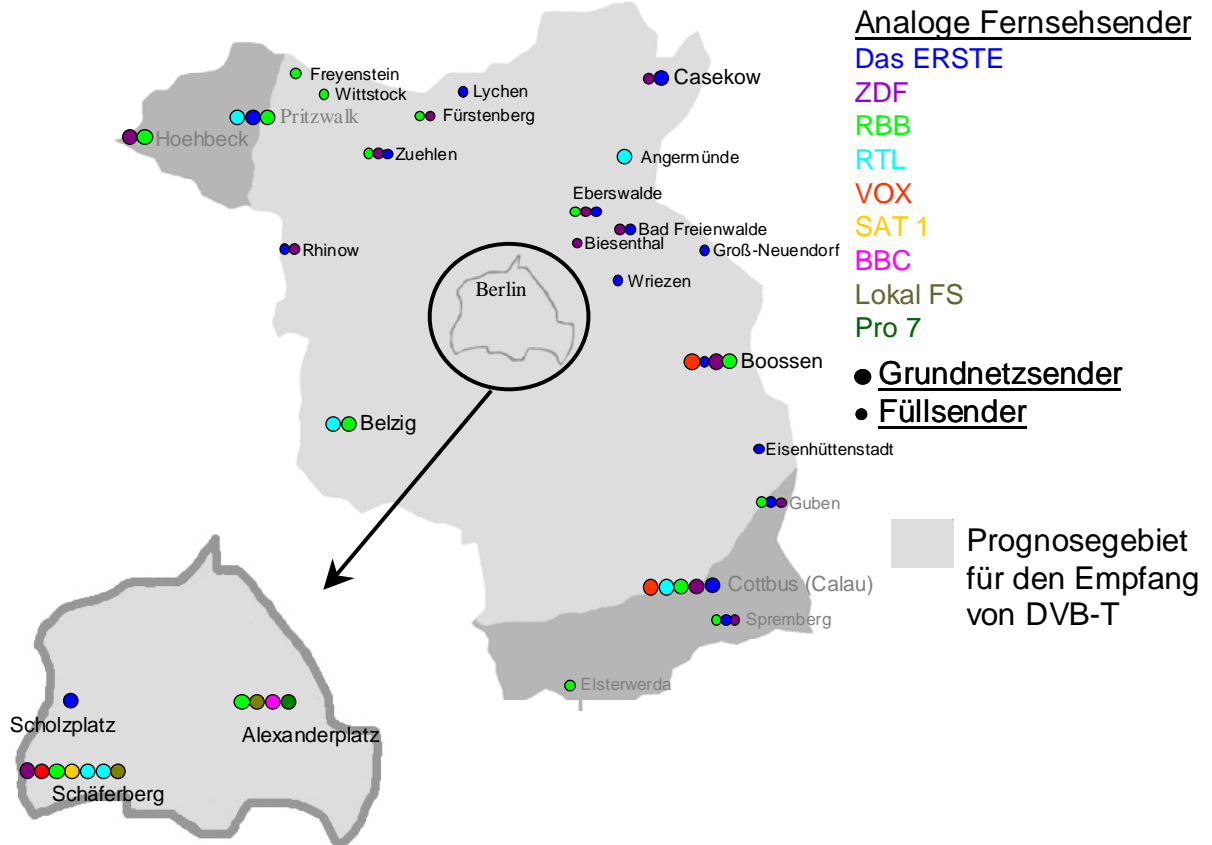


Bild I.6.9: Analoges Sendernetz VOR der Umstellung auf digitales terrestrisches Fernsehen in der Region Berlin / Brandenburg

Das obige Bild zeigt wieder sehr deutlich den Unterschied zwischen der Fernsehübertragung der privaten Programmanbieter im Gegensatz zu der der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten. Da die privaten Anbieter keine flächendeckende Versorgung der Bevölkerung sicher zu stellen haben, ist die terrestrische Ausstrahlung auf die Ballungszentren der Region konzentriert.

Das folgende Bild zeigt einen Überblick über die Senderstandorte *nach* der Umstellung auf die digitale Verbreitung.

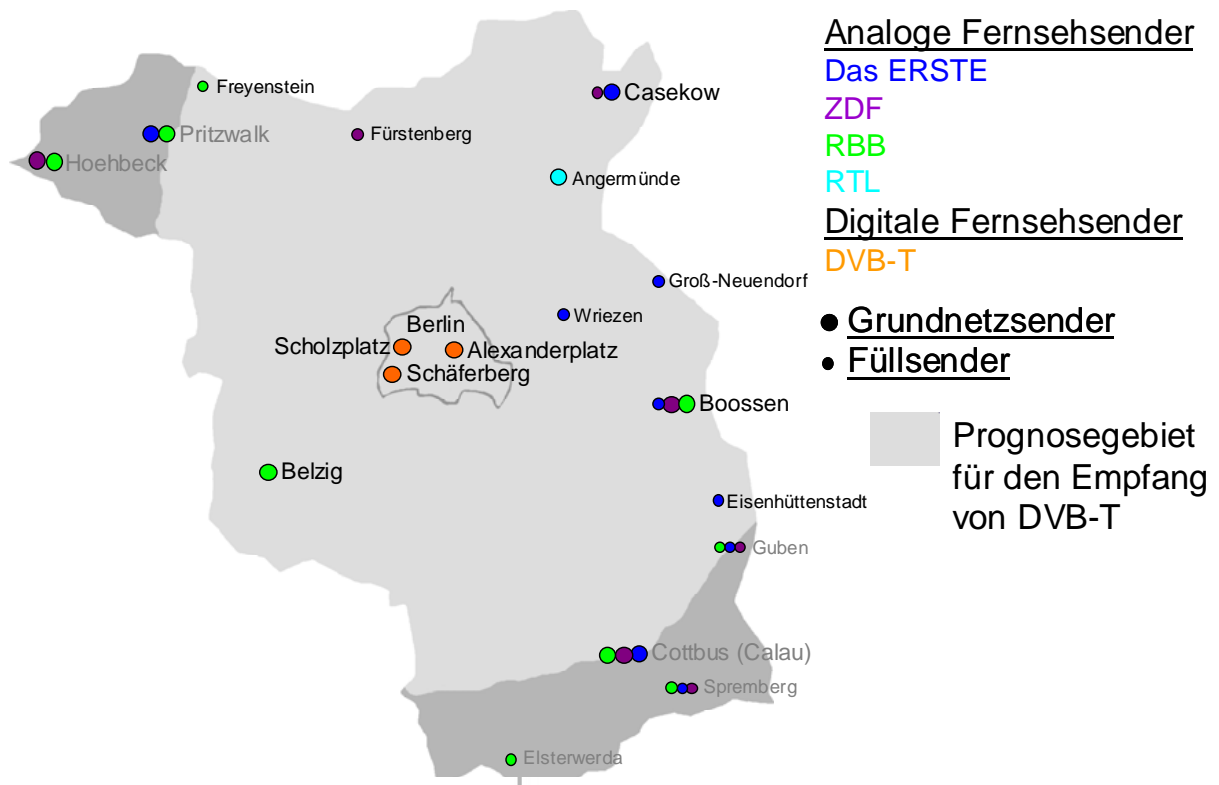


Bild I.6.10: Sendernetz NACH der Umstellung auf digitale terrestrische Fernsehübertragung in der Region Berlin / Brandenburg

Ein Vergleich der Bilder der Fernsehsenderstandorte vor bzw. nach der Umstellung auf digitales Fernsehen in der Region Berlin / Brandenburg liefert folgende drei Grundaussagen:

- Die analoge Verbreitung der Programme der privaten Fernsehanstalten ist in der gesamten Region eingestellt (unter Vernachlässigung des Sonderfalls Angermünde).
- Im Zuge der Umstellung auf digitales Fernsehen sind bis Januar 2005 insgesamt 14 Füllsender der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten, die alle im digitalen Empfangsgebiet liegen, abgeschaltet worden.
- In den Randbereichen bzw. Außenbereichen des neuen digitalen Versorgungsgebietes werden die analogen Sender der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten weiter betrieben, so dass hier ein Empfang von beiden Übertragungsvarianten möglich ist.

Ferner ist im obigen Bild zu beachten, dass über einen digitalen Senderstandort nicht nur ein Programm abgestrahlt wird. In Berlin / Brandenburg werden zur Zeit 28 Programme auf insgesamt 7 Kanälen digital verbreitet (vgl. Bild I.6.11).

5	7	25	27	33	44	56
						
						
						
						

* MHP-Datendienst

Bild I.6.11: Programmangebot und Kanalbelegung von DVB-T in der Region Berlin/Brandenburg, Stand Dezember 2004

In der nachfolgenden Tabelle ist ein Überblick über die gesamt installierten Sendeleistungen der einzelnen Senderstandorte vor und nach der Umstellung auf digitales Fernsehen in der hier betrachteten Region zu sehen.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass wie auch schon bei der Region München bei der Betrachtung der obigen Bilder deutlich wird, dass eine allgemeingültige Aussage bezüglich der installierten Sendeleistungen vor und nach der Umstellung auf DVB-T in der Region Berlin / Brandenburg nicht ohne Einschränkungen getroffen werden kann. Dies liegt daran, dass in einigen Regionen die analoge parallel zu der digitalen Fernsehübertragung existiert. Dieser Sachverhalt hat die direkte Konsequenz, dass es keine gemeinsame Bezugsfläche für den Vergleich gibt, was auch eine direkte Folge der inselförmigen Umstellung ist.

Die mittlere Leistung des analogen Fernsehsignals wird hier wiederum mit einem Faktor von 39,8% bezüglich der Spitzenleistung angenommen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Senderstandorte bezüglich der drei Regionen Berlin, Brandenburg und dem Prognosegebiet für den Empfang des digitalen Fernsehens getrennt gruppiert sind.

In Fettschrift sind diejenigen Standorte gekennzeichnet, bei denen sich nach der Umstellung auf DVB-T Änderungen ergeben haben.

Senderstandort	VOR der Umstellung auf DVB-T				NACH der Umstellung auf DVB-T				
	Anzahl d. Progr.	Spitzenleistung ERP [kW]	mittlere Leistung ERP [kW]	Technik	Anzahl d. Progr.	Spitzenleistung ERP [kW]	mittlere Leistung ERP [kW]	Technik	
Berlin / Brandenburg					Berlin / Brandenburg				
Berlin					Berlin				
Alexanderplatz	3	1471,000	544,270	analog	28		310,000	digital	
Schäferberg	7	894,100	330,817	analog	28		230,000	digital	
Scholzplatz	1	100,000	37,000	analog	12		30,000	digital	
Brandenburg					Brandenburg				
Innerhalb des Prognosegebiet					Innerhalb des Prognosegebiet				
Angermünde	1	0,900	0,333	analog	1	0,900	0,333	analog	
Bad Freienwalde	2	0,099	0,037	analog					
Belzig	2	103,000	38,110	analog	1	100,000	37,000	analog	
Biesenthal	1	1,100	0,407	analog					
Boossen	4	211,100	78,107	analog	3	210,000	77,700	analog	
Casekow	2	100,955	37,353	analog	2	100,955	37,353	analog	
Eisenhüttenstadt	1	0,500	0,185	analog	1	0,500	0,185	analog	
Eberswalde	3	0,425	0,157	analog					
Freyenstein	1	0,010	0,004	analog	1	0,010	0,004	analog	
Fürstenberg	2	2,200	0,814	analog	1	1,100	0,407	analog	
Groß Neuendorf	1	0,603	0,222	analog	1	0,603	0,222	analog	
Lychen	1	0,950	0,352	analog					
Rhinow	2	1,300	0,481	analog					
Wittstock	1	0,295	0,109	analog					
Wriezen	1	0,282	0,104	analog	1	0,282	0,104	analog	
Zuehlen	3	2,950	1,092	analog					
Außerhalb des Prognosegebiet					Außerhalb des Prognosegebiet				
Cottbus	5	1406,500	520,405	analog	3	1392,000	515,040	analog	
Elsterwerda	1	2,000	0,740	analog	1	2,000	0,740	analog	
Guben	3	0,075	0,028	analog	3	0,075	0,028	analog	
Hoebeck	2	520,000	192,400	analog	2	520,000	192,400	analog	
Pritzwalk	3	150,000	55,500	analog	2	100,000	37,000	analog	
Spremberg	3	0,096	0,036	analog	3	0,096	0,036	analog	

Tabelle I.6.5: Vergleich der installierten Sendeleistungen, Standorte und Programme VOR und NACH Umstellung auf DVB-T in der Region Berlin / Brandenburg.

Eine Zusammenfassung getrennt für die drei hier betrachteten Gebiete (Berlin, Brandenburg und Prognosegebiet) ist in den folgenden Tabellen dargestellt.

Berlin	VOR der Umstellung auf DVB-T	NACH der Umstellung auf DVB-T
Anzahl der Programme	9	28
mittlere Sendeleistung ERP [kW]	912,1	570
Technik	analog	digital

Tabelle I.6.6: Vergleich der gesamten installierten mittleren Sendeleistung und Programmangebot VOR und NACH der Umstellung auf DVB-T auf das Stadtgebiet Berlin bezogen

Prognosegebiet	VOR der Umstellung auf DVB-T	NACH der Umstellung auf DVB-T	
Anzahl der Programme	5-9	28	3
mittlere Sendeleistung ERP [kW]	1069,95	570	153,49
Technik	analog	digital	analog

Tabelle I.6.7: Vergleich der gesamten installierten mittleren Sendeleistung und Programmangebot VOR und NACH der Umstellung auf DVB-T auf das Prognosegebiet bezogen

Berlin / Brandenburg (gesamt)	VOR der Umstellung auf DVB-T	NACH der Umstellung auf DVB-T	
Anzahl der Programme	5-9	25	3
mittlere Sendeleistung ERP [kW]	1839,1	570	898,6
Technik	analog	digital	analog

Tabelle I.6.8: Vergleich der gesamten installierten mittleren Sendeleistung und Programmangebot VOR und nach der Umstellung auf DVB-T auf die gesamte Region Berlin / Brandenburg bezogen

Wie oben bereits beschrieben ist es auf Grund der fehlenden Bezugsfläche nicht möglich einen allgemeingültigen Faktor bezüglich der Änderung der installierten Sendeleistung durch die Umstellung auf digitales Fernsehen in der Region Berlin / Brandenburg anzugeben. Werden aber die Ergebnisse für die drei hier getrennt voneinander betrachteten Regionen gesehen, kann eine Tendenz ausgemacht werden. So ist in allen drei Regionen die mittlere installierte Sendeleistung reduziert worden.

Ausgenommen von dieser Betrachtungsweise wurde bislang die Programmanzahl. Sie hat sich nach der Umstellung auf digitales Fernsehen erhöht. Aus diesem Grund wird im Folgenden die installierte Sendeleistung eines Programms im Hinblick auf die drei oben angegebenen Bezugsflächen vor und nach der Umstellung auf die digitale Verbreitung verglichen. Da sich die analoge Fernsehübertragung der privaten Sendeanstalten nur auf Ballungszentren in den zu betrachteten Gebieten konzentriert hat, wird für den hier anzustellenden Vergleich das flächendeckend zu empfangene Programm ZDF untersucht.

Die nähere Betrachtung des landesweit ausgestrahlten Programms ZDF bezüglich der installierten Sendeleistungen ergibt für die gesamte Fläche von Berlin und Brandenburg folgendes Ergebnis: Vor der Umstellung auf DVB-T wurde das ZDF in der Region mit einer mittleren analogen Sendeleistung von 450 kW ERP ausgestrahlt. Nach der Simulcastphase wurden analog betriebene Sender mit einer summierten mittleren Sendeleistung von

123,6 kW ERP abgeschaltet. Im Zuge der digitalen Versorgung sind für das Programm ZDF 17,5 kW ERP (Kanal 33 mit insgesamt 70 kW ERP für 4 Programme) hinzugekommen, was einer Reduzierung der mittleren installierten Sendeleistung um 23 % entspricht.

Wird analog hierzu das Prognosegebiet als Bezugsfläche gewählt, erhält man eine Reduzierung der mittleren installierten Sendeleistung von 66 %. Wird nur das Stadtgebiet von Berlin betrachtet, ergibt sich eine Verringerung von 85 %.

I.6.1.3 DVB-T in der Region Bremen / Unterweser

Um zu überprüfen, in wie weit die für die Startinsel Berlin / Brandenburg getroffenen Aussagen auch für andere bereits auf DVB-T umgestellte Regionen Gültigkeit haben, wird im Folgenden die Region Bremen / Unterweser näher untersucht. Hier wurde die Simulcastphase am 8.11.2004 beendet. In folgendem Bild ist das Bundesland Niedersachsen mit dem Prognosegebiet für den Empfang von DVB-T in der Region Bremen / Unterweser zu sehen, das wiederum als Bezugsfläche für den Vergleich der Senderdichte und installierten Sendeleistungen herangezogen wird.



Bild I.6.12: Niedersachsen mit dem prognostizierten Empfangsgebiet für DVB-T in der Region Bremen / Unterweser

In den anschließenden Bildern sind die verschiedenen Senderstandorte analog zu der vorherigen Darstellungsweise *vor* und *nach* dem Beginn der Umstellung auf digitale Fernsehübertragung in dem prognostizierten Empfangsgebiet dargestellt. Zudem beinhalten sie Informationen, ob es sich bei einem öffentlich rechtlichen Senderstandort um einen Grundnetzsender oder Füllsender handelt.

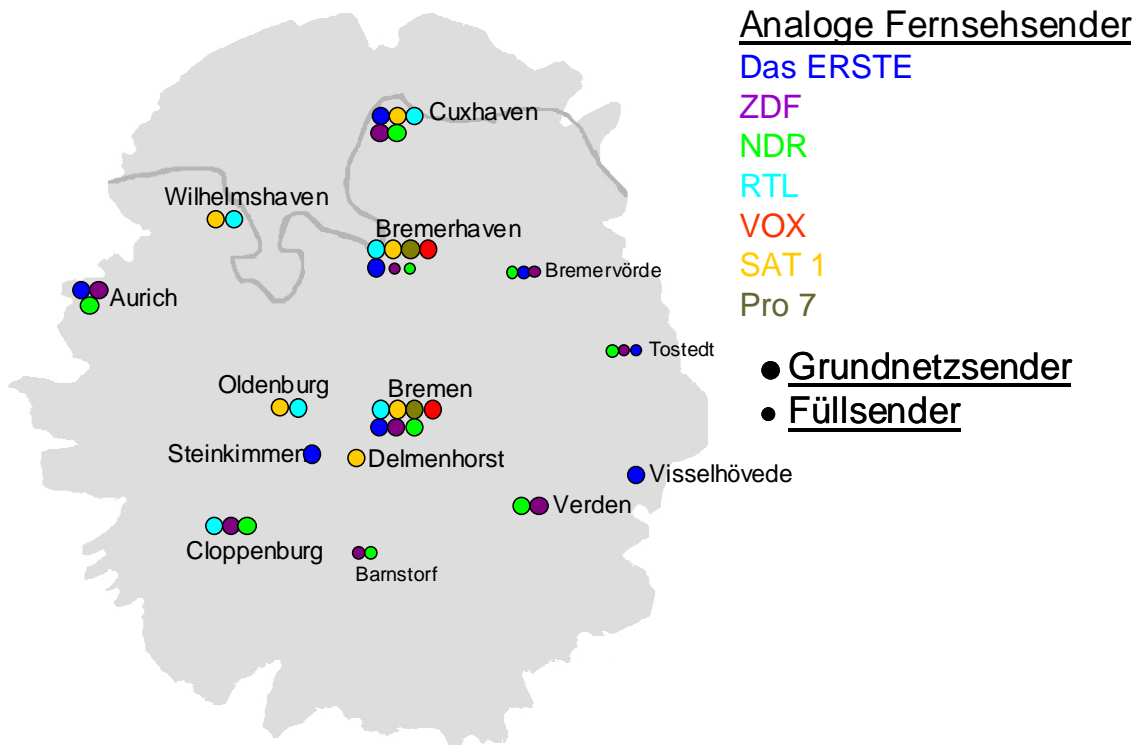


Bild I.6.13: Analoges Sendernetz VOR der Umstellung auf digitale terrestrische Übertragung in der Region Bremen / Unterweser

Im Gegensatz dazu zeigt das folgende Bild einen Überblick über die Senderstandorte *nach* der Umstellung auf DVB-T.

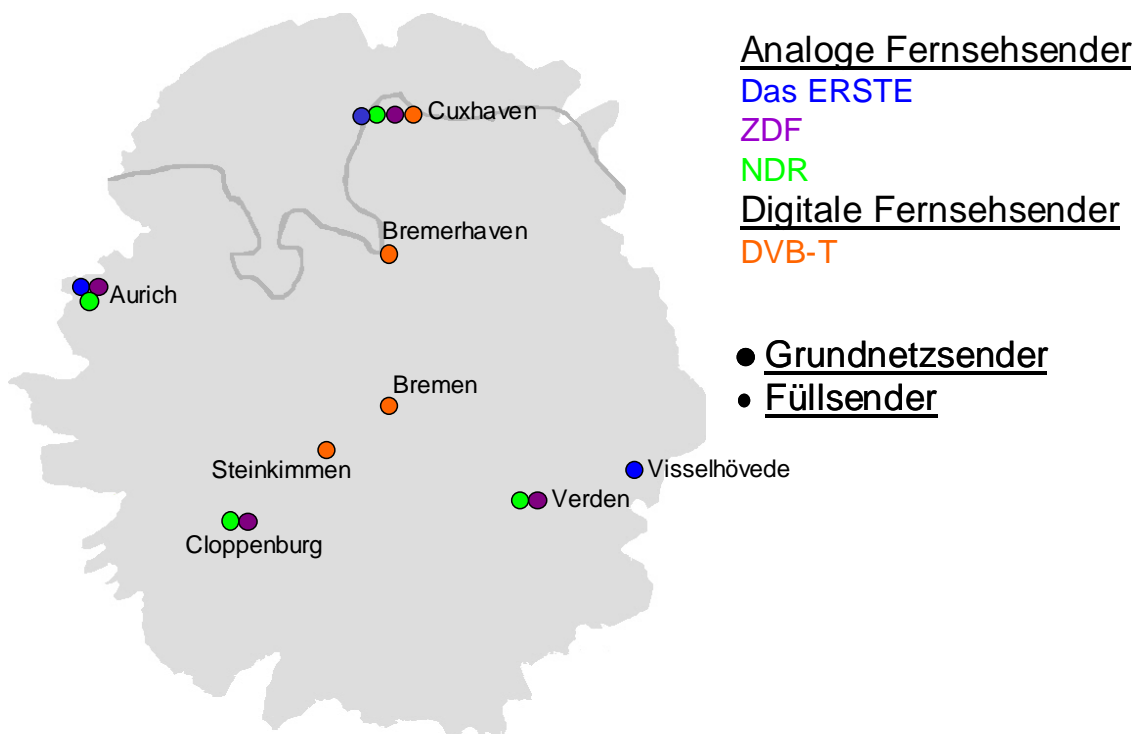


Bild I.6.14: Sendernetzverteilung NACH der Umstellung auf digitale terrestrische Übertragung in der Region Bremen / Unterweser, Dezember 2004

Ein Vergleich der Bilder der Fernsehsenderstandorte vor bzw. nach der Umstellung auf DVB-T in der Region Bremen / Unterweser liefert folgende drei Grundaussagen:

- Auch hier ist die analoge Verbreitung der Programme der privaten Fernsehanstalten in der gesamten Region eingestellt
- Im Zuge der Umstellung auf DVB-T sind alle Füllsender der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten abgeschaltet worden.
- In den Randbereichen des neuen digitalen Versorgungsgebietes werden die analogen Sender der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten weiter betrieben, so dass hier ein Empfang von beiden Übertragungsvarianten möglich ist.

Zur Anzahl der zu empfangenden Programme ist festzuhalten, dass in der Region Bremen / Unterweser zur Zeit 27 Programme auf insgesamt 7 Kanälen digital ausgestrahlt werden (vgl. Bild I.6.15).

	* 1	* 2					
	22	55	29	49	42	32	45
Das Erste mit buten un binnen			NDR mit Hallo Niedersachsen	SAT 1	RTL	ZDF	TELE 5
NDR mit sportblitz			HR mit Hamburg Journal	ProSieben	RTL	3sat ZDFinfokanal	TERRA NOVA
arte			MDR mit Nord Magazin	Kabel 1	super	Ki&Ka ZDFdokukanal	EUROSPORT
			WDR mit Schleswig Holstein Magazin	N24	VOX	ZDF.digitext *	

- * MHP-Datendienst
- *1 Region Bremen / Bremerhaven
- *2 Region Oldenburg / Bremerhaven

Bild I.6.15: Programmangebot und Kanalbelegung für DVB-T in der Region Bremen / Unterweser, Stand November 2004.

In der folgenden Tabelle ist ein Überblick über die installierten Sendeleistungen der einzelnen Standorte vor und nach der Umstellung auf digitales Fernsehen in der hier betrachteten Region zu sehen. Zu beachten ist wieder, dass die mittlere effektive Leistung des analogen Fernsehsignals 39,8% der Synchronspitzenleistung beträgt.

In Fettschrift sind wiederum diejenigen Standorte gekennzeichnet, bei denen sich nach der Umstellung auf DVB-T Änderungen ergeben haben.

Senderstandort	VOR der Umstellung auf DVB-T				NACH der Umstellung auf DVB-T			
	Anzahl d. Progr.	Spitzenleistung ERP [kW]	mittlere Leistung ERP [kW]	Technik	Anzahl d. Progr.	Spitzenleistung ERP [kW]	mittlere Leistung ERP [kW]	Technik
	Aurich	3	810,000	299,700	analog	3	810,000	299,700
Barnstorf	2	0,090	0,033	analog				
Bremen	7	223,000	82,510	analog	23		216,000	digital
Bremerhaven	7	34,200	12,654	analog	23		25,000	digital
Bremervoerde	3	0,329	0,122	analog				
Cloppenburg	3	92,000	34,040	analog	2	87,000	32,190	analog
Cuxhaven	5	757,080	280,120	analog	3	755,000	279,350	analog
					4		20,000	digital
Delmenhorst	1	3,000	1,110	analog				
Oldenburg	2	2,000	0,740	analog				
Steinkimmen	1	500,000	185,000	analog	24		125,000	digital
Tostedt	3	0,360	0,133	analog				
Verden	2	124,000	45,880	analog	2	124,000	45,880	analog
Visselhoevede	1	20,000	7,400	analog	1	20,000	7,400	analog
Wilhelmshaven	2	5,000	1,850	analog				

Tabelle I.6.9: Vergleich der installierten Sendeleistungen, Senderstandorte und Programme VOR und NACH Umstellung auf DVB-T in der Region Bremen / Unterweser.

Eine Zusammenfassung für das hier betrachtete Gebiet ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Bremen / Unterweser	VOR der Umstellung auf DVB-T	NACH der Umstellung auf DVB-T	
Anzahl der Programme	7	25	3
mittlere Sendeleistung ERP [kW]	951,3	386,0	664,5
Technik	analog	digital	analog

Tabelle I.6.10: Vergleich der gesamten installierten mittleren Sendeleistungen und Programmanzahl VOR und NACH der Umstellung auf DVB-T in der Region Bremen / Unterweser

Auch hier ist eine Auswertung bezüglich eines allgemeingültigen Faktors als Maß für den Unterschied der installierten Sendeleistungen vor und nach der Umstellung auf die digitale terrestrische Übertragung nicht möglich, da in dem als Bezugsfläche herangezogenem Prognosegebiet sowohl noch analoge als auch digitale Sender gemeinsam betrieben werden. Wird wie bei dem Beispiel in Berlin / Brandenburg eine Tendenz ausgemacht, ist in dem hier betrachteten Gebiet die mittlere installierte Leistung sogar noch leicht erhöht worden.

Wird das flächendeckend ausgestrahlte Programm ZDF mit seinen installierten Sendeleistungen einzeln untersucht, erhält man folgendes Ergebnis: Vor der Umstellung auf DVB-T

wurde das ZDF in der betrachteten Region mit einer mittleren analogen Sendeleistung von ca. 240 kW ERP ausgestrahlt. Durch die Umstellung wurde in der Region eine analoge Sendeleistung von gut 25 kW eingespart. Dafür sind für die digitale Versorgung 10,2 kW mittlere Sendeleistung hinzugekommen. Dies entspricht einer Reduzierung von knapp 7 %.

I.6.1.4 Fazit

Insgesamt lassen sich folgende Punkte bei einem Vergleich der Sendedichte und der installierten Sendeleistungen bezüglich der Umstellung auf digitales terrestrisches Fernsehen aus den vorherigen Betrachtungen festhalten.

Die privaten Programmanbieter haben nicht nur in den Startregionen, sondern direkt in den betreffenden Bundesländern ihre analoge Verbreitung eingestellt. Durch die Umstellung auf digitales terrestrisches Fernsehen kann die Anzahl der Füllsender der öffentlich rechtlichen Fernsehanstalten reduziert werden.

Die mittlere installierte Sendeleistung betreffend kann zu diesem Zeitpunkt keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Die Umstellung auf DVB-T in Form von sogenannten „Inseln“, die sich auf die Ballungszentren in Deutschland konzentrieren, hat zur Folge, dass in deren Außenbereichen sowohl noch digital als auch analog abgestrahlte Programme zu empfangen sind und somit ein direkter Vergleich nur eingeschränkt möglich ist. Darüber hinaus sind die hierbei getroffenen tendenziellen Aussagen gegensätzlich. So wurde in der Region Nürnberg und der Region Berlin / Brandenburg ein Trend zu einer Reduzierung der mittleren Sendeleistung festgestellt, während in den Regionen München und Bremen / Unterweser eher eine Erhöhung erkennbar ist.

Werden allerdings die in den Randbereichen des Prognosegebietes gelegenen noch bestehenden analogen Sender insofern vernachlässigt, da sie bei der zukünftigen flächendeckenden Versorgung von digitalem Fernsehen abgeschaltet werden, ist bei allen hier betrachteten Regionen eine Reduzierung der mittleren installierten Sendeleistung zu verzeichnen. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass in den Außenbereichen des jetzigen digitalen Empfangsgebietes im Zuge einer flächendeckenden Versorgung u.U. weitere digitale Sender installiert werden, deren Sendeleistung hier nicht berücksichtigt werden kann.

Dementsprechend kann eine allgemeingültige Aussage erst zu dem Zeitpunkt getroffen werden, wenn ein flächendeckender Empfang von digitalem terrestrischen Fernsehen möglich ist.

Darüber hinaus muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass eine Aussage über die installierten Sendeleistungen keine Rückschlüsse auf die individuelle Expositionssituation zulässt.

I.6.2 Analoge und digitale terrestrische Radioübertragung

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit einem Vergleich der Senderdichte und der installierten Sendeleistungen zwischen DAB und UKW. Das digitale Rundfunkverfahren ist ein im Rahmen von der EU Forschungsinitiative EUREKA 147 entwickeltes und standardisiertes Verfahren zur digitalen Übertragung von Radiosignalen. Auf der DAB Planungskonferenz in Wiesbaden wurde 1995 die Grundlage geschaffen, dass bundesweit Frequenzen für terrestrische DAB Bedeckungen genutzt werden können (vgl. [BMWl 00]). Hierbei wurde ein Verteilplan für die Frequenzbereiche 47 – 68 MHz, 174 – 230 MHz, 230 – 240 MHz und 1452 – 1492 MHz verabschiedet.

In Deutschland sind zunächst zwei DAB Bedeckungen vorgesehen: Für die erste Bedeckung wurde der Frequenzbereich 223 – 230 MHz (Band III, Kanal 12, Blöcke 12A – 12D) gewählt, der auch europaweit für DAB genutzt wird. Weil dies nicht in allen Bundesländern erfüllt werden konnte, werden auch DAB-Blöcke in den Kanälen 5, 6, 7, 8 und 11 verwendet, in einigen europäischen Ländern sogar in den Kanälen 4 – 13. Der VHF-Bereich ist auf Grund der physikalischen Ausbreitungsbedingungen und der wirtschaftlich günstigen Sendernetzstrukturen für großflächige Versorgungsgebiete besonders gut geeignet. Für die zweite DAB Bedeckung stehen Frequenzen im 1,5 GHz Bereich zur Verfügung. Dieses sogenannte L-Band bietet sich für eine sofortige Versorgung von Ballungsräumen und eine gezielte Versorgung von Verkehrswegen, z. B. von Autobahnen, an. Es ist aber in topografisch schwierigen Gebieten sowie für einen flächendeckenden Ausbau großer Gebiete aus wirtschaftlichen Gründen schlechter geeignet.

Im Unterschied zum DVB-T begann der Regelbetrieb vom digitalen Radio bereits im Jahr 1999. Ein Überblick über das geplante Versorgungsgebiet zum Ende des Jahres 2004 ist in nachfolgendem Bild zu sehen.



Bild I.6.16: Netzabdeckung von DAB für 2005 (siehe [DIG])

Um analog zu der Betrachtungsweise beim digitalen terrestrischen Fernsehen morphographische und topologische Unterschiede zwischen den zu vergleichenden Regionen ausschließen zu können, wird der Vergleich in zwei Regionen durchgeführt, in denen sowohl eine nahezu flächendeckende Versorgung mit UKW als auch mit DAB installiert ist. Hierfür werden die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Bayern betrachtet.

I.6.2.1 Nordrhein-Westfalen

In Nordrhein-Westfalen wird für die landesweite Ausstrahlung von Digital Radio der Frequenzblock 12D verwendet. Die vorgesehene Ausstrahlung von DAB im L-Band in Ballungsräumen ist auf Grund von Lizenzierungsverfahren derzeit noch nicht in Betrieb.

Für den Vergleich der Senderdichte und installierten Sendeleistung wird für Nordrhein-Westfalen das Radioprogramm WDR 2 ausgewählt. Dieses wird flächendeckend sowohl analog im UKW Bereich als auch digital ausgestrahlt.

Einen Überblick über die jeweiligen Senderstandorte ist in folgendem Bild zu sehen.

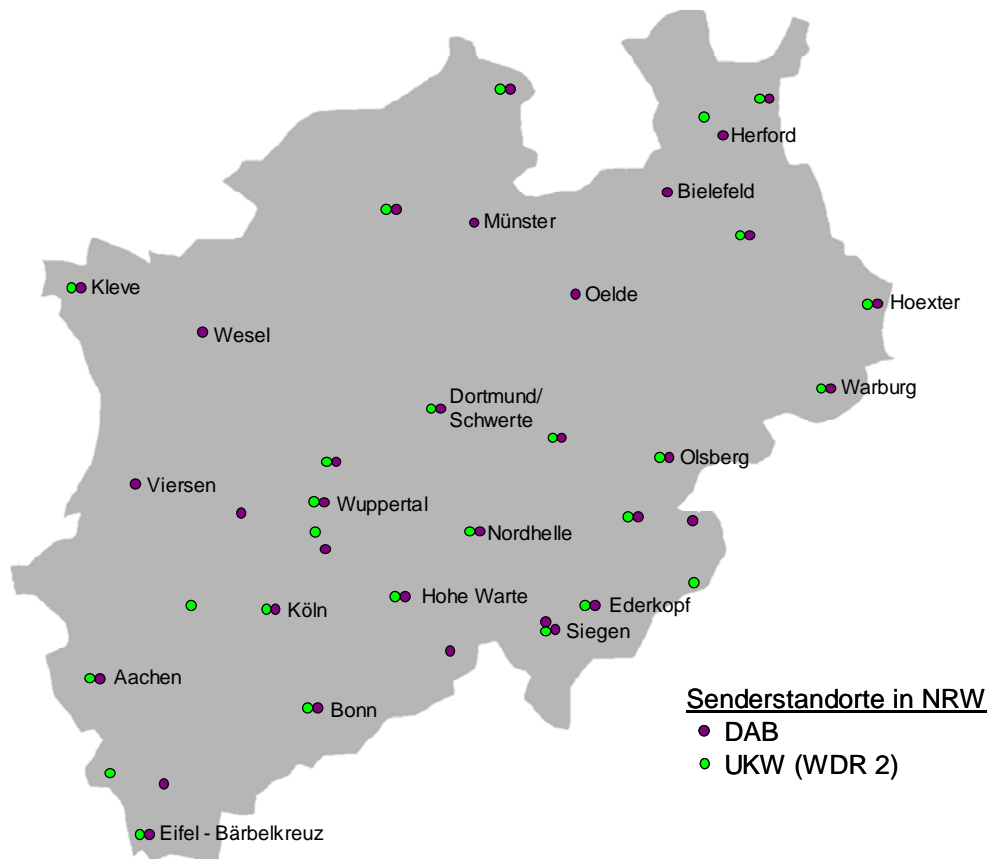


Bild I.6.17: Vergleich der Senderstandorte für das landesweite Ensemble von DAB und für die analoge Verbreitung von WDR2 über UKW in Nordrhein-Westfalen

Die Nutzdatenraten der im landweiten DAB Ensemble enthaltenen Programme sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

DAB - landesweites Ensemble [NRW]	Datenrate in [kbit/s]	alternative Datenrate in [kbit/s]
EinsLive	128	128
WDR 2 Klassik	160	112
WDR 2	128	112
Funkhaus Europa	96	96
WDR Vera	56	56
WDR Infokanal	72	72
WDR 2 Sport (zeitweise)	-	64
EinsLive diggi	96	96
Deutschlandfunk	192	192
Deutschlandradio Berlin	128	128
Dom Radio	160	160

Tabelle I.6.11: Nutzdatenraten der einzelnen DAB Programme im landesweiten Ensemble

Die Summation aller Nutzdatenraten ergibt eine gesamte Nettodatenrate von 1216 kbit/s, die sich wiederum auf eine insgesamt abgestrahlte effektive Sendeleistung von 22,85 kW aufteilen. Diese werden von 33 Sendestandorten abgestrahlt.

Das Programm WDR 2 mit einer Nutzdatenrate von 128 kbit/s (bzw. 112 kbit/s) hat hiermit einen Anteil von ungefähr 1/10 an der gesamten übertragenden Datenmenge. Wählt man unter Vernachlässigung der Redundanz (u.a. Fehlerschutzkodierung) diesen Faktor auch als den Anteil an der zur Verfügung stehenden Sendeleistung nimmt das Programm insgesamt ca. 2,3 kW Sendeleistung in Anspruch. Im Gegensatz dazu wird WDR 2 im UKW Frequenzbereich über insgesamt 26 Sender mit einer Sendeleistung von knapp 410 kW abgestrahlt.

Werden die oben hergeleiteten Sendeleistungen ins Verhältnis gesetzt, benötigt die analoge Ausstrahlung von WDR 2 eine um den Faktor 178 höhere Sendeleistung als dies bei der Verbreitung über DAB der Fall ist (vgl. hierzu auch [PAUL 04]).

Als nächstes werden die insgesamt installierten Sendeleistungen der landesweit ausgestrahlten Programme verglichen. Die in Zukunft lokal ausgestrahlten Programme werden von dieser Betrachtung deswegen ausgeschlossen, weil sich die Angebote für die lokalen digitalen Programme noch in der Lizenzierungsphase befinden und dementsprechend noch keine Sender im Betrieb sind (Stand Januar 2005). Für die landesweit analog zu empfangenden 8 Programme ist insgesamt eine Sendeleistung von 2340 kW installiert. Auf der anderen Seite steht für das flächendeckende DAB Ensemble (vgl. Tabelle I.6.11) eine Sendeleistung von 23 kW zur Verfügung. Dies entspricht einer Reduzierung der mittleren installierten Sendeleistung auf 1 %.

I.6.2.2 Bayern

Auch im Bundesland Bayern wird für die landesweite Ausstrahlung von DAB der Frequenzblock 12D verwendet. Im Gegensatz zu Nordrhein-Westfalen werden hier bereits einige regionale Programm Ensembles im L-Band ausgestrahlt.

Analog zum vorherigen Vergleich der Senderdichte und installierten Sendeleistung im Hinblick auf ein flächendeckendes ausgestrahltes Radioprogramm wird für Bayern der Rundfunksender „Bayern 4 Klassik“ ausgewählt. Dieser wird landesweit sowohl analog im UKW Bereich als auch digital ausgestrahlt.

Ein Überblick über die jeweiligen Senderstandorte ist im folgenden Bild zu sehen.

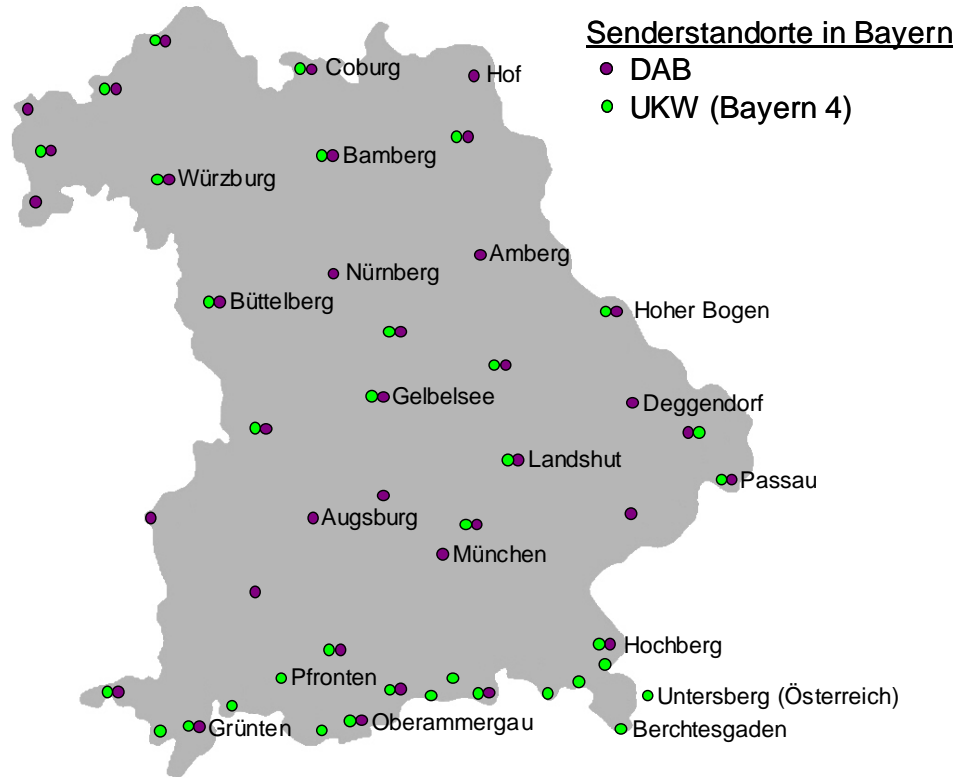


Bild I.6.18: Vergleich der Senderstandorte für das landesweite Ensemble von DAB und für die analoge Verbreitung von Bayern 4 Klassik über UKW in Bayern.

Die Nutzdatenraten der im landesweiten DAB Ensemble enthaltenen Programme sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

DAB - landesweites Ensemble [Bayern]	Datenrate in [kbit/s]
Bayern mobil	160
Das Modul	160
Bayern 4 Klassik	192
B5 aktuell	96
BR Traffic News	48
BR News + Wetter	48
BR Business	48
ROCK ANTENNE	192
Radio Galaxy	160
MobilData BDR	64

Tabelle I.6.12: Nutzdatenraten der einzelnen DAB Programme im landesweiten Ensemble in Bayern (vgl. [BR 04])

Die Summation aller Nutzdatenraten ergibt in diesem Beispiel eine gesamte Nettodatenrate von 1168 kbit/s, die sich wiederum auf eine insgesamt abgestrahlte effektive Sendeleistung von 30,35 kW aufteilen. Diese werden von 37 Sendestandorten abgestrahlt.

Das Programm „Bayern 4 Klassik mit einer Nutzdatenrate von 192 kbit/s hat hiermit einen Anteil von knapp 1/6 an der gesamten übertragenden Datenmenge. Wählt man unter Vernachlässigung der Redundanz (u.a. Fehlerschutzkodierung) diesen Wert auch als den Anteil an der zur Verfügung stehenden Sendeleistung nimmt das Programm insgesamt ca. 5 kW Sendeleistung in Anspruch. Im Gegensatz dazu wird „Bayern 4 Klassik“ im UKW Frequenzbereich über insgesamt 35 Sender mit einer Sendeleistung von knapp 550 kW abgestrahlt.

Werden die oben hergeleiteten Sendeleistungen ins Verhältnis gesetzt, benötigt die analoge Ausstrahlung eine um den Faktor 110 höhere Sendeleistung als dies bei der Verbreitung über DAB der Fall ist.

Als nächstes werden analog zum vorherigen Beispiel die insgesamt installierten Sendeleistungen der landesweit ausgestrahlten Programme verglichen. Die lokalen Programmangebote werden von dieser Betrachtung deswegen ausgeschlossen, da erst einige wenige lokale Ensembles in Bayern verbreitet werden und in Zukunft noch weitere hinzukommen. Für die landesweit analog zu empfangenden 8 Programme ist insgesamt eine Sendeleistung von etwa 4550 kW installiert. Auf der anderen Seite steht für das flächendeckend DAB Ensemble (vgl. Tabelle I.6.11) eine Sendeleistung von 30,35 kW zur Verfügung. Dies entspricht einer Reduzierung der mittleren installierten Sendeleistung auf 0,7 %.

I.6.2.3 Fazit

Die oben betrachteten Beispiele für DAB haben gezeigt, dass mit der Einführung der digitalen Tonrundfunkübertragung eine deutliche Reduzierung der installierten Sendeleistungen für ein Programm und insgesamt betrachtet erzielt werden kann. Eine Aussage über einen allgemeingültigen Faktor kann aber nicht angegeben werden.

Wie schon bei den Betrachtungen von DVB-T kann durch die Betrachtungen der insgesamt installierten Sendeleistungen keine Aussage über die individuelle Exposition getroffen werden.

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 einen 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

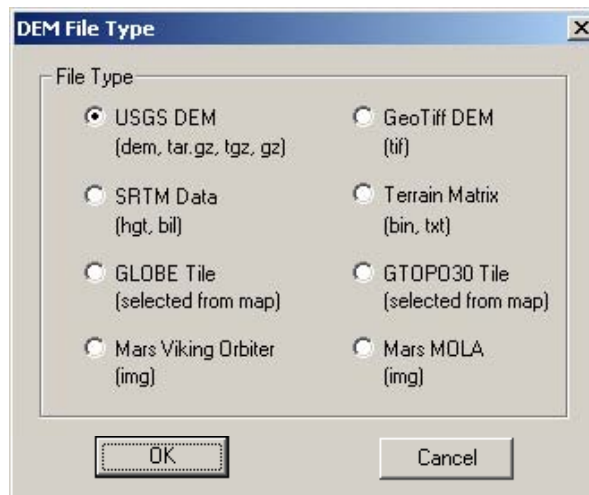


Bild II.2.1: Datenformate, die mit [3DEM] bearbeitet werden können

- 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.

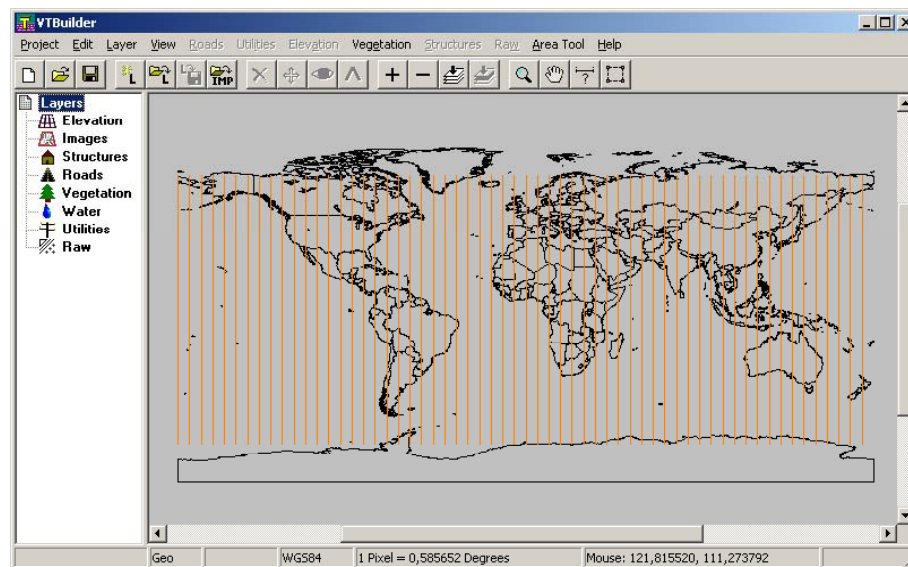


Bild II.2.2: VT-Builder [VTP]

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 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).

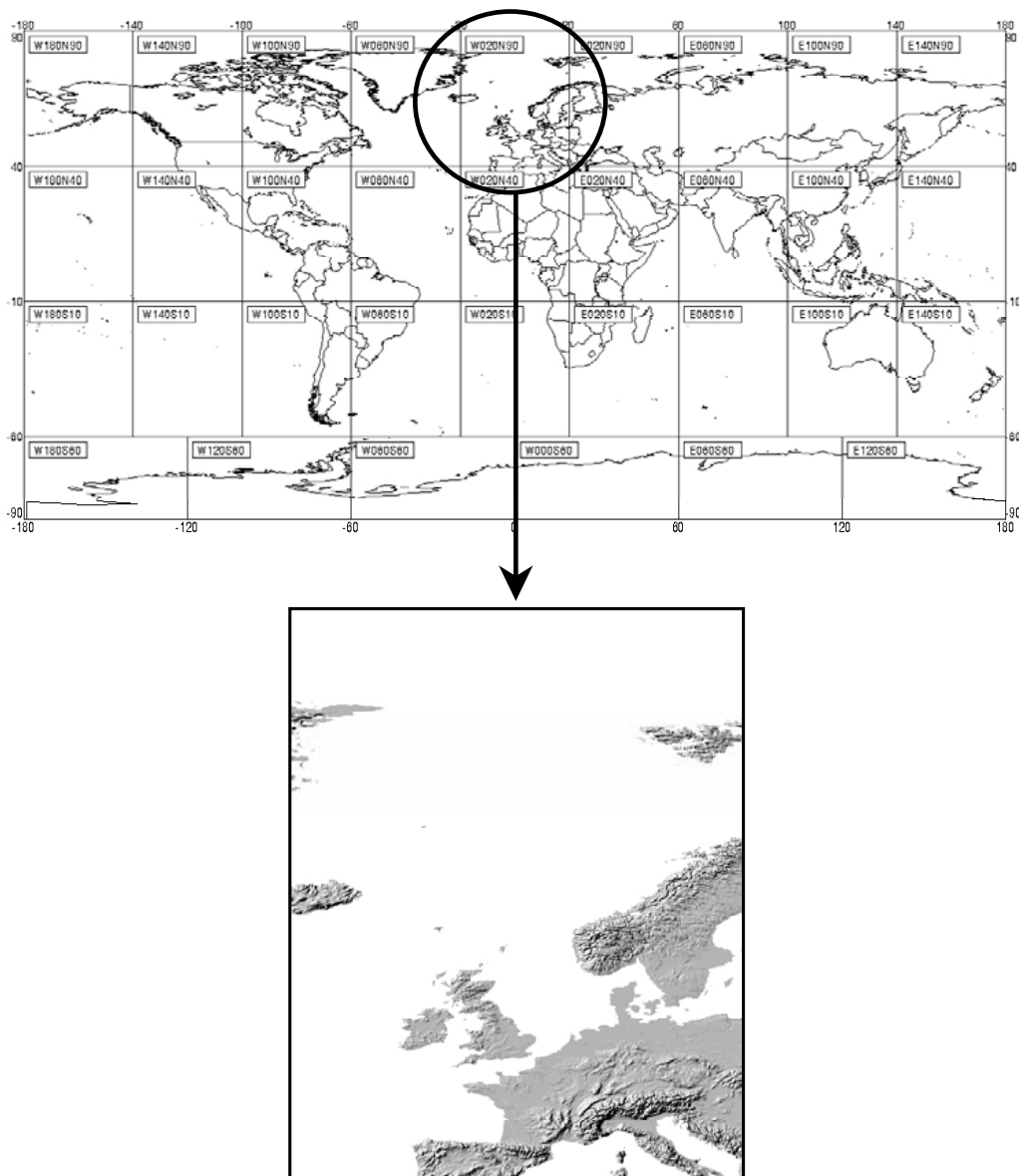


Bild II.2.4: GTOPO30 Kacheln (weltweit und Mitteleuropa) [G30]

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.

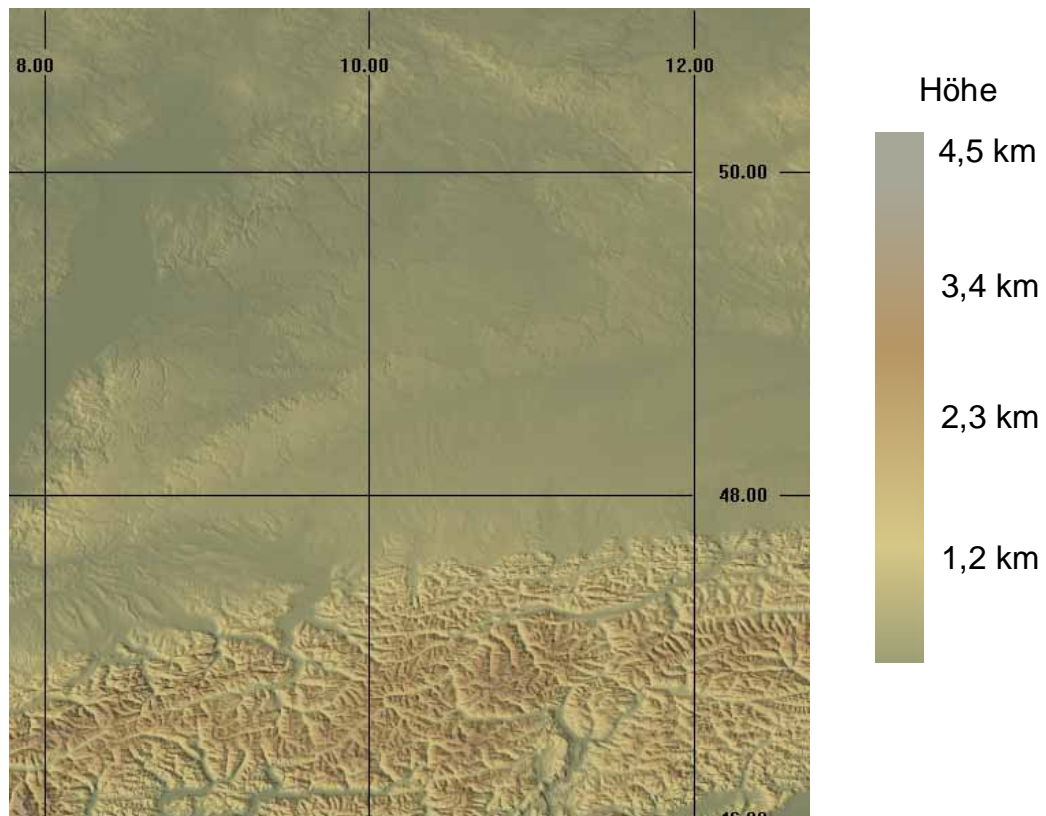


Bild II.2.5: Untersuchungsgebiet: Großraum Bayern

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.

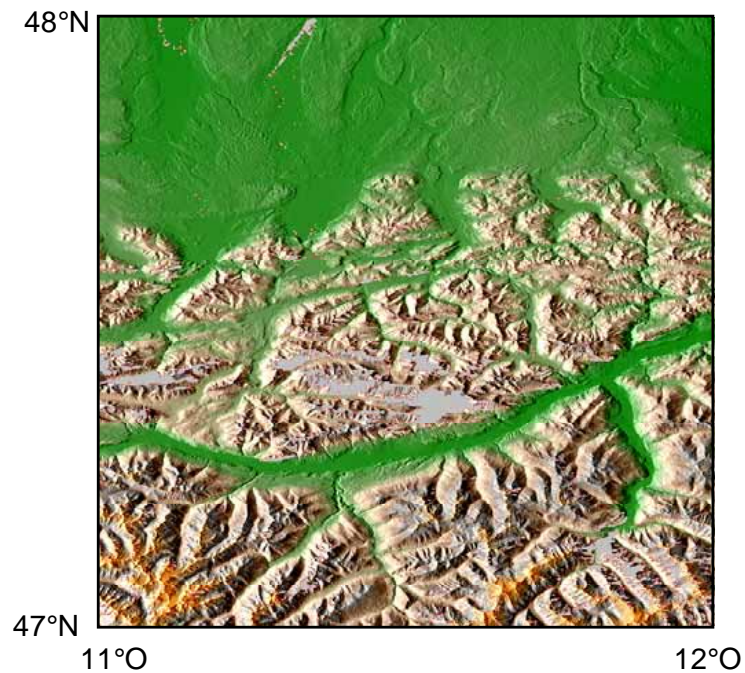
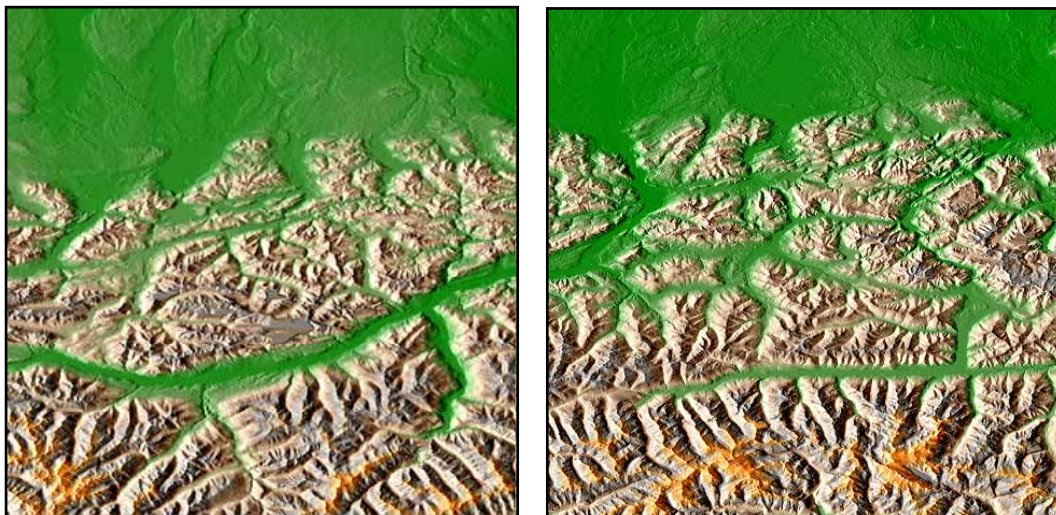


Bild II.2.6: Eine Kachel der SRTM-Daten (Datei: N47E011.hgt)

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)



SRTM-Kachel: N47E011

SRTM-Kachel: N47E012

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.

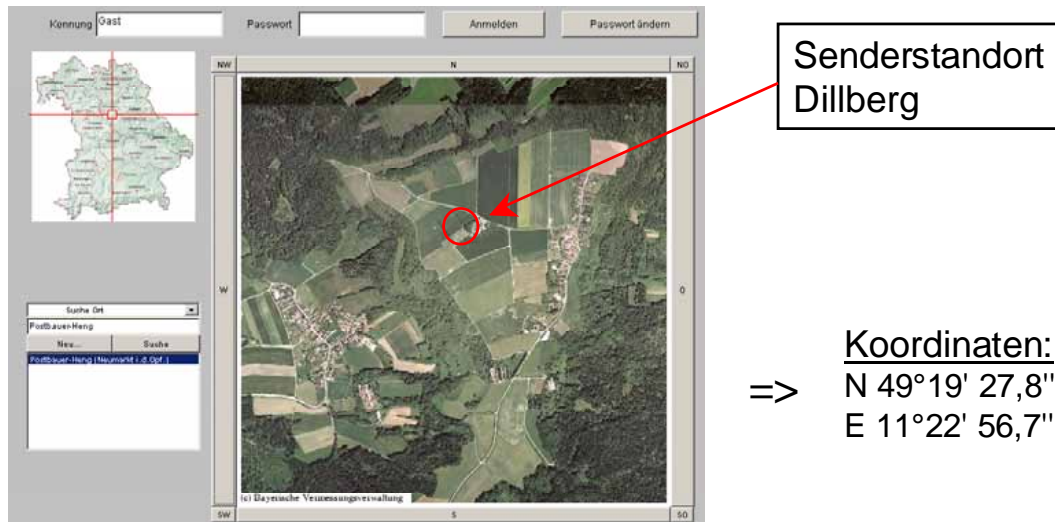


Bild II.2.9: Bestimmung der Koordinaten vom Senderstandort Dillberg mit dem BayernViewer Plus (siehe [BAY])

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 Abstrahldiagramme. 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)

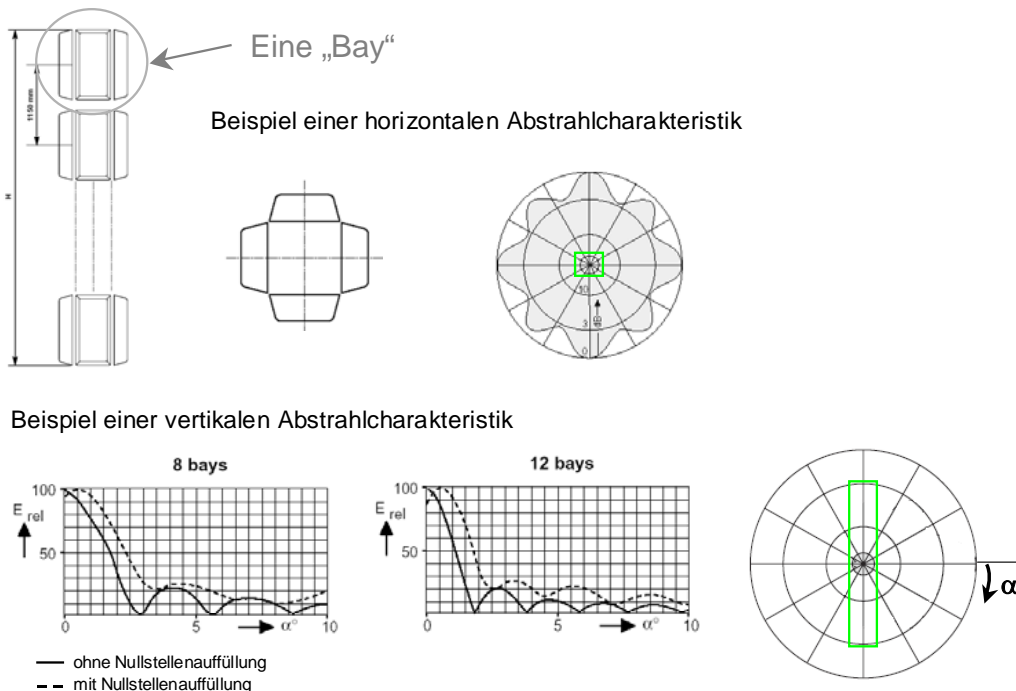


Bild II.2.10: Beispiel einer Rundfunksendeantenne der Firma Kathrein [KAT]
Bauart: Dipolfelder; die Antenne ist jeweils mit dem grünen Kasten schematisch angedeutet

Superturnstile Antenne

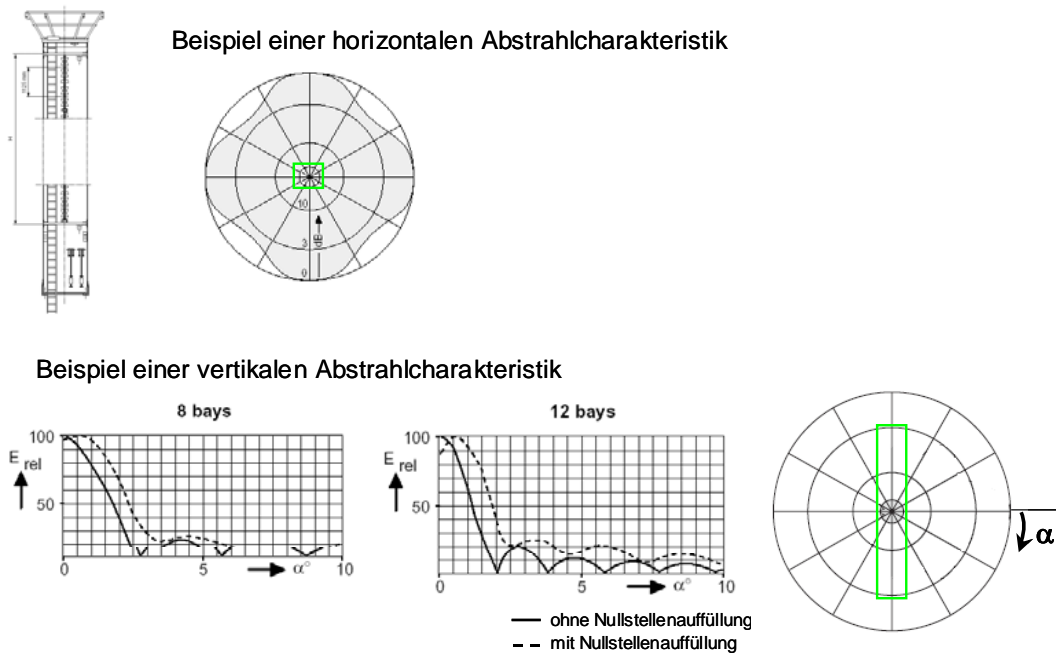


Bild II.2.11: Beispiel einer Rundfunksendeantenne der Firma Kathrein [KAT]
Bauart: Superturnstile; die Antenne ist jeweils mit dem grünen Kasten schematisch angedeutet

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

Superturnstile 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

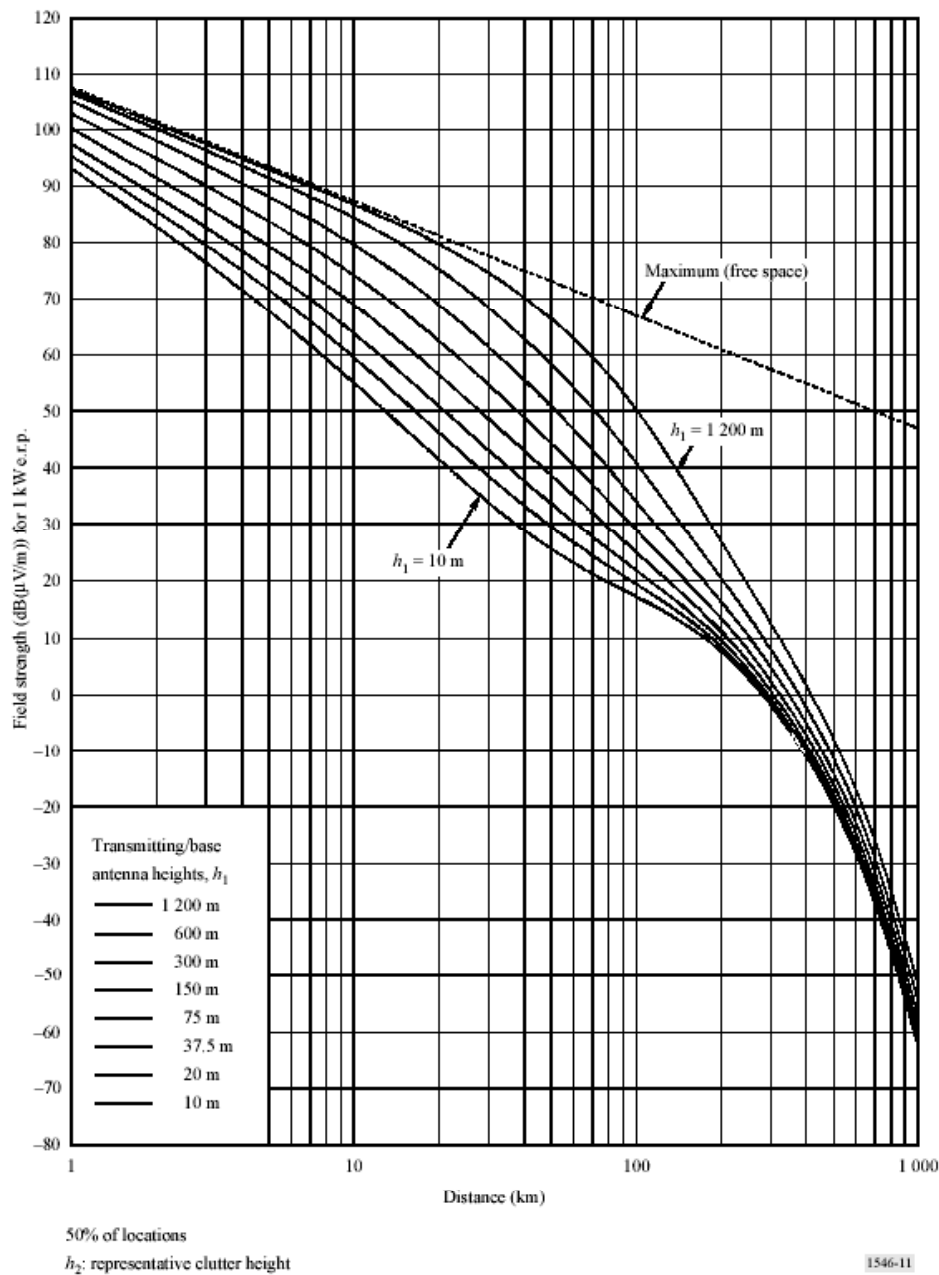


Bild II.2.13: Ausbreitungskurve aus der Empfehlung ITU-R P.1546; in Abhängigkeit des Abstandes und der Höhe der Sendeantenne, 600 MHz, 1% Zeitwahrscheinlichkeit, 1 kW ERP, Ausbreitung über Land

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.

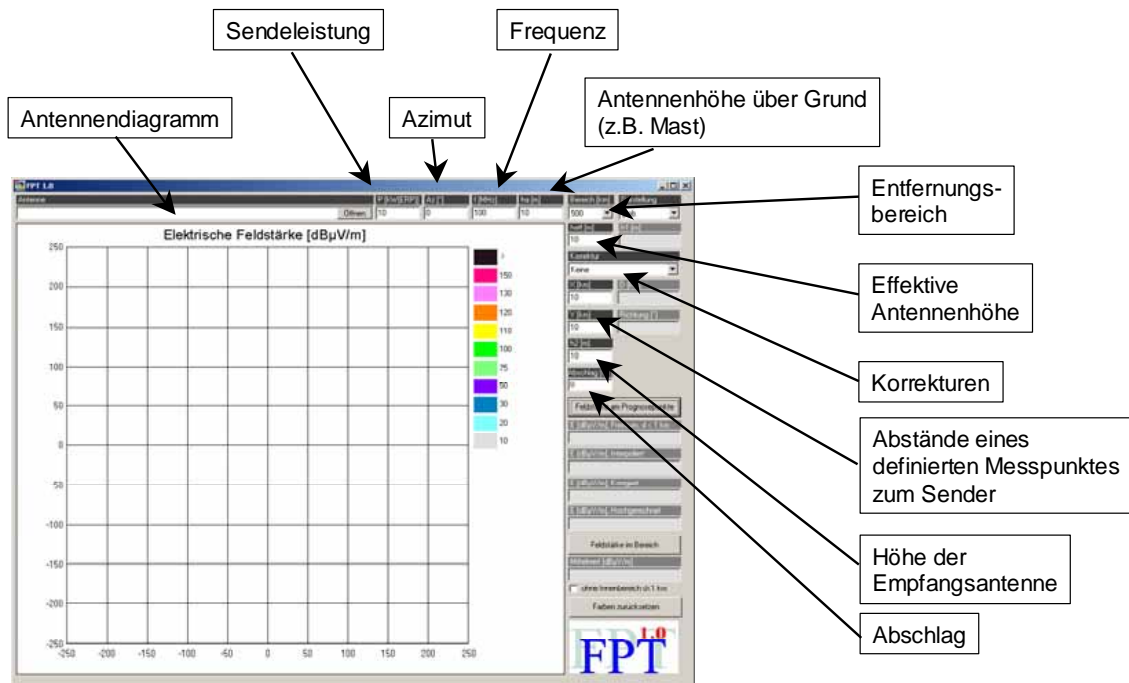


Bild II.2.14: Oberfläche von FPT (Field Prediction Tool) basierend auf der ITU-Empfehlung ITU-R P.1546 (Eingabeparameter)

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.

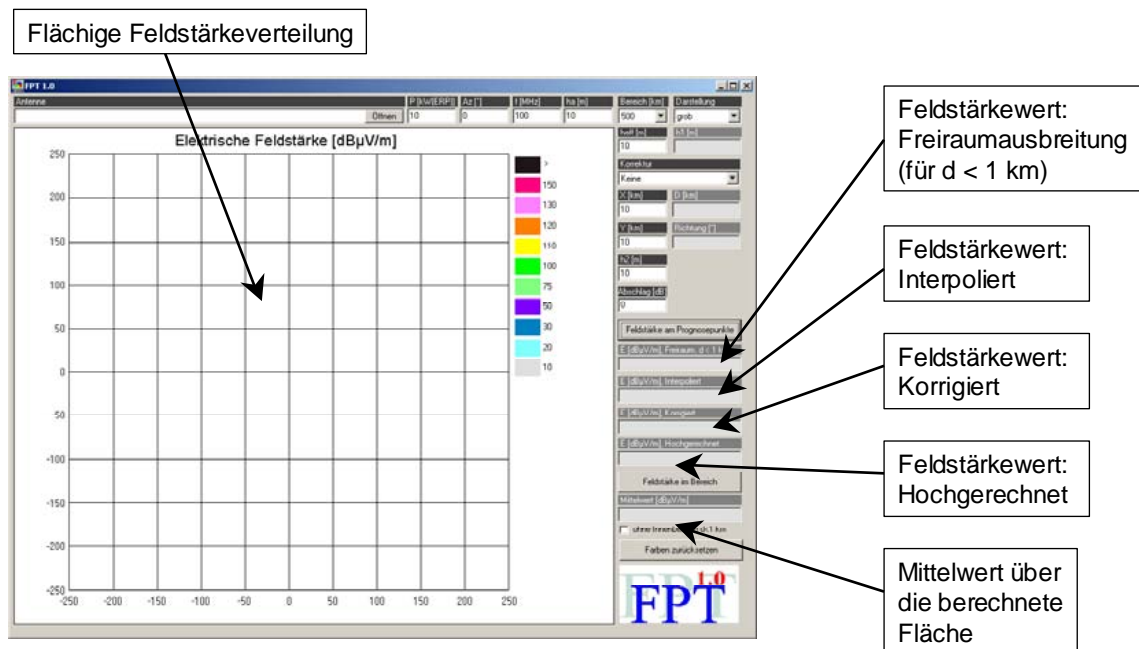


Bild II.2.16: Oberfläche von FPT (Field Prediction Tool) basierend auf der ITU-Empfehlung ITU-R P.1546

- 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.

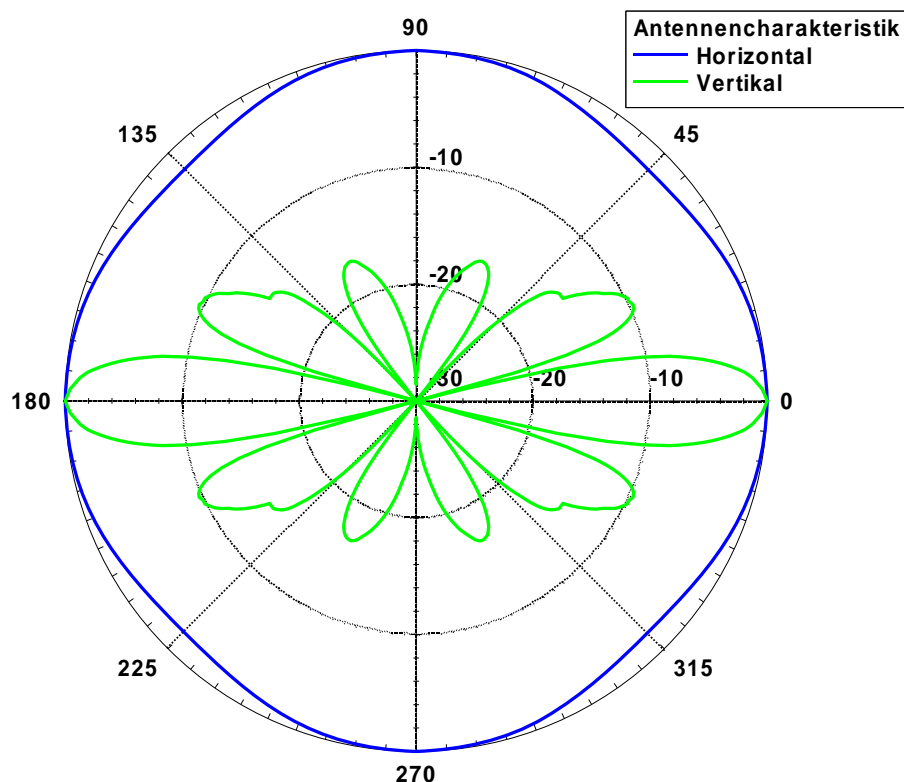


Bild II.3.1: Für die Berechnung verwendete „typische“ Antennencharakteristik basierend auf der Antenne Kathrein „4DR 8 4HO“; der Gewinn wurde nach Abschnitt II.2.1.1.3 auf 15 dBd angepasst

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.

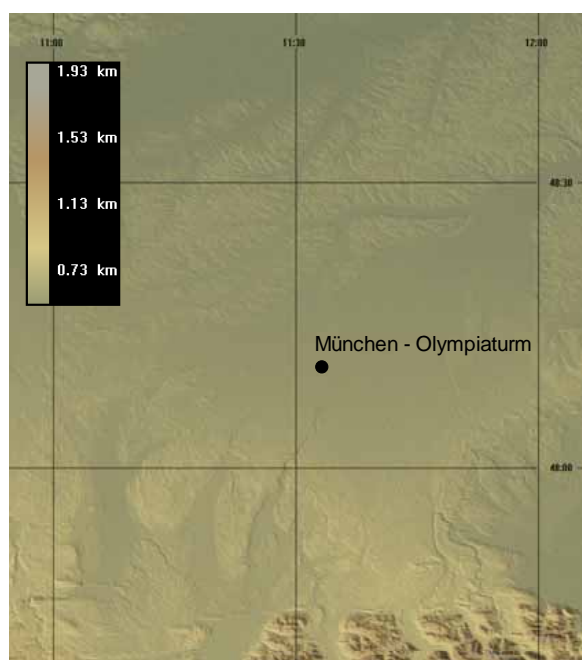
Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse mit realen Messungen verglichen. Hierzu wurden zum einen der Senderstandort Olympiaturm in München und der Dillberg südöstlich von Nürnberg herangezogen.

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).

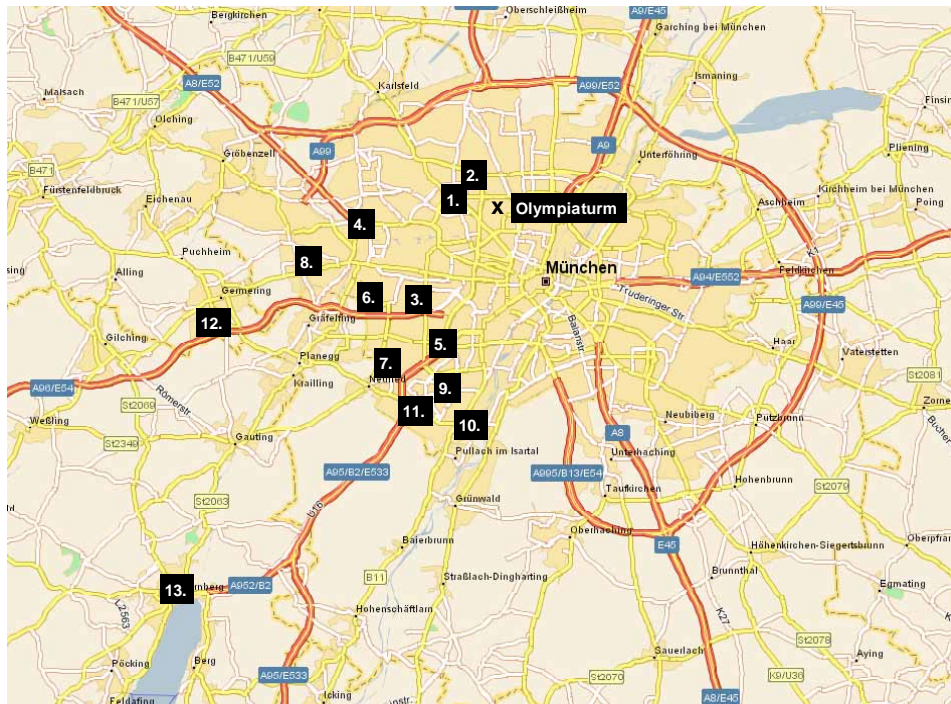


Bild II.3.3: Überblick über die Vergleichspunkte

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.

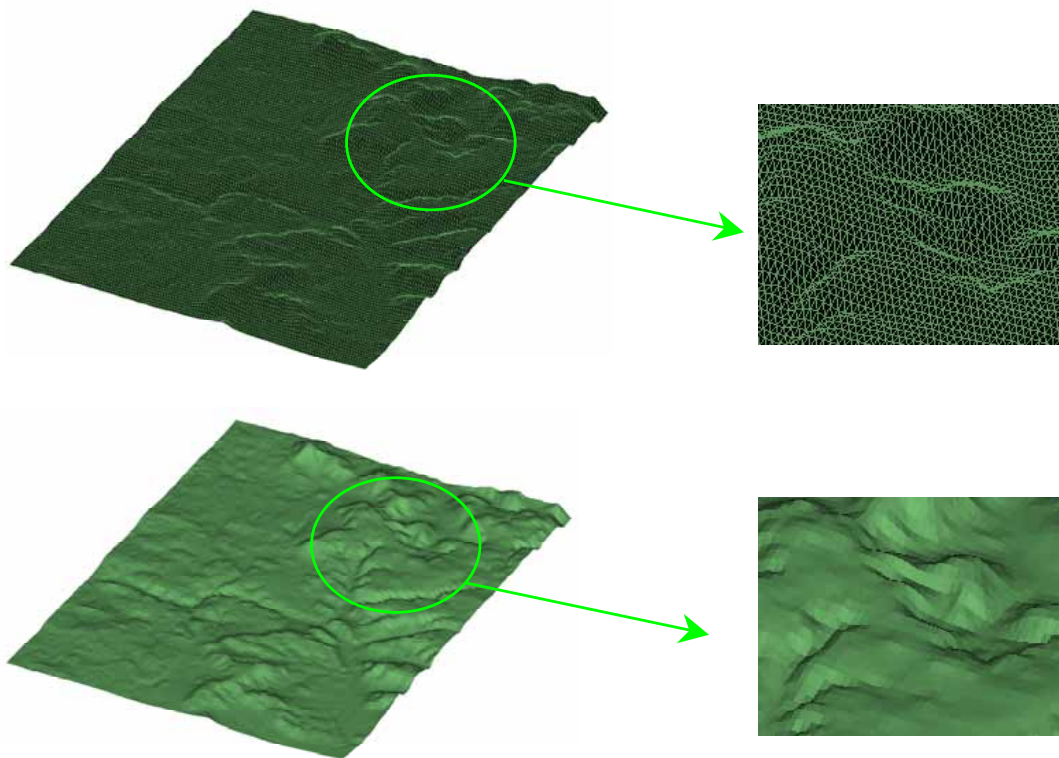


Bild II.3.4: Verarbeitung der Geländedaten in Wireless Insite – Darstellung durch sogenannte „Faces“ (oben: „Drahtdarstellung“; unten: „ausgefüllte Darstellung“)

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.

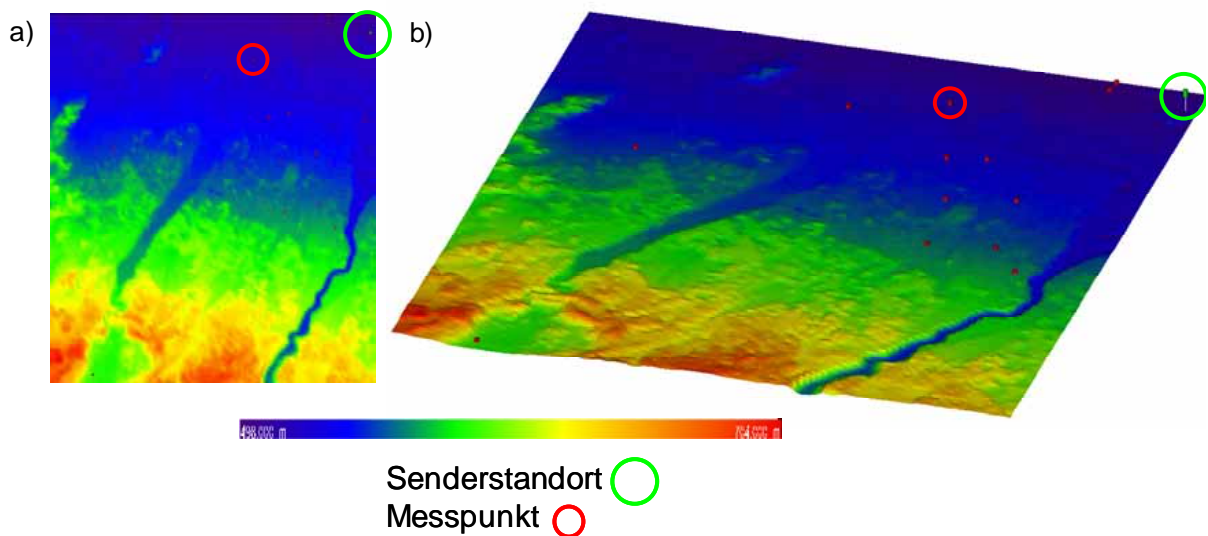


Bild II.3.5: Simulationsraum Wireless Insite
 a) 2D
 b) 3D

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.

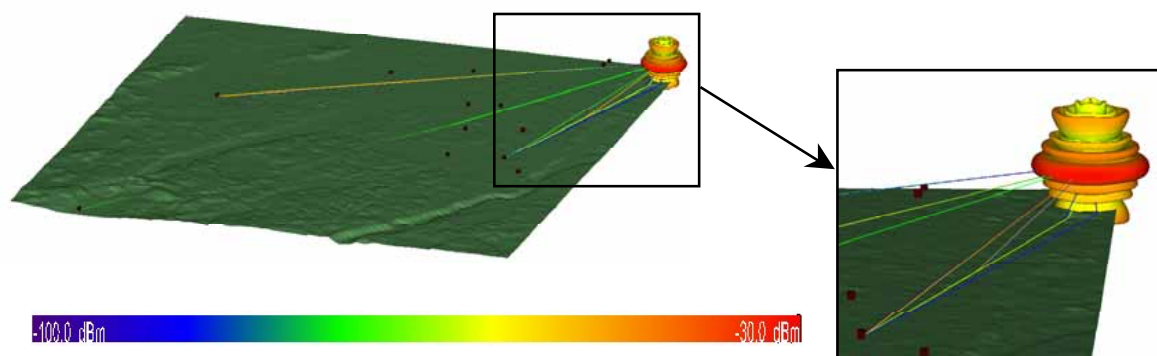


Bild II.3.6: Ausbreitungswege anhand von 3 Beispielpunkten und 3D Antennendiagramm

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 [dBµV/m]	Berechnung [dBµV/m]	Abweichung [dB]	Messung [dBµV/m]	Berechnung [dBµV/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.

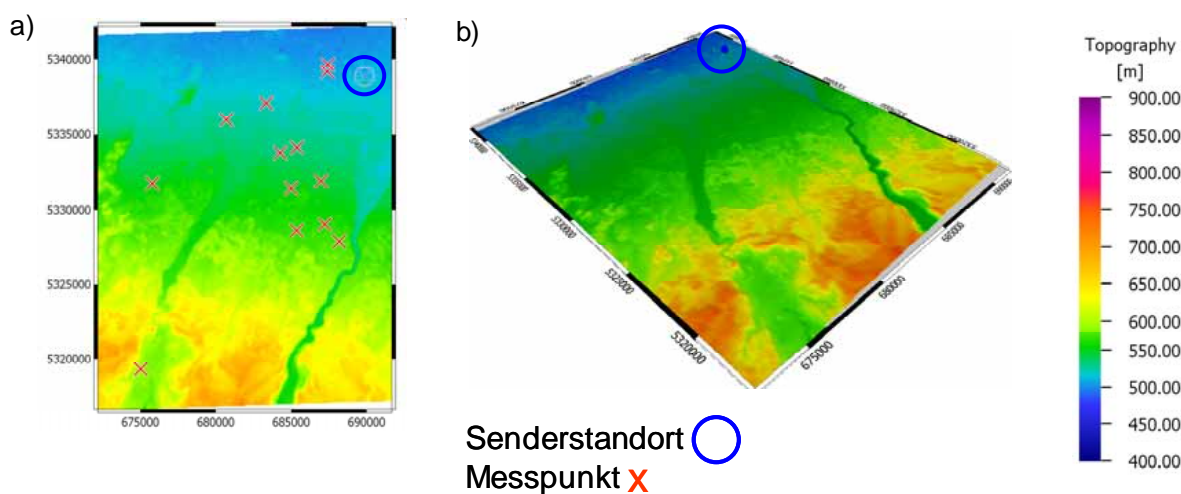


Bild II.3.7: Simulationsraum von WinProp für die Region des Senderstandorts Olympiaturm München
 a) 2D
 b) 3D

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.

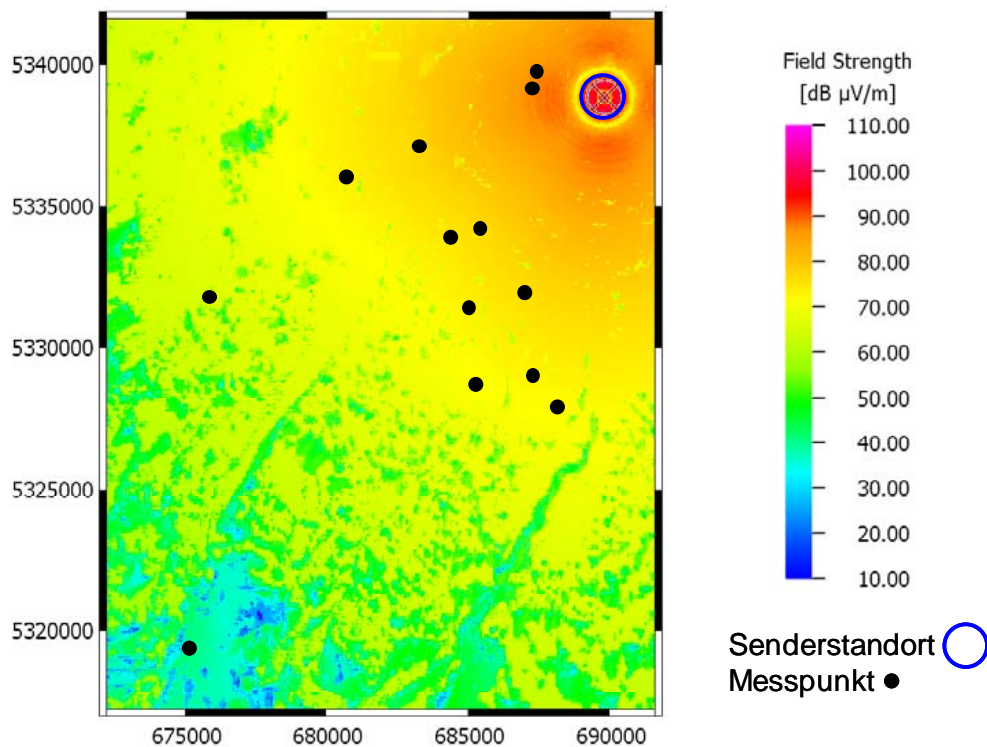


Bild II.3.8: Simulationsergebnis von WinProp für den Senderstandort Olympiaturm, Kanal 35

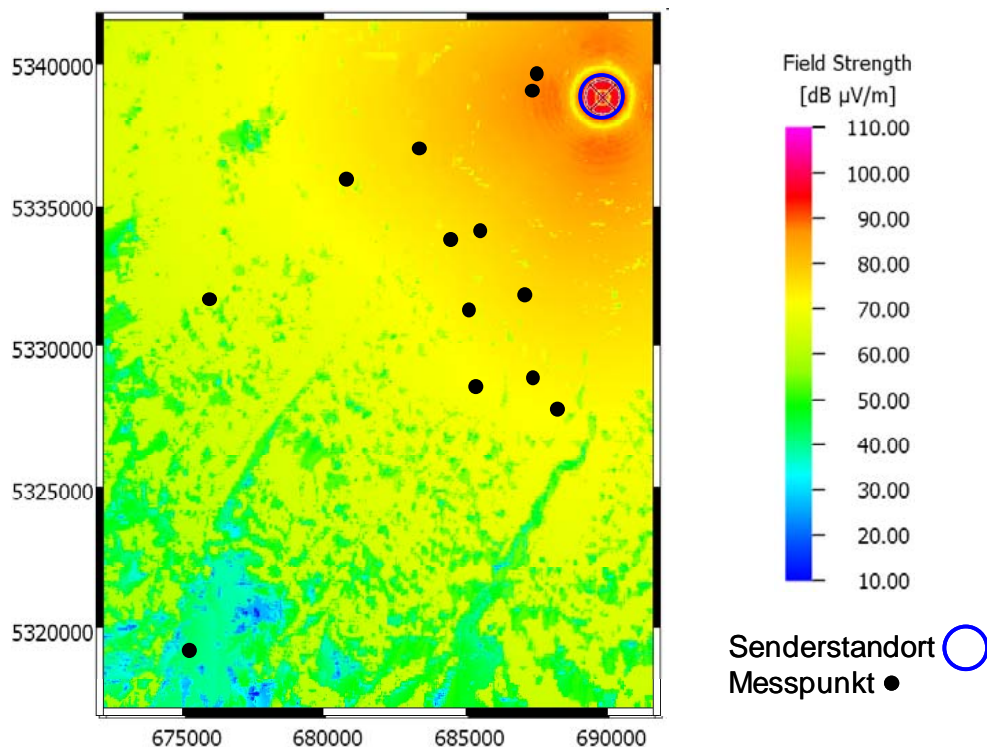


Bild II.3.9: Simulationsergebnis von WinProp für den Senderstandort Olympiaturm, Kanal 56

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.

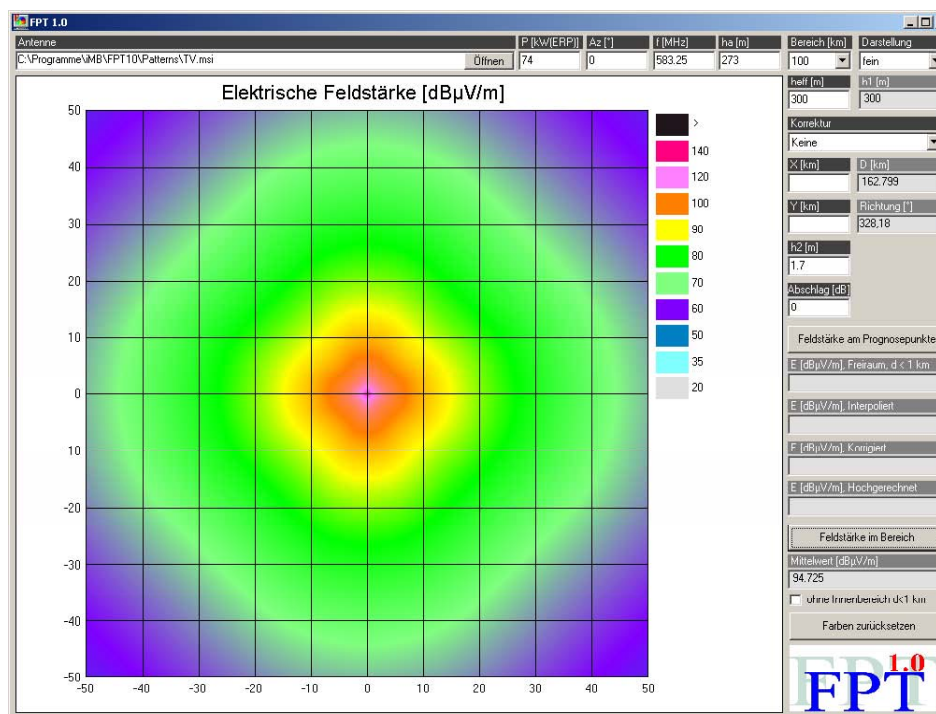


Bild II.3.10: Simulationsergebnisse von FPT ohne Korrektur der Empfangsantennenhöhe und Umgebung, Kanal 35

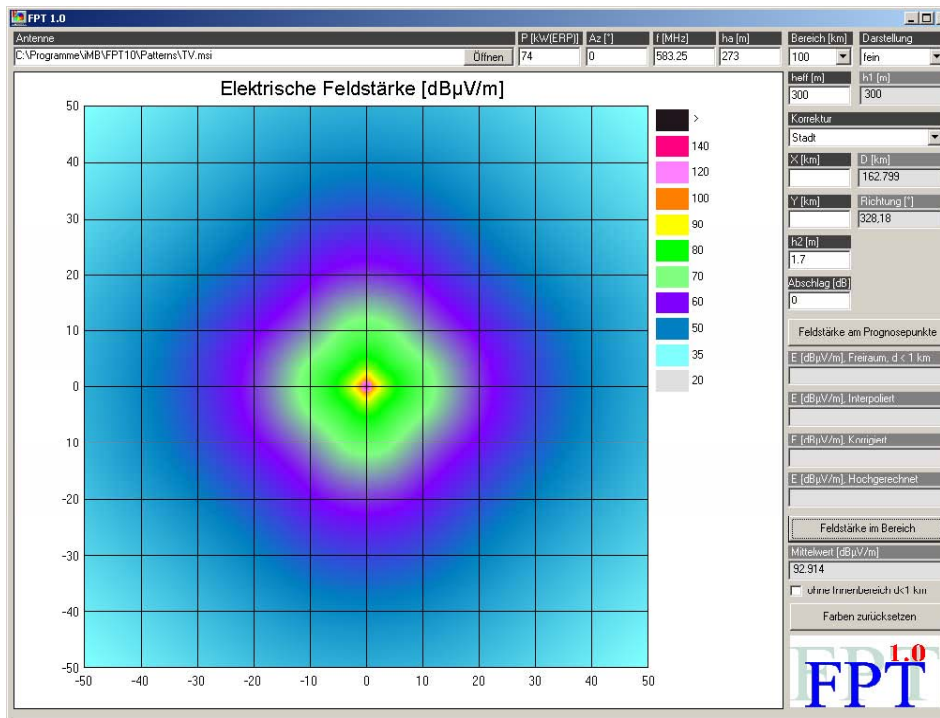


Bild II.3.11: Simulationsergebnisse von FPT mit Korrektur der Empfangsantennenhöhe auf 1,7 m (Korrektur für „Stadt“), Kanal 35

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 Softwarepaketen 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.

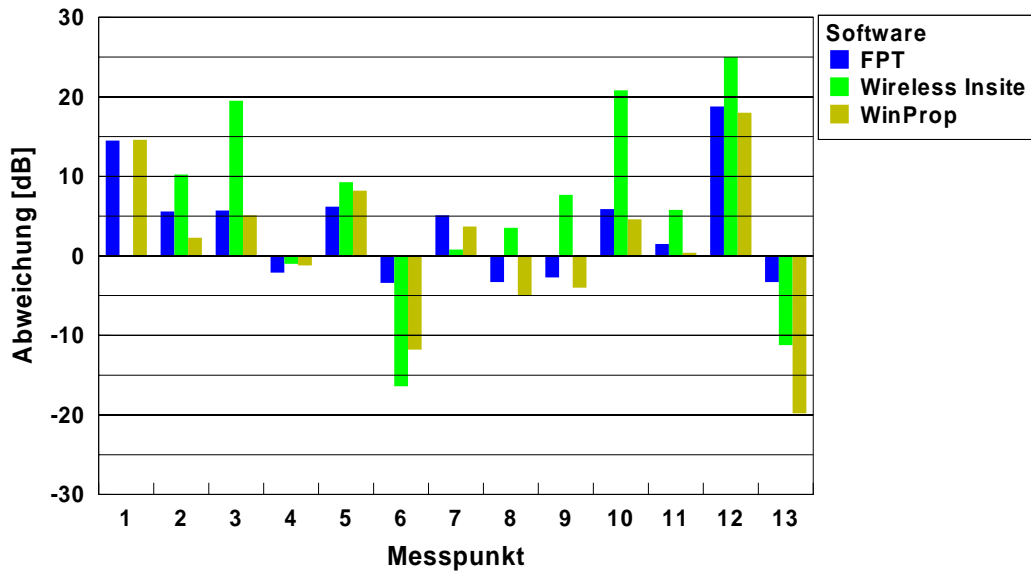


Bild II.3.12: Vergleich zwischen Berechnungsergebnis und Messergebnis, Kanal 35

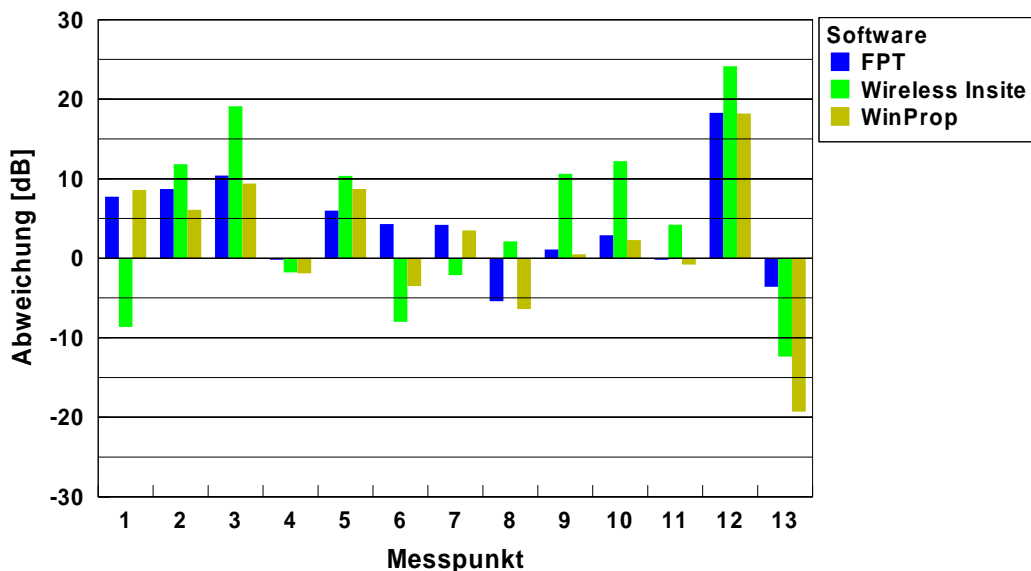


Bild II.3.13: Vergleich zwischen Berechnungsergebnis und Messergebnis, Kanal 56

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.

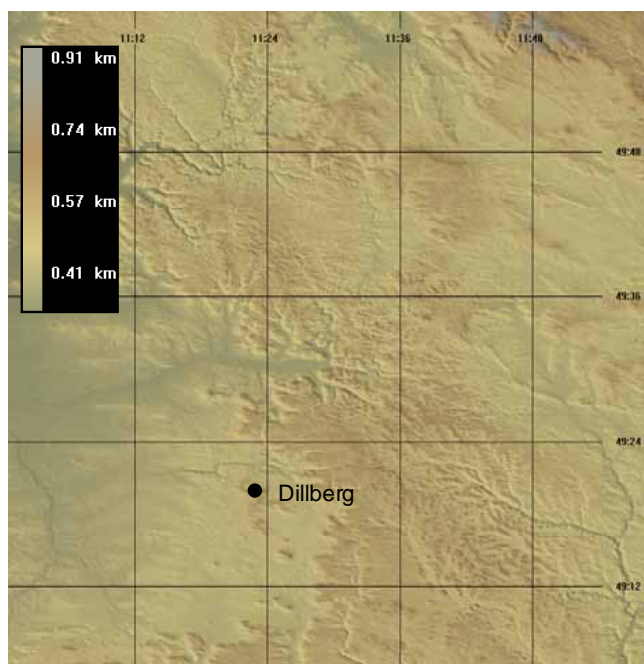
FPT	Wireless Insite	WinProp
5,8 dB	9,9 dB	7,2 dB

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.

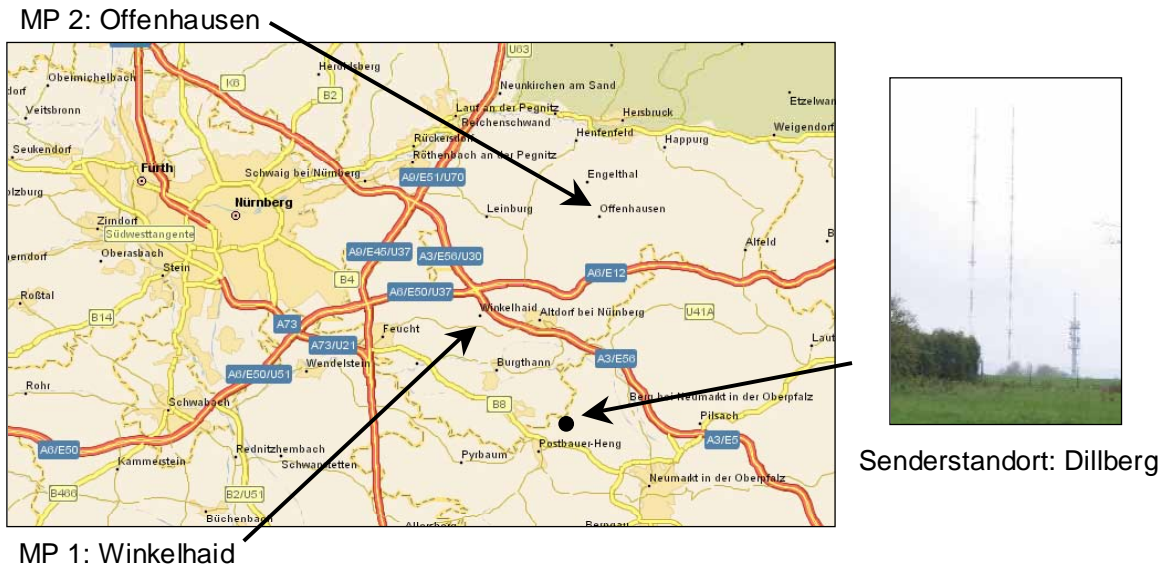


Bild II.3.15: Vergleichspunkte für die Region Nürnberg

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.

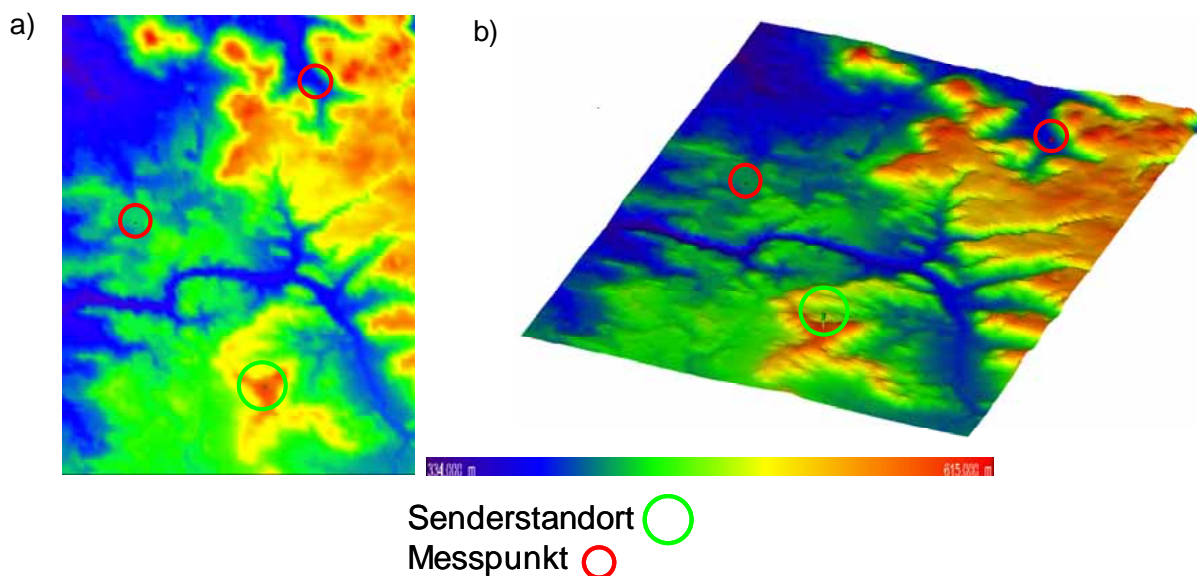


Bild II.3.16: Simulationsraum von Wireless Insite für die Region des Senderstandorts Dillberg
 a) 2D
 b) 3D

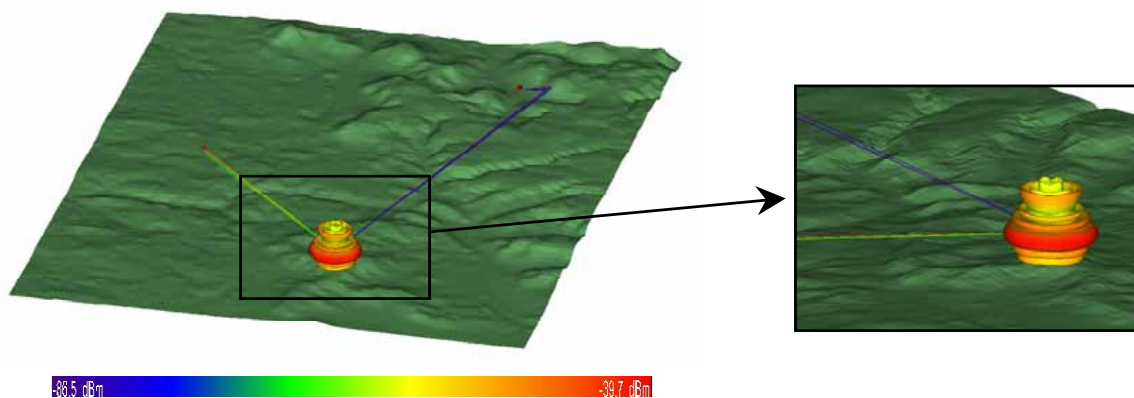


Bild II.3.17: Ausbreitungswege und 3D Antennendiagramm

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.

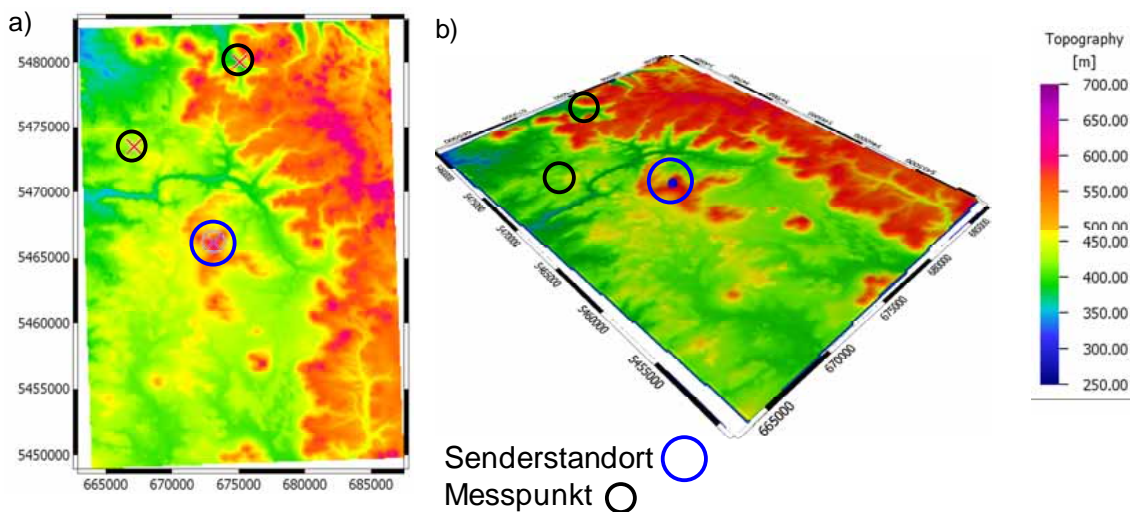


Bild II.3.18: Simulationsraum von Wireless Insite für die Region des Senderstandorts Dillberg
 a) 2D
 b) 3D

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

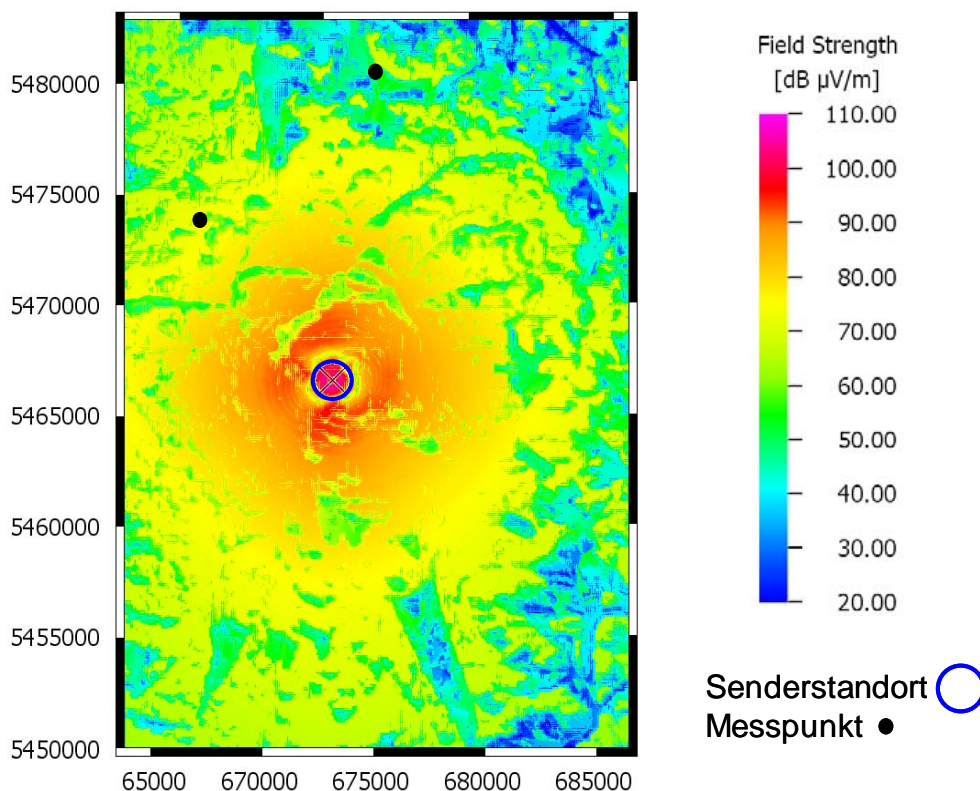


Bild II.3.19: Simulationsergebnis von WinProp für den Dillberg, Kanal 6

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.

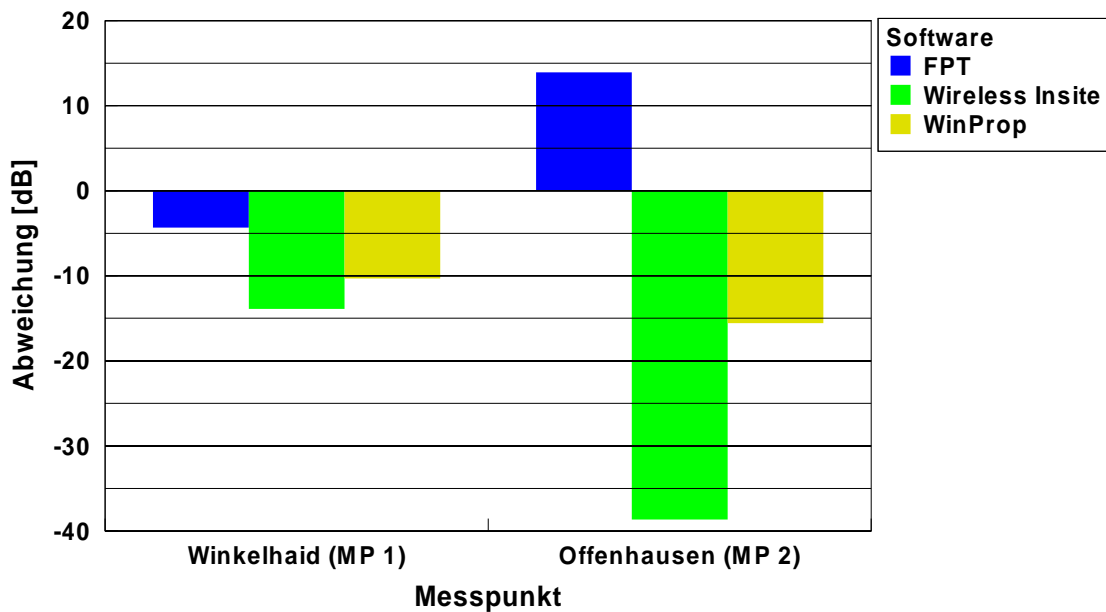


Bild II.3.20: Vergleich zwischen Berechnungsergebnis und Simulationsergebnis, Kanal 9

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.

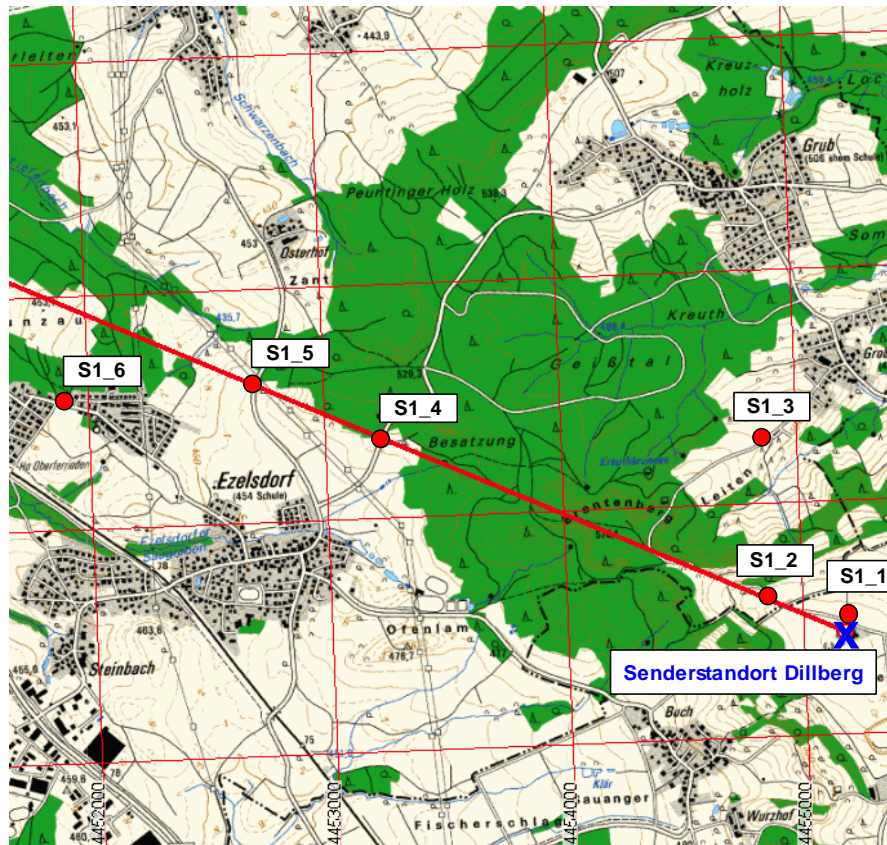


Bild II.3.21: Senderstandort Dillberg mit Vergleichspunkten in der direkten Umgebung Linie 1 (S1)

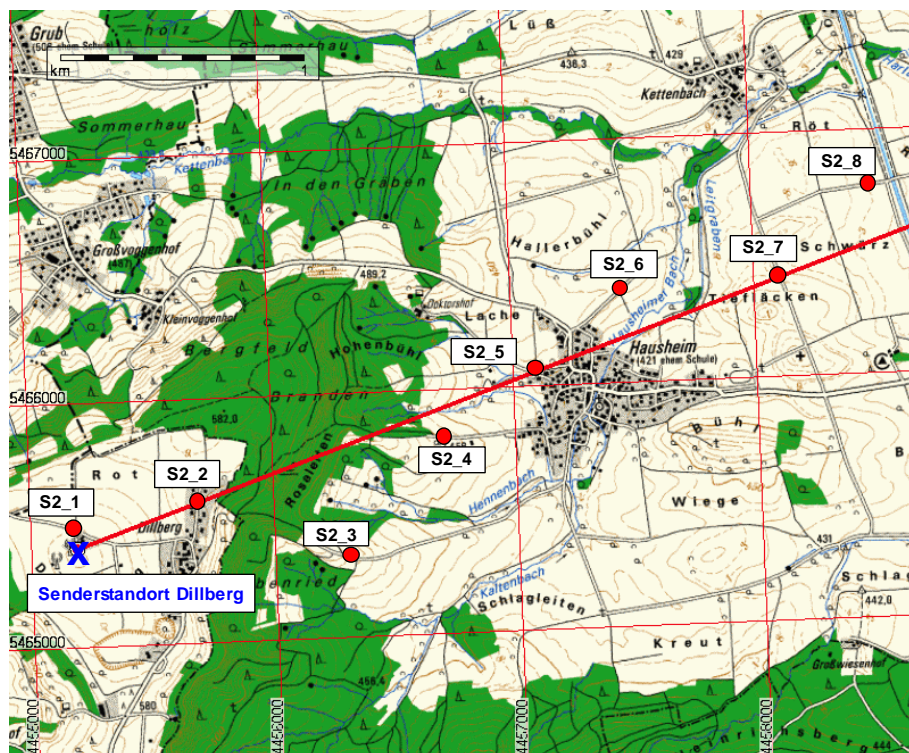


Bild II.3.22: Senderstandort Dillberg mit Vergleichspunkten in der direkten Umgebung Linie 2 (S2)

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.

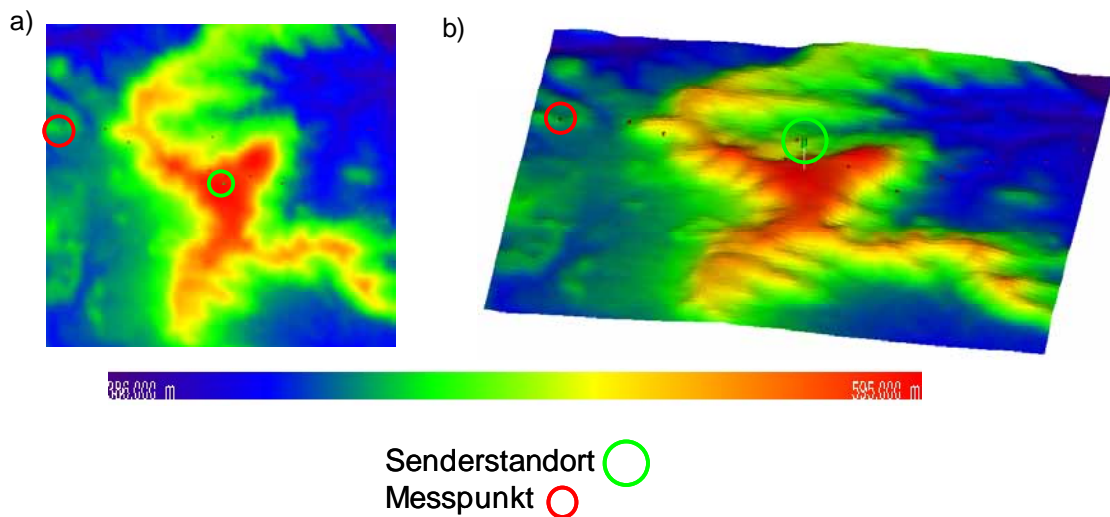


Bild II.3.23: Simulationsraum von Wireless Insite für die direkte Senderumgebung des Senderstandorts Dillberg
a) 2D
b) 3D

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

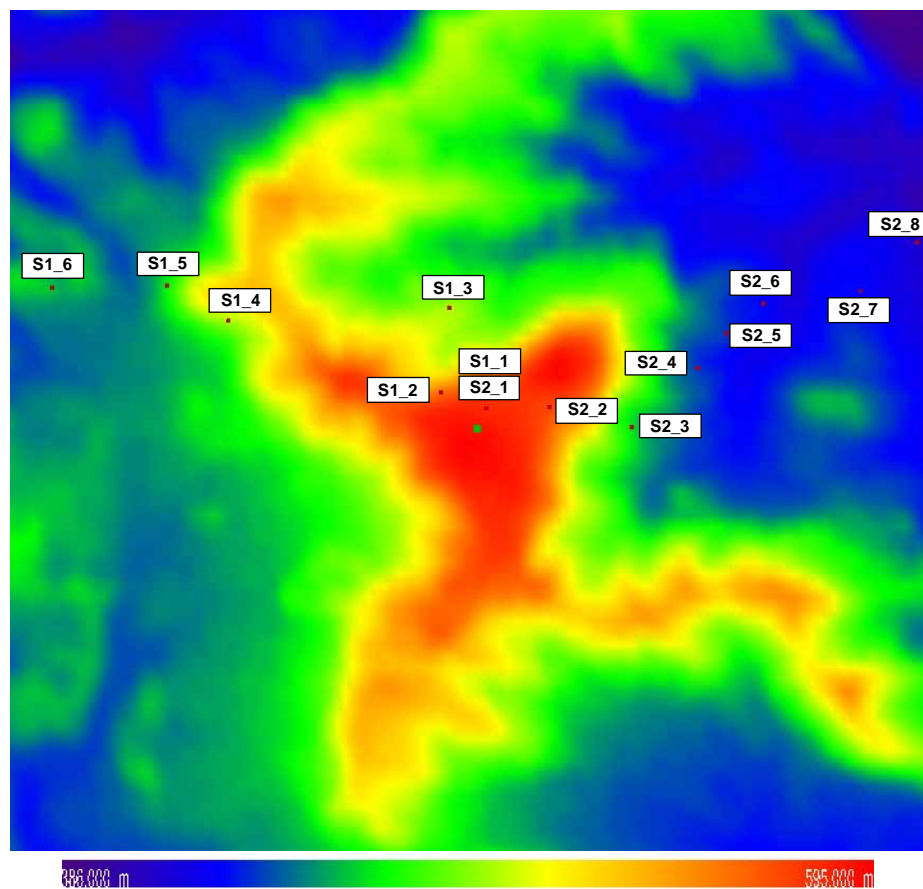


Bild II.3.24: Lage der Vergleichspunkte in Relation zum Senderstandort (grüner Punkt)

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

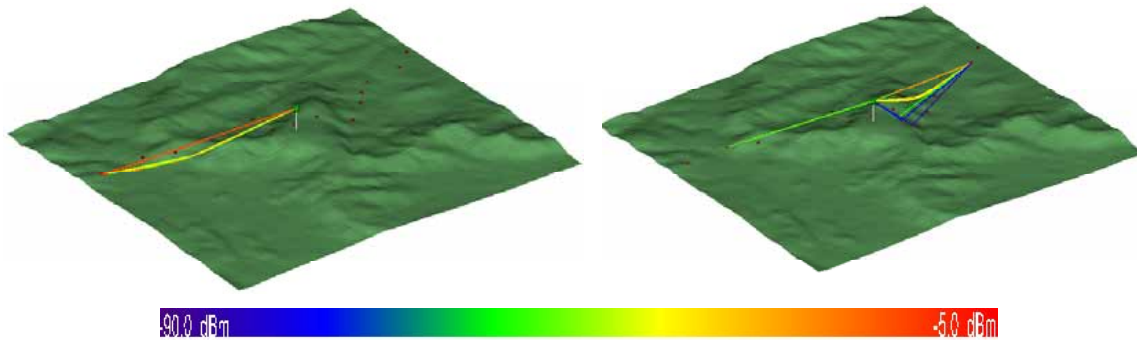


Bild II.3.25: Ausbreitungswege Wireless Insite

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.

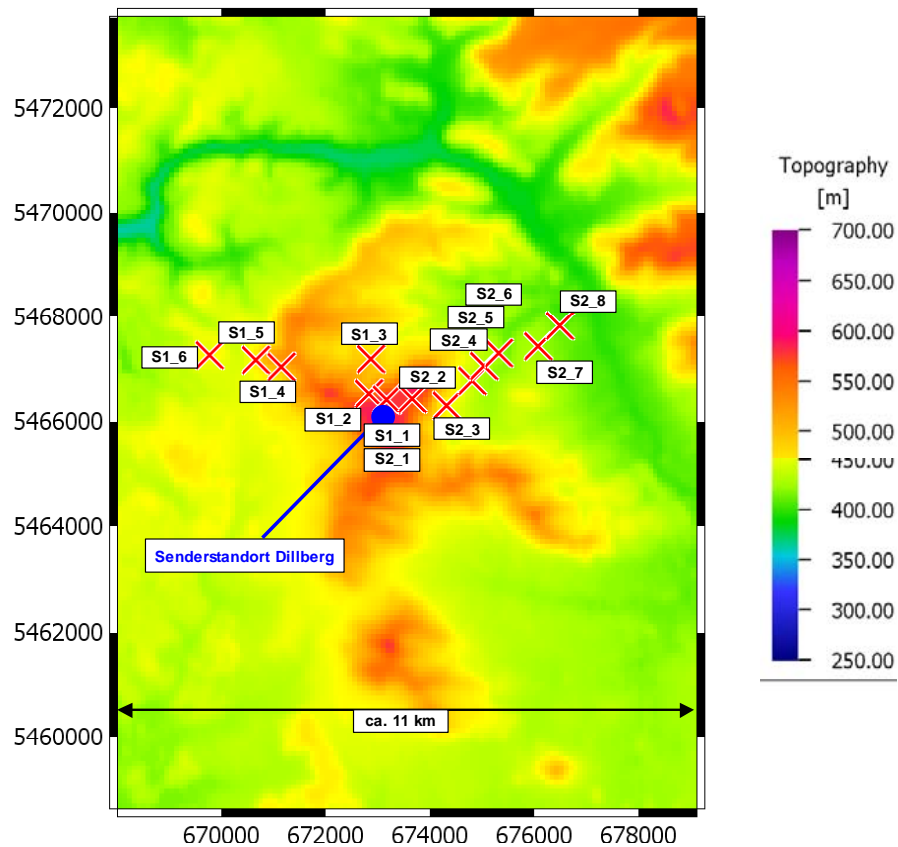


Bild II.3.26: Berechnungspunkte und Simulationsumgebung von WinProp

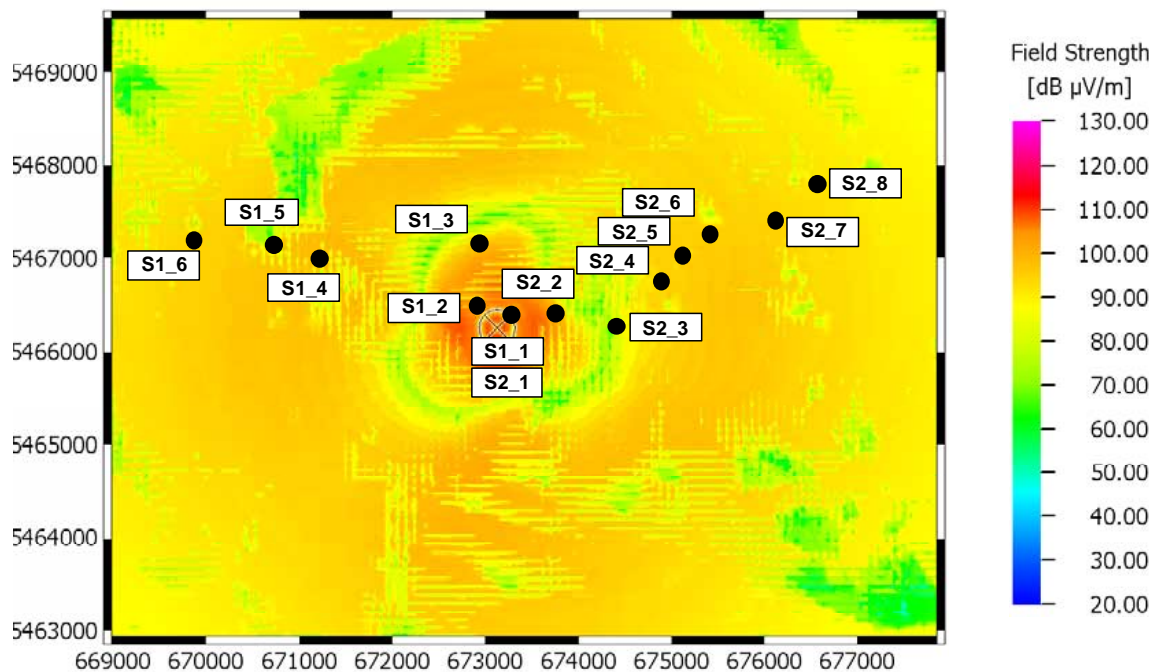


Bild II.3.27: Berechnungsergebnis mit WinProp

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.

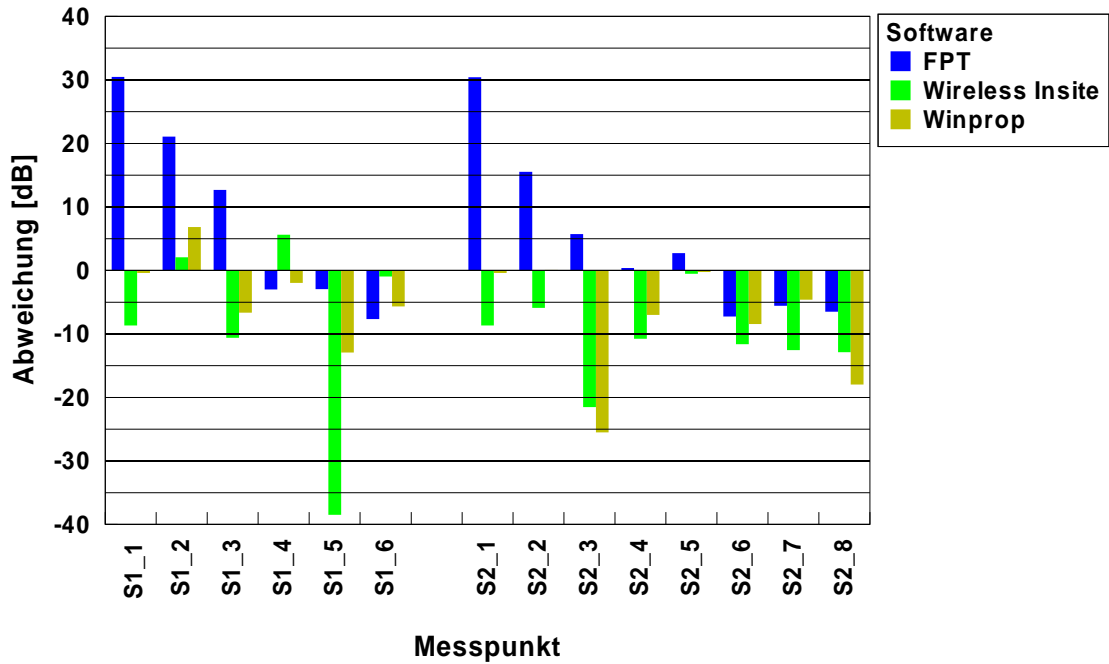


Bild II.3.28: Abweichung zwischen Mess- und Berechnungswert

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.

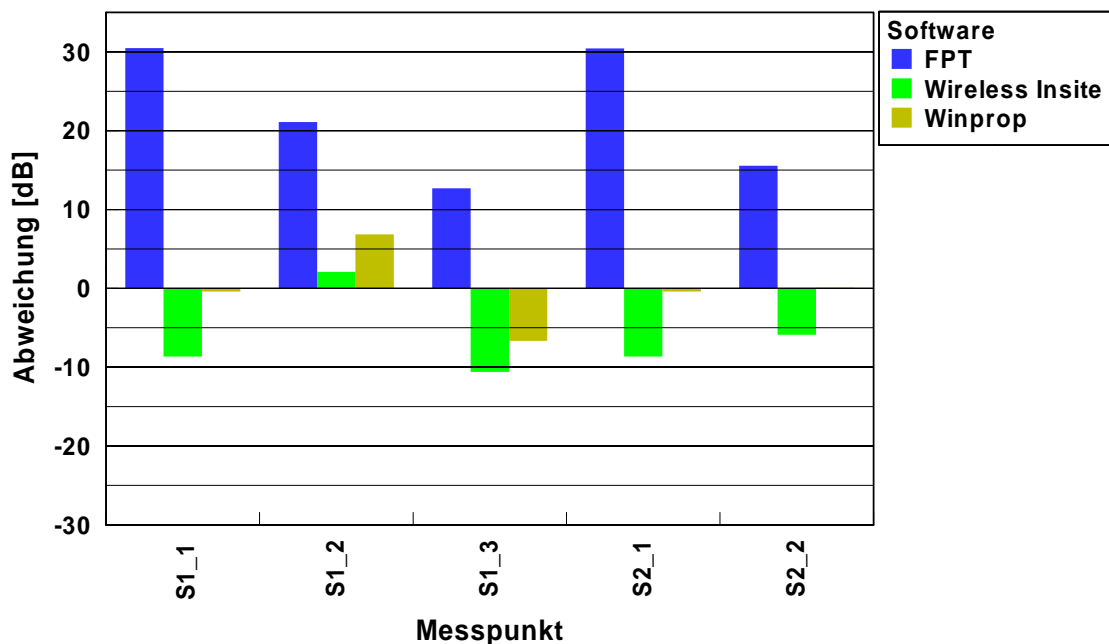


Bild II.3.29: Vergleich der Simulationsergebnisse im Bereich bis 1 km

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 Feldstärke-schwankungen. 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 Auflösungsbandbreite 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 (Zeilensynchronimpuls) 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 Zeitansatz 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:

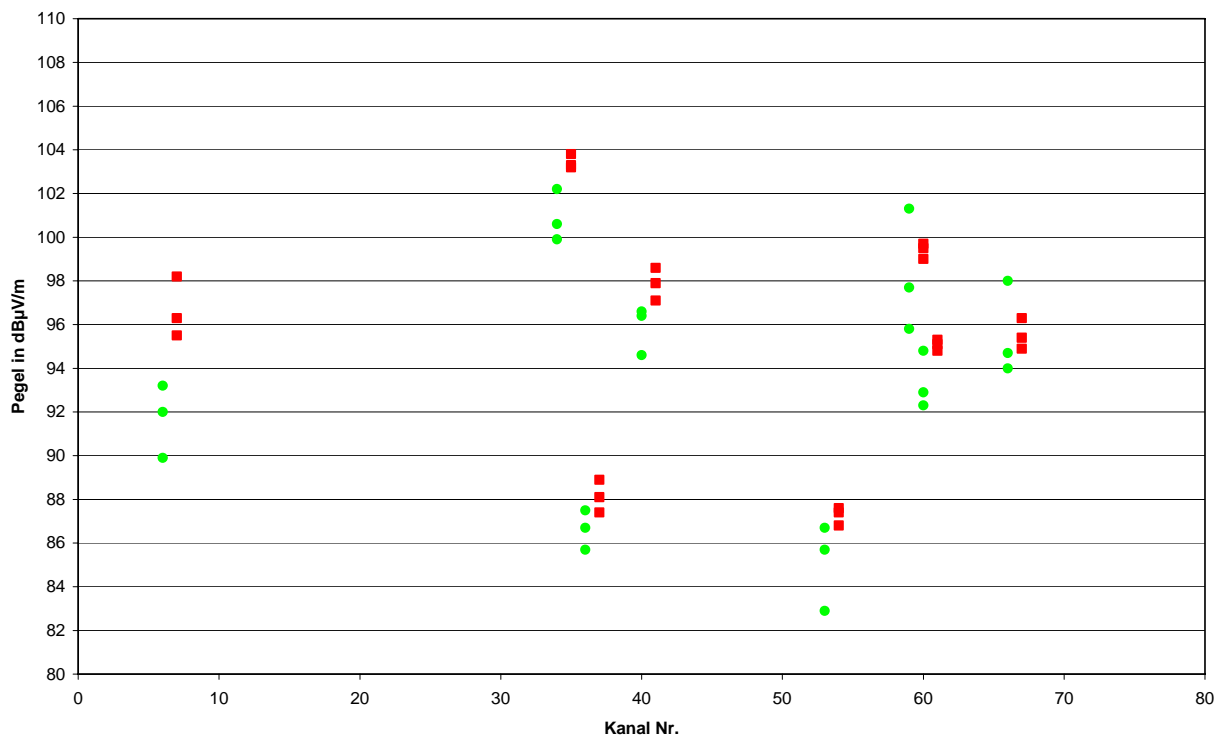


Bild II.4.3: Vergleich der Ergebnisse von Einzelpunktmessungen (grün) und Messungen mit der "Schwenkmethode" mit isotroper Antenne (rot)

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 Polarisierungen 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.

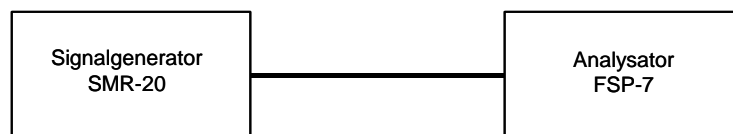


Bild II.4.4: UKW-Signale: Messaufbau

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 Auflösungsbreite (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.

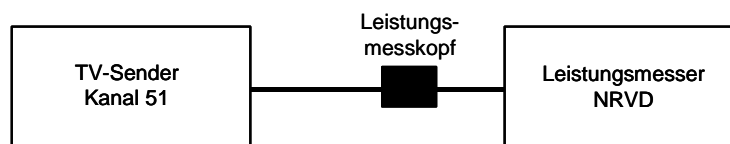


Bild II.4.5: Messungen am Ausgang eines analogen TV-Senders

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.

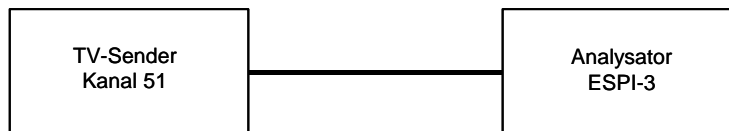


Bild II.4.6: Spektrale Messung am Ausgang eines analogen TV-Senders

Folgende Abbildung zeigt zwei typische Messergebnisse:

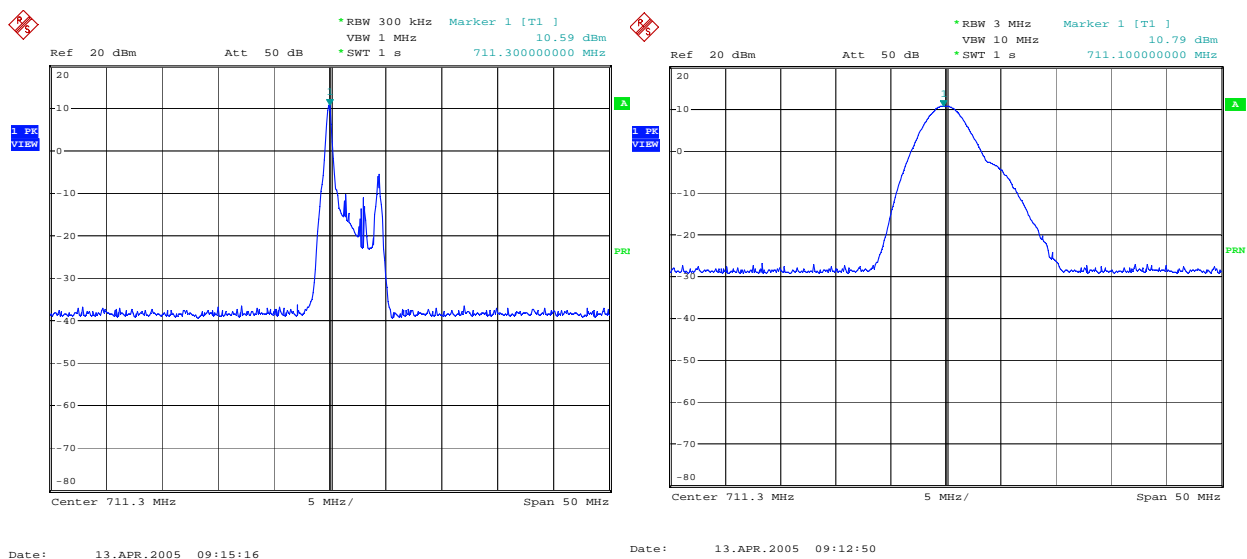


Bild II.4.7: Spektren eines analogen TV-Signals (links: RBW = 300 kHz; rechts: RBW = 3 MHz)

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 ($\text{Span}/\text{RBW} < \text{Pixelanzahl}$).
- 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).

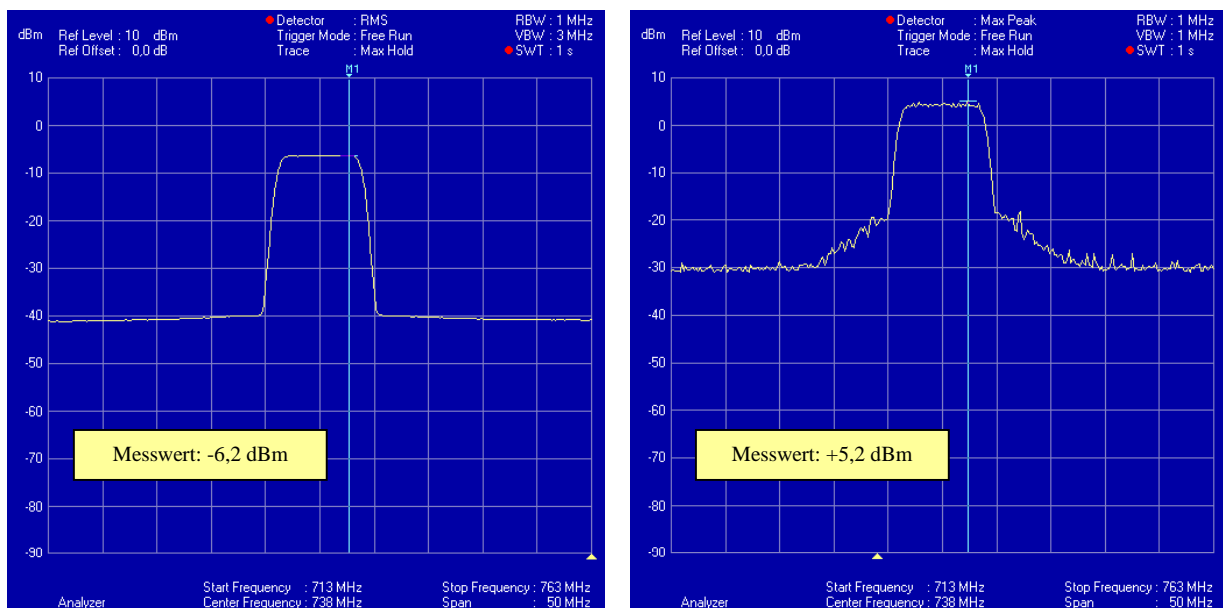


Bild II.4.8: Spektren eines DVB-T-Signals, gemessen mit RMS-Detektor (links) bzw. Peak-Detektor (rechts). Messgerät: FSH-3 von Rohde & Schwarz

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:

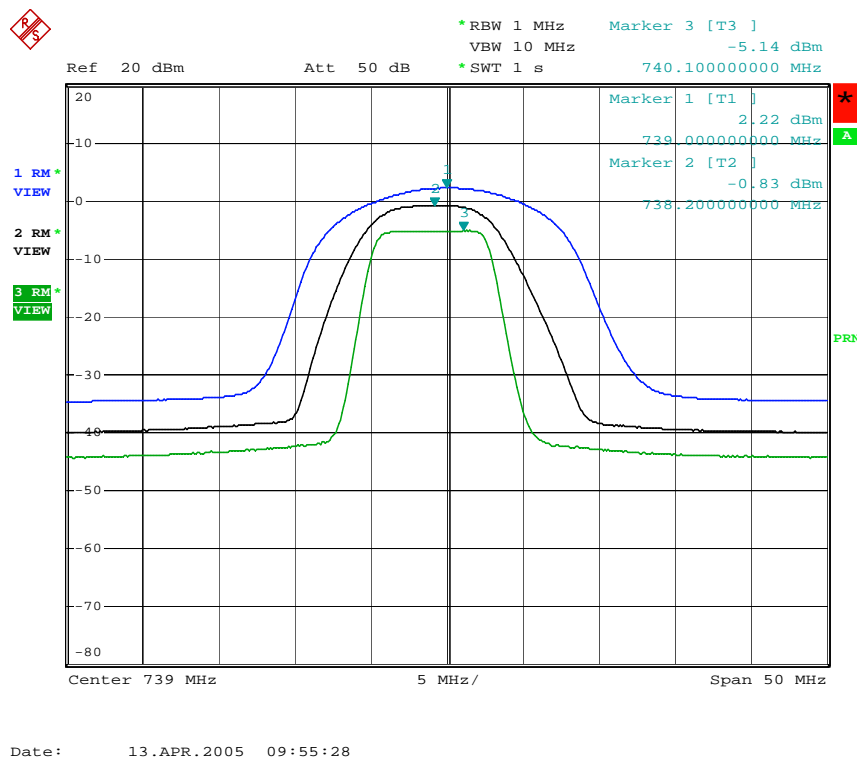


Bild II.4.9: Spektren eines DVB-T-Signals, gemessen mit RBW = 1 MHz (grün), 3 MHz (schwarz) und 10 MHz (blau); RMS-Detektor

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.

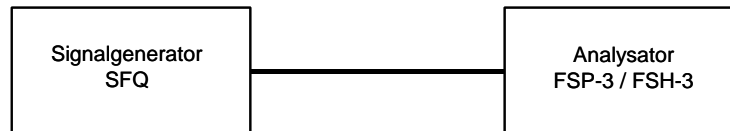


Bild II.4.10: Spektrale Messung eines künstlich erzeugten DVB-T-Signals

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 wurden entsprechend der in Bayern vorgesehenen Modulationskennwerte parametrisiert (16-QAM, 8k-Mode, Coderate 2/3). Gemessen wurde anschließend mit RMS-Detektor und verschiedenen Auflösebandbreiten. 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 Auflösebandbreite (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 Auflösebandbreite (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:

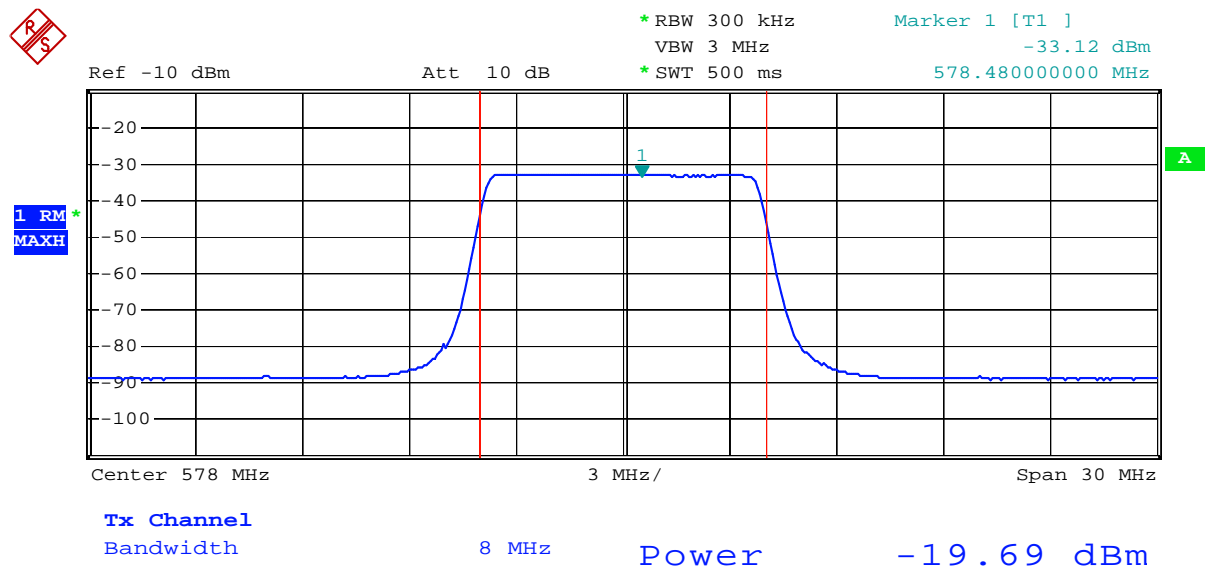


Bild II.4.11: Kanalleistungsmessung mit einem Spektrumanalysator

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

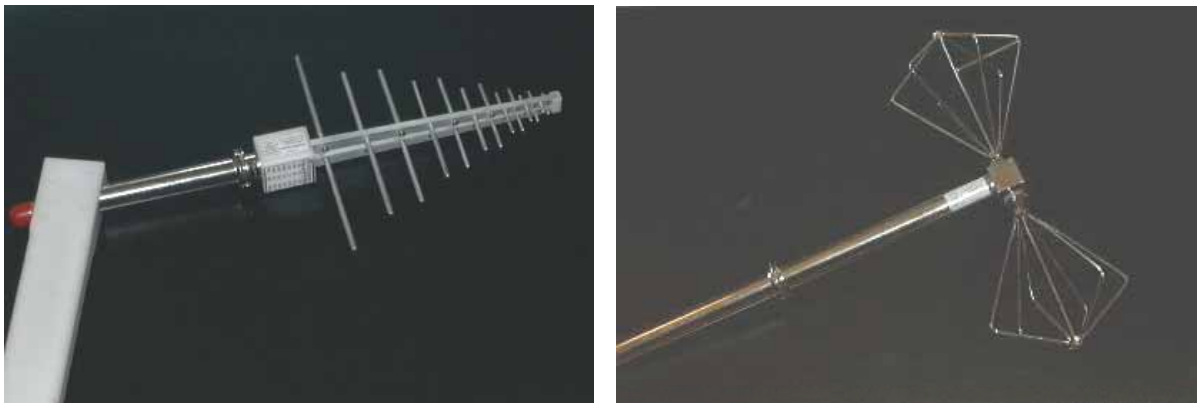


Bild II.4.13: Verwendete Messantennen: Schwarzbeck USLP-9142 (links) und UBA-9116 (rechts)

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	Sweeptime [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.

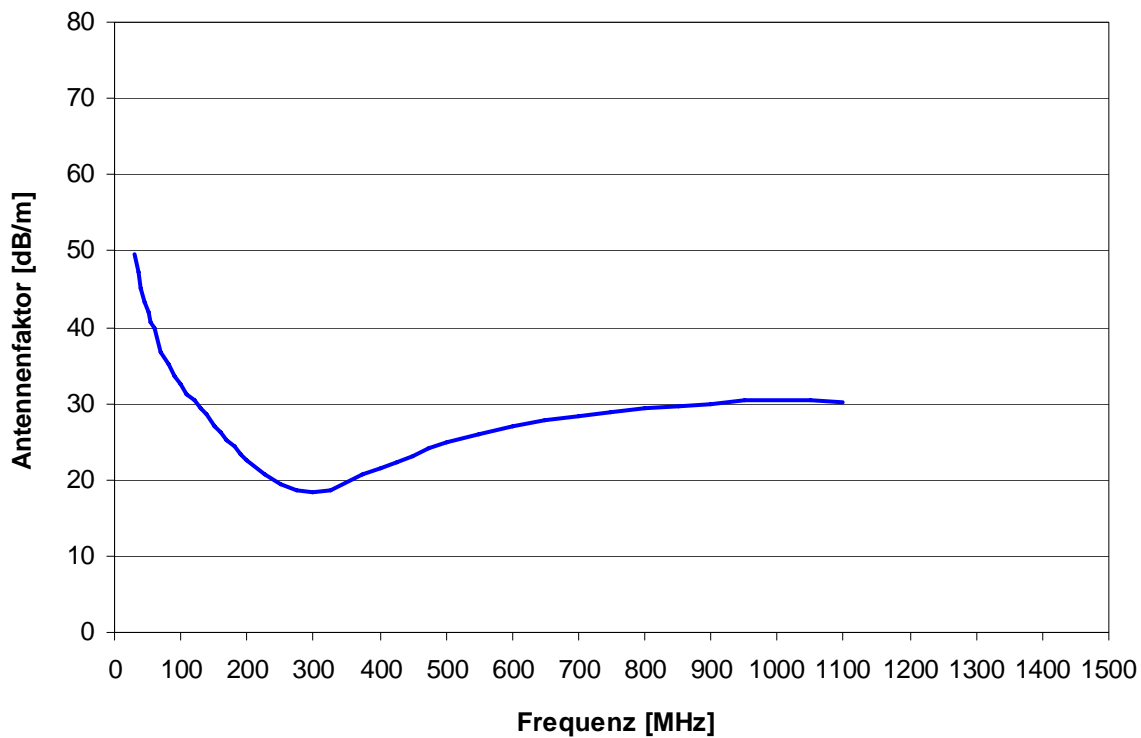


Bild II.4.15 Antennenfaktor bikonische Antenne Schwarzbeck UBA-9116

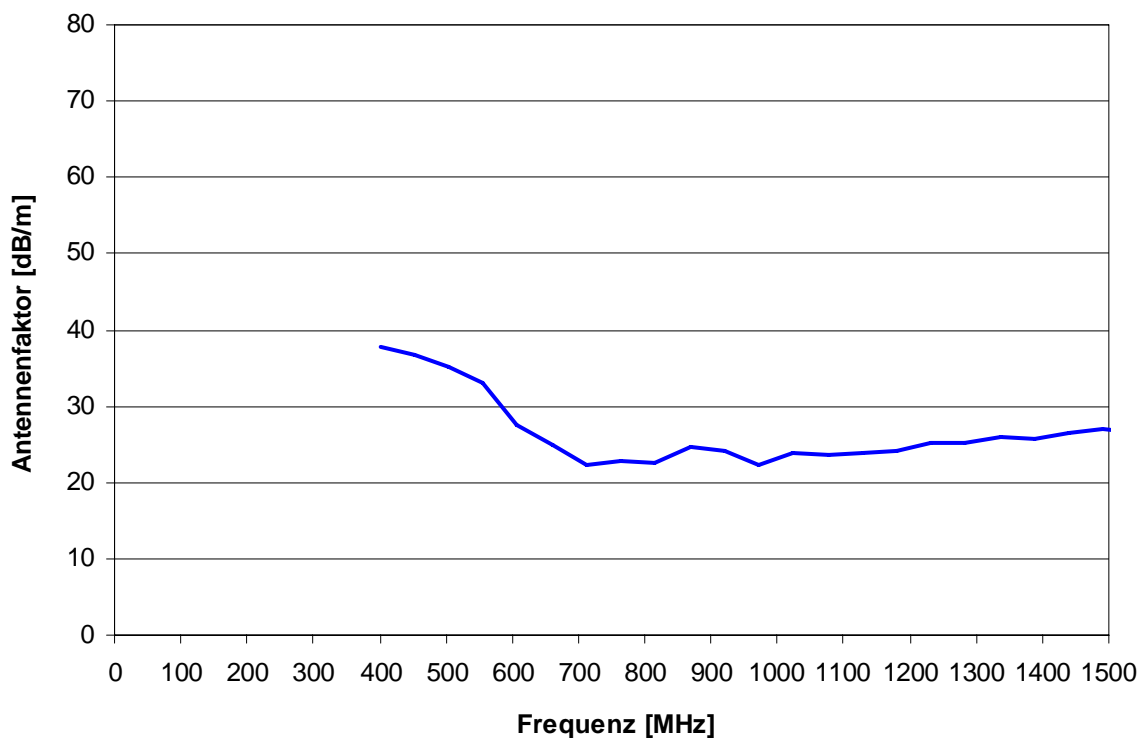


Bild II.4.16 Antennenfaktor logarithmisch-periodische Antenne Schwarzbeck USLP-9142

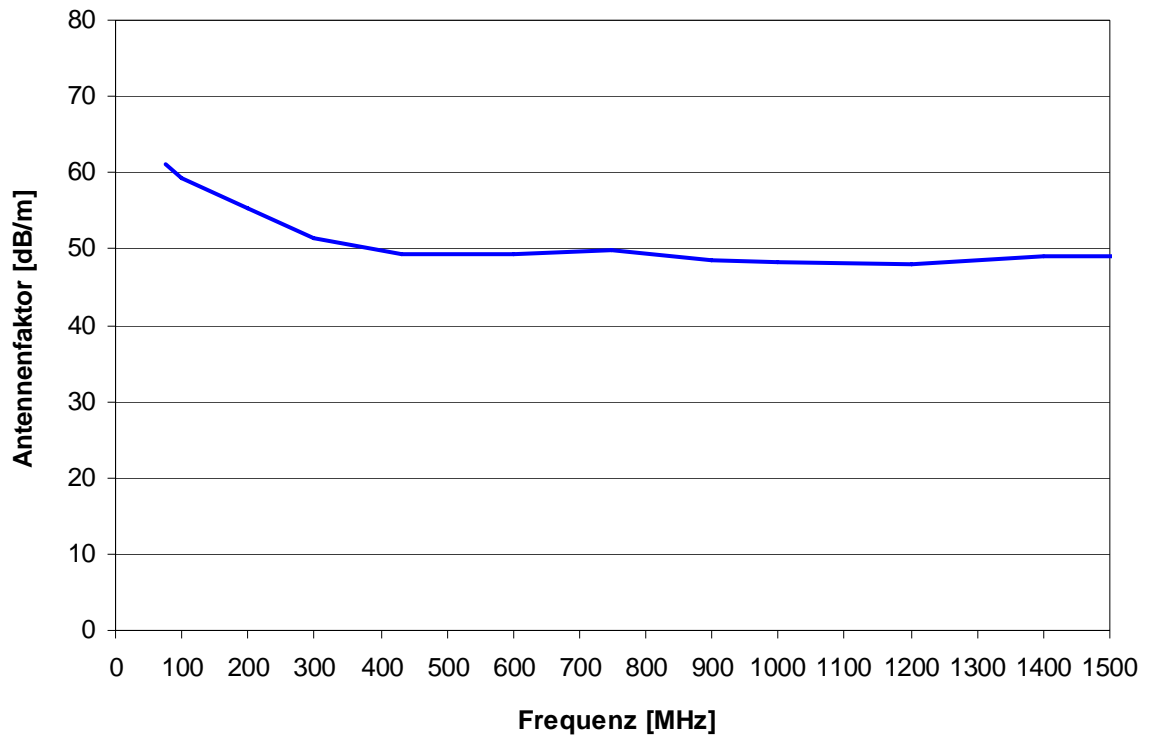


Bild II.4.17 Antennenfaktor Isotropsonde Messsystem Narda SRM-3000

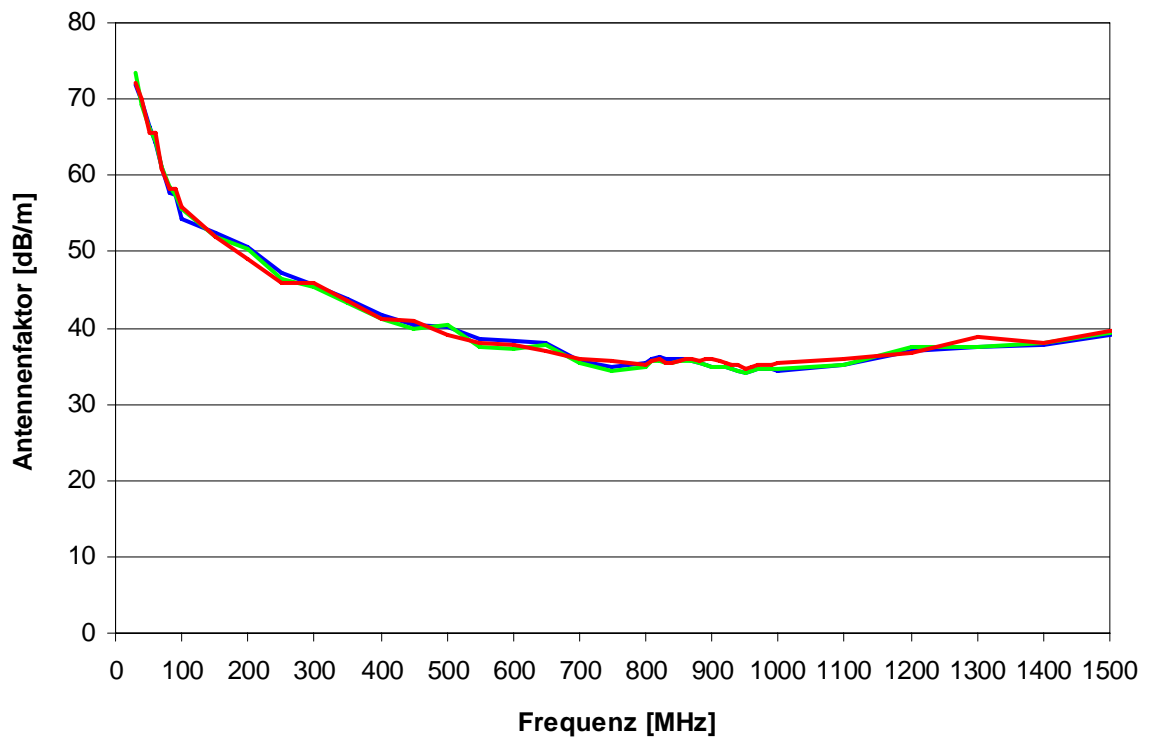


Bild II.4.18 Antennenfaktor Isotropsonde Messsystem Rohde & Schwarz TS-EMF; die drei dargestellten Kurven entsprechend den Antennenfaktoren der drei Messachsen

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 veränderten) 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.

III. Expositionserhebung

**Bearbeitungszeitraum
11. April 2005 – 31. März 2006**

III.1 Einleitung

Im Kapitel „Expositionserhebung“ des Forschungsvorhabens „Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern“ erfolgt zum einen eine messtechnische Erhebung der Immissionen durch analoge und digitale Ton- und Fernseh Rundfunksender. Die Messungen für die Expositionserhebung wurden in den Startregionen von DVB-T in Nord- bzw. Südbayern durchgeführt. Durch eine Messung vor der Umstellung (nur Analogbetrieb) und nach der Umstellung (nur Digitalbetrieb) ist eine direkte Vergleichbarkeit der Immissionssituation gewährleistet. Die Vergleichsmessungen an ein und derselben Region haben zudem den Vorteil, dass die Ergebnisse nicht durch topographische oder morphographische Unterschiede verfälscht werden.

Darüber hinaus werden die messtechnisch erhobenen Immissionen auch mit entsprechenden Berechnungen verglichen. Hierbei wird das aus Abschnitt II.2.2 schon bekannte Programm FPT eingesetzt. Durch einen Vergleich der Messungen mit den Berechnungen kann die Eignung der Software zur Ermittlung der Immissionen durch digitale und analoge Rundfunksender überprüft werden. In diesem Zusammenhang sind zwei Betrachtungsarten möglich: Zum einen ist die Frage zu klären, wie *genau* das Programm die Immissionen prognostiziert. Hierzu kann die betragsmäßige mittlere Abweichung zwischen Berechnung und Messung als Kriterium herangezogen werden. Zum zweiten wird überprüft, in wie weit das Berechnungsverfahren als Worst Case Methode geeignet ist. Hierunter ist zu verstehen, dass die berechneten Werte an allen Vergleichspunkten möglichst oberhalb der gemessenen Immissionen liegen. Als Beurteilungskriterium wird hierzu der prozentuale Anteil der Punkte herangezogen, an denen diese Situation vorlag.

Für die Wahl der Messpunkte wurde eine Messkampagne des Bayerischen Landesamtes für Umwelt herangezogen [BER 04]. Deren statistisch unabhängige Messpunkte wurden unter großer Sorgfalt und Berücksichtigung verschiedenster Parameter wie z.B. die Bevölkerungsdichte rein zufällig ermittelt. Das Bayerische Landesamt für Umwelt stellte uns freundlicherweise Koordinaten und Fotos der Messpunkte zur Verfügung. In den folgenden zwei Bildern sind die Messpunkte aufgeteilt in die Startregionen Nordbayern und Südbayern zu sehen.

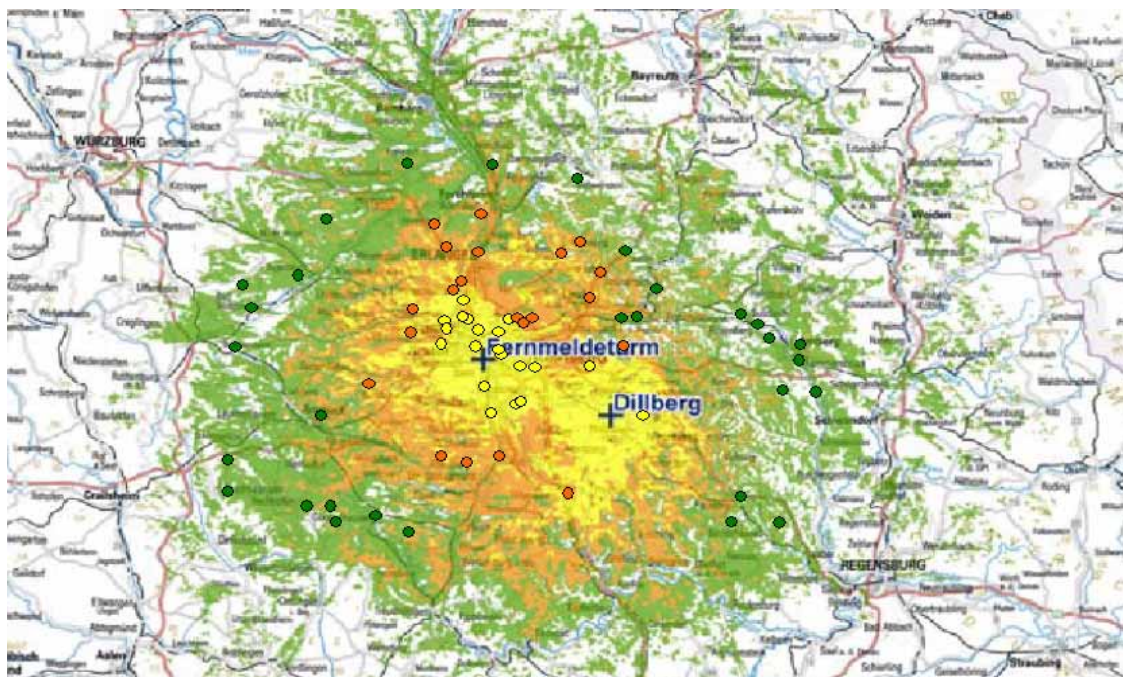


Bild III.1.1: Messpunktverteilung für die Region Nordbayern, farblich nach der jeweiligen Versorgungsklasse markiert
 Gelb: "portable indoor" (Empfang mit kleiner Zimmerantenne möglich)
 Orange: "portable outdoor" (Empfang mit kleiner Stabantenne außerhalb von Gebäuden möglich)
 Grün: "fixed antenna" (Empfang mit Richtantenne auf dem Dach möglich)

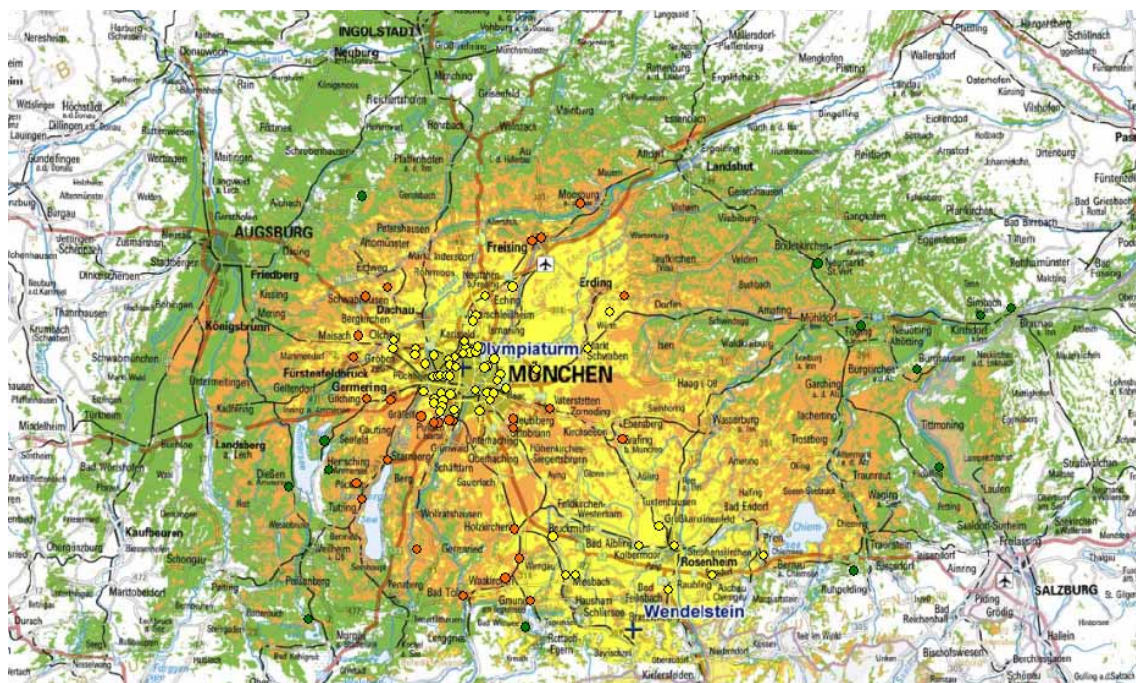


Bild III.1.2: Messpunktverteilung für die Region Südbayern, farblich nach der jeweiligen Versorgungsklasse markiert
 Gelb: "portable indoor" (Empfang mit kleiner Zimmerantenne möglich)
 Orange: "portable outdoor" (Empfang mit kleiner Stabantenne außerhalb von Gebäuden möglich)
 Grün: "fixed antenna" (Empfang mit Richtantenne auf dem Dach möglich)

Aus der Messkampagne des Bayerischen Landesamtes für Umwelt standen 181 Punkte zur Verfügung. Für dieses Projekt war jedoch eine Anzahl von 200 Messpunkten für den "Vorher-Nachher"-Vergleich vorgesehen. Um diese Zahl zu erreichen, mussten also noch 19 weitere Punkte gewonnen werden. Hierfür wurden drei Punkte aus den ebenfalls durchgeführten Gebäudemessungen verwendet (jeweils der Messpunkt, der vor dem Gebäude im Freien untersucht wurde). Außerdem standen noch insgesamt 45 Punkte aus drei "Strahlenmessungen" (siehe Abschnitt III.4.5.2 und Abschnitt III.4.5.3) zur Verfügung, aus denen die verbleibenden 16 per Losverfahren ausgewählt wurden. Somit ergab sich folgende Aufteilung der 200 Messpunkte:

Region	Punkte aus LfU-Kampagne	Punkte aus Gebäudemessungen	Punkte aus Linienmessungen
München	106	2	5
Nürnberg	75	1	11
Total	181	3	16

Tabelle III.1.1: Herkunft und Aufteilung der 200 Messpunkte

An 185 der 200 Messpunkte herrschte keine Sichtverbindung zu einem der Senderstandorte, nur an 15 Messpunkten war die Sicht gegeben. Betrachtet man die Verteilung auf die drei DVB-T-Versorgungsklassen, so ergibt sich folgendes Bild:

Region	"portable indoor"	"portable outdoor"	"fixed antenna"
München	40	16	31
Nürnberg	74	26	13
Total	114	42	44

Tabelle III.1.2: Aufteilung der 200 Messpunkte auf die drei DVB-T-Versorgungsklassen

Die Mehrzahl der Messpunkte befindet sich also in relativ geringer Entfernung zu den Senderstandorten, so dass die Regionen mit der vermutlich höchsten mittleren Immission besonders intensiv untersucht wurden. Es ergeben sich folgende mittlere Entfernungen zum nächsten DVB-T-Senderstandort:

Region	"portable indoor"	"portable outdoor"	"fixed antenna"
München	12,1 km	30,2 km	55,5 km
Nürnberg	7,2 km	23,8 km	38,3 km
Total	10,4 km	27,7 km	43,4 km

Tabelle III.1.3: Mittlere Entfernung zum nächsten DVB-T-Senderstandort für die drei Versorgungsklassen

Folgende Tabelle gibt abschließend einen Überblick über die Siedlungsstruktur in der Umgebung der Messpunkte:

Region	Innenstadt	Vorstadt / Kleinstadt	Dorf, Weiler
München	5	33	49
Nürnberg	25	58	30
Total	30	91	79

Tabelle III.1.4: Klassifizierung der 200 Messpunkte bezüglich der Siedlungsstruktur

Wie oben bereits kurz erwähnt, wurden zusätzlich zu den Untersuchungen an den "Zufallsmesspunkten" noch folgende systematische Messungen durchgeführt:

- Messung der Höhenabhängigkeit der Immission in 4 Hochhäusern (insgesamt 80 Messpunkte),
- Systematische "Linienmessungen" auf drei verschiedenen Strecken in der Umgebung der Senderstandorte Nürnberg, Dillberg und Wendelstein (insgesamt 47 Messpunkte).

Somit wurden im Rahmen dieses Projektes an über *300 Messpunkten* "Vorher-Nachher"-Untersuchungen durchgeführt.

III.2 Ergebnisse der vergleichenden Feldstärkemessungen

III.2.1 Messgeräte, Messdurchführung

Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchungen zu geeigneten Messverfahren (Abschnitt II.4 dieses Berichtes), wurde für die Messung eine geeignete Ausrüstung zusammengestellt und ein definierter Verfahrensablauf festgelegt. Ausführliche Erläuterungen dazu finden sich in den Abschnitten II.4.4 und II.4.5.

Im Detail wurden folgende Messmittel vor Ort eingesetzt:

Messmittel	Typ	Hersteller	Seriennummer	Letzte Kalibrierung
Feldanalysator	SRM-3000	Narda STS	E-0042	03/2005
Bikonische Messantenne	UBA 9116	Schwarzbeck	384	04/2003
LogPer Messantenne	ULSP 9142	Schwarzbeck	112	04/2003
LogPer Messantenne	ULSP 9142	Schwarzbeck	102	01/2004
1,5 m Koaxialleitung	RF-cable SRM	Narda STS	E-0012	02/2005

Tabelle III.2.1: Eingesetzte Messmittel

Durchgeführt wurden die "Vorhermessungen" in den Monaten April und Mai 2005. Die "Nachhermessungen" wurden nach Beendigung des Simulcastbetriebs im Oktober 2005 vorgenommen. In beiden Messzeiträumen war also ein vergleichbarer Vegetationszustand (Belaubung) vorhanden, so dass der jahreszeitliche Einfluss auf die Messresultate minimiert ist.



Bild III.2.1: Typischer Messpunkt in einem Wohngebiet

III.2.2 Problematik des Vergleichs der Ergebnisse zweier Messkampagnen

Ziel der vergleichenden Messungen war es, einen Eindruck über die Veränderung der Exposition der Bevölkerung durch Rundfunksignale zu gewinnen, der durch die Einführung von DVB-T bedingt ist. Während der Durchführung der Messkampagne bzw. im Rahmen der Auswertung der Messergebnisse zeigten sich jedoch auch einige Effekte, die bei der Bewertung der gefundenen Immissionswerte unbedingt beachtet werden müssen, da sonst aus den Messresultaten falsche oder unzulässige Schlüsse gezogen werden könnten:

- Selbst die relativ große Anzahl von 200 zufällig ausgewählten "Vorher-Nachher"-Messpunkten in Wohngebieten stellt nicht zwingend sicher, dass damit eine völlig erschöpfende Aussage über die Exposition der Bevölkerung möglich wird. Beispielsweise befanden sich alle Messpunkte in Bodennähe. Aussagen über die mittleren Immissionen in höheren Stockwerken können daraus nur näherungsweise abgeleitet werden (Um diese Problematik etwas mehr in Griff zu bekommen, wurden allerdings zusätzlich Messungen in vier Hochhäusern durchgeführt). Auch die Frage nach der absolut höchsten Exposition kann durch Auswertung der 200 Messpunkte nicht abschließend beantwortet werden. Es darf nicht vergessen werden, dass die Auswahl der Messpunkte nach einem Zufallsprinzip erfolgte und daher nicht sichergestellt ist, dass auch an den Punkten mit höchster Immission in der Umgebung der Senderstandorte gemessen wurde. Um nähere Informationen über die maximale Exposition zu erhalten, wurden zusätzlich Messungen an Punkten in unmittelbarer Nähe des Standortes durchgeführt ("Linienmessungen"). Außerdem wurden zwei Gebäude untersucht, die weniger als zwei Kilometer von einer Sendeanlage (Olympiaturm) entfernt sind.
- Insbesondere der arithmetische Mittelwert der Leistungsflussdichtewerte über alle Messpunkte erweist sich als sehr unsichere Größe zur Beurteilung der "mittleren Immissionsituation". Wie später noch gezeigt wird, können sich bei Verwendung dieses Wertes als Beurteilungsgröße für den "Vorher-Nachher"-Vergleich deutliche Fehlinterpretationen ergeben. Es zeigt sich, dass andere statistische Kennwerte der Immissionsverteilung für die Beurteilung der "mittleren Immission" deutlich besser geeignet sind.
- Die begrenzte Wiederholbarkeit von Feldstärkemessungen limitiert auch die Aussagekraft von "Vorher-Nachher"-Messungen. Allein schon durch veränderte Umweltbedingungen (Niederschlag, Jahreszeit, Luftfeuchtigkeit etc.) wird eine zweite Messung am selben Messpunkt (durchgeführt auf gleiche Weise vom gleichen Personal mit der gleichen Ausrüstung) immer etwas andere Resultate liefern, auch wenn die felderzeugende Anlage in ihren Eigenschaften nicht verändert wurde. Daher sollte man bei derartigen "Vorher-Nachher"-Vergleichen die Immissionsveränderung nicht für einzelne Punkte isoliert betrachten, sondern das Augenmerk auf die mittlere Veränderung über die Gesamtheit der Punkte legen. Um einen Eindruck über die Wiederholbarkeit derartiger Messungen zu gewinnen, wurden die Felder der UKW-Sender (die ja von der DVB-T-Umstellung nicht betroffen sind) sowohl bei der "Vorher-" als auch bei der "Nachhermessung" erfasst. Ein Vergleich der Resultate gibt Aufschluss über die maximal erreichbare Reproduzierbarkeit und zeigt eventuell Ursachen für erhöhte Differenzen auf. Auf die Ergebnisse dieser Vergleichsmessung wird noch im Detail eingegangen.

- Auch zeigt sich, dass ein "sturer" Vergleich der HF-Immission vor und nach der DVB-T-Umstellung wenig aussagekräftige Ergebnisse liefert. Ein derartiger Vergleich gibt nur Auskunft, wie sich die Exposition an den explizit betrachteten Punkten verändert hat. Zusätzlich sind zwar daraus auch einige Schlussfolgerungen bezüglich der Veränderungen innerhalb der Gesamtfläche, auf der sich die Punkte befinden (also die Regionen München bzw. Nürnberg) möglich. Eine Aussage, ob die Technologie "DVB-T" grundsätzlich günstiger oder ungünstiger bezüglich der Immission anzusehen ist, kann aus dem reinen Messwertvergleich nicht ohne weiteres gewonnen werden. An dieser Stelle sei beispielsweise erwähnt, dass mit der Umstellung auf DVB-T, die beiden analogen Grundnetzsender auf dem Sendeturm "Schwabach-Heidenberg" abgeschaltet wurden und dafür DVB-T-Sender am Nürnberger Fernmeldeturm in Betrieb genommen wurden. Dies bedeutet, dass die meisten Messpunkte im Innenbereich der Stadt Nürnberg mit der Umstellung auf DVB-T näher an die Sendeanlage heranrücken (Der Sender "Schwabach-Heidenberg" befindet sich in südlicher Richtung in etwa 15 km Entfernung vom Nürnberger Fernmeldeturm (siehe Bild III.2.15), der selbst am südlichen Rand von Nürnberg lokalisiert ist), so dass vermutlich eine Immissionszunahme in Nürnberg festzustellen ist, die allerdings nicht automatisch der "Technologie" DVB-T zugeordnet werden darf, sondern im wesentlichen durch die Verlagerung des Antennenstandortes bedingt ist.
- Bei der Auswertung der "Vorher-Nachher"-Messungen ist außerdem zu beachten, dass die analogen TV-Signale am Standort Olympiaturm und Wendelstein zum Zeitpunkt der "Vorhermessungen" bereits mit einer um etwa 3 bis 4 dB reduzierten ERP abgestrahlt wurden. Dies bedeutet, dass die Resultate der "Vorhermessung" nicht mehr den Zustand des analogen TV-Netzes widerspiegeln, wie er in dieser Region in den letzten Jahren anzutreffen war, sondern ein Szenario mit bereits reduzierter Immission. Diese Verzerrung der Immissionssituation muss angemessen korrigiert werden, was im Folgenden auch bei der Auswertung der Messergebnisse getan wurde (z.B. in Tabelle III.2.5).

III.2.3 Reproduzierbarkeit der Messung im UKW-Frequenzbereich

Um einen Eindruck über die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu gewinnen, wurden die Felder des UKW-Rundfunks sowohl bei der "Vorher-" als auch bei der "Nachhermessung" ermittelt. Die Konfiguration der UKW-Sendeanlagen im Untersuchungsgebiet im Sommer 2005 nicht wesentlich verändert wurde (nur im Bereich des Wendelsteins wurde durch den Umbau die ERP der UKW-Signale leicht erniedrigt). Dies bedeutet, dass Differenzen in den Messresultaten beider Kampagnen im wesentlichen durch veränderte Ausbreitungsbedingungen (Wetter, Belaubung etc.) bedingt sein müssen. Der Einfluss der Messausrüstung wurde minimiert, da für beide Kampagnen das gleiche Equipment verwendet wurde.

Prinzipiell hätte auch ein "Vorher-Nachher"-Vergleich des landesweiten DAB-Signals (Kanal 12) Auskünfte über die Wiederholbarkeit der Messungen liefern können, da die DAB-Sender in der betrachteten Region ebenfalls nicht verändert wurden. Jedoch wurde auf diesen Vergleich verzichtet, da zum Zeitpunkt der "Vorhermessungen" noch nicht hundertprozentig geklärt war, welches Messverfahren des verwendeten Messgerätes SRM-3000 bei den digitalen Rundfunksignalen zuverlässig den RMS-Wert liefert.

Folgende Grafik zeigt für 197 Messpunkte den Vergleich der gemessenen UKW-Summenleistungsflussdichte (Nachhermessung / Vorhermessung in dB). Ein positiver dB-Wert bedeutet also, dass bei der zweiten Messung mehr gemessen wurde als bei der ersten. An drei der 200 Messpunkte war der Vergleich nicht möglich, da hier die UKW-Messdaten fehlerhaft waren (Übertragungsfehler des Messgerätes).

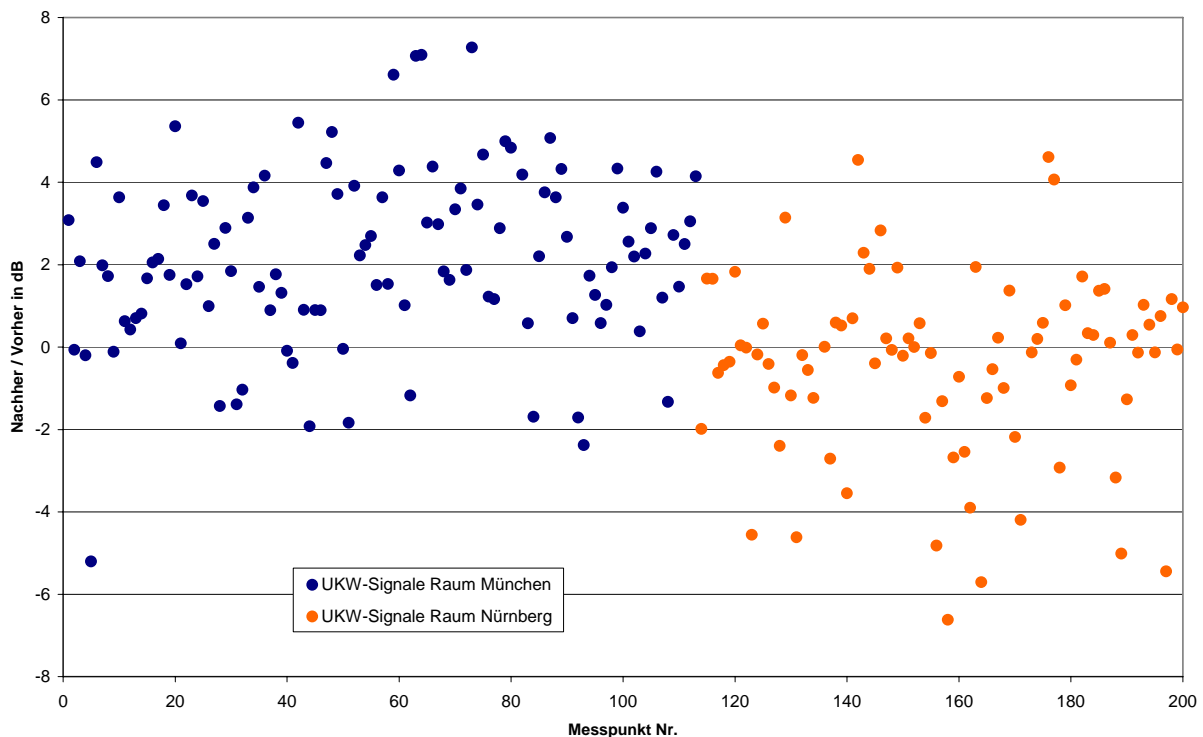


Bild III.2.2: Ergebnis des Vergleichs der UKW Summenfeldstärke der beiden Messungen (Verhältnis aus Nachhermesswert zu Vorhermesswert in dB) für 197 Messpunkte

Eine Auswertung obiger Grafik liefert folgende Erkenntnisse:

- Der Unterschied zwischen den Ergebnissen der beiden Messungen liegt bei der Mehrzahl der Punkte im Bereich von maximal ± 3 dB (143 von 197 d.h. 72,6 %).
- Im Mittel ergibt sich, dass im Rahmen der Nachhermessung 1,03 dB mehr gemessen wurde, als bei der Vorhermessung (Standardabweichung: 2,52 dB).
- Interessant ist dabei, dass sich offensichtlich ein Unterschied zwischen den Regionen München und Nürnberg ergibt. Im Raum Nürnberg erscheint die Reproduzierbarkeit besser (Mittlere Abweichung: -0,43 dB, im Münchner Raum hingegen: +2,14 dB). Auch die Streubreite der Differenzen ist geringer: Im Nürnberg liegen 70 von 85 Messpunkten (d.h. 82,4 %) innerhalb des ± 3 dB-Bereichs, während es in München nur 73 von 112 (65,2 %) sind. Es drängt sich daher der Verdacht einer systematischen Abweichung auf.

Um der Frage nach der Ursache für die festgestellten Unterschiede bezüglich der Reproduzierbarkeit zwischen den Regionen Nürnberg und München näher auf den Grund zu gehen, wurden die Münchner Messdaten genauer analysiert. Dabei stellte sich heraus, dass hauptsächlich nur die UKW-Signale, die vom Standort "Wendelstein" ausgesendet wurden, bei der zweiten Messung im Mittel signifikant höhere Resultate lieferten als bei der ersten Messung. Dieser Sachverhalt ist in folgender Grafik dargestellt:

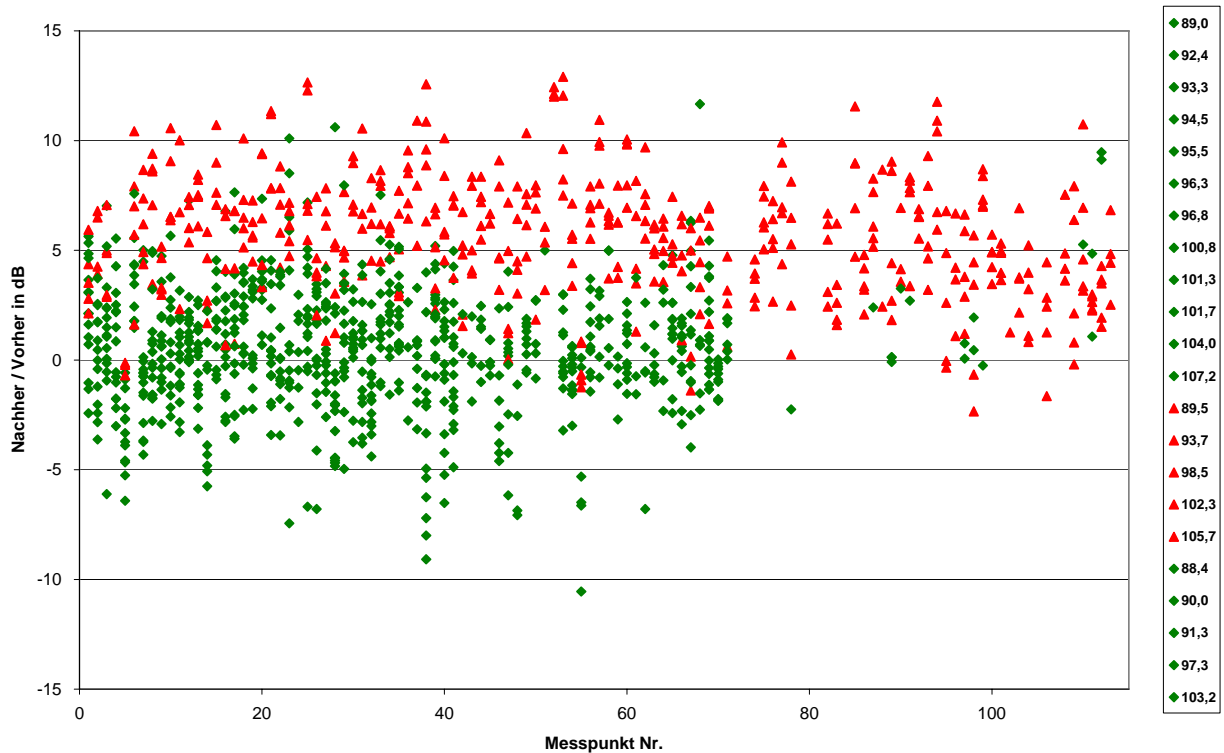


Bild III.2.3: Ergebnis des Vergleichs der UKW Summenfeldstärke im Raum München, aufgelöst für einzelne Frequenzen (Rot: Wendelstein; Grün: Olympiaturm bzw. Ismaning)

Lässt man die Signale vom Wendelstein außer acht, so ergibt sich im Raum München, ähnlich wie in der Region Nürnberg, wieder eine nahezu symmetrische Verteilung um den Nullwert herum. Der Mittelwert über alle grünen Punkte beträgt dann +0,6 dB (Standardabweichung: 2,8 dB).

Bei den Signalen vom Wendelstein hingegen ist eine deutliche Tendenz zu höheren Messergebnissen im Rahmen der "Nachhermessung" festzustellen (Mittelwert über alle roten Punkte: +5,6 dB, Standardabweichung 2,9 dB). Eine absolut erschöpfende Erklärung für diese offensichtlich systematische Abweichung kann nicht gegeben werden. Nachfragen beim Bayerischen Rundfunk ergaben keinen schlüssigen technischen Grund für diesen Effekt. Möglich wäre auch, dass die Abweichungen hauptsächlich jahreszeitlich oder durch das Wetter bedingt sind. Da die Messpunkte im Mittel vom Wendelstein deutlich weiter entfernt sind, als von München, würden sich wetter- oder jahreszeitlich bedingte Unterschiede im Dämpfungskoeffizient auch stärker bemerkbar machen, als im Stadtbereich von

München. Im folgenden Bild sind daher die Ergebnisse des UKW-Vergleichs für Signale vom Wendelstein in Abhängigkeit von der Entfernung zum Wendelstein aufgetragen:

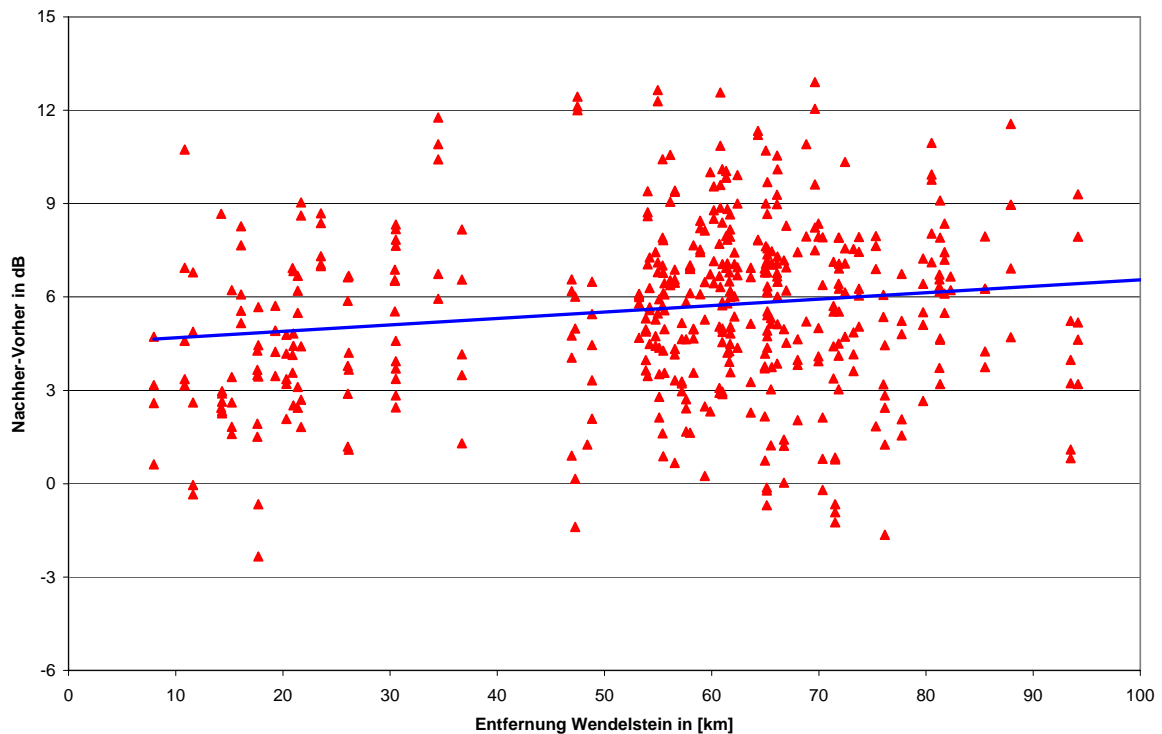


Bild III.2.4: Ergebnis des Vergleichs der UKW Summenfeldstärke für Signale vom Wendelstein in Abhängigkeit von der Entfernung zum Senderstandort

Wie die eingezeichnete Regressionsgerade verdeutlicht, ergibt sich nur eine leichte Zunahme der Differenz zwischen "Vor-" und "Nachhermessung" für weiter entfernte Punkte, was den Einfluss wetterbedingter Dämpfungsunterschiede nur wenig unterstützt.

Auch eine genauere Auswertung der Wetterbedingungen an den Messpunkten erhärtet die Annahme eines deutlichen Wettereinflusses nicht:

An insgesamt 57 der 200 Messpunkte (32 in der Region Nürnberg, 25 im Bereich München) trat während einer der beiden Messungen Niederschlag auf (leichter bis mittelstarker Regen), wobei an 53 Punkten der Regen während der "Vorhermessung" auftrat. An vier Punkten regnete es während der "Nachhermessung". An keinem Punkt regnete es während beider Messungen.

Berechnet man für diese 57 Punkte wiederum den mittleren Unterschiedsfaktor zwischen "Vor-" und "Nachhermessung", so ergeben sich mit $-0,4$ dB für die Region Nürnberg bzw. $+2,1$ dB für die Region München nahezu die gleichen durchschnittlichen Abweichungen, wie bei Mittelwertbildung über alle Punkte. Der Niederschlag übt also offensichtlich keinen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Feldstärkewerte aus. Bei 77,2 % der 57 Punkte ergibt sich ein Unterschied zwischen "Vor-" und "Nachhermessung" von weniger als 3 dB. Dieser Prozentsatz ist sogar geringfügig besser als der bei Betrachtung aller 200 Punkte.

Fazit:

Zusammenfassend kann man feststellen, dass der Pegelunterschied zwischen den beiden Messkampagnen für die UKW Signale an der überwiegenden Zahl der Messpunkte weniger als 3 dB beträgt. Eine bessere Reproduzierbarkeit ist erfahrungsgemäß aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren auch nicht zu erwarten gewesen. Allerdings wurde beobachtet, dass die UKW-Signale vom Wendelstein systematisch bei der zweiten Messung stärker vorhanden waren als beim ersten Messdurchgang, ohne dass dafür eine plausible Begründung gefunden werden kann. Eine witterungsbedingte Ursache für diesen Effekt konnte nicht nachgewiesen werden. Die Gesamtaussage der vergleichenden Messungen wird allerdings durch diesen Effekt nicht in Frage gestellt.

III.2.4 Gesamtexposition und Verteilung auf die verschiedenen Funkdienste

In diesem Abschnitt soll zunächst die an den Messpunkten gefundene Gesamtimmission, also die Summe aus allen gemessenen Funkdiensten vor und nach der DVB-T-Umstellung, vergleichend gegenübergestellt werden. Folgende Tabelle gibt zunächst einen Überblick über wichtige Kennwerte der Verteilung der Resultate. Dabei wird zum einen die Summenleistungsflussdichte, zum anderen der grenzwertbezogene Summenwert in ppm ("Ausschöpfungsgrad der Grenzwerte") [ICNIRP 98] betrachtet.

Anzumerken ist an dieser Stelle noch, dass die Immissionen der DAB-Sender (die, wie später noch gezeigt wird, nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtimmission ausmachen) nur im Rahmen der "Nachhermessung" erfasst wurden. Um keine Verzerrung der Ergebnisse zu erzeugen (Es soll ja die Gesamtexposition "nachher" mit der Gesamtexposition "vorher" verglichen werden), wurden diese Messresultate unverändert auch für die Auswertung der "Vorhermessung" übernommen, da die DAB-Signale auch bereits zum Zeitpunkt der "Vorhermessung" vorhanden waren, jedoch davon ausgegangen werden kann, dass keine nennenswerte Veränderung bezüglich der DAB-Felder zwischen den beiden Messungen aufgetreten ist.

Kennwert	Vorhermessung		Nachhermessung	
	S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$	Millionstel vom Grenzwert	S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$	Millionstel vom Grenzwert
Kleinster Messwert	0,03	0,01	0,03	0,01
Größter Messwert	4.039,8	2.019,6	4.748,6	2.374,4
Spannweite [dB]	52 dB	52 dB	52 dB	53 dB
Mittelwert	53,0	25,1	76,6	34,6
Median	1,0	0,4	5,1	1,8

Tabelle III.2.2: Ergebnisse der "Vorher-" bzw. "Nachhermessung" (Gesamtimmission Ton- und Fernsehgrundfunk): Wichtige Kennwerte

Es ergibt sich also ein sehr großer Unterschied zwischen den größten und den kleinsten Messwerten (Spannweite mehr als 50 dB). Auch ist eine deutliche Differenz zwischen Mittelwert und Median feststellbar, was auf eine stark unsymmetrische Verteilung schließen lässt.

In obiger Tabelle wurde die Exposition sowohl absolut als Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ als auch grenzwertbezogen (Summe aller auf den jeweiligen individuellen Leistungsflussdichtegrenzwert bezogenen Einzelwerte) dargestellt. In den nachfolgenden Untersuchungen wird allerdings auf die grenzwertbezogene Darstellung verzichtet, da gerade im hier relevanten TV-Frequenzbereich zwischen 200 und 850 MHz keine konstanten Grenzwerte vorliegen und daher die gleiche Leistungsflussdichte bezogen auf den Grenzwert für einen TV-Kanal im VHF-Bereich strenger zu bewerten wäre als der gleiche Wert im UHF-Bereich. Dadurch

soll verhindert werden, dass ein DVB-T-Signal, das beispielsweise in einem höheren Kanal abgestrahlt wird, als ein in der Region vor der Umstellung vorhandenes analoges TV-Signal, nur deswegen weniger stark Einfluss auf die Summenexposition ausübt, als vorher das analoge Signal (oder umgekehrt). Denn die Tatsache, dass TV-Sender in den höheren Kanälen aufgrund der in diesem Frequenzbereich ansteigenden Grenzwertkurve einen abnehmenden grenzwertbezogenen Expositionsanteil liefern, soll hier nicht einen verzerrenden Einfluss auf die "Vorher-Nachher"-Bewertung ausüben.

In den folgenden beiden Bildern ist die Verteilung der Messwerte auf einzelne Leistungsflussdichteklassen als Histogramm sowie die sich daraus ergebenden kumulierten Werte als Verteilungsfunktion dargestellt:

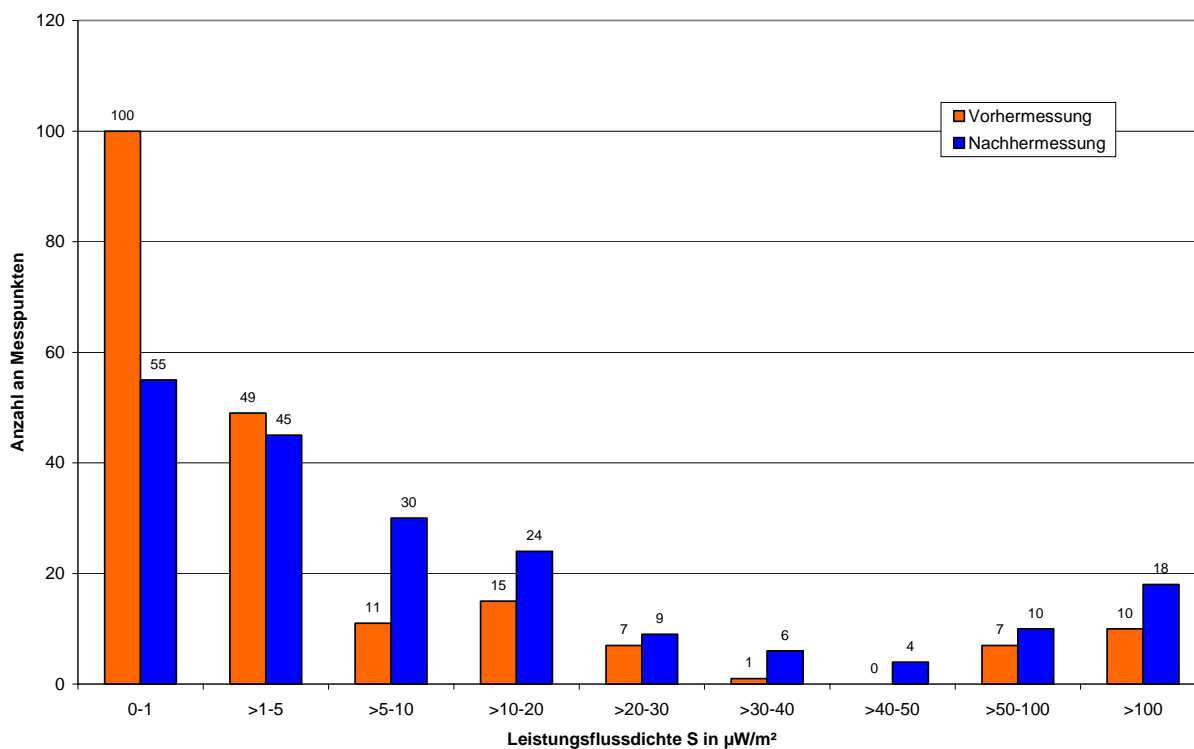


Bild III.2.5: Verteilung (Histogramm) der gemessenen Leistungsflussdichtewerte (Gesamtimmision Ton- und Fernseh Rundfunk)

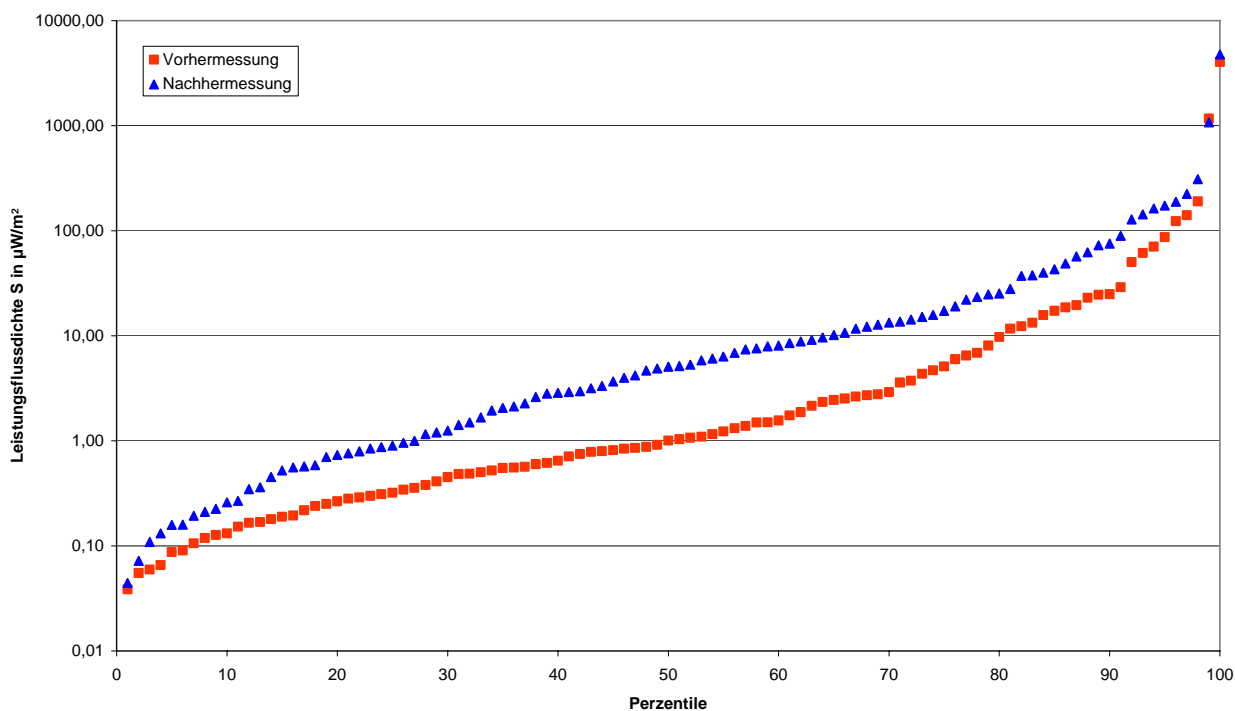


Bild III.2.6: Verteilungsfunktion der gemessenen Leistungsflussdichtewerte (Gesamtimmission Ton- und Fernsehrundfunk)

Obige Bilder sowie die Resultate aus Tabelle III.2.2 verdeutlichen, dass bei der "Nachher-" Messkampagne im Mittel an den Messpunkten höhere Immissionen festgestellt wurden, als bei der "Vorhermessung".

In der nächsten Abbildung ist dargestellt, wie sich die Immissionswerte mit dem Abstand zur Sendeanlage verhalten, wobei hier nur die Ergebnisse der Nachhermessung dargestellt sind. Als Abstand zur Sendeanlage wird hierbei die Entfernung zum nächsten DVB-T-Standort verwendet.

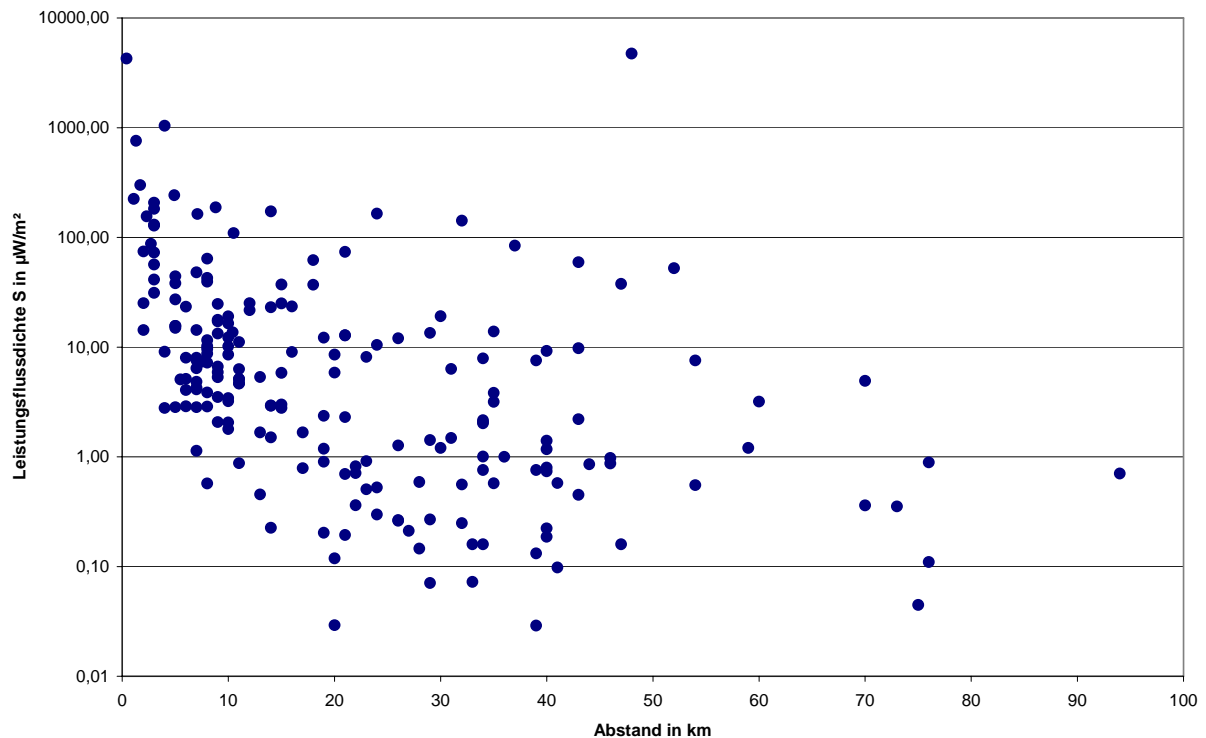


Bild III.2.7: Gemessene Leistungsflussdichtewerte (Gesamtimmission Ton- und Fernsehgrundfunk) als Funktion vom Abstand zum nächsten DVB-T-Standort ("Nachhermessung")

Wie zu erwarten, ergeben sich in größeren Abständen zu den Senderstandorten im Mittel niedrigere Expositionswerte, als im Nahbereich. Allerdings ist eine große Streubreite (typisch 20 bis 30 dB) feststellbar. Es gibt aber auch einen bemerkenswerten Ausreißer: Der absolut größte Messwert fand sich nicht in unmittelbarer Umgebung eines DVB-T-Standortes, sondern in 48 Kilometer Entfernung vom Wendelstein in der Nähe von Traunstein. Die dort messbare Feldstärke wurde jedoch nicht vom Sender Wendelstein, sondern von einem in wenigen hundert Meter entfernten lokalen UKW-Senderstandort (Lokalradio, 99,4 MHz, ERP = 300 W und Antenne Bayern, 103,7 MHz, ERP = 5 kW) erzeugt.

Zusätzlich zur Summenexposition ist natürlich interessant, wie die Leistungsflussdichtewerte auf die einzelnen Funkdienste verteilt sind. Hierzu wurde für die 200 Messpunkte die mittlere Leistungsflussdichte getrennt nach betrachteten Funkdiensten jeweils für die "Vor-" und die "Nachhermessung" errechnet. Das Ergebnis ist in folgendem Bild dargestellt. Betrachtet man zunächst die beiden grünen Säulenreihen, so wird die erwartete Abnahme der analogen Immission bei gleichzeitiger Zunahme der DVB-T-Immission deutlich. Verwunderlich ist allerdings die starke Dominanz der UKW-Immission, was zur Aussage verleiten könnte, dass der UKW-Rundfunk die Hauptursache für die festgestellten Immissionen an den untersuchten Punkten darstellt und die TV-Signale nur von zweitrangiger Bedeutung sind.

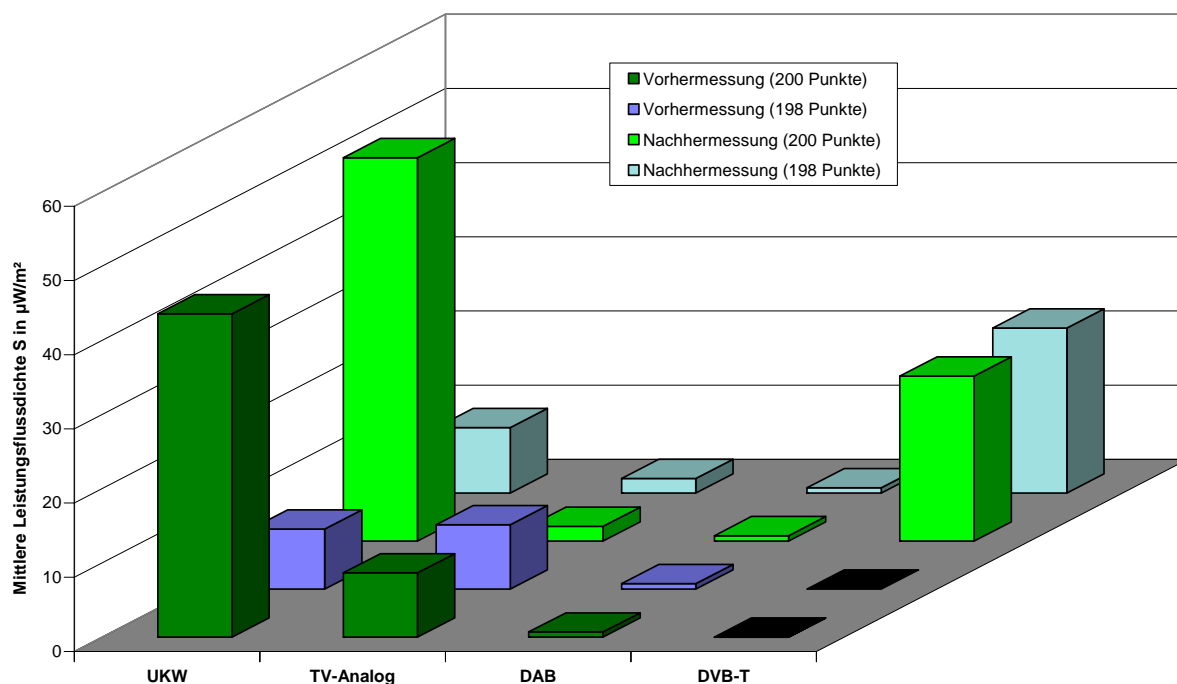


Bild III.2.8: Mittelwerte der Leistungsflussdichten, aufgliedert nach Funkdiensten

Eine genauere Analyse der Messergebnisse zeigt allerdings sehr schnell, dass diese Aussage so nicht zutrifft, da hier einige wenige Messergebnisse zu einer starken Verzerrung der Mittelwerte führen: Wie bereits erwähnt, besitzen die Messergebnisse eine Dynamik von mehr als 50 dB, wobei große Messwerte nur sehr selten auftreten. Ergibt sich nun, dass an einigen der Messpunkte mit sehr hoher Immission diese überwiegend von nur einem Funkdienst erzeugt wird, so verfälscht dies sehr stark den relativen Unterschied der Mittelwerte. Genau das war hier der Fall: An den beiden Messpunkten mit der absolut höchsten Summenimmission wurde diese hauptsächlich von UKW-Signalen erzeugt, was den Mittelwert über alle 200 Punkte so weit verzerrt, dass es zur scheinbaren Dominanz der UKW-Felder führt. Wiederholt man die Auswertung ohne diese beiden Punkte, so zeigt sich ein völlig anderes Bild: Die blauen Säulenreihen in Bild III.2.8 geben die mittleren Leistungsflussdichtewerte für die restlichen 198 Punkte wieder. Wie man erkennen kann, ist die Dominanz des UKW-Rundfunks nun nicht mehr vorhanden. Bei der "Vorhermessung" herrscht in etwa ein Gleichgewicht mit den analogen TV-Signalen, während bei der "Nachhermessung" nun deutlich die DVB-T-Felder dominieren.

Diese starke Veränderung der Verteilung verdeutlicht, dass der Mittelwert der Leistungsflussdichte (berechnet über alle betrachteten Punkte) als Größe zur Quantifizierung der "mittleren Expositionssituation" nicht geeignet ist, da hierbei die Resultate an einigen wenigen Punkten eine völlige Veränderung der mittleren Situation erzeugen können.

Will man also aus den Messergebnissen einen Eindruck über die Veränderung der "mittleren Immissionssituation" gewinnen, muss man andere Größen verwenden. Wesentlich unempfindlicher bezüglich einzelner "Ausreißer" erweist sich beispielsweise der Median, wie folgende Tabelle zeigt:

Kennwert	Mittelwert [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]		Median [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]	
	200 Messpunkte	198 Messpunkte	200 Messpunkte	198 Messpunkte
Vorhermessung	53,0	17,5	1,0	1,0
Nachhermessung	76,6	33,8	5,1	5,0
Unterschied [dB]	1,6	2,9	7,1	7,0

Tabelle III.2.3: Mittlere Summenleistungsflussdichte und Median bei Betrachtung aller 200 Messpunkte bzw. bei Weglassen der zwei Punkte mit den höchsten Immissionswerten

Man erkennt deutlich die stark unterschiedlichen Mittelwerte bei Betrachtung von 200 bzw. 198 Messpunkten, während der Median nahezu unverändert bleibt. Würde man hier den Mittelwert als Maß für die "mittlere Immissionsveränderung" heranziehen, ergäbe sich nur eine moderate Erhöhung (je nach Zahl der betrachteten Messpunkte von 1,6 bzw. 2,9 dB), weil die beiden starken UKW-Signale die mittlere Immissionssituation dominieren. Verwendet man hingegen den Median als "mittleres Expositionsmaß", stellt man eine Immissionszunahme von etwa 7,5 dB fest. Dieser Wert wird nicht nennenswert davon beeinflusst, ob die zwei Messpunkte mit den extremen UKW-Ergebnissen in die Auswertung einbezogen werden oder nicht. Der Median liefert also einen brauchbaren und stabilen Beurteilungswert für die "mittlere Expositionssituation".

Zur Vervollständigung sind in folgender Tabelle nicht nur die Mediane der Summenexpositionswerte angegeben, sondern auch die entsprechenden Größen für die einzelnen Funkdienste:

Funkdienst	Median "Vorhermessung" [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]	Median "Nachhermessung" [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]
UKW	0,3	0,4
Analog-TV	0,3	0,004
DAB	-	0,03
DVB-T	-	1,9
Gesamt	1,0	5,1

Tabelle III.2.4: Medianwerte für die einzelnen Funkdienste und die Gesamtexposition

Fragt man, welche Immission insgesamt jeweils an den 200 Messpunkten am häufigsten absolut den größten Einzelanteil darstellt, so ergibt sich für die "Vorhermessung" eine Dominanz der UKW-Signale (An 120 von 200 Messpunkten mehr als 50 Prozent Anteil an der Gesamtleistungsflussdichte), während bei der "Nachhermessung" die DVB-T-Signale dominieren (An 113 von 200 Messpunkten mehr als 50 Prozent Anteil an der Gesamtleistungsflussdichte).

Eine andere Möglichkeit, ein "mittleres Expositionsmaß" zu definieren, ist die Berechnung des Leistungsflussdichtequotienten "nachher/vorher" und Darstellung für jeden Punkt im logarithmischen Maß als dB-Wert. Das Resultat dieser Operation ist in folgender Abbildung zu sehen:

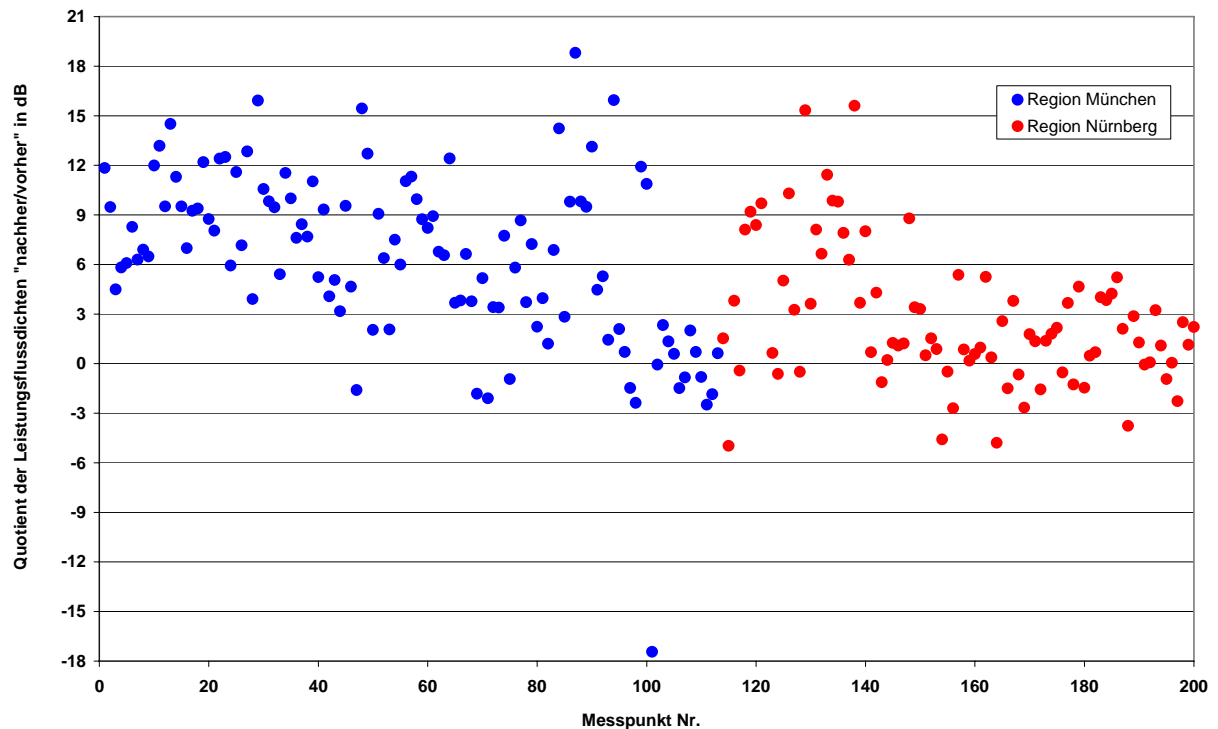


Bild III.2.9: Quotient der Leistungsflussdichtewerte aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB (Gesamtimmission Ton- und Fernsehrundfunk)

Anmerkung:

Die auffällig starke Abnahme der Immission am Messpunkt 101 von knapp 18 dB ist kein Messfehler. In der Nähe des Messpunktes (86576 Schiltberg bei Aichach) war während der "Vorhermessung" ein analoger TV-Füllsender in Betrieb, der dann im Rahmen der DVB-T-Umstellung abgeschaltet wurde. Bei der "Nachhermessung" wurden an diesem Punkt dann nur relativ geringe DVB-T-Felder festgestellt, da die Entfernung zum Münchner Olympiaturm dort bereits sehr groß ist, so dass sich ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Messungen einstellte.

Bildet man den linearen Mittelwert aus den dB-Werten von Bild III.2.9 (was bei Betrachtung bezüglich der "mittleren Exposition" impliziert, dass eine Verdoppelung der Immission an einem Punkt durch eine Halbierung der Immission an einem andern Punkt genau kompensiert wird), so ergibt sich über alle 200 Punkte eine "mittlere Expositionszunahme" von 4,8 dB. Allerdings ist hierbei ein deutlicher Unterschied zwischen den Regionen München und Nürnberg festzustellen: Während im Raum Nürnberg das mittlere Verhältnis an den Messpunkten um 2,7 dB zunimmt, ist im Raum München ein deutlich größerer mittlerer Faktor von 6,5 dB feststellbar. Diese regionalen Unterschiede werden später noch näher analysiert.

Interessant ist auch die Frage nach der "mittleren Exposition" in den drei DVB-T-Versorgungsklassen. Nähere Informationen können aus folgendem Bild entnommen werden, das die Medianwerte für die einzelnen Funkdienste für die drei DVB-T-Versorgungsklassen darstellt:

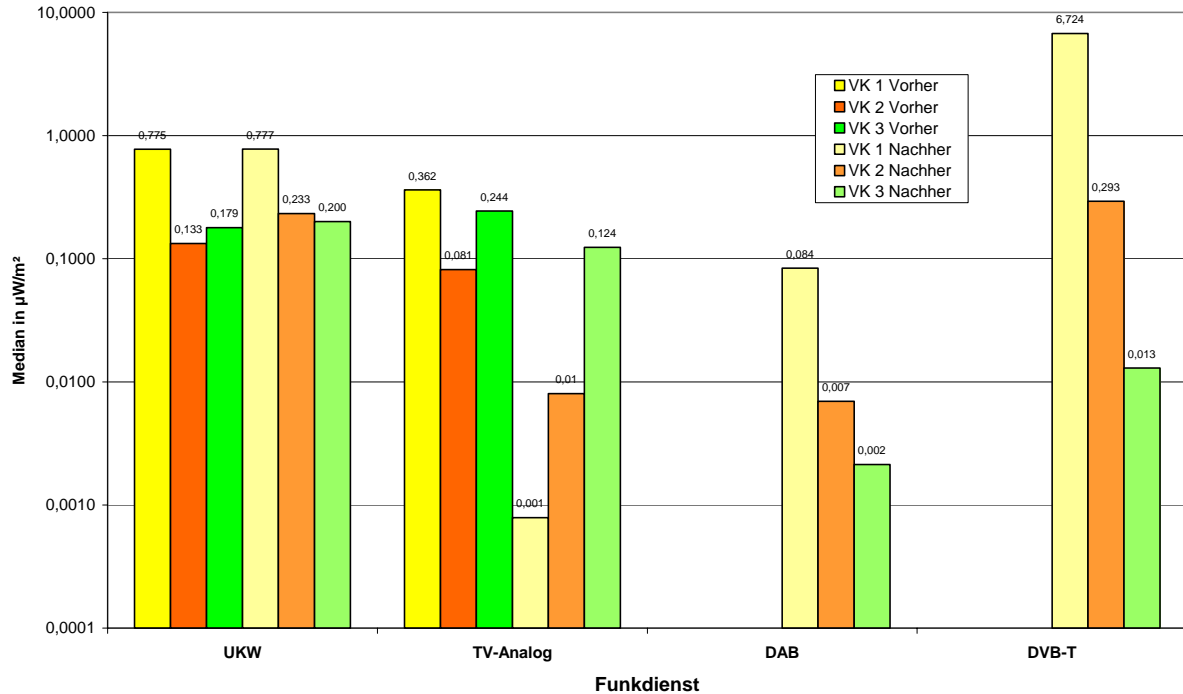


Bild III.2.10: Medianwerte der einzelnen Funkdienste für die drei DVB-T-Versorgungsklassen (VK1: "portable indoor"; VK2: "portable outdoor"; VK3: "fixed antenna")

Man erkennt deutlich, wie die Mediane für die DVB-T-Signale in den Versorgungsklassen 2 und 3 gegenüber dem Wert der Versorgungsklasse 1 ("portable indoor") abnehmen. Ursache dafür ist die derzeitige Versorgungssituation ("Inselversorgung"). Die Analogsignale hingegen (sowohl UKW als auch das analoge TV vor der Umstellung) zeigen eine deutlich homogenere Feldstärkeverteilung, da insbesondere an den Punkten in Bereich der Versorgungsklasse 3 bereits die nächsten analogen Grundnetzsender meist nicht weit entfernt sind. Außerdem werden in den analogen Netzen noch zusätzlich Füllsender betrieben. Damit lässt sich auch die Inhomogenität begründen, die bei den DAB-Signalen vorhanden ist. Da für DAB bereits flächendeckend in Bayern knapp 40 Standorte für die Grundversorgung betrieben werden, ist die Inhomogenität zwar nicht so stark ausgeprägt, wie bei DVB-T, die fehlenden Füllsender sorgen jedoch für eine stärkere Schwankungsbreite als es bei den analogen Netzen der Fall ist. Außerdem befinden sich auf allen betrachteten DVB-T-Standorten auch DAB-Grundnetzsender.

Nach Abschalten der analogen TV-Sender in den Regionen München und Nürnberg ändert sich die Feldverteilung merklich: Da jedoch die benachbarten analogen Grundnetzsender weiterhin in Betrieb bleiben, verschwindet selbst in der Versorgungsklasse 1 die analoge TV-Feldstärke nicht völlig, sondern im Mittel ergibt sich ein Rückgang um etwa 26 dB. Im Bereich der Versorgungsklasse 3 hingegen dominieren die Felder von den benachbarten analogen Grundnetzsendern bereits so stark, dass nur ein Rückgang des Median von etwa

3 dB zu beobachten ist. In dieser Versorgungsklasse ist der Median des digitalen Fernsehens bereits so stark abgesunken, dass er kleiner als der vom analogen TV ist.

Als Konsequenz aus den hier festgestellten Tatsachen kann man erkennen, dass der bisher durchgeführte "Vorher-Nachher"-Vergleich über alle 200 Messpunkte nur von beschränkter Aussagekraft ist, da insbesondere die Messpunkte aus Versorgungsklasse 3 die mittlere Veränderung verzerrt wiedergeben, weil hier eine Dominanz der weiterhin in Betrieb befindlichen analogen Sender vorliegt. Erst wenn in Zukunft auch diese Anlagen durch DVB-T ersetzt werden, kann für diesen Flächenbereich eine verlässliche Aussage über die Immissionsveränderung getroffen werden. Folgendes Bild verdeutlicht diesen Sachverhalt nochmals: In der Versorgungsklasse 3 ergibt sich eine völlig andere Verteilung der relativen Immissionsänderung (typisch bleibt die Änderung dort an den meisten Punkten im Bereich von ± 3 dB), während insbesondere in der Versorgungsklasse 1 (teilweise auch in der Klasse 2) eine deutliche Veränderung der Immission beobachtet werden kann.

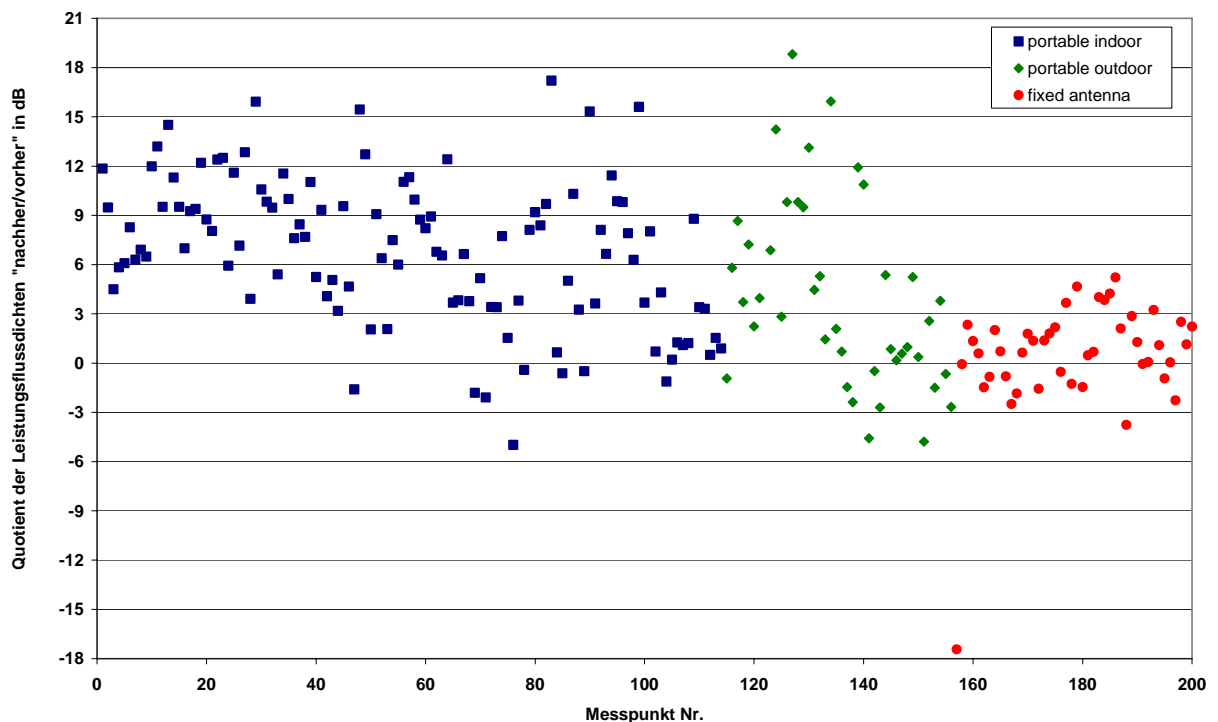


Bild III.2.11: Quotient der Leistungsflussdichtewerte aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB, allerdings sortiert nach Versorgungsklassen (Gesamtimmission Ton- und Fernseh-rundfunk)

Im Mittel wird also insbesondere durch die Messpunkte in Versorgungsklasse 3 eine zumindest in der Versorgungsklasse 1 signifikant vorhandene Immissionsänderung abgeschwächt, wenn man über alle Messpunkte mittelt.

Allerdings befinden sich die meisten der 200 Messpunkte im Bereich der Versorgungsklasse 1 (114 von 200), was durch die bevölkerungsgewichtete Messpunktauswahl bedingt ist. In den folgenden Abschnitten wird daher der "Vorher-Nachher"-Vergleich meist nur für diese sendernahen Punkte durchgeführt, da bei diesen im wesentlichen bereits die Situation

vorliegt, wie sie später nach flächendeckender Umrüstung auf DVB-T überall zu beobachten ist. Durch diese regionale Beschränkung wird die Aussage bezüglich der Immissionsveränderung verlässlicher.

Eine weitere Frage, die mittels der Messergebnisse näher quantifiziert werden kann, ist der mittlere Expositionsunterschied zwischen UKW- und DAB-Signalen. Hierzu wurden die Messergebnisse dieser beiden Funkdienste, die im Rahmen der zweiten Kampagne (Oktober 2005) gewonnen wurden, vergleichend gegenübergestellt. In den folgenden beiden Bildern ist die Verteilung der Messwerte auf einzelne Leistungsflussdichteklassen als Histogramm sowie die sich daraus ergebenden kumulierten Werte als Verteilungsfunktion dargestellt:

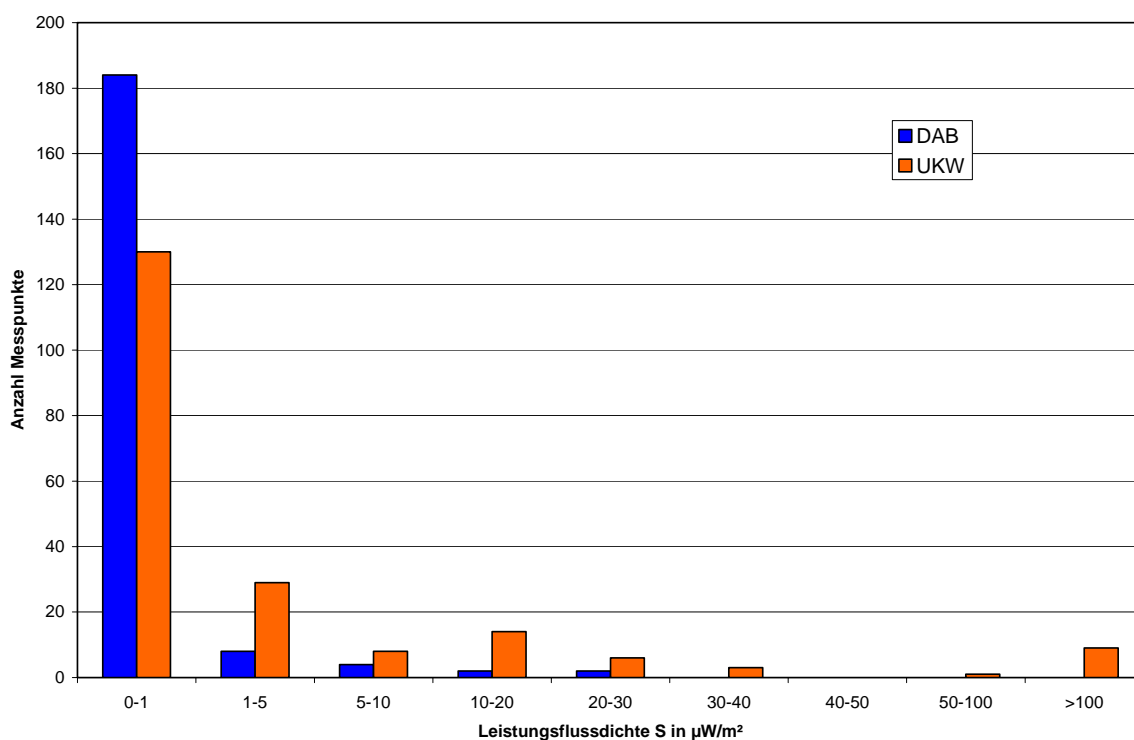


Bild III.2.12: Verteilung der gemessenen Leistungsflussdichtewerte (Histogramm) für UKW und DAB

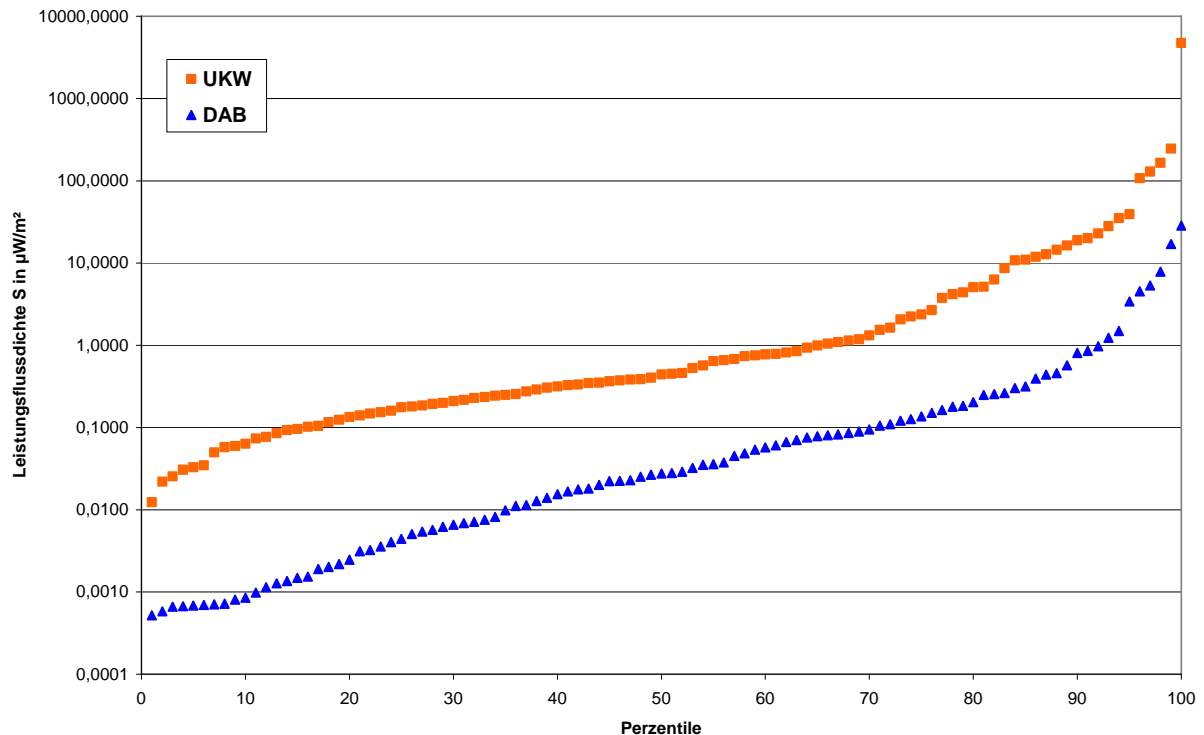


Bild III.2.13: Verteilungsfunktionen der UKW- und DAB-Signale

Wie bereits in Abschnitt I.6.2.2 aus dem Vergleich der installierten Sendeleistungen für UKW und DAB offensichtlich wurde, erzeugen die DAB-Signale im Mittel deutlich niedrigere Immissionswerte als sie von den UKW-Sendern verursacht werden. Die Medianwerte unterscheiden sich um 11,3 dB. Bei Betrachtung des mittleren logarithmischen Unterschiedsfaktors zwischen UKW und DAB ergibt sich ein Wert von 14,2 dB. Man kann also festhalten, dass an den betrachteten Messpunkten im Mittel die UKW-Exposition um mindestens den Faktor zehn höher ausfällt, als die des DAB-Rundfunks.

Vergleicht man diesen Immissionsunterschied mit dem in Abschnitt I.6.2.2 gefundenen Leistungsunterschied zwischen den landesweit empfangbaren UKW- und DAB-Signalen (21,8 dB), so zeigt sich, dass messtechnisch ein etwa 7 dB geringerer Unterschied festgestellt wurde, der vermutlich durch die Tatsache bedingt ist, dass die Messpunkte im Mittel näher an DAB- als an UKW-Grundnetzsendern liegen (Beispielsweise werden von den mit DAB-Grundnetzsendern bestückten Standorten Nürnberg-Fernmeldeturm und München-Olympiaturm keine UKW-Grundnetzsignale sondern nur leistungsschwache Lokalprogramme abgestrahlt).

Dieser deutliche Expositionsunterschied zwischen UKW und DAB wird vermutlich in Zukunft zumindest in den Ballungsregionen Bayerns kleiner werden, da der DAB-Netzbetreiber (Bayern Digital Radio) beabsichtigt, in Zukunft die Sender in den wichtigen Städten Bayerns mit deutlich höherer Leistung zu betreiben (5 bis 8 kW statt bisher 1 kW) [BLM 05].

Fazit:

Ein Vergleich der Ergebnisse der "Vorher-" bzw. "Nachhermessungen" an den 200 "Zufallspunkten" in Wohngebieten in den Regionen München und Nürnberg zeigt eine große Spannweite der absoluten Größe der "Summenexposition" von mehr als 50 dB, sowie eine sehr unsymmetrische Verteilung der Messwerte. Bezüglich der Grenzwertausschöpfung ergab sich am Punkt mit den höchsten Summenimmissionen ein leistungsflussdichtebezogener Ausschöpfungsgrad von nur etwa 2,4 Promille.

Analysiert man die statistische Verteilung der Resultate beider Messkampagnen, so ergibt sich eine mittlere Zunahme der festgestellten Expositionswerte. Will man eine Größe zur Beschreibung der Immissionsverteilung auf die verschiedenen Funkdienste bzw. der "mittleren Expositionsänderung" angeben, so erweist sich der arithmetische Mittelwert über die an den Punkten gemessenen Leistungsflussdichtewerte als nicht geeignet, da dieser Wert sehr stark von einzelnen "Ausreißern" (d.h. Punkten mit überdurchschnittlich hohen Feldstärken) beeinflusst wird. Als brauchbar erweist sich der Medianwert (50%-Perzentil) oder der mittlere logarithmierte Unterschiedsfaktor zwischen "Nachher-" und "Vorhermessung" aller Punkte (in dB). Mit einer "mittleren Zunahme" von 7,5 bzw. 4,8 dB liefern beide Betrachtungsweisen eine Veränderung in Richtung höherer Exposition nach Einführung des digitalen Fernsehens. Allerdings ist die Situation in den beiden untersuchten Regionen nicht gleich, sondern es zeigen sich Unterschiede bezüglich der Höhe der Veränderung. Außerdem ist zu beachten, dass die offensichtlich in den beiden betrachteten Regionen die tatsächlich vorhandene "mittlere Expositionsänderung" durch die Resultate an den Messpunkten der Versorgungsklasse 3 abgeschwächt wird.

Ein Vergleich zwischen UKW- und DAB-Signalen ergibt eine deutliche Dominanz der UKW-Signale (Unterschiedsfaktor im Mittel größer als 10 dB). Zukünftig vorgesehene Leistungserhöhungen bei DAB zur Gewährleistung einer zuverlässigeren Indoorversorgung werden diesen aktuellen Unterschied allerdings verkleinern.

III.2.5 Nähere Betrachtung der Region Nürnberg

In diesem Abschnitt soll die Expositionsänderung in der Region Nürnberg detaillierter analysiert werden. Folgendes Bild zeigt zunächst nochmals die relative Änderung der Messwerte in dB an den 87 Messpunkten der Region Nürnberg.

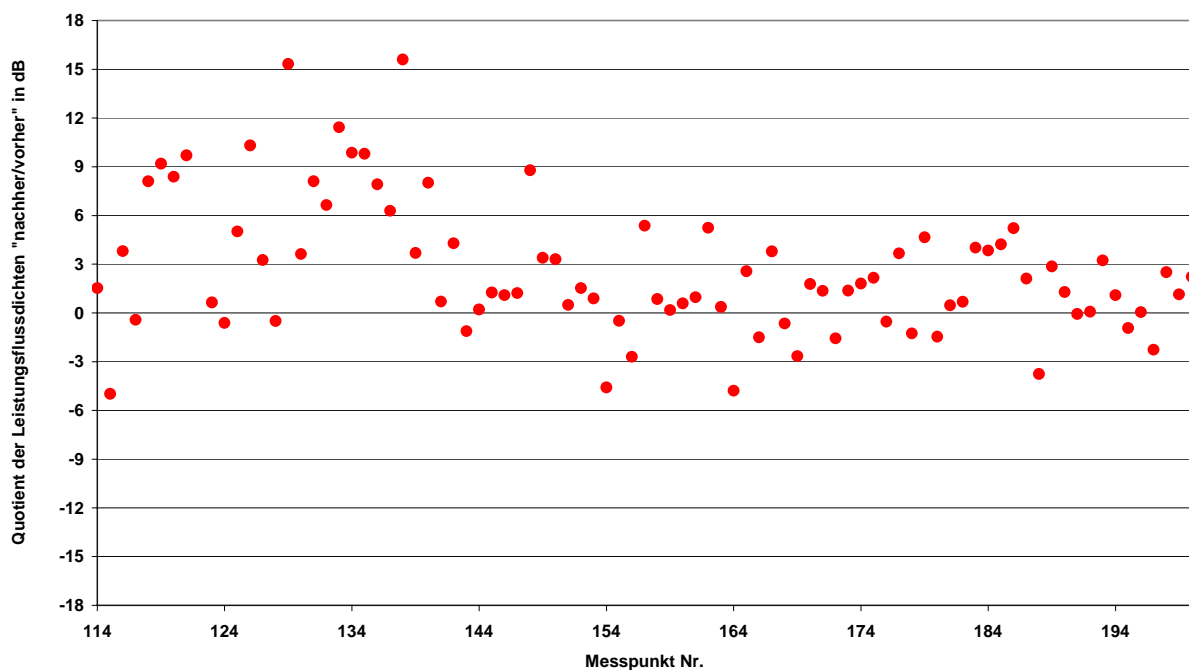


Bild III.2.14: Quotient der Leistungsflussdichtewerte aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB für die 87 Messpunkte im Raum Nürnberg (Gesamtmission Ton- und Fernseh Rundfunk)

Wie bereits erwähnt, resultiert bei einer Mittelung über die dB-Werte in der Region eine durchschnittliche Zunahme von 2,7 dB bei einer Standardabweichung von 4,1 dB. Die Mehrzahl der Messergebnisse (49 von 87, d.h. 56 %) bleiben im Intervall von ± 3 dB. Interessant ist auch die Tatsache, dass nur ein Teil der Punkte signifikante Zunahmen zeigt (im Bereich der Punkte 120 bis 140), während der größere Teil nur geringe Veränderungen aufweist (Bereich 140 bis 200). Da die Nummerierung der Messpunkte nicht zufällig über die Region verteilt ist, sondern benachbarte Punkte auch räumlich meist mehr oder weniger nahe bei einander liegen, ist zu vermuten, dass die Zunahme der Immission auch nur in einem räumlich begrenzten Teil der Region Nürnberg auftritt.

Zur Visualisierung der räumlichen Immissionsverteilung wurden die 87 Messpunkte in einen Landkartenausschnitt eingezeichnet und die dort jeweils festgestellten Expositionsänderungen in fünf Klassen eingeteilt und mittels einer Farbcodierung der Messpunktsymbole dargestellt.

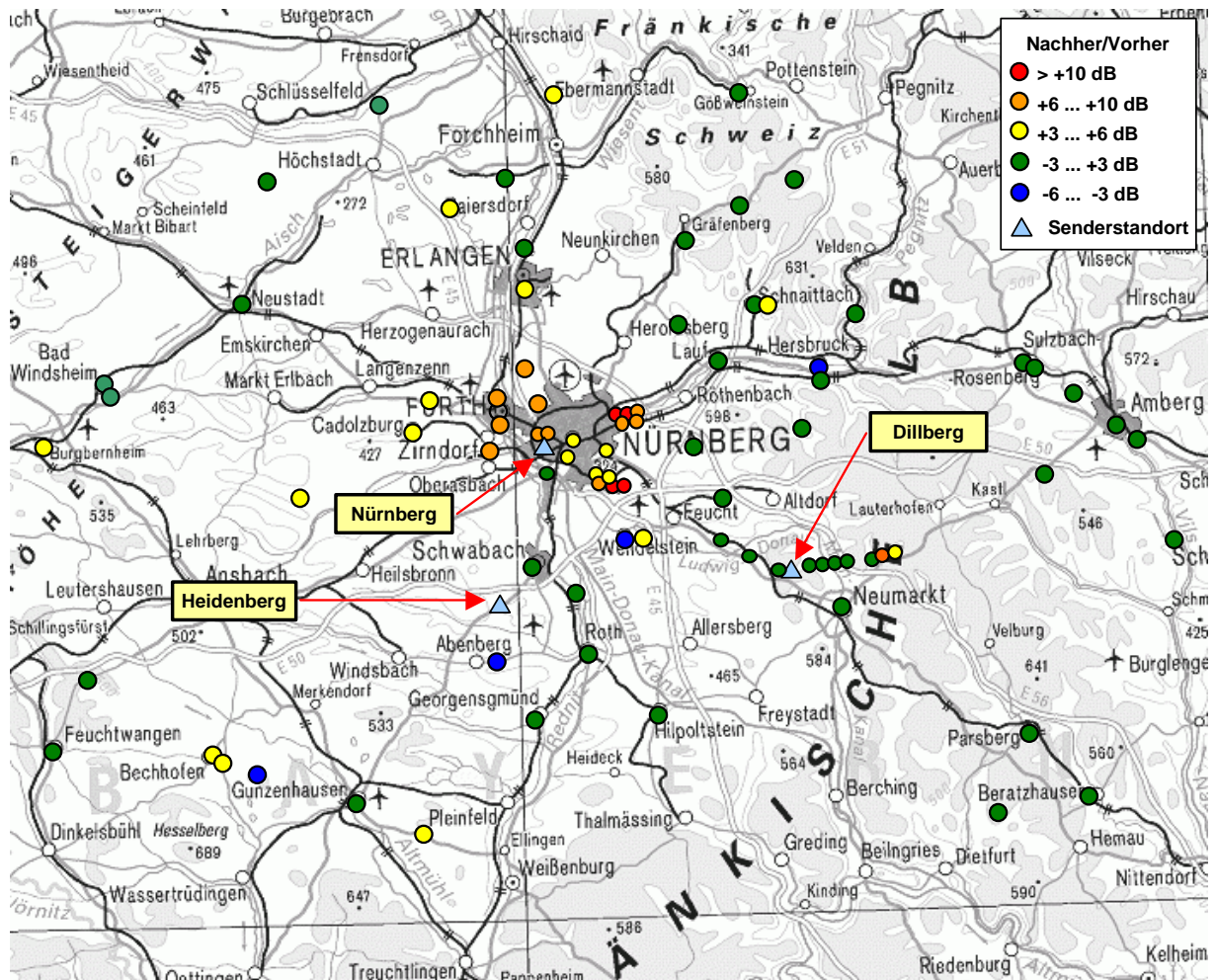


Bild III.2.15: Quotient der Leistungsflussdichtewerte (Gesamtimmission Ton- und Fernseh Rundfunk) aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB für die 87 Messpunkte im Raum Nürnberg (Darstellung in fünf Klassen)

Obige Karte zeigt deutlich, dass im Bereich der Ballungsregion Nürnberg / Fürth / Erlangen die Exposition signifikant zugenommen hat, was wegen der Nordverschiebung des Senderstandortes (vom Heidenberg südlich Schwabach hin zum Fernmeldeturm Nürnberg) nicht verwunderlich ist.

In der Umgebung des Standortes "Dillberg" ist hingegen nur eine geringfügige Zunahme erkennbar. Eine statistische Auswertung der Punkte in der Umgebung des Dillberg ergab eine mittlere Zunahme der Gesamtexposition von 1,5 dB (Standardabweichung: 2,4 dB). Dies ist ebenfalls nicht besonders überraschend, da die ERP am Dillberg, im Vergleich zum Fernmeldeturm Nürnberg, mit Einführung von DVB-T nur moderat gesteigert wurde (Zunahme der ERP um 5 dB; vgl. Tabelle I.6.1). Betrachtet man nur die Immission durch TV-Signale, so ergibt sich in der Region "Dillberg" eine mittlere Expositionszunahme von etwa 4,5 dB, also eine sehr gute Übereinstimmung zur Vergrößerung der ERP.

Die Messpunkte in größerer Entfernung zu den beiden Senderstandorten zeigen keine signifikante Expositionsänderung, da dort die Messwerte bereits durch andere (analoge) Grundnetzsender und / oder UKW dominiert werden.

Fazit:

Ein Vergleich der Ergebnisse der "Vorher-" bzw. "Nachhermessungen" an den 87 Messpunkten in der Region Nürnberg zeigt eine deutliche Zunahme der Gesamtexposition im Bereich der Stadtgebiete Nürnberg / Fürth / Erlangen (mittlere Zunahme: 6,8 dB). Grund dafür ist die Verlagerung der TV-Sender im Rahmen der Umstellung auf DVB-T vom Heidenberg südlich Schwabach zum Fernmeldeturm Nürnberg. Im Bereich "Dillberg" ist nur eine moderate Expositions Zunahme von 1,5 dB feststellbar. Die Messpunkte außerhalb der Versorgungsklasse "portable indoor" zeigen keine signifikante Veränderung der mittleren Exposition mehr.

III.2.6 Nähere Betrachtung der Region München

In diesem Abschnitt soll die Expositionsänderung in der Region München detaillierter analysiert werden. Folgendes Bild zeigt zunächst die relative Änderung der Messwerte in dB an den 113 Messpunkten der Region München.

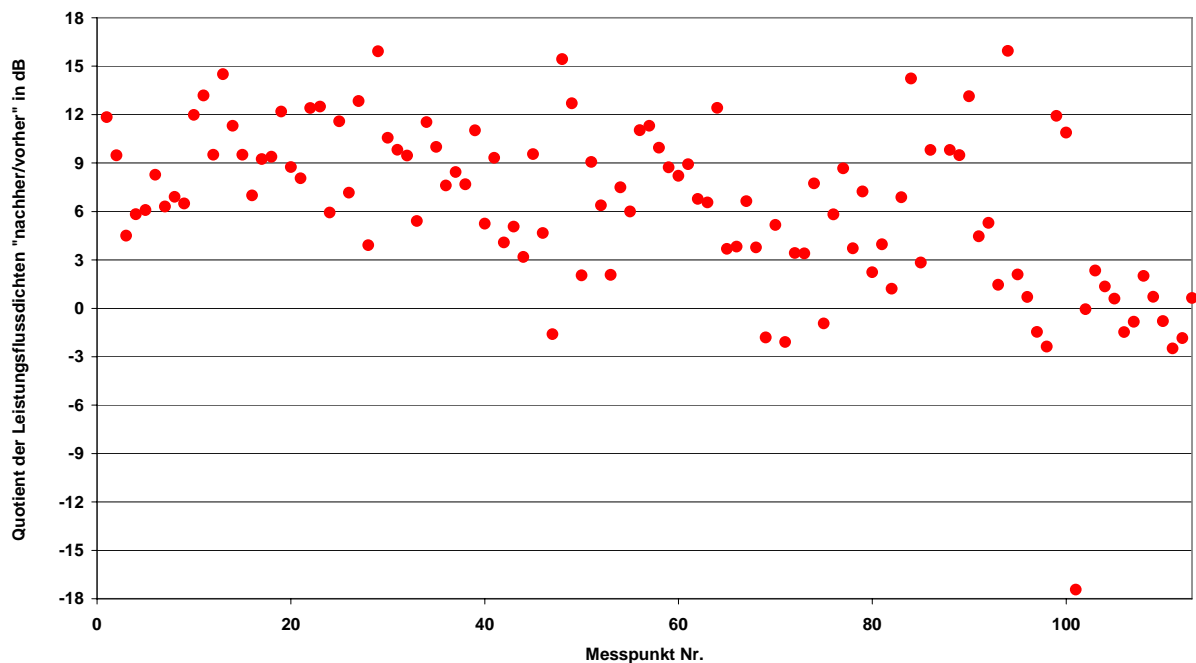


Bild III.2.16: Quotient der Leistungsflussdichtewerte aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB für die 113 Messpunkte im Raum München (Gesamtimmision Ton- und Fernsehgrundfunk)

Wie bereits erwähnt, resultiert hier bei einer Mittelung über die dB-Werte eine durchschnittliche Zunahme von 6,5 dB bei einer Standardabweichung von 5,2 dB. Nur 26 von 113 Punk-

ten (d.h. 23 %) bleiben im Intervall von ± 3 dB. Auch hier zeigt ein Teil der Punkte keine nennenswerte Zunahme (Bereich um 110), während der größere Teil signifikante Veränderungen aufweist. Da die Nummerierung der Messpunkte hier ebenfalls nicht zufällig über die Region verteilt ist, sondern benachbarte Punkte auch räumlich mehr oder weniger nahe bei einander liegen, ist zu vermuten, dass die Zunahme der Immission auch nur in einem räumlich begrenzten Teil der Region München auftritt.

Zur Visualisierung der räumlichen Immissionsverteilung wurden die 113 Messpunkte ebenfalls in einen Landkartenausschnitt eingezeichnet und die dort jeweils festgestellten Expositionsänderungen in sechs Klassen eingeteilt und mittels einer Farbcodierung der Messpunktsymbole dargestellt.

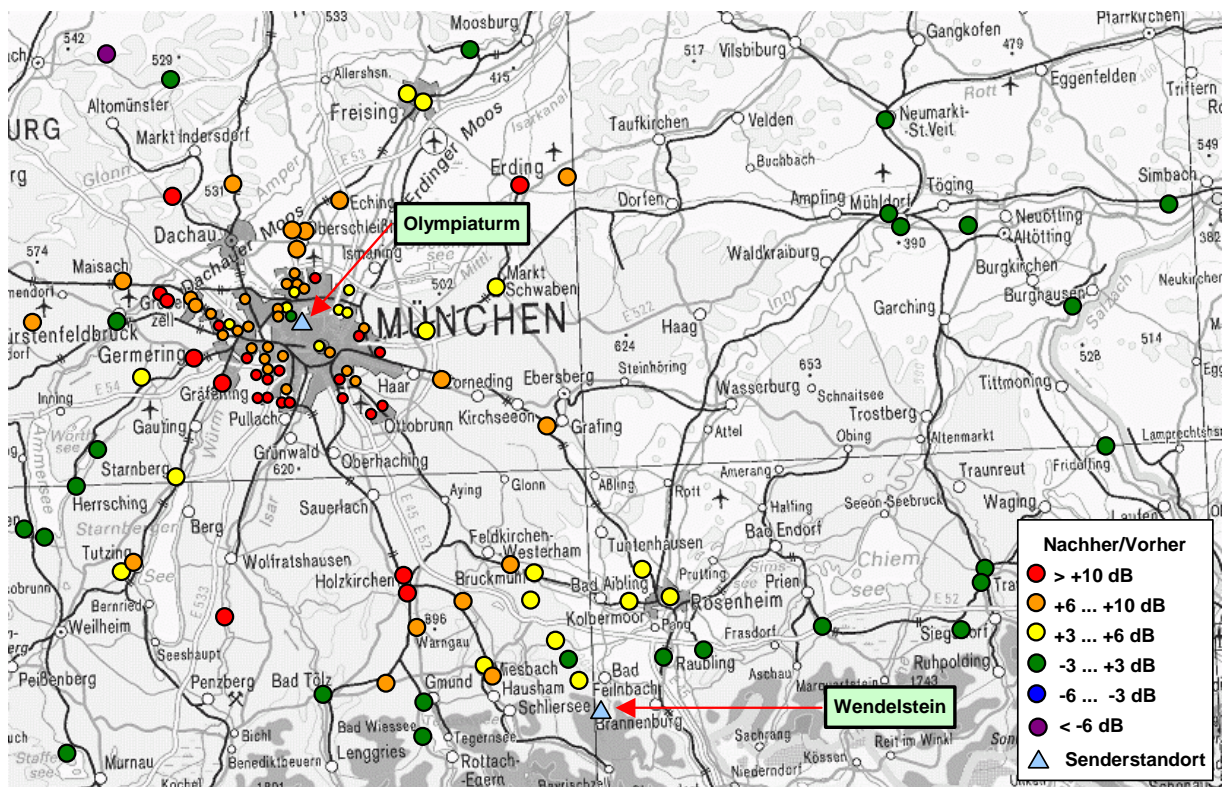


Bild III.2.17: Quotient der Leistungsflussdichtewerte (Gesamtimmision Ton- und Fernsehrundfunk) aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB für die 113 Messpunkte im Raum München (Darstellung in sechs Klassen)

Obige Karte zeigt, dass sowohl im näheren Umfeld der Stadt München als auch in der Region nördlich des Wendelstein (dort allerdings etwas geringer ausgeprägt) die Exposition signifikant zugenommen hat. Die Messpunkte in größerer Entfernung zu den Senderstandorten hingegen zeigen wieder keine signifikante Expositionsänderung, da dort die Messwerte bereits durch andere (analoge) Grundnetzsender und/oder UKW dominiert werden.

Die Immissionszunahme in der Umgebung des Wendelstein (mittlere Zunahme der Gesamtexposition: 5,5 dB; Standardabweichung: 4,3 dB) ist nicht besonders verwunderlich, da die vom Wendelstein nominell abgestrahlte ERP nach der Einführung von DVB-T um etwa 11 dB zugenommen hat (siehe Tabelle. I.6.3). Zusätzlich ist allerdings zu berücksichtigen, dass die analogen TV-Signale vom Wendelstein zum Zeitpunkt der "Vorhermessung" bereits seit

einigen Monaten über eine provisorische Antenne mit etwa 4 dB verringerter ERP abgestrahlt wurden, was natürlich einen Einfluss auf die Resultate der "Vorhermessung" ausübt.

Berücksichtigt man die während der "Vorhermessung" vorhandene Leistungsreduktion um 4 dB beim Analog-TV, so ergibt sich nur noch eine mittlere Zunahme der Gesamtexposition von 4,7 dB. Betrachtet man hingegen ausschließlich die Immission durch TV-Signale und berücksichtigt wieder die während der "Vorhermessung" vorhandene Leistungsreduktion um 4 dB beim Analogfernsehen, so ergibt sich eine mittlere Immissionszunahme von etwa 6 dB, also zirka 5 dB weniger, als die nominelle Erhöhung der ERP.

Im näheren Umfeld von München (55 Messpunkte in Versorgungsklasse 1) ist ebenfalls eine Zunahme der Gesamtexposition festzustellen (Mittlere Zunahme: 8,7 dB, Standardabweichung: 3,2 dB). Auch am Olympiaturm hat die ERP mit Einführung von DVB-T zugenommen (Zunahme um 5 dB). Allerdings ist auch hier der zusätzliche Einfluss einer Leistungsreduktion zu berücksichtigen, denn am Olympiaturm wurden die analogen Kanäle zum Zeitpunkt der "Vorhermessung" bereits über eine provisorische Antenne abgestrahlt, so dass sich eine um etwa 3 dB niedrigere ERP ergab, als nominell die Jahre vorher vorhanden war.

Berücksichtigt man die während der "Vorhermessung" vorhandene Leistungsreduktion um 3 dB beim Analog-TV, so ergibt sich nur noch eine mittlere Zunahme der Gesamtexposition von etwa 7 dB. Betrachtet man hingegen ausschließlich die Veränderung der TV-Signale, resultiert eine Expositionszunahme von 9,2 dB, also etwa 4 dB mehr als die Zunahme der ERP erwarten lassen würde. Der Grund für diese überproportionale Zunahme könnte allerdings in der Tatsache zu finden sein, dass die provisorische Analogantenne um etwa 40 Meter niedriger montiert war, als die DVB-T-Antenne, so dass die im Mittel bessere "Ausleuchtung" der Straßenzüge der Stadt München Ursache für die überproportionale Zunahme der DVB-T-Feldstärkewerte an den Messpunkten in Bodennähe sein könnte.

In folgendem Bild sind die Unterschiedsfaktoren zwischen "Vor-" und "Nachhermessung", für die 55 Punkte im Stadtbereich von München unter Berücksichtigung der Leistungsreduktion am Olympiaturm dargestellt. Die mittlere Zunahme der Gesamtexposition von 7 dB ist als grüne Linie in das Bild eingezeichnet.

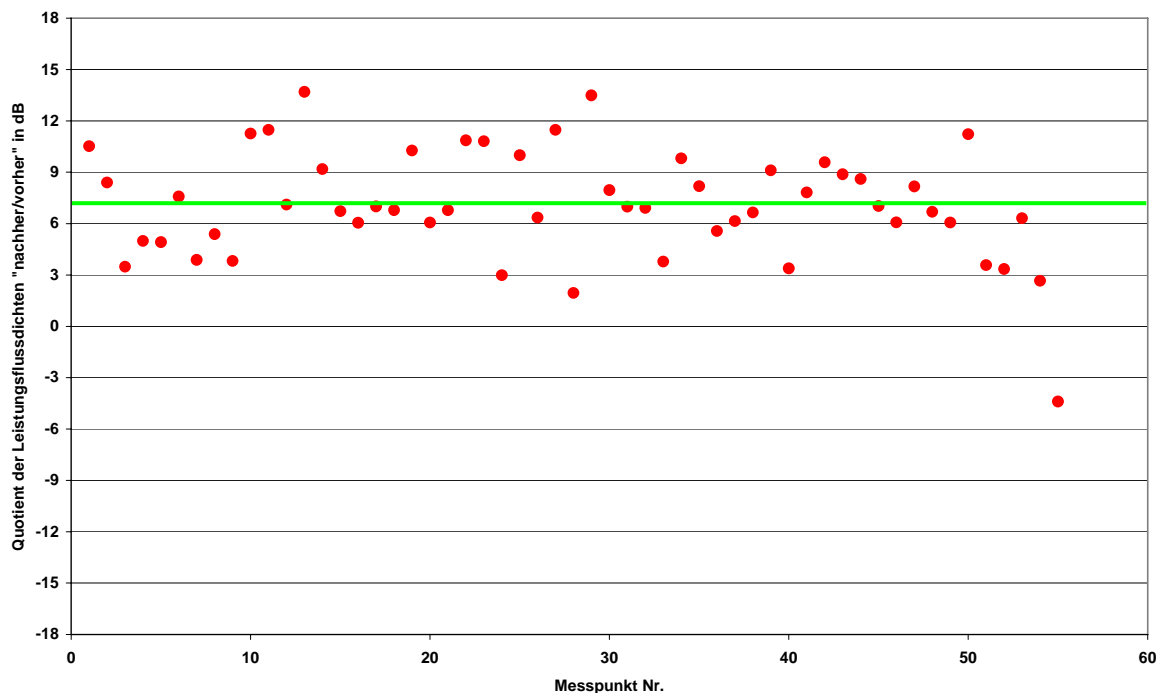


Bild III.2.18: Quotient der Leistungsflussdichtewerte aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB für die 55 Messpunkte im näheren Umfeld von München (Gesamtmission Ton- und Fernseh Rundfunk), jedoch unter Berücksichtigung der reduzierten Sendeleistung am Olympiaturm zum Zeitpunkt der "Vorhermessung"

Fazit:

Ein Vergleich der Ergebnisse der "Vorher-" bzw. "Nachhermessungen" an den 113 Messpunkten in der Region München zeigt eine signifikante Expositionszunahme im näheren Stadtgebiet von München und im Bereich der direkt benachbarten Landkreise bis hin zum Wendelstein (mittlere Zunahme: 6,5 dB). Grund dafür sind einerseits die Zunahme der ERP am Wendelstein und am Olympiaturm durch die Einführung von DVB-T als auch eine veränderte Montagehöhe der Antennen am Olympiaturm im Vergleich zur "Vorhermessung".

In größerer Entfernung zum Olympiaturm bzw. Wendelstein ist keine signifikante Veränderung der Exposition mehr feststellbar.

III.2.7 Zusammenfassung der Messresultate an den 200 "Zufallspunkten"

Wie im letzten Abschnitt erläutert, ist in den Bereichen der Versorgungsklassen "portable outdoor" und "fixed antenna" eine belastbare Auswertung der Expositionsänderung, verursacht durch die Einführung des digitalen TV nicht möglich, da in diesen Regionen derzeit meist noch die Felder der Analog-TV-Grundnetzversorgung dominant sind. Die Messungen zeigten, dass dort bisher noch keine signifikante Veränderung der Immission feststellbar ist. Nur im Bereich "portable indoor" ist bereits ein vollständiger Wechsel von analoger auf digitale Versorgung vollzogen worden. Daher ist es sinnvoll, die Expositionsänderung eingehend nur in den "portable indoor"-Regionen um die Standorte Dillberg, Wendelstein und Olympiaturm München zu analysieren. Auch der Ballungsbereich Nürnberg muss gesondert bewertet werden, da hier mit der Einführung des digitalen TV der Senderstandort um etwa 15 Kilometer in das Stadtgebiet von Nürnberg hinein verlagert wurde. Da sich die Mehrzahl der Messpunkte wegen der bevölkerungsdichtegewichteten Auswahl im Stadtgebiet von Nürnberg und Fürth befanden, führte diese Verlagerung zu einer überproportional hohen Zunahme der Exposition, die nicht allein durch die Veränderung der ERP begründet ist.

Zusammenfassend ist in folgender Tabelle die Veränderung der Exposition für die drei besonders betrachteten "portable indoor"-Regionen dargestellt:

Region	Zahl der Messpunkte	Zunahme der ERP	Mittlere Zunahme TV-Exposition	Mittlere Zunahme der Gesamtexposition
Dillberg	13	5,0 dB	4,5 dB	1,5 dB
Wendelstein	20	11,5 dB	5,9 dB	4,7 dB
München	55	5,1 dB	9,2 dB	7,1 dB

Tabelle III.2.5: Mittlere Veränderung der Exposition (Nachher / Vorher in dB) in den drei besonders betrachteten Untersuchungsteilgebieten im Vergleich zur Veränderung der ERP (Die Tatsache, dass zum Zeitpunkt der "Vorhermessung" die Anlogsender am Olympiaturm bzw. Wendelstein bereits mit reduzierter ERP betrieben wurden, ist in dieser Tabelle bereits berücksichtigt.)

In den drei besonders betrachteten Regionen ergibt sich eine durchschnittliche Zunahme der Exposition durch TV-Signale zwischen 4,5 und 9,2 dB. Da TV-Sender jedoch nur einen Teil der Rundfunk-Expositionsquellen darstellen, und andere Quellen, insbesondere der UKW-Rundfunk, von der Systemumstellung nicht berührt werden, verringert sich bei Betrachtung der mittleren Gesamtexposition im Rundfunkbereich die Exposition auf Faktoren zwischen 1,5 und 7,1 dB.

Die Veränderung der ERP an dem für die betrachtete Region jeweils verantwortliche Senderstandort kann als grober Indikator für die mittlere Expositionsänderung herangezogen werden. In der Region "Dillberg" stimmen ERP-Zunahme und mittlere Expositionsänderung sehr gut überein, während im Bereich "Wendelstein" und "München" mittlere Zunahme und die ERP-Veränderung um 3 bis 4 dB differieren. Offensichtlich haben auch noch andere

Faktoren einen Einfluss auf die Expositionsänderung (wie beispielsweise in München eventuell die Veränderung der Montagehöhe der Sendeantenne).

Will man die hier gefundenen Ergebnisse auf andere Regionen in Deutschland übertragen, gilt das oben Gesagte analog: Nur in den "portable indoor"-versorgten Regionen der derzeit in Deutschland vorhandenen DVB-T-Inseln ist derzeit eine belastbare Aussage über die mittlere Expositionsänderung möglich, da nur dort der Wechsel von analoger auf digitale Versorgung nahezu vollständig stattgefunden hat.

Ein ERP-Vergleich der für die Versorgung verantwortlichen Standorte kann in erster Näherung Aufschluss über eine gegebenenfalls vorhandene Expositionsänderung geben. Für die beiden in Kapitel I.6.1.2 bzw. I.6.1.3 ebenfalls bezüglich der installierten Sendeleistungen analysierten Startregionen Berlin und Bremen/Unterweser ergibt sich dann folgendes Bild:

Im "portable indoor"-Bereich von Berlin (etwa identisch mit dem Berliner Stadtgebiet) wurde nach der DVB-T-Umstellung mit einer etwa 2 dB niedrigeren ERP gearbeitet. Dies bedeutet, dass im Stadtgebiet von Berlin vermutlich im Mittel auch eine leichte Abnahme der Immission stattgefunden hat, allerdings können natürlich einige andere Effekte (z.B. veränderte Montagehöhen der Antennen) diesen Trend noch zusätzlich beeinflussen (in beide Richtungen).

In den "portable indoor"-Bereichen der Region Bremen/Unterweser zeigt sich hingegen ein etwas differenzierteres Bild:

Im Stadtgebiet von Bremen und in Bremerhaven ergibt sich eine um etwa 4 bzw. 3 dB höhere ERP nach der DVB-T-Umstellung, was entsprechend zu einer Erhöhung der mittleren Exposition in diesen beiden Städten führen sollte.

Im Bereich "Steinkimmen" hingegen wurde die abgestrahlte ERP um knapp 2 dB gesenkt, was in dieser Region folglich zu einer reduzierten mittleren Exposition führen sollte.

In Cuxhaven wurde zwar ein digitaler Sender in Betrieb genommen, die dort vorhandenen leistungsstarken Analogsender wurden noch nicht abgeschaltet, so dass dort die ERP und damit auch die mittlere Exposition nahezu konstant geblieben sein sollten.

Zusätzlich darf auch in diesen Regionen nicht vergessen werden, dass noch andere Faktoren als die ERP einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Exposition ausüben können.

Die Messergebnisse in Bayern sowie die hier durchgeführten überschlägigen Betrachtungen in anderen Regionen Deutschlands zeigen, dass sowohl eine Zunahme als auch eine Abnahme der mittleren Exposition durch die Einführung von DVB-T in der Umgebung von Senderstandorten möglich ist. Der Vergleich der abgestrahlten ERP kann in erster Näherung aufzeigen, in welche Richtung sich die Immission in der näheren Umgebung eines Senderstandortes bewegt hat.

Nicht in die hier dokumentierten Betrachtungen eingeflossen ist die Tatsache, dass aufgrund der höheren spektralen Effizienz bei DVB-T in einem Analogkanal gleichzeitig vier TV-Programme übertragen werden können, was theoretisch zu einer systembedingten Expositionsverringerung von etwa 6 dB pro Programm führt. Dieser Wert ist allerdings als theoretische Zahl zu sehen, da dieser Effekt nur dann wirksam wird, wenn durch die Einführung von DVB-T die überzähligen Analogkanäle nicht mehr genutzt werden. Die Praxis der DVB-T-Umstellung zeigt jedoch, dass die meisten frei werdenden Analogkanäle im Regelfall mit

DVB-T-Signalen belegt werden (was zu einer Vergrößerung der Zahl an terrestrisch verbreiteten TV-Programmen führt). Die mögliche systembedingte Expositionsverminderung wird also im wesentlichen durch ein gesteigertes Programmangebot kompensiert.

III.2.8 Auswertung der systematischen "Linienmessungen"

Zusätzlich zu den Messungen an den 200 zufällig ausgewählten Messpunkten, wurden noch systematische "Linienmessungen" auf drei verschiedenen Strecken in der Umgebung der Senderstandorte Nürnberg, Dillberg und Wendelstein (insgesamt 47 Messpunkte) durchgeführt. Auch hier wurden sowohl "Vorher" als auch "Nachhermessungen" vorgenommen. Die Resultate dieser Messungen können den folgenden drei Abbildungen entnommen werden.

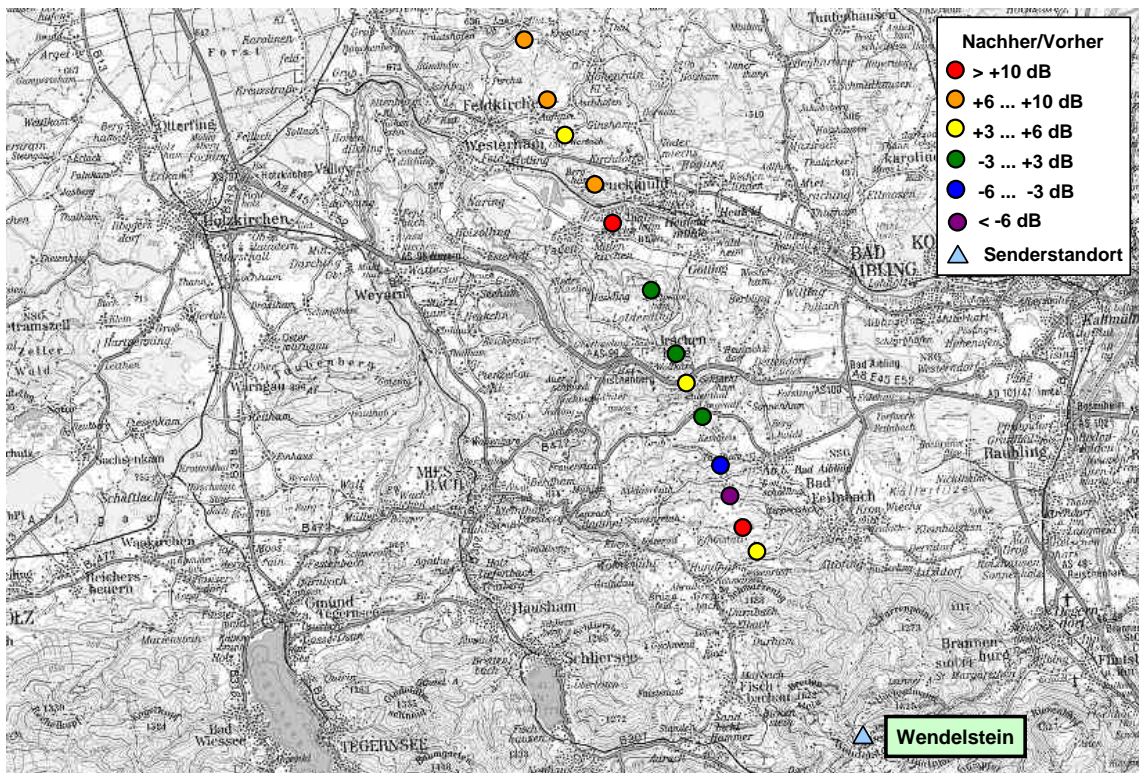


Bild III.2.19: Veränderung der Immission durch analoge bzw. digitale TV-Signale entlang einer etwa 28 km langen radialen Linie vom Fuß des Wendelstein bis Eutenhausen (Quotient der Leistungsflussdichtewerte aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB; Darstellung in sechs Klassen)

Diese "Linienmessung" verdeutlicht nochmals die signifikante Zunahme der mittleren TV-Immission in der Region nördlich des Wendelsteins, allerdings deutlich geringer ausgeprägt, als aufgrund die ERP-Veränderung erwartet (mittlere Zunahme: 2,8 dB).

Alle Messresultate entlang dieser Linie blieben sowohl "vorher" als auch "nachher" unter $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$ (nur TV) bzw. $200 \mu\text{W}/\text{m}^2$ (Summe aller Rundfunkdienste).

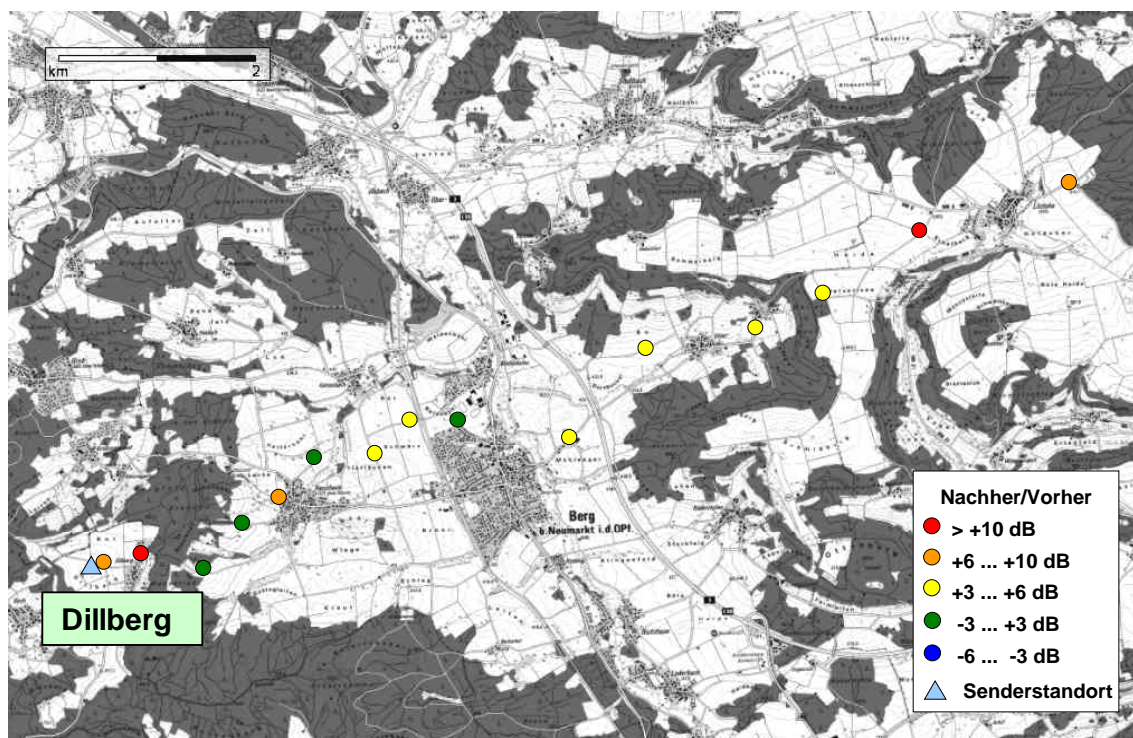


Bild III.2.20: Veränderung der Immission durch analoge bzw. digitale TV-Signale entlang einer etwa 11 km langen radialen Linie vom Dillberg bis Litzlohe (Quotient der Leistungsflussdichtewerte aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB; Darstellung in fünf Klassen)

Diese "Linienmessung" verdeutlicht nochmals, dass die mittlere TV-Immission in der Umgebung des Dillbergs etwa um den Betrag der ERP-Erhöhung (5 dB) zugenommen hat (mittlere Zunahme der Immission: 5,1 dB).

Der größte TV-Messwert ergab sich bei der "Nachhermessung" am Messpunkt mit der zweitgeringsten Entfernung (etwa 500 Meter) zum Sender ($944 \mu\text{W}/\text{m}^2$). Die größte Rundfunk-Gesamtimmission fand sich am sendernächsten Punkt mit $3.790 \mu\text{W}/\text{m}^2$.

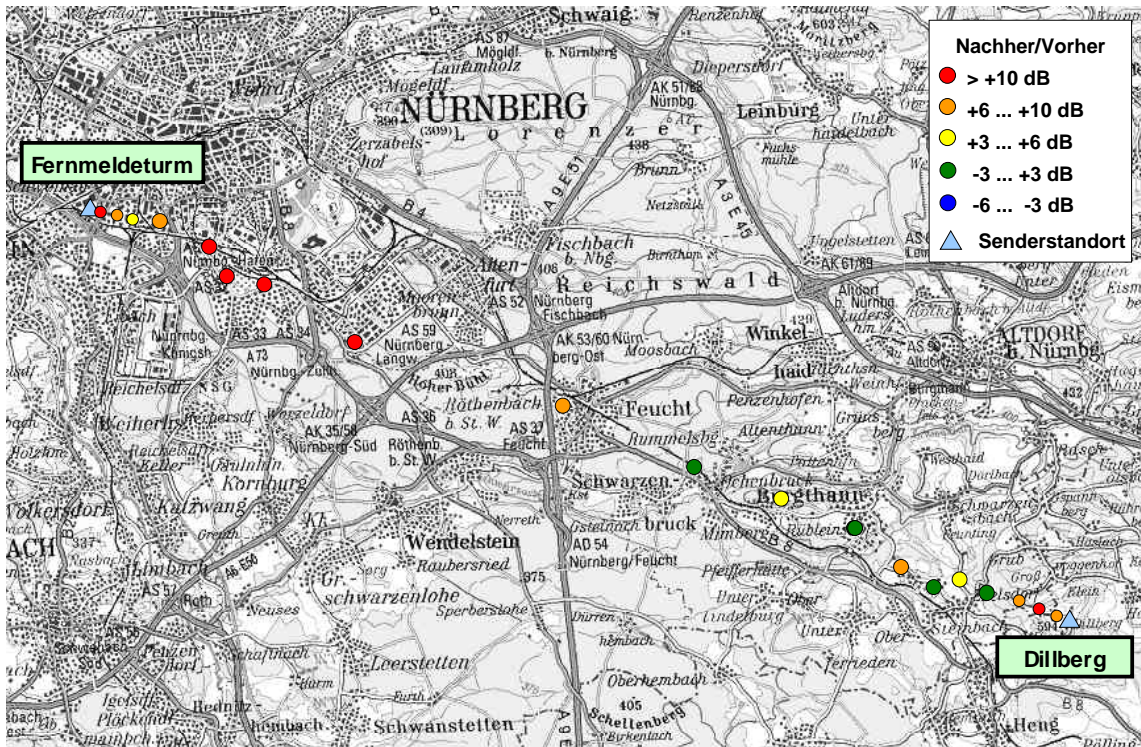


Bild III.2.21: Veränderung der Immission durch analoge bzw. digitale TV-Signale entlang einer etwa 25 km langen Linie vom Dillberg zum Nürnberger Fernmeldeturm (Quotient der Leistungsflussdichtewerte aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB; Darstellung in fünf Klassen)

Hier sieht man nochmals die beiden unterschiedlichen Immissionszustände in der nordbayerischen Region: Während an den Punkten, die sich näher zum Dillberg befinden, eine moderate Zunahme der Immission auftritt, sieht man an den Punkten im Ballungsgebiet Nürnberg wesentlich deutlicher ausgeprägt die Immissionszunahme aufgrund der Verlagerung der TV-Sender von Schwabach an den Nürnberger Fernmeldeturm.

Der größte TV-Messwert ergab sich bei der "Nachhermessung" am Messpunkt mit geringsten Entfernung (etwa 100 Meter) zum Nürnberger Fernmeldeturm (etwa $6.400 \mu\text{W}/\text{m}^2$). Die größte Rundfunk-Gesamtimmission fand sich am gleichen Punkt mit etwa $6.600 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Dieser Punkt stellt damit auch das absolute Maximum der Exposition von allen im Rahmen der hier untersuchten Messpunkte (Flächenmessung, Linienmessung, Gebäudemessung) dar.

Fazit:

Die zusätzlich durchgeführten "Linienmessungen" an den Standorten Nürnberg, Dillberg und Wendelstein unterstützen die bei den Zufallsmesspunkten gefundenen Erkenntnisse bezüglich der Veränderung der Immissionssituation.

III.2.9 Auswertung der Gebäudemessungen

In den folgenden Abschnitten werden Messungen innerhalb von Gebäuden vorgestellt, bei denen zum einen die Höhenabhängigkeit der Immissionen und zum anderen die Dämpfung der zu messenden Signale (verursacht z.B. durch Gebäudewände und Fensterscheiben) untersucht wird.

III.2.9.1 Höhenabhängigkeit der Immission

Aufgrund der vertikalen Abstrahlcharakteristik der TV-Antennen, sowie durch die Abschattungswirkung von Gebäuden und Bäumen, ist im näheren Umfeld der betrachteten Rundfunksender mit einer ausgeprägten Höhenabhängigkeit der Immission zu rechnen. Um diese genauer zu studieren, wurden bei vier Hochhäusern im Stadtgebiet von Nürnberg und München die Immissionen jeweils in verschiedenen Stockwerken messtechnisch erfasst.

Bei der Auswahl der vier Gebäude wurde speziell darauf geachtet, dass sie mit einer ausreichend großen Anzahl an Stockwerken ausgestattet sind und dass zumindest in den oberen Stockwerken eine direkte Sicht zum Senderstandort besteht. Folgende Gebäude wurden untersucht:

Bezeichnung	Beschreibung	Höchstes Stockwerk	Entfernung zum Sender	Nächster Sender
Gebäude 1	Wohnhochhaus in Nürnberg, Neuselsbrunn 53	21. OG	5,6 km	Fernmeldeturm Nürnberg
Gebäude 2	Planungsreferat der Stadt München, Blumenstraße 28b	11. OG	4,8 km	Olympiaturm München
Gebäude 3	Abfallwirtschaftsbetrieb München, Georg-Brauchle-Ring 29	8. OG	1,3 km	Olympiaturm München
Gebäude 4	O ₂ -Zentrale München, Georg-Brauchle-Ring 23-25	8. OG	1,2 km	Olympiaturm München

Tabelle III.2.6: Beschreibung der untersuchten Gebäude

Im Folgenden werden die vier Gebäude aus obiger Tabelle mit Lageplänen und Bildern sowie den Messergebnissen detailliert vorgestellt. Die dokumentierten Messergebnisse stellen dabei die Summenleistungsflussdichte aus allen vermessenen Rundfunkdiensten (UKW, DAB, analoges TV und DVB-T) dar.

Gebäude 1:

Das *Gebäude 1* (Wohnhochhaus, Neuselsbrunn 53) befindet sich im Südosten von Nürnberg in einem vorstädtischen Wohngebiet mit lockerer Hochhausbebauung. Die laterale Entfernung zum Fernmeldeturm Nürnberg beträgt etwa 5,6 km.



Bild III.2.22: Lage von *Gebäude 1* und des Senderstandortes (links); Außenansicht des Gebäudes mit Markierung der Messpunkte

Gemessen wurde in jedem zweiten der 20 Stockwerke im Treppenhaus, das allerdings eine Vergitterung in Richtung Norden aufweist (siehe Bild III.2.22). Um die "Fassadenwerte" ohne den dämpfenden Einfluss des Gitters zu erhalten, wurde die Empfangsantenne außerhalb der Vergitterung positioniert und die "Schwenkmethode" durchgeführt, d.h. so weit es die Bewegungseinschränkung, verursacht durch das Gitter zuließ, wurde ein möglichst großes Volumen durch Bewegen der Antenne mit verschiedenen Polarisationsausrichtungen abgetastet (siehe Bild III.2.23).

Zusätzlich wurde auf der Dachterrasse (21. OG) und vor dem Gebäude auf Höhe des Erdgeschosses gemessen. Ab dem 5. Stockwerk bestand Sichtverbindung zum Fernmeldeturm Nürnberg. Bei allen darunter liegenden Etagen wurde die Sicht durch andere Gebäude und Bäume verdeckt.



Bild III.2.23: Messung im Treppenhaus außerhalb der Vergitterung und unterhalb des Treppenhauses vor *Gebäude 1*

Im folgenden Bild ist die Verteilung der Summenimmission in den verschiedenen Stockwerken für die "Vorher-" und die "Nachhermessung" dargestellt.

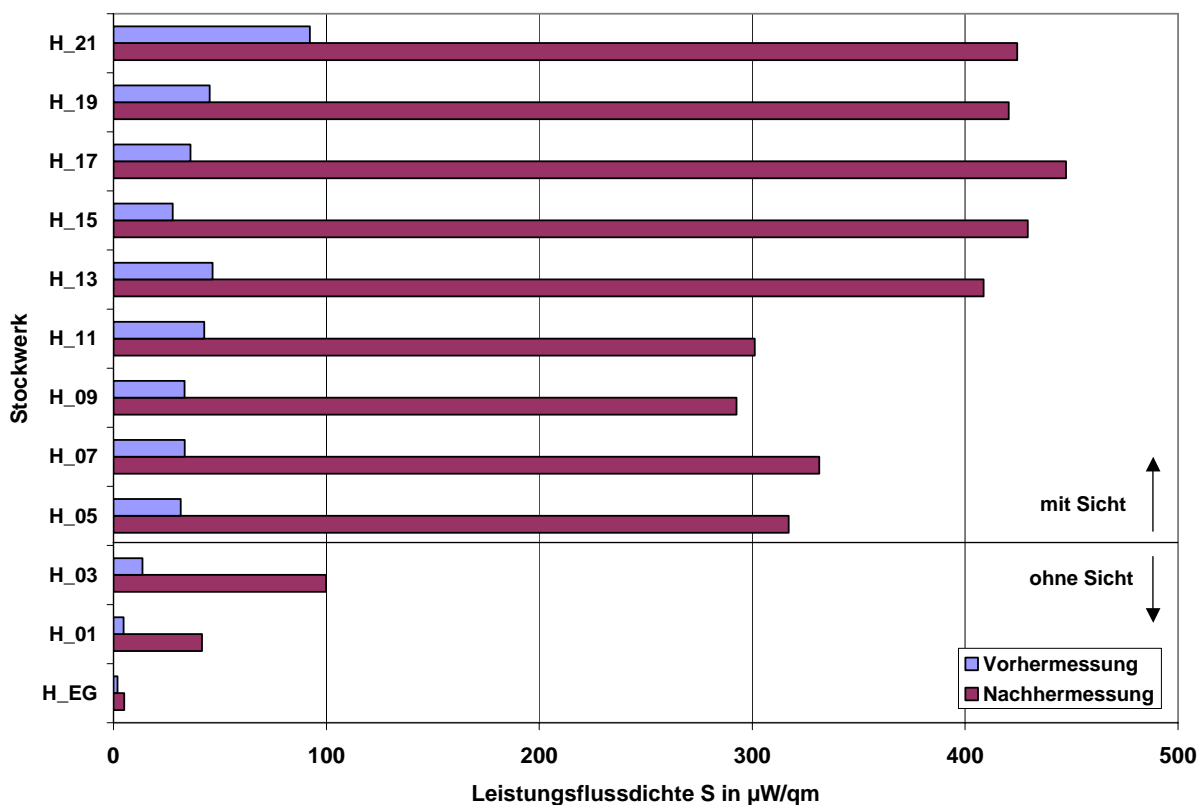


Bild III.2.24: Höhenabhängige Immissionsverteilung ("Vor-" und "Nachhermessung") bei *Gebäude 1*

Der Unterschiedsfaktor zwischen kleinstem und größtem Messwert beträgt bei diesem Gebäude 16,9 dB ("Vorhermessung") bzw. 19,5 dB ("Nachhermessung").

Die Immission nimmt sowohl bei der "Vor-" als auch bei der "Nachhermessung" mit zunehmender Stockwerkshöhe tendenziell zu. Der hier sehr auffällige Größenunterschied zwischen "Vor-" und "Nachhermessung" ist darin begründet, dass im ersten Messdurchgang vom Fernmeldeturm Nürnberg nur regionale Fernsehprogramme mit geringer Sendeleistung abgestrahlt wurden (die Grundnetzsender befanden sich noch auf der Sendeanlage bei Schwabach) während bei der "Nachhermessung" im Zuge des Sendestarts von DVB-T alle Fernsehkanäle nun vom Fernmeldeturm aus betrieben wurden.

Sehr schön ausgeprägt ist der sprunghafte Anstieg der Summenimmission vom dritten zum fünften Obergeschoss aufgrund der ab dort bestehenden Sichtverbindung zum Fernmeldeturm.

Gebäude 2:

Das *Gebäude 2* (Planungsreferat der Stadt München, Blumenstraße 28 b) befindet sich im Zentrum von München mit einer lateralen Entfernung von etwa 4,8 km zum Olympiaturm München.

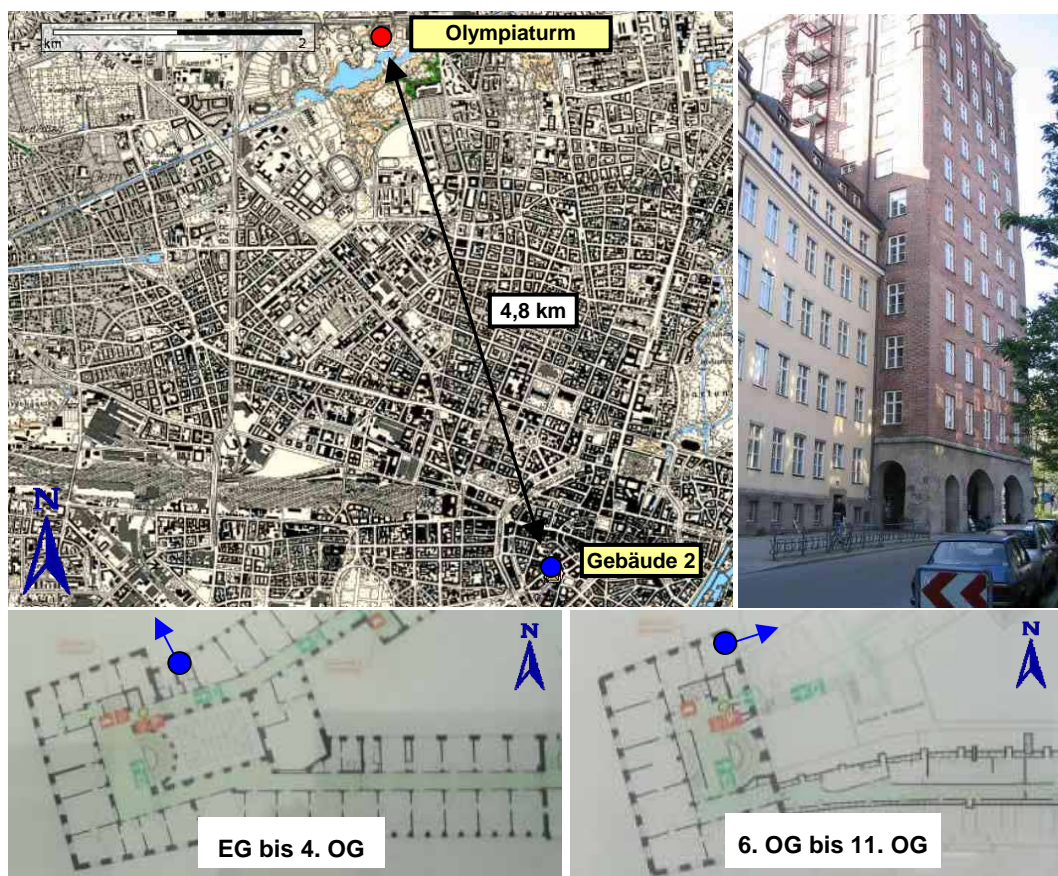


Bild III.2.25: Lage von *Gebäude 2* und des Senderstandortes (links); Außenansicht des Gebäudes (rechts) und Ausrichtung der Messpunkte (Toiletten) mit Öffnungsrichtung der Fenster (unten)

Gemessen wurde in jedem der elf Stockwerke innerhalb der Toilette vor dem geschlossenen Fenster. Im fünften Stockwerk wurde nicht gemessen, da es dort keine vergleichbare Räum-

lichkeit mit offenem Zutritt gab. Die Fenster bis zum vierten Stockwerk sind nach Nordwesten ausgerichtet, ab dem sechsten Stockwerk nach Nordosten.

Vom 7. Stockwerk an bestand Sichtverbindung zum Olympiaturm. Bei allen darunter liegenden Etagen wurde die Sicht durch andere Gebäude verdeckt.



Bild III.2.26: Gebäude 2: Messung in der Toilette (links); Blick vom 11. OG zum Olympiaturm (rechts)

Im folgenden Bild ist die Verteilung der Summenimmission in den verschiedenen Stockwerken für die "Vorher- und die Nachhermessung" dargestellt.

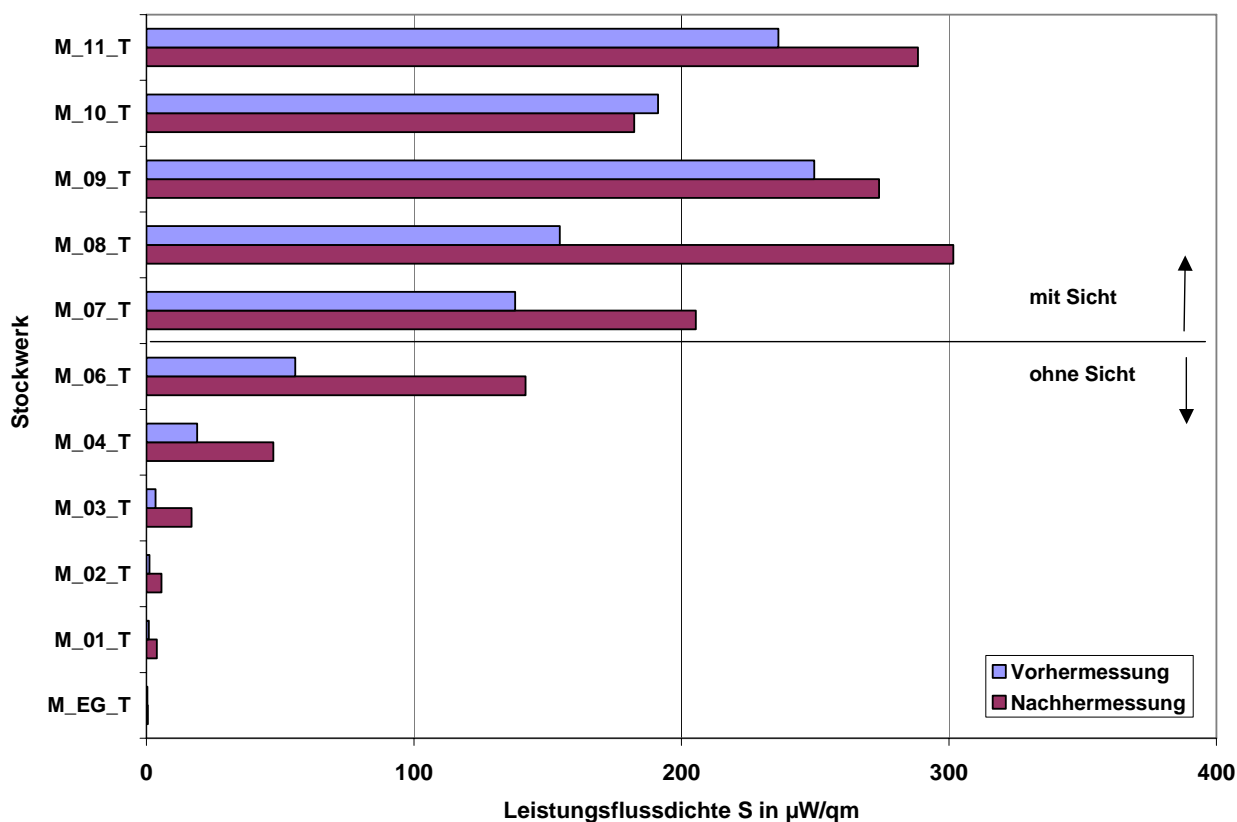


Bild III.2.27: Höhenabhängige Immissionsverteilung ("Vor-" und "Nachhermessung") bei Gebäude 2

An zehn der elf Messpunkte ist eine Zunahme der Immission nach Umstellung auf DVB-T zu beobachten, die allerdings nicht so stark ausgeprägt ist, wie beim Gebäude 1.

Der Unterschiedsfaktor zwischen kleinstem und größtem Messwert beträgt bei diesem Gebäude 28,8 dB ("Vorhermessung") bzw. 27,3 dB ("Nachhermessung") er ist damit deutlich größer als bei *Gebäude 1*.

Die Immission nimmt sowohl bei der "Vorher-" als auch bei der "Nachhermessung" mit zunehmender Stockwerkshöhe zu. Auf der Höhe des zehnten Stockwerkes ist bei beiden Messungen ein "Einbruch" in der gemessenen Leistungsflussdichte zu erkennen. Dieser könnte durch eine Nullstelle im vertikalen Antennendiagramm des Olympiaturms bedingt sein.

Nicht ganz so deutlich ist hier der Anstieg der Summenimmission vom sechsten zum siebten Obergeschoss aufgrund der ab dort bestehenden Sichtverbindung zum Olympiaturm ausgeprägt.

Gebäude 3:

Das *Gebäude 3* (Abfallwirtschaftsbetrieb München, Georg-Brauchle-Ring 29) befindet sich im Nordwesten von München in unmittelbarer Nähe zum Olympiaturm (laterale Entfernung etwa 1,3 km).

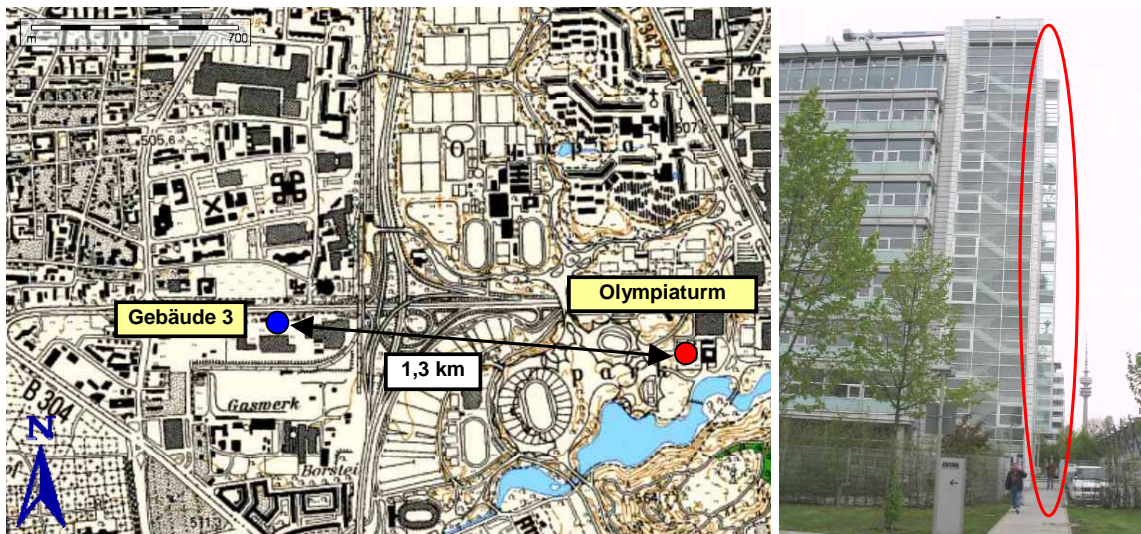


Bild III.2.28: Lage von *Gebäude 3* und des Senderstandortes (links); Westansicht des Gebäudes mit dem Olympiaturm im Hintergrund (rechts)

Das *Gebäude 3* besitzt acht Stockwerke und eine verglaste Front am südlichen Ende des Hauses. Die Empfangsantenne wurde für die Messung aus dem geöffneten Fenster in Richtung Olympiaturm ausgerichtet. Zusätzlich wurde ebenerdig unter der Glasfront außerhalb des Gebäudes eine Messung durchgeführt. An allen Messpunkten bestand Sichtverbindung zum Olympiaturm.



Bild III.2.29: Ostansicht von *Gebäude 3* mit den Messpunkten (links); Messung im südlichen Glasflügel außerhalb der Fenster (rechts)

Im folgenden Bild ist die Verteilung der Summenimmission in den verschiedenen Stockwerken für die "Vorher-" und die "Nachhermessung" dargestellt.

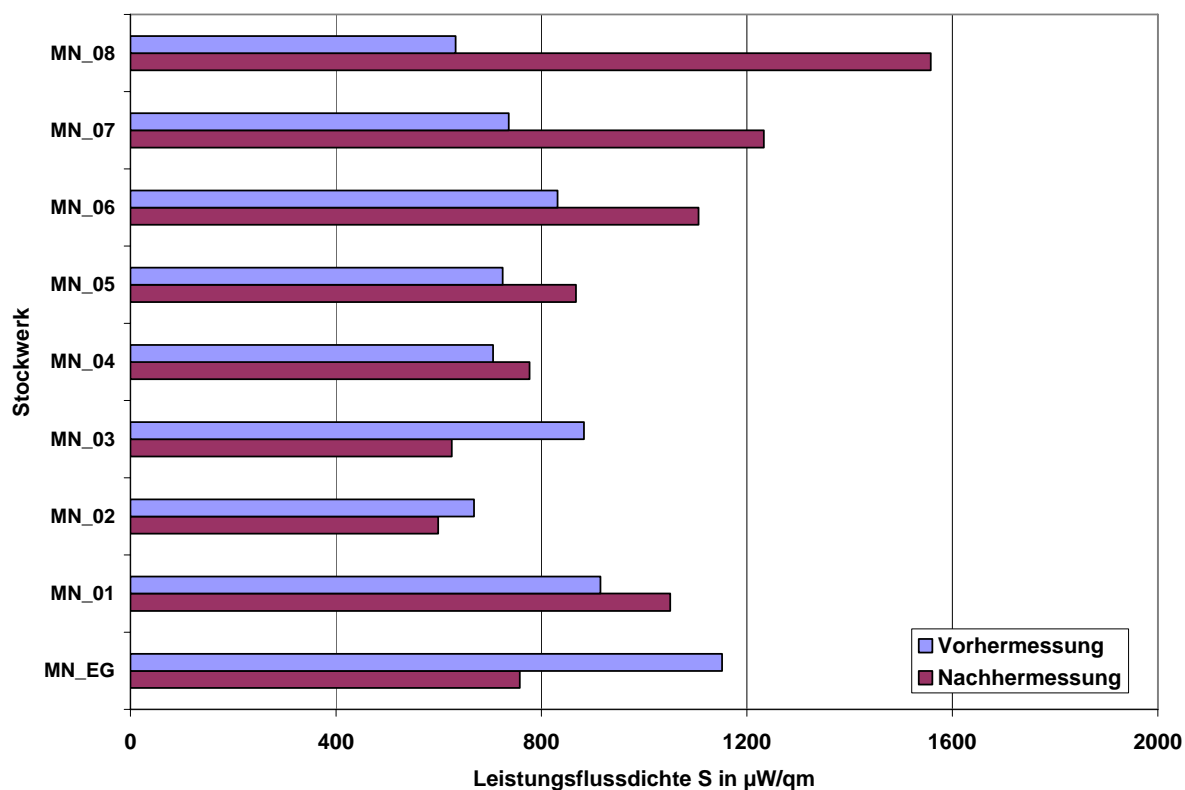


Bild III.2.30: Höhenabhängige Immissionsverteilung ("Vor-" und "Nachhermessung") bei *Gebäude 3*

An sechs der neun Messpunkte ist eine Zunahme der Immission nach Umstellung auf DVB-T zu beobachten, an drei Punkten hingegen eine Abnahme.

Der Unterschiedsfaktor zwischen kleinstem und größtem Messwert beträgt bei diesem Gebäude nur 2,6 dB ("Vorhermessung") bzw. 4,2 dB ("Nachhermessung").

Die Immission zeigt lediglich bei der "Nachhermessung" einen Trend zur Zunahme in den höheren Stockwerken. Bei der "Vorhermessung" wurden am tiefsten Messort (ebenerdig) die höchsten Felder gemessen, die aber über das erste zum zweiten Stockwerk hin abnehmen und sich danach nur noch geringfügig ändern.

Beide Effekte sind vermutlich auf die unterschiedliche Montagehöhe und Abstrahlcharakteristik der Fernsehseudeantennen zurückzuführen.

Gebäude 4:

Das *Gebäude 4* (Zentrale der Firma O₂ (Germany), München, Georg-Brauchle-Ring 23-25) befindet sich im Nordwesten von München in unmittelbarer Nähe zum Olympiaturm (laterale Entfernung etwa 1,2 km).

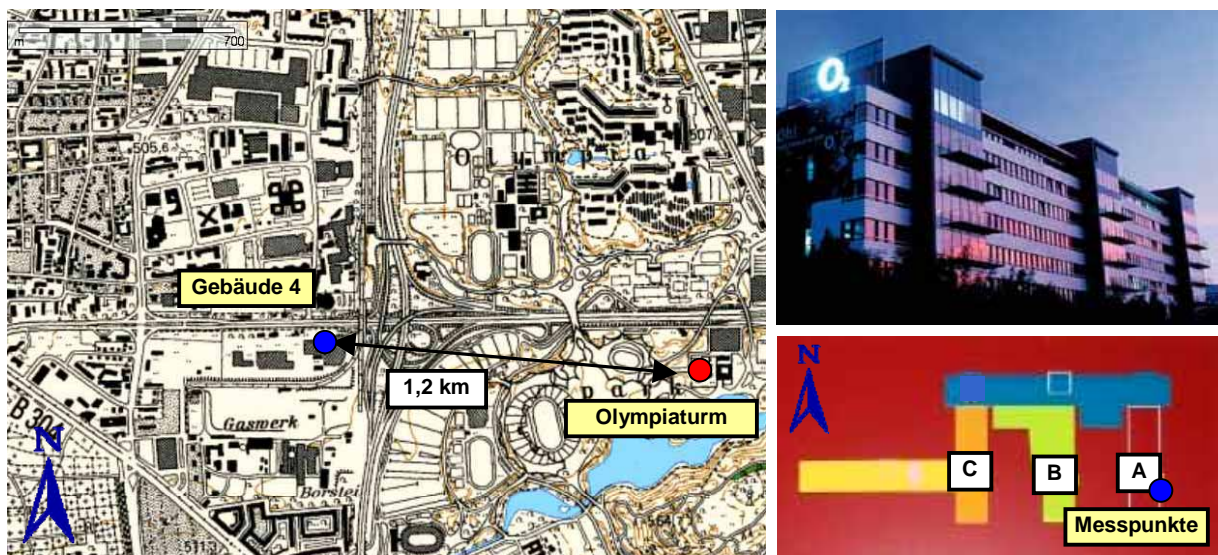


Bild III.2.31: Lage von *Gebäude 4* und des Senderstandortes (links); Nordansicht und Grundriss des Gebäudes mit den Abschnitten A, B und C und der Lage der Messpunkte (rechts)

Das *Gebäude 4* umfasst acht Stockwerke und ist in die Abschnitte A, B und C unterteilt. Für die Messungen wurde das Treppenhaus des östlichsten Abschnittes (A) ausgewählt. Die Etagenbezeichnungen im unten folgenden Diagramm beschreiben das Zwischengeschoss, d.h. die Messpunktbezeichnung o2_A_04 bezieht sich auf das Stockwerk zwischen dem 4. und dem 5.OG. Während der Messungen waren die Fenster geschlossen. Bis auf den Messpunkt o2_A_EG bestand immer Sichtverbindung zum Olympiaturm.



Bild III.2.32: Messung im Treppenhaus von *Gebäude 4*, Abschnitt A (links); Olympiaturm im Hintergrund (rechts)

Im folgenden Bild ist die Verteilung der Summenimmission in den verschiedenen Stockwerken für die "Vorher-" und die "Nachhermessung" dargestellt. Das Ergebnis vom Messpunkt im dritten OG wurde nicht mit einbezogen, da aus der Vorhermessung aufgrund eines Messgerätefehlers keine vollständigen Messdaten vorlagen.

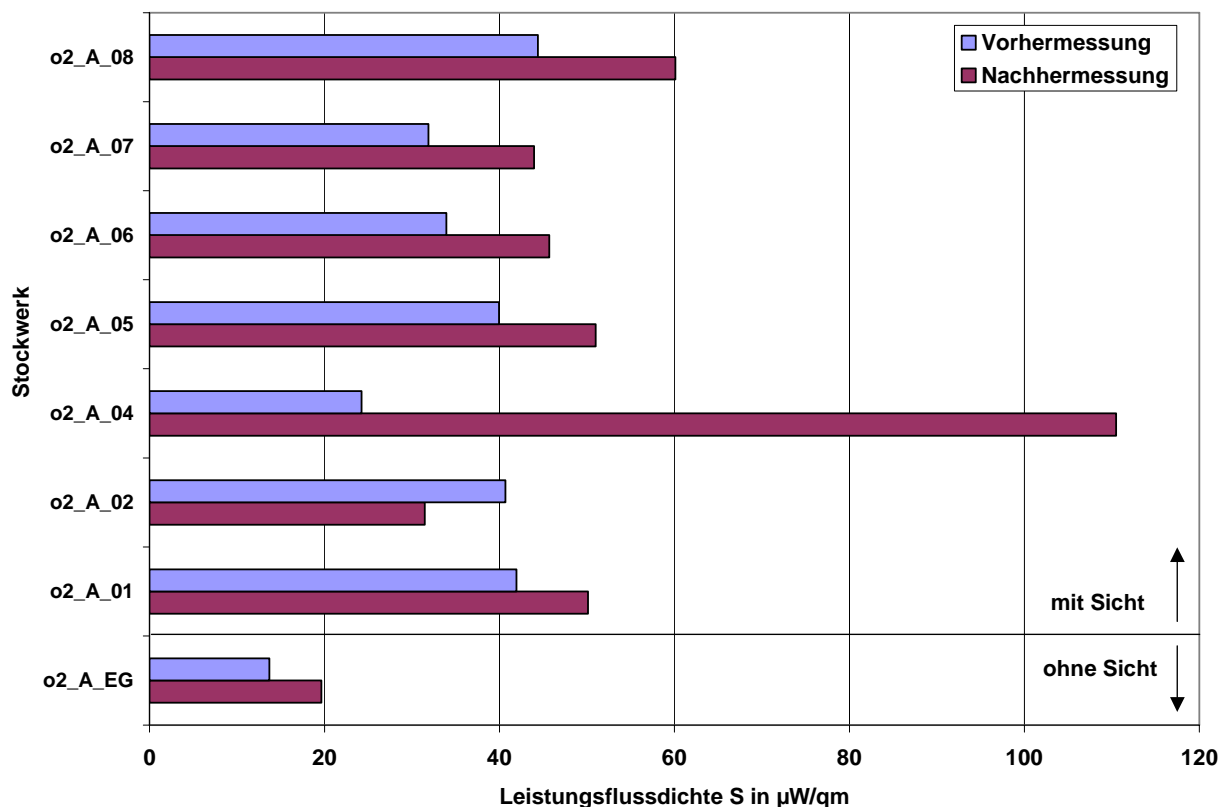


Bild III.2.33: Höhenabhängige Immissionsverteilung ("Vor-" und "Nachhermessung") bei *Gebäude 4*

An sieben der acht Messpunkte ist eine Zunahme der Immission nach Umstellung auf DVB-T zu beobachten, an einem Punkt hingegen eine Abnahme.

Der Unterschiedsfaktor zwischen kleinstem und größtem Messwert beträgt bei diesem Gebäude 5,1 dB ("Vorhermessung") bzw. 4,9 dB ("Nachhermessung").

Die Immissionen der "Vor-" und der "Nachhermessung" bewegen sich aufgrund der geschlossenen Fenster auf sehr niedrigem Niveau und scheinen keiner eindeutigen Höhenabhängigkeit zu unterliegen. Bei der "Nachhermessung" erreicht die Summenimmission im vierten Stockwerk ein singuläres Maximum. Eventuell wurde dies durch ein nicht hundertprozentig verschlossenes Fenster verursacht.

Fazit:

Die in vier dafür geeigneten Hochhäusern in München bzw. Nürnberg durchgeführten Untersuchungen der Höhenabhängigkeit der Immission, verursacht durch die im Abstand von etwa ein bis sechs Kilometer befindlichen Rundfunksendetürme (Olympiaturm bzw. Fernmeldeturm Nürnberg) zeigen die bereits im Rahmen der Messungen an den 200 "Zufallspunkten" festgestellte tendenzielle Erhöhung der Immission nach Einführung von DVB-T (besonders ausgeprägt am Gebäude in Nürnberg). An zwei der vier Gebäude kann eine signifikante Zunahme der Immission in den höheren Stockwerken, verursacht durch die dort vorhandenen günstigeren Sichtverhältnisse zum Sendeturm, nachgewiesen werden. Die Messungen in den beiden Gebäuden mit weniger als 2 Kilometer Abstand zum Olympiaturm zeigen hingegen keine ausgeprägte Höhenabhängigkeit der Immission. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass dort nahezu von allen Punkten aus eine gute Sichtverbindung zum Turm herrscht und auch die Messpunkte in den höheren Stockwerken dieser Gebäude sich noch im Bereich der Nebenkeulen der Rundfunkantennen befinden.

III.2.9.2 Untersuchungen zur Abschätzung der Gebäudedämmung

In diesem Abschnitt soll mittels einfacher Messreihen versucht werden, typische Dämpfungswerte, hervorgerufen durch die Gebäudemauern bzw. die Wände in Innenräumen, zu ermitteln. Dazu wurden bei den durchgeführten Gebäudemessungen verschiedene zusätzliche Szenarien definiert, wie z.B. Messung bei offenem und geschlossenem Fenster oder vergleichende Messungen am Fenster und im Inneren des Gebäudes.

An drei der vier Gebäude, an denen die "Höhenmessungen" durchgeführt wurden, haben diese Messungen zur Bestimmung der Gebäudedämmung stattgefunden (*Gebäude 2*, 3 und 4).

Gebäude 2:

Im *Gebäude 2* (Planungsreferat der Stadt München, Blumenstraße 28 b) wurden, zusätzlich zu den "Fassadenmessungen" in den Toilettenräumen bei geschlossenem Fenster, auch Messungen bei offenem Fenster sowie im Gebäudeinneren durchgeführt. Folgendes Bild gibt einen Eindruck über die Lage der Messpunkte in diesem Gebäude:

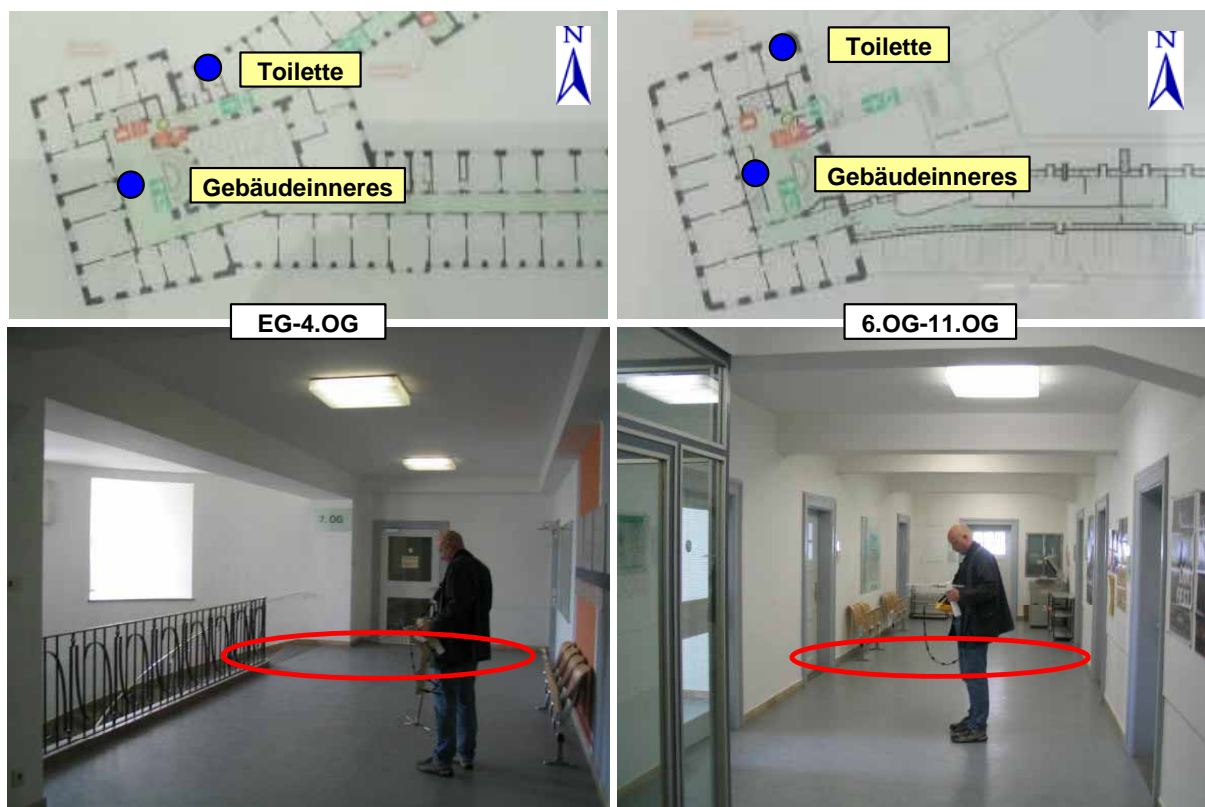


Bild III.2.34: Schematische Darstellung der Messpunkte im Gebäudeinneren und auf den Toiletten in den unterschiedlichen Stockwerken (oben); Messorte im Flur im 7. bzw. im 11. OG (unten) bei *Gebäude 2*

Die Messungen wurden, außer im 5. OG, in allen Stockwerken durchgeführt, aus den Einzelergebnissen in dB wurde jeweils der lineare Mittelwert berechnet. Die Fensterdämpfung wurde nur in einem Stockwerk (11. OG) bestimmt.

In der folgenden Tabelle ist die Abschwächung der gemessenen Signale in dB zwischen Toilette und Gebäudeinnerem sowie zwischen offenem und geschlossenem Fenster dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass hier die Summenimmissionen aus allen Funkdiensten (Frequenzbereich etwa 100 bis 800 MHz) mit einander verglichen werden und daher ein "mittlerer Dämpfungswert" für das vorhandene "Frequenzgemisch" entsteht. Es wurde bewusst auf eine frequenzselektive Auswertung der Dämpfung verzichtet, da dafür wesentlich umfangreichere Messreihen notwendig wären.

"gedämpfter" Messort	"ungedämpfter" Messort	Stockwerk	Mittlere Dämpfung
Gebäudeinneres, Flur ("Vorhermessung")	Toilette, Fenster geschlossen ("Vorhermessung")	EG - 11.OG	12,5 dB
Gebäudeinneres, Flur ("Nachhermessung")	Toilette, Fenster geschlossen ("Nachhermessung")	EG - 11.OG	12,6 dB
Toilette, Fenster geschlossen ("Vorhermessung")	Toilette, Fenster offen ("Vorhermessung")	11.OG	2,1 dB
Toilette, Fenster geschlossen ("Nachhermessung")	Toilette, Fenster offen ("Nachhermessung")	11.OG	0,4 dB

Tabelle III.2.7: Dämpfungswerte in *Gebäude 2*

Durch die Umbauung werden im Inneren von *Gebäude 2* die gemessenen Signale im Mittel um etwa 12,5 dB abgeschwächt (Einzelwerte zwischen 10 und 22 dB). Die Dämpfung des relativ alten Fensters in den Toiletten ist relativ gering und liegt offensichtlich unter 3 dB.

Gebäude 3:

Im *Gebäude 3* (Abfallwirtschaftsbetrieb München, Georg-Brauchle-Ring 29) wurden bei den Untersuchungen in der südlichen Glasfront zusätzlich zu den Messungen bei offenem Fenster auch Messungen bei geschlossenem Fenster und im Gebäudeinneren durchgeführt.

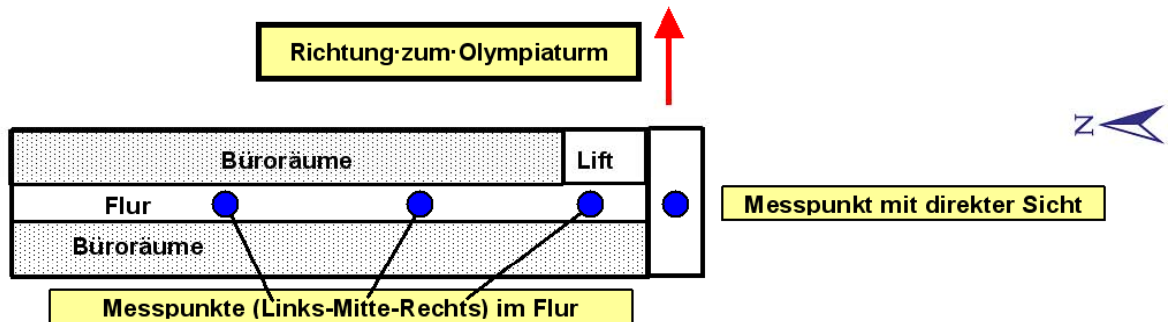


Bild III.2.35: Schematische Darstellung von *Gebäude 3*, Lage der Messpunkte im Gebäudeinneren und in der südlichen Glasfront



Bild III.2.36: Messpunkte 8. OG_Links, 5. OG_Mitte und 3. OG_Rechts bei *Gebäude 3*

Die Messungen wurden in mehreren Stockwerken durchgeführt, aus den Einzelresultaten in dB wurde jeweils der lineare Mittelwert berechnet. Die Fensterdämpfung wurde nur in einem Stockwerk (8. OG) bestimmt.

In der folgenden Tabelle ist die mittlere Abschwächung der gemessenen Signale in dB zwischen dem südlichsten Messpunkt (in der Glasfront) und den Orten im Gebäudeinnerem sowie der Vergleich zwischen offenem und dem geschlossenem Fenster dokumentiert.

"gedämpfter" Messort	"ungedämpfter" Messort	Stockwerk	Mittlere Dämpfung
Gebäudeinneres, Flur ("Vorhermessung")	Glasfront, Fenster geschlossen ("Vorhermessung")	1., 3., 5. und 8.OG	27,9 dB
Gebäudeinneres, Flur ("Nachhermessung")	Glasfront, Fenster geschlossen ("Nachhermessung")	2., 5. und 8.OG	30,3 dB
Glasfront, Fenster geschlossen ("Nachhermessung")	Glasfront, Fenster offen ("Nachhermessung")	8.OG	21,2 dB

Tabelle III.2.8: Dämpfungswerte in *Gebäude 3*

Durch die Umbauung werden im Inneren des *Gebäudes 3* die gemessenen Signale im Mittel um etwa 28 bis 30 dB abgeschwächt (Einzelwerte zwischen 17 und 41 dB). Die Gebäudedämpfung ist hier also deutlich stärker ausgeprägt als bei *Gebäude 2*. Die Dämpfung des modernen, metallbedampften Thermofensters ist ebenfalls mit etwa 20 dB deutlich größer.

Gebäude 4:

Im *Gebäude 4* (Zentrale der Firma O₂ (Germany), München, Georg-Brauchle-Ring 23-25) wurden neben den Messungen in Gebäudeabschnitt A (direkte Sicht zum Olympiaturm) auch Messungen in den dahinter liegenden Gebäudeabschnitten B und C sowie Messungen bei offenem und geschlossenem Fenster durchgeführt, um auch die Abschattungswirkung von Gebäuden zu studieren.

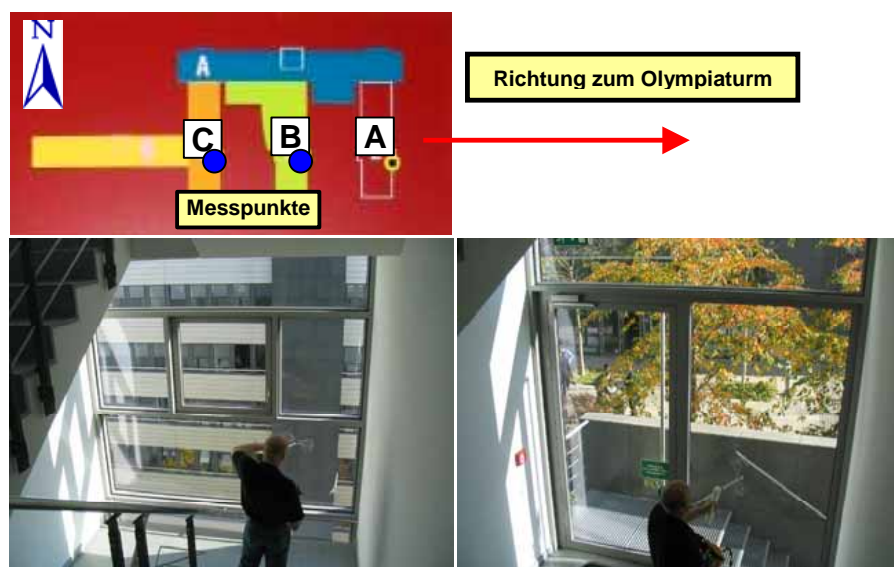


Bild III.2.37: Schematische Darstellung von *Gebäude 4* mit Lage der Messpunkte (oben); Messpunkte in den Abschnitten B und C

Die Messungen wurden jeweils in zwei Stockwerken durchgeführt, aus den Einzelresultaten in dB wurde jeweils der lineare Mittelwert berechnet. Die Fensterdämpfung wurde nur in einem Stockwerk (8. OG) bestimmt.

In der folgenden Tabelle ist die Abschwächung der gemessenen Signale in dB zwischen dem Messpunkt des gleichen Stockwerkes im Abschnitt A und dem jeweiligen Punkt in den Abschnitten B und C sowie der Vergleich von offenem und geschlossenem Fenster dargestellt.

"gedämpfter" Messort	"ungedämpfter" Messort	Stockwerk	Mittlere Dämpfung
Abschnitt B, Treppenhaus ("Vorhermessung")	Abschnitt A, Treppenhaus ("Vorhermessung")	EG und 6.OG	7,6 dB
Abschnitt C, Treppenhaus ("VorhermessungC")	Abschnitt A, Treppenhaus ("Vorhermessung")	EG und 6.OG	6,6 dB
Abschnitt B, Treppenhaus ("Nachhermessung")	Abschnitt A, Treppenhaus ("Nachhermessung")	EG und 6.OG	7,5 dB
Abschnitt C, Treppenhaus ("Nachhermessung")	Abschnitt A, Treppenhaus ("Nachhermessung")	EG und 6.OG	6,6 dB
Abschnitt A, Treppenhaus, Fenster geschlossen ("Vorhermessung")	Abschnitt A, Treppenhaus, Fenster offen ("Vorhermessung")	8.OG	12,4 dB
Abschnitt A, Treppenhaus, Fenster geschlossen ("Nachhermessung")	Abschnitt A, Treppenhaus, Fenster offen ("Nachhermessung")	8.OG	10,5 dB

Tabelle III.2.9: Dämpfungswerte in *Gebäude 4*

Im Abschnitt B werden die Signale vom etwa 1,2 km entfernten Olympiaturm durch den davor liegenden Gebäudeabschnitt A um etwa 7,5 dB abgeschwächt, im Abschnitt C um etwa 6,6 dB. Überraschenderweise scheint die Dämpfung im Abschnitt B, bei dem nur ein Gebäude (Abschnitt A) die Signalausbreitung hindert, etwas höher zu sein als im Abschnitt C, obwohl hier zwei Gebäude (Abschnitt A und B) zwischen ihm und dem Olympiaturm liegen. Dieses Ergebnis sollte jedoch nicht überbewertet werden, da sich das gesamte Gebäude im Bereich der vertikalen Nebenkeulen des Olympiaturms befindet und daher auch diagrammabhängige Immissionsschwankungen den Abschattungseffekten überlagert sein können. Auch Reflexionen an anderen Gebäudeteilen sind als Ursache für die geringere Dämpfung in Abschnitt C denkbar.

Die Dämpfung der Fenster liegt hier mit etwa 10,5 bzw. 12 dB zwischen den Ergebnissen in den beiden anderen untersuchten Gebäuden.

Fazit

Die exemplarischen Untersuchungen zur Dämpfung durch Gebäudemauern an drei Gebäuden in München brachten teilweise sehr unterschiedliche Resultate: Der mittlere Unterschied zwischen dem Messwert an der Gebäudefassade und dem Wert im Gebäudeinneren betrug bei einem Gebäude zirka 12 dB, während die Dämpfung des zweiten untersuchten Gebäudes mit etwa 30 dB deutlich stärker ausgeprägt war. Die unterschiedlichen Dämpfungswerte sind vermutlich im wesentlichen durch die unterschiedlichen Baumaterialien und Fensterdämpfungen bedingt. Eine Untersuchung bezüglich der Abschattungswirkung von großen Gebäudeteilen brachte eine Dämpfung von etwa 7 dB. Hier verhindern vermutlich Reflexionen und Beugungseffekte eine bessere Ausprägung der Schattenzone. Die drei untersuchten Fenster brachten mit 3, 10 und 21 dB ebenfalls sehr unterschiedliche Dämpfungswerte. Hier ist offensichtlich die Metallbedampfung der Scheiben sowie das Material der Fensterrahmen hauptsächlich ausschlaggebend für die entstehende Dämpfung.

III.2.10 Zusammenfassende Bewertung

Als wesentliche Ergebnisse der hier durchgeführten umfangreichen Expositionsmessungen bezüglich Rundfunksignalen in den bayerischen DVB-T-Startregionen "München" und "Nürnberg" können folgende Punkte festgehalten werden.

- Die gefundenen Expositionswerte besitzen eine große Spannweite bezüglich ihrer absoluten Höhe von mehr als 50 dB. Bezüglich der Grenzwertausschöpfung ergab sich am Punkt mit den höchsten Summenimmissionen ein leistungsflussdichtebezogener Ausschöpfungsgrad von nur etwa 3 Promille (Punkt aus der "Linienmessung" Nürnberg - Dillberg).
- Analysiert man die statistische Verteilung der Resultate beider Messkampagnen, so ergibt sich eine mittlere Zunahme der festgestellten Expositionswerte. Allerdings ist die Situation in den beiden untersuchten Regionen nicht gleich, sondern es zeigen sich Unterschiede bezüglich der Höhe der Veränderung. Außerdem ist zu beachten, dass die offensichtlich in den beiden betrachteten Regionen tatsächlich vorhandene mittlere Expositionsänderung durch die Resultate an den Messpunkten der Versorgungsklassen 2 (portable outdoor) und 3 (fixed antenna) abgeschwächt wird. Nur in den "portable indoor"-versorgten Regionen ist derzeit eine belastbare Aussage über die mittlere Expositionsänderung möglich, da nur dort der Wechsel von analoger auf digitale Versorgung nahezu vollständig stattgefunden hat. Wie sich die Expositionssituation in den Randregionen ändern wird, wenn die dort derzeit noch vorhandenen Analogsender auf digital umgestellt worden sind, kann derzeit nicht gesagt werden, denn die Änderung hängt davon ab, ob die zukünftige Leistung der dortigen Digitalsender höher oder niedriger als die bisherige Analleistung sein wird.
- Ein Vergleich der Ergebnisse der "Vor-" bzw. "Nachhermessungen" an den 87 Messpunkten in der Region Nürnberg zeigt eine deutliche Zunahme der Gesamtexposition im Bereich der Stadtgebiete Nürnberg / Fürth / Erlangen (mittlere Zunahme: 6,8 dB). Grund dafür ist die Verlagerung der TV-Sender im Rahmen der Umstellung auf DVB-T vom Hei-

denberg südlich Schwabach zum Fernmeldeturm Nürnberg. Im Bereich "Dillberg" ist nur eine moderate Expositions Zunahme von 1,5 dB feststellbar. Die Messpunkte außerhalb der Versorgungsklasse "portable indoor" zeigen keine signifikante Veränderung der mittleren Gesamtexposition.

- Ein Vergleich der Ergebnisse der "Vorher-" bzw. "Nachhermessungen" an den 113 Messpunkten in der Region München zeigt eine signifikante Immissionszunahme im Stadtgebiet von München und im Bereich der direkt benachbarten Landkreise bis hin zum Wendelstein. Grund dafür sind einerseits die Zunahme der ERP am Wendelstein und am Olympiaturm durch die Einführung von DVB-T als auch eine veränderte Montagehöhe der Antennen am Olympiaturm im Vergleich zur "Vorhermessung". In größerer Entfernung zum Olympiaturm bzw. Wendelstein ist keine signifikante Veränderung der Exposition mehr feststellbar.
- Die Veränderung der ERP an dem für die betrachtete Region jeweils verantwortliche Senderstandort kann als grober Indikator für die mittlere Expositionsänderung herangezogen werden. In der Region "Dillberg" stimmen ERP-Zunahme und mittlere Expositionsänderung sehr gut überein, während im Bereich "Wendelstein" und "München" mittlere Expositions Zunahme und ERP-Veränderung um 3 bis 4 dB differieren. Offensichtlich haben auch noch andere Faktoren einen Einfluss auf die Expositionsänderung (wie beispielsweise in München die Veränderung der Montagehöhe der Sendeantenne).
- Will man die hier gefundenen Ergebnisse auf andere Regionen in Deutschland übertragen, gilt das oben gesagte analog: Nur in den "portable indoor"-versorgten Regionen der aktuell in Deutschland vorhandenen DVB-T-Inseln ist derzeit eine belastbare Aussage über die mittlere Expositionsänderung möglich, da nur dort der Wechsel von analoger auf digitale Versorgung nahezu vollständig stattgefunden hat. Ein ERP-Vergleich der für die Versorgung verantwortlichen Standorte kann in erster Näherung Aufschluss über eine gegebenenfalls vorhandene Expositionsänderung geben. Zusätzlich sollte jedoch nie vergessen werden, dass noch andere Faktoren als die ERP einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Exposition ausüben können.
- Die Messergebnisse in Bayern zeigen eine Zunahme der mittleren Exposition in den "portable-indoor"-versorgten Bereichen um die Senderstandorte durch die Einführung von DVB-T auf. Dies muss jedoch nicht in allen Regionen Deutschlands, in denen bereits auf DVB-T umgestellt wurde, so der Fall sein, denn die beispielhaft durchgeführten überschlüssigen ERP-Betrachtungen für zwei andere Regionen Deutschlands zeigten, dass, abhängig von der ERP der Digitalsender im Vergleich zu den abgeschalteten Analogsendern, sowohl eine Zunahme als auch eine Abnahme der mittleren Exposition durch die Einführung von DVB-T in der Umgebung von Senderstandorten möglich ist.
- Ein Vergleich zwischen UKW- und DAB-Signalen ergibt eine deutliche Dominanz der UKW-Signale (Unterschiedsfaktor im Mittel größer als 10 dB). Zukünftig vorgesehene Leistungserhöhungen bei DAB zur Gewährleistung einer zuverlässigeren Indoorversorgung werden diesen aktuellen Unterschied allerdings verkleinern.
- Die zusätzlich durchgeführten "Linienmessungen" an den Standorten Nürnberg, Dillberg und Wendelstein unterstützen die bei den Zufallsmesspunkten gefundenen Erkenntnisse bezüglich der Veränderung der TV-Immissionssituation.

- Die in vier Hochhäusern durchgeführten Untersuchungen der Höhenabhängigkeit der Immission, verursacht durch die im Abstand von etwa ein bis sechs Kilometer befindlichen Rundfunksendetürme zeigen ebenfalls die tendenzielle Erhöhung der Immission nach Einführung von DVB-T. An zwei der vier Gebäude konnte außerdem eine signifikante Zunahme der Immission in den höheren Stockwerken, verursacht durch die dort vorhandenen günstigeren Sichtverhältnisse zum Sendeturm, nachgewiesen werden. Die Messungen in den beiden Gebäuden mit weniger als 2 Kilometer Abstand zum Olympiaturm zeigen hingegen keine ausgeprägte Höhenabhängigkeit der Immission.
- Die exemplarischen Untersuchungen zur Dämpfung durch Gebäudemauern an drei Gebäuden brachten teilweise sehr unterschiedliche Resultate: Der mittlere Unterschied zwischen dem Messwert an der Gebäudefassade und dem Wert im Gebäudeinneren betrug bei einem Gebäude zirka 12 dB, während die Dämpfung des zweiten untersuchten Gebäudes mit etwa 30 dB deutlich stärker ausgeprägt war. Die unterschiedlichen Dämpfungswerte sind vermutlich im wesentlichen durch die unterschiedlichen Baumaterialien und Fensterdämpfungen bedingt. Eine Untersuchung bezüglich der Abschattungswirkung von großen Gebäudeteilen brachte eine Dämpfung von etwa 7 dB. Hier verhindern vermutlich Reflexionen und Beugungseffekte eine bessere Ausprägung der Schattenzone. Die drei untersuchten Fenster brachten mit 3, 10 und 21 dB ebenfalls sehr unterschiedliche Dämpfungswerte. Hier ist offensichtlich die Metallbedampfung der Scheiben sowie das Material der Fensterrahmen hauptsächlich ausschlaggebend für die entstehende Dämpfung.

III.3 Langzeitmessungen

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit Langzeitmessungen. Hierzu wurden an mehreren Messpunkte die Immissionen von analogem TV, DVB-T, UKW und DAB über einen Zeitraum von 24 Stunden aufgenommen. Durch diese Vorgehensweise können mögliche Immissionschwankungen quantifiziert werden.

III.3.1 Colonius in Köln

Der Messpunkt befindet sich in einem lateralen Abstand von ungefähr 400 m zum Standort Colonius in Köln. Die Messeinrichtung wurde in einer Wohnung im dritten Obergeschoss aufgebaut. Es bestand *direkte Sicht* zum Sender. In Bild III.3.1 ist die Lage und der Sendeturm zu sehen.

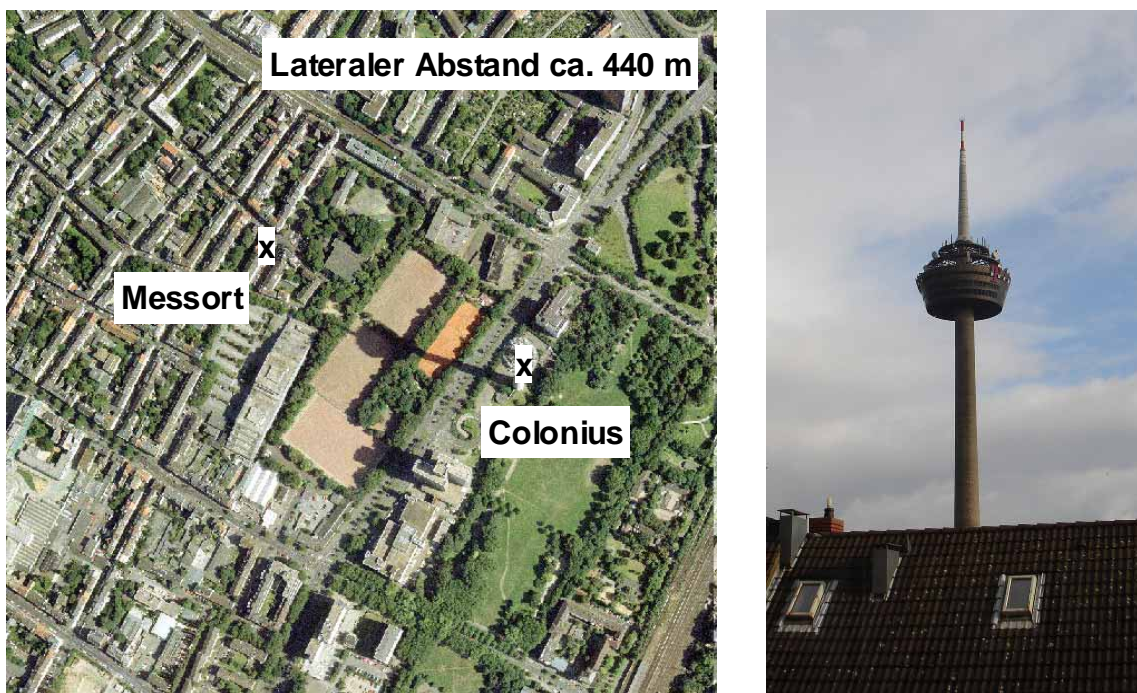


Bild III.3.1: Lage von Sender und Messort; Sender Colonius

Vom Colonius werden insgesamt 6 digitale Fernsehkanäle und ein UKW-Kanal abgestrahlt. Im weiteren werden die Messergebnisse für beide Funksysteme getrennt dargestellt. Bezüglich der DVB-T Kanäle ist der Vollständigkeit halber noch folgender Sachverhalt zu erwähnen: Da die Verbreitung des digitalen Fernsehens auf einem Gleichwellennetz beruht, überlagern sich die Signale von mehreren Senderstandorten an einem Punkt und eine exakte Zuordnung der Immission zu einem Sender ist daher generell nicht möglich. Die gemessene Immission wird dennoch nur dem Senderstandort Colonius zugeordnet, da dessen Anteil aufgrund des geringen Abstandes gegenüber den übrigen Standorten dominiert.

Während des Messzeitraumes gab es Phasen mit Aufenthalt und Phasen ohne Aufenthalt von Personen (mit entsprechender Bewegung) in der Nähe der Messeinrichtung. In

Bild III.3.2 ist der Immissionsverlauf über 24 Stunden exemplarisch für einen digitalen Fernsehkanal dargestellt.

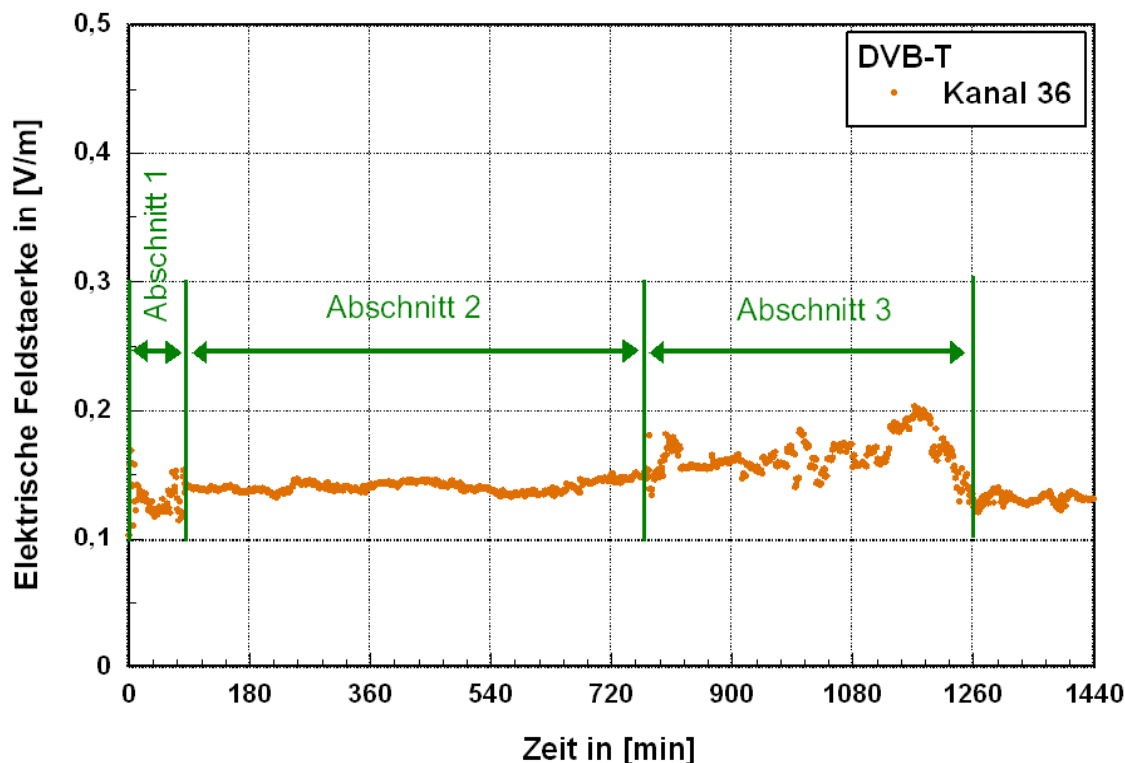


Bild III.3.2: Feldstärkeverlauf für DVB-T mit direkter Sicht zum Sender

Aus Bild III.3.2 lassen sich folgende drei Zeitabschnitte mit unterschiedlichem Immissionsverlauf herausfiltern:

- Abschnitt 1: Aufenthalt von mehreren Personen innerhalb des Raumes
- Abschnitt 2: Kein Aufenthalt von Personen innerhalb des Raumes
- Abschnitt 3: Aufenthalt einer Person (nachts) innerhalb des Raumes (die Schlafstätte befand sich wenige Meter entfernt vom Messgerät)

Die zahlenmäßigen Feldstärkeschwankungen in den jeweiligen Zeitabschnitten sind in folgender Tabelle zu sehen. Hiermit ist die Spannweite zwischen maximal und minimal gemessenem Feldstärkewert in dB gemeint.

	Beschreibung	Feldstärkeschwankung in [dB]
Abschnitt 1	Aufenthalt von Personen im Raum (tagsüber)	4,3
Abschnitt 2	Kein Aufenthalt von Personen im Raum	1,1
Abschnitt 3	Aufenthalt von Personen im Raum (nachts)	4,0

Tabelle III.3.1: Feldstärkeschwankungen für DVB-T in den verschiedenen Zeitabschnitten

Die Immissionsschwankungen werden demnach hauptsächlich durch den Aufenthalt der Personen in der Nähe der Messeinrichtung hervorgerufen und können nicht einer anlagenseitigen Ursache zugeordnet werden. Die geringen Feldstärkeschwankungen im Zeitabschnitt 2 liegen möglicherweise in den Witterungsbedingungen begründet. Während der Messdauer kam es immer wieder zu starken schauerartigen Niederschlägen mit anschließenden trockenen Perioden.

Im Folgenden wird in gleicher Weise der Immissionsverlauf eines UKW Kanals untersucht. Dieser ist in folgendem Bild dargestellt.

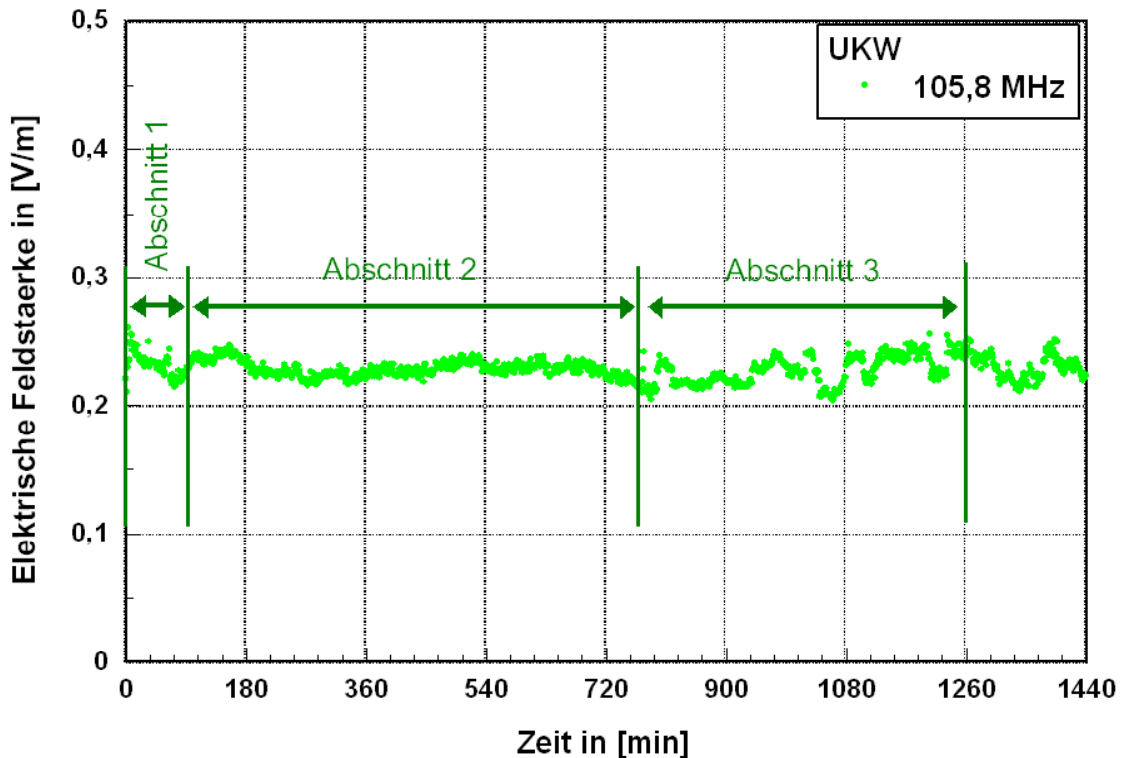


Bild III.3.3: Feldstärkeverlauf für UKW mit direkter Sicht zum Sender

In obigem Bild sind wie schon bei der vorangegangenen Betrachtung die drei Zeitabschnitte zu sehen. Der Immissionsverlauf zeigt ein ähnliches Verhalten wie bereits beim DVB-T Kanal, was auch durch die zahlenmäßige Immissionsschwankung in folgender Tabelle unterstützt wird.

	Beschreibung	Feldstärkeschwankung in [dB]
Abschnitt 1	Aufenthalt von Personen im Raum (tagsüber)	1,8
Abschnitt 2	Kein Aufenthalt von Personen im Raum	0,9
Abschnitt 3	Aufenthalt von Personen im Raum (nachts)	1,9

Tabelle III.3.2: Feldstärkeschwankungen für UKW in den verschiedenen Zeitabschnitten

Die Immissionsschwankungen werden demnach auch bei UKW hauptsächlich durch den Aufenthalt und die Bewegung von Personen in der Nähe der Messeinrichtung hervorgerufen und können nicht einer anlagenseitigen Ursache zugeordnet werden.

III.3.2 IMST in Kamp-Lintfort

Der in diesem Abschnitt betrachtete Messpunkt befindet sich in einem Labor im zweiten Obergeschoss der IMST GmbH in Kamp-Lintfort. Im Gegensatz zum vorangegangenen Messpunkt bestand *keine direkte Sicht* zum Sender. In Bild III.3.4 sind die Lage von Messort und den Senderstandorten sowie der Messaufbau dargestellt.

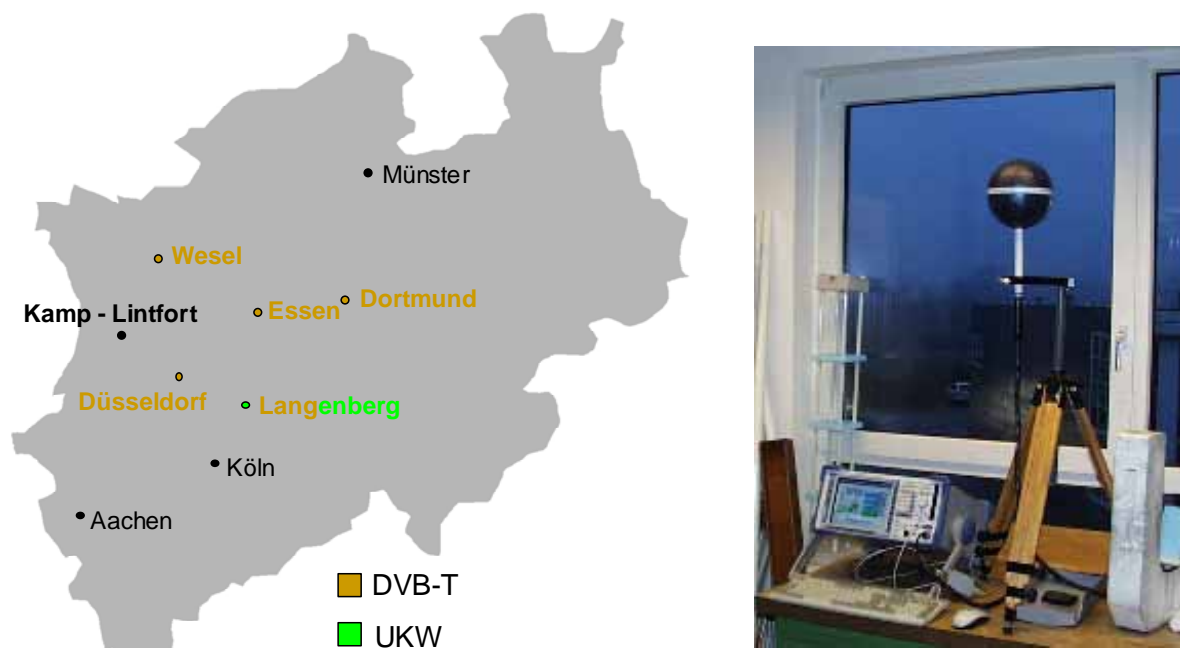


Bild III.3.4: Lage von Messort und Senderstandorten; Messaufbau am IMST

Auch dieser Messort zeichnet sich dadurch aus, dass Phasen mit Aufenthalt und Phasen ohne Aufenthalt von Personen vorlagen. Bezüglich der Immissionen von DVB-T ist erneut der Betrieb als Gleichwellennetz zu erwähnen. In Bild III.3.4 sind daher alle in Frage kommenden DVB-T Senderstandorte dargestellt. Die gemessenen Immissionen setzen sich aus den Signalen dieser Sender zusammen.

Darüber hinaus wurden mehrere UKW-Frequenzen gemessen, die alle vom Senderstandort in Langenberg abgestrahlt werden, der ca. 40 km entfernt vom Messort liegt.

In Bild III.3.5 ist der Immissionsverlauf über 24 Stunden exemplarisch für einen digitalen Fernsehkanal dargestellt.

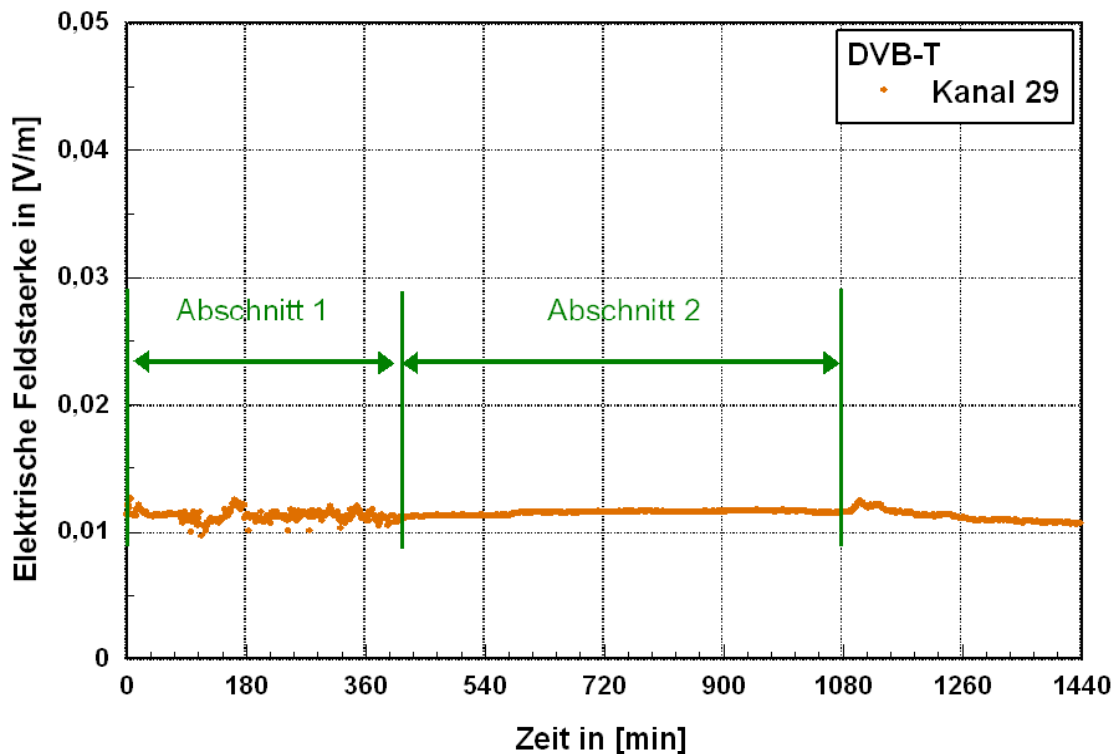


Bild III.3.5: Feldstärkeverlauf von DVB-T mit keiner direkten Sicht zu den Senderstandorten

Aus Bild III.3.5 lassen sich in Analogie zum vorangegangenen Messort zwei Zeitabschnitte mit unterschiedlichem Immissionsverlauf herausfiltern.

- Abschnitt 1: Aufenthalt von mehreren Personen innerhalb des Raumes
- Abschnitt 2: Kein Aufenthalt von Personen innerhalb des Raumes

Die zahlenmäßigen Feldstärkeschwankungen in den jeweiligen Zeitabschnitten sind in folgender Tabelle zu sehen.

	Beschreibung	Feldstärkeschwankung in [dB]
Abschnitt 1	Aufenthalt von Personen im Raum	2,4
Abschnitt 2	Kein Aufenthalt von Personen im Raum	0,7

Tabelle III.3.3: Feldstärkeschwankungen für DVB-T in den verschiedenen Zeitabschnitten

Die Immissionsschwankungen scheinen auf den ersten Blick erneut durch den Aufenthalt von Personen in der Nähe der Messeinrichtung hervorgerufen zu werden. Eine weitere Messung eines Immissionsverlaufs zu einem anderen Zeitpunkt zeigte jedoch, dass auch Schwankungen durch Änderungen im Ausbreitungsweg auftreten können (hier z.B. durch vorbeifahrende Autos). In diesem Fall waren keine Personen anwesend. Die Feldstärkeschwankungen lagen bei 2,3 dB und damit in einem ähnlichen Bereich wie die bei Aufenthalt

von Personen im Raum (siehe Tabelle III.3.3). Die Ursachen für die Immissionsschwankungen liegen demnach bei Szenarien mit großer Entfernung zum Sender nicht ausschließlich in der direkten Messumgebung, sondern können sich auf dem gesamten Ausbreitungsweg befinden.

Im Folgenden wird in gleicher Weise der Immissionsverlauf eines UKW Kanals untersucht. Dieser ist in Bild III.3.6 dargestellt.

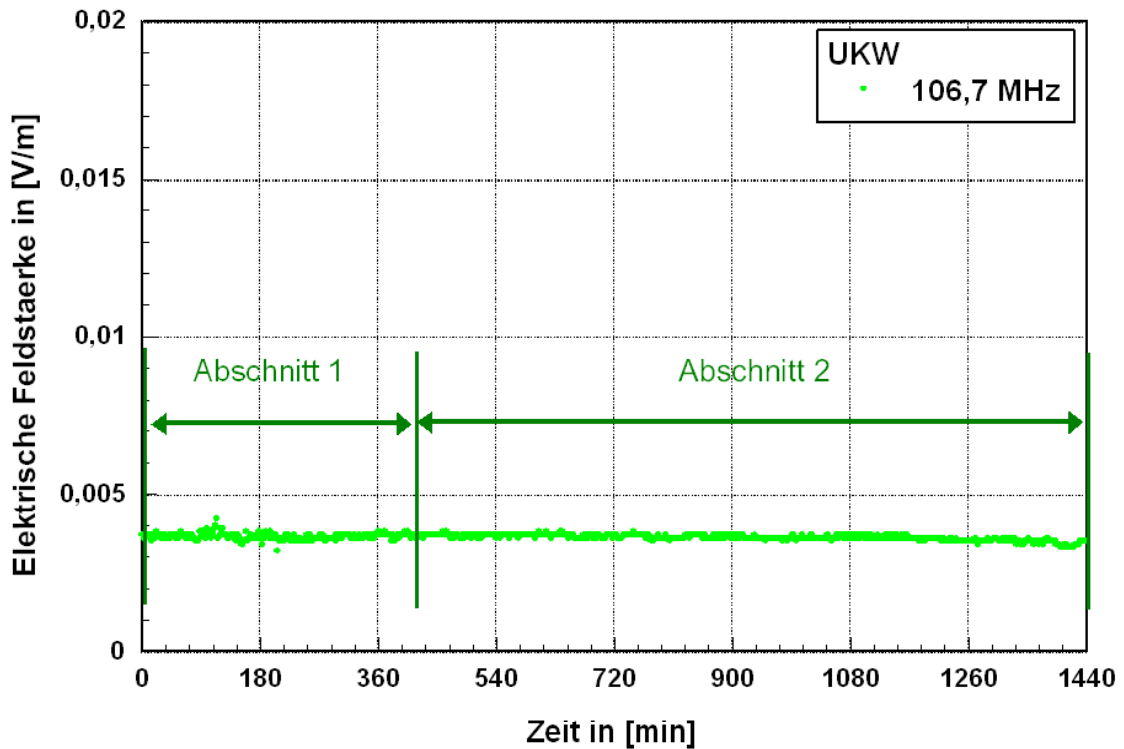


Bild III.3.6: Feldstärkeverlauf von einem UKW-Kanal mit keiner direkten Sicht zum Sender

In obigem Bild sind, wie schon bei der vorangegangenen Betrachtung, die zwei Zeitabschnitte zu sehen. Der Immissionsverlauf zeigt ein ähnliches Verhalten wie schon beim DVB-T Kanal, was auch durch die zahlenmäßige Immissionsschwankung in folgender Tabelle unterstützt wird.

	Beschreibung	Feldstärkeschwankung in [dB]
Abschnitt 1	Aufenthalt von Personen im Raum bzw. Ausbreitungsweg bedingte Schwankungen	1,8
Abschnitt 2	Kein Aufenthalt von Personen im Raum bzw. vorbeifahrende Autos	0,7

Tabelle III.3.4: Feldstärkeschwankungen für UKW in den verschiedenen Zeitabschnitten

Die Immissionsschwankungen werden demnach auch bei UKW hauptsächlich durch den Aufenthalt der Personen in der Nähe der Messeinrichtung bzw. durch Änderungen seitens

des Ausbreitungsweges hervorgerufen und können nicht einer anlagenseitigen Ursache zugeordnet werden.

III.3.3 Fernmeldeturm "Regensburg" und UKW-Sender "Hohe Linie"

Der Messpunkt befindet sich in einem lateralen Abstand von ungefähr 5,5 km zum Fernmeldeturm "Regensburg" bzw. ungefähr 6 km zum Sender "Hohe Linie". Die Messeinrichtung wurde in einer Wohnung im vierten Obergeschoss vor der geschlossenen Balkontür aufgebaut. Es bestand *keine direkte Sicht* zu den beiden Sendern. In Bild III.3.7 ist die Lage des Messpunktes und der beiden Sender zu sehen.

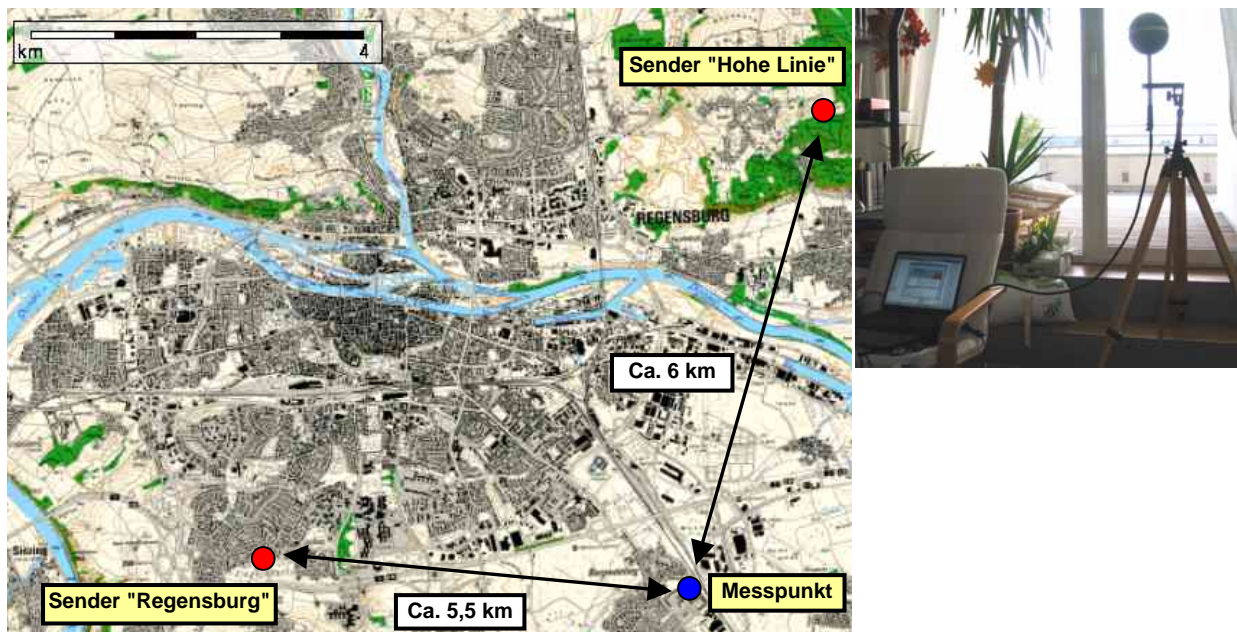


Bild III.3.7: Lage der Sender "Regensburg" und "Hohe Linie" sowie des Messortes; Messaufbau

Vom Sender "Regensburg" werden insgesamt fünf analoge Fernsehkanäle, sechs UKW-Kanäle und ein DAB-Signal (regional, L-Band) abgestrahlt, vom Sender "Hohe Linie" ein analoger Fernsehkanal, sechs UKW-Kanäle und ein DAB-Signal (landesweit, Band III). Dargestellt werden im weiteren exemplarisch je ein Signal der drei unterschiedlichen Funkdienste.

Während des 24h-Messzeitraumes (04. - 05.04.2006; Messbeginn 18:40 Uhr) gab es Phasen mit und ohne Aufenthalt von Personen in der Nähe der Messeinrichtung. In Bild III.3.8 ist der Immissionsverlauf über 24 Stunden exemplarisch für einen analogen Fernsehkanal dargestellt.

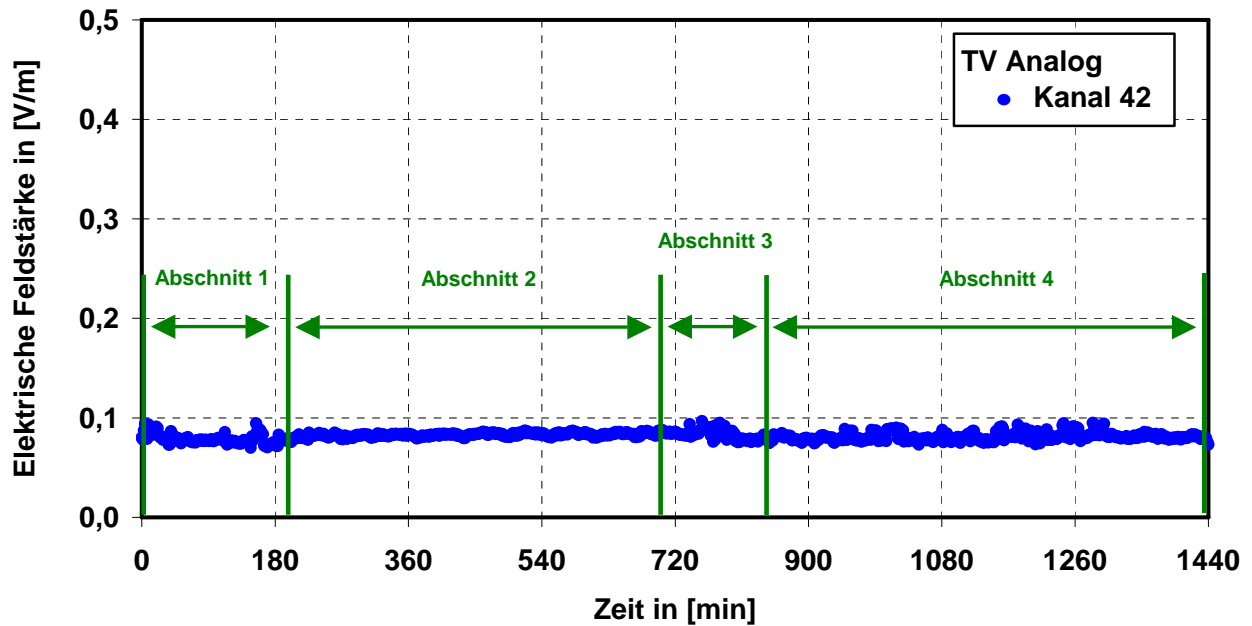


Bild III.3.8: Feldstärkeverlauf für TV analog (Kanal 42) ohne direkte Sicht zu einem Sender

Aus den Bildern III.3.8, III.3.9 und III.3.10 sind immer folgende vier Zeitabschnitte mit unterschiedlichem Immissionsverlauf zu differenzieren:

- Abschnitt 1 und 3: Aufenthalt von Personen innerhalb des Raumes (abends und früh)
- Abschnitt 2 und 4: Kein Aufenthalt von Personen innerhalb des Raumes (nachts und tagsüber)

Die zahlenmäßigen Feldstärkeschwankungen in den jeweiligen Zeitabschnitten sind in folgender Tabelle zu sehen:

	Beschreibung	Feldstärkeschwankung in [dB]
Abschnitt 1	Aufenthalt von Personen im Raum (abends)	2,6
Abschnitt 2	Kein Aufenthalt von Personen im Raum (nachts)	1,0
Abschnitt 3	Aufenthalt von Personen im Raum (früh)	2,1
Abschnitt 4	Kein Aufenthalt von Personen im Raum (tagsüber)	2,3

Tabelle III.3.5: Feldstärkeschwankungen für TV analog (Kanal 42) in den verschiedenen Zeitabschnitten

Wie schon in Abschnitt III.3.2 fällt bei den Schwankungen aus der obigen Tabelle auf, dass diese nicht alleine nur durch die Anwesenheit von Personen im Raum verursacht wurden (vergleiche hierzu Abschnitt 3 und 4). Der Unterschied der Schwankung von Abschnitt 2 zu Abschnitt 4 zeigt, dass diese auch durch Änderungen im Ausbreitungsweg (z.B. vorbeifahrende Autos) hervorgerufen werden können. Die Ursachen für die Immissionsschwankungen liegen demnach bei Szenarien mit großer Entfernung zum Sender und indirekten Sichtverhältnissen nicht ausschließlich in der direkten Messumgebung, sondern können sich auf dem gesamten Ausbreitungsweg befinden. Insgesamt zeigen aber auch die Ergebnisse hier, dass die Schwankungen nicht einer anlagenseitigen Ursache zugeordnet werden können.

Im Folgenden wird der Immissionsverlauf eines UKW Kanals betrachtet.

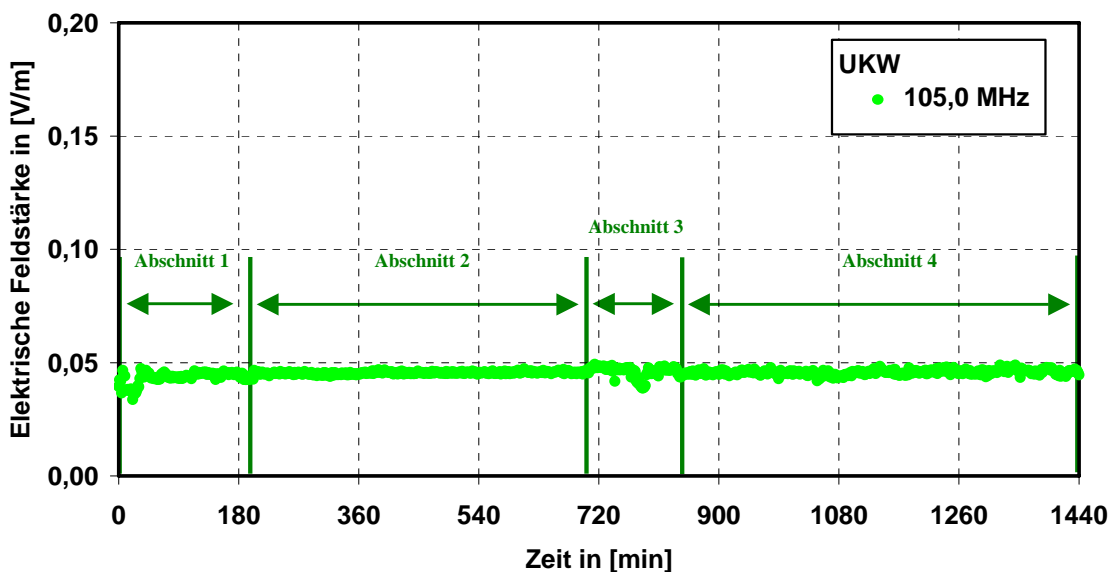


Bild III.3.9: Feldstärkeverlauf für UKW (105,0 MHz) ohne direkte Sicht zu einem Sender

In den Feldstärkeverlauf des UKW-Signals (siehe Bild III.3.9) wurden ebenfalls die vier Zeitabschnitte übertragen und in der folgenden Tabelle die Feldstärkeschwankungen in den Zeitphasen dargestellt:

	Beschreibung	Feldstärkeschwankung in [dB]
Abschnitt 1	Aufenthalt von Personen im Raum (abends)	3,0
Abschnitt 2	Kein Aufenthalt von Personen im Raum (nachts)	0,8
Abschnitt 3	Aufenthalt von Personen im Raum (früh)	2,1
Abschnitt 4	Kein Aufenthalt von Personen im Raum (tagsüber)	1,3

Tabelle III.3.6: Feldstärkeschwankungen für UKW (105,0 MHz) in den verschiedenen Zeitabschnitten

Die Immissionsschwankungen werden demnach auch bei UKW hauptsächlich durch den Aufenthalt und die Bewegung von Personen in der Nähe der Messeinrichtung hervorgerufen.

Hinzukommend sind hier natürlich auch wie schon in der vorangegangenen Betrachtung Änderungen im Ausbreitungsweg zu berücksichtigen. Insgesamt können die Immissionschwankungen auch hier nicht einer anlagenseitigen Ursache zugeordnet werden.

Im Folgenden wird in gleicher Weise der Immissionsverlauf eines DAB-Signals untersucht.

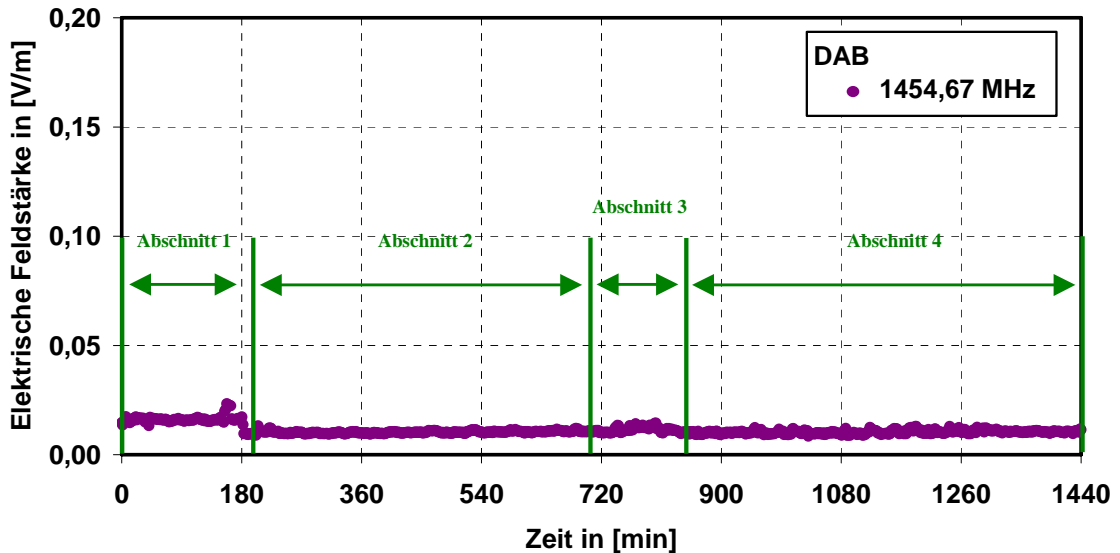


Bild III.3.10: Feldstärkeverlauf für DAB (L-Band) ohne direkte Sicht zu einem Sender

In obigem Bild sind wiederum die vier Zeitabschnitte eingezeichnet. Der Immissionsverlauf stellt sich in ähnlicher Weise wie schon beim analogen TV-Kanal und beim UKW-Signal dar, was auch aus der Feldstärkeschwankung in der folgenden Tabelle ersichtlich wird.

	Beschreibung	Feldstärkeschwankung in [dB]
Abschnitt 1	Aufenthalt von Personen im Raum (abends)	8,3
Abschnitt 2	Kein Aufenthalt von Personen im Raum (nachts)	2,3
Abschnitt 3	Aufenthalt von Personen im Raum (früh)	3,5
Abschnitt 4	Kein Aufenthalt von Personen im Raum (tagsüber)	3,7

Tabelle III.3.7: Feldstärkeschwankungen für DAB (L-Band) in den verschiedenen Zeitabschnitten

Immissionsschwankungen ergeben sich demnach auch bei DAB in erster Linie durch den Aufenthalt und die Bewegung von Personen in der Nähe des Messaufbaus und werden nicht durch Veränderungen z.B. der Abstrahlleistung des Senders hervorgerufen.

III.3.1 Fazit

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Ergebnisse von Langzeitmessungen über eine Zeitdauer von 24 Stunden vorgestellt. An mehreren Messpunkten mit unterschiedlichen Sichtbedingungen und Entfernungen zum Sender wurden die Immissionen von analogem TV, DVB-T, UKW und DAB aufgenommen. Durch diese Vorgehensweise konnten mögliche Immissionsschwankungen quantifiziert werden.

Die Immissionsverläufe von analogem TV, DVB-T, UKW und DAB zeigten hierbei ein ähnliches Verhalten. Schwankungen in der Feldstärke konnten insgesamt nicht mit Änderungen in der Sendeleistung begründet werden. Hier spielten andere Einflussfaktoren eine wesentliche Rolle. In diesem Zusammenhang sind vor allem der Aufenthalt von Personen mit entsprechender Bewegung in der Nähe der Messeinrichtung und Änderungen seitens des Ausbreitungsweges zu nennen.

III.4 Vergleich von Messungen und Berechnungen

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem Vergleich zwischen rechen-technisch prognostizierten Feldstärkewerten und den entsprechenden gemessenen Immissionen aufgeteilt nach analogem Fernsehen, DVB-T, UKW und DAB.

Als Berechnungsprogramm wird hierzu das bereits im vorangegangenen Arbeitspaket entwickelte FPT herangezogen (vgl. Abschnitt II.2.2).

Im Folgenden werden die für die Berechnung notwendigen Eingabeparameter der Vollständigkeit halber nochmals kurz vorgestellt.

- Horizontales Antennendiagramm

Für die horizontalen Antennendiagramme ist die Mithilfe der Netzbetreiber bzw. der Programmanbieter unumgänglich. Die erforderlichen Antennencharakteristiken wurden von diesen für die Studie zur Verfügung gestellt.

- Effektive Sendeleistung (in [kW (ERP)])

Die effektive Sendeleistung wird in kW (ERP) angegeben (siehe [BNetzA] bzw. [WITT 04]). Diese ist auf einen $\lambda/2$ -Dipol bezogen. Für den Vergleich der Immissionen ist es notwendig, dass hier die *mittlere* effektive Sendeleistung angegeben wird: Beim analogen Fernsehen muss der Wert der Synchronspitzenleistung bei Annahme eines mittleren Bildinhaltes hierzu um den Faktor von 4 dB reduziert werden.

- 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 Meter angegeben.

- Effektive Antennenhöhe h_{eff}

Die Berücksichtigung der Geländeoberfläche innerhalb der Berechnung wird über die sogenannte effektive Antennenhöhe realisiert (vgl. Abschnitt II.2.2). Für die Berechnungen wird eine über alle Raumrichtungen gemittelte effektive Antennenhöhe verwendet, die z.B. aus [BNetzA] entnommen werden kann.

- Empfangsantennenhöhe h_2

Für die Empfangsantennenhöhe h_2 wird eine Höhe von 1,7 m über dem Erdboden verwendet. Dieser Wert ist repräsentativ für die nähere Umgebung (vgl. Abschnitt II.3.1).

- Korrekturen für Empfangsantennenhöhe h_2 (nur bei h_2 ungleich 10 m)

Die Korrekturen für die Empfangsantennenhöhe von 1,7 m korrespondieren jeweils mit der am Messpunkt vorliegenden Konfiguration, aufgeteilt nach

- Stadt, dicht
Empfangspunkt umgeben von hohen Häusern mit mehreren Stockwerken
- Stadt,
Empfangspunkt umgeben von niedriger dichter Bebauung

- Vorstadt
Empfangspunkt umgeben von lockerer Bebauung
- Land, offen
Ländlich, Dorf
- Stadt, nah
Entfernung kleiner 3 km vom Sender innerhalb einer Stadt
- Abstände zum Sender
Der laterale Abstand zwischen Sender und jeweiligem Messpunkt muss durch einen x und einen y- Abstand angegeben werden. Diese lassen sich aus den jeweiligen Koordinatenpaaren von Sender und Messpunkt im Gauß-Krüger-Format bestimmen.

Zum besseren Verständnis der im weiteren betrachteten Senderstandorte zeigt das Bild III.4.1 schematisch die beiden Startregionen für DVB-T in Bayern, in denen die Messungen durchgeführt wurden.



Bild III.4.1: Übersicht über die DVB-T Startregionen in Bayern

III.4.1 Berechnungen für das analoge Fernsehen

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse für das *analoge Fernsehen* mit den entsprechenden vor der Umstellung auf digitales Fernsehen gemessenen Immissionen verglichen. Das Bild III.4.2 zeigt die für die Region Nordbayern relevanten Senderstandorte. Die Größe der Kreise symbolisiert hierbei die mittlere Sendeleistung der einzelnen Sender.

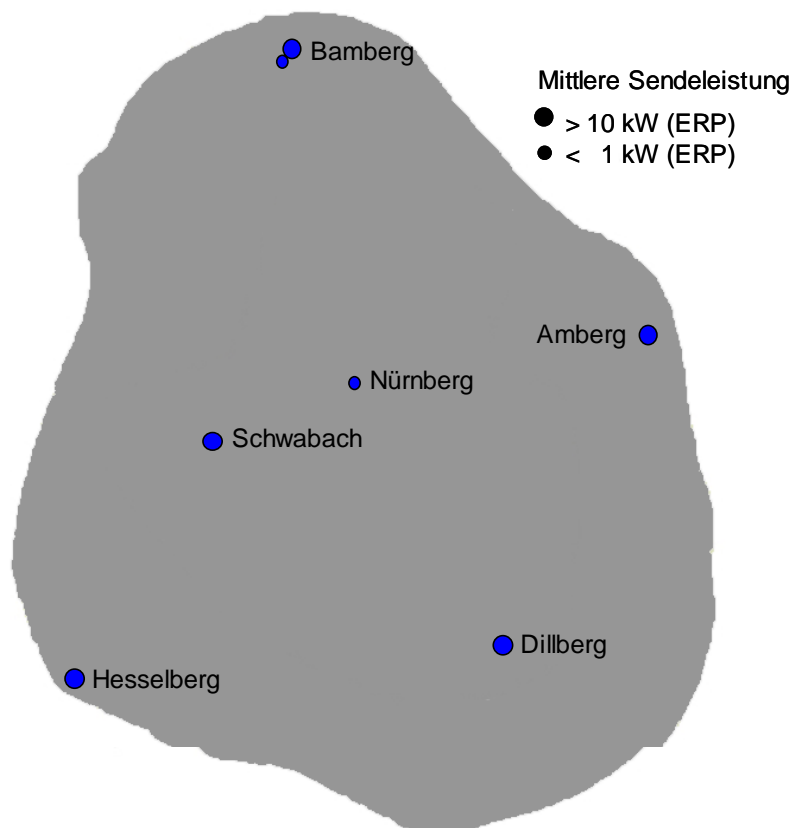


Bild III.4.2: Analoge TV-Senderstandorte in der Region Nordbayern

In Tabelle III.4.1 sind die obigen Senderstandorte mit den Kanalnummern und den zugehörigen Berechnungsparametern zu sehen. Die effektive Höhe aus der [BNetzA] wird in Abhängigkeit der jeweiligen Raumrichtung angegeben. Die in den folgenden Berechnungen verwendete sogenannte mittlere effektive Höhe entspricht hierbei dem arithmetischen Mittelwert der effektiven Antennenhöhe gemittelt über alle Raumrichtungen.

Senderstandort	Koordinaten		Kanalnummer	Antennenhöhe [m]	Mittlere Effektive Höhe [m]	Mittlere Sendeleistung [kW (ERP)] je Kanal
	Rechtswert [m]	Hochwert [m]				
Amberg	5485631	4500342	37	125	341	141,3
			43	125	341	199,1
Bamberg	5524330	4432389	24, 56	119	241	21,9
			30, 45, 48	114	236	0,3
	5528344	4432619	52	105	303	39,8
Büttelberg	5476455	4382345	55	200	157	195
Dillberg	5465273	4455055	6	210	349	39,8
Hesselberg	5437688	4392274	32	108	299	195,4
			47	118	309	195,4
Nürnberg	5476870	4430284	21, 23, 53	282	266	0,25
			36, 40	235	219	0,4
Schwabach	5461073	4426284	34	205	278	159,2
			59	215	288	195,9

Tabelle III.4.1: Überblick über die betrachteten Senderstandorte für das analoge Fernsehen in der Region Nordbayern mit den entsprechenden Berechnungsparametern

Anlehnend an die vorherige Darstellungsweise sind in Bild III.4.3 die Senderstandorte des *analogen Fernsehens* und in der anschließenden Tabelle die für die Berechnung relevanten Parameter für die Region Südbayern zu sehen.

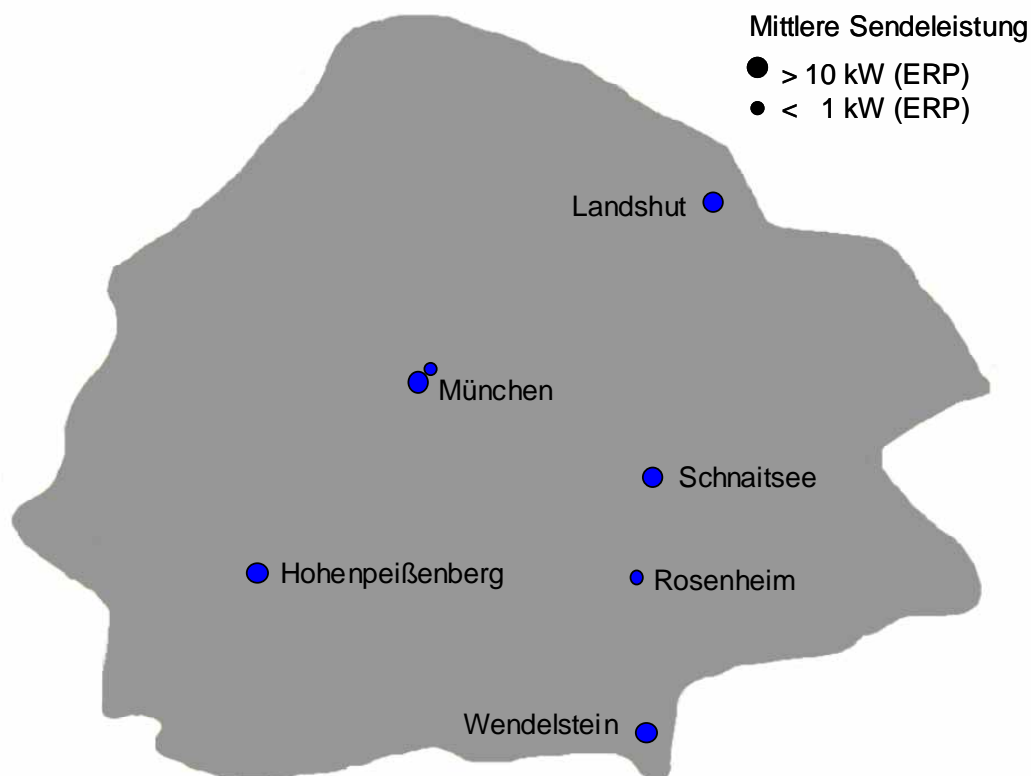


Bild III.4.3: Analoge TV-Senderstandorte in der Region Südbayern

Senderstandort	Koordinaten		Kanalnummer	Höhe der Antenne [m]	Mittlere Effekt. Höhe [m]	Mittlere Sendeleistung [kW (ERP)] je Kanal
	Rechtswert [m]	Hochwert [m]				
Hohenpeißenberg	5296234	4426929	22, 53	152	386	138,0
			25	140	374	39,8
Landshut	5376209	4512679	39	58	80	21,9
München (Olymp.)	5337376	4466805	24, 27, 40, 45, 51, 59	260	253	0,4
			35 ²	273	266	39,9
			37	260	253	1,0
			56 ²	283	276	39,9
Rosenheim	5301432	4509125	38	62	10	0,1
Schnaitsee	5327152	4527088	26, 54	150	282	199,5
Wendelstein	5284934	4500938	10	49	1021	15,92

Tabelle III.4.2: Überblick über die betrachteten Senderstandorte des analogen Fernsehens in der Region Südbayern mit den entsprechenden Berechnungsparametern

Die Ergebnisse des Vergleichs von rechentechnisch mit FPT prognostizierten und entsprechenden messtechnisch erfassten Immissionen in den oben dargestellten Regionen werden im weiteren zusammenfassend dargestellt. Für die Auswertung standen hierzu 1135 Vergleichspaare zwischen Berechnung und Messung zur Verfügung. Diese setzen sich aus den 181 Außenmesspunkten und der Anzahl der jeweils gemessenen Frequenzen für das analoge Fernsehen zusammen. Für die Durchführung der rechentechnischen Prognose wurden zunächst die Abstände der einzelnen Messpunkte zum jeweils betrachteten Senderstandort anhand der Koordinatenpaare als x- und y-Abstand bestimmt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Koordinaten für Messpunkt und Senderstandort im Gauß-Krüger Format (alternativ ist auch das UTM-Format möglich) vorliegen sollten. Insofern müssen die Standortkoordinaten der Sender, die typischerweise in Länge und Breite angegeben sind, in das entsprechende Format transformiert werden. Hierzu gibt es im Internet frei verfügbare Software (z.B. MultiTransAHO). Exemplarisch sind die für die Transformation notwendigen Datenformate in der folgenden Tabelle dargestellt.

Eingabeformat			Ausgabeformat		
Referenzellipsoid	Koordinaten	Darstellungsart	Referenzellipsoid	Koordinaten	Darstellungsart
GRS80 (WGS84)	Länge und Breite	Dezimalgrad bzw. Grad; Minuten; Sekunden	Bessel (Potsdam)	Gauß-Krüger	Rechtswert und Hochwert in [m]

Tabelle III.4.3: Datenformate für die Umrechnung von Koordinaten aus Länge und Breite in das Gauß-Krüger Format

Prinzipiell kann u.a. zwischen folgenden unterschiedlichen Anforderungen an ein Berechnungsverfahren unterschieden werden. In diesen spiegelt sich auch das Einsatzgebiet insofern wieder, ob das Verfahren z.B. für EMVU-Betrachtungen oder für eine Funknetzplanung verwendet werden soll.

² Die Sendeleistungen weichen von denen aus Kapitel I ab, da während der Vorher-Messungen bereits eine provisorische Analog-TV Sendeantenne installiert war, die einen Gewinnunterschied von -3 dB zur ursprünglichen aufwies.

1. Das Berechnungsverfahren soll eine möglichst geringe mittlere betragsmäßige Abweichung bezüglich entsprechender Messwerte aufweisen, d.h. der betragsmäßige Unterschied zwischen der rechentechnisch ermittelten und messtechnisch erfassten Immission soll möglichst gering sein. Dies ist als ein Maß für die *Genauigkeit* der rechentechnischen Prognose anzusehen.
2. EMVU:
Das Berechnungsverfahren soll an möglichst allen Vergleichspunkten einen höheren Immissionswert liefern als der, der bei der Messung ermittelt wurde. Die Differenz zwischen Berechnung und Messung soll demnach immer größer „0“ sein bzw. der berechnete Wert soll den Messwert möglichst an allen Vergleichspunkten überbewerten (dies entspricht der 100%igen Überbewertung) Auf diese Weise kann das Verfahren als eine Worst Case - Berechnung angesehen werden.
3. Funknetzplanung:
Das Berechnungsverfahren soll an möglichst allen Vergleichspunkten einen niedrigeren Immissionswert liefern, als er bei der Messung ermittelt wurde. Die Differenz zwischen Berechnung und Messung soll demnach immer kleiner „0“ sein bzw. der berechnete Wert soll den Messwert möglichst an allen Vergleichspunkten unterbewerten (dies entspricht der 100%igen Unterbewertung) Auf diese Weise ist das Verfahren für die Prognose einer Versorgungssicherheit geeignet.

Vor diesem Hintergrund wurden in der hier vorliegenden Studie zwei unterschiedliche Berechnungen durchgeführt. Zum einen wurde in den rechentechnisch prognostizierten Immissionen ein konfigurationsabhängiger Korrekturfaktor für die Empfangsantennenhöhe berücksichtigt und zum anderen wurde die Berechnung ohne Korrektur durchgeführt.

Bezüglich der Nomenklatur in den folgenden Abschnitten ist folgendes festgelegt: Die *mittlere Abweichung* wird aus der *betragsmäßigen Differenz* zwischen Berechnung und Messung ermittelt. Die *prozentuale Überbewertung* gibt den *prozentualen Anteil* aller Vergleichspunkte an, an denen die berechnete Immission oberhalb der gemessenen Feldstärke lag.

In der folgenden Tabelle sind die über alle Vergleichspaare betrachtete mittlere Abweichung und der prozentuale Anteil der Überbewertungen getrennt nach Berechnung mit Korrektur bzw. ohne Korrektur dargestellt.

Konfiguration	Korrektur	Anzahl der Paare	Mittlere Abweichung in [dB]	Anzahl der Punkte in [%] mit einer Überbewertung
alle	ja	1135	12,9	27,8
alle	nein	1135	24,8	96,2

Tabelle III.4.4: Auswertung der Vergleiche zwischen Messung und Berechnung für das analoge Fernsehen

Aus Tabelle III.4.4 kann folgendes festgehalten werden:

- Eine Berechnung mit einem gemäß der ITU-Empfehlung integrierten konfigurationsabhängigen Korrekturfaktor weist eine geringere mittlere Abweichung auf als eine Berechnung ohne Korrekturfaktor.
- Eine Berechnung ohne Korrekturfaktor liefert einen höheren prozentualen Anteil an Vergleichspunkten, an denen die berechnete Immission über der gemessenen lag (der prozentual Anteil von Überbewertungen ist bedeutend höher), als eine Berechnung mit Korrektur.

Darüber hinaus hat die Auswertung des Vergleichs insgesamt gezeigt, dass die unterschiedlichen Kanäle eines Senders bei der Prognose ein ähnliches Verhalten aufweisen.

Auf der Basis der oben dargestellten Anforderungen an das Berechnungsprogramm werden im Folgenden zwei Optimierungen der Berechnungen durchgeführt: Auf der einen Seite wird das Berechnungsprogramm in der Art optimiert, dass eine möglichst gute Genauigkeit in Form einer möglichst geringen betragsmäßigen mittleren Abweichung vorliegt. Zum zweiten wird das Berechnungsprogramm auf den „Worst Case“ in Form einer möglichst großen prozentualen Überbewertung optimiert, d.h. der Anteil der Vergleichspunkte, an denen die berechnete Immission oberhalb der gemessenen liegt soll möglichst groß sein.

Zunächst wird untersucht, in wie weit sich die obigen Ergebnisse bezüglich der Genauigkeit bzw. der mittleren Abweichung durch einen Zuschlag auf die Berechnungsergebnisse verbessern lassen. Es wurde also derjenige Zuschlag für die jeweilige Konfiguration gesucht, bei dem sich ein globaler Minimumwert für die mittlere Abweichung ergab. In folgender Tabelle sind die resultierenden Zuschläge aufgeteilt nach der jeweiligen Konfiguration dargestellt.

Konfiguration	Korrektur	Anzahl der Paare	Mittlere Abweichung in [dB] (ohne Zuschlag)	Zuschlag in [dB]	Mittlere Abweichung in [dB] (mit Zuschlag)
Gesamt	ja	1135	12,9	jeweilig	9,0
Stadt, dicht	ja	232	14,6	8	8,1
Stadt	ja	210	12,5	7	8,0
Vorstadt	ja	356	9,8	2	9,4
Stadt, nah	ja	27	22,4	-17	7,9
Land, offen	ja	310	10,5	2	9,7

Tabelle III.4.5: Mittlere Abweichung; Auswertung für das analoge Fernsehen mit Berücksichtigung eines Zuschlags

Durch die Berücksichtigung eines der jeweiligen Konfiguration entsprechenden Zuschlags konnte die mittlere Abweichung um knapp 4 dB verbessert werden. Der prozentuale Anteil der Vergleichspunkte, deren Abweichung vor dem Hintergrund der Messunsicherheit innerhalb eines Bereichs von ± 3 dB liegt beträgt 78 %. Für diese Punkte liefert die rechen-technische Prognose eine *gute Übereinstimmung* mit den korrespondierenden Messwerten.

Die dennoch relativ hohe mittlere Abweichung liegt in den restlichen 22 % der Vergleichspunkte begründet. Diese weisen zum Beispiel geographische Merkmale (Tallage mit daraus resultierender Abschattung) auf, die durch das hier verwendete Verfahren nicht ausreichend dargestellt werden können, wodurch höhere Über- bzw. Unterbewertungen auftreten. Dieses spiegelt sich auch in dem Umstand wieder, dass die mittlere Abweichung für Punkte, die in ebenem Gelände liegen, um gut 2 dB besser ist als für Punkte in bergigem Terrain.

Hieran anschließend steht nun die prozentuale Überbewertung als Maß für die „Worst Case“ – Optimierung im Vordergrund. Hierfür bilden die Berechnungen ohne Korrekturterm die Grundlage. Für die Optimierung wurde so verfahren, dass die resultierende maximale Unterbewertung möglichst einen Wert von 3 dB und weniger aufweist und somit im Bereich der Messunsicherheit liegt. Auf diese Weise kann ein Worst Case Verfahren geschaffen werden. In Tabelle III.4.6 sind die Ergebnisse der Optimierung auf eine möglichst maximale prozentuale Überbewertung dargestellt.

Konfiguration	Korrek.	Anzahl d. Paare	Anz. Punkte m.. Überbew. in [%]	Max. Unterbew. in [dB] (ohne Zuschlag)	Zuschlag in [dB]	res. Anz. Punkte m.. Überbew. in [%]	Max. Unterbew. in [dB] (mit Zuschlag)
Gesamt	nein	1135	96,3	9,2	jeweilig	98,8	2,9
Stadt, dicht	nein	232	96,6	9,2	7	98,3	2,2
Stadt	nein	210	99,1	5,5	3	99,5	2,5
Vorstadt	nein	356	97,8	4,4	2	98,9	2,4
Stadt, nah	nein	27	100,0	-8	-8	100,0	0
Land, offen	nein	310	91,9	8,9	6	98,4	2,9

Tabelle III.4.6: Worst Case-Ansatz; Auswertung für das analoge Fernsehsignal mit Berücksichtigung eines Zuschlags

Aus obiger Tabelle wird ersichtlich, dass die prozentuale Überbewertung unter Berücksichtigung eines Zuschlags zu den Berechnungsergebnissen gesteigert werden konnte. Die maximale Unterbewertung liegt hierbei im Bereich der Messunsicherheit. An dieser Stelle sei aber angemerkt, dass die mittlere Abweichung durch diese Vorgehensweise bedingt stark ansteigt und einen Wert von 30 dB aufweist.

Das Berechnungsverfahren kann ohne Berücksichtigung einer Korrektur für die Empfangsantennenhöhe und inklusive eines Zuschlags für Immissionen des analogen Fernsehen als Worst Case Methode angesehen werden.

III.4.2 Berechnungen für das digitale Fernsehen

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse für das *digitale terrestrische Fernsehen* mit den entsprechenden gemessenen Immissionen nach der Umstellung wird im Folgenden Abschnitt behandelt. Das Bild III.4.4 zeigt die für die Region Nürnberg relevanten Senderstandorte.



Bild III.4.4: DVB-T Senderstandorte in der Region Nordbayern

In der folgenden Tabelle sind die Senderstandorte mit den zugehörigen Kanalnummern und den Berechnungsparametern dargestellt.

Senderstandort	Koordinaten		Kanalnummer	Höhe der Antenne [m]	Mittlere Effek. Höhe [m]	Mittlere Sendeleistung [kW (ERP)] je Kanal
	Rechtswert [m]	Hochwert [m]				
Dillberg	5465273	4455055	34, 59	180	325	50,0
			6	210	356	25,0
Nürnberg	5476870	4430284	34,59	284	268	50,0
			40, 60, 66	284	268	20,0
			6	275	259	25

Tabelle III.4.7: Überblick über die betrachteten Senderstandorte in der Region Nordbayern für DVB-T mit den entsprechenden Berechnungsparametern

In gleicher Weise sind in Bild III.4.5 die Senderstandorte des digitalen terrestrischen Fernsehens und in der anschließenden Tabelle die für die Berechnung relevanten Parameter für die Region Südbayern zu sehen.



Bild III.4.5: DVB-T Senderstandorte in der Region Südbayern

Senderstandort	Koordinaten		Kanalnummer	Höhe der Antenne [m]	Mittlere Effek. Höhe [m]	Mittlere Sendeleistung [kW (ERP)] je Kanal
	Rechtswert [m]	Hochwert [m]				
München (Olymp.)	5337376	4466805	10	275	275	20,0
			34, 35, 56, 48, 66	284	284	100,0
Wendelstein	5284934	4500938	10	45	983	25,0
			34, 35, 56, 48, 66	54	992	100,0

Tabelle III.4.8: Überblick über die betrachteten Senderstandorte in der Region Südbayern für DVB-T mit den entsprechenden Berechnungsparametern

Bei den Immissionen des digitalen Fernsehens ist im Gegensatz zum analogen Fernsehen zu beachten, dass das Sendernetz ein sogenanntes Gleichwellennetz ist. Hierbei werden Signale von mehreren Standorten auf der gleichen Frequenz abgestrahlt, d.h. am Empfangsort überlagern sich die Immissionen von den entsprechenden Sendern. Die Berechnungen wurden dementsprechend zunächst für jeden digitalen Senderstandort separat durchgeführt. Anschließend wurden die prognostizierten Immissionen an den einzelnen Vergleichspunkten leistungsmäßig addiert. Insofern ist die Anzahl der Vergleichspunkte von 948 im Gegensatz zur vorherigen Betrachtung des analogen Fernsehens reduziert.

Die folgende Tabelle enthält entsprechend der Betrachtungen beim analogen Fernsehen zunächst einmal die Ergebnisse der zwei Berechnungsarten (mit und ohne Korrektur) aufgeteilt nach mittlerer Abweichung und prozentualer Überbewertung.

Konfiguration	Korrektur	Anzahl der Punkte	Mittlere Abweichung in [dB]	Anzahl der Punkte in [%] mit einer Überbewertung
alle	ja	948	13,6	19,6
alle	nein	948	18,5	92,9

Tabelle III.4.9: Auswertung der Vergleiche zwischen Messung und Berechnung für das digitale terrestrische Fernsehen

Die Ergebnisse aus Tabelle III.4.9 zeigen ein ähnliches Ergebnis wie die des analogen Fernsehens. Während die Berücksichtigung einer konfigurationsabhängigen Korrektur (laut ITU-Empfehlung) für die Empfangsantennenhöhe eine geringere mittlere Abweichung und somit bessere Genauigkeit aufweist, ist der Anteil der prozentualen Überbewertung bei der Berechnung ohne Korrekturterm deutlich größer. Darüber hinaus hat auch hier der Vergleich insgesamt gezeigt, dass die unterschiedlichen Kanäle eines Senders bei der Prognose ein ähnliches Verhalten aufweisen.

Anlehnend an die Vorgehensweise beim analogen Fernsehen wird nun untersucht, in wie weit sich die obigen Ergebnisse durch einen Zuschlag im Hinblick auf „Genauigkeit“ und „Worst Case“ verbessern lassen. Zunächst sind in Tabelle III.4.10 die Ergebnisse für die Optimierung bezüglich der mittleren Abweichung dargestellt.

Konfiguration	Korrektur	Anzahl der Punkte	Mittlere Abweichung in [dB] (ohne Zuschlag)	Zuschlag in [dB]	Mittlere Abweichung in [dB] (inklusive Zuschlag)
Gesamt	ja	948	13,6	jeweilig	11,5
Stadt, dicht	ja	154	16,5	4	13,0
Stadt	ja	192	14,8	1	14,3
Vorstadt	ja	296	10,0	4	8,5
Land, offen	ja	306	12,8	5	9,9

Tabelle III.4.10: Mittlere Abweichung; Auswertung für das digitale terrestrische Fernsehen mit Berücksichtigung eines Zuschlags

Durch die Berücksichtigung eines der jeweiligen Konfiguration entsprechenden Zuschlags konnte die mittlere Abweichung um knapp 2 dB verbessert werden. Für 83 % aller Vergleichspunkte liegt die Abweichung zwischen Berechnung und Messung innerhalb eines Bereichs von ± 3 dB. Hierfür liefert die rechentechnische Prognose demnach wiederum eine gute Übereinstimmung mit den korrespondierenden Messwerten.

Die dennoch relativ hohe mittlere Abweichung liegt wie schon beim analogen Fernsehen in den restlichen Vergleichspunkten (z.B. Tallage) begründet. Dass in diesem Zusammenhang aber nicht ausschließlich die Topographie eine Rolle spielt, zeigt die Tatsache, dass die mittlere Abweichung der „bergigen“ Punkte in diesem Fall knapp 1 dB besser war als die der „ebenen“ Punkte.

Im Folgenden steht die prozentuale Überbewertung im Vordergrund. Hierfür bilden wiederum die Berechnungen ohne Korrekturterm die Grundlage. In Tabelle III.4.11 sind die Ergebnisse der Optimierung auf eine möglichst maximale prozentuale Überbewertung zu sehen.

Konfiguration	Korrek.	Anzahl d. Punkte	Anz. Punkte m. Überbew. in [%]	Max. Unterbew. in [dB]	Zuschlag in [dB]	res. Anz. Punkte m. Überbew. in [%]	Max. Unterbew. in [dB] (m. Zuschlag)
Gesamt	nein	948	92,3	8,0	jeweilig	97,8	3,0
Stadt, dicht	nein	154	96,2	3,2	1	96,8	2,2
Stadt	nein	192	99,0	1,3	0	99,0	1,3
Vorstadt	nein	296	95,6	5,3	3	99,7	2,3
Land, offen	nein	306	84,6	8,0	5	95,8	3,0

Tabelle III.4.11: Worst Case-Ansatz; Auswertung für das digitale terrestrische Fernsehen mit Berücksichtigung eines Zuschlags

Aus obiger Tabelle wird ersichtlich, dass die prozentuale Überbewertung unter Berücksichtigung eines Zuschlags zu den Berechnungsergebnissen gesteigert werden konnte. Die maximale Unterbewertung liegt hierbei im Bereich der Messunsicherheit. An dieser Stelle sei aber angemerkt, dass die mittlere Abweichung durch diese Vorgehensweise bedingt stark ansteigt und einen Wert von gut 21 dB aufweist.

Das Berechnungsverfahren ohne Berücksichtigung einer Korrektur für die Empfangsantennenhöhe und inklusive eine Zuschlags für Immissionen des digitalen Fernsehens kann als Worst Case Methode angesehen werden.

III.4.3 Berechnungen für UKW

Die Berechnungsergebnisse für UKW mit den entsprechenden gemessenen Immissionen werden im Folgenden Abschnitt verglichen. Das Bild III.4.6 zeigt die für die Region Nürnberg relevanten Senderstandorte. Die Größe der Kreise symbolisiert hierbei die mittlere Sendeleistung der jeweiligen Sender.



Bild III.4.6: UKW Senderstandorte in der Region Nordbayern

Die Tabelle III.4.12 zeigt die Senderstandorte mit den zugehörigen abgestrahlten Frequenzen und den Berechnungsparametern.

Senderstandort	Koordinaten		Frequenzen [MHz]	Höhe der Antenne [m]	Mittlere Effektive Höhe [m]	Mittlere Leistung [kW (ERP)] je Frequenz
	Rechtswert [m]	Hochwert [m]				
Amberg	5476994	4488657	90	30	117	0,3
Ansbach	5462209	4396127	89,4	138	171	0,5
Bamberg	5528344	4432619	89,6; 94,8; 99,8; 102,9	53	301	25
			97,4	53	301	5
	5527600	4432830	101,1	83	301	25
Büttelberg	5476425	4382304	88,2; 99,3; 101,5; 104,0	183	187	25,1
			95,5	183	187	10,0
Dillberg	5465273	4455055	87,6; 97,9; 100,6; 100,2; 104,5	190	334	25,1
			102,5	110	254	10,0
			88,9; 92,3	170	314	25,1
Gelbelsee	5423238	4458191	100,2; 101,6; 106,1	120	185	25,0
			88	91	156	10,0
			90,5; 97,6	91	156	25,0
Nürnberg	5476870	4430284	105,1	240	224	0,5
			105,6	240	224	0,1
			92,9; 94,5; 95,8; 97,1; 106,9	240	224	0,3
			90,1	223	207	0,1
			98,6	100	82	1,0
	5479648	4432998	103,6	38	12	0,2
			106,5	38	12	0,1
Fürth	5479472	4427397	107,4	120	82	0,9
Ochsenkopf	5543664	4486289	100,3; 102,3; 103,2; 107,1	189	576	100
			90,7; 96,0; 99,4	170	557	100
Schwabach	5461073	4426284	107,8	84	161	0,32
Seubersdorf	5448552	4470108	94	105	219	1

Tabelle III.4.12: Überblick über die betrachteten Senderstandorte in der Region Nordbayern für UKW mit den entsprechenden Berechnungsparametern

In Analogie zur vorherigen Darstellung sind in Bild III.4.7 die UKW-Senderstandorte und in der anschließenden Tabelle die für die Berechnung relevanten Parameter für die Region Südbayern dargestellt.

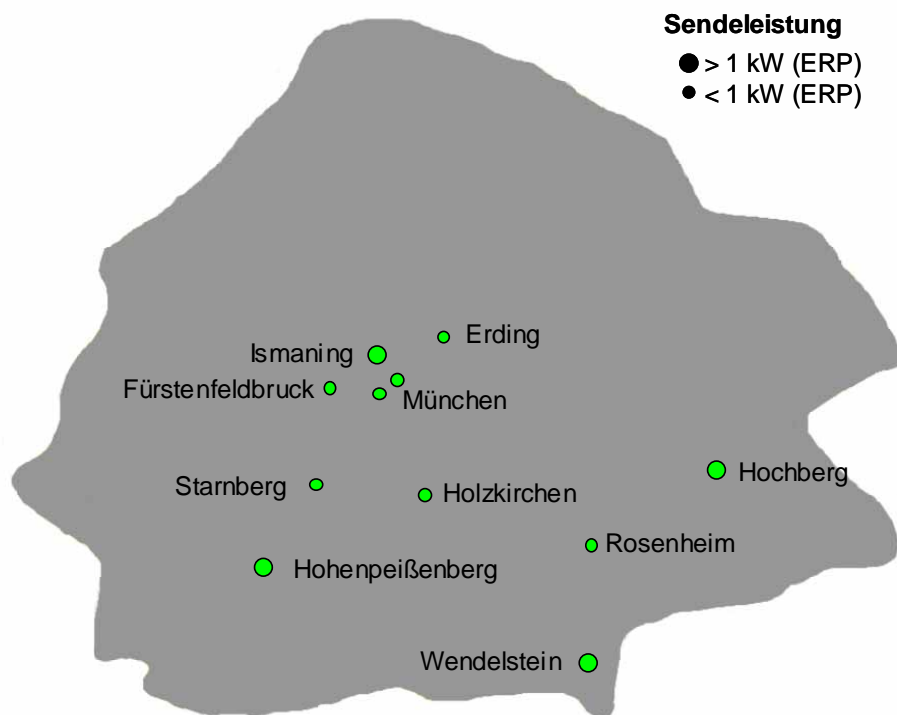


Bild III.4.7: UKW Senderstandorte in der Region Südbayern

Senderstandort	Koordinaten		Frequenzen [MHz]	Höhe der Antenne [m]	Mittlere Effek. Höhe [m]	Mittlere Leistung [kW (ERP)] je Frequenz
	R-Wert [m]	H-Wert [m]				
Erding	5349606	4493651	87,9	36	34	0,1
Fürstenfeldbruck	5332877	4442238	106,4	110	148	2,0
Hochberg	5300489	4548919	95,9; 98,0	55	148	5,0
			91,5; 103,7; 107,1	55	148	5,0
Hohenpeißenberg	5296234	4426929	94,2; 99,2	128	336	25,1
			100,4	128	336	25,1
			92,8; 103,8	128	336	25,1
Holzkirchen	5306060	4472792	91,7	46	116	0,1
Ismaning	5346238	4480840	88,4; 90,0; 91,3; 97,3	100	96	25,1
			102,7; 103,2; 105,2;	200	196	25,1
München (Neuh.)	5334413	4466498	96,8; 100,8; 101,7;	100	96	0,3
München (Olymp.)	5337376	4466805	89,0; 92,4; 93,3; 95,5; 96,3; 101,3	256	259	0,3
Rosenheim 1	5301432	4509125	92,3	50	10	0,1
			96,2; 97,2; 106,6	52	12	0,1
Rosenheim 2	5291618	4512680	96,7	15	82	0,3
Starnberg	5318461	4451399	87,9; 94,7	18	5	0,1
Wendelstein	5284934	4500938	89,5; 93,7; 98,5; 102,3; 105,7; 107,7	55	987	100,0

Tabelle III.4.13: Überblick über die betrachteten Senderstandorte in der Region Südbayern für UKW mit den entsprechenden Berechnungsparametern

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Vergleichs von rechentechnisch mit FPT prognostizierten und entsprechenden messtechnisch erfassten Immissionen in den oben dargestell-

ten Regionen zusammenfassend dargestellt. Für die Auswertung standen hierzu 2804 Vergleichspaare zwischen Berechnung und Messung zur Verfügung. Diese setzen sich wiederum aus den 181 Messpunkten und der Anzahl der jeweils gemessenen Frequenzen für UKW zusammen. Für die Durchführung der rechentechnischen Prognose wurden zunächst wieder die Abstände der Messpunkte zum jeweils betrachteten Senderstandort anhand der Koordinatenpaare als x- und y-Abstand bestimmt. Anschließend wurden die zwei schon bekannten Berechnungen durchgeführt. Zum einen wurde in die rechentechnisch prognostizierten Immission ein konfigurationsabhängiger Korrekturfaktor für die Empfangsantennenhöhe berücksichtigt und zum anderen wurde die Berechnung ohne Korrektur durchgeführt.

In der folgenden Tabelle sind die über alle Vergleichspaare betrachtete mittlere Abweichung und der prozentuale Anteil der Überbewertungen getrennt nach Berechnung mit Korrektur bzw. ohne Korrektur dargestellt.

Konfiguration	Korrektur	Anzahl der Punkte	Mittlere Abweichung in [dB]	Anzahl der Punkte in [%] mit einer Überbewertung
alle	ja	2804	10,0	27,5
alle	nein	2804	15,7	92,7

Tabelle III.4.14: Auswertung der Vergleiche zwischen Messung und Berechnung für UKW

Die Ergebnisse aus Tabelle III.4.14 zeigen ein schon bekanntes Bild. Wohingegen die Berücksichtigung einer konfigurationsabhängigen Korrektur für die Empfangsantennenhöhe eine geringere mittlere Abweichung aufweist, ist der Anteil der prozentualen Überbewertung bei der Berechnung ohne Korrekturterm deutlich größer. Insgesamt hat der Vergleich auch hier gezeigt, dass die unterschiedlichen Kanäle eines Senders bei der Prognose ein ähnliches Verhalten aufweisen.

Wie schon beim analogen und digitalen Fernsehen wird im Folgenden untersucht, in wie weit sich die obigen Ergebnisse durch einen zusätzlichen Faktor verbessern lassen. Zunächst sind hierzu in Tabelle III.4.15 die Ergebnisse für die Optimierung bezüglich der mittleren Abweichung dargestellt.

Konfiguration	Korrektur	Anzahl der Punkte	Mittlere Abweichung in [dB] (ohne Zuschlag)	Zuschlag in [dB]	Mittlere Abweichung in [dB] (inklusive Zuschlag)
Gesamt	ja	2804	10,0	jeweilig	8,3
Stadt, dicht	ja	561	10,3	6	6,2
Stadt	ja	575	9,8	5	7,2
Vorstadt	ja	811	9,5	-1	9,3
Stadt, nah	ja	20	8,6	-7	4,3
Land, offen	ja	837	10,3	3	9,0

Tabelle III.4.15: Mittlere Abweichung; Auswertung für UKW inklusive eines Zuschlags

Durch die Berücksichtigung eines der jeweiligen Konfiguration entsprechenden Zuschlags konnte die mittlere Abweichung um knapp 2 dB verbessert werden. Der prozentuale Anteil der Vergleichspunkte, deren Abweichung vor dem Hintergrund der Messunsicherheit inner-

halb eines Bereichs von ± 3 dB liegt beträgt 83 %. Die übrigen 17 % der Vergleichspunkte weisen zum Beispiel in ihrer geographischen Lage begründet zum Teil hohe Über- bzw. Unterbewertungen auf, wodurch die relativ große mittlere Abweichung begründet ist. Vor diesem Hintergrund kann noch unterstützend hinzugefügt werden, dass die mittlere Abweichung für Punkte, die in ebenem Gelände liegen um gut 4 dB besser war als für Punkte in bergigem Terrain.

Für die Optimierung der prozentualen Überbewertung bilden wiederum die Berechnungen ohne Korrekturterm die Grundlage. In Tabelle III.4.16 sind die Ergebnisse der Optimierung auf eine möglichst maximale prozentuale Überbewertung zu sehen. Dabei wurde in gleicher Weise wie bei den vorherigen Betrachtungen vorgegangen.

Konfiguration	Korrek.	Anzahl d. Punkte	Anz. Punkte m. Überbew. in [%]	Max. Unterbew. in [dB] (o. Zuschlag)	Zuschlag in [dB]	res. Anz. Punkte m. Überbew. in [%]	Max. Unterbew. in [dB] (m.Zuschlag)
Gesamt	nein	2804	92,3	16,8	jeweilig	99,4	2,3
Stadt, dicht	nein	561	99,2	0,6	0	99,2	0,6
Stadt	nein	575	94,4	16,8	14	99,8	2,8
Vorstadt	nein	811	92,7	11,1	9	99,8	2,1
Stadt, nah	nein	20	100,0	3,0	0	100,0	3,0
Land, offen	nein	837	85,8	14,3	12	99,6	2,3

Tabelle III.4.16: Worst Case-Ansatz; Auswertung für UKW inklusive eines Zuschlags

Aus obiger Tabelle wird ersichtlich, dass die prozentuale Überbewertung unter Berücksichtigung eines Zuschlags zu den Berechnungsergebnissen gesteigert werden konnte. Die maximale Unterbewertung liegt hierbei im Bereich der Messunsicherheit. An dieser Stelle sei aber angemerkt, dass die mittlere Abweichung durch diese Vorgehensweise bedingt stark ansteigt und einen Wert von gut 26 dB aufweist.

Das Berechnungsverfahren ohne Berücksichtigung einer Korrektur für die Empfangsantennenhöhe und inklusive eines Zuschlags kann auch für Immissionen von UKW als Worst Case Methode angesehen werden.

III.4.4 Berechnungen für DAB

Die Ergebnisse der Berechnungen in Relation zu den gemessenen Immissionen für *DAB* werden analog zu den vorherigen Betrachtungen vorgestellt. In Bild III.4.8 sind die Senderstandorte von DAB in der Region Nordbayern zu sehen. Hierbei werden die Sender dahingehend unterschieden, ob sie für eine landesweite Ausstrahlung oder zur Versorgung von lokalen Ballungszentren verwendet werden.

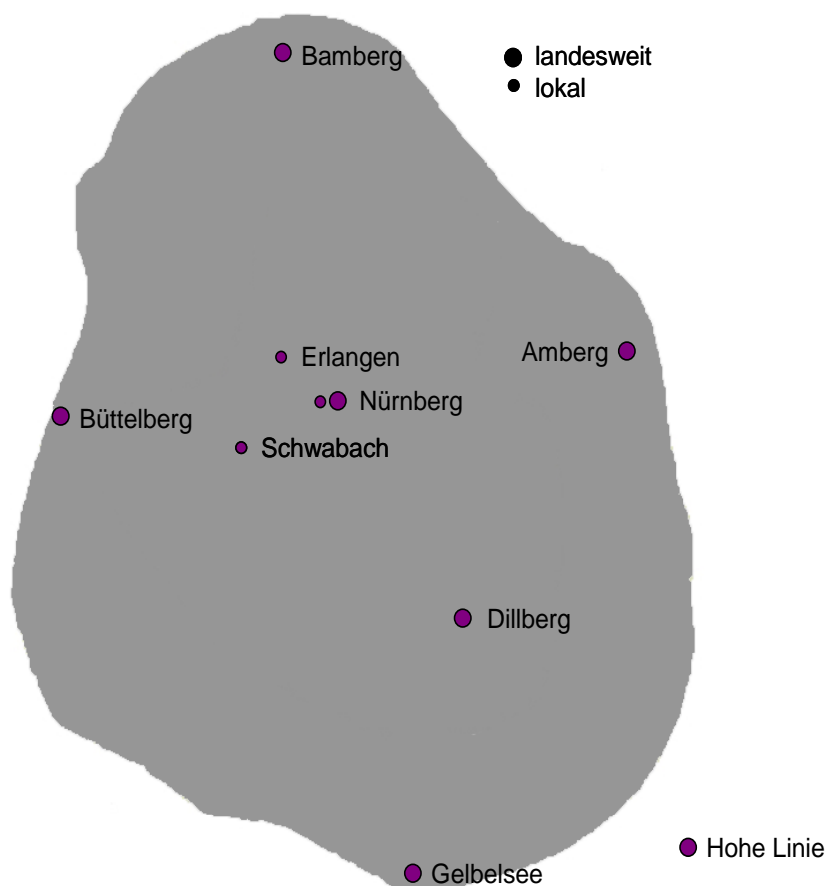


Bild III.4.8: DAB Senderstandorte in der Region Nordbayern

In Tabelle III.4.17 sind die einzelnen Senderstandorte mit den jeweiligen Berechnungsparametern zu sehen.

Senderstandort	Koordinaten		Frequenzen [MHz]	Höhe der Antenne [m]	Mittlere Effektive Höhe [m]	Mittlere Leistung [kW (ERP)] je Frequenz
	Rechtswert [m]	Hochwert [m]				
Amberg	5485631	4500342	229,072	80	305	1,0
Bamberg	5528344	4432619	229,072	114	269	1,0
Büttelberg	5476425	4382304	229,072	180	185	1,0
Dillberg	5465273	4455055	229,072	145	250	1,0
Gelbelsee	5423238	4458191	229,072	110	180	1,0
Nürnberg	5476870	4430284	229,072	259	251	0,5
Hohe Linie	5433473	4512570	229,072	150	222	1,0
Erlangen (lokal)	5494946	4427763	1456,384	51	17	4,0
Nürnberg (lokal)	5476870	4430284	1456,384	291	290	4,0
Schwabach (lokal)	5461073	4426284	1456,384	80	153	4,0

Tabelle III.4.17: Überblick über die betrachteten Senderstandorte in der Region Nordbayern für DAB mit den jeweiligen Berechnungsparametern

In gleicher Weise sind in Bild III.4.9 und Tabelle III.4.17 die Senderstandorte von DAB in der Region Südbayern mit ihren Berechnungsparametern dargestellt.



Bild III.4.9: DAB Senderstandorte in der Region Südbayern

Senderstandort	Koordinaten		Frequenzen [MHz]	Höhe der Antenne [m]	Mittlere Effektive Höhe [m]	Mittlere Leistung [kW (ERP)] je Frequenz
	Rechts- wert [m]	Hochwert [m]				
Augsburg	5361737	4425352	229,072	50	30	1,0
Herzogstand	5274415	4448522	229,072	12	665	0,5
Hochberg	5300489	4548919	229,072	58	150	1,0
Hohenpeißenberg	5296234	4426929	229,072	110	346	1,0
Ismaning	5346238	4480840	229,072	175	173	1,0
Landshut	5376209	4512679	229,072	50	100	1,0
München (Funkhaus)	5333886	4466784	229,072	80	73	1,0
Pfaffenhofen	5378482	4458020	229,072	130	187	1,0
Pfarrkirchen	5363355	4565598	229,072	100	109	1,0
Wendelstein	5284934	4500938	229,072	20	950	0,5
Baierbrunn (lokal)	5361737	4425352	1463,232	50	60	1,0
Freising (lokal)	5363385	4478956	1463,232	54	80	1,0
Fürstenfeldbruck (lokal)	5332877	4442238	1463,232	13	168	1,0
Höhenkirchen (lokal)	5320956	4477399	1463,232	63	120	1,0
München (lokal)	5337473	4466909	1463,232	232	233	1,0
München (lokal)	5337473	4466909	1463,232	292	293	2,0

Tabelle III.4.18: Überblick über die betrachteten Senderstandorte in der Region Südbayern für DAB mit den jeweiligen Berechnungsparametern

Bei den Immissionen von DAB ist wie beim digitalen Fernsehen zu beachten, dass das Sendernetz ein sogenanntes Gleichwellennetz ist. Hierbei werden die Signale von mehreren Standorten aufgeteilt nach landesweiter bzw. lokaler Bedeckung auf der gleichen Frequenz abgestrahlt. Am Empfangsort überlagern sich die Immissionen von diesen Sendern. Die Berechnungen wurden dementsprechend zunächst für jeden digitalen Senderstandort separat durchgeführt. Anschließend wurden die Immissionen an den einzelnen Vergleichspunkten leistungsmäßig addiert. Insofern ist die Anzahl von 181 bzw. 109 der Vergleichspunkte im Gegensatz zu den vorherigen Betrachtungen deutlich reduziert.

Zunächst werden nur die Immissionen der landesweiten Bedeckung betrachtet. In Tabelle III.4.18 sind hierzu die mittlere Abweichung und die prozentuale Überbewertung über alle Vergleichspunkte und alle Konfigurationen aufgeteilt nach den bereits bekannten zwei Berechnungsarten zu sehen.

Konfiguration	Korrektur	Anzahl der Punkte	Mittlere Abweichung in [dB]	Anzahl der Punkte in [%] mit einer Überbewertung
alle	ja	181	16,5	5,0
alle	nein	181	9,1	77,8

Tabelle III.4.19: Auswertung der Vergleiche zwischen Messung und Berechnung für DAB, landesweite Bedeckung

Auch die Optimierung bezüglich der mittleren Abweichung wird anhand der jeweiligen Konfigurationen in bekannter Weise durchgeführt. Hierzu wird ein Zuschlag auf den berechneten Wert gesucht, durch den die mittlere Abweichung minimiert wird. Die Resultate sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Konfiguration	Korrektur	Anzahl der Punkte	Mittlere Abweichung in [dB] (ohne Zuschlag)	Zuschlag in [dB]	Mittlere Abweichung in [dB] (inklusive Zuschlags)
Gesamt	ja	181	16,5	jeweilig	7,3
Stadt, dicht	ja	27	19,6	15	5,8
Stadt	ja	33	17,7	15	5,5
Vorstadt	ja	53	14,0	8	7,0
Land, offen	ja	68	15,2	10	8,5

Tabelle III.4.20: Optimierung der mittleren Abweichung; Auswertung der Immissionsberechnungen für DAB inklusive eines Zuschlags; landesweite Bedeckung

Der Vergleich von Berechnung und Messung der Immissionen von DAB in der landesweiten Bedeckung hat gezeigt, dass durch die Berücksichtigung eines Zuschlags in Abhängigkeit der vorliegenden Konfiguration die mittlere Abweichung von 16,5 auf 7,3 dB verbessert werden konnte. Der prozentuale Anteil der Vergleichspunkte, deren Abweichung vor dem Hintergrund der Messunsicherheit innerhalb eines Bereichs von ± 3 dB liegt beträgt in diesem Fall 80 %. Die übrigen 20 % der Vergleichspunkte weisen zum Beispiel wie schon bekannt in ihrer geographischen Lage begründet zum Teil hohe Über- bzw. Unterbewertungen auf, wodurch die relativ hohe mittlere Abweichung begründet ist. Vor diesem Hintergrund kann

noch unterstützend hinzugefügt werden, dass die mittlere Abweichung für Punkte, die in ebenem Gelände liegen, um gut 2 dB besser war als für Punkte in bergigem Terrain.

Die Optimierungsergebnisse bezüglich einer maximalen prozentualen Überbewertung sind in Tabelle III.4.21 zu sehen.

Konfiguration	Korrek.	Anzahl d. Paare	Anz. Punkte m. Überbew. in [%]	Max. Unterbew. in [dB] (o. Zuschlag)	Zuschlag in [dB]	res. Anz. Punkte m. Überbew. in [%]	Max. Unterbew. in [dB] (m. Zuschlag)
Gesamt	nein	181	77,8	13,8	jeweilig	93,3	2,9
Stadt, dicht	nein	27	88,9	4,9	2	92,6	2,9
Stadt	nein	33	78,8	3,1	1	84,8	2,1
Vorstadt	nein	53	75,5	8,6	6	94,3	2,6
Land, offen	nein	68	74,6	13,8	11	97,0	2,8

Tabelle III.4.21: Worst Case-Ansatz; Auswertung für DAB inklusive eines Zuschlags; landesweite Bedeckung

Aus obiger Tabelle wird ersichtlich, dass die prozentuale Überbewertung unter Berücksichtigung eines Zuschlags zu den Berechnungsergebnissen gesteigert werden konnte. Die maximale Unterbewertung liegt hierbei im Bereich der Messunsicherheit. An dieser Stelle sei aber angemerkt, dass die mittlere Abweichung durch diese Vorgehensweise bedingt stark ansteigt und einen Wert von knapp 18 dB aufweist.

Das Berechnungsverfahren ohne Berücksichtigung einer Korrektur und inklusive eines Zuschlags für Immissionen von DAB für die landesweite Bedeckung kann als Worst Case Verfahren betrachtet werden.

In gleicher Art und Weise stehen nun die Betrachtungen für DAB in der lokalen Bedeckung im Mittelpunkt. Zunächst ist in Tabelle III.4.22 wiederum die Auswertung über alle Vergleichspaare und Konfigurationen zu sehen.

Konfiguration	Korrektur	Anzahl der Paare	Mittlere Abweichung in [dB]	Anzahl der Punkte in [%] mit einer Überbewertung
alle	ja	109	15,7	8,9
alle	nein	109	20,2	95,6

Tabelle III.4.22: Auswertung der Vergleiche zwischen Messung und Berechnung für DAB, lokale Bedeckung

In Tabelle III.4.23 ist in gewohnter Form die Optimierung auf eine möglichst minimale mittlere Abweichung dargestellt.

Konfiguration	Korrektur	Anzahl der Punkte	Mittlere Abweichung in [dB] (ohne Zuschlag)	Zuschlag in [dB]	Mittlere Abweichung in [dB] (mit Zuschlag)
Gesamt	ja	109	15,7	jeweilig	7,8
Stadt, dicht	ja	25	19,1	13	8,1
Stadt	ja	24	13,8	11	4,8
Vorstadt	ja	36	11,6	7	6,2
Land, offen	ja	24	12,3	4	11,6

Tabelle III.4.23: Abweichung; Auswertung für DAB inklusive eines Zuschlags; lokale Bedeckung

Wie auch schon bei den vorangegangenen Betrachtungen konnte die mittlere Abweichung durch einen der Konfiguration entsprechenden Zuschlag deutlich verbessert werden. Der prozentuale Anteil der Vergleichspunkte, deren Abweichung vor dem Hintergrund der Messunsicherheit innerhalb eines Bereichs von ± 3 dB liegt beträgt 83 %. Die übrigen 17 % der Vergleichspunkte weisen zum Beispiel wie schon bekannt in ihrer geographischen Lage begründet zum Teil hohe Über- bzw. Unterbewertungen auf.

Die Ergebnisse der Optimierung auf einen möglichst großen prozentualen Wert bezüglich einer Überbewertung sind in folgender Tabelle zu sehen

Konfiguration	Korrek.	Anzahl d. Punkte	Anz. Punkte m. Überbew. in [%]	Max. Unterbew. in [dB] (o. Zuschlag)	Zuschlag in [dB]	res. Anz. Punkte m. Überbew. in [%]	Max. Unterbew. in [dB] (m. Zuschlag)
Gesamt	nein	112	95,6	-8,3	jeweilig	97,4	2,3
Stadt, dicht	nein	25	96,0	-1,1	0	96,0	1,1
Stadt	nein	24	100,0	0	0	100,0	0
Vorstadt	nein	36	97,2	-0,3	0	97,2	0,3
Land, offen	nein	24	88,5	-8,3	6	96,2	2,3

Tabelle III.4.24: Worst Case Ansatz; Auswertung für DAB inklusive eines Zuschlags; lokale Bedeckung

Aus obiger Tabelle wird ersichtlich, dass die prozentuale Überbewertung unter Berücksichtigung eines Zuschlags zu den Berechnungsergebnissen gesteigert werden konnte. Auffällig ist, dass in drei der vier Konfigurationen keine Zuschläge angegeben sind, was daran liegt, dass die maximale Unterbewertung auch ohne Zuschlag bereits im Bereich der Messunsicherheit lag. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass die Anzahl der Vergleichspunkte im Gegensatz zu den vorangegangenen betrachteten Systemen viel geringer ist. Darüber hinaus spielt hier auch noch die Tatsache hinein, dass sich die DAB Übertragungen im L-Band auf Ballungszentren konzentrieren und somit die Abstände zum Senderstandort geringer ausfallen als bei den anderen betrachteten Systemen.

Der Vollständigkeit halber sei hier aber noch angemerkt, dass die mittlere Abweichung durch diese Vorgehensweise bedingt stark ansteigt und einen Wert von gut 20 dB aufweist.

Das Berechnungsverfahren ohne Berücksichtigung einer Korrektur und inklusive eines Zuschlags für Immissionen von DAB im Bereich des L-Bandes kann als Worst Case Verfahren angesehen werden.

III.4.5 Immissionen in der Senderumgebung

Im Folgenden Abschnitt werden die Immissionen in der direkten Senderumgebung näher betrachtet. Da bis zu einer Entfernung von 1 km bei FPT mit reiner Freiraumausbreitung ausschließlich unter Verwendung des horizontalen Abstrahldiagramms gerechnet wird, ist infolgedessen mit deutlichen Überbewertungen der Immission zu rechnen (vgl. Abschnitt II.2.2 bzw. II.3.4). Hierzu wird zunächst überprüft, in wie weit ein geeignet gewählter Abschlag in diesem Bereich sinnvoll ist.

Darüber hinaus werden Immissionsvergleiche zwischen Berechnungen und Messungen durchgeführt, bei denen die Vergleichspunkte auf radial verlaufenden Linien ausgehend von einem Senderstandort verteilt sind. In Bild III.4.10 sind zwei derartige Linien exemplarisch für den Senderstandort Dillberg dargestellt. Anhand der Messpunkte wird erkennbar, dass die Verteilung exakt auf einer Linie z.B. aufgrund von eingeschränkter Erreichbarkeit nur begrenzt zu erreichen war.

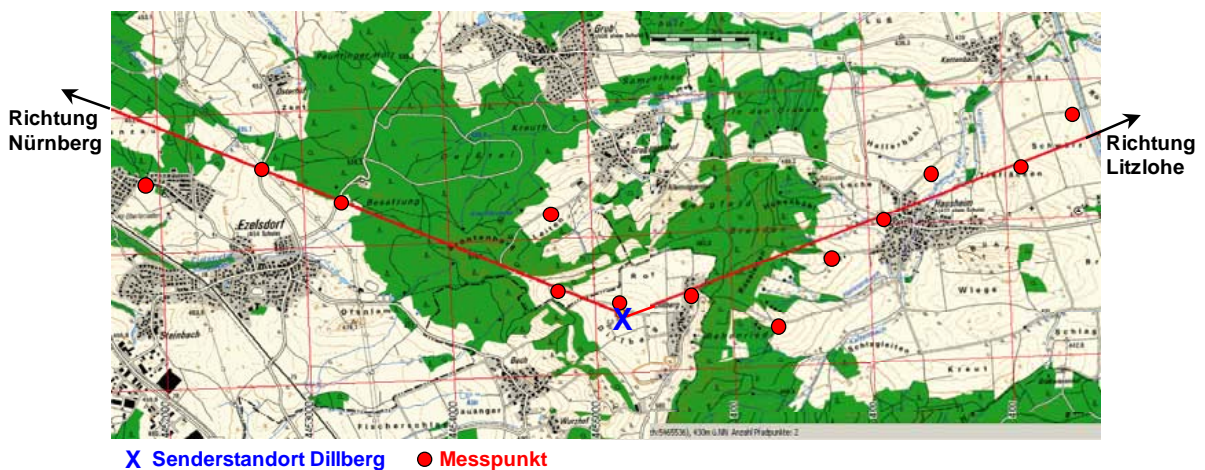


Bild III.4.10: Senderstandort Dillberg mit Messpunkten auf radial verlaufenden Linien

III.4.5.1 Bestimmung eines Abschlagswertes

Die Berechnungen bis zu einem Abstand von 1 km vom Sender haben vermutlich (vgl. Abschnitt II.3.4) die Konsequenz, dass mit deutlichen Überbewertungen der prognostizierten Immission in diesem Bereich zu rechnen ist. Hierzu werden im Folgenden Messungen in der direkten Umgebung vom Senderstandort mit entsprechenden Berechnungen verglichen. Anschließend kann hieraus geschlossen werden, in wie weit ein geeignet gewählter Abschlag eine Immissionsüberbewertung reduzieren kann. Bei allen für den Vergleich herangezogenen Punkten lag direkte Sichtverbindung zum jeweiligen Sender vor.

Zunächst wird der Senderstandort Dillberg näher betrachtet. Wie in Bild III.4.11 zu sehen, kann der betrachtete Bereich bis 1 km Entfernung zum Sender mit einer ländlich geprägten Umgebung und entsprechend geringer Mehrwegeausbreitung charakterisiert werden.

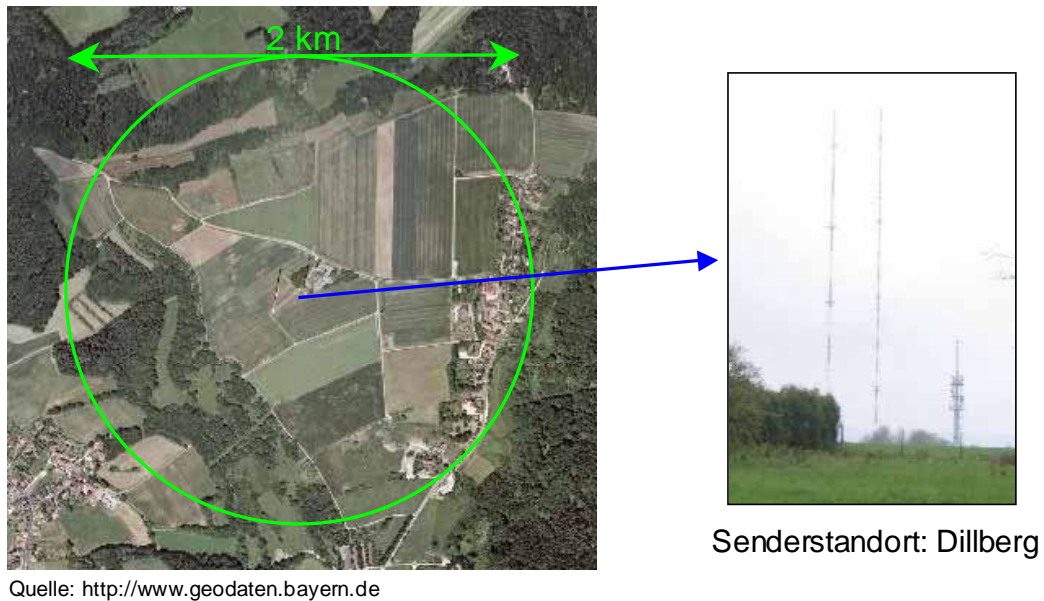


Bild III.4.11: Nahbereich vom Senderstandort Dillberg

In diesem Bereich werden die berechneten Immissionen an drei im unterschiedlichen Abstand zum Sender befindlichen Punkten getrennt nach Analog-TV, DVB-T, UKW und DAB mit den entsprechenden Messwerten verglichen. Bei DVB-T und DAB ist der Vollständigkeit halber noch folgender Sachverhalt zu erwähnen. Da beide Rundfunkdienste auf einem Gleichwellennetz beruhen, überlagern sich die Signale von mehreren Senderstandorte an einem Punkt und eine exakte Zuordnung der Immission zu einem Sender ist daher generell nicht möglich. Die gemessene Immission wird dennoch nur dem Dillberg zugeordnet, da dessen Anteil aufgrund des geringen Abstandes gegenüber den restlichen Standorten dominiert. Dies wurde anhand von Berechnungen untermauert.

Die resultierenden Abweichungen (Differenz zwischen Berechnung und Messung) sind im folgenden Bild zu sehen. Jeder Balken entspricht hierbei einem Sendekanal bzw. einer vom Senderstandort Dillberg abgestrahlten Frequenz.

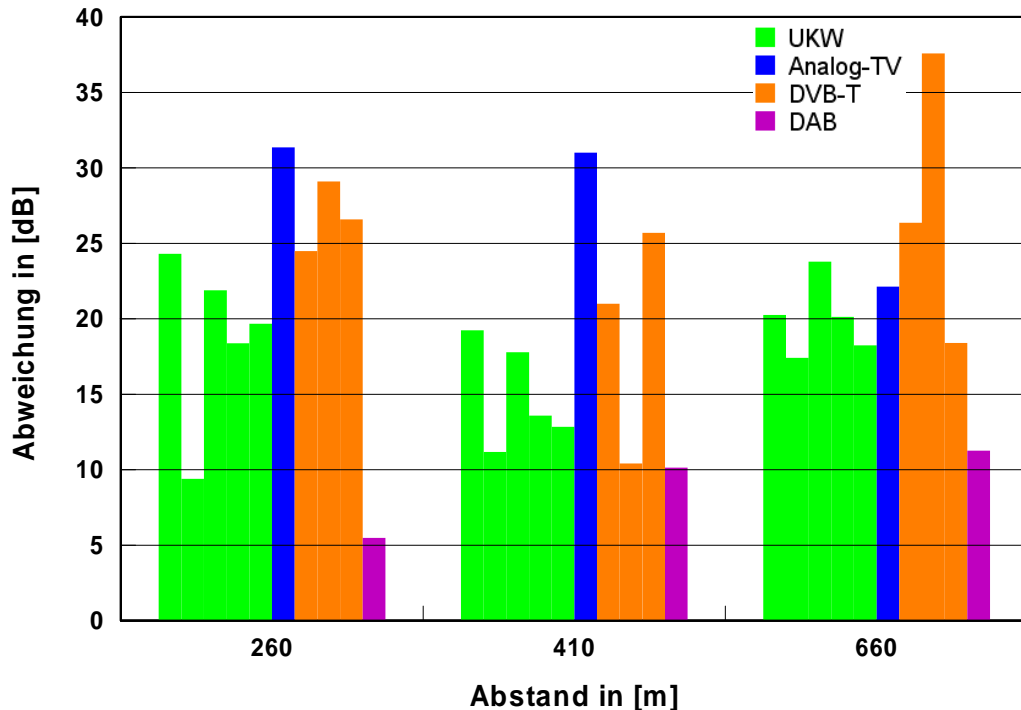


Bild III.4.12: Abweichungen zwischen Berechnung und Messung im Bereich bis zu einem Kilometer vom Senderstandort Dillberg

Das obige Bild zeigt die programmbedingt bereits vermutete Überbewertung der Immissionen in der direkten Umgebung des Senderstandortes. Hieraus lassen sich in Analogie zu den in den vorangegangenen Abschnitten eingeführten zwei Berechnungsmethoden „Optimierte mittlere betragsmäßige Abweichung“ und „Worst Case Betrachtung“ für das jeweilige System typische Abschlagswerte für den Bereich bis 1 km vom Sender ermitteln. Einerseits wurde also derjenige Abschlagswert auf alle berechneten Immissionen für das jeweilige System gesucht, bei dem sich ein globaler Minimumwert für die mittlere Abweichung ergab. Andererseits wurde derjenige Abschlagswert gesucht, für den alle berechneten Immissionswerte unter Berücksichtigung der Messunsicherheit oberhalb des messtechnisch bestimmten Wertes lag.

Diese sind in Tabelle III.4.24 dargestellt.

System	Abschlag für die Berechnungsart „Optimierte mittlere Abweichung“ (im Bereich bis 1 km vom Sender)	Abschlag für die Berechnungsart „Worst Case“ (im Bereich bis 1 km vom Sender)
UKW	15	10
Analog-TV	25	10
DVB-T	15	10
DAB	10	5

Tabelle III.4.25: Bestimmung eines Abschlages für die Berechnung bis zu einem Kilometer Entfernung vom Senderstandort

Hieran anknüpfend steht nun der Sendestandort Nürnberg-Fernmeldeturm im Mittelpunkt. Wie in folgendem Bild zu sehen, kann der betrachtete Bereich bis 1 km Entfernung zum Sender

mit einer städtisch geprägten Umgebung und entsprechend höherem Potenzial für Mehrwegeausbreitung charakterisiert werden.

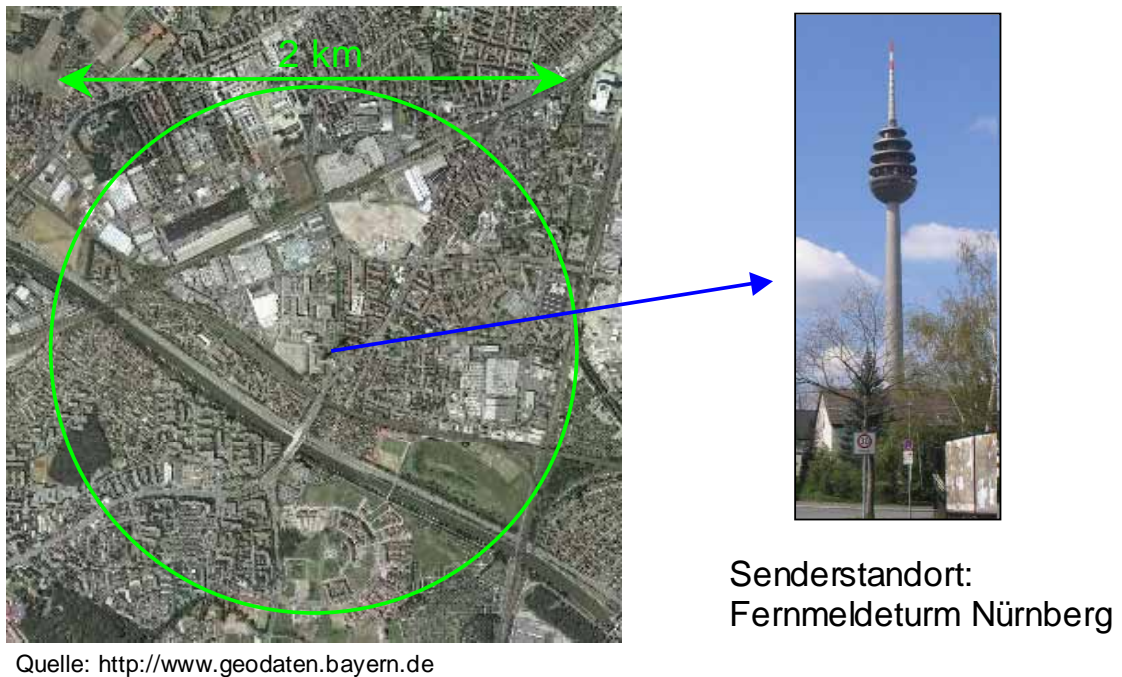


Bild III.4.13: Nahbereich vom Senderstandort Fernmeldeturm Nürnberg

Wie schon beim Dillberg wurden in diesem Bereich Vergleichspunkte in unterschiedlichen Abständen zum Sender platziert. Die resultierenden Abweichungen in Form von Differenz zwischen Berechnung und Messungen sind in Bild III.4.14 dargestellt. Jeder Balken entspricht hier wiederum einem Kanal bzw. einer abgestrahlten Frequenz.

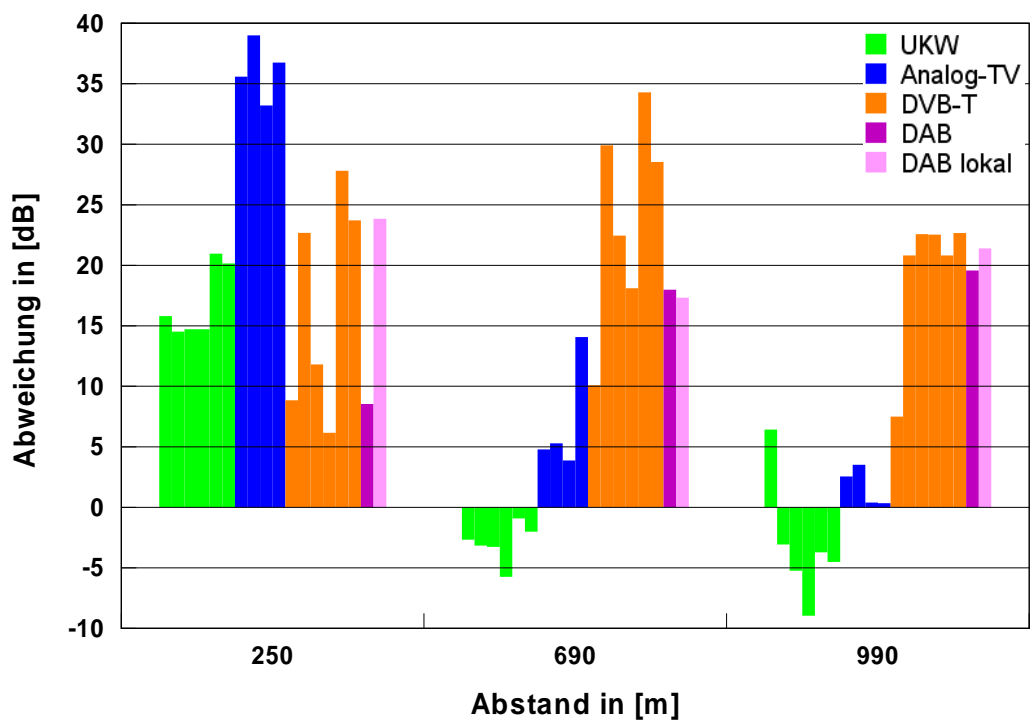


Bild III.4.14: Abweichungen zwischen Berechnung und Messung im Bereich bis zu einem Kilometer vom Senderstandort Nürnberg-Fernmeldeturm

Das Bild III.4.14 zeigt, dass die Ergebnisse nicht so eindeutig sind wie es beim Senderstandort Dillberg der Fall war. Insofern ist es schwierig, einen allgemeingültigen Abschlag für eine derartige Konfiguration abzuleiten.

Anhand der Ergebnisse macht für den hier vorliegenden Fall eine Unterteilung des Bereichs bis 500 m und größer als 500 m Sinn. Da im Folgenden der hier betrachtete Senderstandort auch für die Linienmessungen untersucht wird, können vor diesem Hintergrund folgende Abschlagswerte, die in gleicher Art und Weise wie im vorherigen Beispiel bestimmt wurden, (siehe Tabelle III.4.5) angenommen werden.

System	Abschlag für die Berechnungsart „Optimierte mittlere Abweichung“		Abschlag für die Berechnungsart „Worst Case“	
	0 – 0,5 km	0,5 – 1 km	0 – 0,5 km	0,5 – 1 km
UKW	17	-3	14	-8
Analog-TV	35	6	30	0
DVB-T	17	20	7	15
DAB	4	19	5	15
DAB lokal	12	19	20	15

Tabelle III.4.26: Bestimmung eines Abschlags für die Berechnung bis zu einem Kilometer Entfernung vom Senderstandort Nürnberg-Fernmeldeturm

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass ein Abschlag auf die berechneten Immissionen im Bereich bis 1 km Entfernung zum Senderstandort in einer ländlichen Umgebung durchaus sinnvoll ist. Die Untersuchungen im Bereich eines Senders in einer städtischen Umgebung mit einem hohen Potenzial an Mehrwegeausbreitung hat gezeigt, dass für eine derartige Konfiguration kein allgemeingültiger Faktor abgeleitet werden kann.

III.4.5.2 Linienmessungen in Nordbayern

Im Folgenden werden die Messergebnisse auf radial verlaufenden Linien ausgehend von einem Senderstandort mit entsprechend rechentechnisch prognostizierten Werten unter der Berücksichtigung der in den vorangegangenen Abschnitten getroffenen Aussagen verglichen. In Bild III.4.15 sind zwei Linien für die Region Nordbayern schematisch dargestellt.

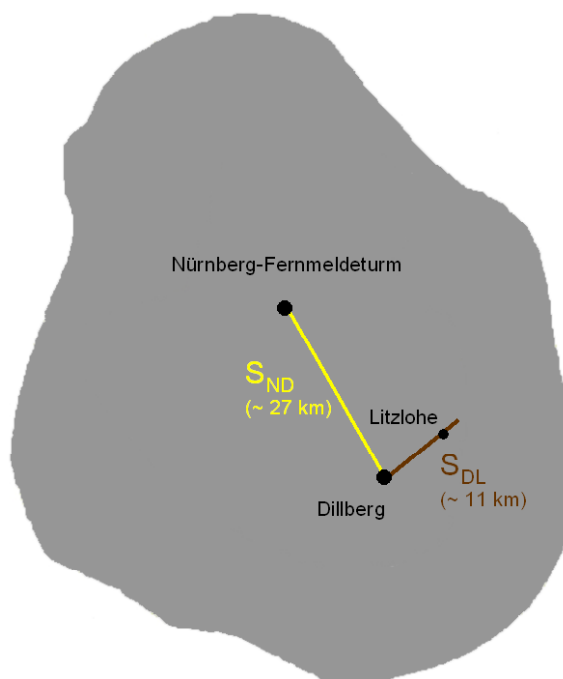


Bild III.4.15: Linienmessungen in Nordbayern

Zunächst wird die Linie S_{DL} ausgehend vom Senderstandort Dillberg betrachtet. Die zugehörigen Vergleichspunkte mit den entsprechenden Koordinaten, Korrekturen und dem zugehörigen lateralen Abstand sind in folgender Tabelle zu sehen.

Messpunkt	Koordinaten		Korrektur	lateraler Abstand In [km]
	Hochwert	Rechtswert		
S _{DL} 01	5465493	4455183	Land, offen	0,25
S _{DL} 02	5465498	4455674	Land, offen	0,66
S _{DL} 03	5465334	4456318	Land, offen	1,26
S _{DL} 04	5465801	4456834	Land, offen	1,86
S _{DL} 05	5466070	4457058	Land, offen	2,16
S _{DL} 06	5466299	4457352	Land, offen	2,52
S _{DL} 07	5466398	4458110	Land, offen	3,26
S _{DL} 08	5466781	4458550	Land, offen	3,81
S _{DL} 09	5466747	4458961	Land, offen	4,17
S _{DL} 10	5466387	4460179	Land, offen	5,24
S _{DL} 11	5467367	4460654	Land, offen	5,98
S _{DL} 12	5467543	4461982	Land, offen	7,29
S _{DL} 13	5467904	4462711	Land, offen	8,10
S _{DL} 14	5468346	4463498	Land, offen	8,98
S _{DL} 15	5468915	4465195	Land, offen	10,77

Tabelle III.4.27: Messpunkte und Abstände für die Linienmessung Dillberg - Litzlohe

Die für den Immissionsvergleich durchgeführten Berechnungen sind wie schon aus den vorangegangenen Abschnitten bekannt aufgeteilt in „optimierte mittlere Abweichung“ und „Worst Case Ansatz“. Sowohl die konfigurationsabhängigen Zuschläge wie auch die Abschläge bis zu einem Abstand von einem Kilometer (siehe Tabelle III.4.25) wurden jeweils berücksichtigt. Die folgenden zwei Bilder enthalten die Ergebnisse für den analogen Fernsehkanal 6 und exemplarisch für einen UKW-Kanal, die beide vom Dillberg abgestrahlt werden.

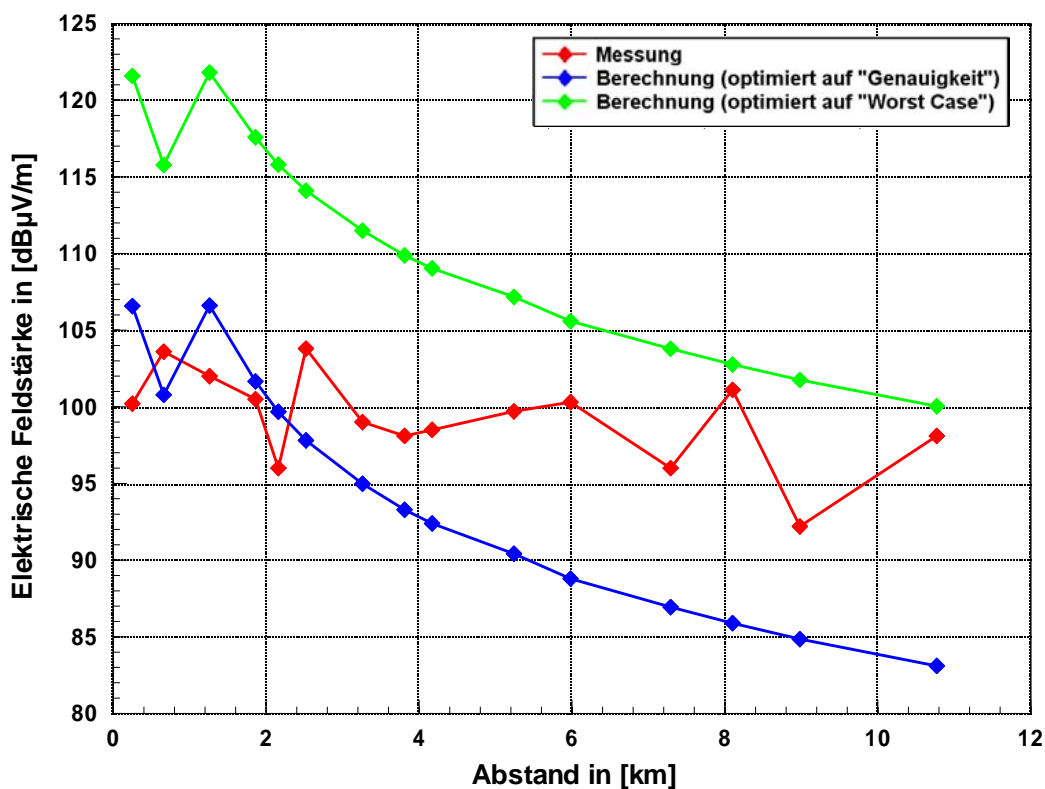


Bild III.4.16: Vergleich zwischen Messung und Berechnung, Linienmessung vom Dillberg Richtung Litzlohe, Analoges Fernsehen, Kanal 6

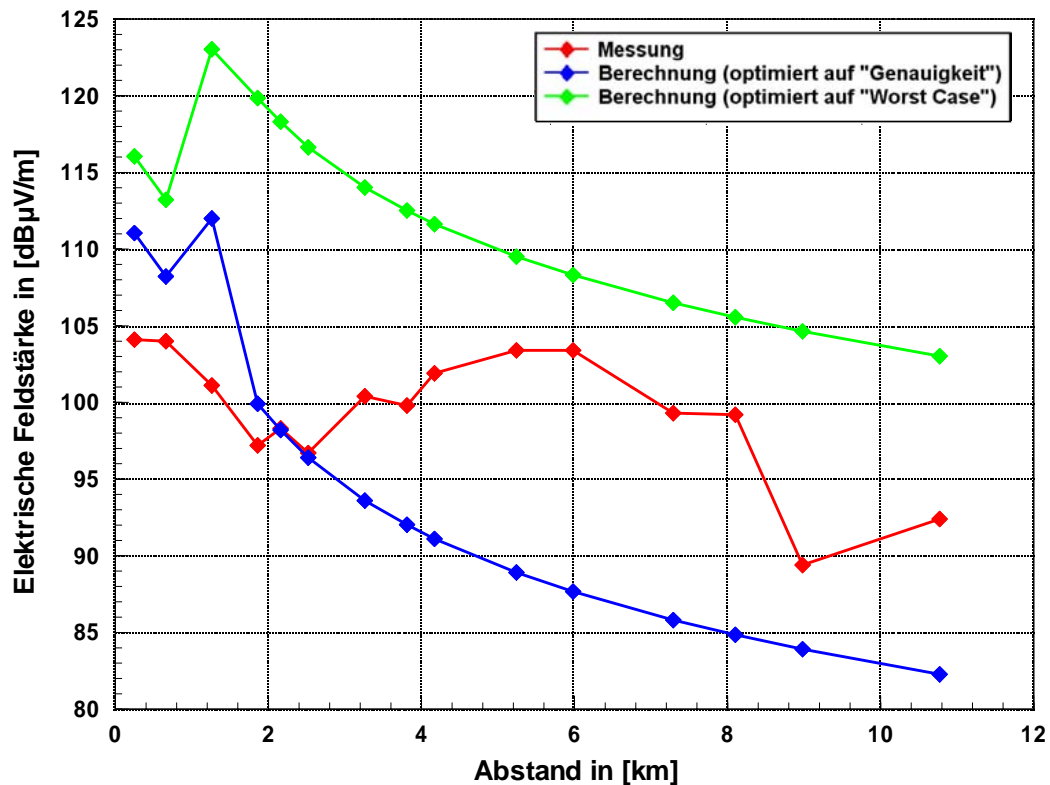


Bild III.4.17: Vergleich zwischen Messung und Berechnung, Linienmessung vom Dillberg Richtung Litzlohe, UKW

Die beiden vorangegangenen Bilder zeigen folgende Ergebnisse

- Die Berechnungsmethode „Optimierte mittlere Abweichung“ gibt etwa bis zu einer Entfernung von 4 km eine genauere Prognose, unterbewertet dann den gemessenen Wert aber zum Teil deutlich
- Die Worst Case Berechnung überbewertet die gemessene Immission an allen Punkten.

Sowohl die Ergebnisse vom analogen Fernsehen als auch von UKW zeigen einen ähnlichen Verlauf. Auffällig ist der Anstieg der gemessenen Immission ab einer Entfernung von ungefähr 4 km. Eine Erklärung hierfür liefert der Höhenverlauf entlang der Linie vom Dillberg in Richtung Litzlohe (siehe Bild III.4.18).

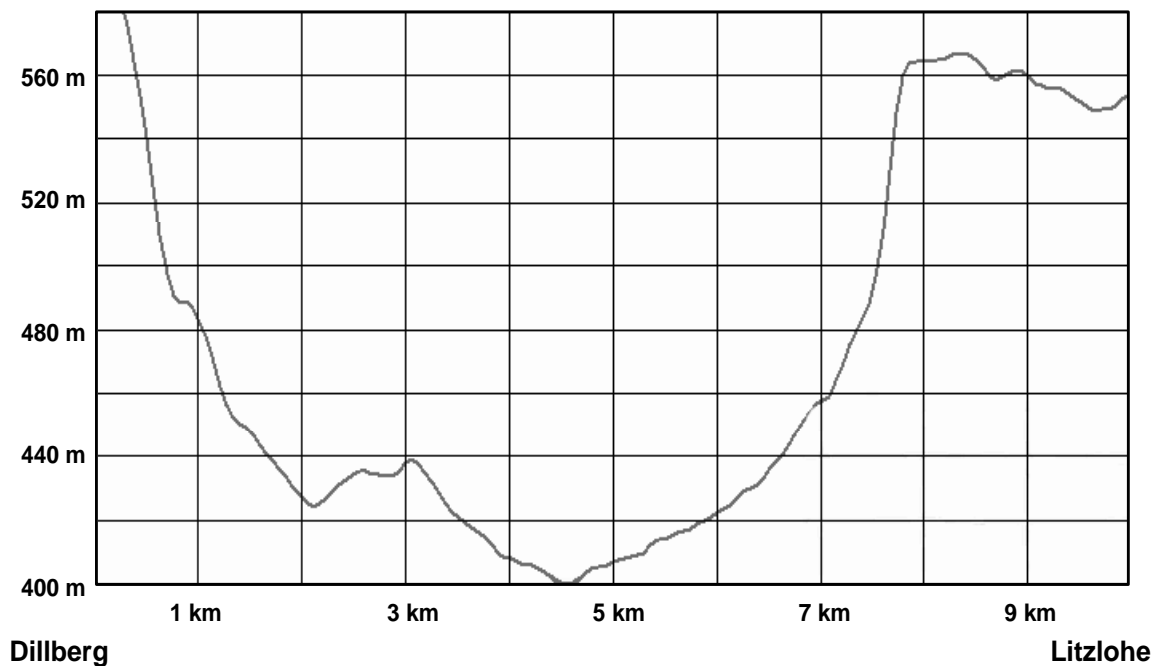


Bild III.4.18: Höhenverlauf vom Dillberg Richtung Litzlohe

Der Höhenverlauf korrespondiert gut mit den gemessenen Immissionswerten. Ab einer Entfernung von 4 - 5 km steigt das Gelände an und der Höhenunterschied zwischen Senderstandort und Messpunkt wird verringert. Der Geländeverlauf spiegelt demnach eine Konfiguration wieder, bei der das einfache Programm FPT an seine Grenzen stößt. Dies liegt darin begründet, dass in die Berechnung lediglich ein Parameter – die mittlere effektive Höhe – zur Darstellung des Geländes verwendet wird.

Als Ergebnis kann an dieser Stelle zunächst einmal festgehalten werden, dass gerade die Methode „Optimierte mittlere Abweichung“ bei derartigen Konfigurationen an ihre Grenzen stößt und mit deutlichen Unterbewertungen zu rechnen ist.

Im Folgenden werden die Immissionen entlang der Linie S_{ND} betrachtet, der zwischen den Senderstandorten Dillberg und dem Fernmeldeturm in Nürnberg verläuft. Hervorzuheben ist hierbei, dass beide Endpunkte dieser Linie Senderstandorte darstellen, so dass Vergleiche der Immissionen ausgehend von beiden Sendern betrachtet werden können. Die folgende Tabelle enthält die jeweiligen Messpunkte mit den entsprechenden Koordinaten. Die Abstände sind ausgehend vom Senderstandort in Nürnberg dargestellt.

Messpunkt	Koordinaten		Korrektur	lateraler Abstand in [km]
	Hochwert	Rechtswert		
S _{ND} 01	5477076	4430426	Abschlag	0,25
S _{ND} 02	5476743	4430965	Abschlag	0,69
S _{ND} 03	5476703	4431260	Abschlag	0,99
S _{ND} 04	5476520	4432056	Stadt, nah	1,81
S _{ND} 05	5476177	4432784	Stadt, nah	2,59
S _{ND} 06	5475586	4433220	Stadt	3,20
S _{ND} 07	5474861	4434835	Stadt	4,97
S _{ND} 08	5473518	4436990	Vorstadt	7,50
S _{ND} 09	5471446	4442252	Vorstadt	13,14
S _{ND} 10	5469820	4445780	Vorstadt	17,02
S _{ND} 11	5468993	4447813	Vorstadt	19,22
S _{ND} 12	5467986	4450136	Vorstadt	21,75
S _{ND} 13	5466695	4451041	Land, offen	23,12
S _{ND} 14	5466478	4451810	Land, offen	23,90
S _{ND} 15	5466489	4452706	Land, offen	24,71
S _{ND} 16	5466201	4453184	Land, offen	25,26
S _{ND} 17	5466291	4454904	Land, offen	26,80
S _{ND} 18	5465621	4454834	Land, offen	27,00
S _{ND} 19	5465493	4455183	Land, offen	27,37

Tabelle III.4.28: Vergleichspunkte für die Linienmessung von Nürnberg zum Dillberg

Die für den Immissionsvergleich durchgeführten Berechnungen sind wie schon in den vorangegangenen Abschnitten aufgeteilt in die zwei bekannten Arten. Sowohl die konfigurationsabhängigen Zuschläge wie auch die Abschläge bis zu einem Abstand von einem Kilometer (siehe Tabelle III.4.26) wurden jeweils berücksichtigt.. Die folgenden zwei Bilder enthalten die Ergebnisse für den analogen Fernsehkanal 6 und exemplarisch für einen UKW-Kanal, die beide vom Dillberg abgestrahlt werden.

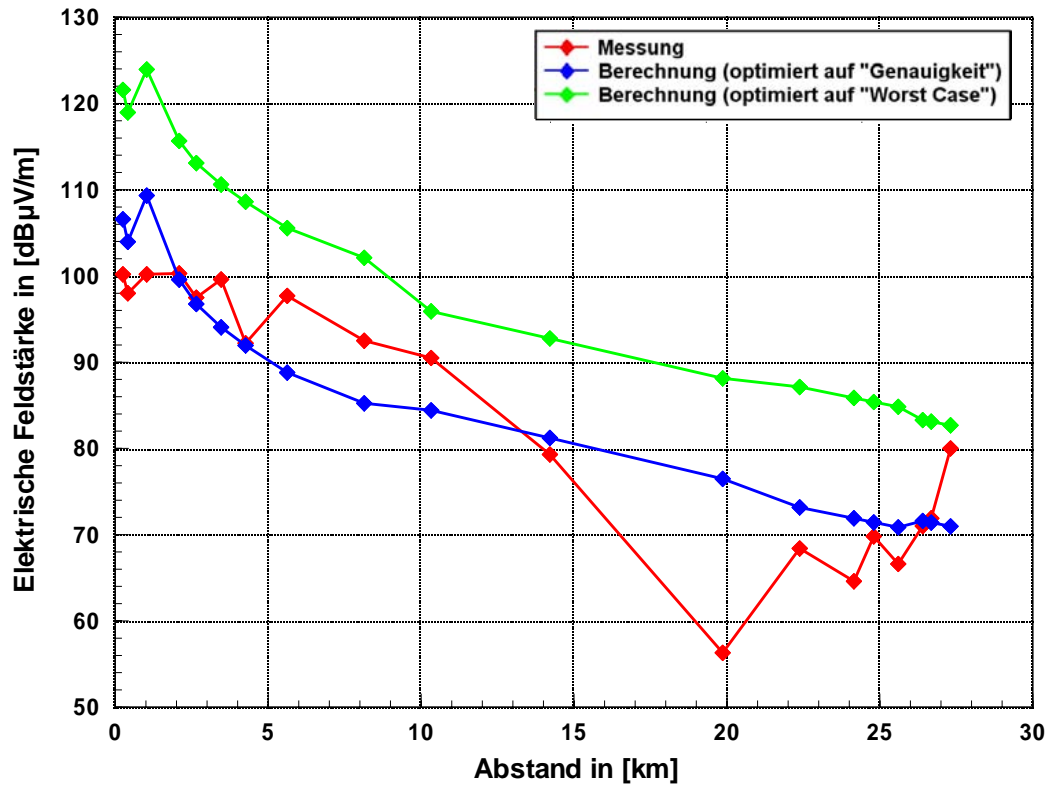


Bild III.4.19: Feldstärkeverlauf zwischen Dillberg und Nürnberg, Analoges Fernsehen, Kanal 6

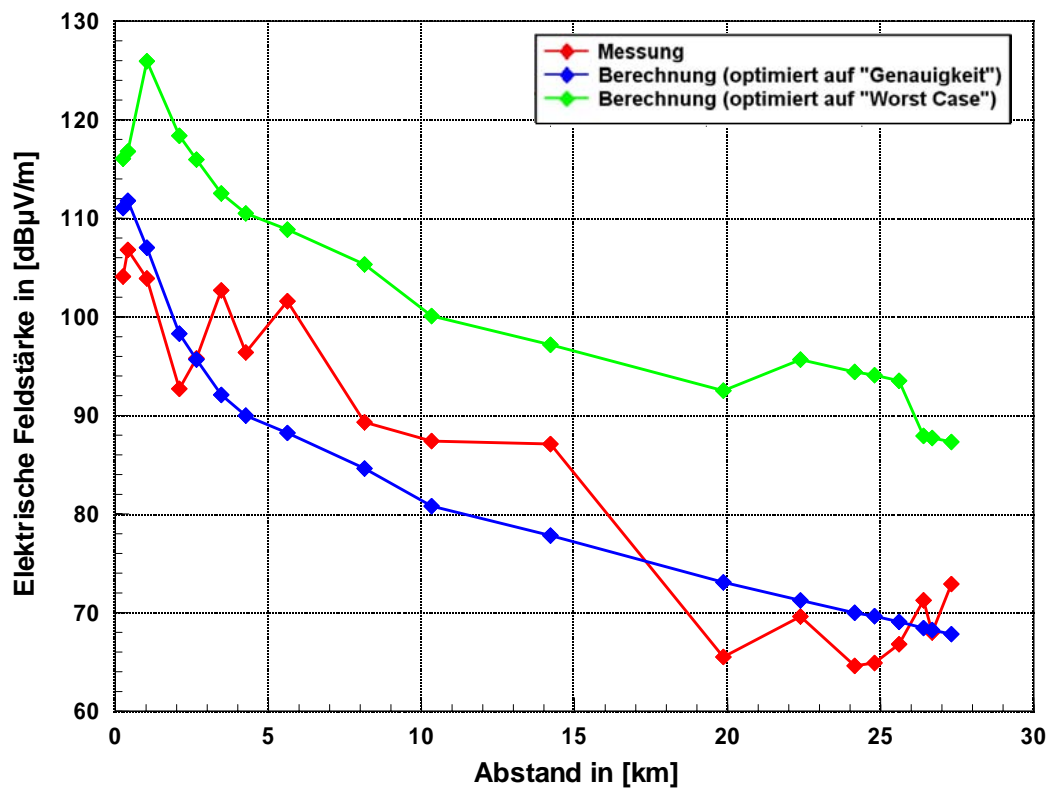


Bild III.4.20: Feldstärkeverlauf zwischen Dillberg und Nürnberg, UKW

Die beiden vorangegangenen Bilder zeigen folgende Ergebnisse

- Die Berechnungsmethode „Optimierte mittlere Abweichung“ gibt eine genauere Prognose, Unterschätzungen zum Messwert sind aber möglich
- Wiederum überbewertet die Worst Case Berechnung die gemessene Immission an allen Punkten.

Im Folgenden werden die Rundfunkdienste betrachtet, die auf dem Fernmeldeturm in Nürnberg installiert sind. Exemplarisch sind hierzu ein UKW-Kanal und das lokale DAB in den folgenden zwei Bildern dargestellt.

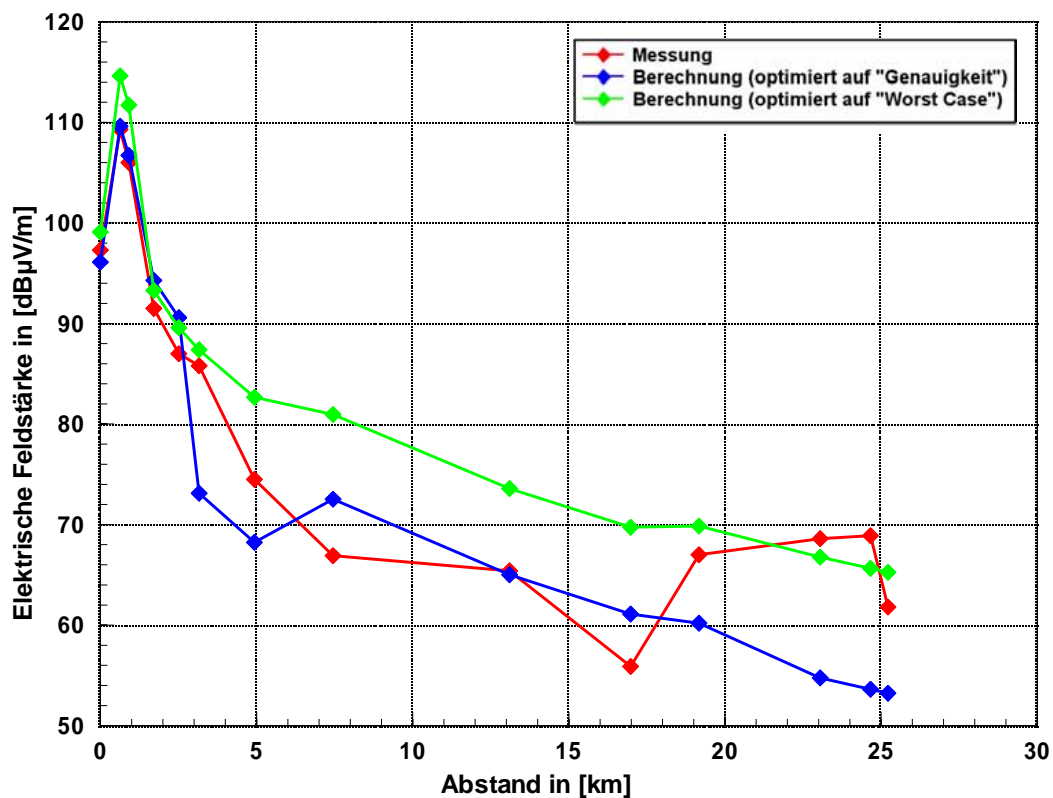


Bild III.4.21: Feldstärkeverlauf von Nürnberg-Fernmeldeturm zum Dillberg, UKW

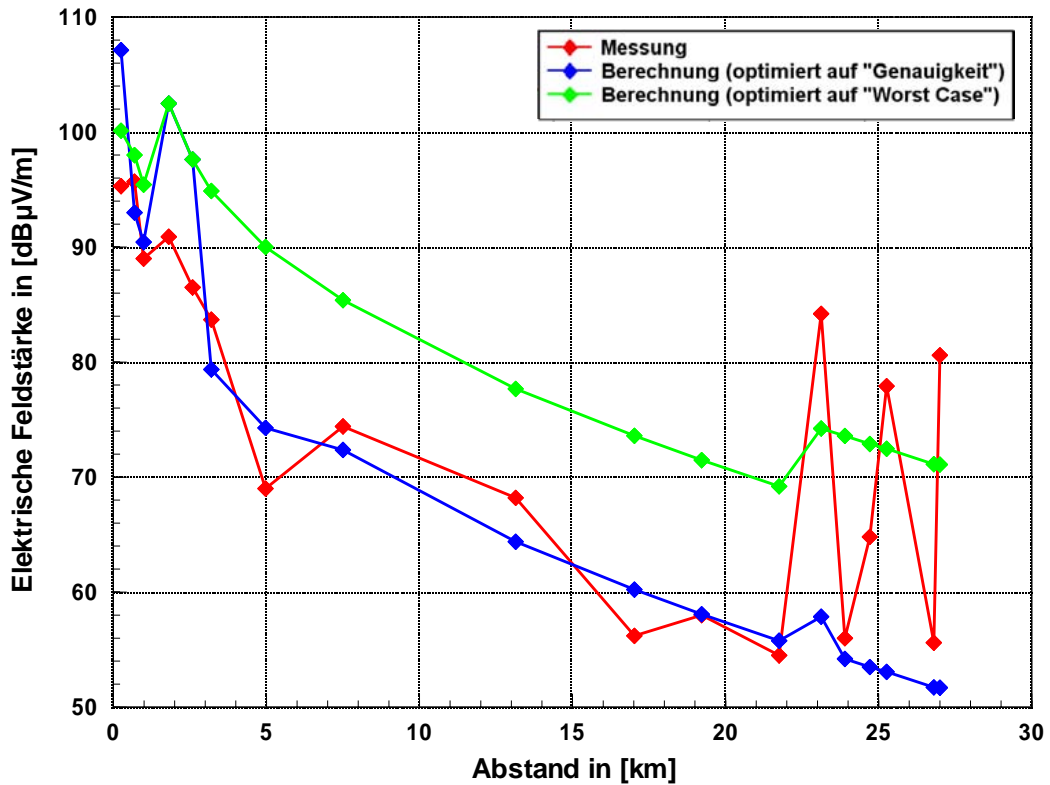


Bild III.4.22: Feldstärkeverlauf von Nürnberg-Fernmeldeturm zum Dillberg, DAB, lokal

Auffällig sind die deutlichen Feldstärkesteigerungen ab einer Entfernung von ungefähr 20 km zum Senderstandort Nürnberg. Diese liegen im Höhenprofil auf dieser Wegstrecke begründet. Wie aus Bild III.4.23 zu erkennen ist, steigt das Bodenprofil ab einer Entfernung von ungefähr 20 km zum Dillberg gesehen stark an.

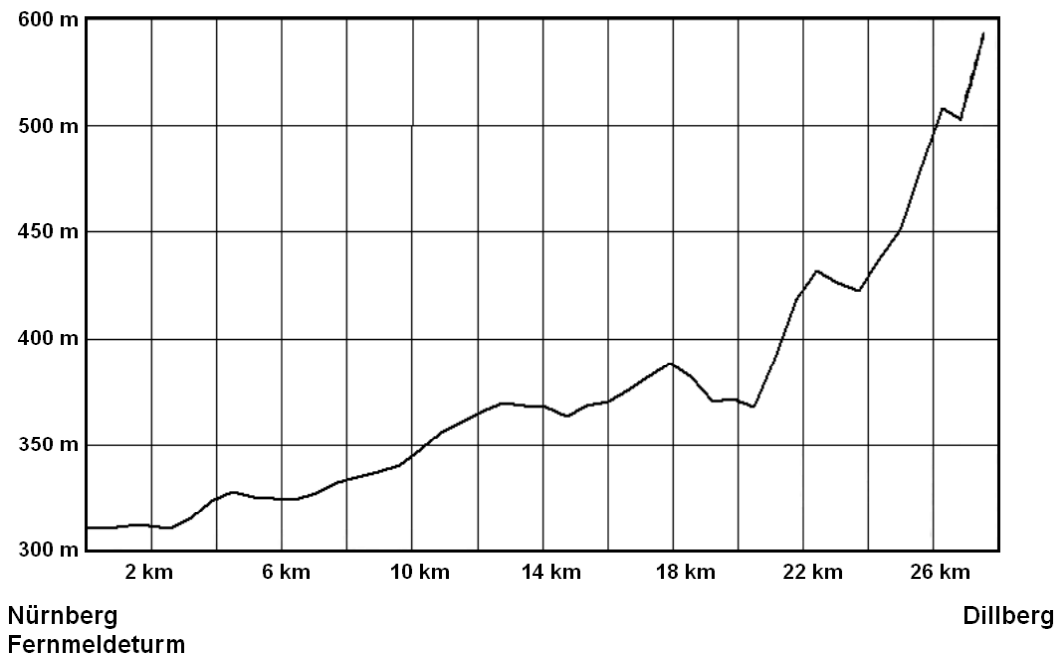


Bild III.4.23: Höhenverlauf von Nürnberg zum Dillberg

Die beiden vorangegangenen Immissionsverläufe mit dem korrespondierenden Höhenverlauf spiegeln eine Konfiguration wieder, bei der das einfache Programm FPT an seine Grenzen stößt. Dies liegt darin begründet, dass in die Berechnung lediglich ein Parameter – die mittlere effektive Höhe – zur Darstellung des Geländes verwendet wird.

Im Folgenden wird der Immissionsvergleich auf der Linie zwischen Nürnberg-Fernmeldeturm und dem Dillberg für DAB in der landesweiten Bedeckung und DVB-T durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass beide als Gleichwellennetz betrieben werden. Die Signale der Senderstandorte liegen hierbei auf der gleichen Frequenz und überlagern sich entsprechend am Empfangsort. In vorliegendem Fall werden die berechneten Immissionen vom Dillberg und Fernmeldeturm Nürnberg zunächst getrennt für jeden Vergleichspunkt berechnet und anschließend leistungsmäßig addiert. Die Berechnungen sind wie schon aus den vorangegangenen Abschnitten bekannt aufgeteilt in eine auf die mittlere Abweichung optimierten Berechnung und in den Worst Case Ansatz. Die konfigurationsabhängigen Zuschläge wurden jeweils berücksichtigt. Die folgenden zwei Bilder enthalten die Ergebnisse exemplarisch für den digitalen Fernsehkanal 34 und für den landesweiten DAB-Kanal.

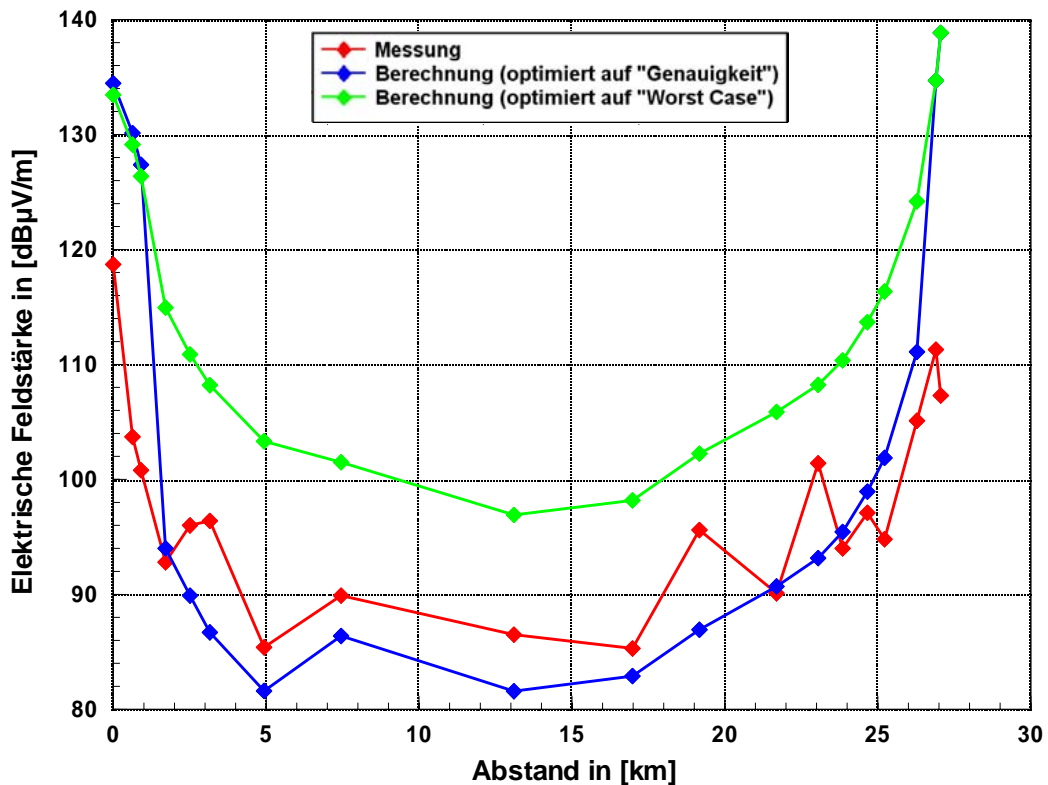


Bild III.4.24: Feldstärkeverlauf von Nürnberg-Fernmeldeturm zum Dillberg, DVB-T, Kanal 34

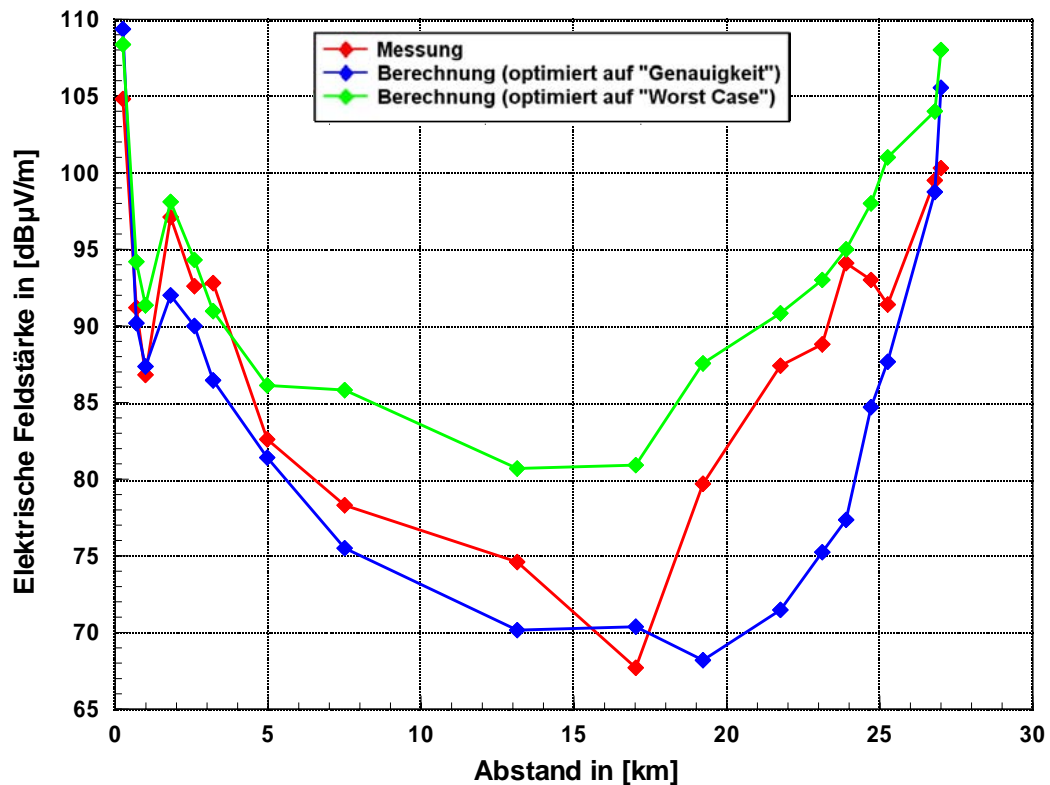


Bild III.4.25: Feldstärkeverlauf von Nürnberg-Fernmeldeturm zum Dillberg, DAB, landesweit

Die beiden vorangegangenen Bilder zeigen folgende Ergebnisse

- Die Berechnungsmethode „Optimierte mittlere Abweichung“ weist gerade in Bild III.4.24 eine genauere Prognose auf, Unterschätzungen zum Messwert sind aber möglich
- Die Worst Case Berechnung unterbewertet die Immissionen zwar an einigen Punkten, diese liegt aber im Bereich der Messunsicherheit.

III.4.5.3 Linienmessungen in Südbayern

Im Folgenden werden die Messergebnisse auf einer radial verlaufenden Linie ausgehend vom Senderstandort Wendelstein mit entsprechend rechen-technisch prognostizierten Werten unter oben angesprochenen Randbedingungen in der Region Südbayern verglichen. In Bild III.4.26 ist eine Linie schematisch dargestellt.



Bild III.4.26: Linienmessung im Bereich Südbayern

Der Ausgangspunkt für die Linie S_W ist der Sendestandort Wendelstein auf einer Höhe von ca. 1890 über NN und der Endpunkt ist Eutenhausen. Die Vergleichspunkte mit den entsprechenden Koordinaten, Korrektur und dem zugehörigen lateralen Abstand sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Messpunkt	Koordinaten		Korrektur	Lateraler Abstand in [km]
	Hochwert	Rechtswert		
S_W_{01}	5292203	4497702	Land, offen	7,92
S_W_{02}	5292971	4497605	Land, offen	8,66
S_W_{03}	5294711	4496308	Land, offen	10,78
S_W_{04}	5296006	4496493	Land, offen	11,89
S_W_{05}	5297113	4495702	Land, offen	13,22
S_W_{06}	5298067	4495231	Land, offen	14,28
S_W_{07}	5299066	4494681	Land, offen	15,42
S_W_{08}	5300964	4493656	Land, offen	17,57
S_W_{09}	5304398	4493103	Land, offen	20,94
S_W_{10}	5305783	4491980	Land, offen	22,65
S_W_{11}	5307235	4491881	Land, offen	24,03
S_W_{12}	5308231	4491480	Land, offen	25,10
S_W_{13}	5310689	4489739	Land, offen	28,05

Tabelle III.4.29: Vergleichspunkte für die Linienmessung Wendelstein-Eutenhausen

Die für den Immissionsvergleich durchgeführten Berechnungen sind wie schon aus den vorangegangenen Abschnitten bekannt aufgeteilt in eine auf die mittlere Abweichung optimierte Berechnung und in den Worst Case Ansatz. Die konfigurationsabhängigen Zuschläge wurden jeweils berücksichtigt. Die folgenden zwei Bilder enthalten die Ergebnisse für den analogen Fernsehkanal 10 und exemplarisch für einen UKW-Kanal, die beide vom Wendelstein abgestrahlt werden.

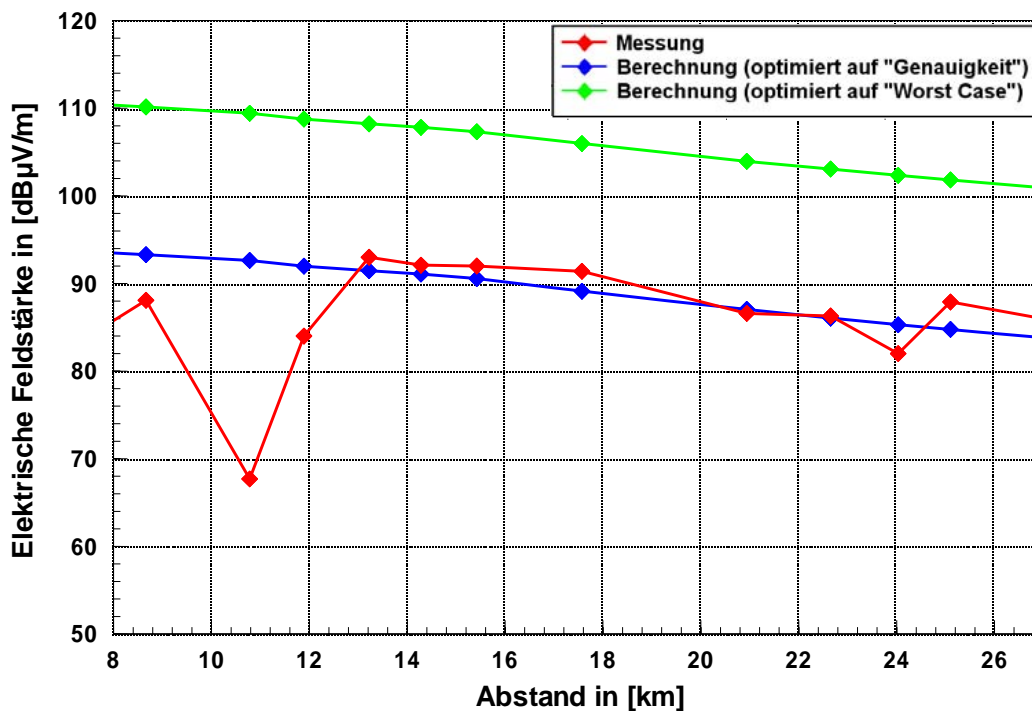


Bild III.4.27: Linienmessung zwischen Wendelstein und Eutenhausen, Analoges Fernsehen, Kanal 10

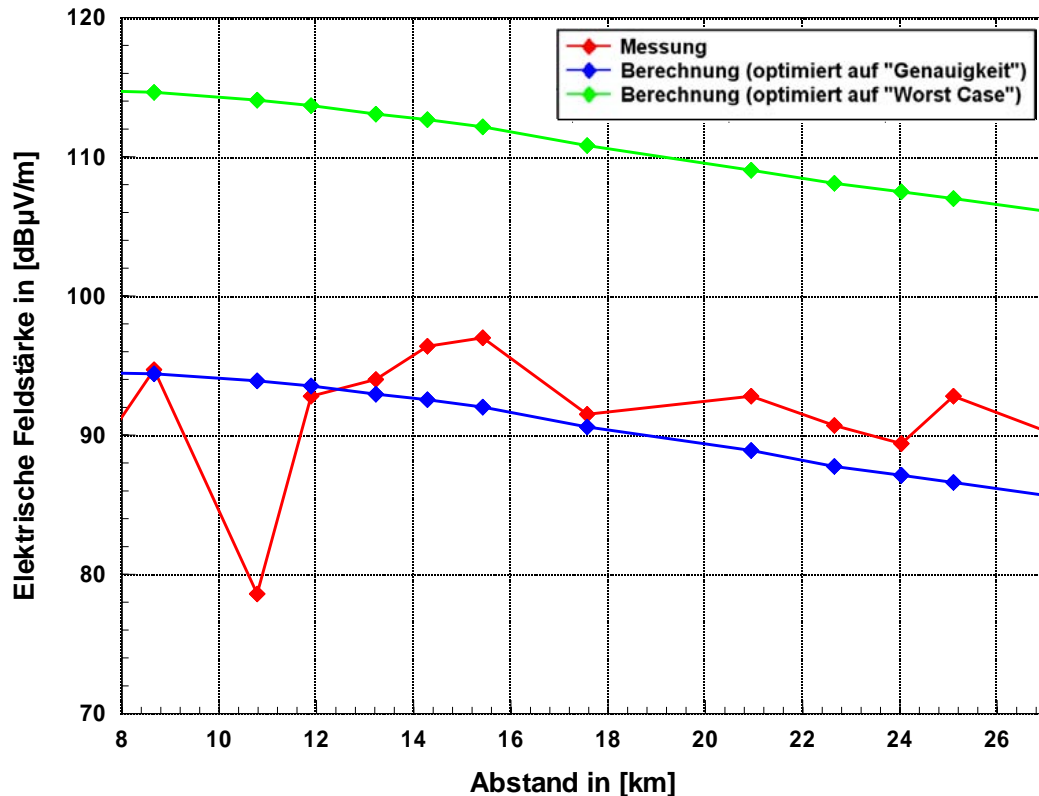


Bild III.4.28: Linienmessung zwischen Wendelstein und Eutenhausen, UKW

An den obigen Bildern ist zunächst einmal der „Einbruch“ der Messergebnisse bei knapp 11 Kilometer Abstand zum Senderstandort Wendelstein auffällig. Dieser ist in der Lage des Messpunktes begründet, der von dichtem Baumbewuchs umgeben und somit gut abgeschattet war. Darüber hinaus spiegeln beide Linienvergleiche zwischen Messungen und Berechnung am Senderstandort Wendelstein die oben genannten Ergebnisse wieder. Wohingegen mit dem Worst Case Verfahren die gemessenen Immissionen an allen Vergleichspunkten überschätzt wird, gibt die Methode „Optimierte mittlere Abweichung“ die Immission zwar genauer wieder; aber diese kann auch unterschätzt werden.

III.4.6 Fazit

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Vergleich zwischen rechenstechnisch mit FPT prognostizierten Feldstärkewerten und den entsprechenden gemessenen Immissionen aufgeteilt nach analogem Fernsehen, DVB-T, UKW und DAB durchgeführt. Insgesamt standen hierzu 5180 Vergleichspaare zur Verfügung.

Das Berechnungsprogramm wurde anhand der folgenden Anforderungen näher betrachtet:

- Das Berechnungsprogramm soll eine möglichst geringe mittlere betragsmäßige Abweichung bezüglich entsprechender Messwerte liefern, d.h. der betragsmäßige Unterschied zwischen der rechentechnisch ermittelten und messtechnisch erfassten Immission soll möglichst gering sein. Dies ist als ein Maß für die *Genauigkeit* der rechentechnischen Prognose anzusehen.
- Das Berechnungsprogramm soll an möglichst allen Vergleichspunkten einen höheren Immissionswert liefern, als der bei der Messung ermittelt wurde. Die Differenz zwischen Berechnung und Messung soll demnach immer größer „0“ sein bzw. der berechnete Wert soll den Messwert möglichst an allen Vergleichspunkten überbieten (dies entspricht der *100%igen Überbewertung*). Auf diese Weise kann das Verfahren als eine Worst Case - Berechnung angesehen werden.

Wünschenswert wäre die Tatsache, dass beide oben genannten Anforderungen innerhalb von einem Berechnungsschritt erreicht werden können, somit die Berechnung eine *einzig* *Feldstärke* liefert, die zum einen eine möglichst geringe Abweichung zu den Messungen erreicht und zum anderen immer möglichst knapp oberhalb der gemessenen Immission liegt. Es hat sich während der Berechnungen mit FPT gezeigt, dass sowohl die mittlere Abweichung als auch die möglichst 100%ige Überbewertung in dieser Berechnungsmethode keine voneinander unabhängigen Größen darstellen und somit die obige Anforderung nicht gleichzeitig erreicht werden kann.

Eine Berücksichtigung eines Korrekturfaktors für eine von 10 m geänderten Empfangsantennenhöhe (laut ITU-Empfehlung) in die rechentechnisch prognostizierte Immission zeigte eine geringere mittlere Abweichung zu den Messwerten als eine Berechnung ohne Korrektur, die aber einen deutlich höheren Anteil an Punkten lieferte, an denen die berechnete Immission oberhalb der messtechnisch bestimmten lag.

Daher wurde zunächst die Berechnung mit Berücksichtigung einer Korrektur anhand eines konfigurationsabhängigen Zuschlags die mittlere Abweichung betreffend optimiert und anschließend die Berechnung ohne Berücksichtigung einer Korrektur anhand eines konfigurationsabhängigen Zuschlags in der Art optimiert, dass möglichst alle Vergleichspunkte eine höhere berechnete Immission aufwies als die messtechnisch bestimmt.

Die einzelnen Konfigurationen und die zugehörigen Zuschläge für die Optimierung auf eine möglichst geringe mittlere Abweichung sind in folgender Tabelle aufgeteilt nach jeweiligem System dargestellt.

Konfiguration	Zuschläge für die Optimierung der mittleren Abweichung in [dB]				
	Analog-TV	DVB-T	UKW	DAB (landesweit)	DAB (lokal)
Stadt, dicht	8	4	6	15	13
Stadt	7	1	5	15	11
Vorstadt	2	4	-1	8	7
Land, offen	2	5	3	10	4

Tabelle III.4.30: Konfigurationsabhängige Zuschläge zur Optimierung der mittleren Abweichung zwischen Berechnungen und entsprechenden Messungen

Die Resultate dieser Vorgehensweise für die gesamte mittlere Abweichung sind in folgender Tabelle dargestellt.

System	Korrektur	Anzahl der Punkte	Mittlere Abweichung in [dB] (inklusive des jeweiligen Zuschlags)	Standardabweichung in [dB]
Analog TV	ja	1135	9,0	12,2
DVB-T	ja	948	11,5	16,2
UKW	ja	2804	8,3	13,8
DAB (landesweit)	ja	181	7,3	9,9
DAB (lokal)	ja	112	7,8	10,2

Tabelle III.4.31: Mittlere Abweichung zwischen Berechnungen und entsprechenden Messungen

Insgesamt kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die Prognose mit dem Programm FPT aufgrund der Größe der mittleren Abweichung nur eingeschränkt geeignet ist, die Immissionen durch Rundfunksender zu berechnen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass je nach betrachtetem Rundfunkdienst zwischen 78 und 83 % aller Punkte eine maximale Abweichung von ± 3 dB zeigten. Für diese wurde mit FPT vor dem Hintergrund der Messunsicherheit die Immission gut prognostiziert. Da es aber auch Punkte gibt, an denen zum Teil auch durch ihre geographische Lage begründet mit deutlichen Über- bzw. Unterschätzungen gerechnet werden muss, ist das Verfahren in der Praxis nur eingeschränkt geeignet, da auf Messungen nicht verzichtet werden kann.

Darüber hinaus zeigte sich, dass die Immissionsprognose für Punkte in ebenem Gelände in den meisten Fällen eine geringere mittlere Abweichung aufwies als für Punkte in bergigem Gelände.

Anschließend wurde eine Optimierung der prozentualen Überbewertung durchgeführt, deren Grundlage die Berechnungsergebnisse ohne Korrektur bildeten. Ziel hierbei war, eine maximale Unterbewertung im Bereich der Messunsicherheit zu erhalten. Auch hierfür wurden die Ergebnisse anhand eines konfigurationsabhängigen Zuschlags im Hinblick auf eine maximale Unterbewertung optimiert. Die Werte für diese Zuschläge sind in folgender Tabelle aufgeteilt nach jeweiligem System und Konfiguration dargestellt.

Konfiguration	Zuschläge für die Optimierung „Hoher prozentualer Anteil der Punkte mit Überbewertungen in [dB]“				
	Analog-TV	DVB-T	UKW	DAB (landesweit)	DAB (lokal)
Stadt, dicht	7	1	0	2	0
Stadt	3	0	14	1	0
Vorstadt	2	3	9	6	0
Land, offen	6	5	12	11	6

Tabelle III.4.32: Konfigurationsabhängige Zuschläge zur Optimierung der mittleren Abweichung zwischen Berechnungen und entsprechenden Messungen

Die Ergebnisse dieser Vorgehensweise sind in Tabelle III.4.30 zu sehen.

System	Korrektur	Anzahl der Punkte	Anzahl der Punkte (in [%]) mit Überbewertungen. (inklusive des jeweiligen Zuschlags)	Maximale Unterbewertung in [dB] (inklusive des jeweiligen Zuschlags)
Analog TV	nein	1135	98,8	2,9
DVB-T	nein	948	97,8	3,0
UKW	nein	2804	99,4	2,3
DAB (landesweit)	nein	181	93,3	2,9
DAB (lokal)	nein	112	97,4	2,3

Tabelle III.4.33: Auswertung für den Worst Case Ansatz

Die Berechnungsmethode Worst Case Ansatz kann unter der Vorgabe eines zu berücksichtigenden Zuschlags für die Immission für alle betrachteten Rundfunkdienste als geeignet angesehen werden. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass die mittlere Abweichung stark ansteigt und mit Werten von 20 - 30 dB gerechnet werden muss.

Vor dem Hintergrund, dass innerhalb des Vergleichs von Messung und Berechnung sowohl bergiges als auch ebenes Gelände berücksichtigt wurden, beinhalten die Zuschläge beide Konfigurationen, natürlich optimiert auf die Topographie in den Vergleichsregionen. Insofern sind diese Zuschläge zwar generell auf andere Regionen übertragbar – dennoch muss in derartigen Fällen auch mit differierenden Abweichungen gerechnet werden.

Da die ITU-Empfehlung erst Immissionswerte ab einem Abstand von 1 km zum Sender liefert, wurde für den Bereich bis zu einem Abstand von 1 km mit reiner Freiraumausbreitung in Hauptstrahlrichtung gesehen gerechnet. Dies resultierte darin, dass gerade bei Senderstandorten, die durch eine ländlich geprägte Umgebung charakterisiert werden können, deutliche Überbewertungen vorlagen. Abschläge von 10 - 15 dB auf den berechneten Wert sind in Abhängigkeit des Systems sinnvoll, um eine möglichst geringe mittlere Abweichung zu erhalten. Im Fall einer Worst Case Betrachtung ergaben sich 5 – 10 dB.

Im Gegensatz dazu gestalteten sich die Resultate für einen Senderstandort im städtischen Gebiet für eine Auswertung schwieriger. Ein allgemeingültiger Faktor für einen typischen Abschlag konnte für derartige Szenarien nicht abgeleitet werden. Lediglich für den vorliegenden Fall wurden geeignete Abschläge ermittelt.

Ein Vergleich der Immissionsverläufe anhand von radial vom Sender ausgehenden Linien hat gezeigt, dass gerade in Konfigurationen, in denen das Gelände bei weiterer Entfernung vom Standort stark ansteigt, das Programm FPT an seine Grenzen stößt. Dies liegt daran, dass der Geländeverlauf nur durch eine einzelne Größe – der mittleren effektiven Höhe – berücksichtigt wird. Hierbei berechnet die Methode „optimierte mittlere Abweichung“ zum Teil einen deutlich niedrigeren Wert im Vergleich zum gemessenen. Der Worst Case Ansatz kann zwar auch leichte Unterbewertungen liefern, diese liegen aber in der Größenordnung der Messunsicherheit. Bei anderen Konfigurationen (z.B. „Linienmessung“ ausgehend vom Wendelstein) spiegelten die Immissionsverläufe die folgenden Resultate wieder:

- Die Berechnungsmethode „Optimierte mittlere Abweichung“ weist eine genauere Prognose auf, Unterschätzungen zum Messwert sind aber möglich
- Die Worst Case Berechnung überbewertet die gemessenen Immissionen unter der Berücksichtigung der Messunsicherheit an allen Punkten.

Danksagung

Bei der Realisierung dieses Projektes haben zahlreiche Personen und Organisationen mitgewirkt, denen an dieser Stelle ausdrücklich gedankt wird.

Dank gilt vor allem dem Auftraggeber, dem Bundesamt für Strahlenschutz, für die Initiierung und finanzielle Förderung vorliegenden Untersuchungsvorhabens, sowie für die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen.

Darüber hinaus hat nicht zuletzt auch die konstruktive Mitarbeit der Betreiber T-Systems Business Services GmbH, des Bayerischen Rundfunks und der Bayern Digital Radio GmbH einen großen Anteil am Gesamtprojekt. Dies betrifft vor allem die Bereitstellung der Antennendiagramme für die rechenstechnischen Simulationen. In diesem Zusammenhang seien Herr Hatzinger vom Bayerischen Rundfunk, Herr Schröter von der T-Systems sowie Herr Trotterberger und Herr Widmann vom Digitalradio Bayern dankend erwähnt.

Für die Bereitstellung von Senderdaten seien Herr Haß von der GARV GmbH, Herr Hummel vom NDR, Herr Friedrich vom Bayerischen Rundfunk und Herr Bär von T-Systems dankend erwähnt.

Bei der Entwicklung des Simulationstools FPT sei an dieser Stelle Herr Baacke vom iMB-Ingenieurbüro [iMB] für die konstruktive Zusammenarbeit ausdrücklich gedankt.

Ferner sind Herr Wölfler und Herr Wahl von der Firma AWE Communications für die kostengünstige Bereitstellung der Software Winprop dankend zu erwähnen. Sehr wertvoll waren die schnellen Reaktionen und die Unterstützung bei der Software und darüber hinaus gehende Fragen.

Ebenfalls Dank gebührt den Mitarbeitern der Firma Rohde & Schwarz im Kompetenzzentrum Sendertechnik in Teisnach für die Gelegenheit, Messungen an realen analogen und digitalen TV-Sendern durchführen zu können. Weiterhin sei den Herren Kausche und Mielke aus der Zentrale von Rohde & Schwarz in München für die problemlose Unterstützung mit Signalgeneratoren und Spezialmessgeräten gedankt.

Ein besonderes Dankeschön geht auch an Herrn Dr. Bernkopf vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) für die Überlassung der Koordinaten und vieler Fotos der Messpunkte aus dem Programm "EMF-Monitoring Bayern" des LfU.

Vergessen werden sollen an dieser Stelle auch nicht die Herren Brückner (Umweltamt der Stadt Nürnberg), Lippert (Referat für Gesundheit und Umwelt der Landeshauptstadt München) und Dr. Rechenbach (O₂, München), die uns den Zugang zu den untersuchten Hochhäusern ermöglichten.

Literaturverzeichnis

- [0848-1_1995] **DIN VDE 0848-1**, *Sicherheit in elektromagnetischen Feldern. Teil 1: Mess- und Berechnungsverfahren*. Entwurf, Beuth-Verlag Berlin, Mai 1995.
- [0848-1_2000] **DIN VDE 0848-1**, *Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern. Teil 1: Definitionen, Mess- und Berechnungsverfahren*. VDE-Verlag Berlin, August 2000.
- [26. BImSchV] **26. BImSchV**, Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV), BGBl. Jg. 1996 Teil I Nr. 66, 20.12.1996.
- [99/519/EG] **1999/519/EG**, *Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz)*, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 199/59, 30.07.1999.
- [3DEM] <http://www.visualizationsoftware.com/3dem.html>
- [ANF 04] **Agence Nationale des Fréquences**, Panorama du rayonnement électromagnétique en France, Maisons-Alfort cedex, www.anfr.fr, (2004)
- [ASEB 03] **Arbeitsgemeinschaft Schaffner, Ecosens, Brüniger**, *Messungen der nichtionisierenden Strahlung im Nieder- und Hochfrequenzbereich an ausgewählten Orten auf dem Kantonsgebiet Schwyz*, Abschlussbericht für die Kantonsverwaltung Schwyz, Wallisellen, (2003).
- [AWE 05] <http://www.awe-communications.com>
- [BAY] <http://www.geodaten.bayern.de>
- [BAY 00] Bayerischer Rundfunk, Deutsche Telekom, Institut für Rundfunktechnik, Rohde & Schwarz, Bayerische Medien Technik, Digitales terrestrisches Fernsehen in Bayern: DVB-T Feldversuch Bayern, Abschlussbericht, München, Februar 2000.
- [BEMFV] **BEMFV**, Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder, BGBl. Jg. 2002 Teil I Nr. 60, 27.08.2002.
- [BER 04] **J. Bernkopf**, *Monitoring elektromagnetischer Felder an statistisch ausgewählten Orten in Bayern*, NIR 2004 Nichtionisierende Strahlung Sicherheit und Gesundheit, 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Köln, 31.8.-2.9.2004, S. 411-418, (2004)
- [BGV] **BGV B11 (VBG 25)**, *Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder*, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektronik, 01.06.2001.
- [BGR] **BGR B11 (ZH1/257)**, Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit: *Elektromagnetische Felder*, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektronik, Juni 2001.

- [BLM 05] **Bayerische Landeszentrale für neue Medien**, www.blm.de; Pressemitteilung, München 13.10.2005.
- [BNetzA 2003] **Frequenznutzungsplan**, *BNetzA: Bundesnetzagentur*, 2003
- [BNetzA] http://www.bundesnetzagentur.de/enid/fb780826fae1d5f235856dffa2a0ac65,0/Rundfunk/Senderdaten_ng.html
- [BNetzA 03] **BNetzA MV 09/EMF/3**, *Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken*, BNetzA Bonn, Ausgabe Februar 2003.
- [BOR 02] **Chr. Bornkessel und J. Pamp**, *Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, *Zwischenbericht Literaturstudie zu bestehenden Mess- und Berechnungsverfahren*, Kamp-Lintfort, (2002).
- [BOR 04] **Chr. Bornkessel und M. Schubert**, *Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, *Zwischenbericht Analyse der Immissionsverteilung*, Kamp-Lintfort, (2004).
- [BOR 05] **Chr. Bornkessel und M. Schubert**, *Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, *Abschlussbericht*, Kamp-Lintfort, (2005).
- [BOR 96] **C. Bornkessel, T. Becks und U. Kullnick**, *Katastermäßige Erfassung der elektromagnetischen Belastung in Nordrhein-Westfalen: Vorschläge zur Durchführung*, IMST-Report, Kamp-Lintfort, (1996).
- [BMWI 00] **Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie**, *Digitaler Rundfunk in Deutschland – Startscenario 2000*, <http://www.bmwi.de>, 2000.
- [BR 04] www.br-online.de
- [BUWAL 02] **Messempfehlung für GSM-Basisstationen**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Bern, (2002).
- [BUWAL 05] **Rundfunk- und Funkrufsendeanlagen - Vollzugsempfehlung zur NISV**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, (2005).
- [CEPT 00] Implementation of the Chester Agreement, Naples, 2000.
- [CEPT 03] **CEPT/ECC/Recommendation (02)04**, *Measuring Non-Ionising Electromagnetic Radiation (9 kHz - 300 GHz)*, Maisons Alfort, (2003).

- [CEPT 95] **DAB – Digital Audio Broadcasting**, The CEPT T-DAB Planning Meeting, Wiesbaden, July 1995.
- [CEPT 97] **CEPT**, The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T), Chester, 1997.
- [CIC 93] **D.J. Cichon, T. Kürner und W. Wiesbeck**, *Modellierung der Wellenausbreitung in urbanem Gelände*, Frequenz , vol. 47, S. 2-11, (1993).
- [CIC 94] **D.J. Cichon**, *Strahlenoptische Modellierung der Wellenausbreitung in urbanen Mikro- und Pikofunkzellen*, Dissertation, Universität Karlsruhe, ISSN 0942-2935, Band 8 (1994).
- [COS 99] **COST 231**, *Digital Mobile Radio towards Future Generation Systems*, Final Report, European Commission, EUR 18957, (1999).
- [COST] <http://www.ihe.uni-karlsruhe.de/forschung/cost231/cost231.en.html>
- [D-Sat] **Software D-Sat**, Buhl Data Service GmbH, Am Siebertsweiher 3-5, 57290 Neunkirchen, www.buhl-data.com
- [DAM 95] **P. Dambacher**, *Digitale Technik für Hörfunk und Fernsehen*, R. v. Decker Verlag, (1995).
- [DAM 97] **P. Dambacher**, *Digitale Technik für den Fernsehgrundfunk*, Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, (1997).
- [DEU 00] **Deutsche TV-Plattform**, Bericht der Arbeitsgruppe: Übergang von analogem zum digitalen terrestrischen Fernsehen, www.tv-plattform.de, 2000.
- [DEY 66] **J. Deygout**, *Multiple Knife Edge Diffraction for Microwaves*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 4, S. 480-489, (1966).
- [DEY 91] **J. Deygout**, *Correction Factor for Multiple Knife-Edge Diffraction*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 39, S. 1256-1258 (1991).
- [DIG] <http://www.digitalradio.de>
- [DOT 00] **M. Döttling**, *Strahlenoptisches Wellenausbreitungsmodell und Systemstudien für den Satellitenmobilfunk*, Dissertation, Universität Karlsruhe, Band 26 (2000).
- [EPS 53] **J. Epstein, D.W. Peterson**, *An Experimental Study of Wave Propagation at 850 MHz*, Proc. IRE, vol. 41, S. 595-611, (1953).
- [FCC 97] **FCC Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology**, *Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields*. OET Bulletin 65, August 1997.
- [FIS 04] **W. Fischer**, *Digital Television*, Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, (2004).

- [FUL 02] **K. Fuller, A.D. Gulson, P.M. Judd, A.J. Lowe und J. Shaw**, *Radiofrequency electromagnetic fields in the Cookridge Area of Leeds*, NRPB-W23, Chilton Didcot, (2002)
- [G30] <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.asp>
- [GIO 84] **C.L. Giovaneli**, *An Analysis of Simplified Solutions for Multiple Knife-Edge Diffraction*, IEEE Trans. Ant. Propagat., vol. 32, S. 297-301, (1984).
- [HAT 80] **M. Hata**, *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Services*, IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 29, S. 317-325, (1980).
- [ICNIRP 98] **ICNIRP Guidelines**, Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), Health Physics, vol. 74 no. 4, S. 494-522, (1998).
- [IEEE C95.1] **IEEE Std C95.1-1999 Edition**, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE, New York, USA, 1999.
- [IEEE C95.3] **IEEE Std C95.3-1991**, IEEE Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields – RF and Microwave, IEEE, New York, USA, 1992.
- [iMB] Ingenieurbüro Michael Baacke; <http://www.imb-software.de>
- [ITU 370] **ITU-R P.370**, Propagation in Non-Ionized Media: VHF and UHF Propagation Curves for the Frequency Range from 30 MHz to 1000 MHz, Geneva, (1995); <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/e>
- [ITU 1546] **ITU-R P.1546-1**, Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz, (2001-2003); <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/e>
- [KAT] <http://www.kathrein.de>
- [KEL 96] **H. Keller**, *Normgerechte Personenschutzmessungen im HF- und Mikrowellenbereich mit den Feldstärkemessgeräten EMR-20 / EMR-30*, Firmenschrift Wandel & Goltermann, Eningen, (1996).
- [KEL 05] **H. Keller**, *Grundlagen und Anwendung moderner Spektrumanalysatoren*, Firmenschrift Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, (2005).
- [KEL 06] **H. Keller**, *Grundlagen und Anwendung des Selective Radiation Meter SRM-3000*, Firmenschrift AN_HF_1000, Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, (2006).
- [LAI 04] **Länderausschuss für Immissionsschutz**, *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Bundes-Immissionsschutzverordnung)*, Fassung vom 26.03.2004, www.lai-immissionsschutz.de, (2004).

- [LEB 91] **M. Lebherz**, Wellenausbreitungsmodelle zur Versorgungsplanung im VHF/UHF-Bereich unter Berücksichtigung der Mehrwegeausbreitung, Dissertation, Universität Karlsruhe, Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden, (1991).
- [LEV 92] **M.F. Levy**, Diffraction Studies in Urban Environment with Wide-Angle Parabolic Equation Method, *Electronics Letters*, vol. 28, S. 1491-1492, (1992).
- [LFM] **Landesmedienanstalt NRW**, <http://www.lfm-nrw.de>; 10-Thesen-Papier ist unter <http://www.lfm-nrw.de/downloads/dab-thesen.pdf> abrufbar
- [LUE 82] **R.J. Luebbers et al.**, *GTD Terrain Reflection Model Applied to ILS Glide Scope*, *IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst.*, vol. 18, S. 11-20, (1982).
- [MABB] **Medienanstalt Berlin-Brandenburg**, <http://www.mabb.de>; Pressemitteilung vom 23.11.2004
- [MAT 95] **C. Mattiello**, *Electromagnetic Field Studies in Urban Environments with a Higher-Order Parabolic Equation*, *Proc. Int. Conf. Ant. Prop. ICAP*, S. 355-358, (1995).
- [MÄU 98] **R. Mäusl**, *Repetitorium - Fernsehtechnik*, Rohde & Schwarz, München, (1998).
- [MÄU 03] **R. Mäusl**, *Fernsehtechnik*, Hüthig Verlag, Heidelberg, (2003).
- [MEN 04] **H. Menges, U. Bochtler, R. Eidher und M. Wuschek**, *Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg*, NIR 2004 Nichtionisierende Strahlung Sicherheit und Gesundheit, 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Köln, 31.8.-2.9.2004, S. 405-410, (2004)
- [MON 00] **MONTENA EMC**, *Hintergrundbelastung im Frequenzbereich 100 kHz - 3 GHz unter besonderer Berücksichtigung der Mobilfunkbänder*, Messbericht für das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Rossens, (2000).
- [NES 00] **A. Neskovic, N. Neskovic und G. Paunovic**, *Modern Approches in Modelling of mobile Radio Systems Propagation Environments*, *IEEE Communications Surveys*, (2000).
- [NES 96] **A. Neskovic, N. Neskovic und G. Paunovic**, *Measurements and Analysis of the Electric Field Level in Band 450 MHz*, Project of Power Distribution Company, Belgrade 1996
- [OKU 68] **Y. Okumura**, *Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Services*, *Rev. Electrical. Comm. Lab.*, vol. 16, S. 825-873, (1968).
- [PAU 84] **D. Paunovic, Z. Stojanovic und I. Stojanovic**, *Choice of a suitable method for the prediction of the Field Strength in Planning Land Mobile Radio Systems*, *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 33, no. 3, S. 259-265, (1984).

- [PAUL 04] **M. Pauli und Chris Weck**, Digitaler Rundfunk: Aspekte der Strahlungsemission, FGF Newsletter 3/2004.
- [prEN 50413] **prEN 50413**, *Basic Standard on Measurement and Calculation Procedures for Human Exposure to Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (0 Hz - 300 GHz)*. CENELEC Draft Standard, November 2003.
- [prEN 50420] **prEN 50420**, *Basic standard for the evaluation of human exposure to electromagnetic fields from a stand alone broadcast transmitter (30 MHz – 40 GHz)*. CENELEC Draft Standard, Februar 2004.
- [prEN 50421] **prEN 50421**, *Product standard to demonstrate the compliance of stand alone broadcast transmitter with the reference levels or the basic restrictions related to human exposure to radio frequency electromagnetic fields (30 MHz – 40 GHz)*. CENELEC Draft Standard, Februar 2004.
- [RAD 04] **Radiowoche**, <http://www.radiowoche.de>, Newsarchiv 27.11.2004
- [RAU 00] **Chr. Rauscher**, *Grundlagen der Spektrumanalyse*, Rohde & Schwarz, München, (2000).
- [RIZ 97] **K. Rizk, J.F. Wagen und F. Gardiol**, *Two-Dimensional Ray-Tracing Modeling for Propagation Prediction in Microcellular Environments*, IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 46, S. 508-518, (1997).
- [RTCG 99] **Radio Technology & Compatibility Group**, *Sea Path Propagation Measurements*, Report No. RTL 479, 14 July 1999
- [RUS 93] **T.A. Russell, C.W. Bostian und T.S. Rappaport**, *A Deterministic Approach to Predicting Microwave Diffraction by Buildings for Microcellular Systems*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 41, S. 1640-1649, (1993).
- [S 1120] **ÖNORM S 1120**, Mikrowellen- und Hochfrequenzfelder, Zulässige Expositionswerte zum Schutz von Personen im Frequenzbereich 30 kHz bis 3000 GHz, Messungen., Vornorm, Österreich, 01. Juli 1992.
- [SRTM] <http://www.dlr.de/srtm/produkte/produkte.htm>
- [TELL 80] **R.A. Tell und E.D. Mantioly**, *Population Exposure to VHF and UHF-Broadcast Radiation in the US*, IEEE Proc. 68, (1980)
- [TREP 4] Initial ideas concerning the revision of the Stockholm (1961) Agreement, Technical Annex: Criteria for planning DVB-T
- [UEB] <http://www.ueberallfernsehen.de>
- [VAN 93] **G.A.J. Van Dooren, C.J. Haslett und M.F. Levy**, *Diffraction by a Rectangular Building: Comparison of Three Field-Strength Prediction Techniques*, Electronics Letters, vol. 29, S. 1334-1335, (1993).
- [VAN 93a] **G.A.J. Van Dooren, M.H.A.J. Herben**, *Field Strength Prediction Behind Lossy Dielectric Obstacles by Using the UTD*, Electronics Letters, vol. 29, S. 1016-1018, (1993).

- [VAN 93b] **G.A.J. Van Dooren, M.H.A.J. Herben**, *Polarization-Dependent Site-Shielding Factor of a Block-Shaped Obstacle*, Electronics Letters, vol. 29, S. 15-16, (1993).
- [VAN 94] **G.A.J. Van Dooren**, *A Deterministic Approach to the Modelling of Electromagnetic Wave Propagation in Urban Environments*, PhD Thesis, Eindhoven University, ISBN 90-9006889-9, (1994).
- [VTP] <http://www.vterrain.org>
- [WECK 03] **C. Weck**, *Digitaler Hör- und Fernsehgrundfunk: Aspekte der Strahlungsemission*, 5. Workshop Elektromagnetische Felder in der Umwelt, MUNLV, Düsseldorf, 2.Dezember 2003.
- [WI 04] <http://www.remcom.com>
- [WITT 04] **Norddeutscher Rundfunk**, Hörfunk- und Fernsehsender in der Bundesrepublik Deutschland, NDR Abteilung Sendertechnik Wittsmoor, Stand Januar 2004
- [WUS 02] **M. Wuschek**, *Feldstärkemessungen in der Umgebung von GSM-Mobilfunkbasisstationen*, EMV 2002 10. Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, VDE-Verlag Berlin, Offenbach, S. 683-692, (2002).
- [WUS 04] **M. Wuschek**, Korrekte Erfassung der Immissionen von modernen, breitbandigen Funksystemen, NIR 2004 Nichtionisierende Strahlung Sicherheit und Gesundheit, 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Köln, 31.8.-2.9.2004, S. 372-380, (2004)
- [WUS 04-2] **M. Wuschek, C. Bornkessel, D. Manteuffel, M. Schubert und P. Schmidt**, *Möglichkeiten und Grenzen der Minimierung von Mobilfunkimmissionen: Auf Messdaten und Simulationen basierende Optionen und Beispiele*, Abschlussbericht für das Bayerische Landesamt für Umweltschutz, Regensburg, (2004)
- [WUS 04-3] **M. Wuschek und C. Bornkessel**, *EMF-Messprojekt Berlin*, Newsletter der Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Nr. 4/2004, S. 68-74, Bonn, (2004)

Abkürzungsverzeichnis

BlmSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BNetzA	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Schweiz)
CCIR	Comité Consultatif International des Radiocommunications (frz.) → Internationales beratendes Komitee für Rundfunkfragen
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (frz.) → Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (engl.) → Europäische Konferenz der Verwaltungen für Post und Telekommunikation
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (engl.)
DAB	Digital Audio Broadcasting (engl.) → Digitale Radio Übertragung
DEM	Digitales Elevations Modell
DGM	Digitales Gelände Modell
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying (engl.) → Phasentastung mit vier Zuständen (differentiell)
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial (engl.) → Digitales terrestrisches Fernsehen
DVB-S	Digital Video Broadcasting – Satellite (engl.) → Digitales Fernsehen über Satellit
DVB-C	Digital Video Broadcasting – Cable (engl.) → Digitales Fernsehen über Kabel
DVB-H	Digital Video Broadcasting – Handheld (engl.) → Digitales Fernsehen für mobile Endgeräte
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power (engl.) → Äquivalente isotrope Strahlungsleistung
EMVU	Elektromagnetische Verträglichkeit zur Umwelt
ERP	Equivalent Radiated Power (engl.) → Äquivalente Strahlungsleistung bezogen auf einen $\lambda/2$ -Dipol
FDM	Finite Differenzen Methode
FDTD	Finite Difference Time Domain (engl.) → Finite Differenzen im Zeitbereich
FEM	Finite Elemente Methode
FM	Frequenzmodulation
FPT	Field Prediction Tool (engl.) → Feld Prognose Programm
FR	Freiraumausbreitung

GIS	Geographisches Informationssystem
GO	Geometrical Optics (engl.) → Geometrische Optik
GSM	Global System of Mobile Communication (engl.) → Globales System für Mobilkommunikation (Mobilfunkstandard)
GTD	Geometrical Theory of Diffraction (engl.) → Geometrische Beugungstheorie
ITU	International Telecommunications Union (engl.) → Internationale Fernmeldeunion
LMK	Lang-, Mittel- und Kurzwelentonrundfunk
LOS	Line of Sight (engl.) → Sichtverbindung
MABB	Medienanstalt Berlin-Brandenburg
MEC	Method of Equivalent Currents (engl.) → Methode der äquivalenten Ströme
MPEG	Moving Pictures Experts Group (engl.) → Expertengruppe zur Codierung bewegter Bilder
MUSICAM	Masking pattern-adapted Universal Subband Integrated Coding And Multiplexing (engl.) → Verfahren zur Quellencodierung von Audiosignalen
NLOS	Non Line of Sight (engl.) → keine Sichtverbindung
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (engl.)
PEP	Peak Envelope Power (engl.) → Maximale Hüllkurvenleistung
PO	Physical Optics (engl.) → Physikalische Optik
PTD	Physical Theory of Diffraction (engl.) → Physikalische Beugungstheorie
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (engl.) → Phasentastung mit vier Zuständen (4-PSK)
QAM	Quadraturamplitudenmodulation
RBW	Resolution bandwidth (engl.) → Auflösebandbreite
BNetzA	Bundesnetzagentur
RMS	Root Mean Square (engl.) → Effektivwert
Span	Frequenzbereich bei frequenzselektiven Messgeräten = Endfrequenz – Anfangsfrequenz des dargestellten Spektrums
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
VHF	Very High Frequencies (engl.)
UHF	Ultra High Frequencies (engl.)
UKW	Ultrakurzwelle
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System (engl.) → Universales Mobilkommunikationssystem
USGS	U.S. Geological Survey (engl.) → Geologische Überwachungsbehörde der USA

UTD	Uniform Theory of Diffraction (eng.) → Verallgemeinerte geometrische Beugungstheorie
VBW	Video bandwidth (engl.) → Videobandbreite
VTP	Virtual Terrain Project (engl.) → Virtuelles Erdoberflächen Projekt
ZF	Zwischenfrequenz

Verzeichnis häufig verwendeter Symbole

d	Entfernung
f	Frequenz
h	Höhe
h_a	Sendeantennenhöhe über Grund (Masthöhe)
h_{eff}	effektive Antennenhöhe (berücksichtigt die Umgebung)
k	Erweiterungsfaktor bei Normalverteilung
k	Antennenfaktor (logarithmiert)
r	Abstand
r_a	Reflexionsfaktor der Antenne
r_s	Reflexionsfaktor des Spektrumanalysatoreingangs
t	Erweiterungsfaktor für Student-Verteilung
B	Bandbreite
B_{Signal}	Bandbreite des zu messenden Signals
B_R	Rauschbandbreite
D	Maximale geometrische Ausdehnung einer Antenne
D_B	Beugungsdämpfung
E	Elektrische Feldstärke
H	Magnetische Feldstärke
K	Korrekturfaktor für Bandbreitenhochrechnung
K	Antennenfaktor
P	Leistung
P	Vertrauensintervall
S	elektrische Leistungsflussdichte
U	elektrische Spannung
Z_{F0}	Feldwellenwiderstand des freien Raumes
$\lambda_{(0)}$	(Freiraum-) Wellenlänge
λ	Wellenlänge
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung
ΔL	Pegelfehler