
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-klasse "portable indoor" zeigen keine signifikante Veränderung der mittleren Gesamtexposition.

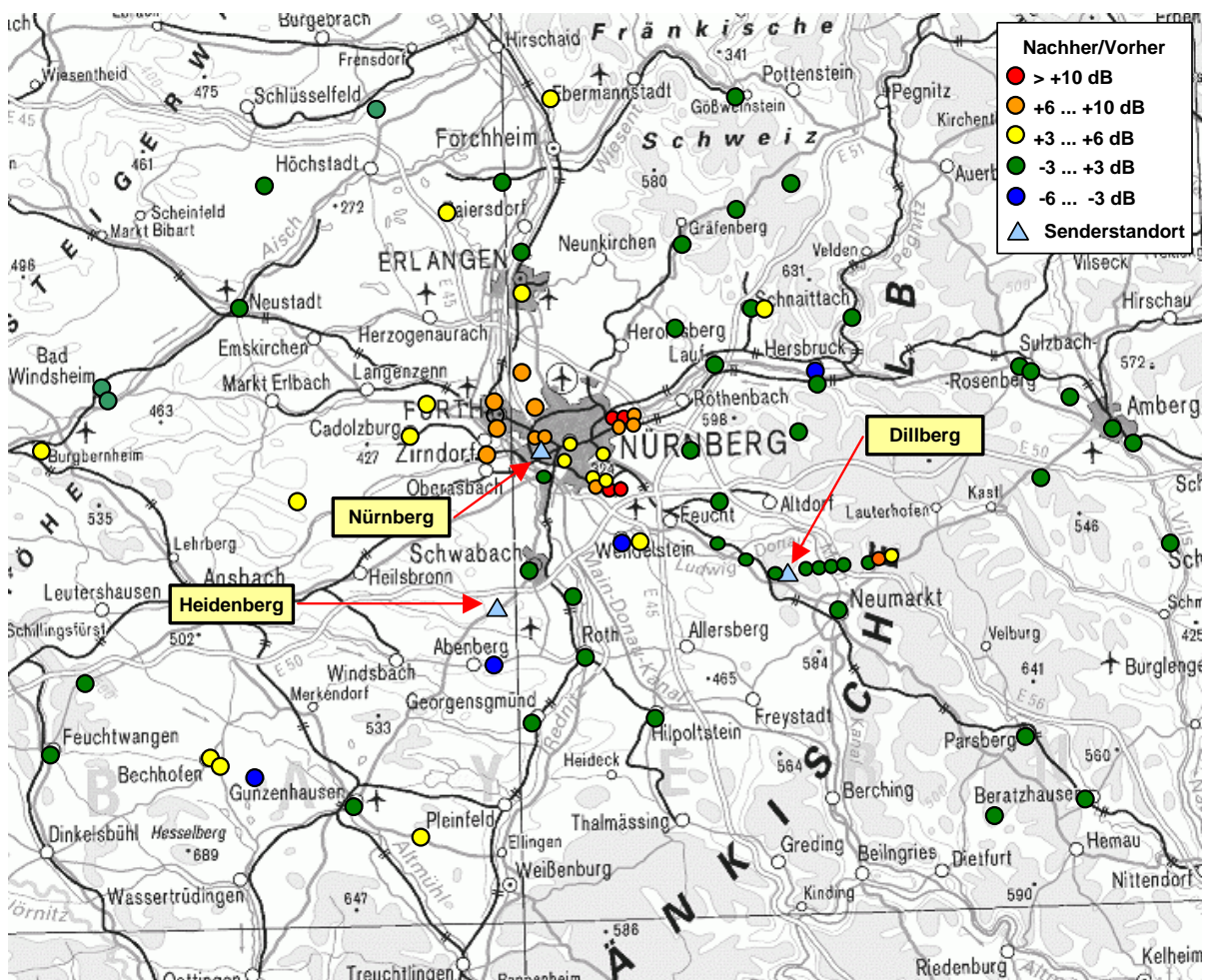


Bild: Quotient der Leistungsflussdichtewerte (Gesamtimmision Ton- und Fernseh-rundfunk) aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB für die 87 Messpunkte im Raum Nürnberg (Darstellung in fünf Klassen)

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.

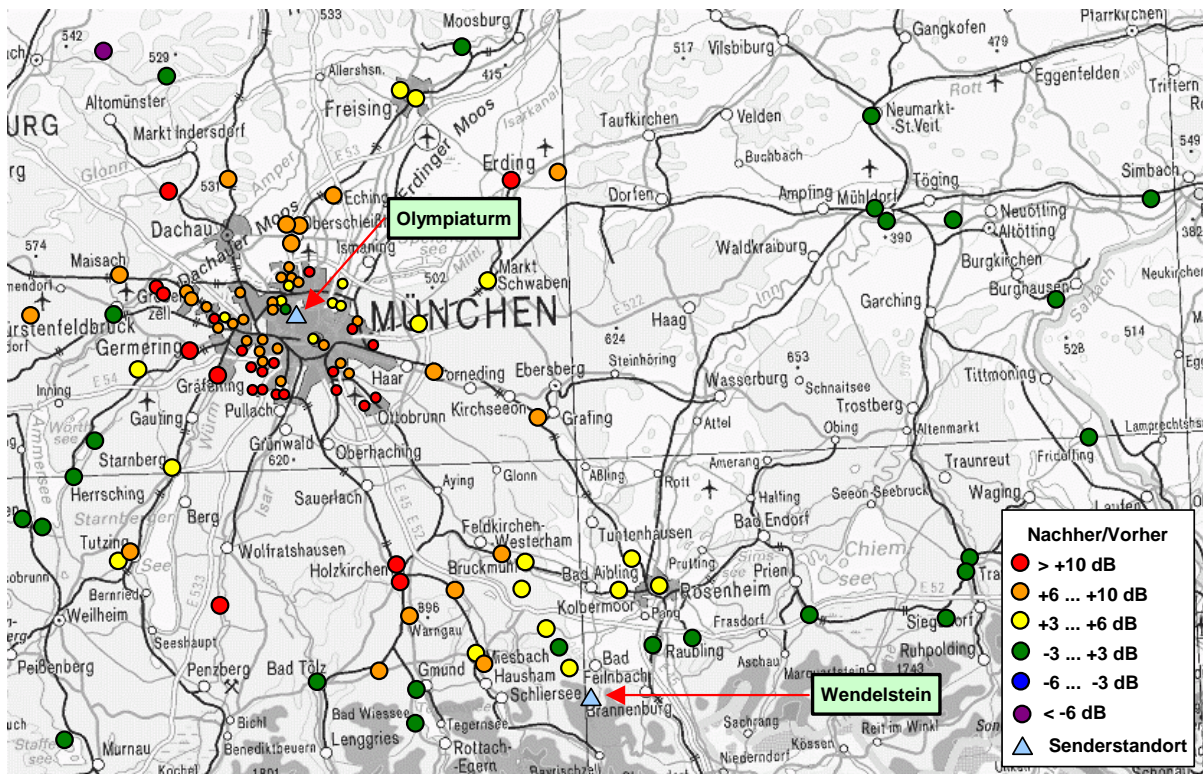


Bild: Quotient der Leistungsflussdichtewerte (Gesamtimmision Ton- und Fernsehrundfunk) aus "Nach-" und "Vorhermessung" in dB für die 113 Messpunkte im Raum München (Darstellung in sechs Klassen)

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 rechenstechnisch 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 eines 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.

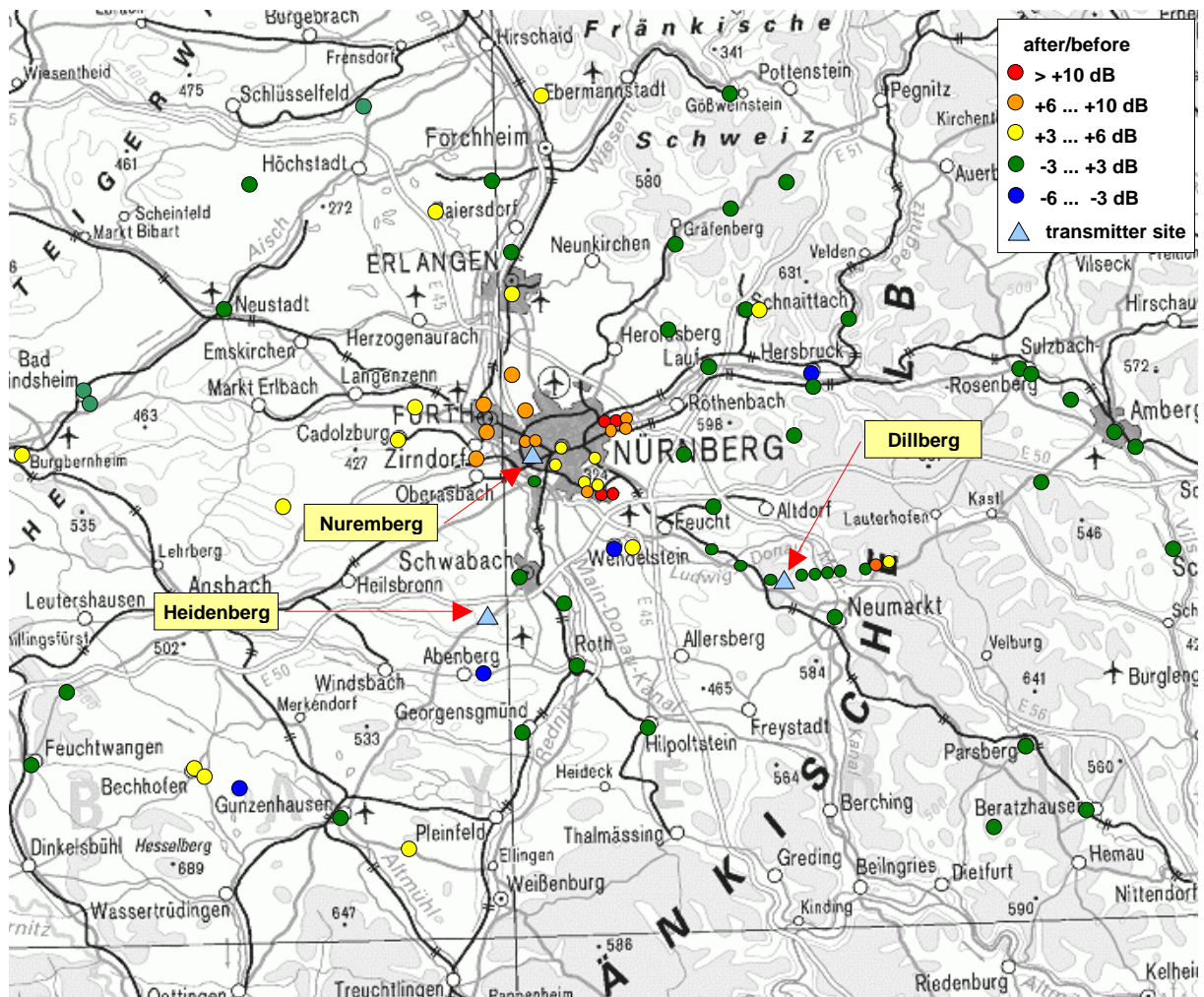
Measurement uncertainty by considering of factors, caused by the measurement instruments and caused by the measuring methods as well, will be roughly 3 dB (95 % confidence interval) and is therefore in the typical dimension of this kind of RF-exposure measurements.

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.

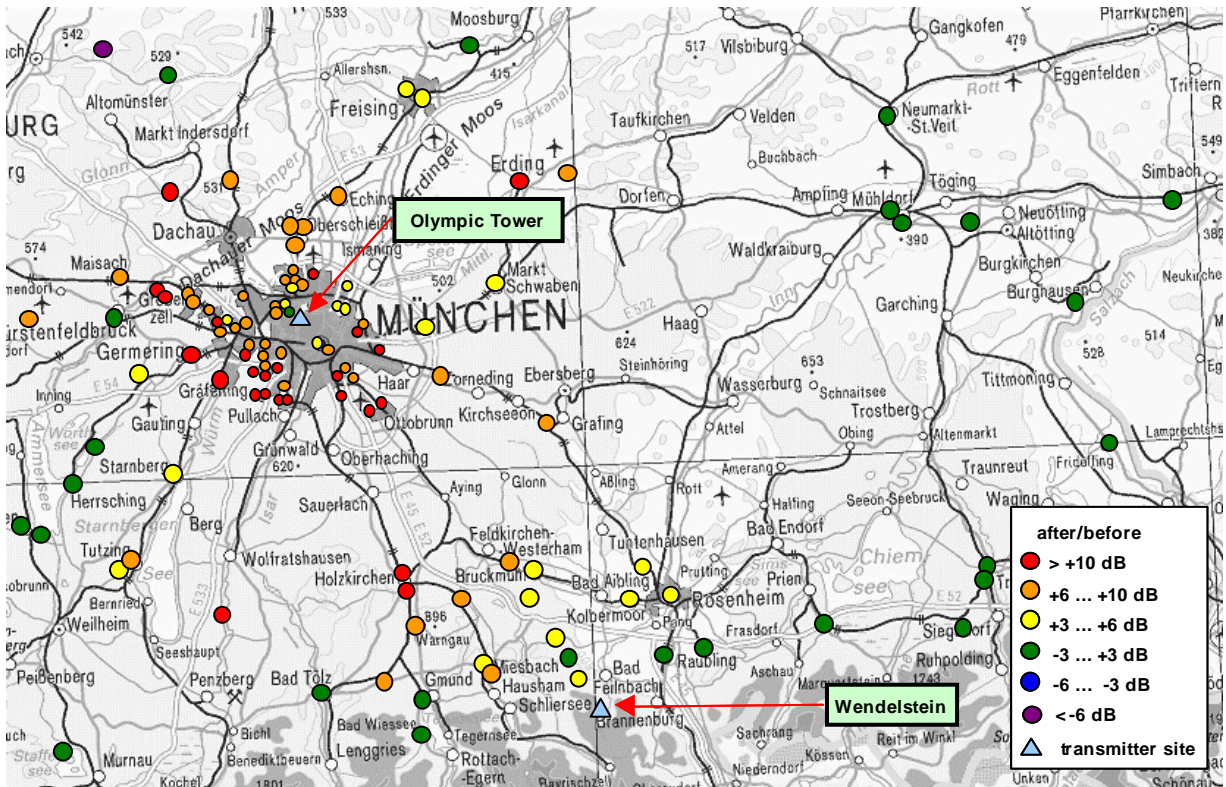
A comparison of the results of the "before-after"-measurements at the measurement points in the Nuremberg region showed a clear increasing of the total exposure in the area of the towns Nuremberg, Fürth and Erlangen (mean increasing factor: 6.8 dB). The reason for this increasing is the displacement 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>Colonius 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.

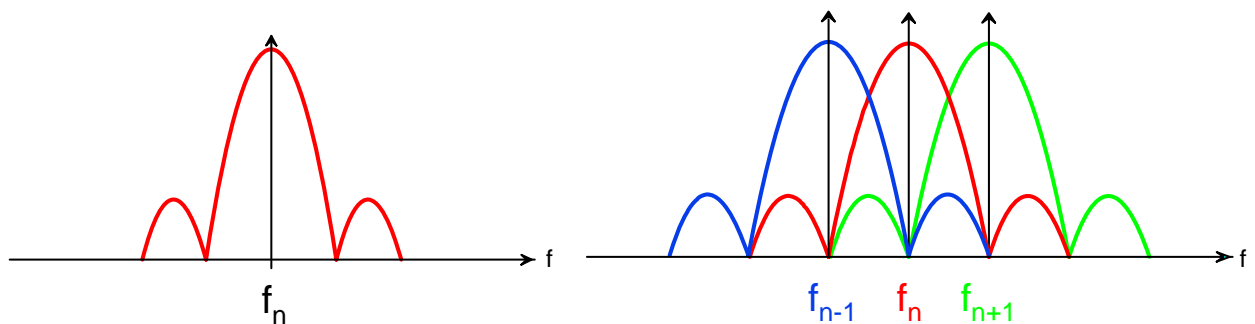


Bild I.2.1: Spektrum bei Einträgermodulation (links) und orthogonaler Mehrträgermodulation (rechts)

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.

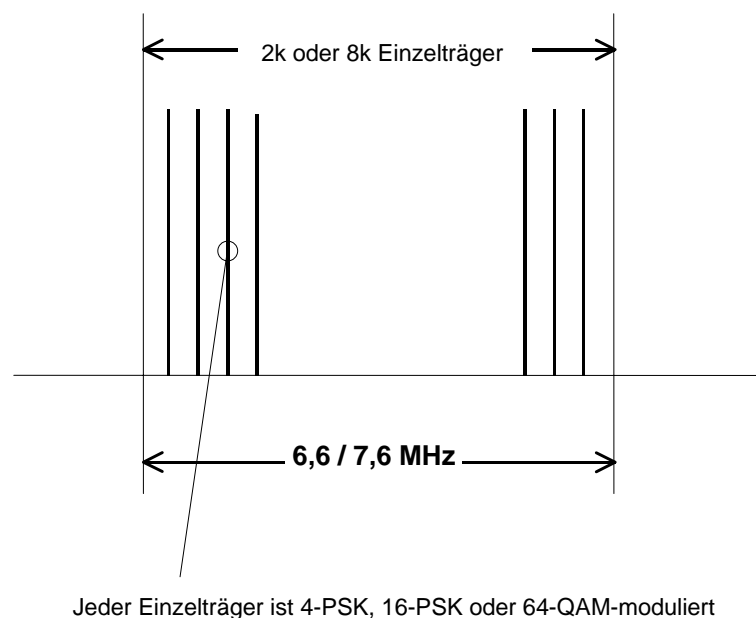


Bild I.2.2: DVB-T: Prinzipieller Aufbau des Spektrums

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.

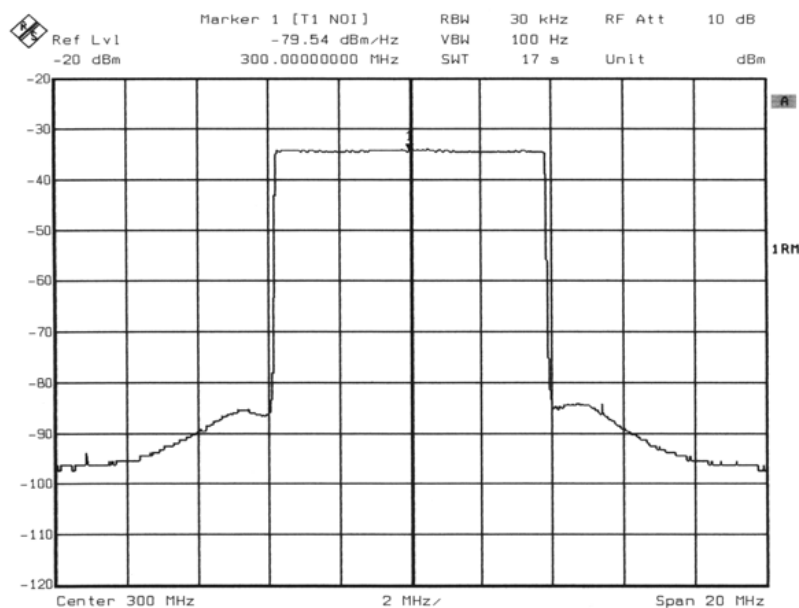


Bild I.2.3: Real gemessenes Spektrum eines DVB-T-Signals (UHF-Band)

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).

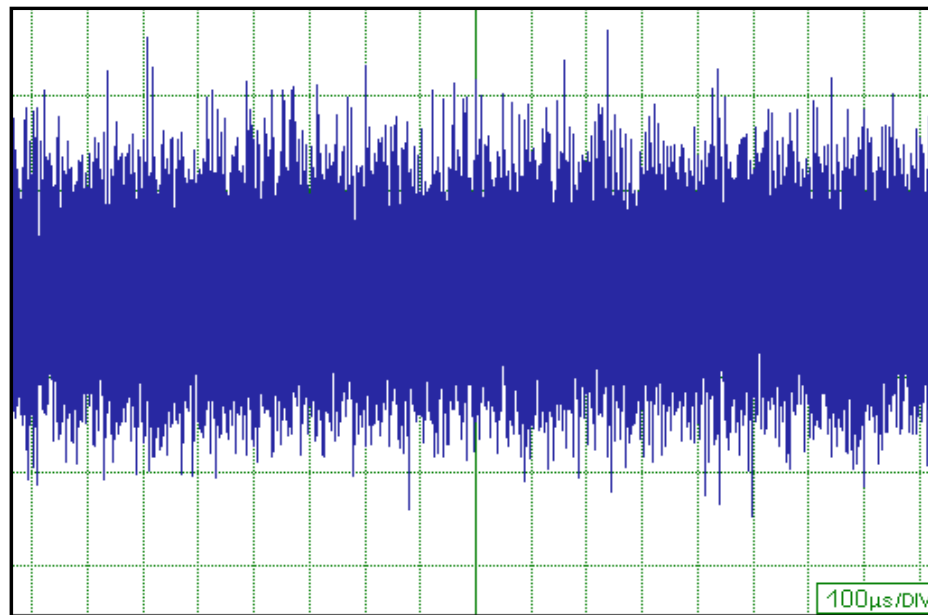


Bild I.2.4: Prinzipieller Zeitverlauf eines DVB-T-Signals (Vertikalachse: Spannung im linearen Maßstab)

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.

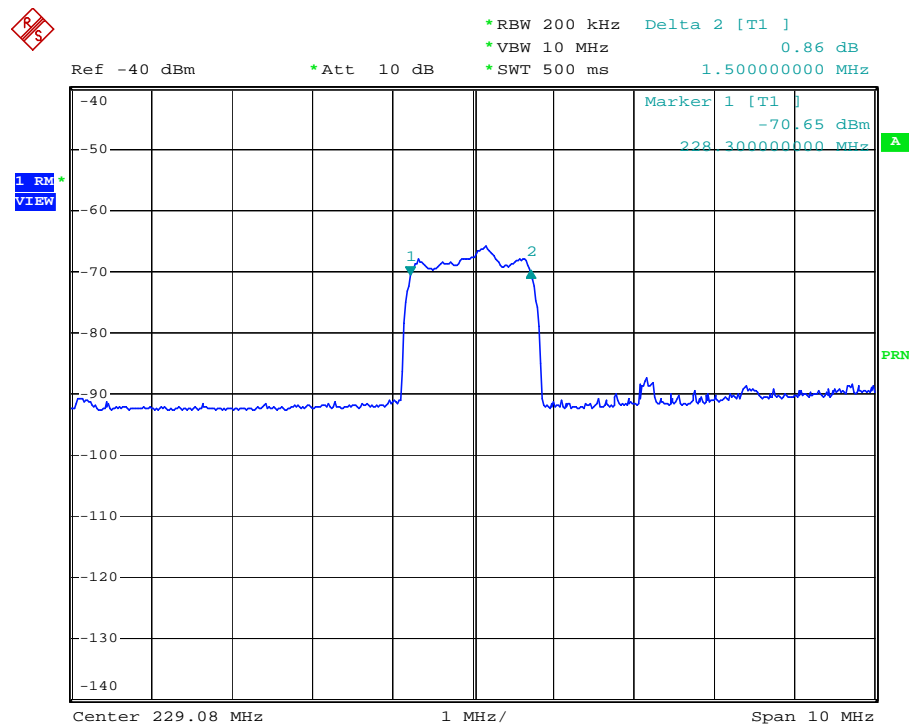
Anzumerken ist an dieser Stelle noch, dass sich die Leistungsangaben bei DVB-T-Sendern immer auf die mittlere (effektive) Leistung beziehen. Dies ist bei analogen TV-Sendern nicht der Fall. Dort gibt man die größte auftretende Leistung, nämlich die „Synchronspitzenleistung“ an, also die Leistung mit 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).



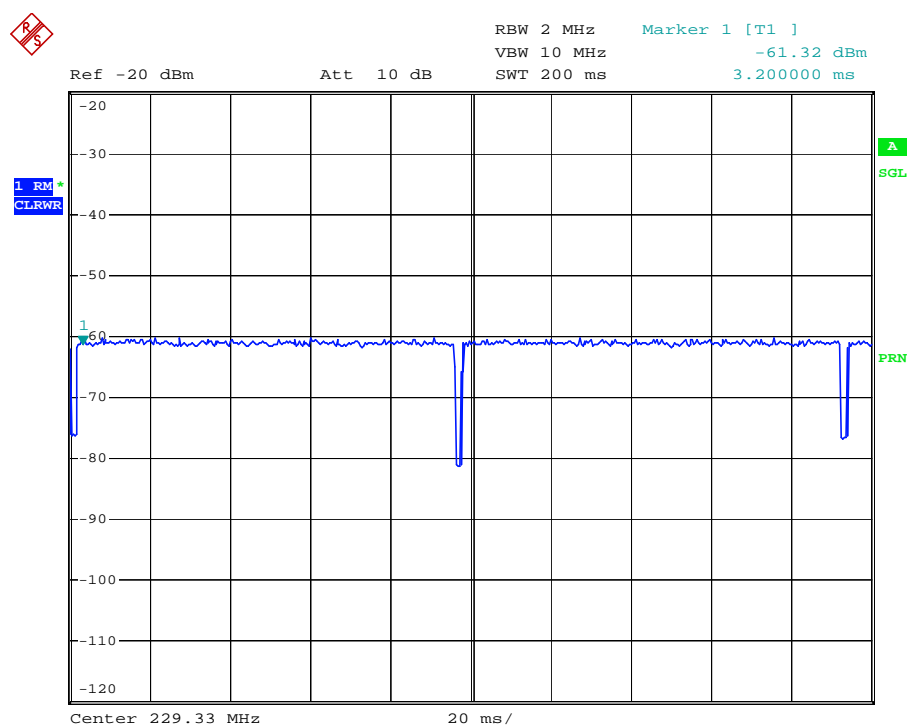
Date: 13.JAN.2005 16:18:05

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 μ s 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.

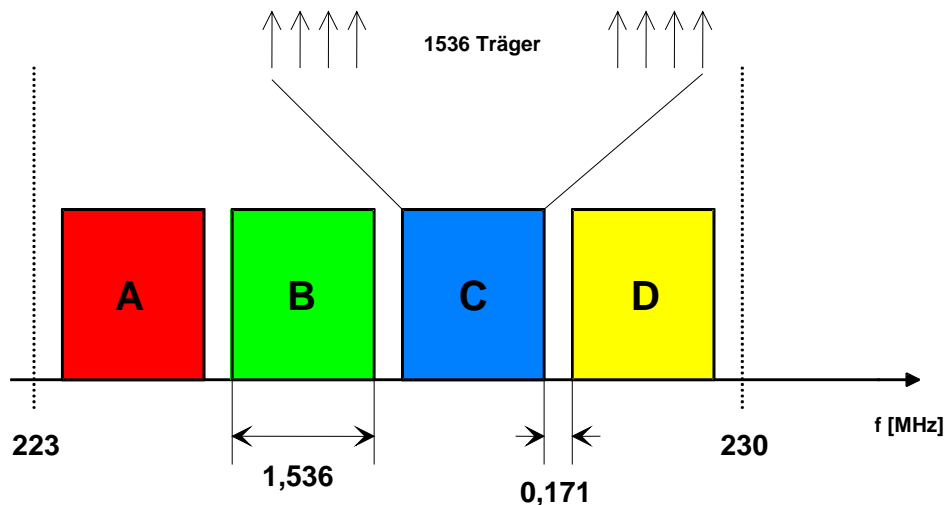


Bild I.2.7: Belegung des Kanals 12 mit vier DAB-Blöcken

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.

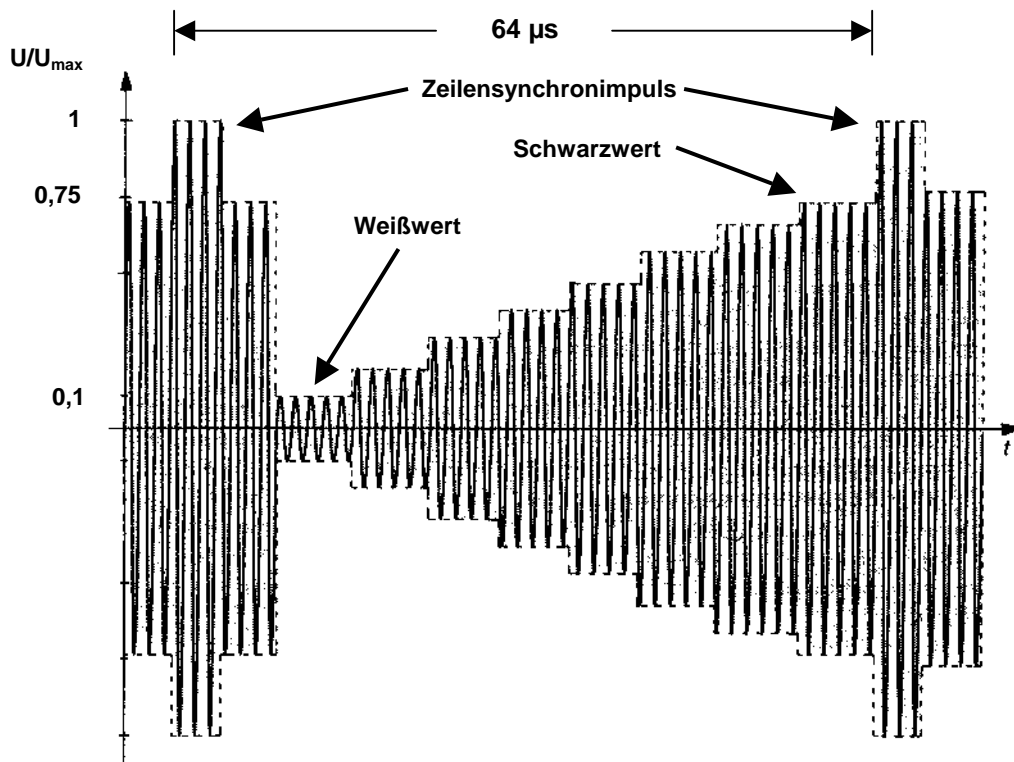


Bild I.2.8: Modulation des Bildträgers durch das BAS-Signal

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 schwarzem Bildinhalt. Schön zu sehen ist auf dem rechten Ausschnitt, dass ein weißer Bildinhalt 20 dB weniger Momentanleistung bedeutet, als beim Zeilensynchronimpuls abgestrahlt wird.

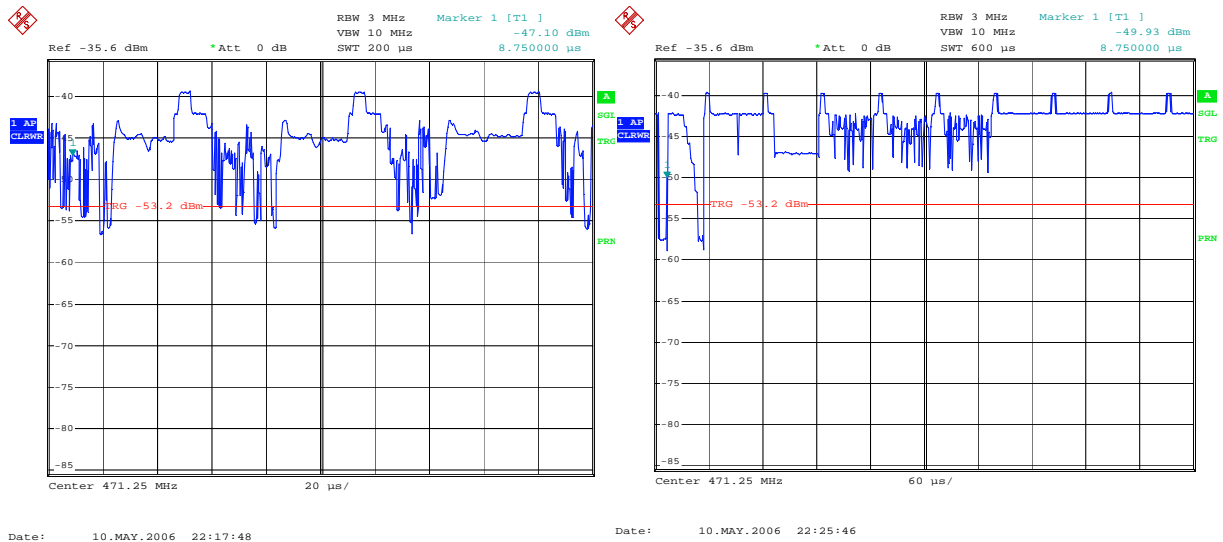


Bild I.2.9: Zwei real gemessene Zeitverläufe der Sendeleistung eines analogen TV-Bildsignals

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).

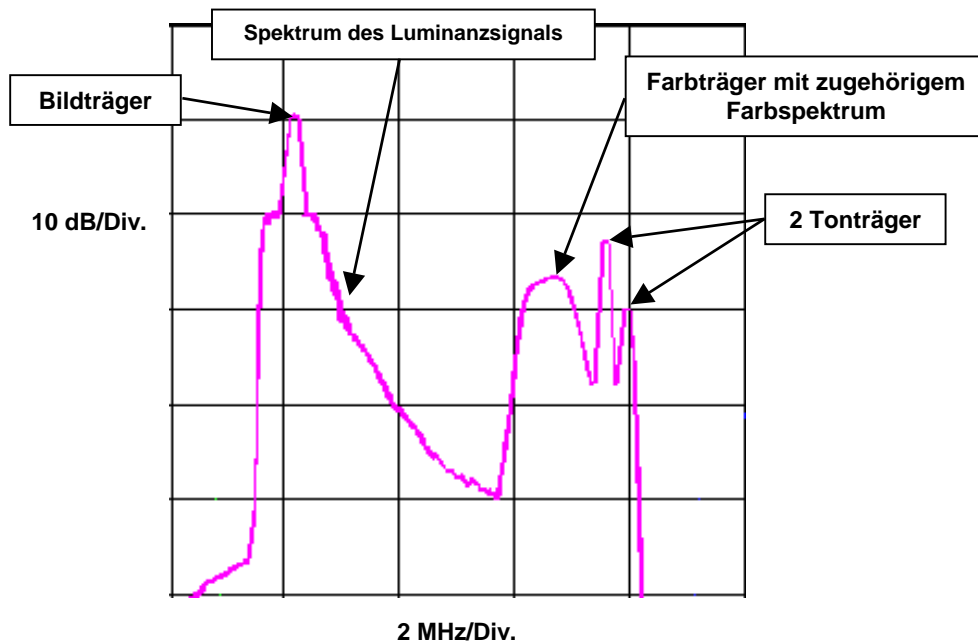


Bild I.2.10: Prinzipielles Aussehen des Spektrums eines analogen TV-Signals

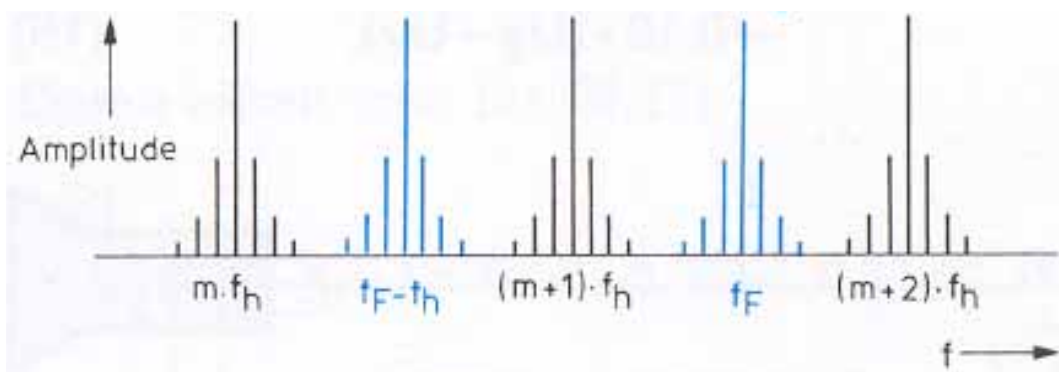


Bild I.2.11: Prinzip der spektralen Verschachtelung von Luminanz- und Chrominanzsignal (f_F = Farbhilfsträgerfrequenz; f_h = Zeilenfrequenz) [MÄU 98]

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.

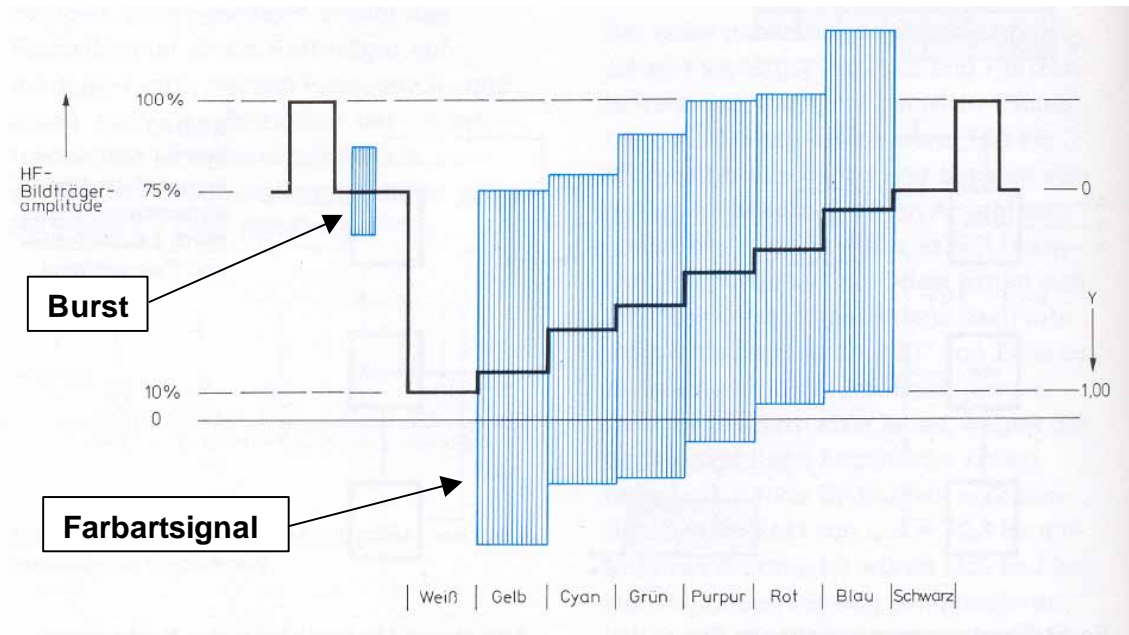


Bild I.2.12: Ideales FBAS-Signal zur Darstellung einer Farbbalkenfolge [MÄU 98]

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 Zweitonsprogramm (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 analoges 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.

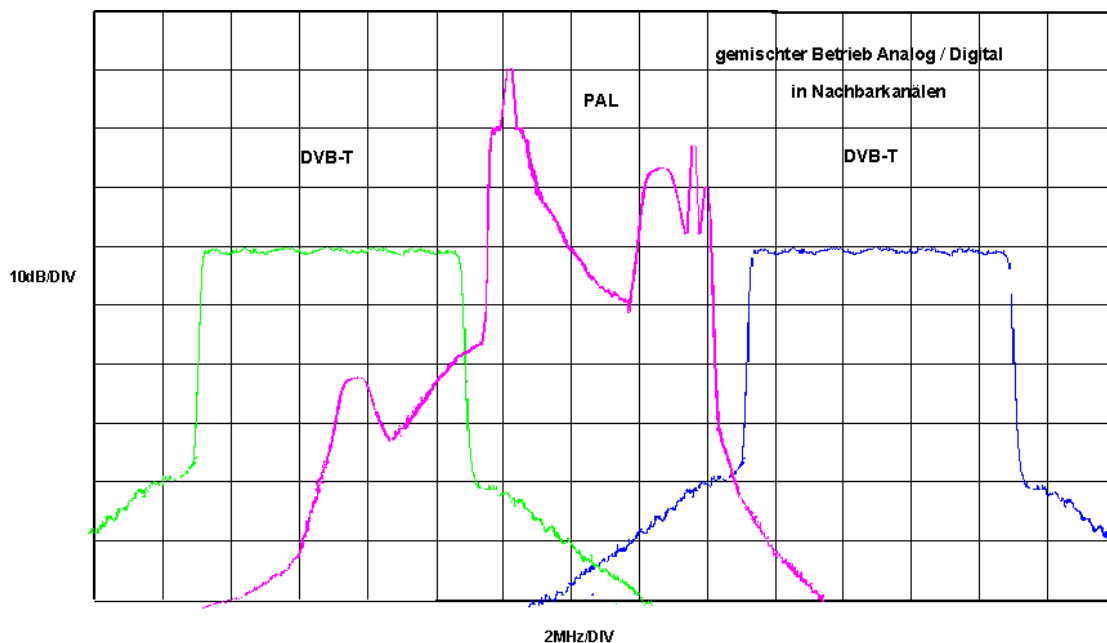


Bild I.2.13: Spektrum eines analogen TV-Signals, eingebettet zwischen zwei DVB-T-Spektren

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).

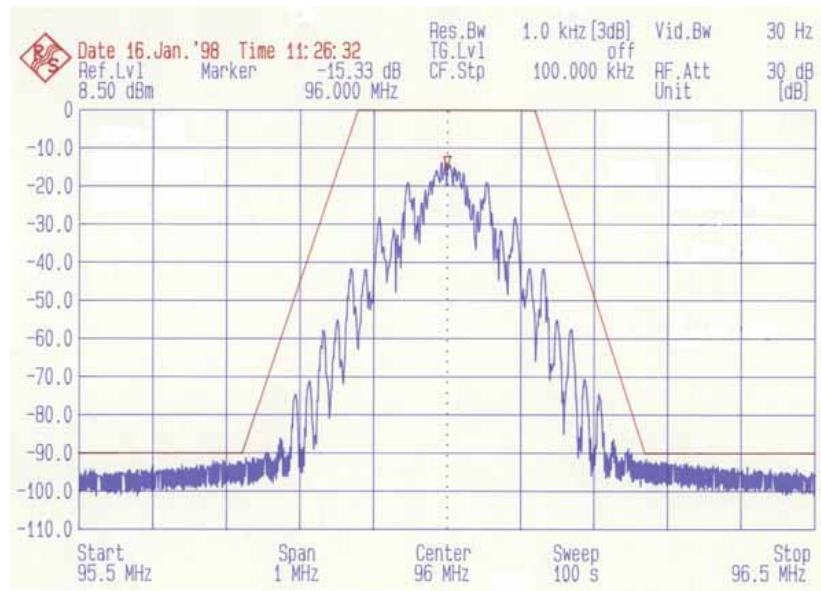


Bild I.2.14: Spektrum eines UKW-Stereosignals (Mit freundlicher Genehmigung der Firma Rohde & Schwarz)

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 Funkshadow eines Hindernisses erreichen 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 immenssem 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 Areals 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].

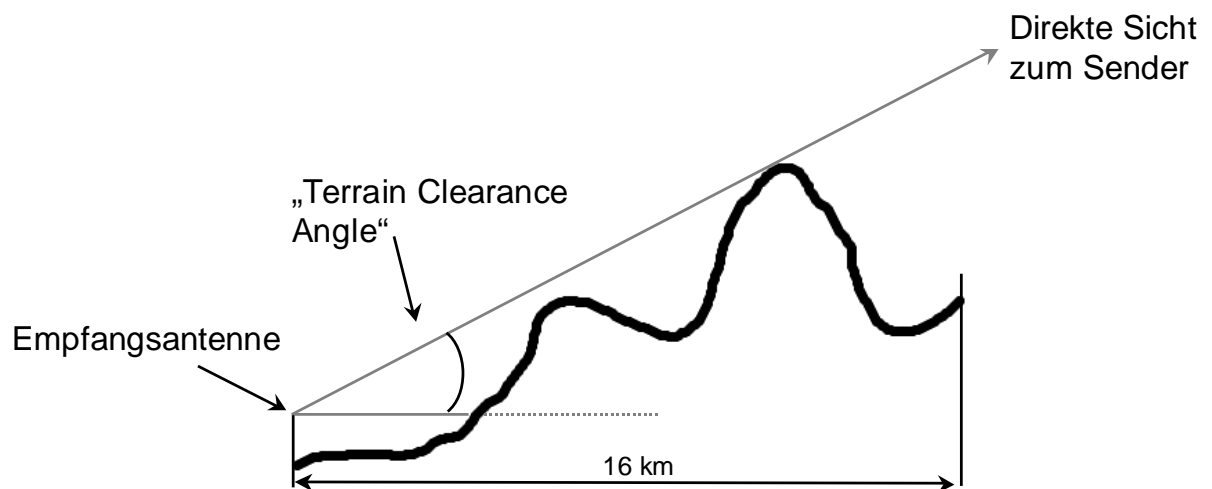


Bild I.3.1: Bedeutung „Clearance Angle“ (Freiwinkel)

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.

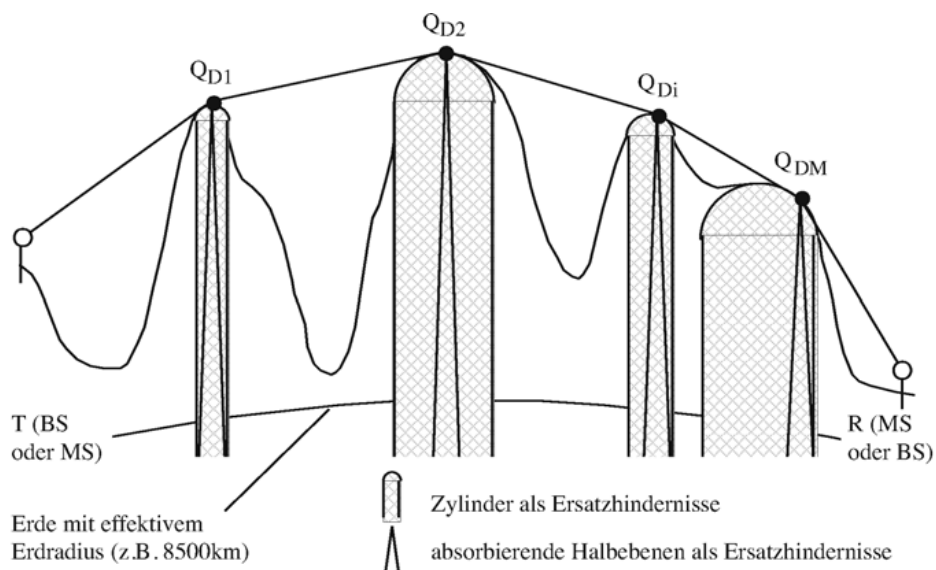


Bild 1.3.2 Geländeprofil zwischen Sender und Empfänger und Ersatzhindernisse (Halbebenen für Multiple-knife-edge-Modelle, Zylinder für Cascaded-cylinder-Modelle)

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.

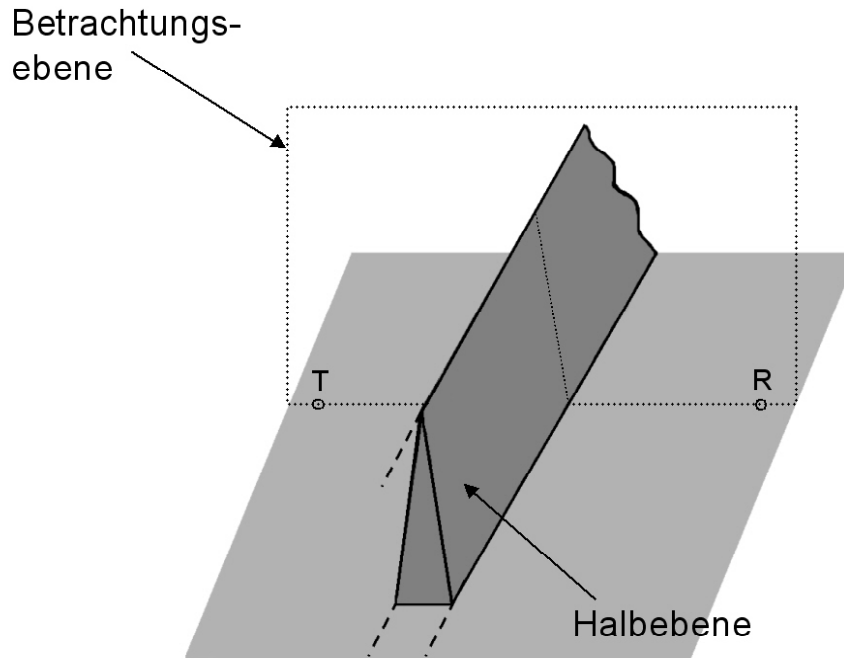


Bild I.3.3 Bedeutung einer Halbebene als Ersatzhindernis

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

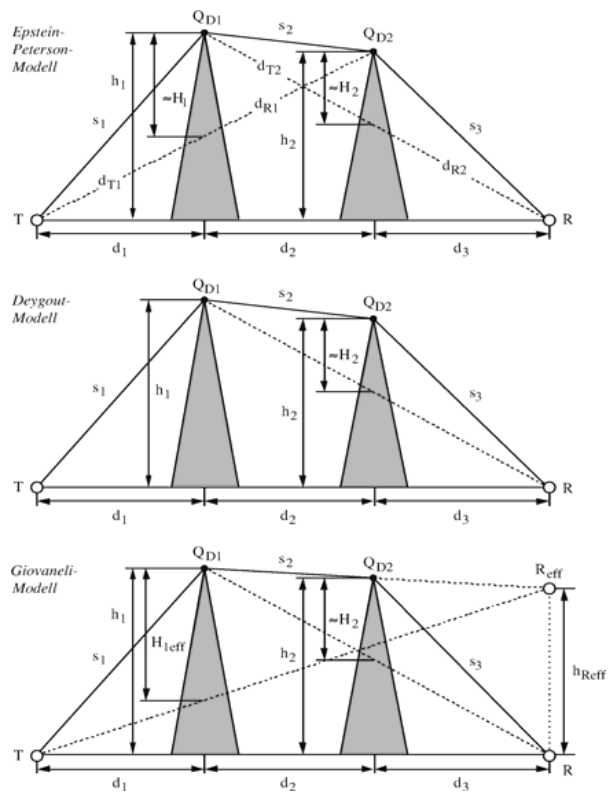


Bild I.3.4 Geometrie für die Multiple-knife-edge-Modelle nach Epstein u. Peterson [EPS 53], Deygout [DEY 66], [DEY 91] und Giovanelli [GIO 84] am Beispiel der Beugung an zwei absorbierenden Halhebeneen

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.

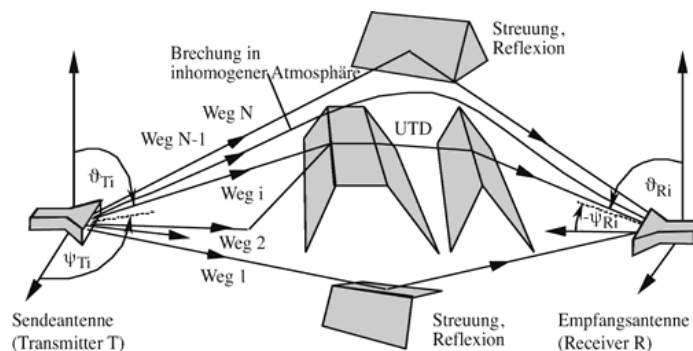


Bild I.3.5: Mehrwegeausbreitung und Deutung einzelner Übertragungswege als Strahlenbahnen

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 Polarisierung der Welle verändert. Eventuell muss der einzelne Strahl auch in mehrere aufgespalten werden. Dies ist für die Reflexion/Transmission unmittelbar ersichtlich. Bei der Beugung muss ein eintreffender Strahl im Prinzip sogar in unendlich viele Strahlen aufgespalten 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 Funkanlagen, die gewerblichen Zwecken dienen oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden. Die Funkanlagen 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 (Gesamtmission) 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 Auflösungsbandbreite 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 Auflösungsbandbreite und anschließender Hochrechnung) vergleichbare Ergebnisse liefern wie spektrale Messungen mit korrekter Auflösungsbandbreite. 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 Fernseh Rundfunksender 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).

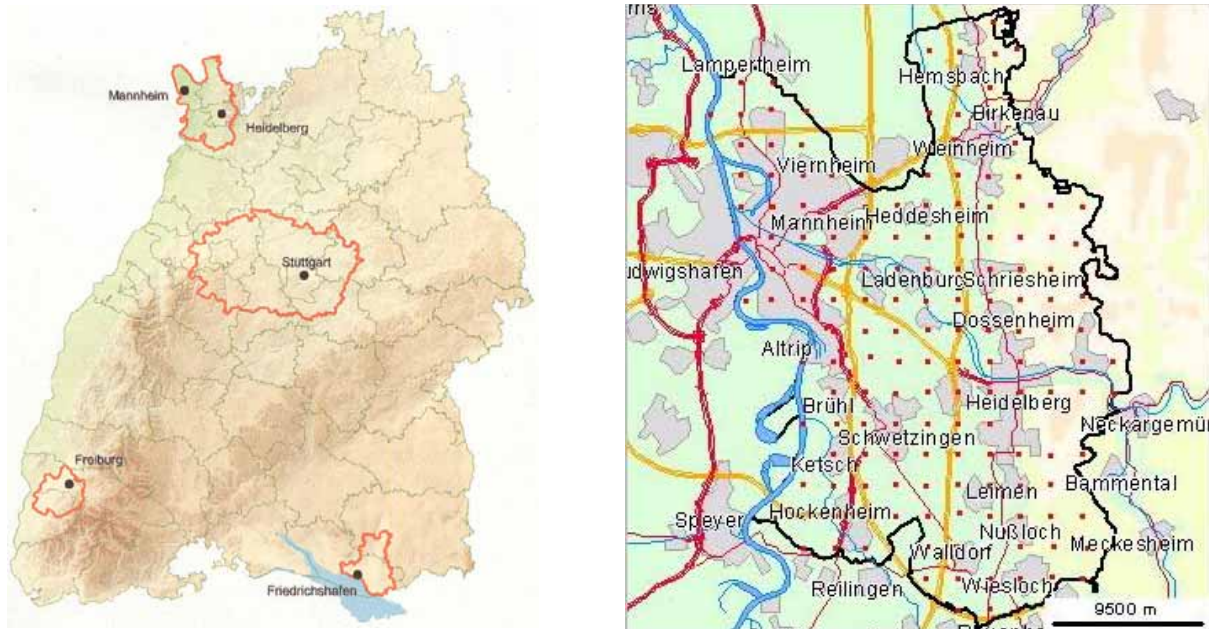


Bild I.5.1: Die vier Untersuchungsgebiete (links) und das Messpunktraster im Untersuchungsgebiet "Heidelberg/Mannheim" (rechts)

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).

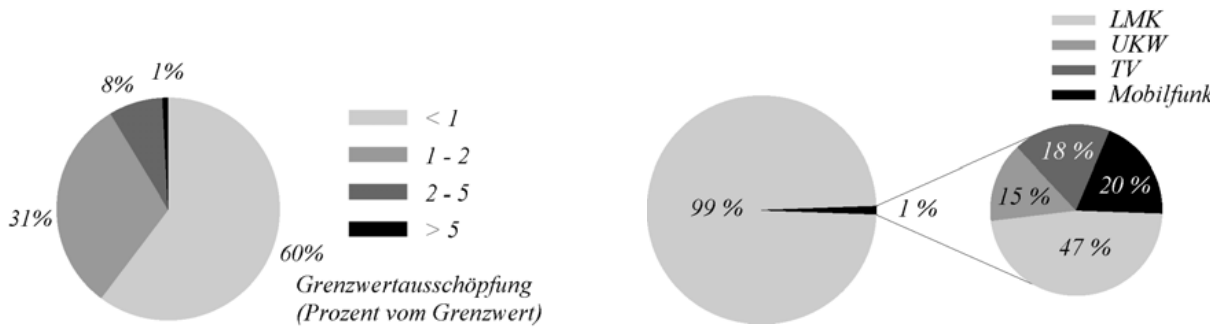


Bild I.5.2: Verteilung der Summenimmission (prozentuale Angabe bezogen auf die elektrische Feldstärke) aller Messpunkte (links) und Anteile der einzelnen Funkdienste an der mittleren Summenimmission (1 %)

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 außerhalb im Mittel etwas größere Immissionen durch Rundfunk und TV feststellbar sind, als innerhalb von geschlossener Bebauung (Bild I.5.3).

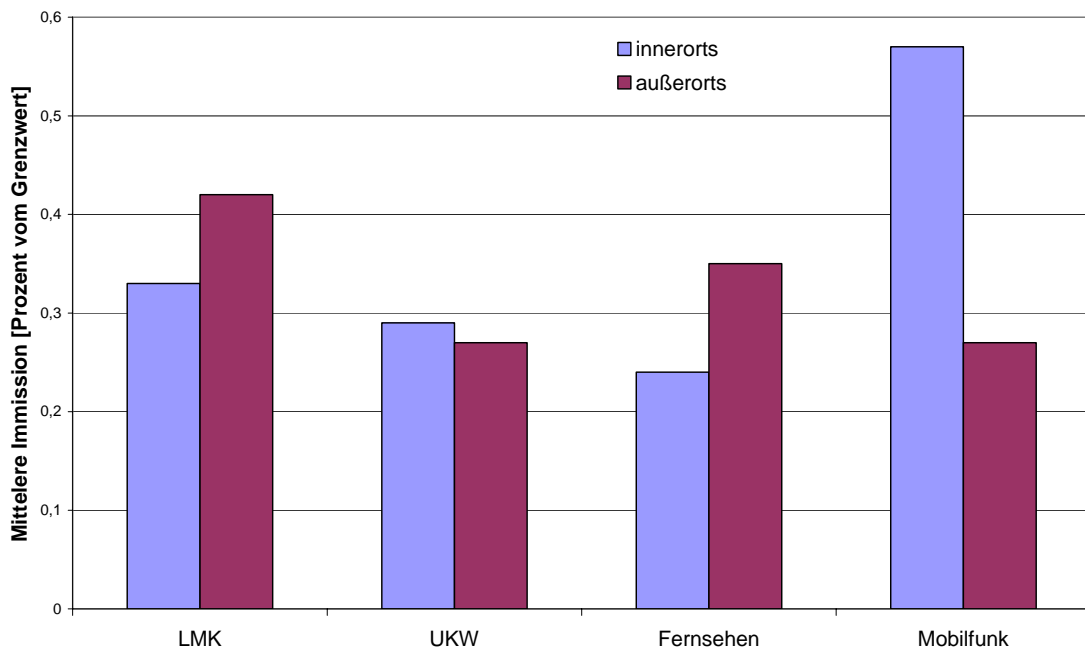


Bild I.5.3: Mittlere Immission der verschiedenen Funkdienste innerorts und außerorts im Vergleich (in % vom Grenzwert bezogen auf die elektrische Feldstärke)

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.

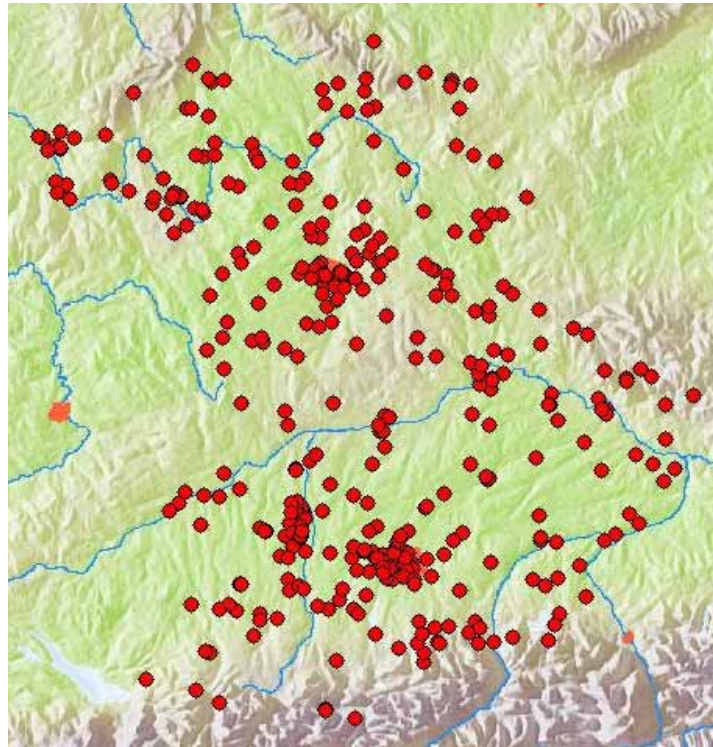


Bild I.5.4: EMF-Monitoring Bayern: Verteilung der 400 Messpunkte

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.

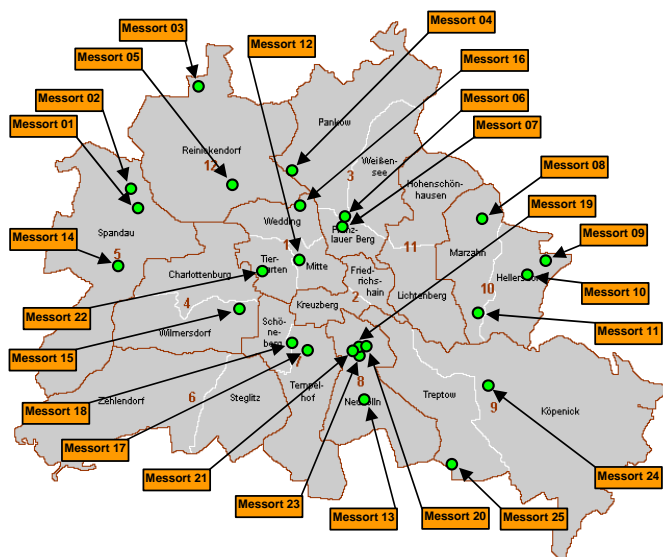


Bild I.5.5: EMF-Messprojekt Berlin: Verteilung der Messorte auf das Stadtgebiet

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 Fernsehrundfunksendern 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 Fernsehrundfunksender (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.

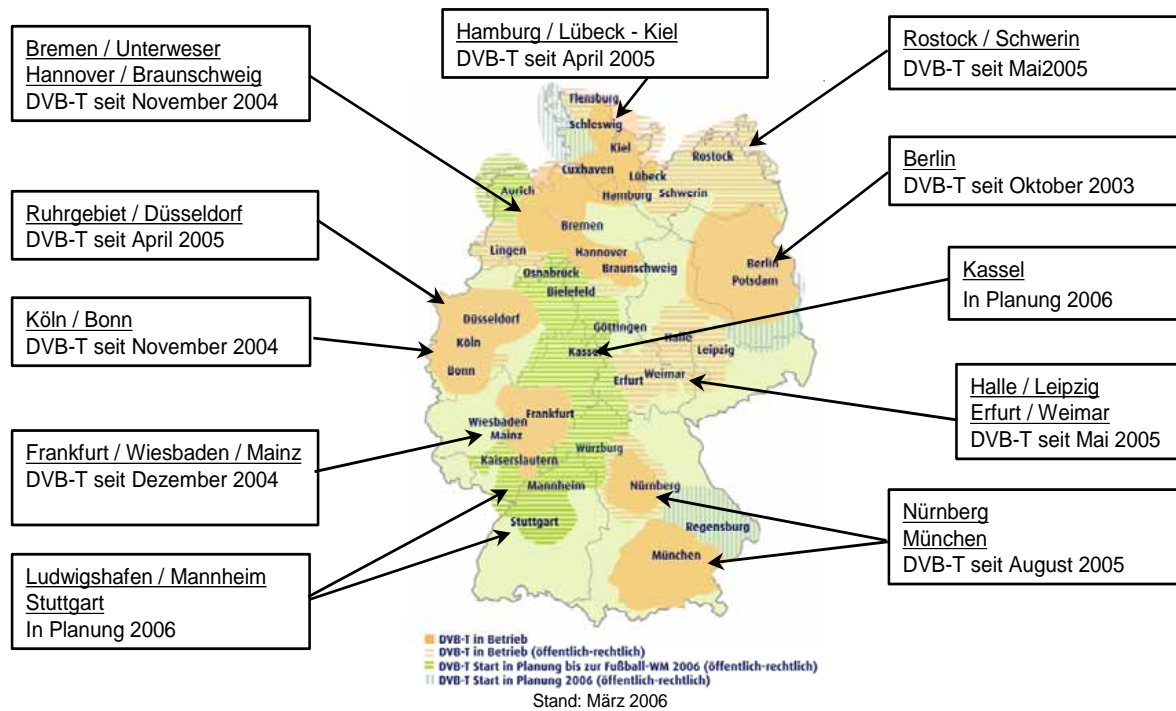


Bild I.6.1: Regionen und Zeitpläne für die Umstellung auf DVB-T in Deutschland, Stand März 2006 (siehe [UEB])

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.

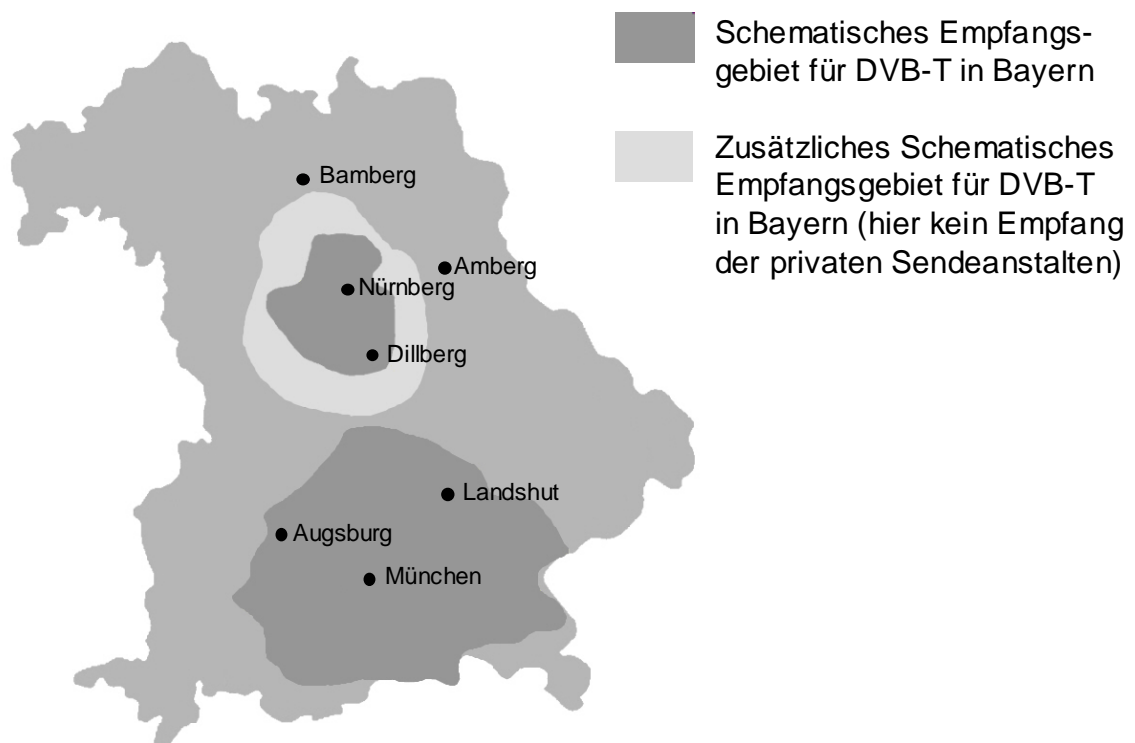


Bild I.6.2: Bundesland Bayern mit den schematischen Empfangsgebieten für DVB-T in den Regionen Nürnberg und München ab 31. Mai 2005

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.

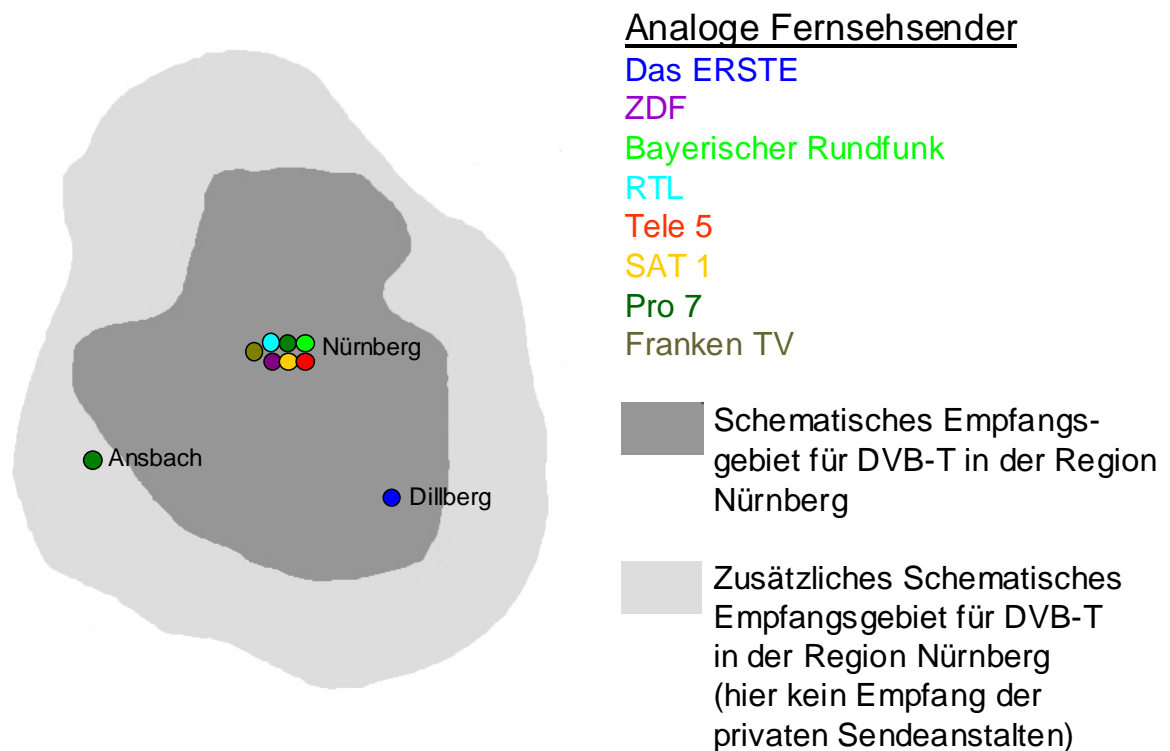


Bild I.6.3: Analoges Sendernetz VOR der Umstellung auf Digital-Fernsehen in Nürnberg; für die öffentlich rechtlichen Programme sind nur die Grundnetzsender dargestellt

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.

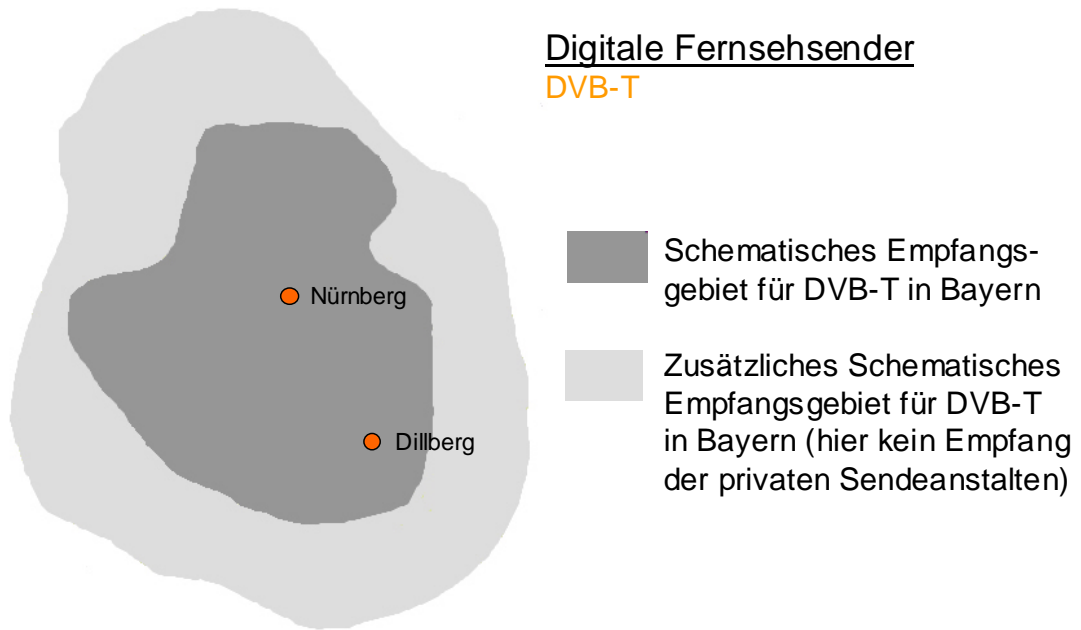


Bild I.6.4: Sendernetz NACH der Umstellung auf Digital-Fernsehen in der Region Nürnberg

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)
Das Erste®	ZDF	BRUNDEUTSCHES FERNSEHEN	RTL	SCT 1	TELE 5	
PHOENIX	3sat ZDF Infokanal	alpha www.br-alpha.de	RTL	7	EUROSPORT	
arte	KiKA ZDF dokukanal	SÜDWEST Fernsehen	VOX	G	FrankenTV	
	ZDF digitext	hr hessen fernsehen	super DIECKMANN	N24		

* 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.

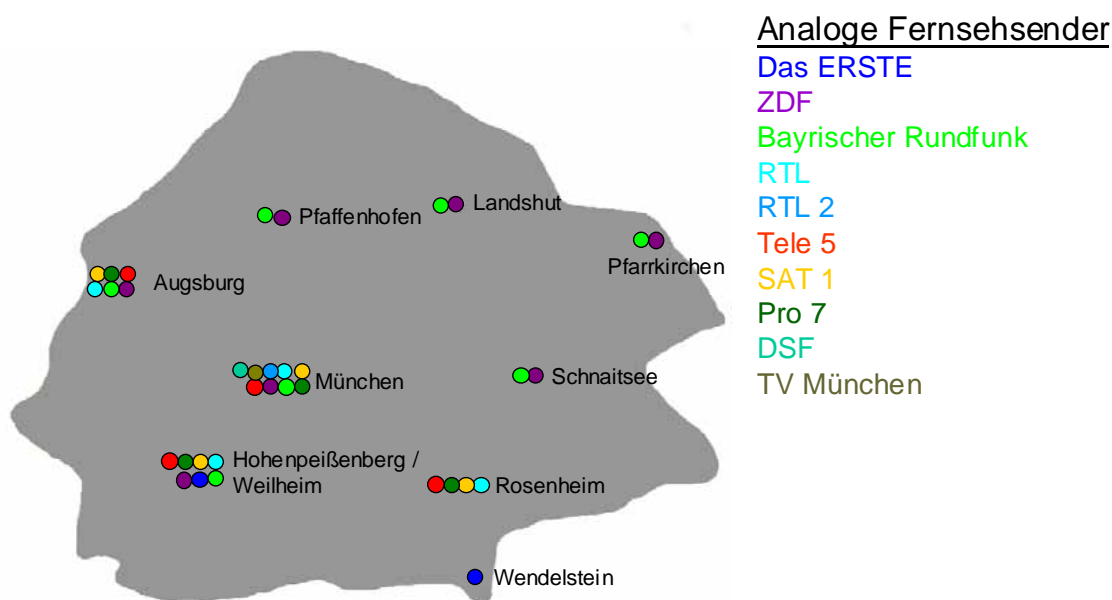


Bild I.6.6: Analoges Sendernetz VOR der Umstellung auf Digitales terrestrisches Fernsehen in der Region München, für öffentliche rechtliche Programme sind nur die Grundnetz-sender dargestellt

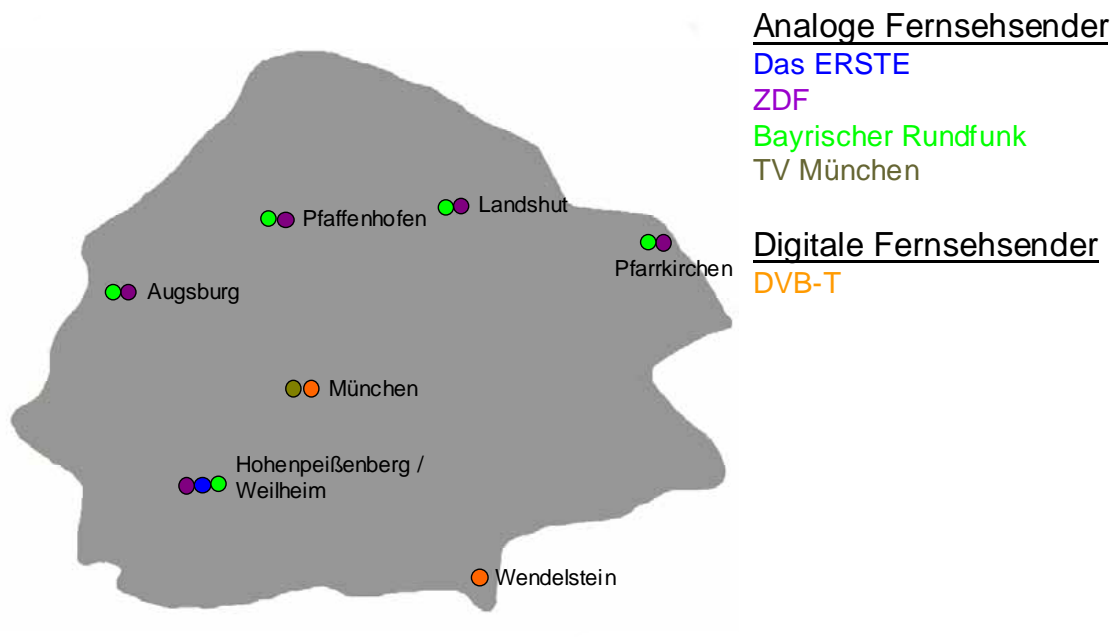


Bild I.6.7: Sendernetz NACH der Umstellung auf Digitales terrestrisches Fernsehen in der Region München, für öffentlich rechtliche Programme sind nur die Grundnetzsender dargestellt

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-Mobile 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.	Spitzen- leistung ERP [kW]	mittlere Leistung ERP [kW]	Technik	Anzahl d. Progr.	Spitzen- leistung 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.

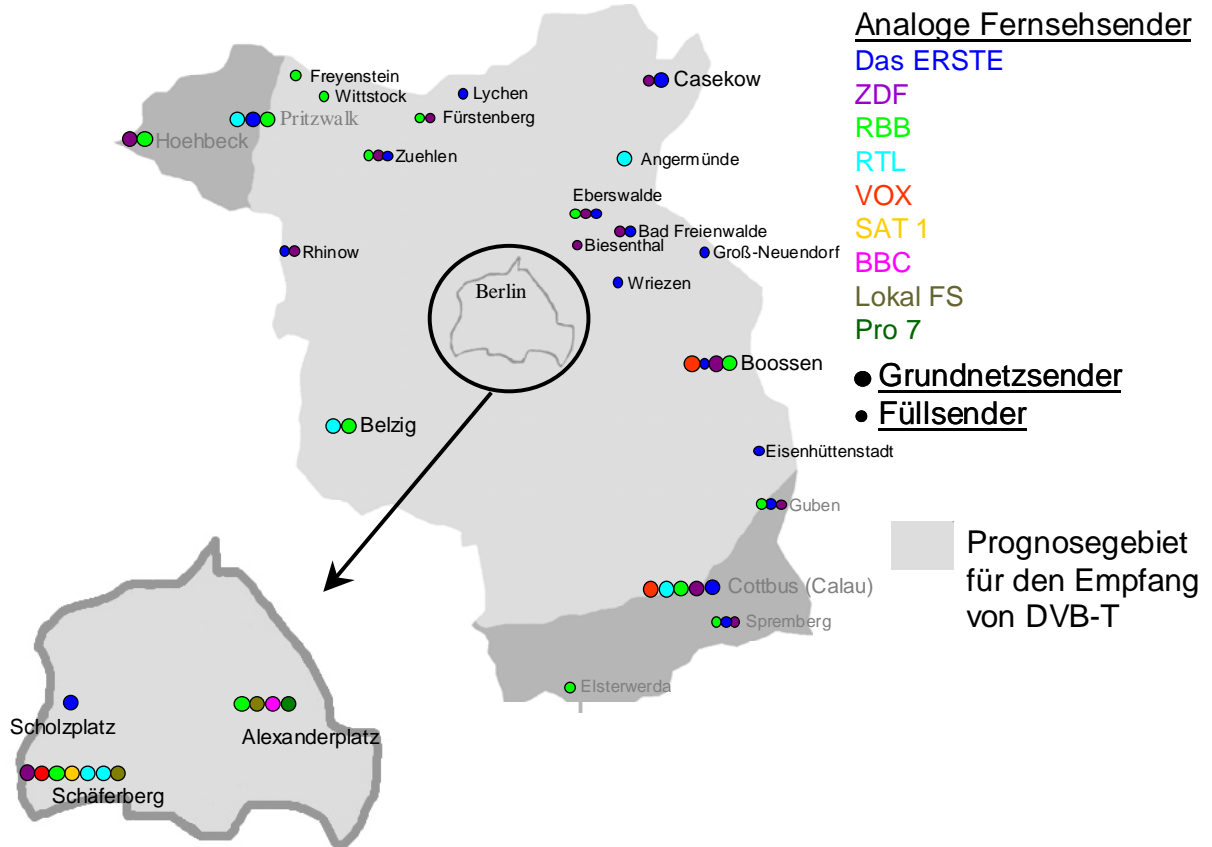


Bild I.6.9: Analoges Sendernetz VOR der Umstellung auf digitales terrestrisches Fernsehen in der Region Berlin / Brandenburg

Das obige Bild zeigt wieder sehr deutlich den Unterschied zwischen der Fernsehübertragung der privaten Programmanbieter im Gegensatz zu der 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.

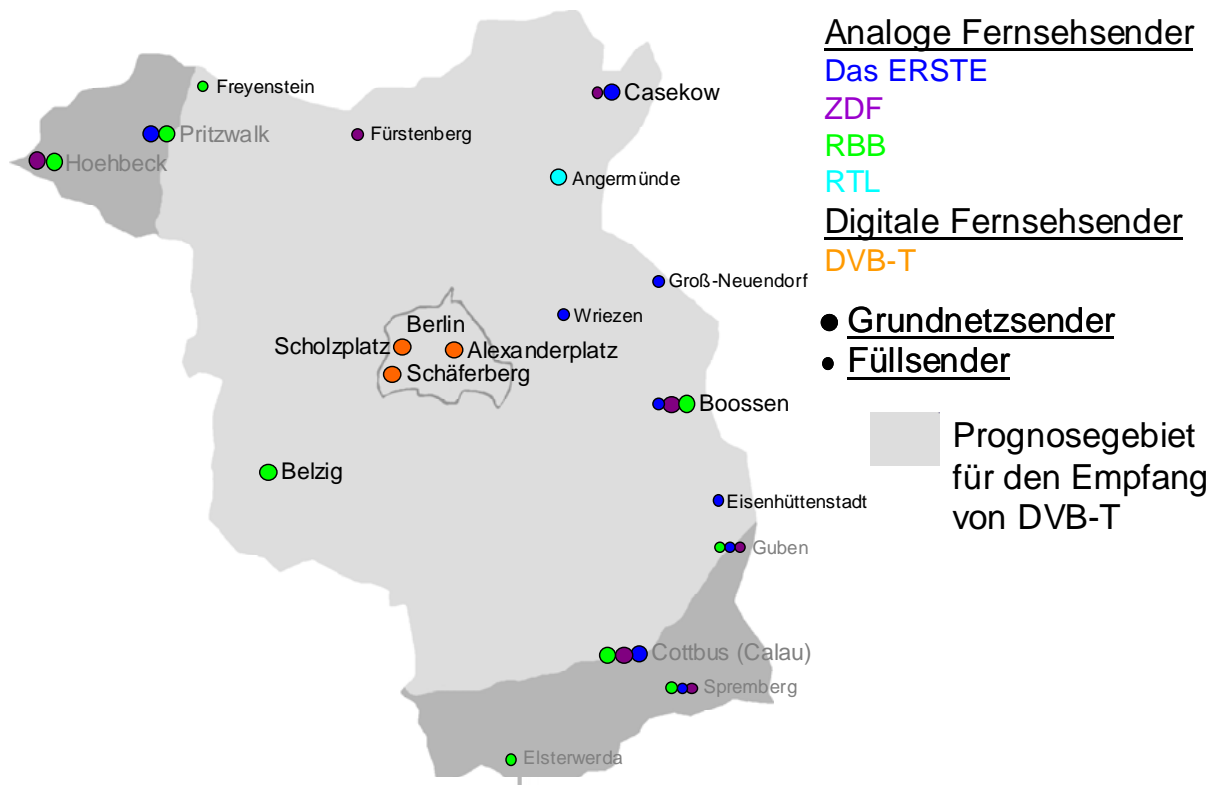


Bild I.6.10: Sendernetz NACH der Umstellung auf digitale terrestrische Fernsehübertragung in der Region Berlin / Brandenburg

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 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.

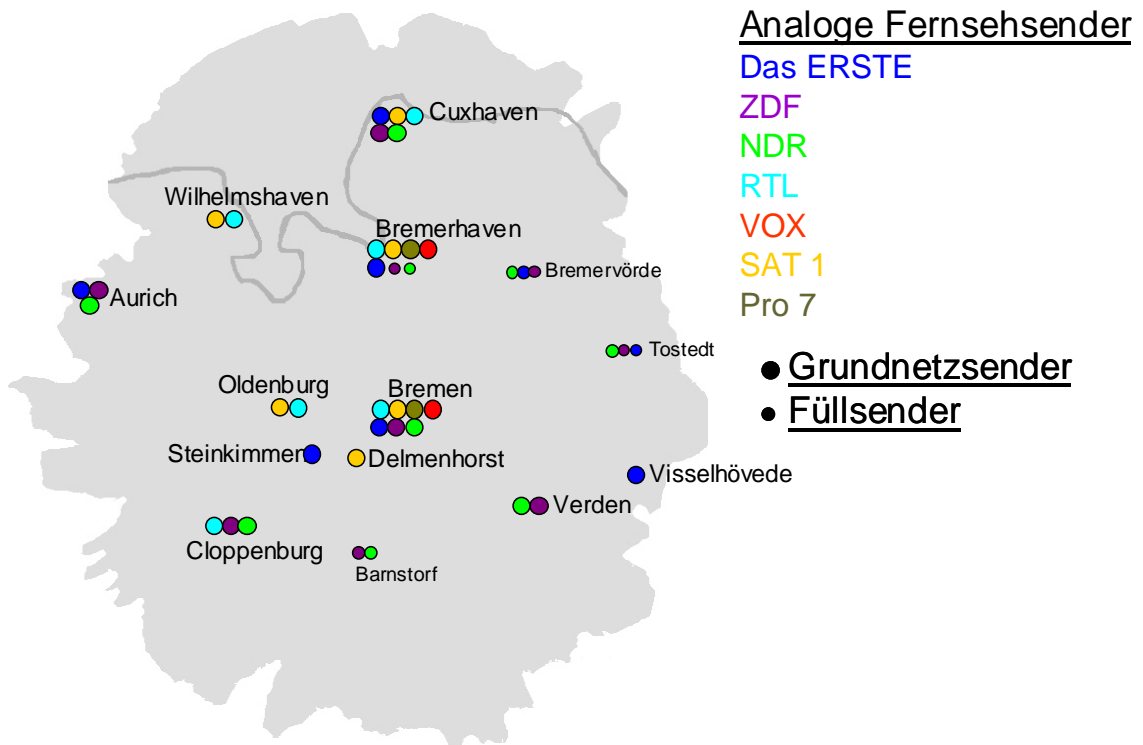


Bild I.6.13: Analoges Sendernetz VOR der Umstellung auf digitale terrestrische Übertragung in der Region Bremen / Unterweser

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

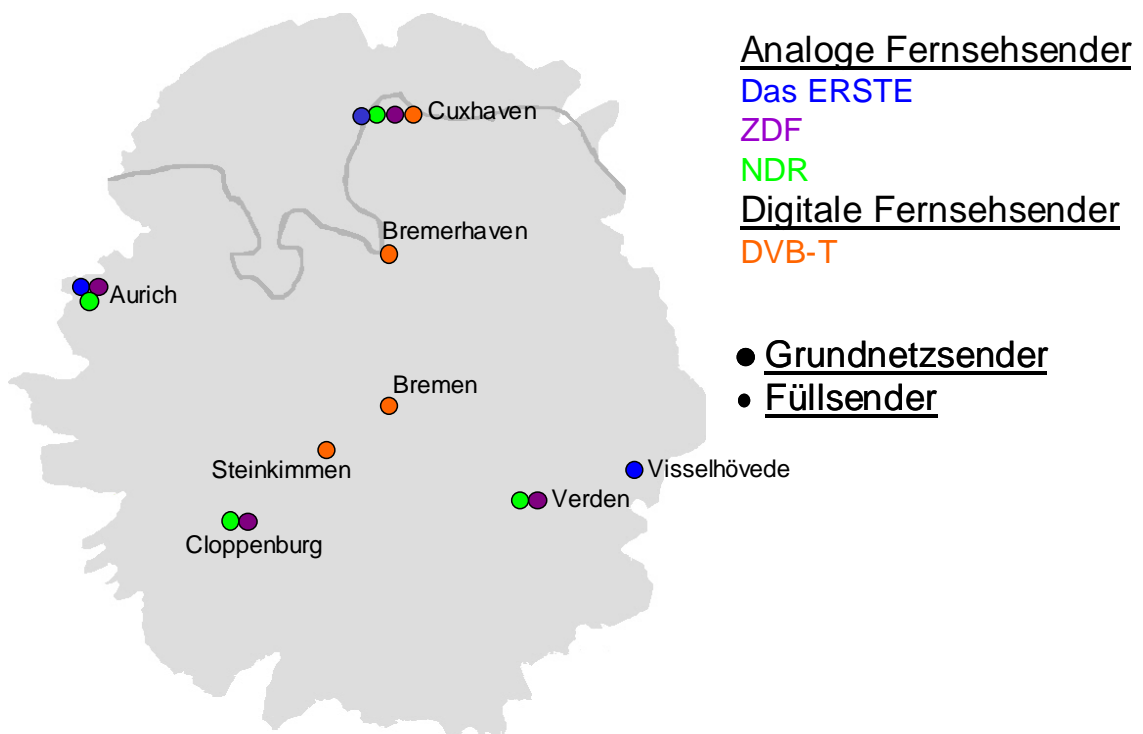




Bild I.6.14: Sendernetzverteilung NACH der Umstellung auf digitale terrestrische Übertragung in der Region Bremen / Unterweser, Dezember 2004

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				
NDR mit sportblitz		HR mit Hamburg Journal				
		MDR mit Nord Magazin				
		WDR mit Schleswig Holstein Magazin			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.

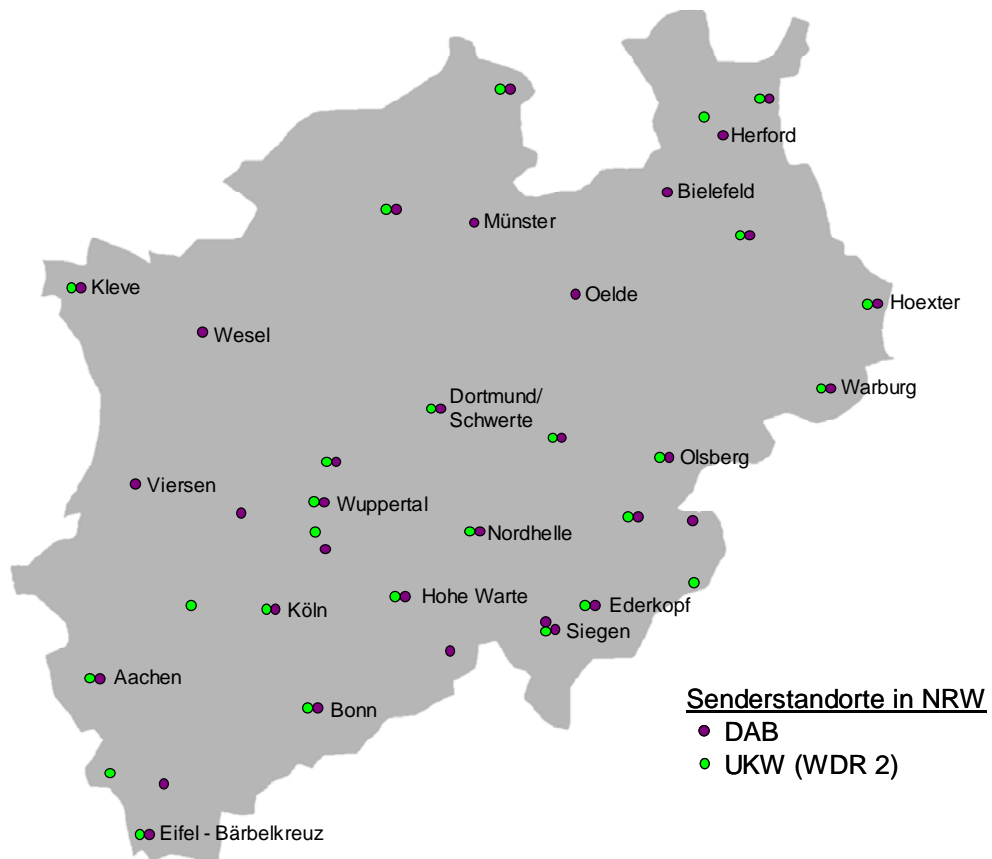


Bild I.6.17: Vergleich der Senderstandorte für das landesweite Ensemble von DAB und für die analoge Verbreitung von WDR2 über UKW in Nordrhein-Westfalen

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.

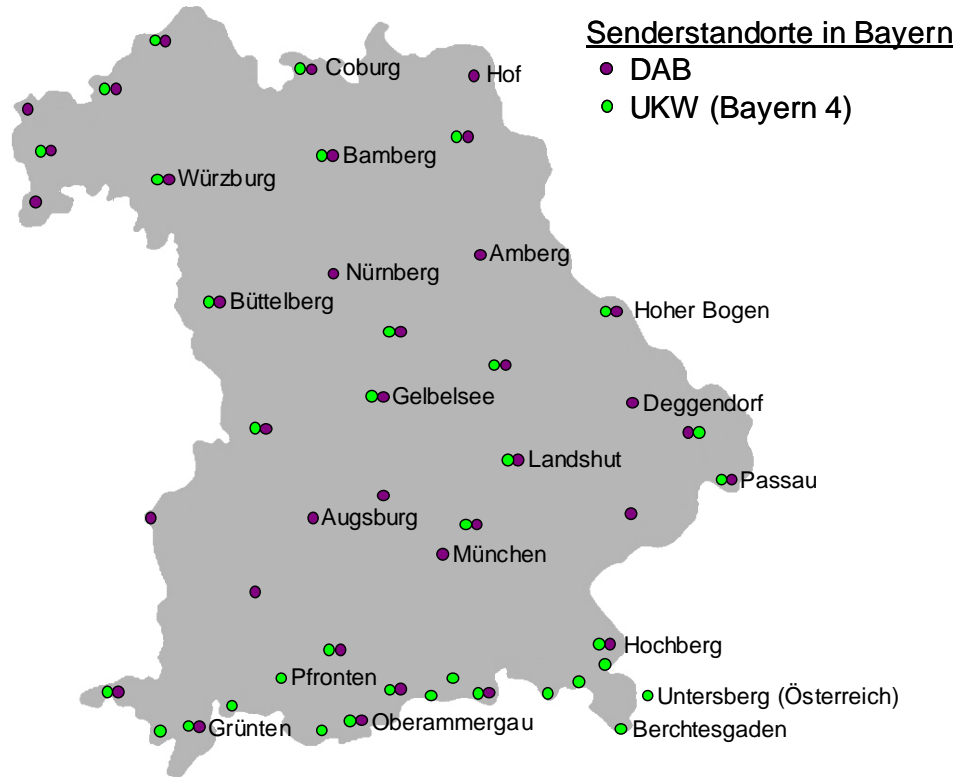


Bild I.6.18: Vergleich der Senderstandorte für das landesweite Ensemble von DAB und für die analoge Verbreitung von Bayern 4 Klassik über UKW in Bayern.

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.