

Abschlußbericht zu

**„Untersuchung zur Implementierung eines
digitalen Übertragungssystem auf OFDM-Basis
im UKW-Frequenzbereich“**

Wolfstein, 17.11.2005

Verfasser: Frank Bernhardt, FH Kaiserslautern

Im Auftrag der technischen Kommission der Landesmedienanstalten Deutschlands

Projektpartner: Landesanstalt für Medien und Kommunikation Rheinland-Pfalz

Prof. Dr. Andreas Steil, FH Kaiserslautern

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Auswahl verschiedener System-Modi.....	5
2.1	Technische Anforderungen an das System	5
2.2	Betrachtete Empfangssituationen	6
2.3	Modulation der Unterträger	7
3	Berechnung der System-Parameter	8
3.1	Wahl des Unterträgerabstands	8
3.2	Berechnung der übrigen Systemparameter.....	13
4	Mindestfeldstärken und Versorgungsreichweiten	16
4.1	Die eigentliche Mindestfeldstärke	16
4.2	Die Mindestfeldstärke für die Funknetzplanung	18
5	Spektrumsmasken	19
6	Schutzabstände für die Funknetzplanung.....	21
6.1	Benötigte Leistungsdichtespektren	22
6.2	Schutzabstände.....	26
6.2.1	Schutz des FM-Rundfunks.....	27
6.2.2	Schutz der 4-QAM-Variante.....	30
6.2.3	Schutz der 16-QAM-Variante.....	32
6.2.4	Schutz der 64-QAM-Variante.....	34
6.3	Beispiele für die Versorgungsprognose	36
6.3.1	Vergleich der UKW-FM mit den drei digitalen Systemen.....	36
6.3.2	Vergleich der UKW-FM mit der 16-QAM-Variante in verschiedenen Empfangssituationen.	37
6.3.3	Interferenzberechnungen zwischen FM und der 16-QAM-Variante.....	38

1 Einleitung

7 Fazit41

8 Literatur.....43

1 Einleitung

Inhalt des vorliegenden technischen Berichts ist die Dimensionierung und Bewertung eines OFDM-Systems ähnlich dem DRM-Standard im UKW-Band. Zunächst wird geklärt, welche Anforderungen an ein solches System gestellt werden müssen. Nachdem die Voraussetzungen geklärt sind, werden wichtige Systemparameter eines solchen Systems bestimmt. Die gewählte Vorgehensweise zur Bestimmung der Parameter ist im vorliegenden Bericht vollständig dargestellt. Um die Einsatzmöglichkeiten abschätzen zu können und Versorgungsprognosen durchführen zu können, werden die Mindestfeldstärken verschiedener Empfangssituationen berechnet. Mit den Frequenzmasken der verschiedenen Sendemodi und mit den typischen Leistungsdichtespektren werden Vorschläge für die gegenseitigen Schutzabstandskurven der verschiedenen Systeme einschließlich UKW-FM definiert. Abschließend wird in Kapitel 7 eine allgemeine und umfassende Analyse des Systems bezüglich der Anforderungen durchgeführt.

Die detaillierten Herleitungen zu den im vorliegenden technischen Bericht angegebenen Zusammenhänge können der Diplomarbeit "Untersuchung zur Implementierung eines digitalen Übertragungssystem auf OFDM-Basis im UKW-Frequenzbereich" entnommen werden.

2 Auswahl verschiedener System-Modi

2.1 Technische Anforderungen an das System

Für die technische Untersuchung relevante Voraussetzungen für das digitale System sind:

- Das System sollte die Möglichkeit zum Aufbau von Gleichwellennetzen besitzen.
- Das System sollte für den mobilen Empfang vorbereitet sein. Die maximale Empfängergeschwindigkeit wird auf 300 km/h festgesetzt.
- Die Nutzbandbreite sollte 100 kHz betragen.
- Die Datenrate sollte für ein Programm in hörbar besserer Audioqualität als beim UKW-FM-Rundfunk ausreichen.
- Bestehende UKW-FM-Versorgungen dürfen nicht gestört werden.

2.2 Betrachtete Empfangssituationen

Bei der Ermittlung der Mindestfeldstärken für die Funknetzplanung werden verschiedene Empfangssituationen berücksichtigt:

- Stationärer Empfang (SE):
 - Feste Antenne mit 6dB Antennengewinn auf dem Dach in 10m Höhe.
 - 50% Ortswahrscheinlichkeit

- Portabler Empfang Outdoor (PEO):
 - Antennenhöhe 1,5 m über dem Erdboden.
 - 95% Ortswahrscheinlichkeit.
 - Im Freien mit Fußgängergeschwindigkeit.

- Portabler Empfang Indoor (PEI):
 - Antennenhöhe 1,5m über dem Erdboden.
 - 70% Ortswahrscheinlichkeit.
 - Innerhalb eines Gebäudes.

- Mobiler Empfang (ME):
 - Antennenhöhe 1,5m über dem Erdboden.
 - 99% Ortswahrscheinlichkeit.
 - Störung durch ICI.

2.3 Modulation der Unterträger

Für die Untersuchung werden drei Modi eines OFDM-Signals definiert, nämlich eine 4-QAM-Variante, eine 16-QAM-Variante und eine 64-QAM-Variante. Die drei Modi unterscheiden sich in erster Linie durch die Modulationsart der Unterträger. Als Grundlage zur CNR-Bestimmung wird die Union-Bound-Abschätzung für die Urban Area (gleich der Abschätzung für die Rural Area) herangezogen. Zum benötigten CNR wird ein Zuschlag von 3dB addiert, um Verluste durch die „ungenau“ Kanalschätzung und die Implementierung zu berücksichtigen. Die Werte aus *Tab. 1* gelten für eine kodierte Bitfehlerrate von 10^{-4} und einen Faltungscodes der Kodierungsrate $R=1/2$.

Voraussetzungen:			
Modulationsart	4-QAM	16-QAM	64-QAM
Benötigtes CNR am Demodulator [dB]	12	22	30
Implementierungszuschlag [dB]	3	3	3
Benötigtes CNR am Empfängereingang [dB]	15	25	33

Tab. 1 Voraussetzungen für die Auswahl der verschiedenen Modi

3 Berechnung der System-Parameter

Die Berechnung der System-Parameter erfolgt in einem festen Muster. Dieses Muster wird im Folgenden dargestellt.

3.1 Wahl des Unterträgerabstands

Zunächst muss der Unterträgerabstand Δf bestimmt werden. Dieser muss den Voraussetzungen für den mobilen Empfangsfall genügen. Der Unterträgerabstand Δf muss groß genug gewählt werden, um genügend Dopplerverschiebung f_{dmax} zulassen zu können. Im mobilen Empfangsfall ist das *CNR* nicht nur vom thermischen Umgebungsrauschen abhängig, es ist auch abhängig von der Empfängergeschwindigkeit v und der dadurch entstehenden Dopplerverschiebung. Die maximale Dopplerverschiebung f_{dmax} ergibt sich mit der maximalen Empfängergeschwindigkeit v_{max} , mit einer maximalen Unterträgerfrequenz $f_{cmax}=108$ MHz und der Lichtgeschwindigkeit c zu

$$f_{dmax} = f_{cmax} \cdot \frac{v_{max}}{c}, \quad G. 1$$

siehe *Tab. 2*.

v_{max} [km/h]	0	5	30	50	100	130	300
f_{dmax} [Hz]	0	0,5	3	5	10	13	30

Tab. 2 Maximale Dopplerverschiebung

Die Bestimmung des Unterträgerabstands Δf erfolgt grafisch, wie nachfolgend dargelegt. Dabei ist zu beachten, dass zu einem ausgewählten Unterträgerabstand Δf auch eine benötigte Mindestempfangsleistung P_{RXmin} und eine maximal zulässige Empfängergeschwindigkeit v_{max} gehören (siehe Kapitel 4.1). Bei steigender

Empfängergeschwindigkeit v bzw. geringerem Unterträgerabstand Δf steigt der zu berücksichtigende Rauschanteil durch Intercarrierinterferenz. Mit

$$Dopp\left(f_{d\max} \cdot \frac{1}{\Delta f}\right) = \int_{-1}^1 (1 - |\kappa|) \cdot J_0\left(2\pi f_{d\max} \frac{1}{\Delta f} \kappa\right) d\kappa \quad G. 2$$

ergibt sich für den Mindestempfangspegel

$$P_{RX\min} = \frac{100\text{kHz}}{\Delta f} \cdot \frac{P_{ISI} + \Phi_{TH} \cdot \Delta f}{\left(1 + 10^{\frac{CNR}{10\text{dB}}}\right) \cdot Dopp\left(f_{d\max} \cdot \frac{1}{\Delta f}\right) - 1} \quad G. 3$$

Das jeweils benötigte CNR kann aus *Tab. 1* entnommen werden. Die Störleistung durch Intersymbolinterferenz P_{ISI} wird dabei vernachlässigt. Für den Empfänger beim mobilen Empfang (ME) wird von den entsprechenden Kennwerten aus *Tab. 5* ausgegangen. Die thermische Rauschleistungsdichte Φ_{TH} lässt sich mit der Boltzmannkonstante k und den Werten aus *Tab. 5* berechnen durch:

$$\Phi_{TH} = k \cdot \left\{ 290\text{K} + 290\text{K} \cdot \left[10^{\frac{F_K}{10\text{dB}}} - 1 + \frac{10^{\frac{F_V}{10\text{dB}}} - 1}{10^{\frac{-L_K}{10\text{dB}}}} \right] \right\} = 2,10 \cdot 10^{-20} \frac{\text{W}}{\text{Hz}} \quad G. 4$$

Bei der Wahl der Unterträgerabstände Δf wird bereits das minimale Guardintervall T_G von 166,6666 μs berücksichtigt. Dieser Wert entsteht aus der Annahme, dass benachbarte Senderstandorte typischerweise einen Abstand von 60 km aufweisen. Um vernünftige Datenraten realisieren zu können, wird die Dauer des Guardintervall T_G auf Werte von 1/16, 1/8 bzw. 1/4 der Symboldauer festgelegt.

3 Berechnung der System-Parameter

Aus dem Zusammenhang zwischen den Unterträgerabstände Δf und dem benötigten Gesamtempfangspegel P_{RXmin} kann man nun eine Wahl bezüglich des Unterträgerabstands treffen. Die *Abb. 1 – Abb. 3* zeigen den benötigten Gesamt-Mindestempfangspegel P_{RXmin} in Abhängigkeit des Unterträgerabstands Δf für die verschiedenen Modulationsarten:

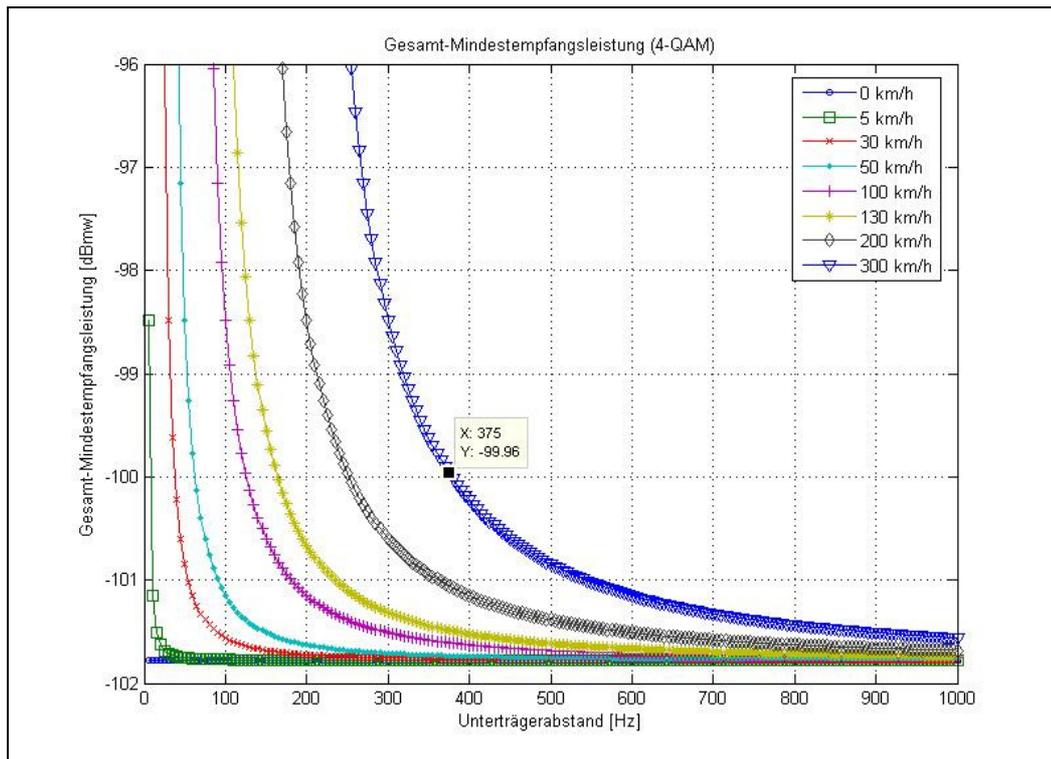


Abb. 1 Mindestempfangsleistung für die 4-QAM

Die Wahl des Unterträgerabstands Δf für die 4-QAM erfolgt nun unter dem Gesichtspunkt, dass die Dauer des Guardintervall T_G $1/16$ der Symboldauer T_S betragen soll. Um dies zu gewährleisten, wird der Wert des Unterträgerabstands Δf auf 375 Hz festgelegt. Dies ermöglicht ein maximale Empfängergeschwindigkeit von 300 km/h.

3 Berechnung der System-Parameter

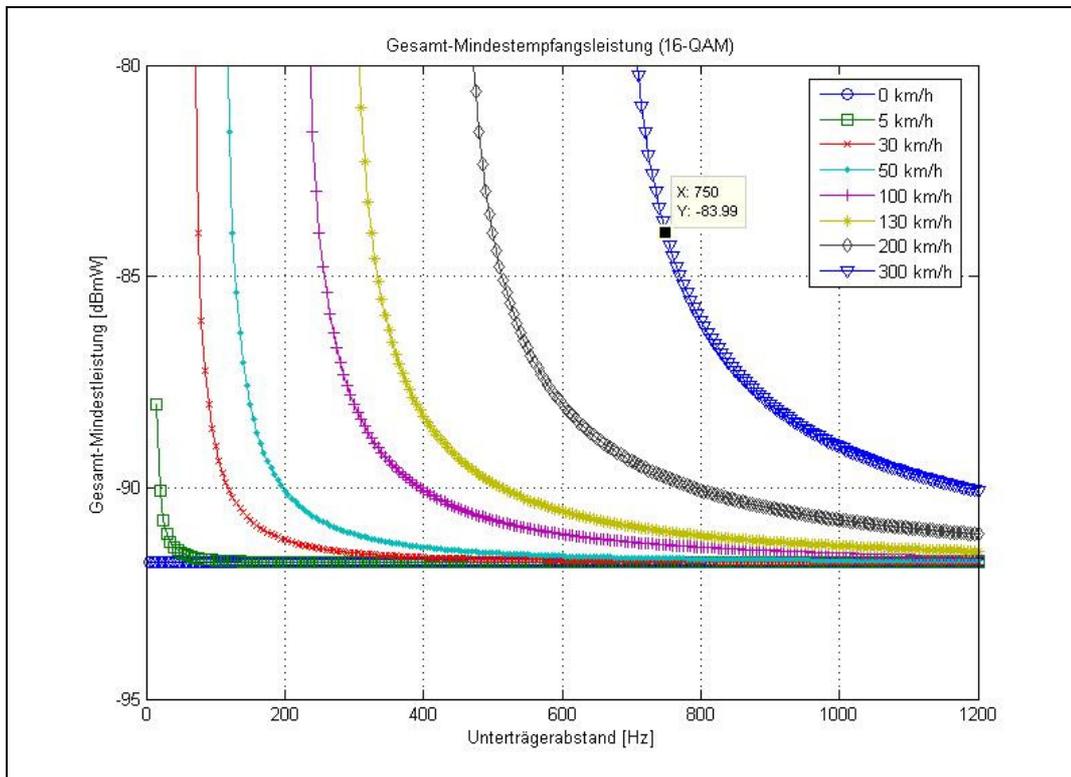


Abb. 2 Gesamt-Mindestempfangsleistung für die 16-QAM

Bei der 16-QAM soll die Dauer des Guardintervall T_G $1/8$ der Symboldauer T_S betragen. Aus diesem Grund wird der Unterträgerabstand Δf auf 750 Hz festgelegt. Dies ermöglicht auch bei der 16-QAM eine maximale Empfängergeschwindigkeit v_{max} von 300 km/h.

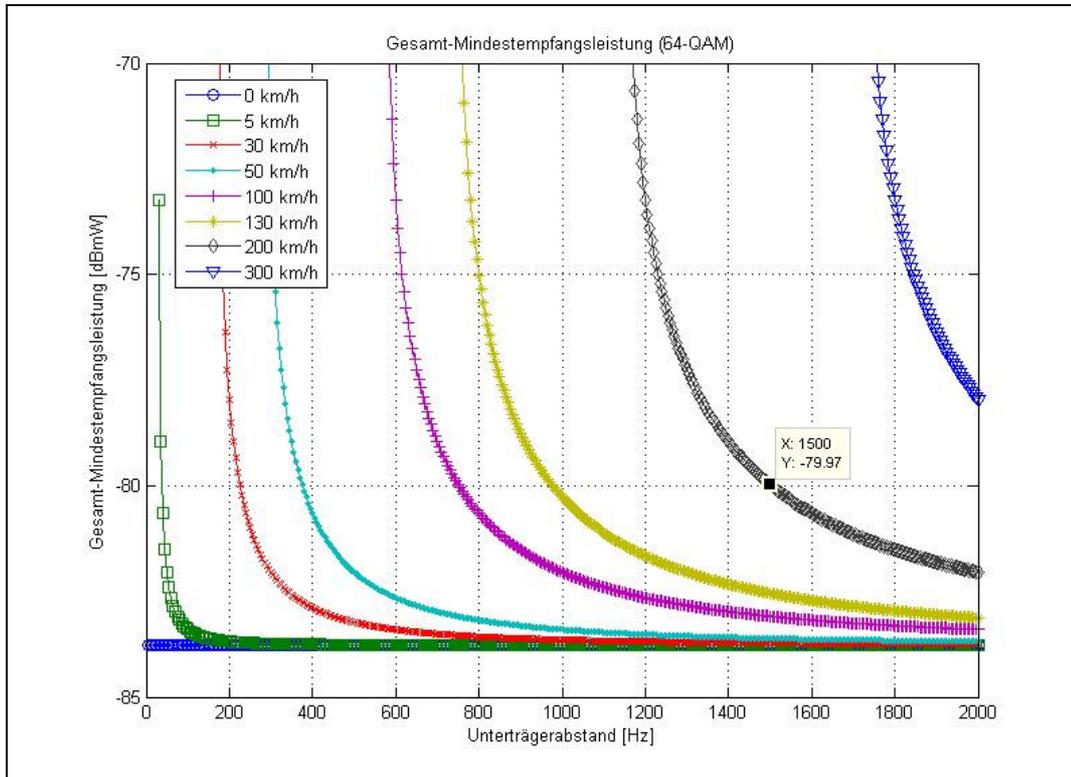


Abb. 3 Gesamt-Mindestempfangsleistung für die 64-QAM

Bei der 64-QAM besteht das Hauptproblem in der Höhe der benötigten Unterträgerabstände Δf für die maximale Geschwindigkeit v_{max} von 300 km/h. Die Symboldauer T_S wird so kurz, dass durch die feste Dauer des Guardintervall T_G eine starke Reduzierung der Datenrate auftritt. Die 64-QAM ist somit nicht mehr effizient. Da eine Geschwindigkeit von 300 km/h eher selten erreicht wird, geht man zugunsten der Datenrate einen Kompromiss ein. Die Dauer des Guardintervall T_G wird auf 1/4 der Symboldauer T_S festgesetzt. Man erhält dann einen Unterträgerabstand Δf von 1500 Hz. Die maximale Empfängergeschwindigkeit v_{max} wird somit auf 200 km/h reduziert.

In Tab. 3 werden die Unterträgerabstände Δf aus Abb. 1 – Abb. 3 dargestellt:

Modulationsart	4-QAM	16-QAM	64-QAM
Unterträgerabstand [Hz]	375	750	1500

Tab. 3 Unterträgerabstände

3.2 Berechnung der übrigen Systemparameter

Nachdem der Unterträgerabstand Δf nun feststeht, kann man mit dessen Hilfe die Nutzsymboldauer T_S berechnen.

$$T_S = \frac{1}{\Delta f} \quad G. 5$$

Die Anzahl der Unterträger K wird durch den Unterträgerabstand Δf und die Gesamtbandbreite $B_{ges}=100$ kHz des Signals festgelegt. Dabei ist zu beachten, dass ein evtl. Träger bei 0 kHz nicht genutzt und deshalb unterdrückt wird.

$$K = \left\lfloor \frac{B_{ges}}{\Delta f} \right\rfloor \quad G. 6$$

Die Dauer des Guardintervall T_G ist aus der Tatsache heraus festgelegt, dass das System gleichwellennetzfähig sein muss. Für eine typische Distanz zweier Sender-Standorte von 60 km kommt man auf die Dauer des Guardintervall T_G von:

$$T_G = \frac{60km}{c \cdot 1,2} = 166 \frac{1}{3} \mu s . \quad G. 7$$

Die Dauer eines OFDM-Symbols T_{OFDM} berechnet sich durch:

$$T_{OFDM} = T_S + T_G . \quad G. 8$$

Aus der Dauer des OFDM-Symbols T_{OFDM} , der Unterträgeranzahl Δf und der Modulationsordnung der Art M-QAM kann man nun die Bruttodatenrate R_{Brutto} berechnen.

$$R_{Brutto} = K \cdot \frac{1}{T_{OFDM}} \cdot \lg(M) \quad G. 9$$

Zum Durchführen der Kanalschätzung werden Pilotsymbole benötigt. Um eine brauchbare Kanalschätzung durchführen zu können, dürfen die Pilotsymbole sowohl in Zeitrichtung als auch in Frequenzrichtung einen bestimmten Abstand nicht überschreiten. Die Berechnungen der Höchstabstände zweier Pilotsymbole in Zeit- und Frequenzrichtung für die Kanalschätzung können wie folgt durchgeführt werden:

- Symbolabstände in Zeitrichtung D_t :

$$D_t \leq \frac{1}{2 \cdot f_{D_{max}} \cdot T_{OFDM}} \quad G. 10$$

Für die Anzahl der OFDM-Symbole je Sekunde P_t , die Pilotsymbole enthalten, erhält man:

$$P_t = \frac{1s}{T_{OFDM} \cdot D_t} \quad G. 11$$

- Unterträgerabstände in Frequenzrichtung D_f :

τ_{max} stellt die maximale Mehrwegeverzögerung dar und wird hier wegen des Ausbreitungsprofils „DAB Hilly Terrain I“ auf 100 μ s festgesetzt.

$$D_f \leq \frac{T_S}{\tau_{max}} \quad G. 12$$

Die Anzahl der Unterträger mit Pilotsymbolen P_f ist gegeben durch:

$$P_f = \left\lceil \frac{K}{D_f} \right\rceil \quad G. 13$$

Die Bruttodatenrate nach der Kanalschätzung R_{Kanal} ist bestimmt durch die Anzahl der Piloten je Sekunde und die Modulationsart.

3 Berechnung der System-Parameter

$$R_{\text{Kanal}} = R_{\text{Brutto}} - P_t \cdot P_f \cdot ld(M) \quad \text{G. 14}$$

Durch die Koderate der Faltungskodierung von $R=1/2$ wird die Nutzdatenrate R_{Netto} wie folgt reduziert:

$$R_{\text{Netto}} = R_{\text{Kanal}} \cdot R \quad \text{G. 15}$$

Tab. 4 zeigt die Systemparameter der drei verschiedenen Modi:

Systemparameter:	4-QAM	16-QAM	64-QAM
Unterträgerabstand [Hz]	375	750	1500
Anzahl der Unterträger	266	132	66
QAM-Symboldauer [ms]	2,66666667	1,33333333	0,66666667
Guardintervalllänge [µs]	166,666667	166,666667	166,666667
OFDM-Symboldauer [ms]	2,83333333	1,5	0,83333333
Brutto-Datenrate [kBit/s]	187,764706	352	475,2
Pilotsymbole in:			
-Zeitrichtung (Abstand/OFDM-Symbole)	5	11	30
--> OFDM-Symbole mit Piloten/Sekunde	70,5882353	60,6060606	40
-Frequenzrichtung (Abstand/Pilotunterträger)	26	13	6
--> Unterträger mit Piloten/OFDM-Symbol	11	11	11
Datenrate nach Kanalschätzung [kBit/s]	186,211765	349,33333	472,56
Netto-Datenrate [kBit/s]	93,1058824	174,66667	236,28

Tab. 4 OFDM-Systemparameter

4 Mindestfeldstärken und Versorgungsreichweiten

Man kann zwei Arten der Mindestfeldstärken unterscheiden. Zum einen die tatsächlich benötigte Mindestfeldstärke am Empfängereingang und zum anderen die Mindestfeldstärke zum Zwecke der Funknetzplanung.

4.1 Die eigentliche Mindestfeldstärke

Die eigentliche Mindestfeldstärke E_{RXmin} ist beim stationären (SE) und portablen (PE) Empfang durch die Empfängerempfindlichkeit P_{min} und das benötigte CNR an der Antenne definiert. Das benötigte CNR kann der *Tab. 1* entnommen werden. Die Kennwerte der jeweiligen Empfänger erhält man in *Tab. 5*.

Benötigte Werte:	SE	PE	ME
Antennengewinn G_A [dBd]	6	0	0
Kabeldämpfung L_K [dB]	1	0	0,2
Kabelrauschzahl F_K [dB]	1	0	0,2
Empfängerrauschzahl F_V [dB]	6	7	7
Rauschtemperatur T_{System} [K]	1453,44	1453,44	1521,94

Tab. 5 Empfängerkennwerte

Die Berechnung der thermischen Rauschleistungsdichte Φ_{TH} erfolgt wie in Kapitel 3.1 G. 4. Die Empfängerempfindlichkeit P_{min} kann nun wie folgt berechnet werden:

$$\frac{P_{min}}{dBmW} = 10 \cdot \log \left(K \cdot \frac{\Delta f \cdot \Phi_{TH}}{1mW} \right) \quad G. 16$$

Für die Mindestempfangsleistung P_{RXmin} folgt dann für den stationären und portablen Fall mit dem benötigten CNR :

$$\frac{P_{RX \min}}{dBmW} = \frac{P_{\min}}{dBmW} + CNR \quad G. 17$$

Beim mobilen Empfang (ME) kommt zur thermischen Rauschleistung noch ein Teil, der durch die Bewegung des Empfängers verursacht wird. Dieser Störanteil ist von der Empfangsleistung E_{RX} abhängig. Die Mindestempfangsleistung E_{RXmin} beim mobilen Empfang kann aus *Abb. 1 – Abb. 3* entnommen werden. *Tab. 6* zeigt die berechneten Mindestempfangsleistungen P_{min} der verschiedenen Modulationsarten und Empfangssituationen.:

Mindestempfangsleistung:	4-QAM	16-QAM	64-QAM
SE [dBmW]	-101,99	-92,02	-84,02
PE [dBmW]	-101,99	-92,02	-84,02
ME [dBmW]	-99,69	-83,99	-79,97

Tab. 6 Mindestempfangsleistungen

Die jeweilige Mindestfeldstärke E_{RXmin} kann mit der Wellenlänge λ und unter der Annahme eines $\frac{\lambda}{2}$ -Dipols als Empfangsantenne berechnet werden durch:

$$\frac{E_{RX \min}}{dB\mu V / m} = \frac{P_{RX \min}}{dBmW} + 124,79 - 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\lambda}{m} \right) - G_A \quad G. 18$$

Für die Mindestempfangsfeldstärken E_{RXmin} ergibt sich:

Mindestfeldstärke:	4-QAM	16-QAM	64-QAM
SE [dB μ V/m]	7,93	17,9	25,9
PE [dB μ V/m]	13,93	23,9	31,9
ME [dB μ V/m]	16,23	31,93	35,95

Tab. 7 Mindestempfangsfeldstärken

4.2 Die Mindestfeldstärke für die Funknetzplanung

Bei den Mindestfeldstärken für die Funknetzplanung E_{med} werden Aufschläge benötigt, die den Fehler des Ausbreitungsmodells nach den CCIR Ausbreitungskurven ausgleichen. Das CCIR-Modell beschreibt die Wellenausbreitung in einer Höhe von 10m über dem Erdboden und einer Ortswahrscheinlichkeit von 50%. Für die verschiedenen Empfangssituationen werden verschiedene Aufschläge auf die Mindestfeldstärke gegeben, um der Empfangssituation gerecht zu werden.

$$\frac{E_{med}}{dB\mu V/m} = \frac{E_{RX\ min}}{dB\mu V/m} + \frac{L_{MMN}}{dB} + \frac{C_L}{dB} + \frac{L_{IH}}{dB} + \frac{L_H}{dB} \quad G. 19$$

Tab. 8 zeigt die verschiedenen Aufschläge der Empfangssituationen:

Korrekturfaktoren:	SE	PEO	PEI	ME
Ortskorrekturfaktor [dB]	0	9	2,9	13
Man Made Noise [dB]	2	2	2	2
Höhenkorrekturfaktor [dB]	0	10	10	10
Gebäudedämpfung [dB]	0	0	12,95	0

Tab. 8 Korrekturfaktoren für die CCR-Ausbreitungskurven

Berechnet man die Mindestfeldstärken für die Funknetzplanung E_{med} , dann erhält man die Ergebnisse aus Tab. 9:

Planungsfeldstärken:	4-QAM	16-QAM	64-QAM
Stationärer Empfang [dB μ V/m]	9,93	19,90	27,90
Portabler Empfang Outdoor [dB μ V/m]	34,93	44,90	52,90
Portabler Empfang Indoor [dB μ V/m]	41,78	51,75	59,75
Mobiler Empfang (300km/h) [dB μ V/m]	41,23	56,93	60,95

Tab. 9 Mindestfeldstärken für die Funknetzplanung

5 Spektrumsmasken

Die Außerbandabstrahlung des OFDM-Systems muss innerhalb definierter Grenzen bleiben. Eine der Systemvoraussetzungen ist, dass bestehende UKW-FM-Versorgungen nicht gestört werden. Aus diesem Grund wird die erste Anforderung an die Spektrumsmaske gestellt: Die Spektrumsmaske des OFDM-Systems muss unterhalb oder auf der Spektrumsmaske des UKW-FM-Rundfunks liegen. Da das OFDM-Signal im Nutzbereich schmalbandiger ist als das UKW-FM-Signal, wird zusätzlich eine weitere Abstufung der zulässigen Außerbandabstrahlung eingeführt.

Abb. 2 zeigt die Frequenzmasken für die OFDM-Signale sowie die des FM-Signals.

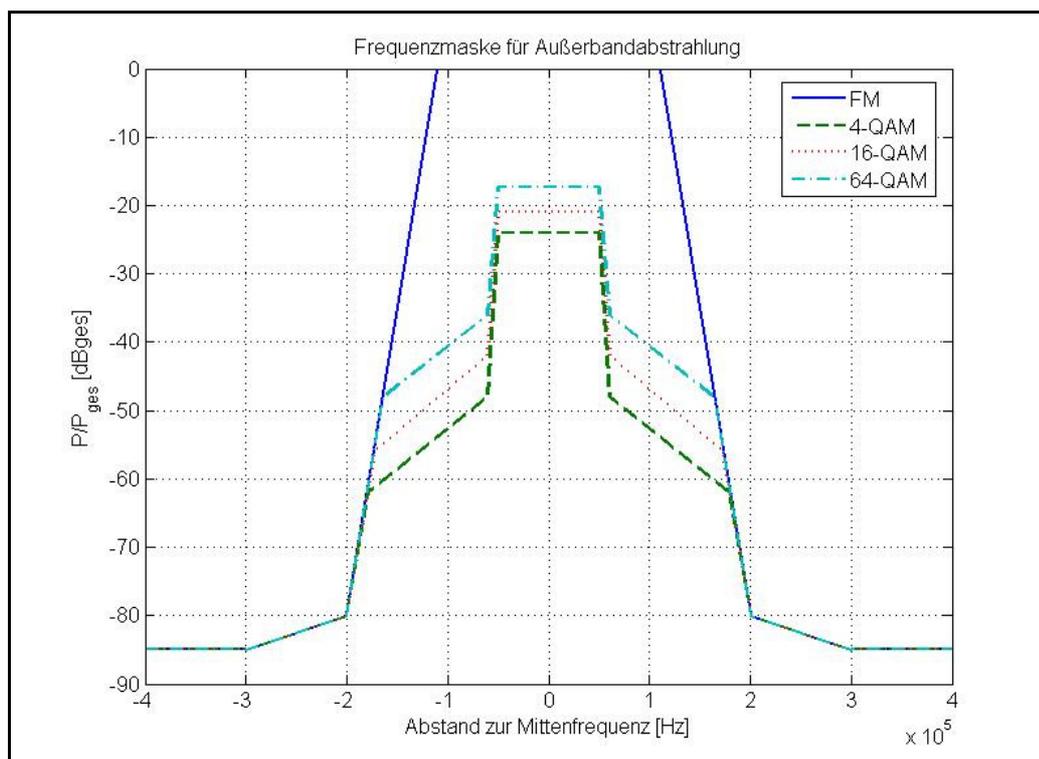


Abb. 4 Frequenzmasken

Die Eckwerte der Frequenzmasken sind in *Tab. 10* dargestellt.

FM		4-QAM		16-QAM		64-QAM	
f	P/Pmin	f	P/Pmin	f	P/Pmin	f	P/Pmin
[kHz]	[dBC]	[kHz]	[dBges]	[kHz]	[dBges]	[kHz]	[dBges]
-400	-85	-400	-85	-400	-85	-400	-85
-300	-85	-300	-85	-300	-85	-300	-85
-200	-80	-200	-80	-200	-80	-200	-80
-110	0	-179	-62	-172	-56	-164	-48
-60	0	-60	-48	-60	-42	-60	-36
-50	0	-50	-23,97	-50	-20,97	-50	-17,4
50	0	50	-23,97	50	-20,97	50	-17,4
60	0	60	-48	60	-42	60	-36
110	0	179	-62	172	-56	164	-48
200	-80	200	-80	200	-80	200	-80
300	-85	300	-85	300	-85	300	-85
400	-85	400	-85	400	-85	400	-85

Tab. 10 Frequenzmasken

6 Schutzabstände für die Funknetzplanung

Für die Versorgungsplanung werden Schutzabstände benötigt, mit denen der Schutz von anderen Rundfunksendern gewährleistet werden kann. Es werden Schutzabstände benötigt, die das OFDM-Signal in allen drei Variationen schützen, und es werden Schutzabstände zum Schutz der FM-Rundfunkversorgung benötigt. Der Schutz der UKW-FM-Rundfunkversorgung ist einer der wichtigsten Eckpunkte bei der Betrachtung des eines digitalen Systems.

6.1 Benötigte Leistungsdichtespektren

Die Leistungsdichtespektren werden normiert auf eine Gesamtleistung von 1 W.

Das typische FM-Frequenzspektrum wurde durch die dauerhafte Messung und anschließende Mittelung eines typischen FM-Senders ermittelt. Als Messbasis wurde ein FM-Rundfunkprogramm mit hoher Kompression gewählt. Angenähert und normiert auf die Gesamtleistung von 1 W ergibt sich unter der Bedingung, dass die Gesamtleistung des Signals innerhalb des Frequenzbereichs von -150 kHz bis $+150$ kHz liegt, folgendes normiertes Leistungsdichtespektrum, siehe *Abb. 5*:

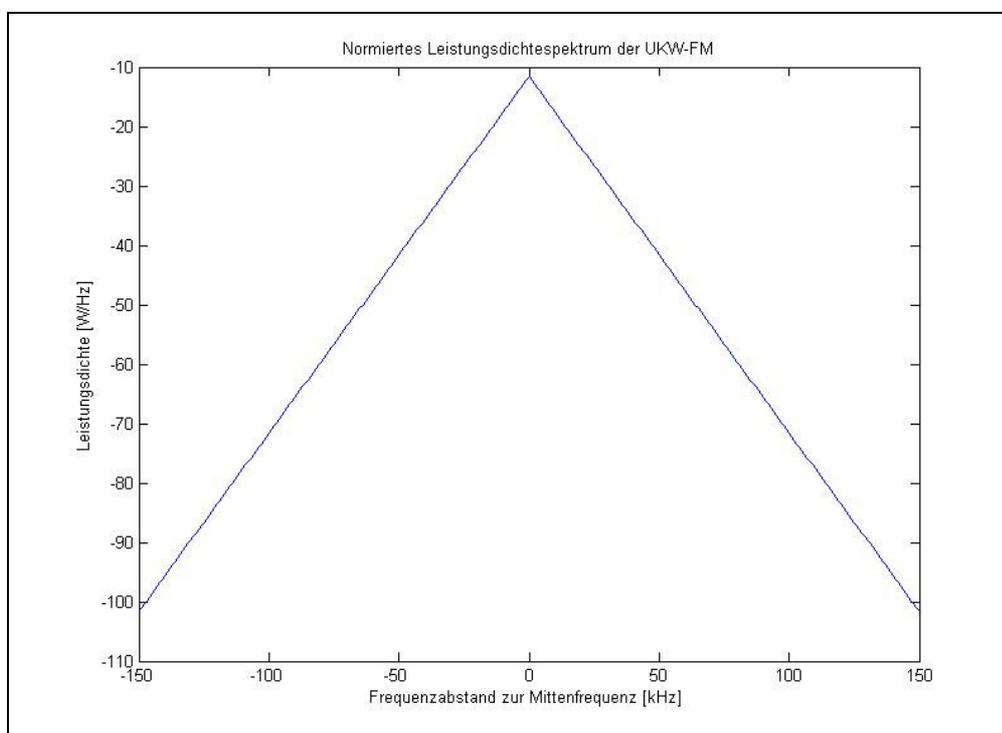


Abb. 5 Approximiertes und normiertes Leistungsdichtespektrum der UKW-FM

Das approximierte und normierte Leistungsdichtespektrum der 4-QAM-Variante sieht folgendermaßen aus, siehe *Abb.6*:

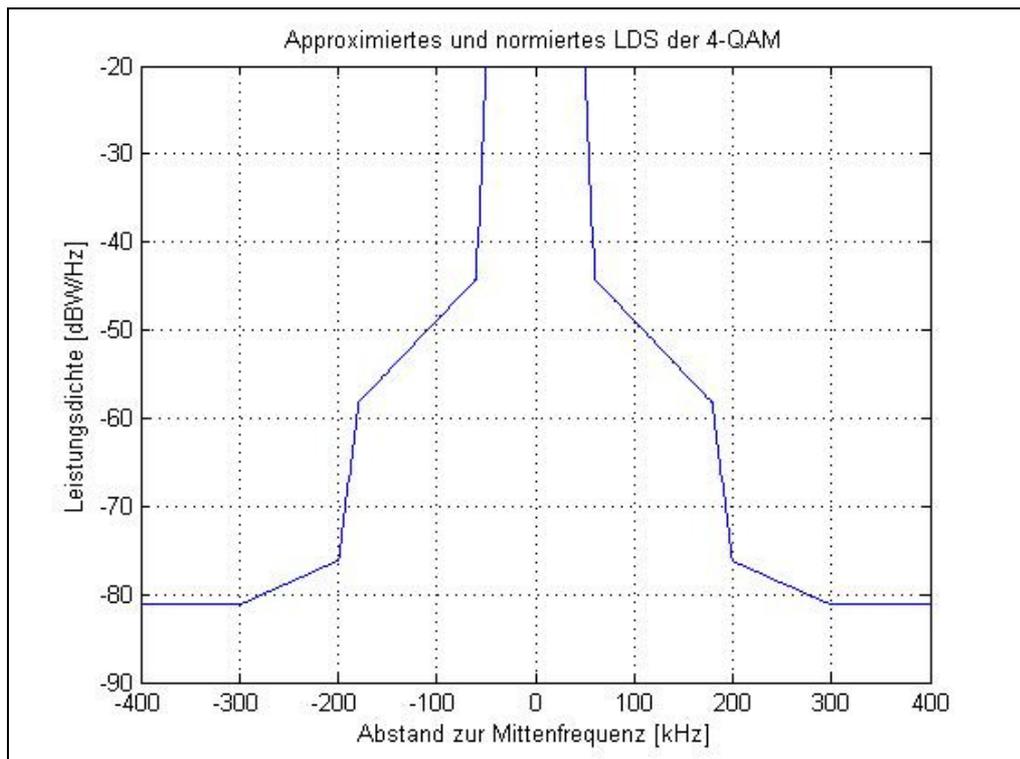


Abb. 6 Approximiertes und normiertes Leistungsdichtespektrum der 4-QAM

Das approximierte und normierte Leistungsdichtespektrum der 16-QAM-Variante sieht folgendermaßen aus, siehe *Abb. 7*:

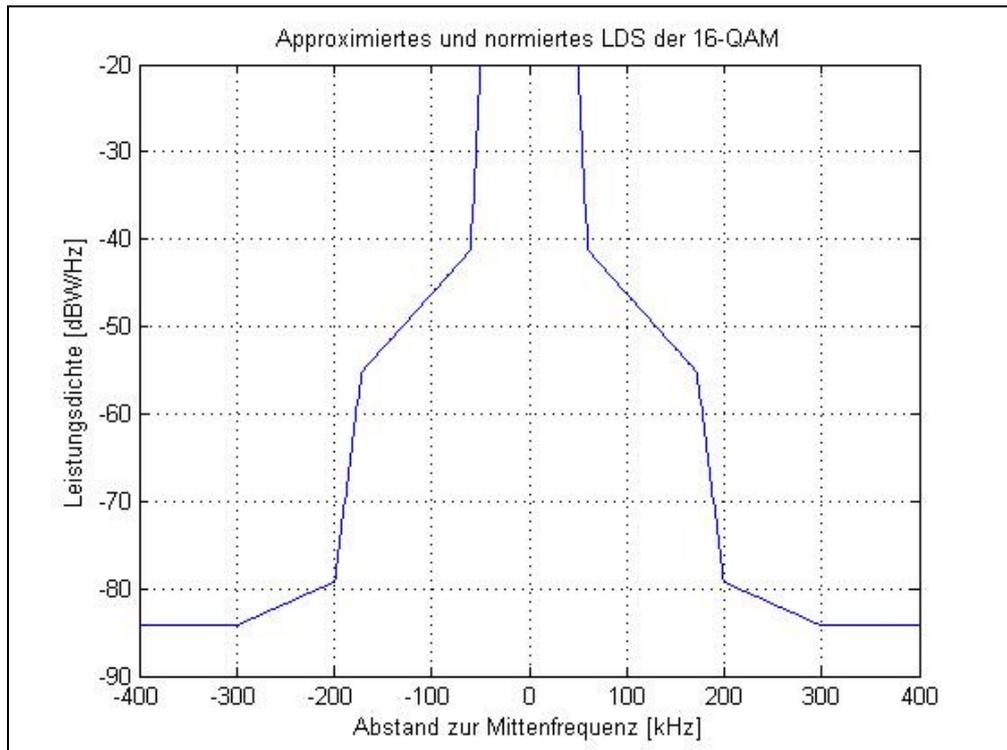


Abb. 7 Approximiertes und normiertes Leistungsdichtespektrum der 16-QAM

Das approximierte und normierte Leistungsdichtespektrum der 64-QAM-Variante sieht folgendermaßen aus, siehe *Abb.8*:

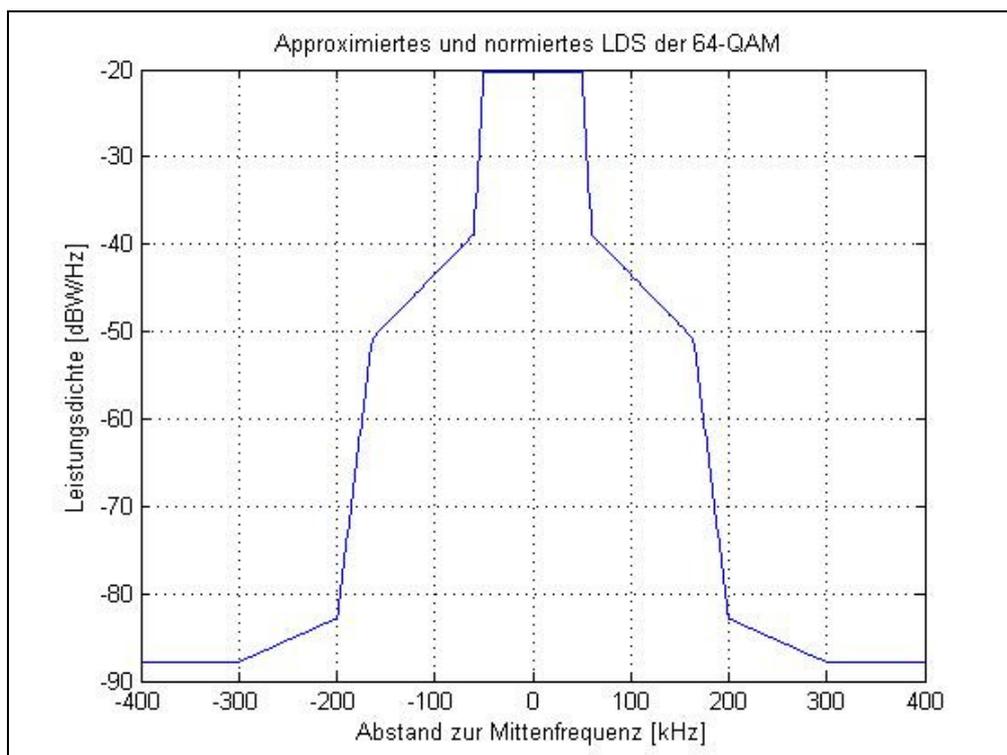


Abb. 8 Approximiertes und normiertes Leistungsdichtespektrum der 16-QAM

6.2 Schutzabstände

Für die Betrachtung der Schutzabstände wird das typisches Nutzleistungsdichtespektrum (*Abb. 5 – Abb. 8*) verwendet. Anhand dieser Leistungsdichte des Nutzsignals wird die Nutzleistung berechnet, die zu schützen ist. Die Störleistung wird ermittelt, indem die Leistungsdichte (*Abb. 5 – Abb. 8*) des störenden Systems durch den Eingangsfiler des Empfängers betrachtet wird. Als Eingangsfilerfunktion G_{EFRM} wird folgende Übertragungsfunktion vorgegeben:

$$G_{EFRM}(f) = \begin{cases} 1 & \text{für } |f| < 150\text{kHz} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Nachstehend wird folgende Nomenklatur verwendet: Der Name der Abbildung bezeichnet das zu schützende System. Die verschiedenen Kurven zeigen den benötigten Schutzabstand des störenden Systems gegenüber dem gestörten System in Abhängigkeit des Abstands der Mittenfrequenzen der beiden Signale.

Die Werte und Kurven gelten für eine Orts- und Zeitwahrscheinlichkeit von jeweils 50%. Um andere Wahrscheinlichkeiten zu erhalten, muss der übliche Aufschlag berücksichtigt werden, wie bei der Beschreibung der Wellenausbreitung mit Hilfe der CCIR-Kurven

6.2.1 Schutz des FM-Rundfunks

Nach der ITU-Recommendation 415-2 wird am Empfängereingang ein SNR von 30 dB benötigt. Ausgehend davon zeigt *Abb. 9* die Schutzabstände zum Schutz der UKW-FM vor dem digitalen OFDM-Signal der angegebenen Variante.

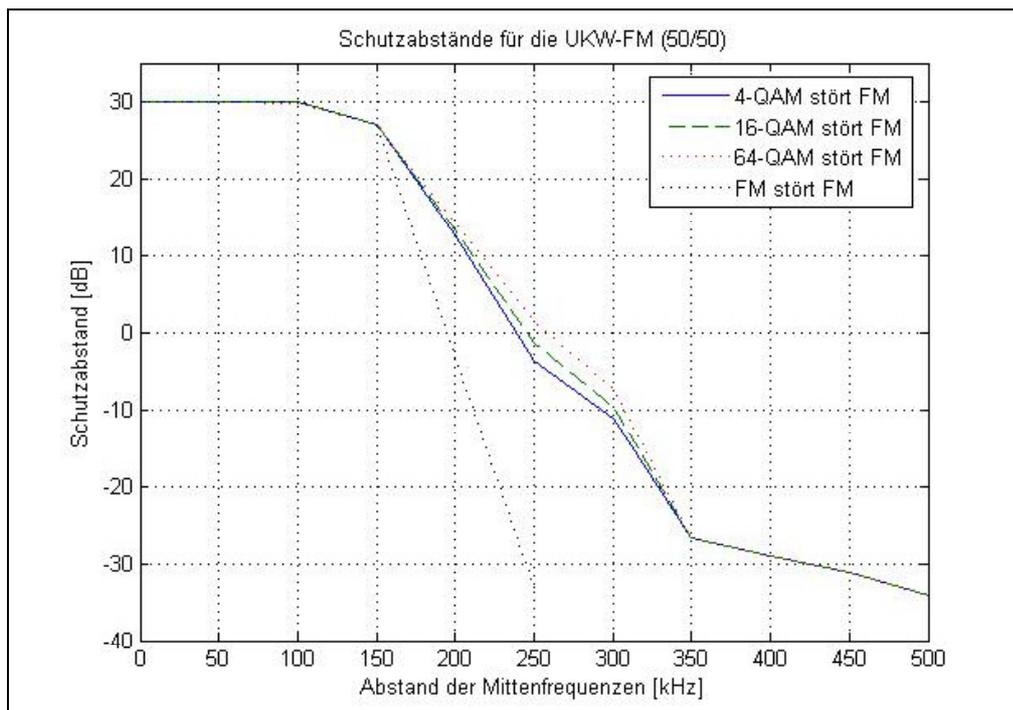


Abb. 9 Schutzabstandskurve für die UKW-FM

Abb. 9 gilt für eine Orts- und Zeitwahrscheinlichkeit von 50%.

Tab. 11 zeigt die Schutzabstände in Abhängigkeit des Abstands der Mittenfrequenzen.

Abstand der Mittenfrequenzen [kHz]	Schutzabstand der UKW-FM [dB]			
	4-QAM	16-QAM	64-QAM	FM
0	30,00	30,00	30,00	30,00
50	30,00	30,00	29,99	30,00
100	29,92	29,90	29,88	30,00
150	26,99	26,99	26,99	26,99
200	12,73	13,45	14,21	-3,01
250	-3,67	-1,30	1,41	-33,01
300	-11,16	-9,61	-7,39	<-33,01
350	-26,60	-26,60	-26,60	<-33,01
400	-28,95	-28,95	-28,95	<-33,01
450	-31,20	-31,20	-31,20	<-33,01
500	-34,21	-34,21	-34,21	<-33,01

Tab. 11 Schutzabstände für die UKW-FM

Beim Übergang von der analogen zur digitalen Rundfunkversorgung ist es wichtig, die bestehende Rundfunkversorgungen nicht zu stören. Um dies zu gewährleisten, wäre es wünschenswert, wenn die benötigten Schutzabstände der UKW-FM gegenüber den digitalen Systemen niedriger wären. *Abb. 10* zeigt die Schutzabstandskurve der UKW-FM für die dauerhafte Störung mit einem UKW-FM-Signal und die vergleichbaren Kurven für die Störung durch das digitale System.

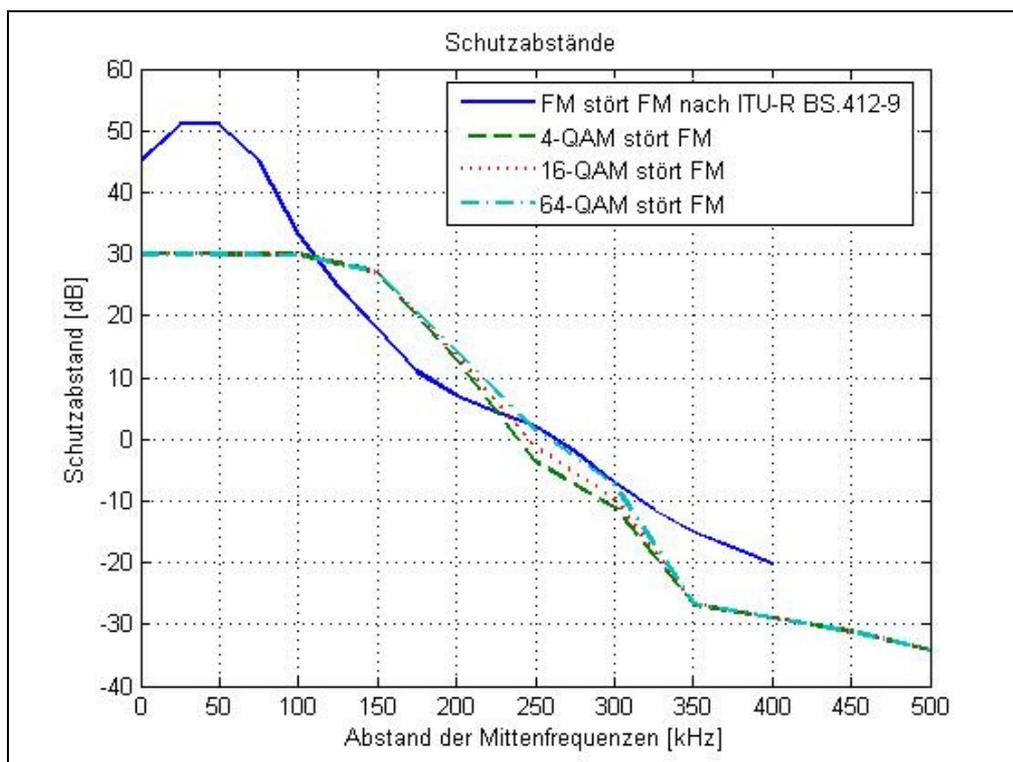


Abb. 10 Schutzabstandskurven im Vergleich zur ITU-R BS.412-9-Kurve

Man erkennt, dass zum Einhalten der Forderung im Bereich von 150 – 250 kHz, die Leistung des digitalen Signals um 8dB gegenüber der Sendeleistung des UKW-FM-Signals reduziert werden muss. Die Störung im Gleichkanalfall ist völlig unkritisch.

6.2.2 Schutz der 4-QAM-Variante

Bei der Berechnung der Schutzabstände für die 4-QAM wird von einem CNR von 15 dB ausgegangen. *Abb. 11* zeigt die Schutzabstände für die 4-QAM-Variante.

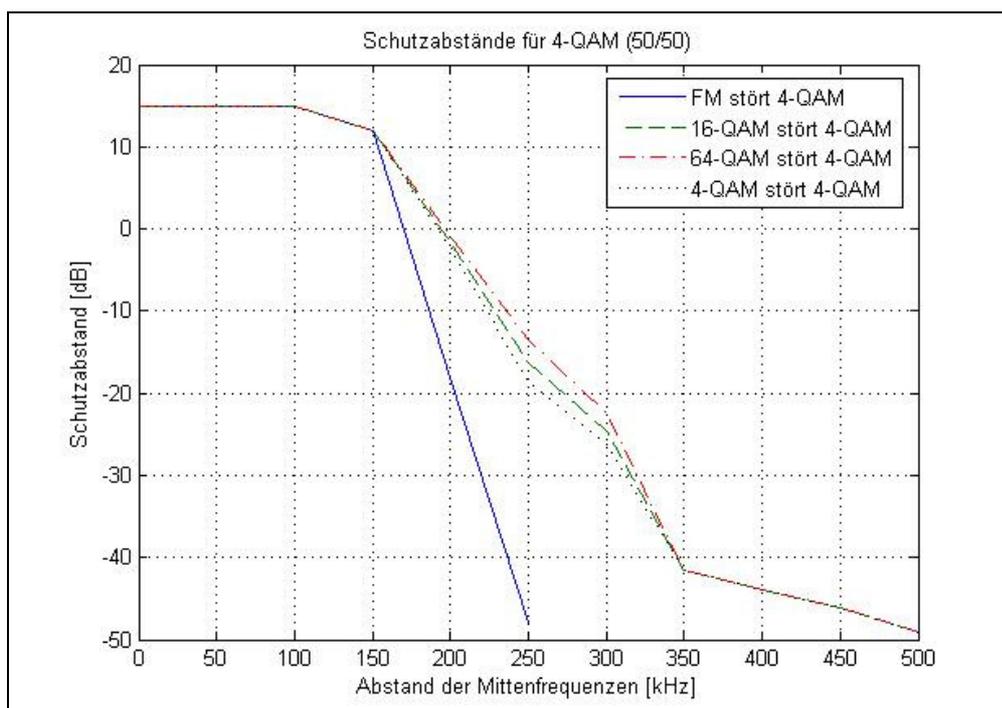


Abb. 11 Schutzabstandskurve für 4-QAM

Die angegebenen Schutzabstände gelten für 50%-ige Orts- und Zeitwahrscheinlichkeit.

Tab. 12 zeigt die Schutzabstände in Abhängigkeit des Abstands der Mittenfrequenzen.

Abstand der Mittenfrequenzen [kHz]	Schutzabstand der 4-QAM-Variante [dB]			
	4-QAM	16-QAM	64-QAM	FM
0	15,00	15,00	15,00	15,00
50	15,00	14,99	15,00	15,00
100	14,90	14,88	14,92	15,00
150	11,99	11,99	11,99	11,99
200	-1,55	-0,79	-2,27	-18,01
250	-16,30	-13,59	-18,67	-48,01
300	-24,61	-22,39	-26,16	<-48,01
350	-41,60	-41,60	-41,60	<-48,01
400	-43,95	-43,95	-43,95	<-48,01
450	-46,19	-46,19	-46,19	<-48,01
500	-49,20	-49,20	-49,20	<-48,01

Tab. 12 Schutzabstände für die 4-QAM-Variante

6.2.3 Schutz der 16-QAM-Variante

Bei der Berechnung der Schutzabstände für die 16-QAM wird von einem CNR von 25 dB ausgegangen. *Abb. 12* zeigt die Schutzabstände für die 16-QAM-Variante.

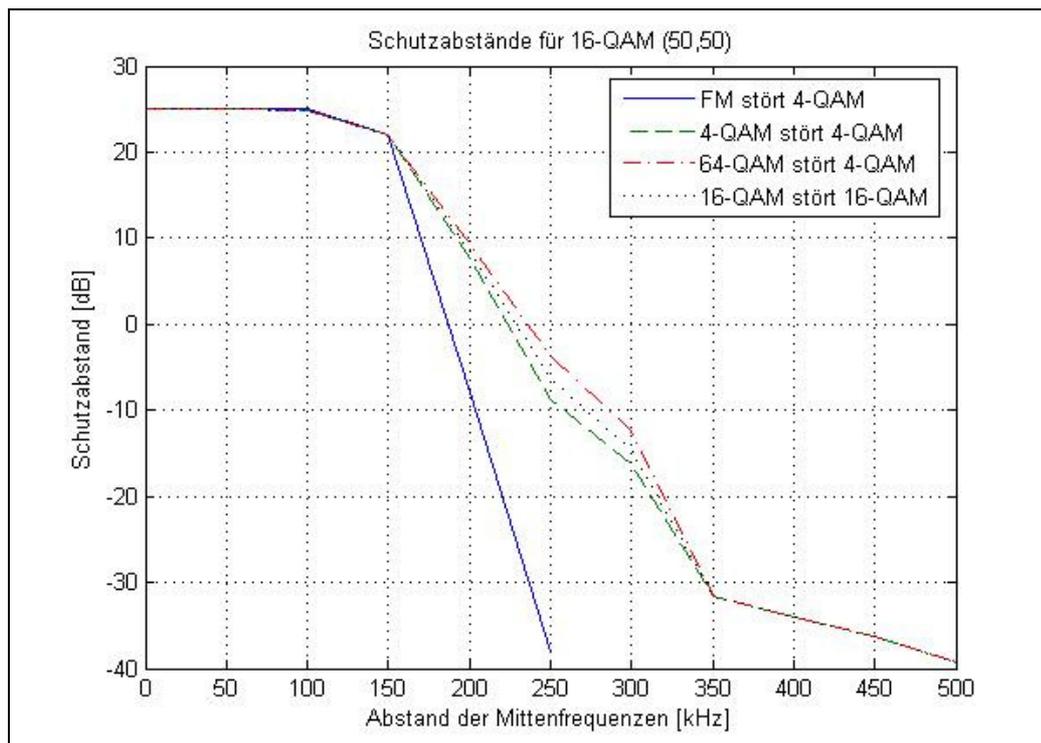


Abb. 12 Schutzabstandskurve für 16-QAM

Die angegebenen Schutzabstände gelten für 50%-ige Orts- und Zeitwahrscheinlichkeit.

Tab. 13 zeigt die Schutzabstände in Abhängigkeit des Abstands der Mittenfrequenzen

Abstand der Mittenfrequenzen [kHz]	Schutzabstand der 16-QAM-Variante [dB]			
	4-QAM	16-QAM	64-QAM	FM
0	25,00	25,00	25,00	25,00
50	25,00	25,00	24,99	25,00
100	24,92	24,90	24,88	25,00
150	21,99	21,99	21,99	21,99
200	7,73	8,45	9,21	-8,01
250	-8,67	-6,30	-3,59	-38,01
300	-16,16	-14,61	-12,39	<-38,01
350	-31,60	-31,60	-31,60	<-38,01
400	-33,95	-33,95	-33,95	<-38,01
450	-36,19	-36,19	-36,19	<-38,01
500	-39,20	-39,20	-39,20	<-38,01

Tab. 13 Schutzabstände für die 16-QAM-Variante

6.2.4 Schutz der 64-QAM-Variante

Bei der Berechnung der Schutzabstände für die 64-QAM wird von einem CNR von 33 dB ausgegangen. *Abb. 13* zeigt die Schutzabstände für die 64-QAM-Variante.

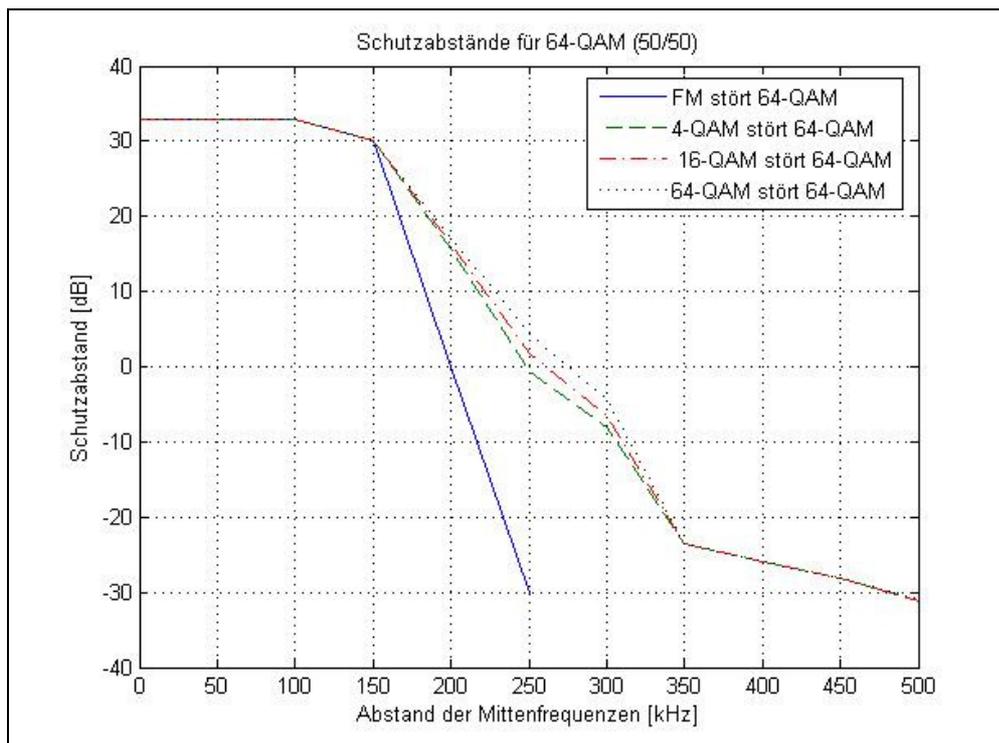


Abb. 13 Schutzabstandskurve für 16-QAM

Die angegebenen Schutzabstände gelten für 50%-ige Orts- und Zeitwahrscheinlichkeit.

Tab. 14 zeigt die Schutzabstände in Abhängigkeit des Abstands der Mittenfrequenzen

Abstand der Mittenfrequenzen [kHz]	Schutzabstand der 64-QAM-Variante [dB]				
	Störer	4-QAM	16-QAM	64-QAM	FM
0		33,00	33,00	33,00	33,00
50		33,00	33,00	33,00	33,00
100		32,92	32,91	32,89	33,00
150		29,99	29,99	29,99	29,99
200		15,73	16,45	17,22	-0,01
250		-0,67	1,70	4,41	-30,01
300		-8,16	-6,61	-4,39	<-30,01
350		-23,60	-23,60	-23,60	<-30,01
400		-25,95	-25,95	-25,95	<-30,01
450		-28,19	-28,19	-28,19	<-30,01
500		-31,20	-31,20	-31,20	<-30,01

Tab. 14 Schutzabstände für die 64-QAM

6.3 Beispiele für die Versorgungsprognose

6.3.1 Vergleich der UKW-FM mit den drei digitalen Systemen

In Abb. 14 ist die Versorgungsreichweite für ein Stereo-FM-Signal des Senders am Donnersberg dargestellt. Die dargestellte Versorgungsreichweite entspricht einer Sendeleistung von 1kW. Zum Vergleich sind die Versorgungsreichweiten der digitalen Systeme für den stationären Empfang dargestellt. Die Sendeleistung der digitalen Systeme ist um 8 dB vermindert. Das entspricht einer Sendeleistung von 158,5 W. Die Abbildung entspricht also dem Versorgungsgebiet, welches durch die Feldstärke begrenzt ist.

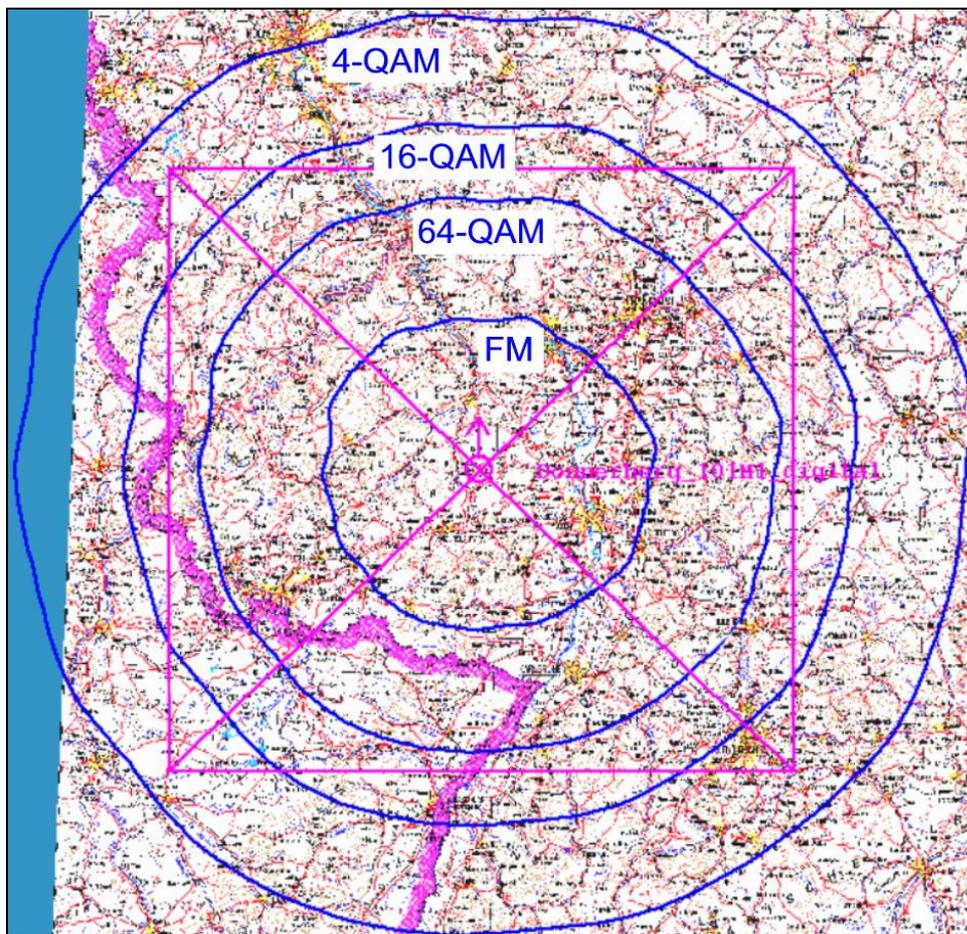


Abb. 14 Versorgungsreichweite FM, 4-QAM, 16-QAM und 64-QAM

6.3.2 Vergleich der UKW-FM mit der 16-QAM-Variante in verschiedenen Empfangssituationen.

In Abb. 15 ist die Versorgungsreichweite für ein Stereo-FM-Signal des Senders am Donnersberg dargestellt. Die dargestellte Versorgungsreichweite entspricht einer Sendeleistung von 1kW. Zum Vergleich sind die Versorgungsreichweiten der 16-QAM-Variante für den stationären Empfang, den portablen Outdoor-Empfang, den portablen Indoor-Empfang und den mobilen Empfang dargestellt.. Die Sendeleistung des digitalen Systems ist um 8 dB vermindert. Das entspricht einer Sendeleistung von 158,5 W. Die Abbildung entspricht also dem Versorgungsgebiet, welches durch die Feldstärke begrenzt ist.

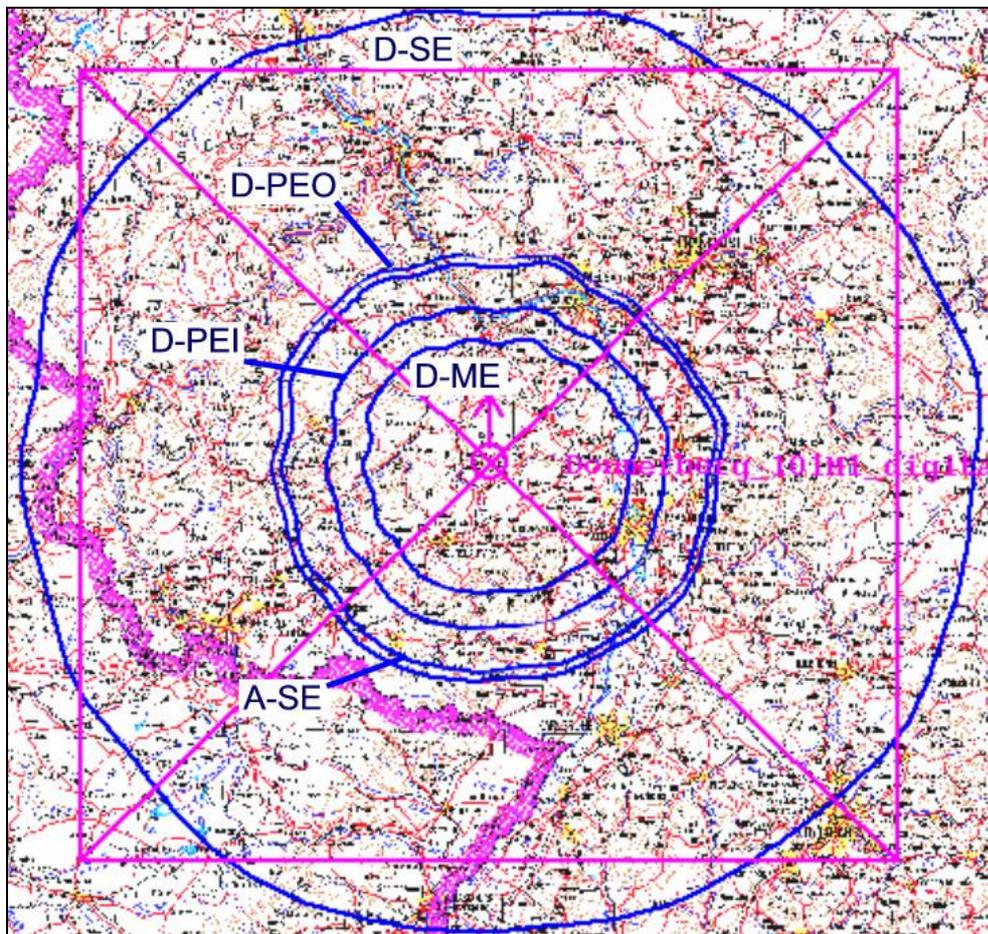


Abb. 15 Versorgungsreichweite FM, 16-QAM mit verschiedenen Empfangssituationen

6.3.3 Interferenzberechnungen für die FM und die 16-QAM-Variante

Abb. 16 zeigt die Versorgungsprognose der Stereo-UKW-FM unter Berücksichtigung von störenden UKW-FM-Sendern. Zur Berechnung der Interferenz wurden die 20 FM-Sender genutzt, die den stärksten Störbeiwert am betrachteten Senderstandort aufweisen. Der Störbeiwert entspricht der produzierten Störfeldstärke zuzüglich dem entsprechenden Schutzabstand. Die Schutzabstandskurve entspricht der Kurve der ITU aus Abb. 10. Im blauen Gebiet reicht die Nutzfeldstärke zum Empfang nicht aus. Im violetten Bereich reicht die Nutzfeldstärke aus, die zulässige Störfeldstärke wird allerdings überschritten. Der weiße Bereich kennzeichnet des versorgte Gebiet.

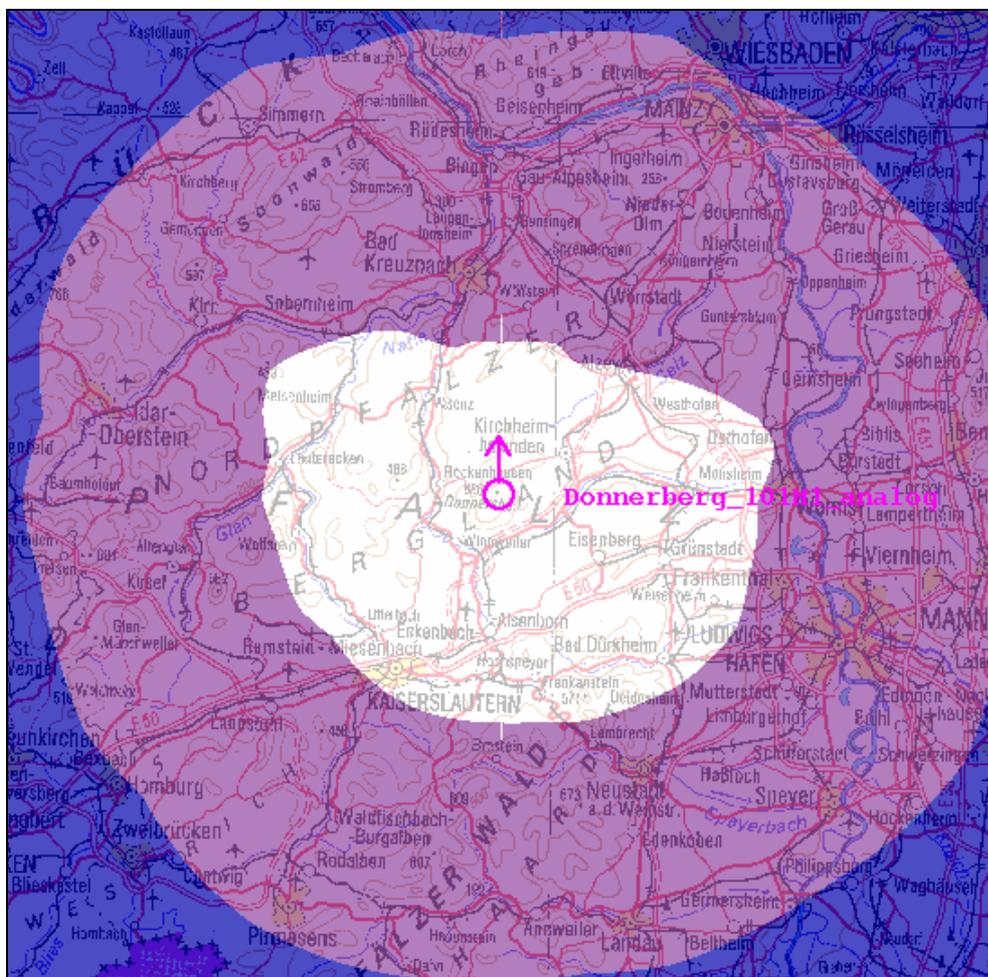


Abb. 16 Interferenzberechnung der FM, gestört durch FM

Abb. 17 zeigt die Versorgungsprognose der Stereo-UKW-FM unter Berücksichtigung von störenden 16-QAM-Sendern. Zur Berechnung der Interferenz wurden die 20 Sender genutzt, die den stärksten Störbeiwert am betrachteten Senderstandort aufweisen. Der Störbeiwert entspricht der produzierten Störfeldstärke zuzüglich dem entsprechenden Schutzabstand. Die Leistung der Störsender wurde um 8 dB gegenüber der Leistung der FM-Sender verringert. Die Schutzabstandskurve entspricht der Kurve aus Abb. 9. Im blauen Gebiet reicht die Nutzfeldstärke zum Empfang nicht aus. Im violetten Bereich reicht die Nutzfeldstärke aus, die zulässige Störfeldstärke wird allerdings überschritten. Der weiße Bereich kennzeichnet des versorgte Gebiet.

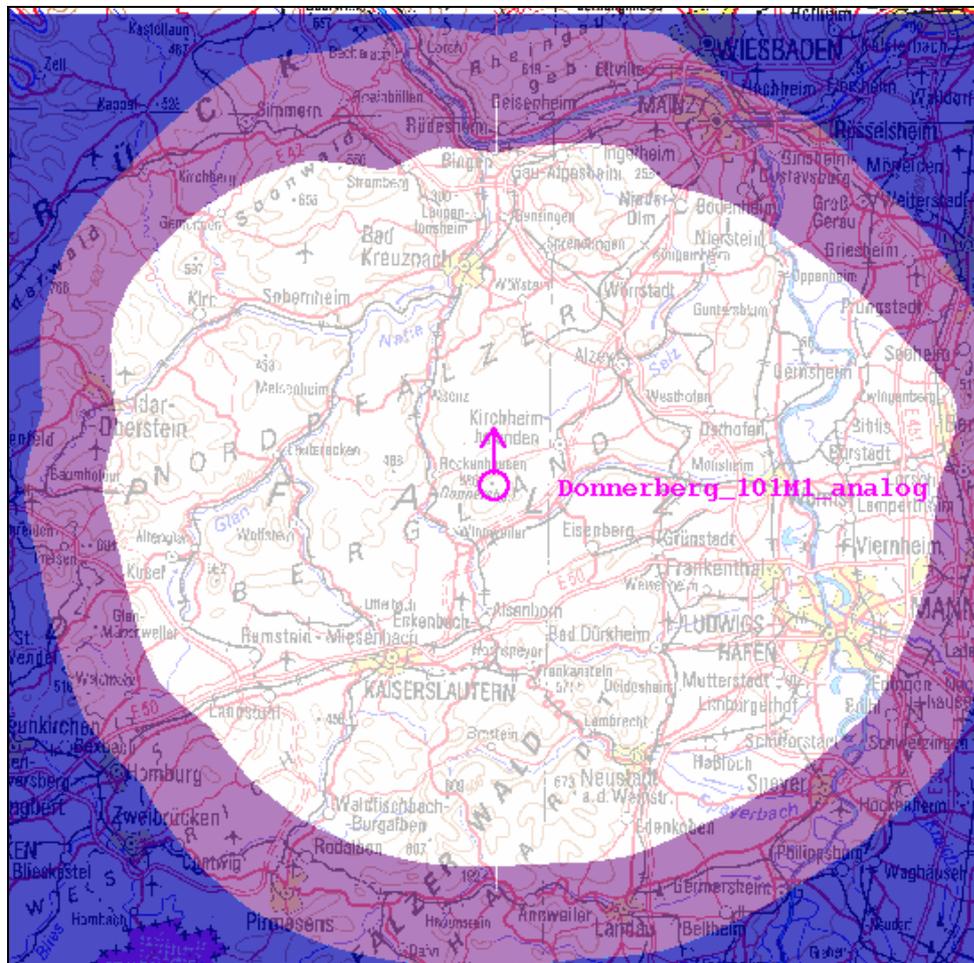


Abb. 17 Interferenzberechnung für die FM, gestört durch die 16-QAM-Variante

Man erkennt, dass mit steigender Zahl der digitalen Sender die Versorgung der bestehenden analogen Rundfunklandschaft verbessert wird.

Abb. 18 zeigt die Versorgungsprognose der 16-QAM-Variante unter Berücksichtigung von störenden UKW-FM-Sendern. Zur Berechnung der Interferenz wurden die 20 Sender genutzt, die den stärksten Störbeiwert am betrachteten Senderstandort aufweisen. Der Störbeiwert entspricht der produzierten Störfeldstärke zuzüglich dem entsprechenden Schutzabstand. Die Leistung des Nutzsenders wurde um 8 dB gegenüber der Leistung des FM-Nutzsenders verringert. Die Schutzabstandskurve entspricht der Kurve aus Abb. 12. Im violetten Bereich reicht die Nutzfeldstärke aus, der zulässige Störbeiwert wird allerdings überschritten. Der weiße Bereich kennzeichnet des versorgte Gebiet.

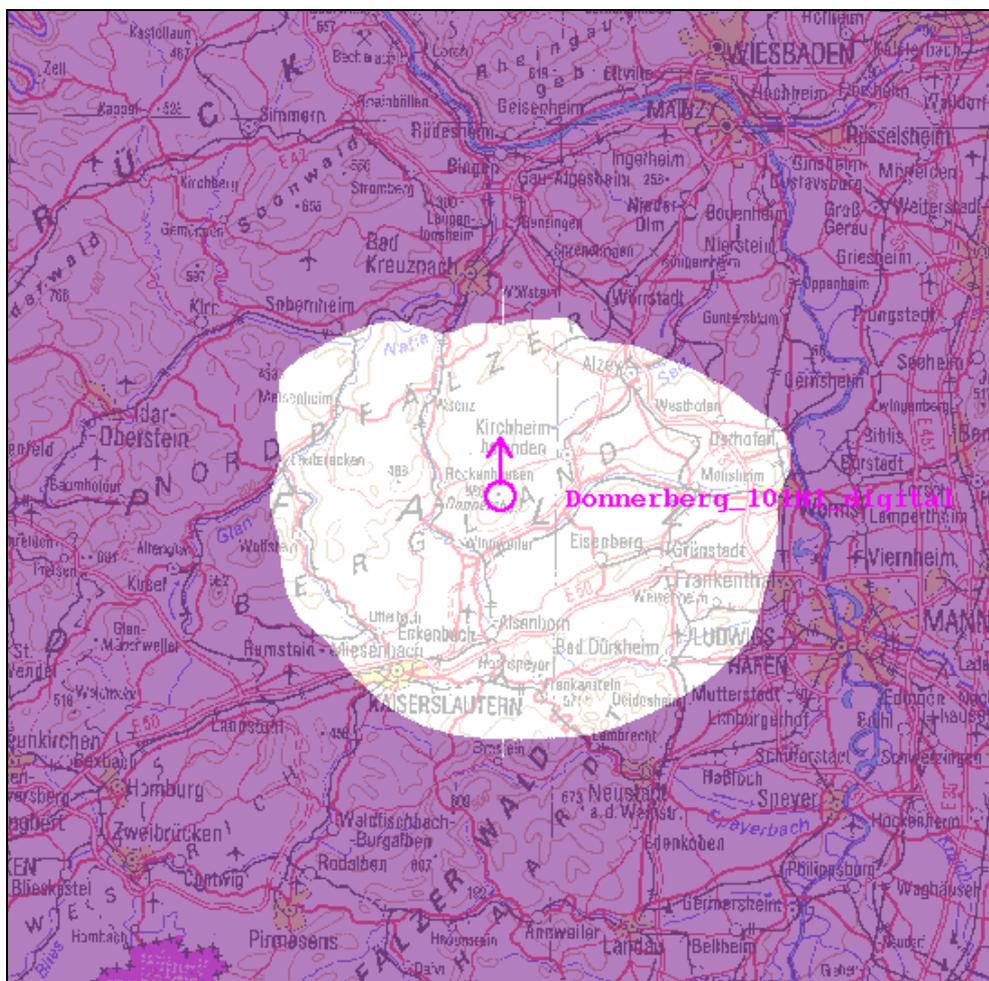


Abb. 18 Interferenzberechnung für die 16-QAM-Variante, gestört durch UKW-FM

Man erkennt, dass trotz geringerer Sendeleistung mit einer ähnlich guten Versorgung durch die digitalisierten Sender gegenüber der UKW-FM zu rechnen ist

7 Fazit

Es sollte kein Problem darstellen, ein digitales Rundfunksystem zu implementieren, das innerhalb der Bandbreite von 100 kHz ein Hörfunkprogramm in CD-Qualität trägt. Durch die Schmalbandigkeit des Systems wird allerdings ein hohes SNR für den problemlosen Empfang benötigt. Dies führt vor allem dann zu Problemen, wenn die Unterträger mit einer höherwertigen Modulationsvariante moduliert werden. Man kann allerdings davon ausgehen, dass zum Betreiben des Systems eine 16-QAM-Variante völlig ausreicht. Sollen höhere Datenraten realisiert werden, so muss man über Wege nachdenken, mit denen die Schmalbandigkeit des Systems umgangen werden kann oder man muss die zulässigen Geschwindigkeiten der Empfänger reduzieren. Das Problem der Schmalbandigkeit könnte man umgehen, indem man das Signal z.B. auf zwei weit genug entfernte Signale der Bandbreite 50 kHz aufteilt. Der Preis für die gewonnene Erhöhung der Datenrate wäre in diesem Fall jedoch ein erheblicher Mehraufwand bei der Planung der Rundfunkversorgung. Die Gleichwellenfähigkeit des Systems ist durch die Festlegung des Guardintervall auf $167 \mu\text{s}$ gegeben. Dieser Wert folgt aus dem typischen Abstand der Senderstandorte beim UKW-FM.

Für die Versorgungsplanung kann man festhalten, dass mit gleicher Sendeleistung eine höhere Reichweite für den stationären sowie für den portablen Empfang erreicht werden kann als mit der UKW-FM. Es ist zu erwarten, dass eine Rundfunkversorgung durch digitale Sender mit einem geringeren Energiebedarf zu realisieren ist. Die Bewegung mit Fußgängergeschwindigkeit stellt kein Problem dar. Für den mobilen Empfang werden besonders bei hohen Geschwindigkeiten hohe Mindestfeldstärken benötigt. Da allerdings eher selten der Fall eintritt, dass sich ein Empfänger mit einer Geschwindigkeit von 300 km/h bewegt, ist auch hier mit einer hohen Versorgungsreichweite zu rechnen.

Der Schutz der bestehenden UKW-FM-Versorgung kann in jedem Fall gewährleistet werden, indem ein digitales Signal in der Leistung um 8 dB gegenüber der Leistung des zu ersetzenden analogen Signals reduziert wird.

Der Schutz des digitalen Systems gegenüber der UKW-FM sollte zumindest im Falle der 4-QAM-Variante und der 16-QAM-Variante kein Problem darstellen. Die 64-QAM-Variante ist insgesamt etwas störanfälliger als die UKW-FM. Sollen also bestehende analoge Senderstandorte und Frequenzen durch digitale ersetzt werden, so

ist es empfehlenswert, auf die 4-QAM-Variante oder die 16-QAM-Variante zurückzugreifen.

Die Übertragung eines Rundfunksignals in CD-Qualität mit AAC-SBR-Audiokodierung ist in jeder OFDM-Konfiguration möglich.

8 Literatur

- [chest97] The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria , Coordination Pinciples and Procedures for the introducing of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T), Chester 1997
- [etsi302018] ETSI EN 302018-1
- [frey97] DAB Digitaler Rundfunk, U.Freyer, Verlag Technik 1997
- [gasp02] Bitfehlerhäufigkeit und Optimierung des DVB-T-Systems für hochmobile Teilnehmer, Ingo Gaspard, 2002
- [itu412] ITU RECOMMENDATION ITU-R BS.412-9
- [itu370] ITU RECOMMENDATION ITU-R P.370-7
- [itu415] ITU RECOMMENDATION ITU-R BS.415-9
- [lued01] Mobilfunksysteme, Christian Lüders, Vogel-Verlag 2001
- [maeus88] Analoge Modulationsverfahren, Rudolf Mäusl, Hüthing-Verlag 1988
- [muel98] Drahtlose terrestrische Datenübertragung an mobile Empfänger, Frank Müller-Römer, Vistas-Verlag 1998
- [rudo] Vielträger-Modulation, Dietmar Rudolph-TFH Berlin
- [schob03] Breitbandige OFDM Funkübertragung bei hohen Teilnehmergegeschwindigkeiten, Henrik Schober, 2003
- [schul02] DAB: Das Übertragungssystem im Mobilfunkkanal, Henrik Schulze, 2002
- [sorg] Mobile Kommunikation, U.Sorger-TU Darmstadt