



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für Nachrichtentechnik



Reduktion von Nachbarkanalstörungen in OFDM-Systemen (DVB-C2)

15. ITG-Fachtagung für Elektronische Medien, Dortmund 2013

Philipp Hasse, Jörg Robert, 26.02.2013

Gliederung

1. Einleitung
2. **Out-of-Band-Emissionen bei OFDM-Signalen**
3. Filterung mit Vorverzerrung
4. Zusammenfassung und Ausblick



Einleitung

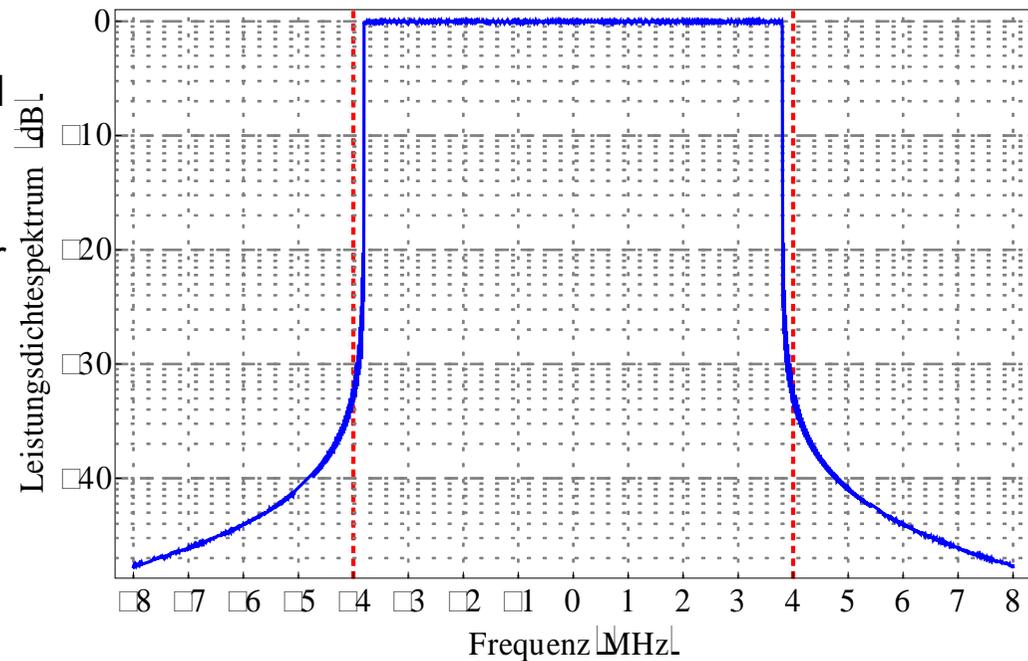
DVB-C2 auf einen Blick

- Die **DVB-C2 Spezifikation** wurde im **März 2009** fertiggestellt
- Zur Überraschung vieler basiert DVB-C2 auf Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex (**COFDM**) mit Schutzintervall (**4k-IDFT** in 8 MHz Kanälen) – wie bereits DVB-T und DVB-T2 – und unterscheidet sich somit maßgeblich von DVB-C, welches auf einer Einträgermodulation basiert (QAM)
- Innerhalb einer Bandbreite von 7,61 MHz beinhaltet DVB-C2 3409 aktive OFDM-Subträger mit einem **Trägerabstand** von ca. **2,2 kHz**
- DVB-C2 verwendet **LDPC** (Low Density Parity Check Code) als Vorwärtsfehlerschutz – wie bereits DVB-S2 und DVB-T2 und ist daher Teil der DVB-x2 Familie

Parameter	16-QAM	64-QAM	256-QAM	1024-QAM	4096-QAM
DVB-C	25,6 Mbit/s 16,8 dB	38,4 Mbit/s 23,0 dB	51,2 Mbit/s 29,0 dB	-	-
C2, CR 2/3	-	31,4 Mbit/s 13,4 dB	-	-	-
C2, CR 3/4	-	-	47,1 Mbit/s 19,9 dB	58,9Mbit/s 24,6 dB	-
C2, CR 4/5	25,1 Mbit/s 10,7 dB	37,7 Mbit/s 16,0 dB	-	-	-
C2, CR 5/6	-	-	52,4 Mbit/s 21,9 dB	65,4 Mbit/s 27,1 dB	78,6 Mbit/s 32,2 dB
C2, CR 9/10	28,3 Mbit/s 12,8 dB	41,4 Mbit/s 18,4 dB	56,6 Mbit/s 23,9 dB	70,7 Mbit/s 29,4 dB	84,4 Mbit/s 34,9 dB

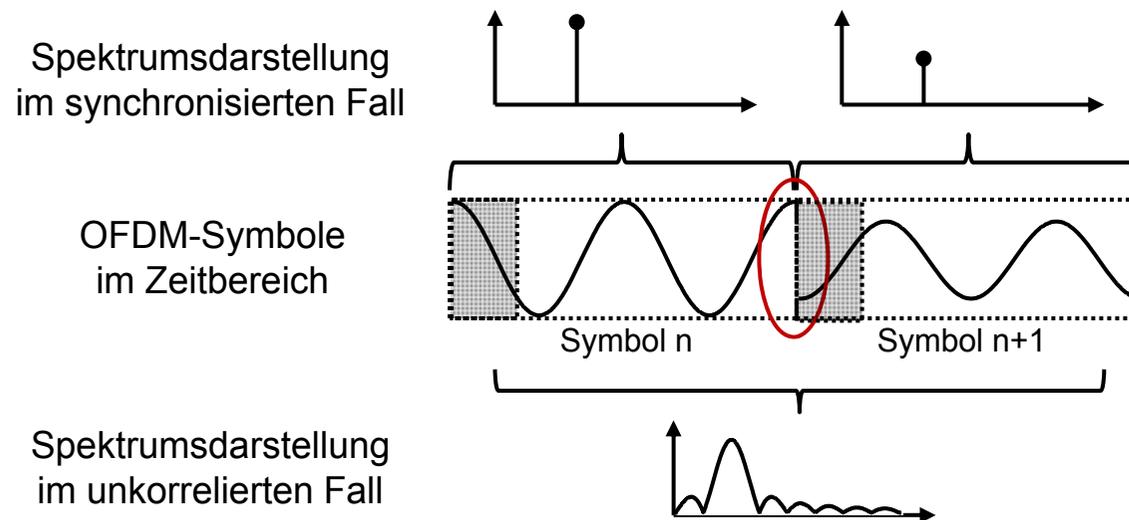
Out-of-Band-Emissionen

- Ein typisches **Leistungsdichtespektrum eines OFDM-Signals** besitzt **Anteile** des Spektrums **jenseits des aktiven Trägerbereiches**, welche auch **Out-of-Band-Emissionen (OoB)** genannt werden
- Im Falle eines **DVB-C2-Signals** minimaler Bandbreite (7,61 MHz) fällt die spektrale **Leistungsdichte** zu den **Kanalgrenzen** (im traditionellen 8-MHz-Raster) innerhalb von 120 kHz um ca. **30 dB** ab
- Die tatsächliche Höhe des Störeinflusses auf ein Signal in einem spektral benachbarten Kanal hängt unter anderem von
 - der Modulation der aktiven Subträger (bzgl. Amplitude und Phase)
 - sowie von der Signalverarbeitung des Empfängers eines Signals im Nachbarkanal ab



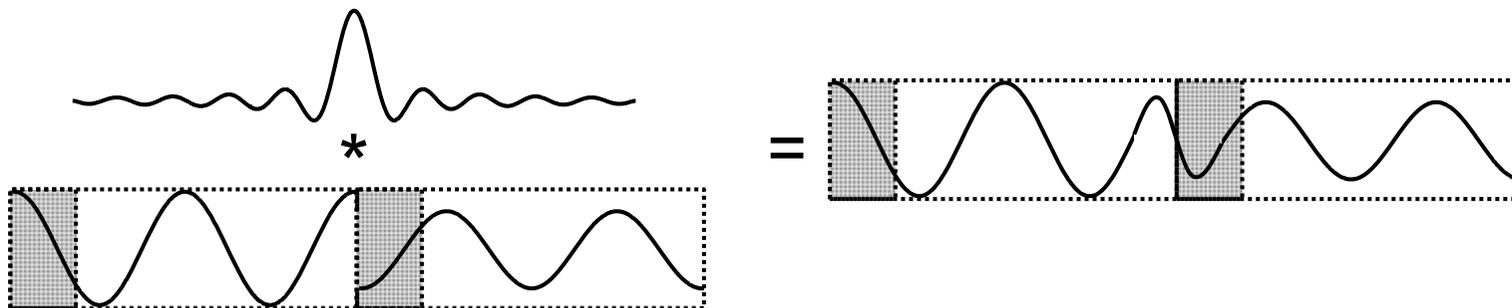
Out-of-Band-Emissionen

- Der **Übergang zwischen** zwei **OFDM-Symbolen** im Zeitbereich erzeugt **Phasen- und Amplitudensprünge** an den Symbolgrenzen
- Ein **zeitlich** auf die OFDM-Symbole **synchronisierter Empfänger** erfasst ein einzelnes Symbol, sodass die anschließende DFT das **gesendete diskrete Spektrum** darstellt
- Ein **zeitlich unkorreliertes System** (beispielsweise Analogfernsehen oder ein weiterer DVB-C2-Empfänger) erfasst mit dem Abtastfenster den Symbolübergang und **„sieht“** dadurch die **Out-of-Band-Emissionen** des OFDM-Signals im Nachbarkanal



Traditionelle FIR-Filterung

- Neben weiteren Methoden zur Unterdrückung der OoB-Emissionen stellt die **zeitdiskrete Filterung** (in modernen Systemen) mit entsprechenden **FIR-Filtern** eine einfache Lösung dar
- Die **Optimierungspunkte** für einen entsprechenden **FIR-Filter** sind dabei unter anderem:
 - Die **Restwelligkeit** der Übertragungsfunktion im aktiven Spektrumsbereich des Nutzsignals,
 - Die **zeitliche Dauer** der **Impulsantwort** des Filters,
 - Die **Flankensteilheit** des Filters, also der Übergangsbereich zwischen Durchlass- und Sperrbereich,
 - Die Höhe der **Unterdrückung im Sperrbereich** des Filters, also die Höhe der Unterdrückung der OoB-Emissionen

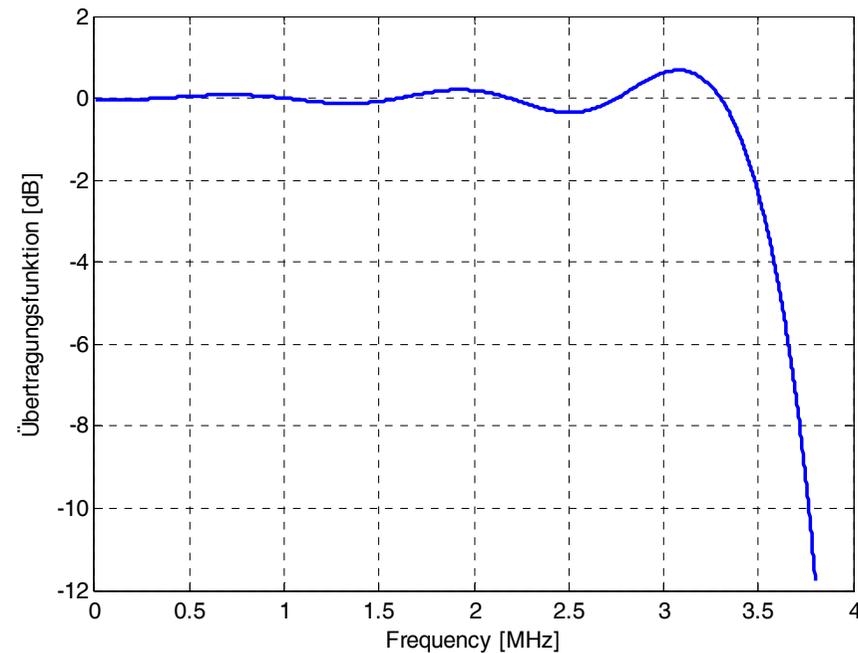


Traditionelle FIR-Filterung

- Die **Optimierung** aller zuvor aufgezeigten Punkte bei der Erstellung eines **FIR-Filters** ist **nur begrenzt möglich**:
 - Entsprechend des „Zeitgesetzes der Nachrichtentechnik“ ist beispielsweise die Optimierung der Flankensteilheit und der Restwelligkeit immer ein Kompromiss mit der zeitlichen Dauer der Impulsantwort des Filters
- Eine **FIR-Filterung des Sendesignals** zur Begrenzung des Spektrums auf die Kanalbandbreite ist bei den für **DVB-C2** spezifizierten **höheren Modulationsstufen**, wie der **1024-** und der **4096-QAM**, mit erheblichen **Nachteilen** verbunden:
 - Eine zeitliche Dauer der Impulsantwort über die Länge des Schutzintervalls eines OFDM-Symbols hinaus führt zu **Inter-Symbol-Interferenz** und damit zur Erhöhung des mittleren Fehlers bzw. zur Verringerung des Modulation Error Ratio
 - Dies ist in sofern kritisch, da der DVB-C2-Standard nur sehr kurze Schutzintervalle von $1/64$ und $1/128$ der Nutzsymbollänge vorsieht
- Eine vorhandene Restwelligkeit oder ungenügende Flankensteilheit und damit Pegelunterschiede innerhalb des Signals beeinflussen die aktiven Subträger in Bezug auf das erzielbare **Signal-zu-Rausch-Verhältnis** bei der Übertragung

Nachteile der Filterung

- Die Grafik zeigt die **Übertragungsfunktion eines Rechteck-Filters** im aktiven Spektrumsbereich eines DVB-C2-Signals zur Reduktion der OoB-Emissionen
 - Der Einsatz eines solchen Filters würde aufgrund der vorhandenen Restwelligkeit und unzureichenden Flankensteilheit sich negativ auf die Performance auswirken
 - Die **Optimierung** der beiden Parameter führt jedoch zu einer wesentlich höheren zeitlichen Dauer **der Impulsantwort** und damit zu **Inter-Symbol-Interferenz**

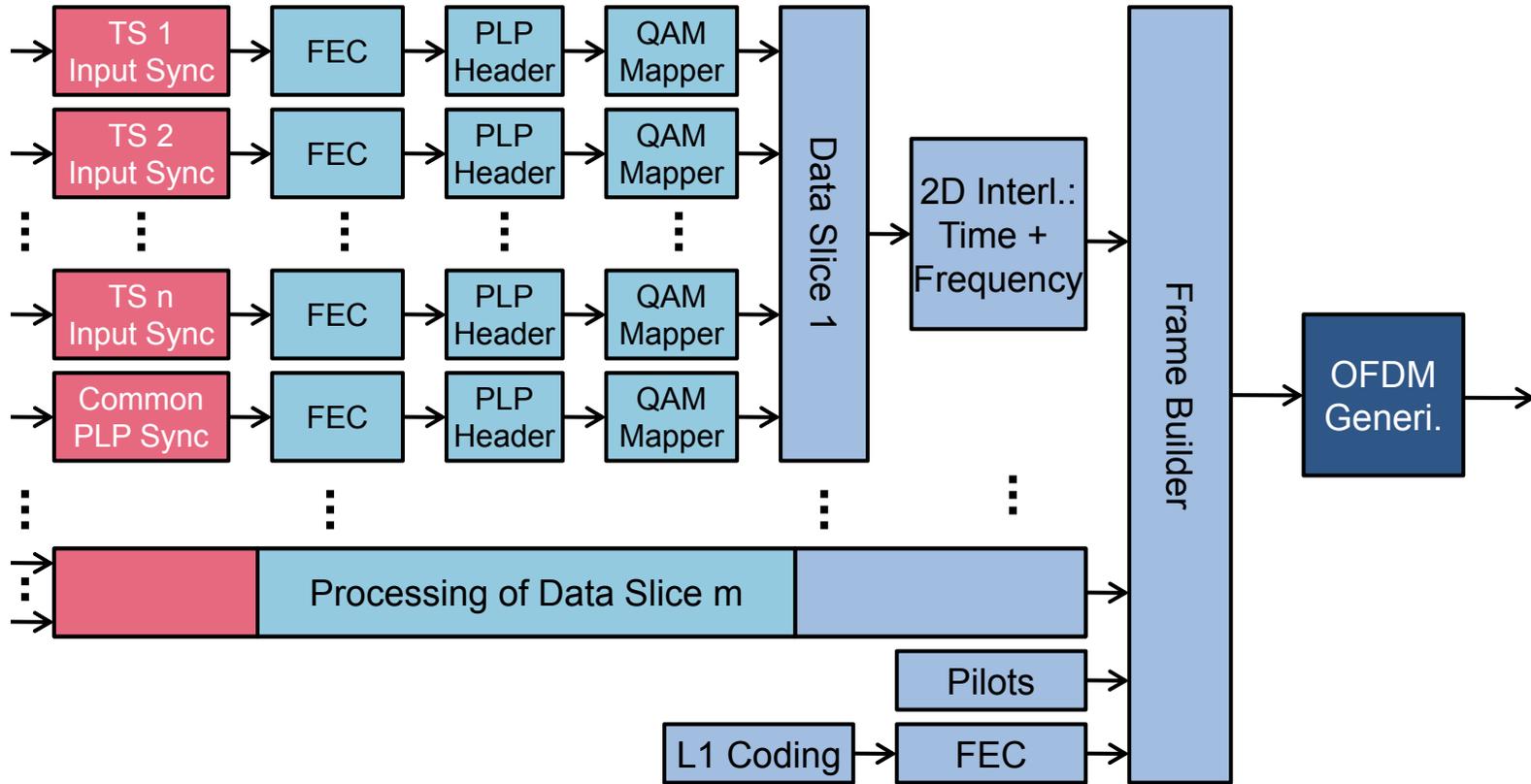


Gliederung

1. Einleitung
2. Out-of-Band-Emissionen bei OFDM-Signalen
- 3. Filterung mit Vorverzerrung**
- 4. Zusammenfassung und Ausblick**

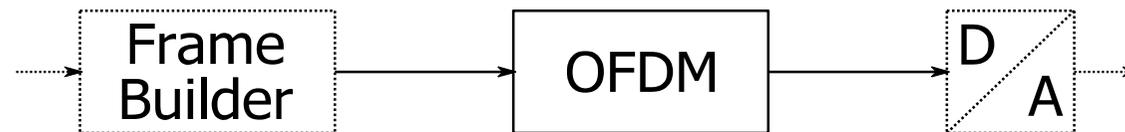


Senderseitige Verarbeitung eines DVB-C2-Signals



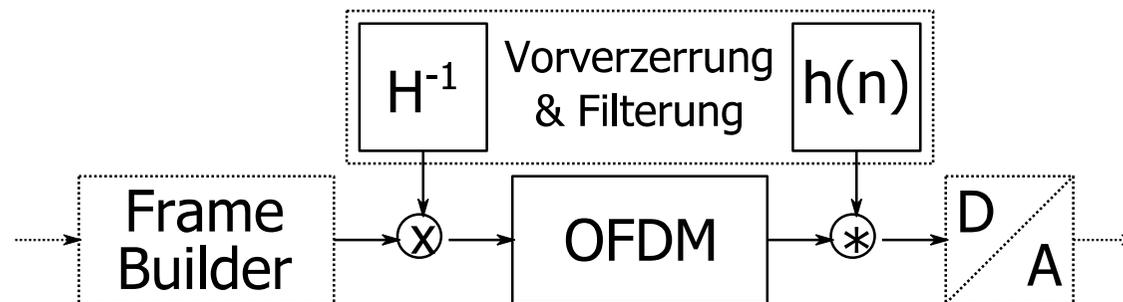
OFDM-Generierung

- Der **Frame-Builder** liefert den **Eingangsvektor für OFDM-Generierung**
 - Der Eingangsvektor besteht aus dem aktiven Signalspektrum (beispielsweise 3409 aktive Subträger), welcher durch Einfügen von Nullwerten, dem sogenannten Zero-Padding, auf eine Gesamtlänge von 4096 Punkten aufgefüllt wird
 - Dieser kann dann anschließend durch eine IFFT (Inverse Fast-Fourier-Transformation) transformiert werden
- Die OFDM-Generierung („OFDM“ Block) besteht aus der IFFT und das Hinzufügen des Schutzintervalls sowie weiteren Verarbeitungsschritten zur Leistungsnormierung
- Eine traditionelle Filterung des Ausgangssignals würde eine FIR-Filterung des Signals nach der Durchführung der OFDM, vor der eigentlichen Digital/Analog-Wandlung vorsehen



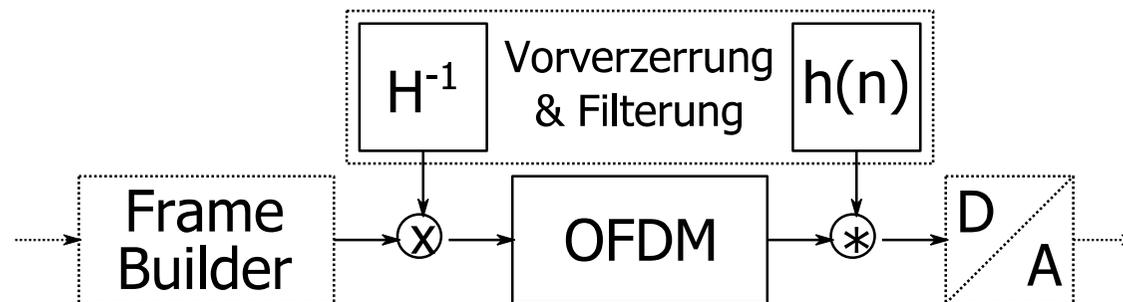
Vorschlag: Filterung mit Vorverzerrung

- Entsprechend der traditionellen FIR-Filterung des OFDM-Signals erfolgt die Filterung vor der eigentlichen Digital/Analog-Konvertierung
- Die durch die Filterung verursachten **linearen Verzerrungen werden** jedoch durch eine zusätzliche Vorverzerrung der aktiven Subträger (bzw. des aktiven Spektrums) des OFDM-Signals **kompensiert**
- Die **Kompensation** erfolgt hierbei **durch die inverse Übertragungsfunktion H^{-1}** des eingesetzten FIR-Filters nach dem Frame-Building und vor der eigentlichen IDFT
- Die Filterung mit Vorverzerrung wirkt hierbei in Bezug auf einen synchronisierten Empfänger transparent, d.h. dieser „sieht“ ein Signal, das dem Signal eines Systems ohne Filterung und ohne Vorverzerrung entspricht (linear zeitinvariantes System)



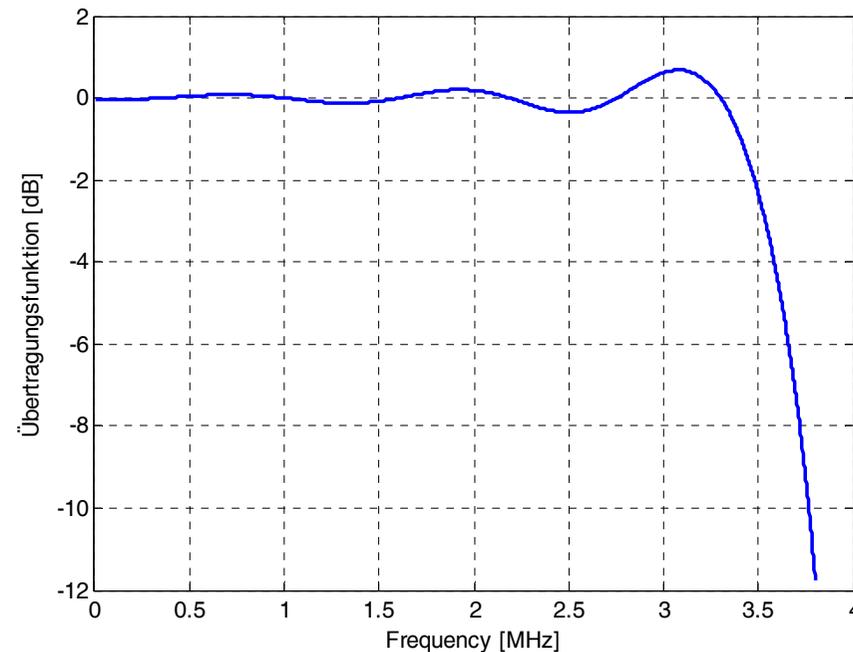
Vorschlag: Filterung mit Vorverzerrung

- Um eine **effektive zeitdiskrete Filterung** der OoB-Emissionen durchzuführen, ist es essentiell, dass das Signal bei Filterung eine **höhere Bandbreite** (und somit Abtastfrequenz) besitzt, **als das eigentliche aktive Spektrum** des OFDM-Signals
- Die kann erzielt werden durch Anpassung
 - der Abtastfrequenz durch entsprechendes **Resampling** im Zeitbereich oder
 - der Größe der IDFT durch entsprechendes **Zero-Padding**
- Im ersteren Fall wird die Filterung dabei sowohl zur Reduktion der Out-of-Band-Emissionen als auch zur Unterdrückung der Wiederholerspektren, die durch das Resampling entstehen, angewendet



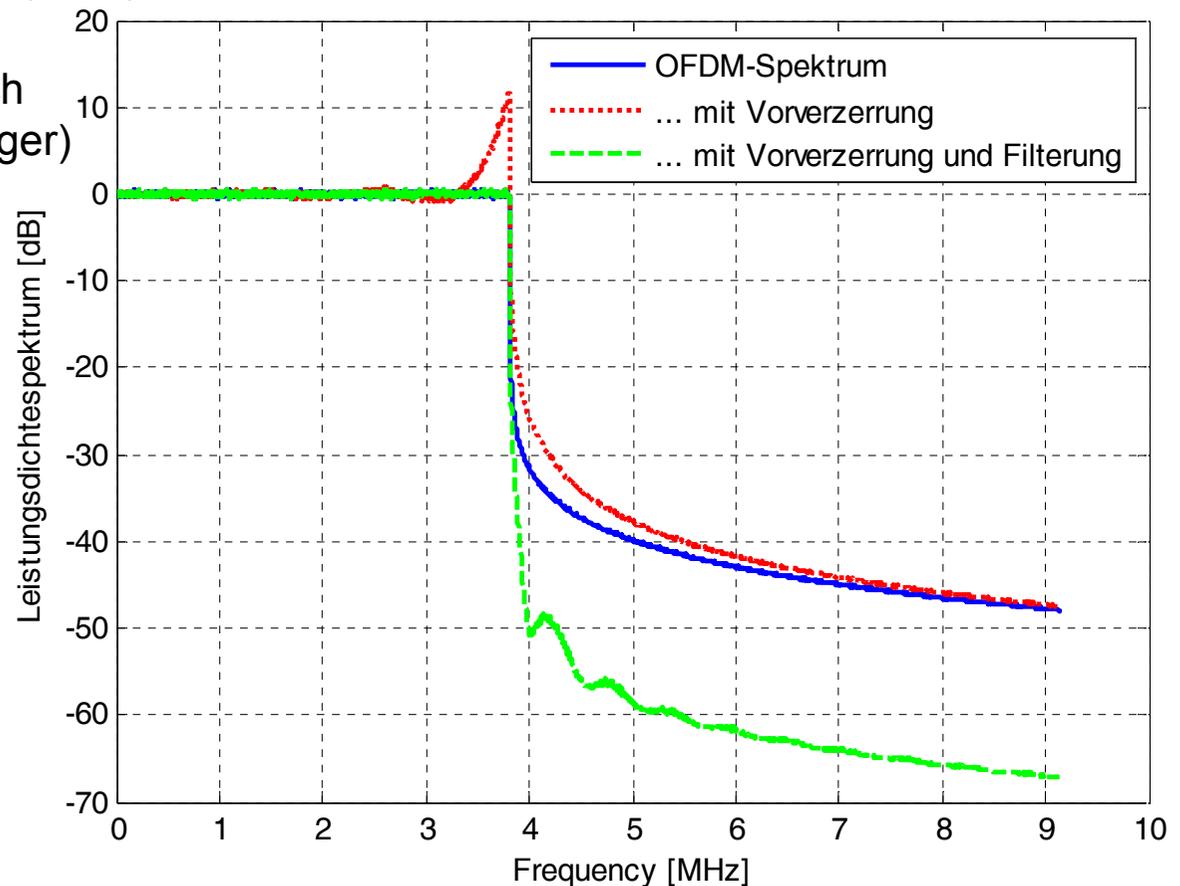
Filter mit kurzer Impulsantwort

- Bei der Auswahl der Parameter für die Erstellung des Rechteck-Filters wurden lediglich zwei Randbedingungen vorgegeben:
 - Die **zeitliche Länge der Impulsantwort** sollte die Hälfte des kürzesten verfügbaren Schutzintervalls von $1/128$ der Symbollänge eines DVB-C2-Signals nicht überschreiten, um Inter-Symbol-Interferenz gänzlich auszuschließen
 - Die Position des Übergangsbereichs zwischen Durchlass- und Sperrbereich wurde so gewählt, dass das **erste Minimum der Übertragungsfunktion** des Filters möglichst exakt **bei ± 4 MHz** liegt
- Die **Überabtastung** des Ausgangssignals wurde hierbei durch Vergrößerung der IDFT um den **Faktor 8** erzielt (entspricht einer Signalbandbreite von 73,1 MHz)
- Die Filterlänge beträgt hierbei 129 Samples (welches der Hälfte der Länge des Schutzintervalls beträgt)



Filter mit kurzer Impulsantwort

- Ein Vergleich des originalen Spektrums mit dem gefilterten und vorverzerrten Signal zeigt für den **aktiven Spektrumsbereich** (aktive Subträger) **keine Degradation** in Bezug auf den mittleren quadratischen Fehler (MSE)
- Die Verringerung der Unterdrückung im OoB-Bereich (durch Anhebung der Randträger) entspricht dem Unterschied zwischen dem originalen OFDM-Spektrum und dem vorverzerrten Signal
- Dies gilt jedoch nur solange die **Impulsantwort kleiner als das Schutzintervall** ist, wie in diesem Fall jedoch gegeben ist



Einschränkungen bei der Anwendung der Vorverzerrung

- Die Vorverzerrung erlaubt den Einsatz von **Filtern mit kurzer Impulsantwort** zur Vermeidung von Inter-Symbol-Interferenzen
 - Filter mit längerer Impulsantwort führen aber weiterhin zu Inter-Symbol-Interferenz
- Die Vorverzerrung führt zumeist zu einer **Anhebung der Randträger**, um einen entsprechend gegenläufigen Verlauf der Übertragungsfunktion auszugleichen
 - Dies führt zu einer Anhebung der OoB-Emissionen des vorverzerrten Signals und somit zu einer Verringerung der Unterdrückung der OoB-Emissionen im Vergleich zu einem nicht vorverzerrten Signal
 - Dieser Effekt ist bei der Wahl und Auslegung des Filters gegebenenfalls gesondert zu berücksichtigen

Zusammenfassung und Ausblick

- Die in diesem Beitrag gezeigte Erweiterung einer traditionellen **FIR-Filterung mit einer Vorverzerrung** der aktiven Subträger eines OFDM-Signals **erlaubt den Einsatz von Filtern mit kurzer Impulsantwort**
 - Die **Vorverzerrung** erfolgt hierbei **auf Basis der inversen Übertragungsfunktion** des Filters
 - Eine Degradation des aktiven Signalspektrums erfolgt hierbei nicht, solange die zeitliche Länge der Impulsantwort in Bezug auf das verfügbare Schutzintervall Berücksichtigung findet
 - Durch die Wahl von Filtern mit kurzer Impulsantwort lässt sich selbst bei den verfügbaren kurzen Schutzintervallen von $1/64$ und $1/128$ der Symbollänge eines DVB-C2-Systems eine Inter-Symbol-Interferenz vermeiden bei dennoch guter Unterdrückung der OoB-Emissionen
- Die Erweiterung wird als eine mögliche Methode zur Verringerung der OoB-Emissionen in den Implementation Guidelines von DVB-C2 eingebracht
- Zuvor wird dieses Verfahren jedoch in einer realen Implementierung getestet werden

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Dipl.-Ing. Philipp Hasse

hasse@ifn.ing.tu-bs.de



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für Nachrichtentechnik