

Orthogonales Frequenzmultiplex – Cool Communications

Der Fachartikel beschreibt die Funktionsweise des Orthogonalen Frequenzmultiplexverfahrens (OFDM), mit dem die Datenrate sehr flexibel an die Gegebenheiten des Übertragungskanals angepasst werden kann.

OFDM hat ein sehr breites Anwendungsfeld sowohl in der drahtlosen als auch in der drahtgebundenen Telekommunikationstechnik. Von Dr.-Ing. Alexander Adams

Die Sesshaft- und Landwirtwerdung des Homo sapiens ging mit der Domestizierung des Getreides einher, um hieraus das tägliche Brot zu gewinnen. Zum Ingenieur aber wurde der Mensch, als er die Brotschneidemaschine erfand, um den ofenfrischen Brotlaib in Segmente definierter Länge zu zerteilen, und somit die Aufstrich- und Belegfläche für die nur unwesentlich später domestizierte Marmelade zu maximieren.

OFDM als „Schneidemaschine“

Zurück aus diesen lukullisch-fantastischen Sphären in die Welt der Kommunikationstechnik: Dort stellt das Orthogonale Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) in der Tat eine solche „Schneidemaschine“ dar, jedoch nicht für die effiziente Verteilung von Teig- und Backwaren, sondern für die optimale Nutzung von Frequenzspektrum in der Übertragungstechnik. OFDM ist ein Modulationsansatz. Er teilt das Spektrum in Tausende von schmalbandigen Unterkanälen, so genannte „Subcarrier“, die unabhängig voneinander modulierbar und adressierbar sind. Dadurch kann der Datendurchsatz in Up- und Downstream granular an die Bedingungen im Übertragungskanal angepasst und somit optimiert werden. Nicht ohne Grund heißt es, OFDM sei „das Tollste seit geschnittenem Brot“. Cool Communications eben. OFDM ist ein digitales Modulationsverfahren, das vor allem in der drahtlosen Datenübertragung schon seit vielen Jahren breite Anwendung findet, z. B. bei WLAN, LTE, DAB (Digital Audio Broadcasting) und DVB (Digital Video

Broadcasting) ... und seit einigen Jahren durch den Einsatz der DOCSIS 3.1-Technologie auch im koaxialen Teil von HFC-Netzen. Die Vorteile von OFDM sind vielfältig und tragen zu seiner guten Eignung für den Einsatz in modernen Kommunikationssystemen bei, wie im Folgenden erläutert wird.

Modulation – ein Grundprinzip der Nachrichtentechnik

Zunächst soll jedoch der Begriff der Modulation einer näheren Betrachtung unterzogen werden. Die Modulation ist ein fundamentaler Prozess in der Nachrichtentechnik, bei dem die Eigenschaften einer Trägerschwingung – typischerweise eine auch „Carrier“ genannte hochfrequente und oftmals sinusförmige Schwingung – durch ein zu übertragendes Signal, die „Nachricht“ oder „Message“, systematisch

verändert werden. Abbildung 1 soll diesen Gedanken veranschaulichen. Hier wird die Information in der Nachricht (Kurve oben) entweder durch Änderungen der Amplitude (AM) oder der Frequenz der Trägerschwingung (FM) übertragen. Ziel einer Modulation ist die Übertragung von Informationen von einem Sender zu einem Empfänger über ein bestimmtes Medium (Kabel, Luft) und eine definierte Frequenz. Die Modulation verschiedener Nachrichten auf unterschiedliche Frequenzen ermöglicht die gleichzeitige Übertragung von Informationen, ohne dass sich diese bei der Übertragung gegenseitig stören. Das Prinzip der Modulation kann mit der Zuordnung von Fahrzeugen zu Fahrspuren auf einer Autobahn verglichen werden, wobei die Fahrspuren die verschiedenen Übertragungskanäle und die Fahrzeuge die zu übertragenden Daten darstellen.

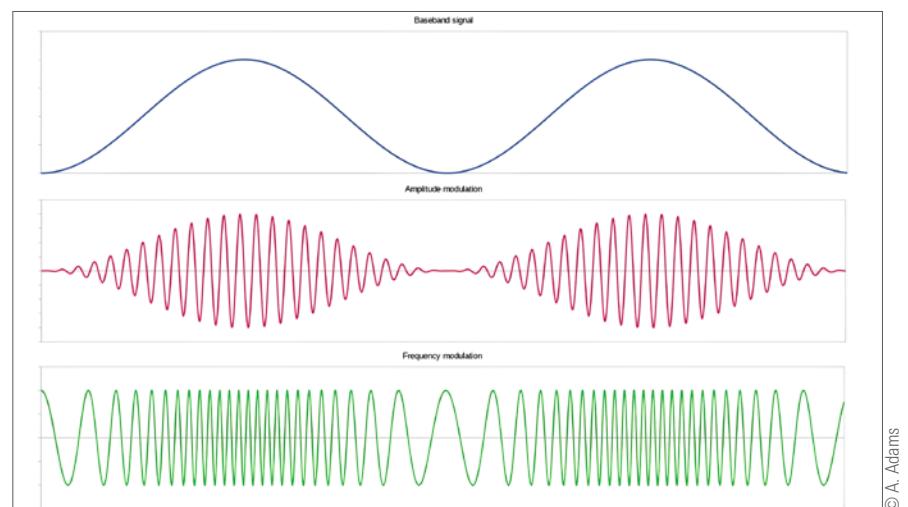


Abbildung 1: AM- und FM-Modulation

© A. Adams

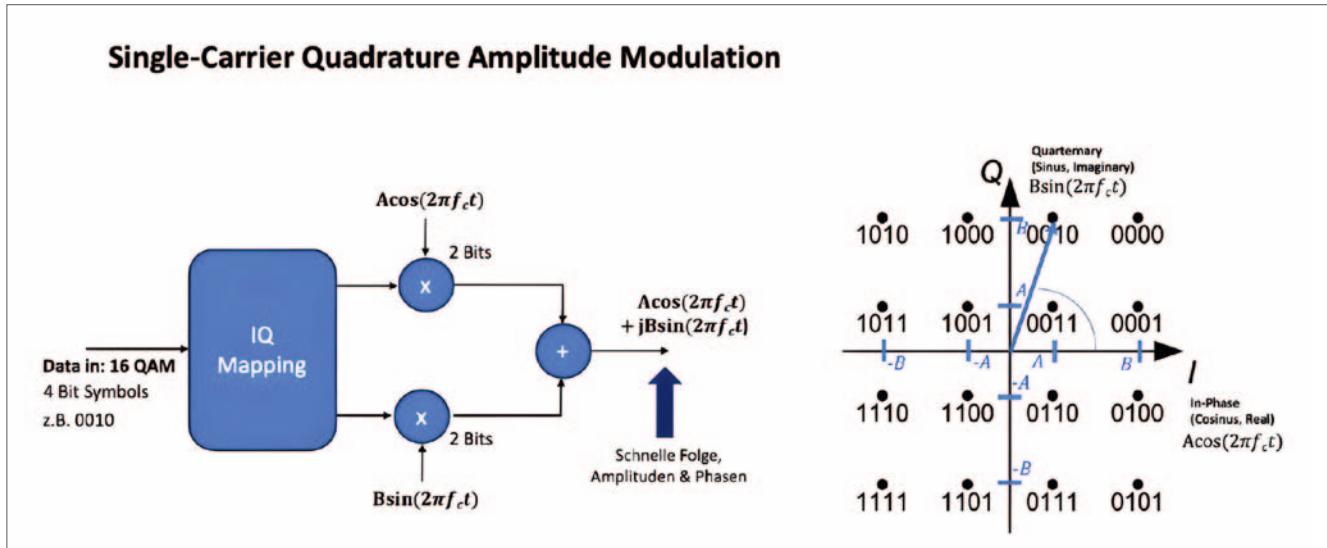


Abbildung 2: Das Prinzip der Single-Carrier Quadrature Amplitude Modulation (SC-QAM)

© A. Adams

Vergleich von SC-QAM- und OFDM-Verfahren

Sowohl in der drahtgebundenen als auch in der drahtlosen Kommunikation ermöglichen Modulationsverfahren eine effiziente Nutzung des verfügbaren Frequenzspektrums und die Übertragung von Daten über große Distanzen. Es gibt verschiedene Modulationsarten, die jeweils unterschiedliche Aspekte der Trägerwelle verändern. In den bisherigen DOCSIS-Systemen (bis zur Version 3.0)

wurde eine sogenannte Single-Carrier Quadrature Amplitude Modulation (SC-QAM) verwendet. Der folgende Vergleich der Funktionsweisen von SC-QAM und OFDM anhand von DOCSIS-Anwendungen erläutert die Vorteile des OFDM-Verfahrens. In den europäischen HFC-Netzen werden für SC-QAM-Übertragungen Kanäle mit einer Bandbreite von 8 MHz verwendet. Da die Bandbreite eines Übertragungskanals der maximalen Symbolrate des Kanals entspricht, können über einen

8 MHz breiten Kanal bis zu 8 Millionen Symbole pro Sekunde gesendet werden. Da im Frequenzbereich jedoch ein gewisser Abstand zu Nachbarkanälen eingehalten wird, um Interferenzen zu vermeiden, werden pro 8-MHz-Kanal nur 6,9 MHz verwendet, sodass sich eine Symbolrate von 6,9 MBaud oder 6,9 Millionen Symbolen pro Sekunde ergibt. Dabei kann es sich um Symbole beliebiger Modulationsordnung handeln – ob ein Bit pro Symbol oder zehn, es sind immer 6,9 Millionen pro Sekunde. Eine 256 QAM DOCSIS

Mathematical orthogonality: $\langle f, g \rangle = \int_a^b f(x)g(x)dx = 0$

Gilt für $f(x) \neq g(x)$
Wenn $f(x) = g(x)$, Resultat ungleich 0

Abbildung 3: Mathematische Definition der Orthogonalität

3.0 Downstream-Übertragung verwendet 8 Bits pro Symbol, was bei einer Symbolrate von 6,9 MBaud dann 55,6 MBit/s ergibt, was wiederum einer Bitdauer von 18 Nanosekunden entspricht. Bei SC-QAM dauert also ein 256-QAM-Symbol von 8 Bits 144 Nanosekunden. SC-QAM-Symbole belegen mit 8 MHz einen großen Frequenzbereich, mit 144 Nanosekunden jedoch einen sehr kleinen Zeitbereich, was mit einer hohen Störanfälligkeit einhergeht. Eine Störeinstrahlung von ein bis zwei Mikrosekunden Dauer kann mehrere Symbole hintereinander empfindlich stören. Darüber hinaus können Mikroreflexionen, die die Nutzdaten überlagern, die Kurzzeitsignale negativ beeinflussen.

Praktisch wird eine SC-QAM dadurch übertragen, dass sowohl eine Sinus-Schwingung als auch eine Cosinus-Schwingung auf der gleichen Mittenfrequenz des designierten 8-MHz-Kanals verwendet werden, wobei die Amplitude der Cosinus-Schwingung die x-Koordinate, und die Amplitude der Sinus-

Schwingung die y-Koordinate der übertragenen Bitkombination auf dem Konstellationsdiagramm darstellt, ähnlich wie Längen- und Breitengrade einen Punkt auf der Landkarte bestimmen. Das Signal wird als Summe übertragen, in dieser Form kann es als Vektor und Phasenwinkel dargestellt werden, wie Abbildung 2 zeigt. Sinus und Cosinus können gleichzeitig auf derselben Frequenz verwendet werden, da diese Funktionen in einem Verhältnis zueinander stehen, das mathematisch als Orthogonalität bezeichnet wird. Die mathematische Definition der Orthogonalität ist in Abbildung 3 dargestellt, dies dient hier jedoch nur der Information und soll nicht näher erläutert werden.

Obwohl die Orthogonalität der Träger auch bei OFDM eine entscheidende Rolle spielt und bereits im Namen enthalten ist, verfolgt OFDM einen grundsätzlich anderen systemtechnischen Ansatz als SC-QAM. Anstelle eines schnell modulierenden Trägers mit kurzen Symbolzeiten und entsprechend brei-

tem Frequenzbereich wird hier prinzipiell zunächst der schnelle, serielle Bitstrom in eine Vielzahl von langsameren, parallelen Bitströmen aufgefächert. Abbildung 4 soll dieses Prinzip verdeutlichen. Bei einer Aufteilung auf n parallele Ausgänge verlängert sich die Symbolzeit an den einzelnen Ausgängen entsprechend um den Faktor n. In OFDM-Systemen gibt es somit Tausende von schmalbandigen „Subcarrier“, die auf harmonischen Frequenzen angeordnet sind und die eine geringe Bandbreite aufweisen, wie z. B. 25 KHz oder 50 KHz in DOCSIS 3.1- und 4.0-Systemen. Dafür ist die Symbolzeit jedes Ausgangs mit 40 oder 20 Mikrosekunden deutlich länger als in SC-QAM Systemen, jedoch unter prinzipieller Beibehaltung des Informationsgehalts. Das heißt, dass der Effekt einer während der Übertragung zufällig eingestrahlten Störung, wie z. B. ein Impuls von einer Mikrosekunde Dauer, in OFDM-Systemen sehr viel weniger gravierende Auswirkungen auf die Signalqualität hat, als es in den klassi-

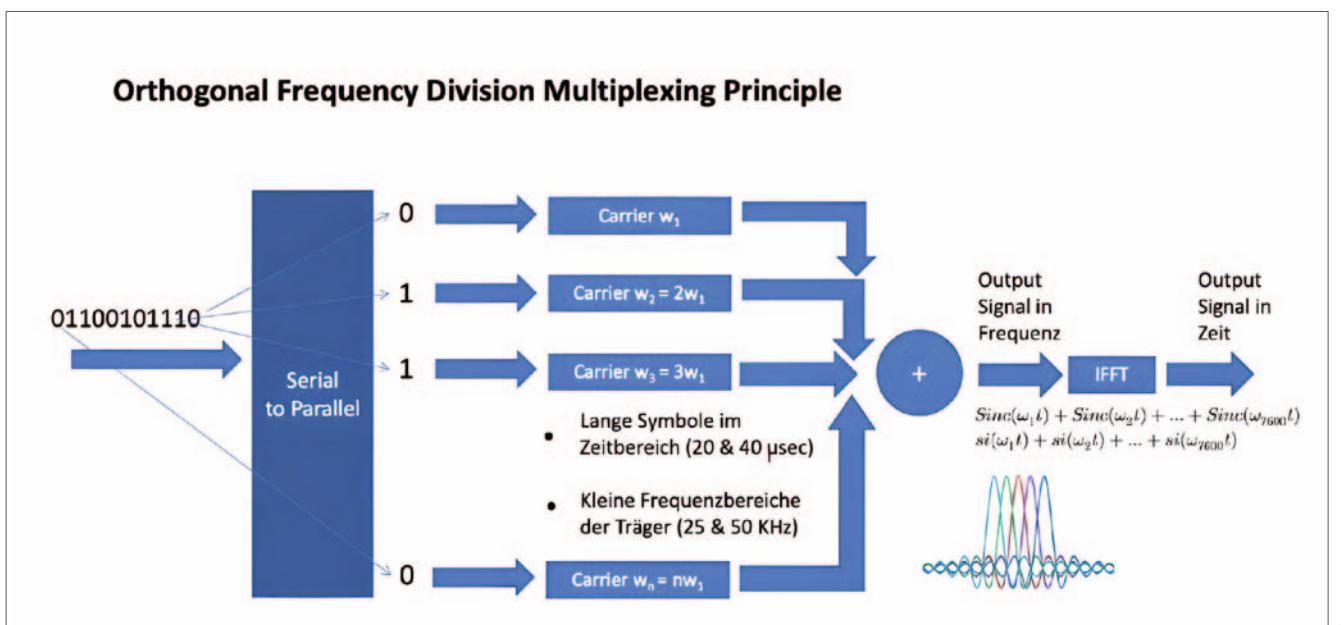


Abbildung 4: Das Prinzip des Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

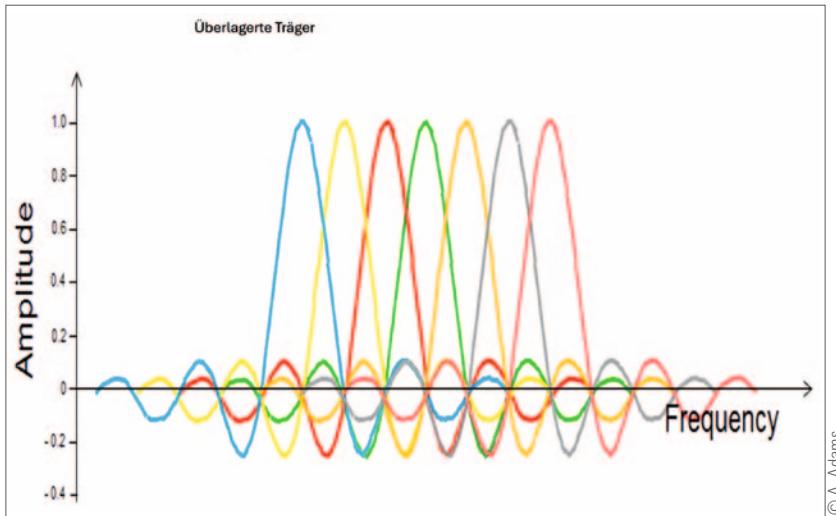


Abbildung 5: Überlagerte si-Funktionen, OFDM-Subcarrier

schen SC-QAM-Kanälen der Fall ist und wo derselbe Impuls mehrere kurze Symbole erheblich stören würde. Die Auswirkungen von Mikroreflexionen lassen sich mit OFDM durch Definition von Cyclic-Prefix-Schutzintervallen im Zeitbereich korrigieren. Lange Symbolzeiten machen OFDM robust.

Si-Funktionen: Überlagerung ohne Korrelation

OFDM-Systeme verwenden keine sinusförmigen Modulationsträger, sondern sogenannte si-Funktionen (im Englischen „Sinc-Function“ genannt). Diese weisen im Gegensatz zu sinusförmigen Schwingungen eine Ausdehnung im

Frequenzbereich auf, wie in Abbildung 4 dargestellt. Wenn sich Modulationsträger im Frequenzbereich überlagern, dann interferieren sie grundsätzlich miteinander. Ausnahmen bilden orthogonale Funktionen, wie oben am Beispiel von Sinus und Cosinus dargestellt. Die mathematische Orthogonalität in Abbildung 3 kann ebenso für mehr als zwei Funktionen gelten. Abbildung 5 kann als grafische Darstellung von orthogonalen si-Funktionen gelten. Die einzelnen si-Funktionen sind auf harmonischen Frequenzen, also auf ganzzahligen Vielfachen einer Grundfrequenz, angeordnet. Diese Anordnung bewirkt, dass das Maximum einer jeden si-Funktion die Nulldurchgänge aller anderen Funktio-

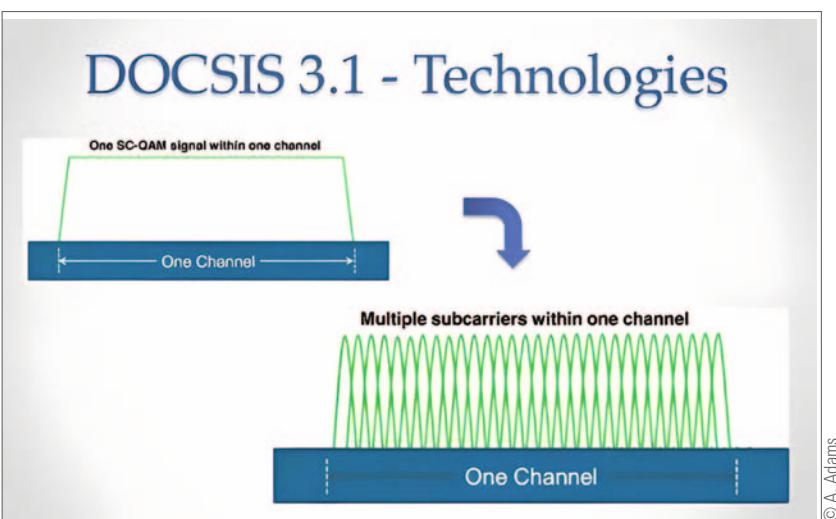


Abbildung 6: OFDM-Subcarrier im 8-MHz-Spektrum

nen überlagert, was keinerlei Auswirkungen auf die maximale si-Funktion hat. So können sich die Funktionen überlagern, ohne zu korrelieren.

Mehr Effizienz und Flexibilität

Auf diese Weise kann OFDM das Frequenzspektrum effizienter als viele andere Modulationsverfahren nutzen, indem es mehrere überlappende, orthogonale Subcarrier verwendet, um Daten parallel zu übertragen. Dies ermöglicht eine höhere Datenrate innerhalb eines gegebenen Bereichs des Spektrums. Weiterhin ermöglicht die Unterteilung des Frequenzbereichs in schmalbandige Subcarrier die Optimierung des Datendurchsatzes innerhalb des modulierten Frequenzbereichs. Innerhalb des Spektrums eines 8 MHz breiten Kanals finden in einem DOCSIS 3.1-System 160 Subcarrier von 50 KHz Bandbreite Platz, bei einer verwendeten Subcarrier-Bandbreite von 25 KHz gar 320 Stück. Dieser Gedanke wird in Abbildung 6 dargestellt. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass theoretisch jeder Subcarrier eines DOCSIS 3.1-Downstream-OFDM-Kanals an unterschiedliche Modems gesendet werden kann. Im Netzbetrieb wählt man hierzu jedoch kleine Gruppen von Subcarriern, deren Modulationsordnung für den vorgesehenen Übertragungsbereich im Frequenzspektrum optimiert wird.

OFDM ermöglicht zudem eine flexible Anpassung der Modulationsordnung und damit der Datenraten sowie der Fehlerkorrekturverfahren an die Qualität des Übertragungskanals, indem Parameter wie Modulationsart und Codierungsraten für einzelne Subcarrier angepasst werden können. Die orthogonalen Eigenschaften der Subcarrier vereinfachen das Empfängerdesign, was zu einer Reduktion der Komplexität und der Kosten führt. Darüber hinaus ermöglicht die FFT-basierte (Fast Fourier Transform) Implementierung von OFDM eine effiziente Realisierung in Hardware. Die Flexibilität von OFDM wird an folgendem Beispiel deutlich: In einem geografischen Gebiet, das von einem Upstream-/Downstream-Port eines DOCSIS 3.0 CMTS versorgt wird, muss allen in diesem Gebiet versorgten Teilnehmern eine Modulationsordnung zugewiesen werden, die auch im gestörtesten Abschnitt dieses Gebietes empfangen werden kann. Bei DOCSIS 3.0 SC-QAM kann daher 256 QAM im Downstream nur dann realistisch eingesetzt werden, wenn alle angeschlossenen Modems auch 256 QAM empfangen können. Ist dies bei zu vielen Modems nicht der Fall, muss die Modulationsordnung für alle Modems in diesem Bereich reduziert werden, was zu einer Verschwendungen von Datenkapazität führt. Auf OFDM-Technologie basierende

Systeme wie DOCSIS 3.1 und 4.0 teilen den Frequenzbereich in viele schmalbandige Subcarrier und können damit jedem Modem genau den Datendurchsatz zur Verfügung stellen, der auf dem individuellen Übertragungsweg zwischen Modem und CMTS möglich ist. Diese Gedanken sollen in Abbildung 7 dargestellt werden.

Fazit

OFDM ist eine robuste Technologie, die lange Signale im Zeitbereich und ein granular fassbares und optimierbares Frequenzspektrum liefert. Sie wurde für den Mobilfunk entwickelt, wo stark gestörte Umgebungen und Mehrwegeausbreitungen Teile der Problemstellung sind. Koaxiale Kabel stellen jedoch per se eine geschirmte Umgebung dar, in der die im Mobilfunk essenzielle Robustheit der OFDM-Signale nicht wirklich notwendig ist, da das Innere eines Koaxkabels aufgrund des metallischen Außenleiters einen abschirmenden „Faradaykäfig“ darstellt, in dem die Verwendung von OFDM primär zu einer signifikanten Steigerung der auf die Symbole modulierbaren Bits führt. Die Verwendung von OFDM bedeutet aber nicht, dass bei der Koax-Installation nunmehr Fahrlässigkeit und Schlechter Einkehr halten können, denn die durch OFDM gewonnene Robustheit wird durch bis zu 50 Prozent erhöhten Datendurchsatz und

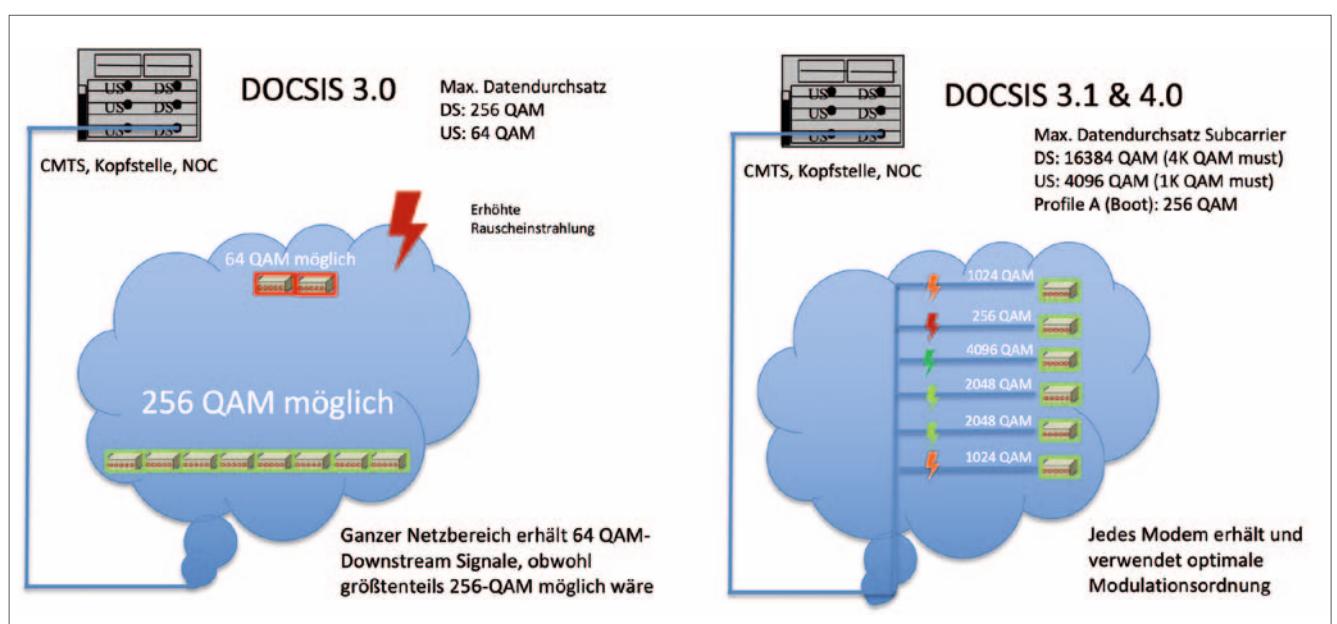


Abbildung 7: Individuelle Gestaltung der Modulationsordnung mit OFDM

damit wiederum eine erhöhte Störungsanfälligkeit bei steigender Modulationsordnung wieder wettgemacht.

OFDM ermöglicht sehr hohe Datenraten, was für moderne Anwendungen wie das Streaming von HD-Video, Online-Gaming und Internet-of-Things-Applikationen unerlässlich ist, wobei erläutert wurde, wie die Fähigkeit, Daten über viele orthogonale Subcarrier parallel zu übertragen, das Frequenzspektrum optimiert nutzt. In einer Welt, in der Spektrum eine begrenzte und sehr wertvolle Ressource darstellt, ist diese Effizienz von entscheidender Bedeutung und wird es auch in Zukunft bleiben. OFDM ist inhärent robust gegenüber einer Vielzahl von Kanalverzerrungen, die sowohl in mobilen wie auch in kabelgebundenen Systemen auftreten. Diese Robustheit verbessert die Zuverlässigkeit der Datenübertragung in verschiedenen Umgebungen. Zudem ermöglicht OFDM eine flexible Anpassung an verschiedene Kanalbedingungen durch die Anpassung der



© A. Adams

Dr.-Ing. Alexander C. Adams verfügt über 23 Jahre Erfahrung in der deutschen und internationalen Breitbandkommunikationsindustrie. Er ist Dozent, Spezialist für DOCSIS-Technologie und europäischer Repräsentant der SCTE – Society of Cable Telecommunications Engineers (US), arbeitet in der Proactive Network Maintenance Research Gruppe der CableLabs und ist Dozent an der Jade Hochschule in Wilhelmshaven sowie Auditor der dibkom. Alex hält einen Bachelor- sowie Masterabschluss in Elektrotechnik von der University of Hawai'i und hat an der TU Darmstadt promoviert.

Anzahl der verwendeten Subcarrier und ihrer Eigenschaften und kann mit dieser Skalierbarkeit eine Vielzahl von Diensten unterstützen, vom Breitbandinternet bis zum digitalen Rundfunksystem.

OFDM arbeitet sehr gut mit Mehrantennensystemen (MIMO – Multiple Input, Multiple Output) zusammen, die für die Erhöhung der Datenraten und die Verbesserung der Signalqualität in modernen Mobilfunknetzen entscheidend sind. Die Kombination von MIMO-Technologie mit OFDM stellt eine Grundlage für die nächsten Generationen drahtloser Kom-

munikationssysteme dar. Mit der Einführung neuer Technologien wie 5G und auch 6G sowie dem wachsenden Bedarf an drahtloser Kommunikation für das Internet-of-Things, autonomes Fahren und Applikationen der Industrie 4.0, ist eine effiziente, zuverlässige und flexible Übertragungstechnik erforderlich. Das Orthogonale Frequenzmultiplexverfahren bietet eine Grundlage, um diese Anforderungen zu erfüllen und die Entwicklung zukünftiger kabelgebundener sowie drahtloser Kommunikationstechnologien weiterhin zu unterstützen. ■