

1 Einleitung

Schalttopologien werden bereits seit vielen Jahrzehnten verwendet, um den Wirkungsgrad verschiedenster Spannungsumformungen zu verbessern. Sie nutzen aus, dass über einem idealen Schalter keine Leistung abfallen kann. Gelingt es, durch das geschickte Timing von Schaltvorgängen in einem Knoten einen Spannungsverlauf zu erzeugen, der mit ausschließlich reaktiven Bauelementen (z.B. ein LC-Filter) zu dem gewünschten Ausgangssignal umgeformt werden kann, so kann in der Theorie mit idealen Komponenten ein Wirkungsgrad von bis zu 100 % erreicht werden. Dies ist mit linear arbeitenden Schaltungskonzepten nicht möglich.

Schon 1958 wurden in der Stromversorgung des IBM 704 Computers Thyratrons als gesteuerte Schaltelemente benutzt, um die Betriebsspannung auf einen konstanten Wert zu regeln [1, Seite 60-12ff]. Während das Funktionsprinzip hier noch einer Phasenanschnittsteuerung gleicht, publiziert D. Paynter von General Electric 1959 einen transistorbasierten DC/DC Wandler [2], dessen grundsätzliches Funktionsprinzip dem heutiger DC/DC Konverter entspricht: Die Ausgangsspannung des Sekundärkreises eines Transformators wird durch die Veränderung der Pulsweite des die Primärseite treibenden Rechtecksignals auf den Sollwert geregelt. Für die Erzeugung hochfrequenter Signale im Zusammenhang mit Sendeanlagen berichtet [3] im Jahr 1963 von der Verwendung von Transistorverstärkern im reinen Schaltbetrieb. Frequenzen unterhalb von 1 MHz mit Ausgangsleistungen im einstelligen Wattbereich konnten bereits bei einem Endstufenwirkungsgrad von 95 % erzeugt werden. Bei Abzug der Eingangssignalleistung wurde ein Wirkungsgrad von 70 - 80 % angegeben. Besonders hervorgehoben werden die deutliche Reduktion der Abwärme in einer konkreten Sendeanlage und die damit verbundene Vereinfachung des Wärmemanagements. Nur zwei Jahre später stellt [4] die Verwendung von pulswertenmodulierten Eingangssignalen zur Erzeugung amplitudenmodulierter Sendesignale vor. Das Frequenzlimit liegt nun bereits im unteren zweistelligen MHz-Bereich. Seitdem sind viele Veröffentlichungen zu diesem Thema erschienen, die versuchen, immer höhere Frequenzen auch mit den heutigen komplexwertigen Basisbandmodulationen zu ermöglichen.

Außerhalb der Hochfrequenzanwendungen sind Topologien im Schaltbetrieb inzwischen allgegenwärtig. Selbst günstigste Schaltnetzteile erreichen über weite Bereiche ihrer Lastkurve Wirkungsgrade jenseits der 80 %, einige Wechselrichter kommen sogar auf 96 - 98 % [5, S. 103: Wirkungsgrad STP 20000TLEE-10]. Auch im Audiobereich sind digitale Verstärker üblich geworden, die ohne weiteres über 90 % Wirkungsgrad erzielen und über einen weiten Aussteuerungsbereich halten können [6-8]. Ermöglicht wurde diese Entwicklung unter anderem durch die Verfügbarkeit schneller Digitalschaltungen und moderner Leistungstransistoren, deren Grenzfrequenz so deutlich oberhalb der für Audioanwendungen notwendigen 20 kHz liegt, dass sie auch bei Verwendung vergleichsweise einfacher Modulationsverfahren effizient schalten können.

Im Bereich der Hochfrequenztechnik ermöglicht die voranschreitende Entwicklung immer schnellerer Transistoren das Vordringen halbleiterbasierter Verstärker zu immer höheren

Frequenzen. Während lineare Verstärker die Maximalfrequenz des Transistors voll ausreizen können, liegen digitale Verstärker in diesem Aspekt zurück. Das für den Schaltbetrieb notwendige Rechtecksignal enthält Oberwellen, von denen zumindest einige mitverstärkt werden müssen, um einen sinnvollen Effizienzvorteil gegenüber linearen Verstärkern zu erreichen. Entsprechend geringer ist die maximale Schalt- und Trägerfrequenz gegenüber der Maximalfrequenz des Transistors. In jüngster Zeit sind jedoch High-Electron-Mobility-Transistoren (HEMTs) auf Gallium-Nitrid-Basis (GaN-Basis) verfügbar geworden, deren hohe Leistungsverstärkung bis deutlich in den zweistelligen GHz-Bereich hinein bei mehreren Watt Ausgangsleistung es nun möglich erscheinen lässt, digitale Leistungsverstärker zumindest im einstelligen GHz-Bereich mit guter Effizienz zu betreiben. Gerade in diesem Frequenzband besteht durch die immense globale Verbreitung von Mobilkommunikation und drahtloser Datenübertragung ein hoher Bedarf an energieeffizienten und kompakten Verstärkern. Diese Arbeit möchte die Signalaufbereitung für den digitalen Verstärker dahingehend optimieren, dass zeitgleich die Effizienz und die Trägerfrequenz bei gegebener Transistortechnologie maximiert werden. Es wird aufgezeigt, wie sich die Signalaufbereitung für die Anforderungen des jeweiligen Einsatzzweckes anpassen lässt, um stets optimale Ergebnisse zu erzielen. Mit zukünftigen Weiterentwicklungen der Transistortechnologie kann das Aufbereitungsverfahren mitwachsen und sich anpassen. Bestehende Verfahren haben sich im Unterschied dazu als insgesamt zu unflexibel oder in der Praxis schwer umsetzbar erwiesen.

Bedarf an Mikrowellen-Leistungsverstärkern

Die Mobilkommunikation hat in den letzten Jahren global eine massive Verbreitung gefunden. Seit Aufkommen der Smartphones steigt die nötige Datentransferkapazität umso rasanter an und Nachfrage nach noch besserer Netzabdeckung, insbesondere in heutigen Problemkonstellationen, wie z.B. Innenräumen, gewinnt zunehmend an Nachdruck. Auch die Anzahl der Endgeräte nimmt weiterhin zu und die langsam einsetzende massenweise Integration kleinerer Geräte in das Internet-of-Things (IoT) tut ihr übriges, den Druck auf Infrastruktur und Technologie zu erhöhen [9,10]. Die 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP) ruft in ihrer Broschüre [11] sogar das Ziel aus, 20 Milliarden personenbezogener Kommunikationsgeräte und 7 Billionen Geräte („Things“) in einem gemeinsamen Funkstandard unterstützen zu wollen. Entgegenet wird diesen gestiegenen Anforderungen gleichermaßen mit der Verbesserung der Funkstandards, dem Ausnutzen von massive MIMO Verfahren, sowie der massiven Erhöhung der Anzahl der Netzknoten in Form von Basisstationen.

Bestehende, analoge Konzepte für Mikrowellensendeverstärker wie Klasse E, Klasse G oder Doherty versuchen zumindest das durch die massive Verbreitung der Funktechnik immer stärker ins Gewicht fallende Problem mangelnder Leistungseffizienz der Verstärker zu minimieren. Verstärker dieser Bauart sind in ihrer praktischen Umsetzung jedoch im allgemeinen vergleichsweise voluminös (z.B. aufgrund der notwendigen Anpassungsnetzwerke) und zudem schmalbandig auf ein bestimmtes Frequenzband zugeschnitten. Weniger schmalbandige Verstärker büßen hingegen Wirkungsgrad ein. Insbesondere für zukünftige Anwendungsszenarien ist aber eine schnelle (Um-)Konfigurierbarkeit und ein geringes Volumen bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad erforderlich. Die bestehenden Systeme stoßen hier an ihre systemisch bedingten Grenzen. Abhilfe könnten digitale Leistungsverstärker schaffen, die aufgrund ihres Funktionsprinzips diverse Vorteile gegenüber den analogen Systemen aufweisen. Das geringe Volumen digitaler Verstärker bietet zusätzlich

den Vorteil, dass die Verstärker räumlich direkt bei der Antenne angeordnet werden können. Die in der Konsequenz entfallenden Leitungsverluste auf der Strecke zwischen Verstärker und Antenne sorgen zusätzlich für erhebliche Energieeinsparungen und der Verstärker kann leistungsschwächer ausgelegt werden. Mit reduzierter Wärmeabgabe der Verstärker kann schließlich auch die zur Kühlung aufgebrachte Energiemenge vermindert werden.

Konzept digitaler Verstärker

Digitale Leistungsverstärker sind dadurch gekennzeichnet, dass der Ausgangstransistor als Schalter betrieben und binär angesteuert wird. In beiden Schaltzuständen ist das Produkt aus Spannungsabfall und Stromfluss über den jeweiligen Transistor nahezu null. Unter Annahme idealer Bedingungen kann also ein theoretischer Wirkungsgrad von 100 % errechnet werden. Bei analogen Verstärkern befindet sich das aktive Bauelement hingegen zumindest zeitweise in einem resistiven Zustand, die Verlustleistung verschwindet nicht. In der Konsequenz müssen analoge Verstärker einen systembedingt limitierten Wirkungsgrad $< 100\%$ besitzen, der auch mit idealen Bauelementen nicht überschritten werden kann. Ein Klasse B Verstärker ist für ein reines Sinussignal mit maximaler Amplitude beispielsweise auf 78.5 % limitiert.

In der Praxis wird der erzielbare Wirkungsgrad beider Verstärkerarten durch die Nicht-idealitäten realer Bauelemente zusätzlich verringert. Durch die stetig voranschreitende Verbesserung der Transistoreigenschaften ist aber davon auszugehen, dass diese Nicht-idealitäten auch zukünftig weiterhin kleiner werden und die Verstärker sich, zumindest bei einer gegebenen Frequenz, immer weiter ihrem theoretisch möglichen Wirkungsgrad annähern können.

Eigenschaften digitale Mikrowellenverstärker

Als Resultat der rein binären Ansteuerung der Transistoren ist der Ausgang der digitalen Verstärkerstufe im gängigen Fall ebenfalls rein binär (Abweichungen hiervon werden in Kap. 12 behandelt). Systemtheoretisch betrachtet entspricht die Funktion des digitalen Verstärkers der eines aus der Digitaltechnik bekannten leistungsstarken Buffers bzw. Invertierers. Alternativ kann der (Voltage-Mode, vgl. Kap. 3.3) Digitalverstärker als elektronisch gesteuerter Schalter verstanden werden, dessen Ausgang auf eines von zwei Versorgungsspannungspotentialen geschaltet werden kann. Durch das Entfallen von Anpassungsnetzwerken ist der digitale Verstärker extrem breitbandig und baulich kompakt. Innerhalb des Verstärker-MMICs wird auf impedanzkontrollierte Leitungen verzichtet und die Transistorzellen werden so dicht wie möglich zueinander platziert. Daher fällt auch das MMIC sehr kompakt aus. Ebenfalls wird auf analoge Mischer im Signalpfad verzichtet, die Signalkette vor dem Verstärker wird vollständig in Digitaltechnik realisiert. In der Folge kann die gesamte Schaltung inklusive Außenbeschaltung auf wenigen Quadratzentimetern untergebracht werden.

Im direkten Vergleich zu analogen Verstärkerlösungen ist weiter festzustellen, dass Signalverzerrungen aus grundsätzlich andersartigen Wirkprinzipien entstehen. Während bei analogen Verstärkern die Signalverzerrungen mit höheren Amplituden aufgrund stärker werdender Kompression zunehmen, steigt der prozentuale Anteil des Quantisierungsrauschens im Ausgangssignal digitaler Systeme bei geringen Signalamplituden deutlich an und erreicht hingegen für hohe Amplituden sein Minimum.

Aktuelle Entwicklungstrends

Einige der Funktechniken, deren Einsatz in naher Zukunft absehbar ist, sollen im Folgenden exemplarisch dargestellt werden. Die vollständige Umsetzbarkeit der sich auf Basis dieser Techniken ergebenden theoretischen Möglichkeiten ist mit aktuell verfügbaren, analogen Leistungsverstärkern jedoch nur begrenzt möglich. Hier könnten digitale Leistungsverstärker ihre Stärken ausspielen.

Dem steigenden Datenratenbedürfnis in Mobilfunknetzen soll unter anderem durch die Nutzung von Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) Verfahren begegnet werden, bei denen mehrere Einzelantennen eines Antennenarrays nicht nur mit verschiedenen Amplituden und Phasenlagen angesteuert werden, sondern sogar jeweils mit einem individuellen Signal beaufschlagt werden. So kann Mehrwegeausbreitung effektiv zur Vervielfachung der Datenrate genutzt werden und mittels MIMO Beamforming auch mit verschiedenen Endgeräten zeitgleich auf der gleichen Frequenz kommuniziert werden. Diese Technik wird von den Herausgebern der Mobilfunkstandards, dem 3rd Generation Partnership Project (3GPP) als Full Dimension MIMO (FD-MIMO) bzw. Space-Division Multiple Access (SDMA) bezeichnet. In [12–14] wird jeweils eine Größenordnung im Bereich ab 64 Antennenelementen mit Ausblick auf >100 Elemente genannt. [15] stellt sogar ein Testbed vor, das 100 Ports eines Antennenarrays mit 320 Ports ansteuern kann.

Um die Einzelelemente eines solchen Antennenarrays mit unabhängigen Signalen beschicken zu können, sind entsprechend viele Verstärkereinheiten notwendig. Diese Verstärkereinheiten sollten hinreichend klein sein, damit die räumliche Integrierbarkeit eines solchen Systems gegeben ist. Ist hinter jedem Antennenelement des Arrays ein Verstärker anzubringen, kann als Grenzwert für dessen Abmessungen der Abstand zweier benachbarter Einzelstrahler des Antennenarrays angenommen werden. Mit dem Trend in Richtung immer höherer Frequenzen zwecks Nutzung von mehr Bandbreite, schrumpfen auch die Abmessungen der Einzelstrahler. Die Technical Reports TR38.813, TR38.814 und TR38.815 [16–18] der 3GPP nennen als zusätzliche Frequenzbänder für den neuen 5G Funkstandard 3.3–4.2 GHz, 4.4–4.99 GHz und 24.25–29.5 GHz. Entsprechend resultieren bei Abständen von $\lambda/2$ [12] Verstärkerabmessungen von unter 3 cm. Kann der Verstärker direkt bei dem Antennenelement angebracht werden, verringert sich die Leistungslänge zwischen Verstärkerausgang und Antennenelement und damit auch die Energieverluste auf dieser Strecke. Das Gesamtsystem wird effizienter, ggf. kann sogar Kühlleistung eingespart werden und dadurch weitere Energie eingespart werden.

Ein paralleler Ansatz sieht vor, durch die Nutzung von Pico- und Femtozellen, die jeweils nur ein Gebäude oder sogar nur wenige Räume innerhalb eines Gebäudes versorgen, die Netzabdeckung und gleichermaßen den Datendurchsatz zu erhöhen. Aufgrund der notwendigen hohen Anzahl insbesondere der Femtozellen müssen diese hinreichend kompakt, preisgünstig und schnell zu installieren sein. Ein Sendeverstärker, der für einen bestimmten Sendekanal innerhalb eines Frequenzbandes ausgelegt ist und ggf. mühsam abgeglichen werden muss, ist für solche Anwendungen undenkbar.

Eine weitere wünschenswerte Eigenschaft von Sendeverstärkern, die zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist eine umfassende Frequenzagilität. Unter dem Begriff Opportunistic Spectrum Access (OSA) werden Verfahren zusammengefasst, die sich zum Ziel gesetzt haben, die Ausnutzung des Frequenzspektrums zu maximieren. So soll eine Frequenz, die am konkreten Aufstellungsort des Senders zumindest zeitweise nicht aktiv genutzt

wird, oder deren lizenzierte Sender am Aufstellungsort ohnehin (z.B. aufgrund von Abschattungen) nicht empfangen werden kann, dynamisch von nicht lizenzierten Sendeeinheiten belegt werden können. Je größer der durch den Sender bedienbare Frequenzbereich ist, umso effektiver können diese Verfahren „weiße Stellen“ in der Frequenzbelegung ausnutzen. Die Zulassungsbehörde für Kommunikationsgeräte in den USA, die Federal Communications Commission (FCC), hat bereits Regularien für Geräte, die derartige Verfahren implementieren, sogenannte White Space Devices (WSD), erlassen [19]. Eine Übersicht über die Situation im Vereinigten Königreich gibt [20]. Die Integration in den Telekommunikationsstandard Long Term Evolution Advanced (LTE-A) ist Gegenstand von Forschungen [21]. Die vorgenannten Quellen beschäftigen sich hauptsächlich mit der Nutzung des TV-Spektrums, jedoch ist unmittelbar einsichtig, dass die grundsätzliche Technik auch auf andere Frequenzbänder ausgeweitet werden kann, sobald die Sendeanlagen die nötige Frequenzagilität aufweisen, um auch weiter entfernte Frequenzbänder bedienen zu können.

Im Zusammenhang von OSA muss auch Software Defined Radio (SDR) genannt werden. Das ideale SDR kann vollständig per Software konfiguriert werden und jede beliebige Frequenz mit jeder beliebigen Bandbreite und jeder beliebigen Modulationsart nutzen. Diesem Idealbild sind in der Praxis natürlich durch die verfügbare Hardware Grenzen gesetzt. Die flexible Umkonfigurierbarkeit eines SDR macht es zu einem idealen Kandidaten für OSA und umgekehrt sind Verstärker, die sich aufgrund ihrer Frequenzagilität für OSA eignen, auch gute Kandidaten für ein SDR-System. Die inhärente Breitbandigkeit und die Umkonfigurierbarkeit digitaler Leistungsverstärker über weite Frequenzbereiche hinweg könnten SDR-Lösungen, die bisher auf analogen Leistungsverstärkern basieren, spürbar erweitern, indem sie Breitbandigkeit und Frequenzagilität mit gutem Wirkungsgrad vereinen.

Sowohl OSA und SDR können mit sogenannten Intelligent Antennas (IA) oder Smart Antennas erweitert werden, deren Charakteristik per Software auf die gegebene Situation angepasst werden kann. Bei diesen Antennen handelt es sich zumeist um Arrays, deren volle Ausnutzungsstufe dem oben bereits als FD-MIMO vorgestellten Konzept entspricht. Hier zeigt sich ein weiteres Bedarfsfeld für physisch kleine Sendeverstärker.

Zielsetzung

Diese Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, den Stand der Technik digitaler Mikrowellenleistungsverstärker voranzutreiben. Im Fokus steht dabei insbesondere die Eignung als Verstärker in Basisstationen für modernen Mobilfunk. Die in Kap. 4 aufgestellten Anforderungen orientieren sich deshalb an den Standards der 3GPP für Mobilfunkbasisstationen.

Bisherige Verfahren, das Basisbandsignal in ein für digitale Verstärker geeignetes Binärsignal umzusetzen, haben sich bislang als zu schlecht und zu unflexibel erwiesen und / oder die schaltungstechnische Umsetzung wies unüberwindbare Hürden auf. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an, mit dem Ziel, ein neuartiges, verbessertes Verfahren zur Erzeugung dieses Binärsignals zu entwickeln. Um die Praxisrelevanz der Ergebnisse sicherzustellen, soll die Leistung des Verfahrens am realen Verstärker nachgewiesen werden.

Im Verlauf der Arbeit stellte sich schnell heraus, dass die wenigen verfügbaren Prototypen digitaler Mikrowellenverstärker für den geplanten Einsatzzweck unzureichend sind. Um

das Primärziel, die Entwicklung des Modulationsverfahrens, erreichen zu können, wurde der Umfang dieser Arbeit entsprechend auch auf die Verbesserung und Entwicklung des eigentlichen Verstärker-MMICs erweitert. Die Arbeit betrachtet das Transmittersystem ganzheitlich: Modulationsverfahren, Verstärker und Ausgangsfilter werden stets im Kontext zueinander betrachtet und verbessert.

2 Begriffskonventionen

Analog vs. Digital

Im Zuge dieser Arbeit muss häufig zwischen hochaufgelösten digitalen bzw. analogen und sehr gering aufgelösten digitalen oder binären Signalen unterschieden werden. Um die Lesbarkeit zu erhalten soll folgende Konvention als Vereinfachung gelten: Ein Signal, dessen Wert in einer Umsetzung in digitaler Technologie mit so vielen Bit aufgelöst ist, dass die Quantisierungsfehler in jedem einzelnen Sample dieses Signals gegenüber der idealen, analogen Variante unter praktischen Gesichtspunkten vernachlässigt werden können, soll auch in der digitalen Umsetzung als „analog“, „wertkontinuierlich“ oder „amplitudenkontinuierlich“ bezeichnet werden dürfen. So könnten beispielsweise die mit je 24 Bit aufgelösten Ausgänge eines Basisbandprozessors als „analog“ oder „amplitudenkontinuierlich“ bezeichnet werden, um sie von dem 1-3 Bit-Signal, welches einem digitalen Verstärker zugeführt wird, zu unterscheiden. Es wird darauf verzichtet, jedes Mal darauf hinzuweisen, dass die Datenverarbeitung natürlich digital implementiert ist und das 24 Bit-Signal selbstverständlich tatsächlich amplitudendiskret ist, diese Diskretisierungsabstufungen jedoch so gering sind, dass sie in dem spezifischen Fall nicht weiter ins Gewicht fallen, weil das durch sie hervorgerufene Diskretisierungsrauschen weit unterhalb der anderen im Gesamtsystem vorhandenen Störeinflüsse liegt.

Binäre Verstärker

Ebenfalls wird, sofern nicht anders angegeben, ohne Beschränkung der Allgemeinheit von einem „binären“ Digitalverstärker ausgegangen, dessen Ausgang nur zwei Zustände annimmt und der daher mit einem 1 Bit-Signal gesteuert wird. Oft ist es möglich, einen Verstärker mit mehr Ausgangsleveln zu konstruieren und mit entsprechend mehr Eingängen anzusteuern, indem der Diskretisierer innerhalb des Modulators für Digitalverstärker mehrere Diskretisierungslevel erkennt und geeignete Signale auf den Ausgangsleitungen ausgibt. Dies ändert jedoch nichts an der grundsätzlichen Funktionsweise der Modulatoren. Den hier besprochenen Modulatoren für digitale Leistungsverstärker ist gemeinsam, dass sie ein hochaufgelöstes (vielbittiges) Signal (im Allgemeinen ≥ 10 Bit [22]) in ein Signal mit deutlich weniger Bits (typischerweise ≤ 4 Bit) überführen. Auf mehrbittige Verstärker wird in Kapitel 12 eingegangen.

Rauschen und Nichtlinearitäten

In analogen Systemen tragen Rauschen und nichtlineare Übertragungskennlinien nennenswert zur Signalverschlechterung bei. In digitalen Systemen entstehen Signalfehler hingegen durch Quantisierungseffekte, die bei Kenntnis des Systems und des Eingangssignals genau berechnet werden können und nicht aus einem Zufallsprozess heraus entstehen. Bei realistischen Eingangssignalen erfüllt dieses Fehlersignal jedoch die gängigen Kriterien stochastischer Rauschprozesse, daher wird in der Literatur weiterhin der Begriff „Rauschen“ für dieses Fehlersignal verwandt. Weitere Verzerrungen des zu übertragenden Basisbandsignals können in digitalen Systemen auf vielfältige Weise entstehen. Während diese Prozesse

im allgemeinen nichtlinearer Natur sind, soll darauf hingewiesen werden, dass sich die zu Grunde liegenden Entstehungsmechanismen deutlich von den typischen Nichtlinearitäten analoger Verstärker unterscheiden. Trotz identischer Bezeichnung des Effekts und mitunter ähnlichen Auswirkungen auf das Frequenzspektrum können diesbezügliche Annahmen und Faustformeln aus dem analogen Bereich nicht oder nur eingeschränkt auf digitale Verstärkersysteme übertragen werden.

Modulator

Wird in dieser Arbeit ohne genauere Einschränkung der Begriff „Modulator“ verwendet, bezeichnet dies denjenigen Schaltungsblock, der das Basisbandsignal annimmt und für den digitalen Verstärker im Trägerfrequenzbereich aufbereitet (transkodiert). Es ist *nicht* der Basisbandmodulator gemeint, der aus den zu sendenden Symbolen das Basisbandsignal erzeugt. Dieser bleibt unberührt bestehen.

Gegenstand der Arbeit ist die Verarbeitung beliebiger Basisbandsignale ohne Kenntnis der genauen Basisbandmodulation und daher auch ohne Einschränkung selbiger. Die digitale Sendekette ist für das Basisband transparent, eine Veränderung des Basisbandes ist nicht beabsichtigt (vgl. Kap. 3.1). Die Höhe der dennoch stattfindenden Veränderungen wird als Fehler gewertet und quantifiziert (EVM, ACLR). Es kommt zu keinen Einschränkungen auf der Seite der Empfänger oder bezüglich möglicher Basisbandmodulationen gegenüber herkömmlichen Systemen.

Klassenzuordnung

Die Zuordnung digitaler Mikrowellenverstärker für Hochfrequenzanwendungen zu den Klassenbezeichnungen Klasse-S (S abgeleitet von Switch-Mode) bzw. Klasse-D (D abgeleitet von Digital) ist nicht eindeutig. Viele Veröffentlichungen betrachten beide Begriffe als gleichwertig, andere jedoch schreiben Klasse-D den Niederfrequenzanwendungen und Klasse-S den Hochfrequenzanwendungen zu. Vereinzelt werden Klasse-D Verstärker aber auch als Untergruppe der Switch-Mode Verstärker (Klasse-S) beschrieben, die dadurch gekennzeichnet ist, dass die Ansteuerung einen Delta-Sigma-Modulator enthält. Weitere Abgrenzungsversuche existieren.

Mit der zunehmenden Anzahl bekannter Ansteuerungsverfahren und vielfältigen Schaltungstopologien scheint eine klare Abgrenzung immer weniger möglich. Diese Arbeit verwendet daher beide Bezeichnungen gleichwertig für alle Schaltungskonzepte, die anstreben, ausschließlich die Transistorzustände „leitend“ und „sperrend“ zu erreichen.

3 Digitale Leistungsverstärker für Mikrowellenanwendungen

3.1 Die digitale Sendekette

Bild 3.1 zeigt das Blockschaltbild des heute üblichen, mit analogen Verstärkern arbeitenden Sendepfades und stellt es einer digitalen Sendekette gegenüber. Ein wesentliches Merkmal der hier betrachteten digitalen Sendeketten ist ihre Eignung als vollständig transparenter Ersatz für die analoge Sendekette. Diese Interoperabilität ist zwingend notwendig, um eine schrittweise und selektive Umstellung von analog auf digital der Sendeanlagen zu ermöglichen. Vom digitalen Verstärker dürfen über die maximal prozessierbare Bandbreite und Trägerfrequenz hinaus keine Einschränkungen auf die Modulation des Basisbandes selbst ausgeübt werden. Anderenfalls würde die Kodierung des Sendesignals von dem konkreten Verstärker abhängen, was zur Folge hätte, dass alle Empfänger beim Wechsel einer Verstärkergeneration angepasst werden müssten und höchstwahrscheinlich – je nach Art der Einschränkung – das knappe Sendespektrum nicht vollständig ausgenutzt werden könnte. Dieser Anspruch an das lineare Verhalten des Gesamtsystems entspricht den üblichen Anforderungen an analoge Sendeketten.

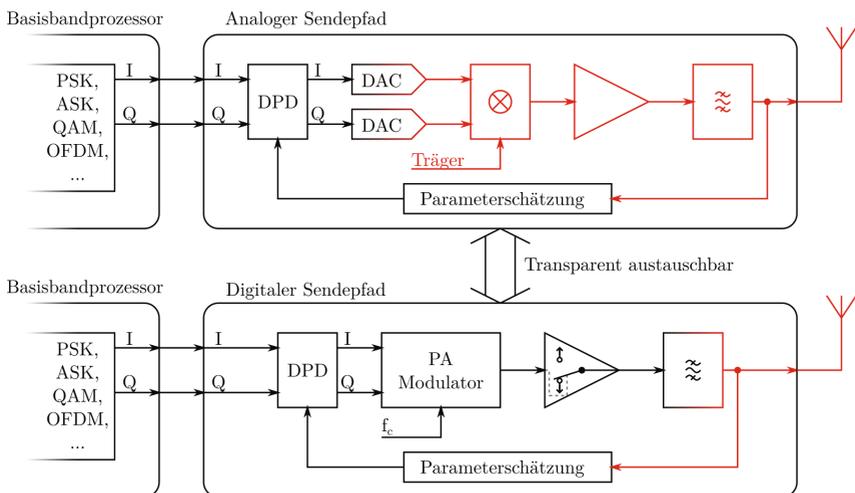


Abbildung 3.1: Austauschbarkeit analoger und digitaler Sendeketten. Rot: Analoges Signal; Schwarz: Digitales Signal

In Abbildung 3.1 ist zusätzlich die Unterteilung in digitale und analoge Schaltungsbestandteile farblich gekennzeichnet. Sowohl Basisbandprozessor als auch die Signalverzerrung

(digital predistortion, DPD) zum Ausgleich von Verstärkernichtlinearitäten werden heutzutage digital implementiert. Im analogen Sendepfad wird unmittelbar nach der DPD in die analoge Domäne gewechselt. Hochmischen, Verstärken und die anschließende Signalfilterung erfolgen analog. Nachteilig hieran ist, dass jeder der analogen Blöcke eng tolerierte Komponenten und/oder eine aufwändige Kalibrierung benötigen. Analoge Schaltungsbestandteile sind zudem anfällig gegenüber Alterung und Temperaturschwankungen. In der digitalen Sendekette hingegen bleibt das Signal bis nach dem Leistungsverstärker vollständig in der digitalen Domäne. Der Mischer der analogen Sendekette wird hier durch einen sogenannten Modulator ersetzt, der das eingehende IQ-Signal so aufbereitet, dass es vom digitalen Leistungsverstärker verstärkt werden kann. Neben dem Hochsetzen auf die Trägerfrequenz umfasst dies auch eine Reduktion der Bittiefe auf einen für den Verstärker geeigneten Wert (oft nur 1 Bit, selten mehr als 2 Bit). Im einfachsten Fall ist der Verstärker ein steuerbarer Schalter, der zwischen zwei festen Potentialen umschaltet. In komplizierteren Varianten können mehrere Spannungslevel ausgegeben [23] oder Ströme umgeschaltet [24] werden. Erst hinter dem Verstärker nimmt ein einfaches passives Bandpassfilter die Wandlung des digitalen Signals in das analoge Sendesignal vor. Die Grenze zwischen digitaler und analoger Domäne kann so bis ans Ende der Kette verschoben werden. Da nun alle aktiven Komponenten der Kette digital arbeiten, sind sie vergleichsweise unempfindlich gegenüber Bauteiltoleranzen und können von den weiteren positiven Eigenschaften digitaler Schaltungen profitieren. Ein Sendesystem dieser Bauart wird auch als „all digital Transmitter“ bezeichnet.

Für den Basisbandprozessor haben sich digitale Implementierungen durchgesetzt, da sie bedingt durch die rasanten Fortschritte in der digitalen Technik weniger Leistung als ihre analogen Gegenstücke benötigen, flexibler sind (z.B. durch Software umprogrammiert werden können) und deutlich kompakter umgesetzt werden können. Diese positiven Eigenschaften sind auch für die Digitalisierung der weiteren Bestandteile der Sendekette zu erwarten. Eine Miniaturisierung und Verringerung des Energiebedarfs hat über die letzten Jahrzehnte zwar auch bei analogen Schaltungen stattgefunden, verlief aber bei weitem nicht so rasant wie in der digitalen Domäne. Die umfangreichen Möglichkeiten nachträglicher Umkonfigurierbarkeit und Funktionserweiterung digitaler Systeme durch Softwareupdates (bzw. Bitfileupdates bei FPGA basierten Systemen) konnten von analogen Systemen bislang nicht eingeholt werden.

3.2 Der Modulator für digitale Mikrowellenverstärker

Der Umformer, der aus dem IQ-Signal das Eingangssignal für den digitalen Verstärker erzeugt, wird in der Literatur im allgemeinen als „Modulator“ bezeichnet (sehr selten auch als „Encoder“). Seine Eigenschaften sind für die Performance des Gesamtsystems ausschlaggebend. Die Bezeichnung Modulator geht darauf zurück, dass eine Grundwellenform anhand des Eingangssignals verändert - moduliert - wird und dazu in der Vergangenheit zumeist eine Pulsweiten*modulation* oder Delta-Sigma-*Modulation* eingesetzt wurde. Trotz der begrifflichen Ähnlichkeit zum Basisbandmodulator sei herausgestellt, dass es sich um zwei in Funktion und Aufbau vollständig unterschiedliche und unabhängig agierende Blöcke handelt. Die Basisbandmodulation wird durch die Signalaufbereitung für den Verstärker in