

# 1 Einleitung

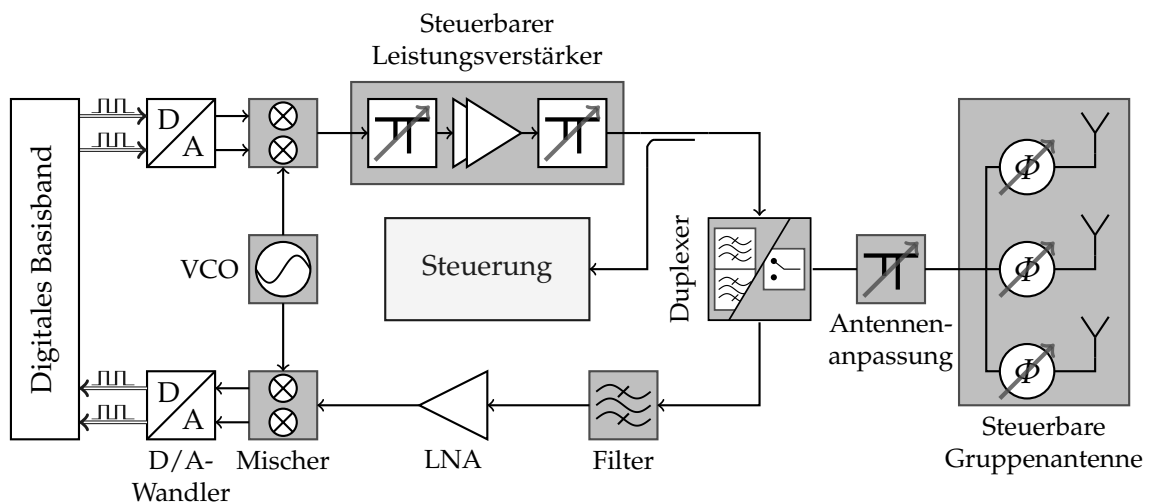
Dem in den letzten Jahrzehnten erzielten Fortschritt auf dem Gebiet der drahtlosen Kommunikation ist es zu verdanken, dass aktuell mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung drahtlos und mobil kommunizieren kann. Nachdem zunehmend entsprechende Kommunikationssysteme den Zugang zu einer breitbandigen Informationsinfrastruktur ermöglichen, werden zukünftig massiv vernetzte drahtlose Sensor- und Kommunikationssysteme die Lebens- und Arbeitswelt revolutionieren. Neben den Herausforderungen auf höheren Netzwerkschichten zur effizienten Handhabung der Informationsflut der ubiquitären Kommunikation ergeben sich zahlreiche Herausforderungen auf der physikalischen Schicht, insbesondere zur Realisierung rekonfigurierbarer Transceiver-Architekturen.

So ist bereits heute der Multiband- und Multistandardbetrieb eine der Schlüsseltechnologien, die aufgrund einer stetig wachsenden Zahl von Frequenzbereichen und Mobilfunkstandards nicht nur eine Rekonfigurierbarkeit der Software, sondern zunehmend auch eine Rekonfigurierbarkeit von Hochfrequenzkomponenten erfordern. Während bisher hauptsächlich parallele Architekturen mit individuell für die einzelnen Bänder und Standards optimierten Bauteilen zum Einsatz kamen, sind solche Ansätze bei zukünftigen Transceiver-Architekturen nicht oder nur sehr eingeschränkt anwendbar. Insbesondere die Realisierung von *software defined radio* (SDR) und *cognitive radio* (CR) erfordern konsequenterweise ein vollständig transparentes HF-Frontend, welches nicht an bereits bei der Herstellung festgelegte Frequenzbänder und Mobilfunkstandards gebunden ist [Mit95; Mit00; PLL08].

Ursprüngliches Ziel von *software defined radio* war die Entwicklung einer universellen und vollständig in Software realisierten Funktionalität des Transceivers für Multistandard- und Multiband-Fähigkeit. An das HF-Frontend von *cognitive radio*, welches sich adaptiv auf die Umgebungsbedingungen anpassen soll, werden vergleichbare Anforderungen gestellt. Daher können beide Ziele aus Sicht des HF-Frontends als äquivalent betrachtet werden. Im Idealfall soll zum digitalen Signalprozessor nur eine einfache Antenne und ggf. ein zusätzlicher Verstärker erforderlich sein.

Obwohl erste Ideen bereits vor rund zehn Jahren entstanden sind, konnte sich das SDR-Konzept in Kommunikationssystemen bis zum heutigen Tag am Massenmarkt nicht durchsetzen. Die Gründe dafür liegen einerseits in den hohen Anforderungen bezüglich der Empfangsdynamik, dem geforderten Signal-zu-Rausch-Abstand und den erforderlichen Bandbreiten von einigen MHz bis rund 6 GHz oder 10 GHz. Andererseits wird eine hohe Energieeffizienz der eingesetzten Systemkomponenten gefordert. Dies stellt gerade in einem mobilen Umfeld durch die Leistungsfähigkeit der verwendeten Batterietechnologien und die zunehmende Funktionalität der Systeme eine stetige technologische Herausforderung dar.

Einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zur Energieeffizienz universeller Transceiver-Strukturen tragen HF-Leistungsverstärker bei. So haben typische Mobilfunk-Basisstationen heutzutage einen Wirkungsgrad von ca. 5 %, wobei bis zu 70 % der aufgewendeten Energie in den Leistungsverstärkern und für deren Kühlung umgesetzt wird [Vas11]. Bei Leistungsverstärkern für mobile Endgeräte liegt der Wirkungsgrad nur unwesentlich höher.



**Abbildung 1.1:** Konzept eines steuerbaren HF-Frontends für ein Mobilfunksystem nach [Sch07a], bestehend aus: Digitalem Basisbandprozessor, Analog/Digital-Wandlern, Mischern, steuerbarem Oszillator (VCO), Verstärkern (PA, LNA), Filtern, Duplexer, Impedanz-Anpassnetzwerken, Phasenschiebern, Antennen und einer geeigneten Steuerung. Funktionsblöcke mit steuerbaren Komponenten sind grau hinterlegt.

Abbildung 1.1 zeigt das Konzept eines steuerbaren HF-Frontends für ein Mobilfunksystem, welches die Forderungen durch einzelne aufeinander abgestimmte steuerbare Komponenten erfüllt. Neben herkömmlichen, etablierten halbleiterbasierten

---

Verfahren wurden in den vergangenen Jahren unterschiedliche Materialien mit steuerbaren Eigenschaften für die Verwendung in der Hochfrequenztechnik entwickelt und optimiert. Das ferroelektrische Materialsystem Barium-Strontium-Titanat (BST) zeigt dabei in dem für Mobilfunkanwendungen interessanten Frequenzbereich bis 15 GHz die besten Eigenschaften [Tag+03; Wei03; Sch07a; Gie09], wohingegen andere keramische Werkstoffe wie Kalium-Tantalat-Niobat (KTN) [Lau+05], Barium-Zirkonat-Titanat (BZT) [XMIT05] und Bismut-Zink-Niobat (BZN) [Par+05] teilweise nur im niederfrequenten Bereich bis wenige MHz sinnvoll einzusetzen sind. Andere Materialien für steuerbare Komponenten sind Flüssigkristalle, die für Frequenzen oberhalb 10 GHz hervorragende Eigenschaften vorweisen [Mül07; Gö109]. Neben den kontinuierlich steuerbaren Materialien werden Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme (MEMS) intensiv untersucht [DLS+04].

In den letzten Jahren konnten einzelne Elemente des steuerbaren HF-Frontends erfolgreich realisiert werden. So wurden bereits zahlreiche steuerbare Antennen [ZGJ08; Mar08; Mös10] und steuerbare Phasenschieber [Gie+06; Ven07; Zha+07; Gae+09], steuerbare Anpassnetzwerke für Antennen [Sch+05; Sch07b; Sch+07b] und steuerbare Filter [NYH08] demonstriert. Neben der Funktionalität müssen die Komponenten Anforderungen der Integrationstechnologie und der HF-Eigenschaften und hier insbesondere der Leistungsverträglichkeit/Linearität erfüllen. Bisher kann keiner der vorgestellten Ansätze alle Anforderungen gleichzeitig erfüllen. Die in dieser Arbeit betrachteten BST-Dickschichten, deren dielektrische Eigenschaften durch ein elektrostatisches Feld in einem begrenzten Bereich kontinuierlich variiert werden können, bieten viele Vorteile. Neben einem auch bei kleinen Stückzahlen kostengünstigen Herstellungsverfahren, einer vernachlässigbaren Stromaufnahme und einer hohen Schaltgeschwindigkeit sind die Möglichkeit einer integrierten Entkopplung der Steuerspannung und die guten Hochfrequenzeigenschaften auch bei großen Signalleistungen hervorzuheben.

Eine aufgrund der hohen Linearitätsanforderungen bisher im Zusammenhang mit steuerbaren Eigenschaften nur ansatzweise behandelte Komponente sind HF-Leistungsverstärker. Die demonstrierten Konzepte [Neo+06; Tom07] sind in der Regel auf wenige Watt Ausgangsleistung beschränkt. Konzepte für Leistungsverstärker mit höheren Ausgangsleistungen wie in [Raa11] zeigen eindrucksvoll die Einschränkungen von halbleiterbasierten Lösungen hinsichtlich der Linearität auf. Erste Messungen der Linearität von steuerbaren Anpassnetzwerken [Sch+07a] und frequenzagilen Multibandantennen [Zhe+08] auf Basis von BST-Dickschichten zeigten eine hohe Linearität der verwendeten Varaktoren. Diese ersten Erkenntnisse legen den Einsatz von BST-Dickschichtkomponenten für eine adaptive Anpassung steuerbarer Leistungsverstärker nahe.

Die Entwicklung von hoch-linearen Hochfrequenzkomponenten, die an die spezifischen Anforderungen und Eigenschaften von BST-Dickschichten und des Leistungsbetriebs angepasst sind, erfordert eine intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit unter anderem auf dem Gebiet der Materialwissenschaften. Nach einer kurzen Einführung der materialspezifischen Grundlagen und Modelle befasst sich das erste Kapitel mit den Besonderheiten von steuerbaren BST-Dickschichten. Nach der Beschreibung der notwendigen technologischen Realisierungsschritte wird ein kurzer Überblick über Verfahren zur Materialcharakterisierung gegeben.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf dem Design und der Optimierung hochlinearer Varaktoren für die Anwendung in steuerbaren HF-Leistungsverstärkern. Ein Ziel ist das Erreichen einer möglichst guten Effizienz des Leistungsverstärkers auch für eine große Dynamik des Eingangssignals. Messungen konnten dieses Potential zwischenzeitlich belegen [Nem+09]. Die Vorteile reichen von einer erhöhten Batterielaufzeit im Fall von mobilen Geräten bzw. geringeren Betriebskosten bis zu geringeren Anforderungen an die Wärmeabfuhr bei Hochleistungsverstärkern mit bis zu 200 W Ausgangsleistung je Transistor. Hierbei ist die Entwicklung steuerbarer Komponenten mit ausreichender Leistungsverträglichkeit und Linearität, bei gleichzeitig möglichst hoher Steuerbarkeit eine Schlüsselfragestellung auf dem Weg zur Realisierung effizienter steuerbarer Leistungsverstärker. Hierzu wird eine im Rahmen der Arbeit entwickelte Routine zum Bauteildesign vorgestellt. Diese berücksichtigt insbesondere die Anforderungen hochlinearer Komponenten, wobei verschiedenste Effekte von der Geometrieabhängigkeit und Linearität auf der Materialseite bis hin zum Einfluss des Elektrodenabstandes auf die Durchbruchfeldstärke und der integrierten Steuerspannungszuführung mittels hochresistiver Leitungen auf der Schaltungsebene behandelt werden müssen. Ein wichtiger Teil der Untersuchungen bezieht sich auf die Modellierung des nichtlinearen Verhaltens steuerbarer BST-Dickschichtkomponenten, die durch entsprechende Zweitton-Großsignalmessungen ergänzt werden.

Die Einsatzmöglichkeiten steuerbarer BST-Dickschichten werden anhand zweier Beispiele steuerbarer Komponenten für Hochleistungsanwendungen exemplarisch untersucht. Dies schließt sowohl die Konzipierung der Komponenten und Schaltungen auf Basis der vorgestellten Designroutine als auch den Entwurf und die mikrotechnologische Realisierung der zugehörigen Bauteile und Komponenten ein. Zu den vorgestellten Komponenten gehören Einzelvaraktoren für die Verwendung in Anpassnetzwerken als auch ein komplett auf einem BST-Substrat integriertes Anpassnetzwerk für die hybride Integration mit einem Transistor zu einem steuerbaren Leistungsverstärker. Neben den schaltungstechnischen Grundlagen werden verschiedene Metriken als Bewertungsgrundlage für steuerbare Leistungsverstärker vorgestellt und verglichen.

---

Abschließend werden die erzielten Forschungsergebnisse zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf weitere Entwicklungen und zukünftige Anwendungsfelder gegeben.