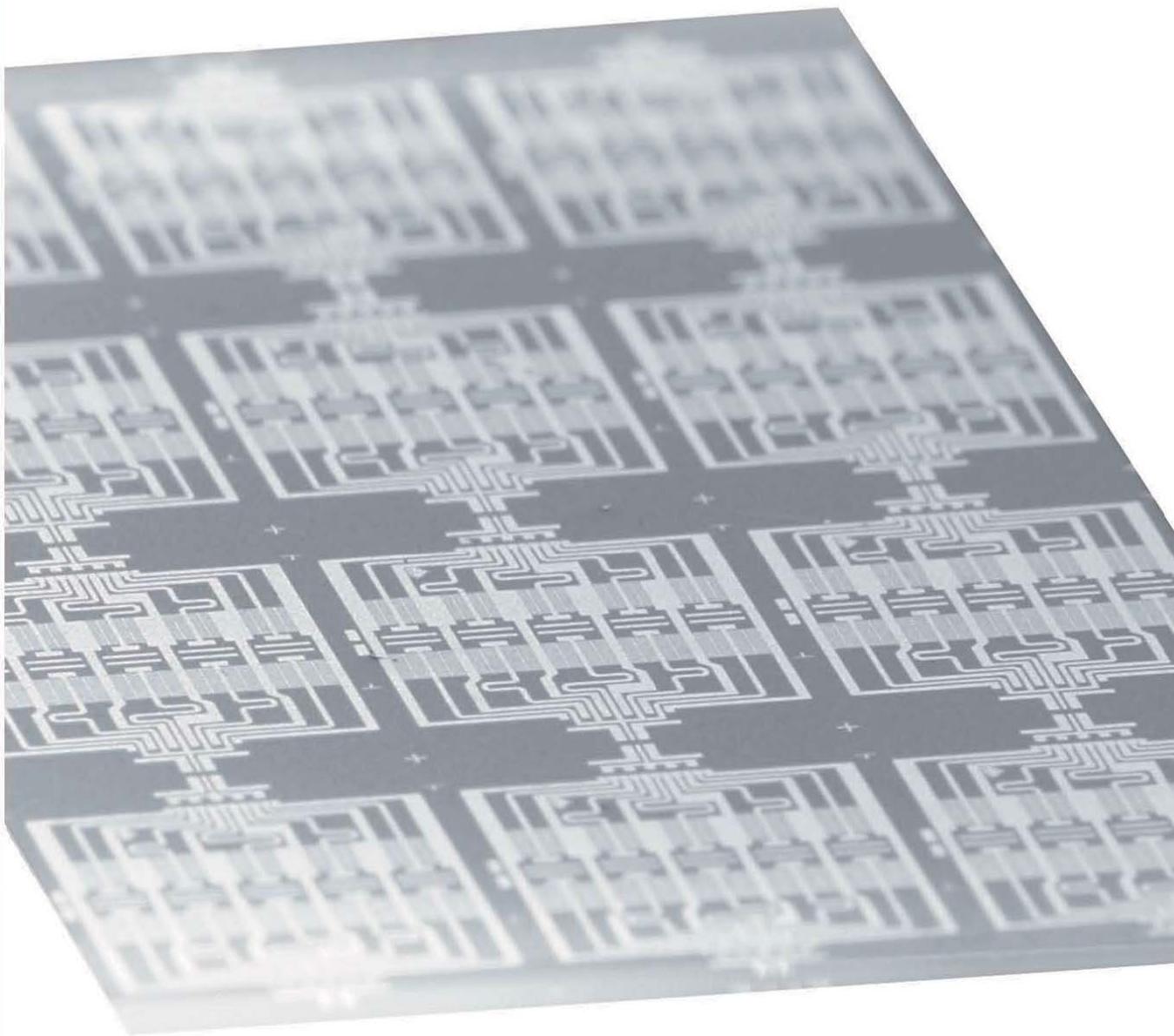


**Holger Maune**

**Design und Optimierung  
hochlinearer ferroelektrischer  
Varaktoren für steuerbare  
Hochfrequenz-Leistungsverstärker**



**Cuvillier Verlag Göttingen**  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



# **Design und Optimierung hochlinearer ferroelektrischer Varaktoren für steuerbare Hochfrequenz-Leistungsverstärker**

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## **Dissertation**

von

Dipl.-Ing.

**Holger Maune**

geboren am 12. September 1981  
in Köln, Deutschland

Referent: Prof. Dr.-Ing. Rolf Jakoby  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel

Tag der Einreichung: 27. Juli 2011  
Tag der mündlichen Prüfung: 26. August 2011

D17  
Darmstadt 2011

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2011  
Zugl.: Darmstadt, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-875-2

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011  
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-54724-0  
Telefax: 0551-54724-21  
[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2011  
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-875-2

# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mikrowellentechnik und Photonik (vormals Institut für Hochfrequenztechnik) der Technischen Universität Darmstadt.

Allen voran gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Jakoby für die Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen wie auch die Förderung einer im höchsten Maße selbständigen Arbeitsweise.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel, Leiter des Lehrstuhls für Technische Elektronik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Für die konstruktive Arbeitsatmosphäre, die Raum für Gespräche und gemeinsame Problemlösungen ließ, möchte ich meinen Kolleginnen und Kollegen des Instituts herzlich danken. Von den vielen Kollegen danke ich Dr.-Ing. Patrick Scheele und Dr.-Ing. Andre Giere für die Einarbeitung in das Themenfeld und die vielen wertvollen Diskussionen. Weiterhin gilt mein Dank Mohsen Sazegar und Yuliang Zheng für die hervorragende Zusammenarbeit in der gemeinsamen Arbeitsgruppe. Ein besonderer Dank gilt den administrativ/technischen Mitarbeitern, allen voran Peter Kießlich, Andreas Semrad und Karin Boye, für ihre exzellente Arbeit in der und für die Technologie, ohne die eine Umsetzung der entwickelten Ideen unmöglich gewesen wäre.

Diese Arbeit beinhaltet viele interdisziplinäre Aspekte und ist durch die langjährige Zusammenarbeit mit Partnern verschiedener Fachrichtungen aus Forschung und Industrie geprägt, welche die vorliegende Arbeit erst ermöglicht haben. Insbesondere sind hier die vorbildliche und seit einer langen Zeit existierende sehr enge Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (vormals Universität Karlsruhe und Forschungszentrum Karlsruhe GmbH) und mit dem Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg hervorzuheben, wo die Synthese und die materialwissenschaftliche Optimierung der verwendeten BST-Dickschichten vorangetrieben wird.

---

Mein besonderer Dank gilt dabei zuallererst:

- Dr. Joachim Binder, Dr. Holger Geßwein, Andreas Friederich, Christian Kohler, Florian Stemme, Xianghui Zhou, Institut für Angewandte Materialien-Werkstoffprozesstechnik, Karlsruher Institut für Technologie
- Dr.-Ing. Florian Paul, Hendrik Elsenheimer, Katrin Schumann, Institut für Mikrosystemtechnik, Universität Freiburg
- Dr.-Ing. Wolfgang Menesklou, Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik, Karlsruher Institut für Technologie

Bedanken möchte ich mich weiterhin auch bei den folgenden Kollegen, Mitstreitern und Projektpartnern für die vielen unterschiedlichen Impulse und die Zusammenarbeit:

- Prof. Dr.-Ing. Georg Böck, Dr.-Ing. Felix Gölden, Ahmed Al Tanany, Daniel Gruner, Fachgebiet Mikrowellentechnik, Technische Universität Berlin
- Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich, Dr. Olof Bengtsson, Dr. Chafik Meliani, Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, Berlin

Kronberg im Taunus, im Juli 2011

Holger Maune

# Kurzfassung

In dieser Arbeit werden steuerbare passive Hochfrequenzkomponenten auf Basis nichtlinearer Barium-Strontium-Titanat-Dickschichten hinsichtlich ihrer Eignung für die Verwendung in Leistungsverstärkern im Mikrowellenbereich untersucht. Langfristiges Ziel ist die Erhöhung der Gesamteffizienz der Leistungsverstärker bei gleichzeitig hoher Dynamik des Eingangssignals mittels adaptiver Last- und Quellimpedanzanpassung. Dies erfordert steuerbare Anpassnetzwerke hoher Linearität und gleichzeitig hoher Steuerbarkeit und Güte. Die relative Permittivität des verwendeten Materialsystems kann durch ein elektrisches Feld kontinuierlich variiert werden. Die durch die Verwendung geeigneter Dotierungen optimierten BST-Dickschichtvaraktoren bieten aufgrund ihrer Steuerbarkeit  $\tau_\epsilon > 30\%$  und hohen Güte  $Q > 100$  für Frequenzen bis 3 GHz und einer sehr hohen Linearität, charakterisiert durch einen Interceptpunkt dritter Ordnung von rund 60 dBm, eine bisher nicht vorhandene Möglichkeit, die Gesamteffizienz von Leistungsverstärkern erheblich zu erhöhen. Zur Verifikation der Anwendbarkeit und Abschätzung des Einsatzpotentials steuerbarer passiver BST-Mikrowellenkomponenten wurde unter anderem die Großsignalmodellierung durchgeführt und ein leistungsfähiger Designprozess entwickelt. Dieser Designprozess basiert auf einer multiskaligen Optimierung steuerbarer BST-Dickschichtkomponenten und berücksichtigt die besonderen Anforderungen von Hochleistungsanwendungen. Basierend hierauf wurde unter anderem ein vollständig auf einem BST-Dickschichtsubstrat integriertes Modul mit fünf parallelen Anpassnetzwerken für eine spätere hybride Integration mit fünf Transistorzellen einer PowerBar zu einem steuerbaren Leistungsverstärker entwickelt und charakterisiert. Auf der dabei verwendeten BST-Keramik mit einer Größe von  $6,3\text{ mm} \times 8,1\text{ mm}$  wurden zudem alle erforderlichen Schaltungselemente zur Entkopplung von hochfrequenz- und gleichspannungsführenden Leitern als auch die erforderlichen Induktivitäten in hybrider Montagetechnik integriert. Neben den schaltungstechnischen Voraussetzungen, welche den Einfluss der externen Beschaltung der Komponente berücksichtigen, werden in dieser Arbeit verschiedene Metriken zur Bewertung und zum Vergleich von steuerbaren Leistungsverstärkern aufgestellt und analysiert.



# Abstract

Passively tunable radio frequency and microwave devices and components based on Barium-Strontium-Titanate are investigated with respect to their suitability for applications in high power-amplifiers. It is the long term vision of this effort to optimize the amplifier's overall efficiency especially for high dynamic signals by adapting the source- and load-impedance. The permittivity of the chosen ceramic material system can be tuned continuously by an applied electrostatic field. Material properties, namely the loss factor and the tunability, can be adapted for tunabilities  $\tau_\epsilon > 30\%$  by using appropriate dopants. A high component quality factor of  $Q > 100$  is preserved in the frequency range of up to 3 GHz with outstanding linearity, characterized by a 3<sup>rd</sup> order intercept point of 60 dBm. These properties enable new opportunities for tunable components in the field of power amplifiers, and hence the optimization of their overall efficiency. For the analysis and verification of the material's properties large-signal models are studied in detail. The design process developed for highly linear components takes the special demands of high power applications into account. Based on the design process different components and devices have been developed. As an example, a fully integrated matching module with five individual impedance matching networks for a powerbar of five GaN-transistors has been designed, processed, and characterized. This 6,1 mm  $\times$  8,1 mm sized ceramic chip includes all necessary components for the decoupling of rf and dc tuning voltage by high resistive transmission lines. The necessary inductances are integrated in a hybrid fashion by means of surface mounted components or bond wires. Additionally, various metrics for the evaluation of tunable power amplifiers have been developed and analyzed.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Steuerbare Mikrowellendielektrika</b>	<b>17</b>
2.1	Steuermechanismen . . . . .	19
2.2	Perowskit-Ferroelektrika . . . . .	22
2.2.1	Barium-Strontium-Titanat-Mischkristalle . . . . .	24
2.2.2	Ginzburg-Landau-Theorie . . . . .	27
2.2.3	Modellierung der Permittivität nichtlinearer Ferroelektrika . . . . .	31
2.2.4	Modellierung der Verluste nichtlinearer Ferroelektrika . . . . .	36
2.2.5	Einfluss von Prozesstechnologie und Dotierungen . . . . .	39
2.3	Technologische Realisierung . . . . .	42
2.3.1	Herstellungsverfahren für BST-Dickschichten . . . . .	43
2.3.2	Mikrotechnologische Realisierung steuerbarer Komponenten . . . . .	48
2.3.3	Integration von Bias-Elektroden . . . . .	51
2.4	Messtechnische Charakterisierung . . . . .	55
2.4.1	Direkte Impedanzmessung . . . . .	57
2.4.2	Streuparametermessung . . . . .	59
2.5	Wiederholbarkeit der Prozessierung . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Bauteildesign steuerbarer Komponenten</b>	<b>63</b>
3.1	Kleinsignalmodellierung . . . . .	65
3.1.1	Ungesteuerte Kapazität . . . . .	67
3.1.2	Steuerbarkeit der Kapazität . . . . .	72
3.1.3	CAD-Modelle . . . . .	82
3.2	Großsignalmodellierung . . . . .	83
3.2.1	Thermische Effekte . . . . .	84
3.2.2	Nichtlineare Signalverzerrungen . . . . .	85
3.2.3	Modellierung . . . . .	86
3.2.4	Messaufbau . . . . .	88
3.3	Integrierte Steuerspannungszuführung . . . . .	95
3.3.1	Hochfrequenzeigenschaften . . . . .	96
3.3.2	Einfluss der Schaltungstechnik . . . . .	99

3.4	Design-Routine . . . . .	105
<b>4</b>	<b>Konzepte und Komponenten für steuerbare Leistungsverstärker</b>	<b>111</b>
4.1	Varaktoren für Hochleistungsanwendungen . . . . .	115
4.2	Vollständig integrierte Anpassnetzwerke . . . . .	120
4.2.1	Netzwerkdesign . . . . .	122
4.2.2	Schaltungsdesign . . . . .	124
4.2.3	Realisierung und Charakterisierung . . . . .	130
4.3	Bewertungskriterien für steuerbare Leistungsverstärker . . . . .	134
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>141</b>
<b>A</b>	<b>Mathematischer Anhang</b>	<b>147</b>
<b>B</b>	<b>Realisierte Bauteile (Auszug)</b>	<b>151</b>
<b>C</b>	<b>Technologischer Anhang</b>	<b>157</b>
<b>D</b>	<b>Materialparameter</b>	<b>159</b>
<b>E</b>	<b>Verwendete Messmittel</b>	<b>161</b>
	<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>161</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>167</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>189</b>

# 1 Einleitung

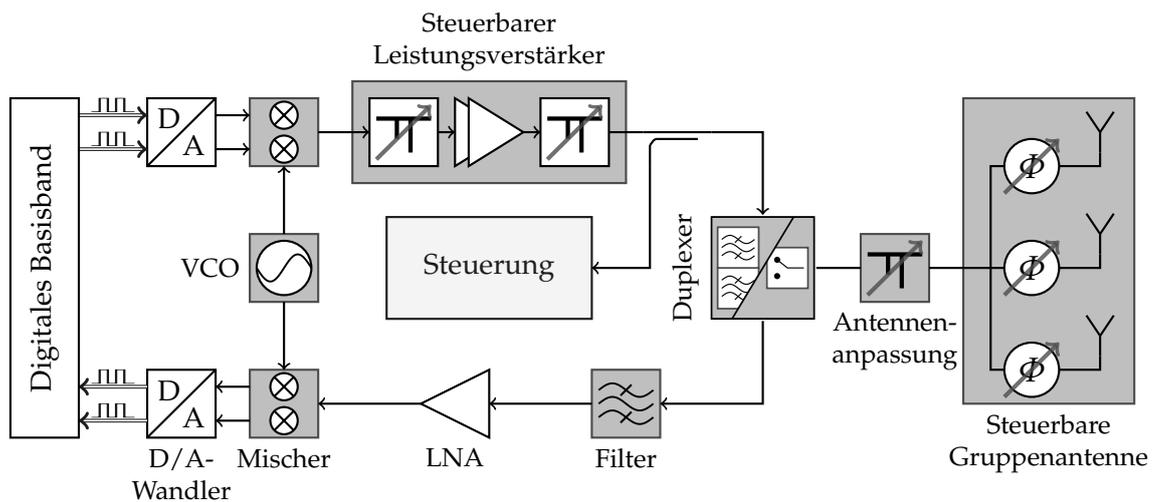
Dem in den letzten Jahrzehnten erzielten Fortschritt auf dem Gebiet der drahtlosen Kommunikation ist es zu verdanken, dass aktuell mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung drahtlos und mobil kommunizieren kann. Nachdem zunehmend entsprechende Kommunikationssysteme den Zugang zu einer breitbandigen Informationsinfrastruktur 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.



## 2 Steuerbare Mikrowellendielektrika

Die Permittivität von Materialien wird von induzierten oder permanenten Dipolen innerhalb des Materials bestimmt. Die dielektrische Verschiebungsdichte ist dabei um die Polarisation  $\vec{P}$  gegenüber der dielektrischen Verschiebungsdichte im Vakuum ( $\epsilon_0\vec{E}$ ) erhöht:

$$\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P}. \quad (2.1)$$

Im einfachsten Fall eines linearen, isotropen Dielektrikums ergibt sich die Polarisation nach

$$\vec{P} = \epsilon_0\chi_e\vec{E}, \quad (2.2)$$

wobei die elektrische Suszeptibilität  $\chi_e$  als Maß für die zusätzliche Verschiebungsladung im Material dient. In diesem Fall lässt sich der Zusammenhang von elektrischer Feldstärke  $\vec{E}$  und dielektrischer Verschiebungsdichte durch die relative Permittivität  $\epsilon_r$  beschreiben:

$$\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \epsilon_0\chi_e\vec{E} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} &= \epsilon_0(1 + \chi_e)\vec{E} \\ &= \epsilon_0\epsilon_r\vec{E}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Im Falle nichtlinearer Dielektrika ist die elektrische Suszeptibilität feldstärkeabhängig und lässt sich aus der Steigung der Polarisation nach

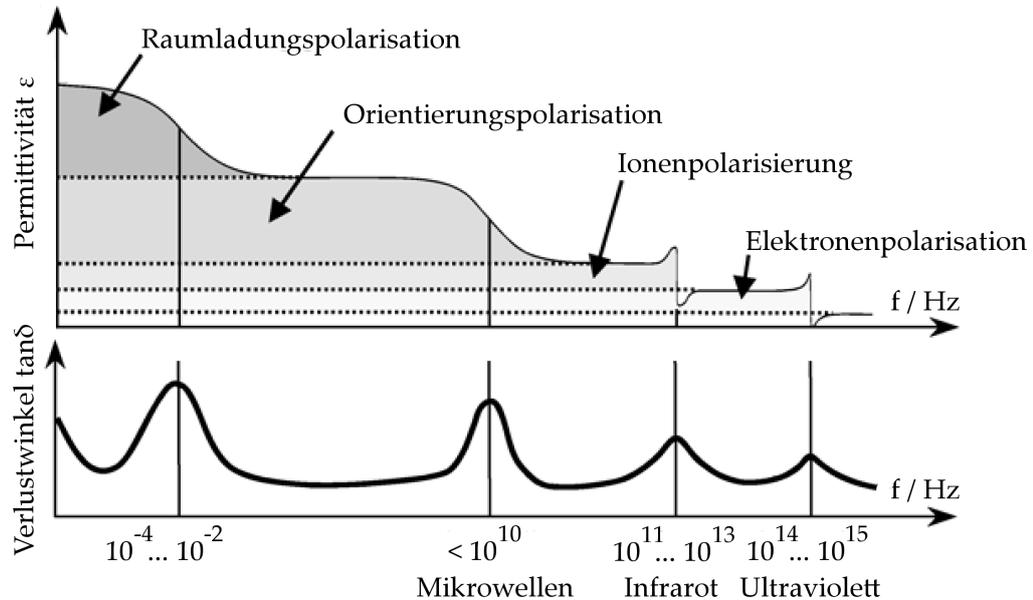
$$\chi_e(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{\partial \vec{P}(\vec{E})}{\partial \vec{E}} \quad (2.5)$$

bestimmen, was zu einer von der elektrischen Feldstärke abhängigen (relativen) Permittivität  $\epsilon_r(\vec{E})$  führt. Die dielektrischen Verluste, bestehend aus Isolations- und Polarisationsverlusten, lassen sich analog zur Formulierung der Leiterverluste in leitfähigen Materialien mit

$$\epsilon_r = \epsilon_r(1 - j \tan \delta_\epsilon) \quad (2.6)$$

durch eine komplexe relative Permittivität mit dem Verlustfaktor  $\tan \delta_\epsilon$  beschreiben. Die durch Gleichstromleitfähigkeit bedingten Isolationsverluste werden im

Allgemeinen bereits bei Frequenzen oberhalb von wenigen 100 Hz bedeutungslos [ITM07], können jedoch bei durch elektrische DC-Felder gesteuerten Kondensatoren (sog. Varaktoren) eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Leistungsaufnahme der Komponente spielen (Leckstrom).



**Abbildung 2.1:** Frequenzabhängigkeit der Permittivität und der dielektrischen Verluste nach [ITM07].

Die Polarisation eines dielektrischen Materials ergibt sich aus der Überlagerung verschiedener Polarisierungseffekte, die in der Regel frequenz- und zeitabhängig sind. Abbildung 2.1 zeigt qualitativ den Frequenzverlauf und benennt die verschiedenen Polarisationsmechanismen. Wird das auf ein Dielektrikum einwirkende elektrische Feld sprunghaft geändert, so wird sich ein Teil der Polarisation (Ionen- und Elektronenpolarisierung) sofort einstellen. Hingegen laufen Polarisierungseffekte mit mechanischen Umorientierungsprozessen (wie Orientierungs- und Raumladungspolarisation), sog. Relaxationsprozesse, mit charakteristischen Zeitkonstanten (Relaxationszeiten  $\tau_{rel}$ ) ab. Dieses Verhalten lässt sich im Frequenzbereich durch die Cole-Cole-Gleichung

$$\epsilon_r = \epsilon_{r,\infty} + \frac{\Delta\epsilon_r}{1 + (j\omega\tau_{rel})^{1-\alpha}} \quad (2.7)$$

beschreiben, wobei  $\Delta\epsilon_r = \epsilon_{r,0} - \epsilon_{r,\infty}$  der Differenz zwischen sich spontan einstellender Permittivität  $\epsilon_{r,\infty}$  und ihrem Endwert  $\epsilon_{r,0}$  entspricht. Messtechnisch lässt sich  $\epsilon_{r,0}$  bei Gleichspannung oder sehr kleinen Frequenzen ermitteln. Die sich spontan