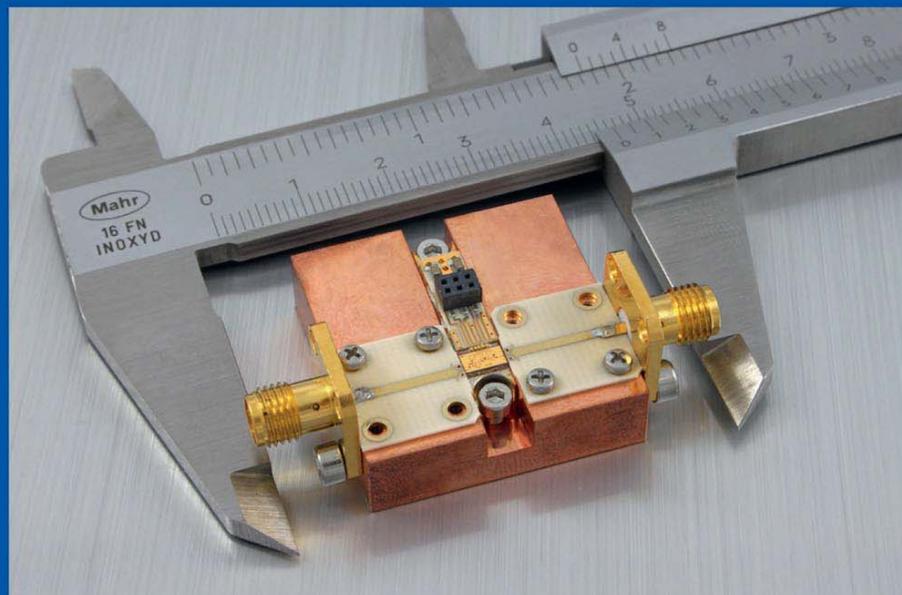


45

Forschungsberichte aus dem  
Ferdinand-Braun-Institut,  
Leibniz-Institut  
für Höchstfrequenztechnik

## Untersuchung und Optimierung robuster und hochlinearer rauscharmer Verstärker in GaN-Technologie









aus der Reihe:

## **Innovationen mit Mikrowellen und Licht**

### **Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik**

Band 45

Andreea Cristina Andrei

Untersuchung und Optimierung robuster und hochlinearer  
rauscharmer Verstärker in GaN-Technologie

**Herausgeber: Prof. Dr. Günther Tränkle, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich**

Ferdinand-Braun-Institut  
Leibniz-Institut  
für Höchstfrequenztechnik (FBH)  
Gustav-Kirchhoff-Straße 4  
12489 Berlin

Tel. +49.30.6392-2600  
Fax +49.30.6392-2602

E-Mail [fbh@fbh-berlin.de](mailto:fbh@fbh-berlin.de)  
Web [www.fbh-berlin.de](http://www.fbh-berlin.de)



## Innovationen mit Mikrowellen und Licht

Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut,  
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

### Vorwort der Herausgeber

Neue Ideen, Entwicklungen und Konzepte aus der Forschung sind die Basis von Fortschritt und Wettbewerbsfähigkeit. Als Inventionen erweitern sie den Stand des Wissens und der Technik, als innovative Produkte und Dienstleistungen schließlich findet ein Teil von ihnen Eingang in unsere Alltagswelt.

In diesem Sinne dokumentiert die Reihe „*Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik*“ aktuelle Forschungen und Entwicklungen aus dem Institut. Wir möchten Ihnen diese Ergebnisse zugänglich machen und zur weiteren Diskussion anregen – nicht zuletzt, damit möglichst viele Entwicklungen zu einem Teil unseres Alltags werden.

Gegenstand der Untersuchungen sind rauscharme Verstärker, die in Funkempfängern eine zentrale Aufgabe haben. Sie heben das empfangene Signal auf einen Leistungspegel, der die unkomplizierte elektronische Verarbeitung erlaubt. Die GaN-Elektronik des FBH ermöglicht es, diese Schaltungen zugleich sehr empfindlich – sodass sie auch sehr schwache Signale erfassen können – und sehr robust – damit der Empfang eines unerwartet starken Signals nicht zur Zerstörung führt – zu entwerfen. Dieser Beitrag verfolgt einen umfassenden Ansatz, in dem die schaltungstechnischen Optimierungspotentiale rauscharmer Verstärker in GaN-Technologie bezüglich ihrer Rauschzahl, Linearität und Robustheit untersucht und ausgeschöpft werden. Kernstück ist eine neue Verstärkertopologie, die derzeit nachweislich die weltweit robusteste rauscharme Topologie ist.

Eine anregende Lektüre wünschen

Prof. Dr. Günther Tränkle  
Direktor

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich  
stellvertretender Direktor

### Das Ferdinand-Braun-Institut

Das Ferdinand-Braun-Institut erforscht elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern. Diese sind Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarfsfeldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität. Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickelt das Institut vom sichtbaren bis zum ultravioletten Spektralbereich. Die Anwendungsfelder reichen von der Medizintechnik, Präzisionsmesstechnik und Sensorik bis hin zur optischen Satellitenkommunikation. In der Mikrowellentechnik realisiert das FBH hocheffiziente, multifunktionale Verstärker und Schaltungen, unter anderem für energieeffiziente Mobilfunksysteme und Komponenten zur Erhöhung der Kfz-Fahrsicherheit. Kompakte atmosphärische Mikrowellenplasmaquellen mit Niederspannungsversorgung entwickelt es für medizinische Anwendungen, etwa zur Behandlung von Hauterkrankungen.

Das FBH ist ein international anerkanntes Zentrum für III/V-Verbindungshalbleiter mit allen Kompetenzen: vom Entwurf, über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung von Bauelementen.

Seine Forschungsergebnisse setzt das FBH in enger Zusammenarbeit mit der Industrie um und transferiert innovative Produktideen und Technologien erfolgreich durch Spin-offs. In strategischen Partnerschaften mit der Industrie sichert es in der Höchstfrequenztechnik die technologische Kompetenz Deutschlands.



# Untersuchung und Optimierung robuster und hochlinearer rauscharmer Verstärker in GaN-Technologie

Von der Fakultät MINT - Mathematik, Informatik, Physik,  
Elektro- und Informationstechnik  
der Brandenburgischen Technischen Universität  
Cottbus-Senftenberg  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation  
vorgelegt von

Dipl.-Ing.  
Andreea Cristina Andrei  
geboren am 16.02.1980 in Timișoara, Rumänien

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dirk Killat  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Rudolph  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich  
Tag der mündlichen Prüfung: 11.12.2017



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2018

Zugl.: (BTU) Cottbus, Univ., Diss., 2018

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2018

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, 2018

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9810-0

eISBN 978-3-7369-8810-1



In der Wissenschaft gleichen wir alle nur den Kindern, die am Rande des Wissens hier und da einen Kiesel aufheben, während sich der weite Ozean des Unbekannten vor unseren Augen erstreckt.

Sir Isaac Newton





## Danksagung

Diese Arbeit habe ich zwar allein geschrieben, an ihrem Gelingen waren jedoch zahlreiche Kollegen beteiligt, denen ich meinen Dank aussprechen möchte.

Zuerst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Rudolph bedanken, der mir die Möglichkeit zur Promotion an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) gegeben hat. Ich bedanke mich darüber hinaus für seine vielfältigen Anregungen, Diskussionen, Fragestellungen und seine stets aufgeschlossene und freundliche Art, die wesentlich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Gastwissenschaftlerin am Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) in Berlin. Daher gilt mein herzlicher Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Heinrich, der mir die Arbeit im FBH ermöglicht hat.

Im täglichen Umgang haben mich neben meinem Betreuer auch noch zahlreiche Mitarbeiter der Abteilung Mikrowellentechnik ertragen. Dass sie mich in meiner Arbeit unterstützt haben, ist nicht selbstverständlich und hat mich sehr gefreut.

Herrn Ralf Doerner möchte ich für die Messungen und die vielen Gedankenanstöße bezüglich des Rauschens herzlich danken. Herrn Olof Bengtsson, Ph.D., der mich während der Arbeit stets mit fundierten und intensiven Diskussionen bezüglich der nichtlinearen Messungen unterstützte, sowie für das Einrichten und das gemeinsame Durchführen der Stress-Messungen mit hoher Überlast, möchte ich besonders danken. Steffen Schulz und Jens Schmidt danke ich für die ausgezeichnete Unterstützung im Bereich der Messtechnik. Ebenso danke ich den Herren Dr.-Ing. Frank Schnieder und Peng Luo für die Erstellung der Transistormodelle, Herrn Dr.-Ing. Franz-Josef Schmückle für die EM-Simulationen, Herrn Dr.-Ing. Bernd Janke für die Erstellung und Betreuung der MMIC-Layouts und Herrn Serguei A. Chevtchenko, Ph.D., für die Entwicklung von GaN-HEMTs.

In Anbetracht der Vielzahl an Mitarbeitern des Instituts können hier nicht alle aufgeführt werden. Daher möchte ich nochmals allen nicht namentlich genannten Kollegen für das angenehme Arbeitsklima danken.



Für das Korrekturlesen möchte ich mich bei Antina Schmidt, Reimo Düben und Frank Schnieder bedanken.

Die ganzen Strapazen waren ohne die private Unterstützung von zu Hause nicht zu bewältigen. Mein größter Dank gilt daher meinem Mann, der mich immer unterstützt hat, fachlich durch seine zahlreichen konstruktiven Anregungen sowie persönlich durch seine unermüdliche Fürsorge und moralische Unterstützung. Meinen Söhnen danke ich für die entgegengebrachte Geduld und ihr Verständnis.



## Abstract

The next generation of integrated transceivers requires low-noise amplifier as well as power amplifier on a single chip. GaN HEMTs show high breakdown voltages and power handling capabilities, as well as a low noise figure, therefore they are an ideal candidate for RF front-ends.

The thesis analyses highly linear and rugged low-noise amplifiers, which can be integrated on transceivers. First, the GaN HEMT is characterized. The equivalent circuit and the bias point for the optimum noise operation are described, followed by an analysis of the transistor properties during burn-in and pulsed input overdrive. This provides a fundamental understanding for amplifier behaviour during and after input power overdrive.

The main part of the thesis addresses the development and the characterization of rugged low-noise amplifiers. Beyond that a new concept for the ruggedness improvement is developed, measured and characterized. This concept uses a novel interconnection topology between two transistors at the amplifier's input, which enhances the LNA's ruggedness against high input power levels. It could be demonstrated that the LNA can withstand peak input power values higher than +44 dBm using CW signal and +47 dBm with a pulsed signal at the amplifier's input without damage.



## Zusammenfassung

Die nächste Generation von integrierten Sende- und Empfangssystemen erfordert sowohl robuste rauscharme Verstärker als auch Leistungsverstärker auf einem einzelnen Chip. Die GaN-HEMT-Technologie hat bisher gezeigt, dass sie durch ihre hohen Durchbruchspannungen, die hohe Elektronenbeweglichkeit und die niedrige Rauschzahl ein guter Kandidat für die Realisierung solcher Systeme ist.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit hochlinearen und robusten rauscharmen Verstärkern, welche in Sender-Empfänger-Systeme integriert werden können. Zuerst wird der GaN HEMT charakterisiert. Nachfolgend werden das Ersatzschaltbild und die Auswahl eines geeigneten Arbeitspunktes für rauscharme Anwendungen beschrieben. Die Eigenschaften von Transistoren werden während des Burn-in Prozesses und gepulster Anregung mit hoher Überlast am Eingang analysiert. Damit werden die Grundlagen für das Verständnis des Verhaltens eines Verstärkers während und nach der Übersteuerung am Eingang gelegt.

Der Hauptteil dieser Arbeit zeigt die Entwicklung und die Charakterisierung von robusten rauscharmen Verstärkern. Darüber hinaus wird ein neues Konzept für die Steigerung der Robustheit entwickelt, gemessen und charakterisiert. Das Konzept verwendet eine neuartige Zusammenschaltung zweier Transistoren am Verstärkereingang, wodurch die Spannungsfestigkeit gegenüber hohen Leistungspegeln gesteigert wird. Damit konnten Höchstwerte von +44 dBm mit CW-Anregung und +47 dBm mit gepulster Anregung am Verstärkereingang ohne Beschädigung demonstriert werden.



## Liste der Publikationen

- **Cristina Andrei**, Olof Bengtsson, Ralf Doerner, Serguei A. Chevtchenko, Wolfgang Heinrich, Matthias Rudolph, “Highly linear X-band GaN-based low-noise amplifier,” *International Symposium on Signals, Systems, and Electronics (ISSSE)*, 2012, pp. 1–4.
- **Cristina Andrei**, Helmut Kautge, Ralf Doerner, Olof Bengtsson, Serguei A. Chevtchenko, Wolfgang Heinrich, Matthias Rudolph, “Highly Rugged X-Band GaN Low Noise Amplifiers,” *6th Space Agency – MOD Round Table Workshop on Wide Bandgap Semiconductors and Components, ESA-ESTEC*, 2012.
- **Cristina Andrei**, Olof Bengtsson, Ralf Doerner, Serguei A. Chevtchenko, Wolfgang Heinrich, Matthias Rudolph, “Robust stacked GaN-based low-noise amplifier MMIC for receiver applications,” *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015, pp. 1–4.
- **Cristina Andrei**, Olof Bengtsson, Ralf Doerner, Serguei A. Chevtchenko, Wolfgang Heinrich, Matthias Rudolph, “Dynamic behaviour of a Low-Noise Amplifier GaN MMIC under input power overdrive,” *European Microwave Conference (EuMC)*, 2015, pp. 231–234.
- **Cristina Andrei**, Ralf Doerner, Serguei A. Chevtchenko, Wolfgang Heinrich, Matthias Rudolph, “On the Optimization of GaN HEMT Layout for Highly Rugged Low-Noise Amplifier Design,” angenommen für die Veröffentlichung bei *European Microwave Conference (EuMC)*, 2017.
- Matthias Rudolph, **Cristina Andrei**, Ralf Doerner, Serguei A. Chevtchenko, Wolfgang Heinrich, “Noise in GaN HEMTs and Circuits,” angenommen für die Veröffentlichung bei *24th International Conference on Noise and Fluctuations*, 2017.
- Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2016. “Elektrischer Signalstärker, Schaltkreisanordnung sowie Verfahren zum Verstärken eines elektrischen Signals”. Erfinder: Matthias Rudolph und **Cristina Andreea Andrei**. Anmeldung: 17.11.2016. DE, Patentschrift DE102015107655A1 und USA, Patentschrift US20160336908A1.

