



Kapitel 1

Einleitung

1.1 Entwicklung der Kommunikationstechnik

Der Wunsch, Nachrichten oder Meldungen schnell über große Entfernungen zu übertragen, ist so alt wie die Menschheit. Der Durchbruch der Nachrichtenübertragung kam jedoch mit der Entdeckung und der Erforschung der Elektrizität Mitte des 19. Jahrhunderts. Die damalige Nachrichtentechnik machte sich die Tatsache zu Nutze, dass sich elektrische Ladungen über Metalldrähte ausbreiten können. Das führte zu Erfindungen wie der Telegraphie und die Telefonie.

Im Jahre 1874 hatte der Physiker Ferdinand Braun den Gleichrichtereffekt am Übergang einer feinen Metallspitze zu einem Nichtmetallkristall entdeckt. Zwischen den Jahren 1886 bis 1891 konnte der Physiker Heinrich Hertz mittels unterschiedlicher Experimente die Existenz elektromagnetischer Wellen beweisen und diese charakterisieren. Guglielmo Marconi war der erste, der die Erfindungen von Braun und Hertz praktisch nutzte. Die erste transatlantische Funkübertragung fand im Dezember 1901 statt.

Ab Mitte des 20. Jahrhunderts erfuhr die Halbleitertechnik eine rasante Entwicklung. J. E. Lilienfeld beschreibt das Prinzip des Feldeffekttransistors, welches er 1925 patentieren lässt [1]. Die Recherchen von Lilienfeld wurden von den Wissenschaftlern der Bell Labs in den USA aufgegriffen und weiter entwickelt, was zur Erfindung des bipolaren Transistors im Jahr 1948 durch Bardeen, Brattain and Shockley führte. Jack Kilby von Texas Instruments und Robert Noyce von Fairchild Camera and Instruments entwickelten den ersten integrierten Schaltkreis, 1958 und 1959. Diese Erfindung stellt einen Meilenstein

in der Entwicklung von kompakten Geräten dar. Die Integration verschiedener Bauelemente auf einem Substrat wird nun für verschiedene Hersteller interessant. So kamen in 1970/71 nahezu gleichzeitig die ersten Mikroprozessoren auf dem Markt: der Intel 4004 und der Texas Instruments TMS 1000. Der Mikroprozessor 4004 beinhaltet schon 2300 Transistoren. In den folgenden Jahren steigt die Anzahl der integrierten Bauelemente pro Fläche stetig und somit erreichen die aktuellen Mikroprozessoren eine Anzahl von mehr als 1,5 Milliarden Komponenten.

Parallel zu den Halbleitererfindungen entwickelte sich auch die Funktechnik sehr schnell. Von der ersten kommerziellen Transatlantik-Telegrafie im Jahr 1907 dauerte es nicht mehr lange, bis auch im deutschen Raum die ersten drahtlosen Übertragungen gemeldet wurden. In 1923 startete der erste Radiosender, 1926 gab es auf der Eisenbahnstrecke Hamburg-Berlin einen Zugfunk, 1935 gab es bereits das erste Autotelefon, welches mehr als 16 kg schwer war und nur im Kofferraum eines Wagens Platz fand, wie in der Abbildung 1.1 dargestellt.

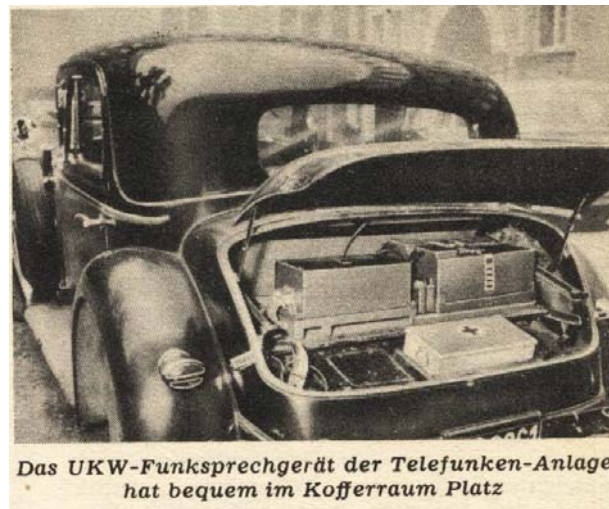


Abbildung 1.1: Das erste Autotelefon [2].

1958 startete das erste landesweite öffentliche Mobilfunknetz in Deutschland, das A-Netz. 1972 wurde das B-Netz in Deutschland, Österreich, den Niederlanden und Luxemburg eingeführt, und 1986 kam das C-Netz. In den 80er Jahren entstanden in Europa sehr viele zueinander inkompatible Mobilfunksysteme, was in folgenden Jahren zur Entwicklung eines globalen digitalen Mobilfunknetzes führte. So entstand 1990 das Global System for Mobile Communications (GSM), der erste digitale Standard im Mobilfunk. Im Jahr 2000



startet die 3. Generation der Mobilfunknetzwerke, UMTS (Universal Mobile Telecommunications System Standard), welches höhere Übertragungsraten ermöglichte. Der Wunsch, immer mehr Daten übertragen zu können, führte zu weiteren Entwicklungen der Mobilfunksysteme. Im Jahr 2010 startete die 4. Generation: LTE (Long Term Evolution). Damit war es möglich, Daten mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von bis zu 150 MBit/s zu übertragen. Ab 2014 gibt es eine Erweiterung von LTE, LTE-Advanced, welche Datenraten von 1 GBit/s (1000 MBit/s) erreichen kann. Der Wunsch „es geht noch schneller und noch besser“ führt zu weiteren Entwicklungen der Mobilfunksysteme. Es gibt viele Mobilfunkunternehmen und Netzausrüster, die aktuell an der 5. Mobilfunkgeneration, kurz 5G, arbeiten und den neuen Standard bis 2020 starten wollen.

Die Kommunikationstechnik ist sehr vielfältig geworden, wie aus der kurz zusammengefassten Geschichte zu entnehmen ist. Die Nutzung der verschiedenartigen Leistungen, wie Ton- und Bildübertragung, SMS, MMS, Streaming kann nur über umfangreiche Systeme abgewickelt werden. Parallel dazu müssen die Netzbetreiber auch die älteren Mobilfunkstandards noch bedienen, da die Entwicklung der Kommunikationstechnik in vielen Teilen der Welt unterschiedlich verläuft. Das führt zu einer ständigen Nachfrage an Basisstationen und zu einer kontinuierlichen Entwicklung der Infrastruktur.

1.2 GaN Technologie

Die Erfindung des ersten Transistors basierend auf Germanium Substrat war der Grundstein für die Entwicklung von elektronischen Geräten. In den 60er Jahren ersetzte Silizium das Germanium in den meisten Anwendungen, weil Silizium stabilere thermische Eigenschaften aufweist. Die Entwicklung der Transistoren führte zu neuen Bauelement-Varianten, welche spezifisch nach der Art der Anwendungen eingesetzt wurden. In den tieferen Frequenzbereichen wurden MOSFETs (eng. Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) verwendet, für die digitalen Schaltungen wiederum wurde CMOS (eng. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) dominant, und für die Anwendungen in den Frequenzbereichen von bis zu 3 GHz setzten sich die bipolaren-Silizium Transistoren durch. Aufgrund der niedrigen Elektronenbeweglichkeit war es



zunächst schwierig, Silizium in Anwendungen für hohe Frequenzen einzusetzen. Eine Lösung für diese Frequenzen wurde mit GaAs (Gallium Arsenide) gefunden. Die GaAs Technologie wurde in den Anfangszeiten, aufgrund der hohen Herstellungskosten, nur im militärischen Bereich und dortigen Anwendungen eingesetzt. So wurde in 1979 der erste GaAs HEMT (High Electron Mobility Transistor) präsentiert [3]. Die GaAs Technologie eroberte in den 90er Jahren auch den Markt für die kommerziellen Anwendungen. Heutzutage ist diese Technologie kostengünstig und füllt die Anwendungsbereiche von schnellen integrierten Schaltungen bis hin zu diskreten Mikrowellen-Leistungsanwendungen. InP (Indium Phosphide) ist ein anderes Halbleitermaterial, welches erfolgreich für Anwendungen bei Frequenzen von bis zu 300 GHz eingesetzt wird. GaAs und InP gehören zu den sogenannten Verbindungshalbleitern (III–V), weil diese als Zusammensetzung von zwei Materialien der dritten und der fünften Gruppe im periodischen System der Elemente hergestellt werden. GaN (Gallium Nitride) ist ein neues Material, das der III–V Gruppe angehört. Es zeichnet sich durch seine hohe Bandlücke aus und hat das Potential, das wichtigste Material nach Silizium in der Halbleitertechnologie zu werden.

GaN wurde zum ersten Mal 1930 synthetisiert und in 1969 als Schicht aufgewachsen [4]. Ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung der GaN–Technologie gelang 1971 mit dem Aufwachsen von GaN mittels MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition). Zwischen den Jahren 1990 und 2000 erreichte die Forschung an GaN HEMTs einen weiteren Höhenpunkt mit dem reproduzierbaren Aufwachsen auf hochqualitativen 4H-SiC Substrat[5]. Die Fortschritte in der GaN/AlGaIn Technologie wurden durch gezielte Forschungen zur Verbesserung der Materialqualität der epitaktischen Schichten, der Auswahl von verbesserten Materialsubstraten und der Entwicklung der Prozesstechnologie vorangetrieben. Im Jahre 2005 kam der erste kommerzielle AlGaIn/GaN HEMT auf dem Markt. Die Forschungen der letzten Jahrzehnte haben gezeigt, dass GaN die hohen Anforderungen an die zukünftige Mobilfunkgeneration und an Radarsysteme erfüllen kann. Der große Bedarf an leistungsfähigen Mikrowellentransistoren hat dazu beigetragen, dass einige kommerzielle Anbieter heutzutage GaN HEMTs mit hervorragenden Eigenschaften auf den Markt bringen.

Die Materialeigenschaften von GaN haben wesentliche Vorteile im Vergleich zu anderen kommerziellen Halbleitern. GaN zeichnet sich durch eine große Band-



lücke aus. Das ermöglicht höhere Betriebsspannungen und -ströme, ohne dass es zum Felddurchbruch kommt. Die erzielten hohen Leistungsdichten machen es möglich, die Abmaße des Transistors für eine gegebene Ausgangsleistung zu reduzieren. Die hohe Spannungsfestigkeit von GaN HEMTs macht es möglich, hohe Ausgangsleistungen mit einer hohen Ausgangsimpedanz zu erreichen, welche die Ausgangsanpassung wiederum vereinfacht. Diese Eigenschaft macht den GaN HEMT zum guten Kandidaten für die Realisierung von Leistungsverstärkern mit hohen Wirkungsgraden. Durch die reduzierte Transistorgröße werden auch geringere Verluste als mit Silizium-Bauelementen erreicht und bringen GaN in Vorteil bei der Realisierung von Schaltkreisen, bei denen hohe Schaltgeschwindigkeiten erforderlich sind. Die thermische Leitfähigkeit von GaN ist ungefähr vergleichbar mit der von Si (Silizium) und ungefähr dreimal größer als von GaAs. GaN aufgewachsen auf einem SiC-Substrat weist zusätzlich einen geringeren thermischen Widerstand als Si Komponenten auf. Diese Eigenschaft wirkt sich positiv auf die Abführung der Verlustleistung aus und ermöglicht eine höhere Lebensdauer und Zuverlässigkeit der GaN Bauelemente.

Tabelle 1.1: Materialeigenschaften von Halbleitern

Materialeigenschaften	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
Bandlücke (eV)	1,1	1,4	3,2	3,4
Sättigungsgeschwindigkeit (cm ⁷ /s)	1	1,3	2	2,7
Durchbruchspannung (MV/cm)	0,3	0,4	2,0	3,3
Thermische Leitfähigkeit (W/cmK)	1,5	0,5	4,5	1,3
JFOM ¹ im Vergleich zu Si	1	1,7	20	27

In der Tabelle 1.1 sind die Materialeigenschaften der wichtigsten Halbleitern, welchen in der Hochfrequenz-Anwendungen verwendet werden. GaN hat eine Sättigungsgeschwindigkeit, die zweimal höher ist als die von Si oder GaAs, und eine Durchbruchspannung, welche zehnmal und 7,5-mal besser ist als diejenigen von Si und GaAs. Zusätzlich, der Johnson Bewertungsfaktor (eng. Johnson's figure of merit) JFOM von GaN, ist 27-mal höher als jener von

¹Durch den Johnson Bewertungsfaktor werden Halbleitermaterialien im Hinblick auf Hochfrequenztransistoren verglichen.



Si und 15-mal höher als jener von GaAs. Der JFOM ist das Produkt aus der Sättigungsgeschwindigkeit und der Durchbruchspannung und stellt den Bezugswert für die Leistungsmerkmale von Bauelementen bei hohen Frequenzen dar.

1.3 GaN Sende-Empfänger

Aufkommende kommerzielle und militärische Kommunikationssysteme schaffen einen großen Bedarf an MMIC (eng. Monolithic Microwave Integrated Circuit) und Komplettlösungen für Sende-Empfänger Schaltkreise. Auf dem Markt gibt es einen erhöhten Bedarf an kleinen, leichten und kostengünstigen Mikrowellen-Komponenten verbunden mit der Forderung nach höherer Funktionalität. Sende- und Empfängermodule sind die wichtigsten Bauteile eines Sende-Empfängersystems.

Die Mobilfunksysteme, hier vor allen die Basisstationen, sowie die Radarsysteme können von der GaN-Technologie profitieren. Die vergleichbare Ausgangsleistung mit hohem Wirkungsgrad und die gute Linearität sind zwei der wichtigen Merkmale eines GaN-Bauteils.

Die Sende-Empfänger-Systeme für Radarapplikationen brauchen sowohl hohe Ausgangsleistungen als auch robuste und rauscharme Verstärker. Dabei soll möglichst zeitnah gesendet und empfangen werden. Für Empfänger war es bisher notwendig, Schutzelemente, wie Filter oder PIN-Dioden, vorzusehen.

Die GaN HEMT Kennzahlen öffnen neue Anwendungsmöglichkeiten in dem Design von Radar- sowie von Sende-Empfänger-Systemen. Diese Systeme können komplett aus GaN in monolithisch integrierten Schaltungen, den sogenannten MMIC, hergestellt werden und die verfügbaren Lösungen in GaAs Technologie ablösen und übertreffen. Ein typischer GaAs Empfänger hat zwischen der Antenne und dem LNA (Low Noise Amplifier) ein Filter hoher Güte vorgeschaltet. Dieses Filter verschlechtert die Rauscheigenschaften des gesamten Systems, da es durch seine Einfügedämpfung selbst typisch 1 dB Verluste in einem System verursacht [6]. GaAs LNA haben ein sehr niedriges Rauschmaß von typisch 0,6 dB bei 10 GHz, wie in [7] gezeigt wurde. Der LNA TQP3M9037 der Firma Triquint erreicht sogar ein Rauschmaß besser 0,4 dB bei 1,9 GHz. Im Vergleich zu GaN LNA werden GaAs LNAs bei Leistungen größer 0,1 W am



Eingang zerstört. GaN LNA können mehr als 20 W am Eingang aushalten, wie in [8] demonstriert wurde.

Traditionell werden GaAs Sende-Empfangssysteme aus mehreren einzelnen Komponenten, wie HPA (High Power Amplifier), Filter, LNA und Zirkulator oder Schalter entwickelt, wie in Abbildung 1.2 dargestellt. Die Produktions- und die Aufbaukosten sind in diesen Fall viel höher als für Single-Chip Lösungen. Dies lässt eine Entwicklung mit der aktuell noch kostenintensiven GaN-MMIC-Technologie sinnvoll erscheinen.

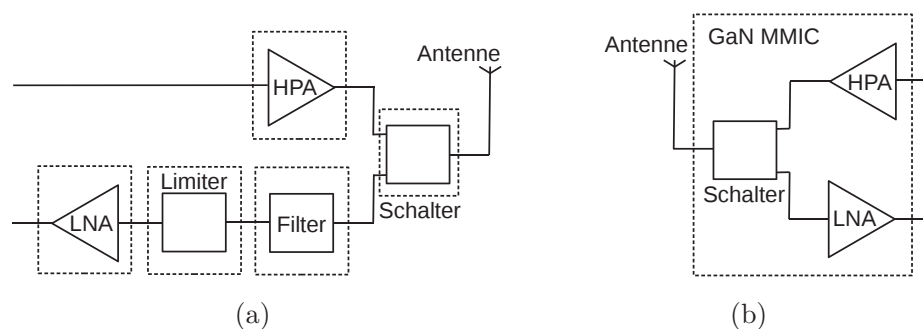


Abbildung 1.2: (a) Traditionelles Multi-Chip GaAs Sende-Empfängersystem und (b) Single-Chip GaN Sende-Empfängersystem.

Ein Single-Chip GaN Sende-Empfänger mit einer Ausgangsleistung von +43 dBm und einem Rauschmaß von 1,5 dB in der X-Band wurde in [9] präsentiert.

Die Robustheit, niedrige Systemrauschzahlen zusammen mit exzellenten Ausgangseigenschaften machen GaN HEMT zu einem starken Konkurrenten für MMIC Sende-Empfänger-Systeme mit GaAs Aufbautechnik.

Am Ferdinand-Braun-Institut (FBH) werden leistungsfähige HEMTs und MMICs basierend auf der GaN-Technologie entwickelt. In Anbetracht der modernen Mobilfunksysteme ist es sehr wichtig, die Verstärkerschaltungen anwendungsspezifisch zu charakterisieren. Der Gegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung und die Optimierung rauscharmer und robuster Verstärker in GaN-Technologie. Diese Arbeit umfasst folgende Aspekte:

- Charakterisierung von GaN HEMTs in Bezug auf minimale Rauschzahlen und hohe Robustheit



- Design und Entwicklung hoch robuster LNAs
- Charakterisierung der entwickelten LNAs

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in sechs Kapitel aufgeteilt und in drei Hauptteile gliedert. Der erste Teil ist eine Einführung, welche einige typische Eigenschaften von Empfängersystemen, des GaN HEMTs und des LNAs beschreibt. Der zweite Teil und der Hauptteil beschäftigt sich mit der systematischen Analyse und der Charakterisierung rauscharmer Verstärker in Form von Robustheit und Linearität. Der letzte Teil zeigt die Messungen und die Eigenschaften der entwickelten GaN LNAs. Im Folgenden ist die Aufteilung der Arbeit in Kapitel gegeben.

Kapitel 1, *Einleitung*, beginnt mit der Motivation zu dieser Arbeit einher mit einigen generellen Informationen für das Verständnis der Notwendigkeit dieser Arbeit. Die Entwicklung der Kommunikationstechnik ist präsentiert und eine begleitende Übersicht über die verschiedenen Halbleitertechnologien wird gegeben.

Kapitel 2, *Rauscharme Verstärker*, beschreibt die Grundlagen eines rauscharmen Verstärkers, von der Rauschzahl in linearen Systemen bis zu den Anforderungen an hoch lineare und hoch robuste Sende-Empfänger-Systeme.

Kapitel 3, *GaN HEMT*, ist dem Transistor mit hoher Elektronenbeweglichkeit gewidmet. Zuerst wird die Funktionsweise dieser Transistoren erklärt und der FBH HEMT in seinem Aufbau gezeigt. Das FBH hat seine eigene Prozesslinie zur Herstellung von GaN HEMTs und GaN MMICs. Anschließend wird in diesem Kapitel die Optimierung des FBH Transistors für rauscharme Anwendungen gezeigt.

In dem **Kapitel 4**, *Optimierung von GaN LNAs*, werden MMIC LNAs, die während dieser Arbeit entstanden sind, beschrieben und charakterisiert. Zuerst wird ein LNA-Entwurf präsentiert, welcher als Startpunkt für die Entwicklung der LNAs dient. Dabei wurden die Linearität und die Rauschzahl untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden weiterhin verfolgt, um die Rauschzahl zu optimieren. Es entstand somit die Idee eines Transformator-LNAs. Auch das



Layout des HEMTs wurde optimiert, um die Rauschzahl zu senken. Schließlich werden hoch robuste LNAs mit einem neuen Stacked-Konzept zum Selbstschutz gegen hohe Übersteuerungs-Leistungen am Eingang demonstriert.

Kapitel 5, *Aufbau und Messung von Verstärkermodulen*, beschäftigt sich mit dem Aufbau von Verstärkermodulen. Um die LNA-Chips mit hohen Eingangsleistungen messen zu können, wurden die einzelnen MMIC-Chips in einem hybriden $50\ \Omega$ Test-Fixture eingebaut. Dabei ist das MMIC mittels Bonddrähten mit einer $50\ \Omega$ -Mikrostreifenleitung Platine verbunden worden, welche wiederum an $50\ \Omega$ Koaxial-Anschlüssen angeschlossen ist. Anschließend werden die gebauten Messplätze gezeigt.

Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung und einem Ausblick auf die Nutzung der Erkenntnisse und weiteren Untersuchungen im **Kapitel 6**, *Zusammenfassung und Ausblick*.

