

## KAPITEL 1

# Einleitung

Als Mikrowellen werden elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich zwischen 300 MHz und 300 GHz bezeichnet<sup>1</sup>, was einer Freiraumwellenlänge von 1 m bis 1 mm entspricht. Durch den Mobilfunk und andere modernere Anwendungen hat sich diese Nomenklatur in den letzten Jahren aber verändert. Im technischen Sprachgebrauch werden als Mikrowellen heutzutage üblicherweise nur Frequenzen  $f > 1$  GHz bezeichnet, wobei der Gegenstand der vorliegenden Arbeit Anwendungen im Frequenzbereich  $10 \text{ GHz} < f < 80 \text{ GHz}$  sind. Die wichtigsten Anwendungen von Mikrowellen lassen sich in drei Bereiche unterteilen:

- Die Funktechnik wird zur drahtlosen Nachrichtenübertragung benutzt. Die zu übertragende Information wird auf eine höhere Frequenz umgesetzt (moduliert) und dann übertragen. Je höher dabei die gewählte Übertragungsfrequenz ist, desto kleiner ist die relative Bandbreite, d.h., es können bei gleicher relativer Bandbreite mehr Informationen übertragen werden. Klassische Beispiele dafür sind der Richt- und Satellitenfunk der Telekommunikationsunternehmen. Die am weitesten verbreitete Anwendung der Funktechnik ist aber inzwischen die Mobilkommunikation. Die Verbindung zwischen Handy und Basisstation erfolgt bei Frequenzen von  $f \leq 2.1 \text{ GHz}$ , für die Kommunikation zwischen den Basisstationen werden Richtfunkstrecken im Bereich von  $f \approx 23 \text{ GHz}$  oder  $38 \text{ GHz}$  gebraucht.
- Die Radartechnik (RADIO DETECTION AND RANGING) nutzt die Reflexion von elektromagnetischen Wellen, um die Position eines Objektes und seine Bewegung zu bestimmen. Aus Laufzeit und Richtung der reflektierten Signale lässt sich die gewünschte Information bestimmen, wobei sich das Auflösungsvermögen mit kleinerer Wellenlänge (d.h. größerer Frequenz) verbessern lässt. Im Gegensatz zu optischen Sensoren und Infrarotsensoren können Mikrowellen Wolken, Nebel und andere Hindernisse durchdringen. Lange Tradition hat diese Technik für militärische Anwendungen und im zivilen Bereich für die Navigation von Schiffen

---

<sup>1</sup>Oft findet sich auch die Unterteilung in Mikrowellen von 300 MHz bis 30 GHz und Millimeterwellen von 30 GHz bis 300 GHz.

und Flugzeugen. In jüngster Zeit hat die Radarsensorik zahlreiche weitere Anwendungen erobert, prominentes Beispiel ist das Abstandswarnradar für Automobile, das bei einer Frequenz von  $f = 77$  GHz arbeitet.

- Bei der Erwärmung zum Erhitzen und Trocknen wird die Energie einer elektromagnetischen Welle in die Bewegung von Wassermolekülen und damit in Wärme umgesetzt. Klassisches Beispiel ist der Mikrowellenherd bei einer Frequenz von  $f = 2.45$  GHz.

Weitere Anwendungen gibt es z.B. in der Radioastronomie oder der Gasspektrometrie.

In Bezug auf die technischen Innovationen und die Schnelligkeit des Wachstums nimmt der Mobilfunk unter all diesen Anwendungen eine Sonderstellung ein. Während sich bis zum Anfang der 90er Jahre nur wenige den Komfort der mobilen Erreichbarkeit leisten konnten, ist das Handy aus dem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken. Es entstand ein schnell wachsender Markt für Mikrowellenbauelemente, was den Einsatz von monolithisch integrierten Schaltungen (MMIC = Monolithic Microwave Integrated Circuit) notwendig machte. Bei dieser Technologie wird die ganze Schaltung inklusive aller passiven Komponenten auf einem Chip integriert. Im Gegensatz dazu stehen hybrid aufgebaute Schaltungen (MIC = Microwave Integrated Circuit), bei denen das aktive Halbleiterbauelement auf Keramikssubstrate gebondet oder gelötet und der Rest der Schaltung auf dem Substrat realisiert wird. Die Übergänge haben dabei einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten der Schaltung und müssen deshalb, insbesondere bei höheren Frequenzen, sehr exakt ausgeführt werden. Bei höherem Durchsatz ist diese Fertigungstechnik kostenintensiv und nicht geeignet.

Neben dieser Unterscheidung der Aufbautechnologie ist das verwendete Halbleitermaterial ein wichtiges Kriterium. Durch den technischen Fortschritt können inzwischen auch Mikrowellenschaltungen bis zu einer Frequenz von derzeit (2003)  $f \approx 10$  GHz in CMOS Technologie ausgeführt werden. Bei höheren Frequenzen gibt es eine Konkurrenz zwischen SiGe- und GaAs-basierten Technologien, wobei der Frequenzvorsprung vom GaAs zum SiGe in den letzten Jahren immer kleiner geworden ist. Einen Vorteil haben die III-V Verbindungshalbleiter gegenüber SiGe jedoch immer noch, wenn es um Leistung bei höheren Frequenzen geht.

Zu einem typischen Mikrowellensystem gehören Verstärker, Mischer und Oszillatoren. Bei den Verstärkern unterscheidet man den rauscharmen Vorverstärker auf der Empfänger- von dem Leistungsverstärker auf der Sendeseite. Die Systemanforderungen in Bezug auf das Rauschen von Vorverstärkern lassen sich mit Feldeffekttransistoren (MESFET = Metal Semiconductor Field Effect Transistor und HEMT = High Electron Mobility Transistor) im Allgemeinen gut erfüllen. Durch den Einsatz neuer Modulationsverfahren sind die Anforderungen an die Leistungsverstärker in den letzten Jahren aber deutlich

gestiegen. Es wird gute Linearität auch bei sehr großer Aussteuerung gefordert. Für batteriebetriebene Anwendungen muss gleichzeitig ein hoher Wirkungsgrad ( $\text{PAE} = \text{Power Added Efficiency}$ ) in allen Leistungsbereichen erreicht werden. Mit Feldeffekttransistoren sind diese Anforderungen nur schwer zu erfüllen, was die Entwicklung bipolarer Transistoren (HBT = Hetero Bipolar Transistor) forcierte.

Eine zentrale Komponente eines Mikrowellensystems ist der Oszillator. Um Prozessschwankungen, Temperaturänderungen und Alterungseffekte ausgleichen zu können, wird eine Abstimmbandbreite im %-Bereich gefordert. Ein zentrales Kriterium ist aber das Phasenrauschen, das die Frequenzstabilität beschreibt. Die gemessene Leistung (bezogen auf 1 Hz Messbandbreite) bei einer Ablagefrequenz dicht neben der Resonanzfrequenz wird ins Verhältnis zur Leistung bei der Resonanzfrequenz gesetzt. Üblich ist die Angabe in dBc/Hz.

Durch das breitere Spektrum verschlechtern Oszillatoren mit höherem Phasenrauschen in Nachrichtenübertragungssystemen den Signal-Rausch-Abstand. Bei Radarsystemen bestimmt das Phasenrauschen die mögliche Ortsauflösung. Für fast alle Mikrowellensysteme ist also das Phasenrauschen des Oszillators eine Größe, die die Performance des ganzen Systems beeinflussen kann.

Ziel dieser Arbeit ist es, Verfahren und Konzepte vorzustellen, die den Entwurf von phasenrauscharmen MMIC-Oszillatoren verbessern. Die interessierenden Ablagefrequenzen  $f_a$  liegen dabei im Bereich von  $100 \text{ kHz} \leq f_a \leq 1 \text{ MHz}$ .

Um phasenrauscharme Oszillatoren herzustellen, müssen drei Bedingungen erfüllt werden:

- Das verwendete aktive Bauelement muss bei der Oszillationsfrequenz genügend Leistungsverstärkung zur Verfügung stellen. Kriterium dafür ist die maximale Schwingfrequenz  $f_{max}$ .
- Auch das niederfrequente Rauschen (auch 1/f-Rauschen) wird in Phasenrauschen umgesetzt und sollte deshalb möglichst gering sein.
- Die belastete Güte der Schaltung muss maximiert werden.

Bei vergleichbarer Stromdichte ist das niederfrequente Rauschen bei Siliziumbasierten bipolaren Transistoren am geringsten. Bis zu Frequenzen von mehreren 10 GHz kann der SiGe-HBT eingesetzt werden. Bei sehr hoher Frequenz (z.B.  $f = 76 \text{ GHz}$  beim Abstandswarnradar) oder größerer Leistungsanforderung müssen GaAs-basierte Transistoren verwendet werden. Weil das niederfrequente Rauschen stark von Störstellen an Grenz- und Oberflächen beeinflusst wird, sind HBTs, bei denen der Strom senkrecht zur Halbleiteroberfläche fließt, den FETs deutlich überlegen. Ein guter Kompromiss zwischen maximaler Schwingfrequenz auf der einen und niedrigem 1/f-Rauschen auf der anderen Seite ist deshalb der GaAs-HBT. Dieses Bauelement wird derzeit primär für

Leistungsverstärker im Mobilfunk ( $f \leq 2.1$  GHz) eingesetzt, mit nur leichten Prozessänderungen können aber Grenzfrequenzen von  $f_{max} > 100$  GHz erreicht werden.

Das größte Problem beim Entwurf von monolithisch integrierten phasenrauscharmen Oszillatoren sind aber die relativ geringen Güten der passiven Elemente. Beim hybriden MIC-Entwurf können Schwingkreise mit Güten von  $Q \geq 10000$  eingesetzt werden, so dass sich auch mit stark rauschenden aktiven Elementen wie Gunn-Dioden gutes Phasenrauschen erreichen lässt. Um aber Anwendungen zu etablieren, die für einen Massenmarkt bestimmt sind, müssen MMICs verwendet werden, bei denen auch der Resonator auf dem Chip angeordnet ist. Die Güte liegt beim MMIC-Entwurf nur im zweistelligen Bereich, so dass das niederfrequente Rauschen einen großen Einfluss auf die Eigenschaften des Oszillators hat.

Weil MMICs nachträglich nicht mehr abgestimmt werden können, ist eine gute Modellbildung der verwendeten Elemente eine der wichtigsten Grundlagen für einen erfolgreichen MMIC-Entwurf. Bei auf Messdaten basierenden Beschreibungen muss neben dem eigentlichen Modell aber auch ein dazugehöriger Algorithmus vorhanden sein, mit dem die Modellparameter zuverlässig extrahiert werden können. Wichtigstes Element einer Schaltung ist der Transistor, der beim Entwurf von Oszillatoren aufgrund der nichtlinearen Effekte mit einem Großsignalmodell beschrieben werden muss. Grundlage hierfür sind arbeitspunktabhängige Kleinsignalparameter. Während beim FET die notwendigen Algorithmen schon länger bekannt sind, war die Extraktion von HBT-Parametern bisher problematisch.

Beim Oszillatorentwurf geht es nicht in erster Linie darum, das Phasenrauschen der Schaltung beim Entwurf exakt zu prognostizieren. Viel wichtiger dagegen ist, bei einer gegebenen Konfiguration das Optimum in Bezug auf das Phasenrauschen zu erreichen. Die vorliegende Arbeit liefert zu diesen Themen die folgenden Beiträge:

- Es wird ein Extraktionsalgorithmus vorgestellt, mit dem sich die HBT-Parameter in vergleichbar einfacher Weise wie beim FET zuverlässig und schnell extrahieren lassen. Dabei wird von einer Näherung Gebrauch gemacht, die für HBTs unterschiedlicher Technologien und Materialsysteme gültig ist.
- Die relevanten niederfrequenten Rauschquellen des GaAs-HBTs werden identifiziert und modelliert. Es wird ein Algorithmus vorgestellt, der eine zuverlässige Extraktion dieser Quellen ermöglicht.
- Es wird eine Gütedefinition für Eintore eingeführt, die eine Güteberechnung auch außerhalb der Resonanzfrequenz gestattet.
- Die belastete Güte  $Q_v$  von Reflexionsoszillatoren wird untersucht. Dafür wird ein geschlossener Ausdruck für  $Q_v$  abgeleitet, mit dem der Einfluss

der an das aktive Element angeschalteten Impedanzen auf die belastete Güte berechnet werden kann.

- Verifiziert werden die Erkenntnisse an MMIC-Oszillatoren im Frequenzbereich von  $23 \text{ GHz} \leq f_{osc} \leq 76 \text{ GHz}$ . Die HBT-Oszillatoren erreichen exzellente Phasenrauscheigenschaften bei Frequenzen bis 76 GHz.

Zur Gliederung: Im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit werden die Extraktionsalgorithmen und Verfahren vorgestellt, die sowohl bei HBTs als auch bei FETs Anwendung finden.

Anschließend wird im dritten Kapitel kurz die Extraktion des FET-Modells dargestellt.

Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit der Modellierung von HBTs. Nach einem Abschnitt zur Extraktion der parasitären Elemente wird der neue Extraktionsalgorithmus vorgestellt und in seiner Gültigkeit genauer untersucht.

Anschließend wird die Modellbildung für das niederfrequente Rauschen und seine Extraktion behandelt.

Nach einem kurzen Abschnitt zur Phasenrauschmesstechnik werden im letzten Kapitel die entworfenen Schaltungen vorgestellt. Es handelt sich um MMIC-Oszillatoren bei 23 GHz mit MESFET-Technologie und bei 38 GHz sowie 76 GHz mit HBT-Technologie.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und dem Ausblick.

## KAPITEL 2

# Transistormodellierung

## 2.1. Kleinsignalmodellierung

Die Kleinsignalextraktion ist die Grundlage jeder Modellierung von aktiven Bauelementen. Die sowohl für FETs als auch für HBTs gültigen Zusammenhänge sollen im Folgenden dargestellt werden.

Das DUT (device under test) wird in einem Arbeitspunkt mit Kleinsignalaussteuerung über der Frequenz gemessen. Die Aufgabe der Extraktion ist es, die Elemente des Kleinsignalersatzschaltbildes in diesem Arbeitspunkt zu bestimmen, um die Messung mit dem Ersatzschaltbild möglichst gut nachbilden zu können.

Bei der Simulation *linearer* Schaltungen kann das aktive Element direkt mit diesem Kleinsignalersatzschaltbild beschrieben werden. Durch die Fortschritte in der Rechentechnik ist es zwar heute auch möglich, die Messwerte direkt in den Simulator einzulesen, trotzdem hat die Kleinsignalextraktion auch in diesem Bereich nicht an Bedeutung verloren:

- Mit Hilfe des Ersatzschaltbildes lassen sich auch Frequenzen berücksichtigen, die nicht gemessen wurden. Dies kann z.B. wichtig sein, wenn das Verhalten einer Schaltung bei sehr niedriger Frequenz bestimmt werden soll. In diesem Bereich kann die Mikrowellenmessung ungenau werden, so dass keine sinnvolle Interpolation der Messwerte mehr möglich ist.
- Für ein fehlertolerantes Design können Prozessschwankungen relativ einfach berücksichtigt werden.
- Neben dem Kleinsignal- lässt sich auch das Rauschverhalten berücksichtigen.

Bei der Simulation *nichtlinearer* Schaltungen wie Oszillatoren und Mischern sind die Wechselgrößen nicht mehr klein gegenüber den Gleichgrößen, weshalb ein Großsignalmodell benötigt wird. Dieses beschreibt die arbeitspunktabhängige Charakteristik der Kleinsignalparameter. Alle in der Kleinsignalextraktion vorhandenen Fehler und Ungenauigkeiten können sich deshalb in das Großsignalmodell fortpflanzen. Die Kleinsignalextraktion ist deshalb die Grundlage für jedes Großsignalmodell.

Erfolgt die Kleinsignalextraktion in engem Zusammenhang zur Technologieentwicklung, so sollte das Ersatzschaltbild physikalisch motiviert sein. Dann können die Kleinsignalparameter Hinweise auf technologische Probleme geben