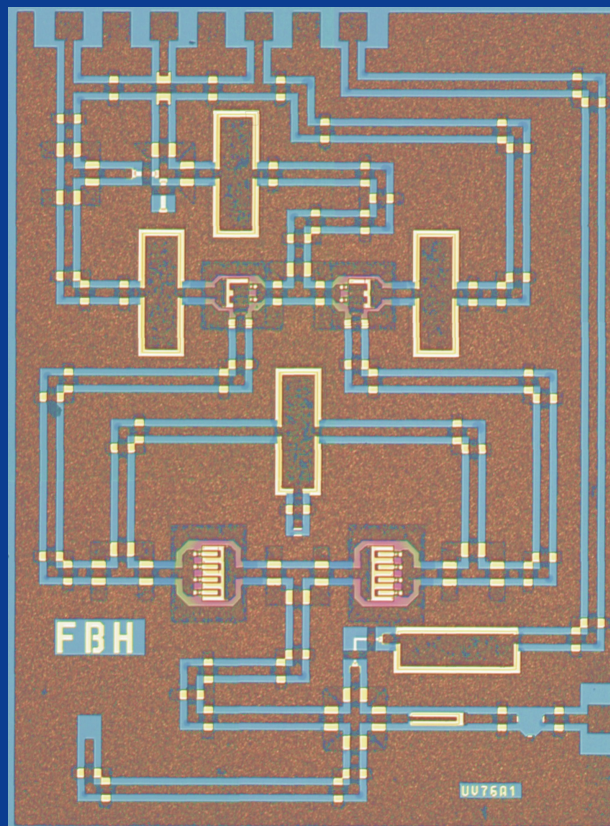


Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik

Monolithische GaAs FET Oszillatoren mit verbesserter Transistormodellierung



aus der Reihe:

Innovationen mit Mikrowellen und Licht

Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik

Band 2

Friedrich Lenk

Monolithische GaAs FET- und HBT-Oszillatoren mit
verbesserter Transistormodellierung

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

Ferdinand-Braun-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
Web www.fbh-berlin.de

Innovationen mit Mikrowellen und Licht

Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik

Vorwort der Herausgeber

Neue Ideen und Methoden in der Forschung erweitern den Stand des Wissens und der Technik. Durch ihre Anwendung in Produkten und Dienstleistungen werden in einem ganzheitlichen Prozess Innovationen erarbeitet, als eine Grundlage für die Zukunftsfähigkeit unserer modernen Welt.

Die Reihe „*Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik*“ dokumentiert in diesem Sinne die aktuelle Forschung und Entwicklung am Ferdinand-Braun-Institut. Durch die Veröffentlichung soll die Diskussion unserer Forschungsergebnisse angeregt werden. So sollen ihnen auch neue Anwendungen eröffnet werden.

Der vorliegende Beitrag "Monolithische GaAs FET- und HBT-Oszillatoren mit verbesserter Transistormodellierung" bezieht sich auf die Entwicklung phasenrauscharmer Millimeterwellen-Oszillatoren, die eine Schlüsselrolle bei der Realisierung von drahtlosen Breitband-Kommunikationsverbindungen und Radarsensoren für Kraftfahrzeuge spielen. Aus Kostengründen und wegen der Volumentauglichkeit sind dazu vollständig monolithisch integrierte Lösungen erforderlich. Die Arbeit erweitert die zum Entwurf dieser Schaltungen notwendigen Design-Kriterien und präsentiert Ergebnisse mit neuen internationalen Rekordwerten.

Prof. Dr. Günther Tränkle
Direktor

Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich
stellvertretender Direktor

Das Ferdinand-Braun-Institut

Das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) erforscht Schlüsseltechnologien in der Mikrowellentechnik und Optoelektronik. Es realisiert Höchstfrequenz-Bauelemente, -Schaltungen und -Module für die Kommunikationstechnik und Sensorik. Seine hochbrillanten Diodenlaser finden Anwendung in der Lasertechnologie, Fertigungs- und Kommunikationstechnik, sowie Medizin- und Präzisionsmesstechnik.

Das FBH ist ein international anerkanntes Kompetenzzentrum für die Technologie der III/V-Verbindungshalbleiter und für die zugehörigen Höchstfrequenz-Bauelemente und Diodenlaser. Es betreibt industriekompatible und flexible Reinraumlaborare mit Gasphasen-Epitaxieanlagen und einer III/V-Halbleiter-Prozesslinie. Das FBH verfügt über modernste Methoden für Simulation und Entwurf sowie umfassende Messtechnik zur Material- und Bauelement-Charakterisierung.

Das Ferdinand-Braun-Institut setzt seine Forschungsergebnisse in enger Zusammenarbeit mit der Industrie um und transferiert innovative Produktideen erfolgreich durch Spin-offs.

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2004

Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2004

ISBN 3-86537-107-8

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2004

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

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, 2004

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-107-8

Monolithische GaAs FET- und HBT-Oszillatoren mit
verbesserter Transistormodellierung

von
Dipl.-Ing. Friedrich Lenk
geboren am
16. September 1966 in Lübbecke

Von der Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik –
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. H. Klar

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. G. Böck

Gutachter: Dr.-Ing. habil. W. Heinrich

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 19. Dezember 2003

Berlin 2004

D83

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) in Berlin.

Mein Dank gilt an erster Stelle Herrn Dr. Ing. W. Heinrich, der mir als Abteilungsleiter die Erstellung dieser Dissertation ermöglicht hat. Seine Anregungen und Hinweise waren mir eine große Hilfe. Außerdem bedanke ich mich bei ihm und bei Herrn Prof. G. Böck für die Übernahme der Gutachten.

Für die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen möchte ich mich bei den Kollegen M. Schott, M. Rudolph, R. Doerner, P. Heymann und F. Schnieder aus der Abteilung Mikrowellentechnik bedanken. Auch S. Schulz möchte ich danken für die vielen Messungen, die eine wesentliche Grundlage für das Gelingen der Arbeit waren. Für die Zeit der gemeinsamen Prüfungsvorbereitung bedanke ich mich bei T. Tischler.

Danken möchte ich auch allen Kollegen aus den Abteilungen Prozesstechnologie und Materialtechnologie, weil ohne die ausgereifte Technologie des FBH keine phasenrauscharmen Oszillatoren möglich gewesen wären. Insbesondere gilt hier mein Dank J. Hilsenbeck, von dem ich im Laufe der Zeit viel über Halbleitertechnologie gelernt habe.

Bei meinem Bruder Volker möchte ich mich für das Korrekturlesen bedanken. Besonderer Dank gilt meiner Frau und meinen Kindern, die für die zusätzlichen Belastungen viel Verständnis aufgebracht haben. Ich hoffe, ich kann davon etwas zurück geben.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Analyse und Optimierung von monolithisch integrierten Oszillatoren (MMIC-VCO) auf Gallium-Arsenid (GaAs). Der erste Teil beschäftigt sich mit der Kleinsignalmodellierung von GaAs-Feldeffekttransistoren (FETs) und Heterobipolartransistoren (HBTs). Es wird ein neuer Algorithmus für HBTs vorgestellt, der eine zuverlässige Extraktion der Elemente des Kleinsignalersatzschaltbildes ermöglicht und auch für HBTs aus anderen Materialsystemen (SiGe, InP) erfolgreich eingesetzt wurde. Ferner wird das niederfrequente Rauschen von GaAs HBTs untersucht und ein Extraktionsverfahren für die relevanten Rauschquellen entwickelt.

Diese Ergebnisse werden dann auf den in der Mikrowellentechnik weit verbreiteten Reflexionsoszillator angewandt. Es wird der Zusammenhang zwischen Schleifenverstärkung, belasteter Güte und Phasenrauschen abgeleitet und analysiert. Dies führt zu einer neuen Designstrategie, mit der sich die belastete Güte maximieren lässt. Auf dieser Basis wurden MMIC-VCOs bei 38 GHz und 77 GHz realisiert, die Bestwerte in Bezug auf das Phasenrauschen erreichen.

Abstract

This thesis treats analysis and optimization of monolithic integrated oscillators (MMIC-VCO) on GaAs. The first part describes small-signal modelling of GaAs field-effect-transistors (FETs) and hetero-bipolar-transistors (HBTs). For HBTs, a new algorithm is presented, which allows reliable extraction of the small-signal equivalent-circuit elements. It was successfully employed with SiGe and InP HBTs as well. Furthermore, the low-frequency noise of GaAs HBTs is investigated and an extraction routine for the relevant noise sources is developed.

In a second step, these results are applied to the reflection-type oscillator, a well-known concept in microwave circuits. The relation between loop-gain, loaded Q and phase noise is derived. This leads to a new design strategy, which allows maximizing the loaded Q . As an example, MMIC-VCOs at 38 GHz and 77 GHz are realized, which achieve best-in-class phase-noise values.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Kurzfassung	III
Abstract	III
Kapitel 1. Einleitung	1
Kapitel 2. Transistormodellierung	6
2.1. Kleinsignalmodellierung	6
2.2. Ex- und intrinsische Elemente	7
2.3. Deembedding parasitärer Elemente	10
2.4. Großsignalmodellierung	12
Kapitel 3. FET-Extraktion und Modellierung	16
3.1. Bestimmung der äußeren Elemente	16
3.1.1. Bestimmung der Kapazitäten	16
3.1.2. Bestimmung der Induktivitäten und Widerstände	18
3.2. Bestimmung der inneren Elemente	22
Kapitel 4. HBT-Extraktion und Modellierung	25
4.1. Bestimmung der äußeren Elemente	27
4.1.1. Bestimmung der Kapazitäten	27
4.1.2. Bestimmung der Induktivitäten und Widerstände	29
4.2. Bestimmung der inneren Elemente	32
4.2.1. Analytische Lösung mit Kettenparametern	33
4.2.2. Analytische Lösung mit Admittanzparametern	34
4.2.3. Praktikable Lösung	35
4.2.4. Verifikation	37
4.2.5. Messfehler in der analytischen Lösung	39
4.3. 1/f Rauschmodellierung	44
4.3.1. Ersatzschaltbild und Berechnung	45
4.3.2. Vereinfachung	49
4.3.3. Relevante Quellen	50
4.3.4. Ergebnisse	53
4.3.5. Skalierung	55
4.4. Großsignalmodell	57
Kapitel 5. MMIC-Oszillatoren	59
5.1. Oszillatoranalyse	63
5.1.1. Schematischer Aufbau	63
5.1.2. Resonatoren	68

5.1.3.	Kurokawa-Kriterium	75
5.1.4.	Gleich- und Gegentaktoszillatoren	77
5.1.5.	Großsignalanalyse	81
5.2.	Anwendungen	85
5.2.1.	Belastete Güte von Reflexionsoszillatoren	85
Kapitel 6.	Schaltungen	94
6.1.	23 GHz VCO in MESFET-Technologie	94
6.2.	Ka-Band-Oszillatoren in HBT-Technologie	96
6.2.1.	Schaltungsaufbau	97
6.2.2.	Nachsimulation des aktiven Teils	99
6.2.3.	Messung der Resonatoren	100
6.2.4.	Simulation der Schleifenverstärkung	102
6.2.5.	Vergleich mit den Messwerten	105
6.2.6.	Ka-Band VCO	106
6.3.	76 GHz „push-push“-VCO in HBT-Technologie	107
6.3.1.	Schaltung und Simulation	108
6.3.2.	Ergebnisse	111
6.4.	Zusammenfassung	113
Kapitel 7.	Zusammenfassung und Ausblick	114
Anhang A.	Gleichungen und Rechenwege	117
A.1.	Reduzierte physikalische Gleichungen	117
A.1.1.	Dioden-Stromgleichung	117
A.1.2.	Dioden-Kapazitätsgleichung	117
A.2.	Funktionalapproximationen	118
A.2.1.	Bestimmung der extrinsischen Widerstände beim FET	118
A.2.2.	Extrinsische Kapazitäten beim HBT	119
A.2.3.	Bestimmung von α_0 und ω_α beim HBT	120
A.3.	Sonstiges	121
A.3.1.	Analytische Gleichung für R_{b2}	121
A.3.2.	Berechnung der Phasensteilheit	121
A.3.3.	Anwendung der Gleich- und Gegentakttheorie	122
A.3.4.	Datenglättung	123
Literaturverzeichnis		126

KAPITEL 1

Einleitung

Als Mikrowellen werden elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich zwischen 300 MHz und 300 GHz bezeichnet¹, 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 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

¹Oft 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 Keramiks substrate 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