

## KAPITEL 1

# Einleitung

Seit mit der Überbrückung des Atlantiks durch den Italiener Marchese Guglielmo Marconi im Jahre 1901 die Bedeutung der elektromagnetischen Wellen erkannt wurde, gilt der Erzeugung von hochfrequenten Schwingungen das Interesse von Wissenschaftlern und Ingenieuren in aller Welt. Seit der Entwicklung der Elektronenröhre ist eine Vielzahl von Oszillatorvarianten bekannt und etabliert, welche zu einem großen Teil auch bei Transistoroszillatoren ihre Entsprechung finden.

Mit dem ständig steigenden Kostendruck bei Hochfrequenzsystemen im Automobil- und Kommunikationsbereich nimmt der Bedarf an reproduzierbaren, zuverlässigen und vor allem kostengünstig zu produzierenden integrierten Schaltungen stetig zu. Wurden zunächst neue Anwendungen in hybrider Aufbautechnik dadurch geschaffen, daß Transistoren mit immer höheren Grenzfrequenzen realisiert werden konnten, wird man heute dagegen zunehmend mit dem Problem konfrontiert, daß immer höhere Arbeitsfrequenzen vom Bauelement zwar noch verarbeitbar sind, die Signalübertragung vom Chip zur Umgebung dagegen immer aufwändiger und damit auch teurer wird. Daraus resultiert die Forderung, neben dem aktiven Bauelement auch passive Komponenten wie Widerstände, Spulen und Kondensatoren auf dem Chip zu realisieren und die Funktion gänzlich mit integrierten Mikrowellschaltungen (MMIC - monolithic microwave integrated circuits) zu verwirklichen.

Während für Prozessorapplikationen die Technologie des aktiven Bauelements noch im Vordergrund steht mit Kriterien wie Integrationsdichte, Kosten und Taktrate, sind für Anwendungen, bei denen besondere Phasenrauscharmut gefordert ist, hochgütige passive Elemente entscheidend. Die GaAs-Technologie ermöglicht heutzutage die Realisierung von Heterostruktur bipolartransistoren (HBT) mit hoher Grenzfrequenz der Strom- und Leistungsverstärkung, verbunden mit niedrigem  $1/f$ -Rauschen. Verglichen mit der Siliziumtechnologie sind um bis zu eine Größenordnung höhere Gütewerte passiver Elemente, insbesondere der Induktivitäten und Leitungen, aufgrund der viel geringeren Substratverluste erreichbar.

Die vollständige Integration aller für die Funktion der Schaltung relevanten Bauelemente führt zwar einerseits zu einer erheblichen Kostenersparnis, verschärft andererseits aber auch die Anforderungen an die verwendeten Modelle, da eine Manipulation der prozessierten Schaltungen im Nachhinein nur

begrenzt möglich ist. Eine dieser wenigen Möglichkeiten ist der Einsatz von verstimmbaren Kapazitäten (Varaktoren) anstelle von Festkapazitäten zur Justage der Schwingfrequenz: Eine bestimmte Anzahl kaskadierter Varaktoren bietet z.B. die Möglichkeit der groben Verstimmung der Oszillatorfrequenz, um Bauteilsschwankungen auszugleichen bzw. ein Frequenzband zu wählen, während ein (schwach angekoppelter) Varaktor für die kontinuierliche Verstimmung innerhalb dieses Frequenzbereiches sorgt. Allerdings führt der Einsatz von Varaktoren stets zwangsläufig zu einer starken Verschlechterung des Phasenrauschens, so daß der Einsatz von Varaktoren immer sehr sparsam erfolgen sollte.

Die Realisierung phasenrauscharmer Oszillatoren als *MMIC* und damit die Untersuchung von Methoden zur Reduktion des Phasenrauschens erscheint deshalb wegen der stark eingeschränkten Manipulierbarkeit der einzelnen prozessierten Schaltung auf den ersten Blick als sehr schwierig, gleichzeitig liegt jedoch in der monolithischen Integration eine große Chance: Die hohe Homogenität des Prozesses ermöglicht einerseits die Herstellung einer großen Anzahl von identischen Schaltungen, darüber hinaus aber auch die Möglichkeit, innerhalb einer Schaltung von einem Testfeld zum nächsten den Einfluß eines Parameters (z.B. eines Induktivitäts- oder Kapazitätswertes) auf das Phasenrauschen durch Änderung nur dieses Parameters auf demselben Wafer gezielt zu untersuchen, während alle anderen als konstant angesehen werden können.

Man hat also die Möglichkeit, eine große Zahl von (fast) identischen Schaltungen miteinander zu vergleichen, die sich in einem bestimmten Punkt voneinander unterscheiden. Dadurch eröffnet sich trotz des vollständig monolithischen Entwurfs ein breites Experimentierfeld. Die Grundlage dafür bildet die Möglichkeit der Variation der oberen Metallisierungsebene über dem gesamten Wafer. Dadurch können z.B. Kondensatorinseln oder auch Spulenabgriffe kontaktiert, aber auch Leitungslängen verändert werden - wenn auch nicht kontinuierlich.

Folgende Überlegungen zeigen, wie die aus der Vergangenheit bekannten Maßnahmen zur Phasenrauschreduktion zu teilweise sich widersprechenden Forderungen führen:

- Die Wahl eines Transistors mit hoher Verstärkung bei der gewünschten Schwingfrequenz, gleichbedeutend mit hohem  $f_{max}$ , führt zur Forderung nach einem hohen Kollektorstrom.
- Eine geringe Belastung des frequenzbestimmenden Resonators (durch lose Ankopplung): Die lose Ankopplung des Resonators führt jedoch zu hohen Verlusten, die durch eine entsprechend hohe Verstärkung des Transistors (bei einem hohen Kollektorstrom) kompensiert werden müssen. Geringere Verluste sind nur möglich durch festere Ankopplung, wodurch der Transistor an Einfluß auf die Schwingfrequenz gewinnt und

dadurch das Phasenrauschen ansteigt. Darüber hinaus können geringere Verluste durch eine Steigerung der (unbelasteten) Güte des Resonators bzw. der passiven Elemente erzielt werden - dies führt jedoch automatisch zu sehr großen Strukturen und ist somit bei monolithisch integrierten Oszillatoren nur begrenzt möglich.

- Die Wahl eines Transistors mit geringem Niederfrequenzrauschen: Die Forderung nach geringem  $1/f$ -Rauschen führt zu einem Betrieb bei geringer Kollektorstromdichte und somit zur Wahl eines Transistors mit großer Emitterfläche. Deren Grenzfrequenz  $f_{max}$  ist jedoch geringer als die von Transistoren mit kleiner Emitterfläche.
- Der Betrieb des Transistors bei der minimalen Rauschzahl  $F$  führt wiederum zu einem anderen optimalen Arbeitspunkt und zur Forderung nach für das Rauschen optimalen Reflexionsfaktoren am Transistorein- bzw. ausgang. Diese Reflexionsfaktoren stimmen jedoch nicht mit denen überein, die für Oszillation bei der gewünschten Schwingfrequenz nötig sind.

Aus den veränderten Randbedingungen ergibt sich ungeachtet der Tatsache, daß die Suche nach Möglichkeiten, das Phasenrauschen zu verringern, schon solange andauert wie es Oszillatoren gibt, ein großes Interesse an diesem Thema. Ziel der Arbeit ist es deshalb, die Wirksamkeit der verschiedenen Methoden zur Phasenrauschreduktion für den Fall der vollständig monolithisch integrierten Mikrowellenoszillatoren zu untersuchen sowie qualitativ und quantitativ zu erklären.

Im Folgenden sollen die Randbedingungen zunächst anhand eines Anwendungsbeispiels verdeutlicht werden, anschließend werden die Ziele der Arbeit präzisiert und deren Gliederung vorgestellt.

### 1.1. Beispiel für Anwendungen: ACC

Eine Anwendung, die nach besonders phasenrauscharmen Oszillatoren verlangt, ist das sogenannte Abstandswarnradar, auch als ACC (**A**daptive **C**ruise **C**ontrol) bekannt, siehe Abb.1.1. Für diese Applikation wurde von der FCC der Frequenzbereich von 76 bis 77GHz zugewiesen. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus Bremsassistent, Tempomat und Auffahrerschutz. Durch einen von der Vorderseite des Fahrzeugs ausgesendeten Radarimpuls wird die Entfernung zu einem vorausfahrenden Fahrzeug ermittelt und unter Berücksichtigung der Eigengeschwindigkeit entschieden, ob Maßnahmen zur Beschleunigung oder zum Abbremsen eingeleitet werden. Im Ergebnis soll ein gesteigerter Fahrkomfort erreicht werden, da Situationen mit ständig wiederkehrenden Beschleunigungs- und Bremsmanövern automatisiert ablaufen können. Der Fahrer behält dabei in jedem Fall die volle Kontrolle, kann und soll aber gegebenenfalls durch eigenständiges Bremsen oder Beschleunigen korrigierend eingreifen. Für die Realisierung solcher Systeme sind grundsätzlich zwei verschiedene Ver-

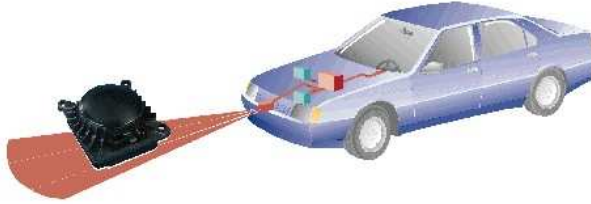


Abb. 1.1: ACC-Radar: Per Radar wird der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ermittelt und die Geschwindigkeit entsprechend angepaßt

fahren möglich und auch bereits kommerziell verfügbar:

- Pulse - Doppler Radar, PDR (z.B. M/A-COM, [1],[2])
- FMCW-Radar (z.B. Bosch, [3])

Das PDR emittiert einen sehr kurzen Impuls und errechnet den Abstand aus dem zeitlich verzögerten Empfangssignal. Die Relativgeschwindigkeit bei der Fahrzeuge wird aus der Dopplerverschiebung ermittelt. Dieses System weist insbesondere bei größeren Abständen und Geschwindigkeiten Vorteile gegenüber dem FMCW-Radar auf.

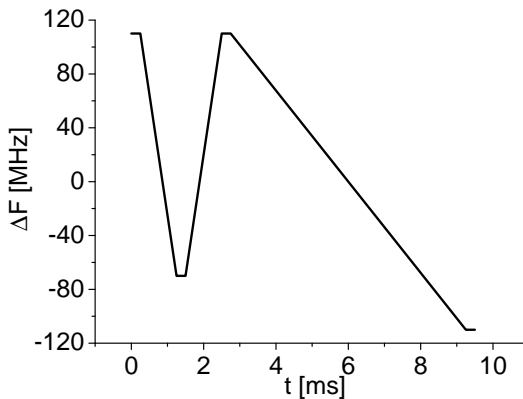


Abb. 1.2: Relative Verstimmung des Oszillators beim FMCW-Radar über der Zeit (aus [3])

Beim FMCW-Radar dagegen wird der VCO innerhalb weniger *ms* linear um einige hundert Megahertz verstimmt, Abb. 1.2. Für zuverlässige Ergebnisse werden dazu mehrere Rampen unterschiedlicher Steigung durchfahren. Nach

Mischung des reflektierten, empfangenen Signales mit der aktuellen Sendefrequenz liegen die Informationen über den Abstand und die Relativgeschwindigkeit zwischen benachbarten Fahrzeugen in der Zwischenfrequenz.

Zur Zeit ist die Zahl der am Markt vorhandenen FMCW-Systeme größer als die der PDR-Systeme, was auf die einfachere Architektur zurückzuführen ist.

Beide Systeme können wiederum nach der Art der Frequenzaufbereitung unterschieden werden:

- Direkte Erzeugung des 76GHz Sendesignales (VCO bei 76GHz)
- Das Sendesignal wird durch Vervielfachung des VCO-Signales erzielt; Üblich ist dabei ein Multiplikator von 2 oder 3, entsprechend 38GHz bzw. 19GHz Schwingfrequenz des VCO.

Vergleicht man beide Konzepte unter der Maxime einer monolithischen Lösung, so findet man für jede Möglichkeit Vor- und Nachteile.

**Direkte Frequenzsynthese:** Die Vorteile der direkten Frequenzerzeugung liegen in erster Linie bei den einzusparenden Vervielfacherstufen. Auch die Pufferverstärker zwischen diesen werden nicht benötigt. Der Kostenvorteil wird jedoch durch erhöhten Aufwand bei der PLL, genauer bei deren hochfrequentem Frequenzteiler, kompensiert. Einen möglichen Ausweg bieten hier Push-Push Oszillatoren, bei denen ein Abgriff der Fundamentalfrequenz, also 38GHz, nach außen geführt wird. Obwohl der Bedarf an Chipfläche von Grundwellenoszillatoren mit steigender Frequenz kleiner werden sollte, hat sich gezeigt, daß dieser davon nahezu unabhängig ist; hier ist also kaum Einsparpotential vorhanden. Vielmehr ist die erforderliche Fläche abhängig von der gewählten Technologie (Koplanar- oder Microstripleitungen).

Phasenrauschbestwerte von voll monolithischen Grundwellen-Oszillatoren im W-Band liegen heute bei -94dBc [4] .. -106dBc/Hz@1MHz [5]. Nicht zuletzt erfordert die direkte Erzeugung eines 76GHz-Signales eine Technologie mit sehr hohen  $f_{max}$ -Werten.

**Multiplikatormethode:** Die Nachteile der direkten Frequenzerzeugung sind zugleich die Vorteile des Multiplikator-konzeptes: Da bereits ein tieferfrequentes Referenzsignal für die PLL vorliegt, vereinfacht sich der Aufwand für den Frequenzteiler erheblich, wodurch Kosten eingespart werden. Erzielbare Phasenrauschwerte für 19GHz-Oszillatoren liegen bei -120dBc@1MHz [6]; Unterstellt man die bestenfalls erreichbare Degradation von 6dB je Verdopplerstufe, so ergeben sich theoretische Bestwerte von -108dBc@1MHz bei 76GHz. Verglichen mit der direkten Frequenzsynthese ergeben sich also leichte Vorteile bei diesem Konzept.

Abb. 1.3 zeigt exemplarisch das Blockschaltbild eines PDR von M/A-COM, welches nach der beschriebenen Multiplikatormethode arbeitet. Das generierte 76GHz Signal gelangt mittels Pin-Dioden-Schaltern auf eine von drei Antennen, wodurch eine azimutale Richtungsbestimmung ermöglicht wird. Aus

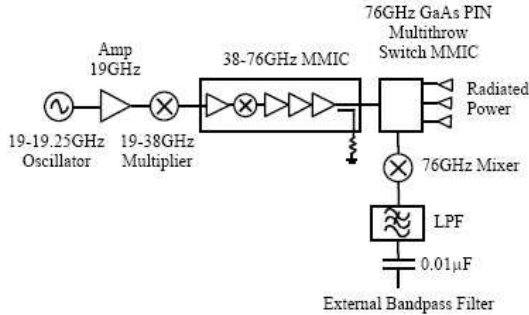


Abb. 1.3: Blockschaltbild eines PDR der Firma M/A-COM aus [1]

Parameter	Messergebnisse
Frequenz	19GHz
Ziehspannungsbereich	120MHz bei 0..8V
Phasenrauschen	-92dBc/Hz@100kHz
Ausgangsleistung	+14dBm±0.75dB (-40°C to +85°C)
Temperaturbereich	-40°C bis +85°C
Frequenzdrift	12MHz
Abstimmgeschwindigkeit	<5nS (10%DC zu 90%RF)

Tab. 1.1: Messergebnisse des hybriden 19GHz-VCOs plus Buffer der Firma M/A-Com aus [1]

Tabelle 1.1 können gemessene Parameter für dieses Radar entnommen werden. Eine besondere Herausforderung stellt dabei der extrem breite Temperaturbereich dar, innerhalb dessen diese eingehalten werden müssen. Der Oszillator wurde mit diskreten AlGaAs-PHEMTs und dielektrischem Resonator auf einem Glassubstrat realisiert. Der dielektrische Resonator bewirkt den relativ geringen Ziehbereich, dieser ist aber bei PDR von untergeordneter Bedeutung. Das Phasenrauschen liegt mit -92dBc@100kHz in einem Bereich, der auch mit monolithischen VCO erreichbar ist, vgl. Kap. 7.2. In [2] wird das erforderliche Phasenrauschen sogar mit nur <-80dBc@100kHz und 19GHz angegeben.

## 1.2. Gliederung der Arbeit

Zunächst wird in Kap. 2 die Definition des Phasenrauschens sowie die einschlägig bekannte Kleinsignaltheorie nach Leeson [7] behandelt. Daran schließt

sich in Kap. 3 eine Vorstellung der Entwurfsverfahren von Oszillatoren sowie der wichtigsten Grundbauelemente des monolithischen Schaltungsentwurfs im Millimeterwellenbereich auf GaAs - HBTs und Leitungselemente - an.

Es folgt eine Übersicht über Phasenrauschmeßmethoden sowie eine Untersuchung des Einflusses des Meßaufbaus auf den Oszillator und damit die Qualität der erzielten Meßwerte in Kap. 4. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der meßtechnischen Untersuchung der Wirksamkeit verschiedener Methoden zur Verringerung des Oszillatorphasenrauschens anhand von realisierten MMICs auf GaAs. Diese Methoden beziehen sich auf den Einfluß der Oszillatortorgüte, des Niederfrequenzrauschens, des Arbeitspunktes sowie des Varaktors. Sie werden in Kap. 5 vorgestellt.

Kap. 6 ist dem differentiellen Oszillator gewidmet, da sich dieses Schaltungskonzept als besonders vorteilhaft für die Erzielung niedrigen Phasenrauschens erwiesen hat und darüber hinaus weitere nützlichen Eigenschaften aufweist. In Kap. 7 werden einige der im Rahmen der Arbeit entstandenen Oszillatoren präsentiert, die sich durch ein besonders geringes Phasenrauschen auszeichnen. Hier findet sich auch eine Beschreibung des entworfenen statischen Frequenzteilers.

Abschließend werden in Kap. 8 die erreichten Ergebnisse mit dem aktuellen Stand der Technik verglichen und zusammengefaßt sowie ein Ausblick gegeben.