



BMBF-Projekt
KOKON
FKZ 01M3161B

Robert Bosch GmbH
Postfach 16 61
71226 Leonberg
Besucher:
Daimlerstraße 6
71229 Leonberg
Tel 0711 811-0
www.bosch.com

Abschlussbericht

Robert Bosch GmbH

27.02.2008

Autor(en):		
Name	Firma	Email-Adresse
Dr. Dirk Freundt	Bosch	Dirk.Freundt@de.bosch.com
Dr. Thomas Walter	Bosch	External.thomas.walter@de.bosch.com



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung Gesamtprojekt	3
I. Zusammenfassung (Robert Bosch GmbH)	11
II. Abschlussbericht	12
Spezifikation von Schlüsselkomponenten SiGe für LRR-Sensoren	13
Charakterisierung und Evaluierung der SiGe-Komponenten	19
Entwicklung und Evaluierung einer Aufbau- und Verbindungstechnik für SiGe-Komponenten	29
Demonstratoren mit SiGe-Komponenten	39
Entwicklung von LRR-Sensoren mit SiGe-Komponenten	43
Veröffentlichung der Ergebnisse	46



Zusammenfassung Gesamtprojekt

27. Februar 2008

Seite 3 von 46

Steigerung von Komfort und Sicherheit sind Hauptziele deutscher Automobilhersteller und ihrer Zuliefererindustrie und ein wesentliches Differenzierungsmerkmal im internationalen Wettbewerb. Fahrerassistenzsystemen und aktiven Sicherheitssystemen, die helfen, gefährliche Situationen frühzeitig zu erkennen und dadurch Unfälle zu vermeiden oder zumindest die Unfallschwere zu verringern, kommt künftig eine große Bedeutung zu.

Verkehrsunfälle sind keine unvermeidbare Nebenerscheinung des Straßenverkehrs und der Mobilität, sondern in den meisten Fällen Folge vermeidbaren menschlichen Fehlverhaltens. Bewertet man nur die materiellen Unfallfolgen, dann ergibt sich allein in Deutschland ein Schaden von jährlich rund 35 Mrd. Euro. Hinzu kommt nach einer Studie des ADAC durch Staus auf deutschen Autobahnen weiterer volkswirtschaftlicher Schaden in Höhe von täglich etwa einer Viertel Milliarde Euro und jeder dritte Stau ist wiederum Unfall bedingt. Diese Fakten und Aussagen belegen die hohe Bedeutung von Arbeiten zur Verbesserung passiver Sicherheitssysteme und die Notwendigkeit von Forschungsarbeiten für aktive Sicherheits- und Assistenzsysteme im Kraftfahrzeug.

Derartige Systeme erfordern Sensoren, die in der Lage sind das Umfeld des Fahrzeuges zu erfassen. Dies ermöglicht eine „elektronische Hülle“ (KOKON) um das Fahrzeug, die tote Winkel überwacht, Hindernisse erkennt, Schutz- und Sicherheitssysteme auslöst, Fußgänger detektiert, schwächere Verkehrsteilnehmer schützt, im dichten Verkehr (Stop und Go) automatisches Fahren oder Kolonnenfahrt („elektronische Deichsel“) ermöglicht und unterstützend beim Einparken hilft.

Mit Radarsensoren kann eine solche elektronische Schutzhülle geschaffen werden. Erste Fahrerassistenzsysteme zur automatischen Abstandregelung und Hinderniswarnung auf Radarbasis („Intelligenter Tempomat“) sind bereits auf dem Markt.

Nur bei einer erheblichen Durchdringung der Fahrzeugflotte mit derartigen Systemen können die Unfallzahlen drastisch zu reduziert und damit erheblicher volkswirtschaftlichen Schaden abgewendet werden. Ein wesentlicher nachgewiesener Effekt solcher Systeme ist ein verbesserter Verkehrsfluss und die Verringerung der Gefahr von Staus. Der sich daraus ableitende volkswirtschaftliche und ökologische Effekt wäre immens und bedeutet einen nachhaltigen Mobilitätserhalt für die Nutzer von Kraftfahrzeugen .

Ergänzend zu den bereits verfügbaren Tempomatradaren stehen breitbandige Ultra-Wideband (UWB)-Nahbereichsradarsensoren für Sicherheitssysteme vor der Markteinführung. Sie arbeiten bei 24 GHz. Aufgrund des hohen Preises werden diese Systeme zunächst nur in Premiumfahrzeugen angeboten. Für das Einführungsszenario wird eine ähnliche Entwicklung wie bei Airbag, ABS und ESP erwartet. Jedoch kommt erschwerend hinzu, dass für diese sicherheitsrelevanten Nahbereichsradarsensorsysteme aus frequenzregula-



torischen Gründen ab 2014 der Frequenzbereich 77-81 GHz festgelegt worden ist.

27. Februar 2008

Seite 4 von 46

Damit diese sicherheitsrelevanten Sensoren auch in Zukunft universell verfügbar und einsetzbar sind, ergeben sich zwei Aufgabenfelder:

1. Forschung und Entwicklung für Systeme mit einer dreifach höheren Frequenz,
2. Bereitstellung einer Technologie, die auch bei der höheren Frequenz eine kostengünstige Realisierung der Systeme zulässt, so dass sie preisgünstig in allen Fahrzeugklassen eingeführt werden können und durch weit verbreitete Einführung die Sicherheit im Straßenverkehr erhöhen, die Unfallzahlen reduzieren und möglichst vielen Fahrern erhöhten Komfort anbieten.

Eine Halbleitertechnologie, die die Voraussetzungen dafür erfüllt, ist die Si/SiGe Technologie. Diese auf dem Halbleiter-Mainstream „Silizium“ basierende Technologie bietet die physikalischen (Grenzfrequenzen über 200 GHz) und technologischen Voraussetzungen für eine kostengünstige Versorgung mit den notwendigen Hochfrequenz-Komponenten und Chips. Allerdings stößt die Si/SiGe-Technologie damit in einen neuen, bisher als Massenmarkt noch nicht vorhandenen Hochfrequenzbereich vor und bedarf einer grundlegenden Erforschung und Entwicklung.

Parallel müssen für die Sensoren der „elektronischen Hülle“ die Spezifikationen erforscht, definiert und festgelegt werden und hieraus die erforderlichen Parameter für die Hochfrequenzkomponenten und Chips abgeleitet werden.

Die Integration der HF-Komponenten und -Chips zu den Nah- und Fernbereichsradarsensoren erfordert die Anwendung nanoelektronischer Technologien und die Entwicklung entsprechender Aufbau- und Verbindungstechniken. Im Vorhaben Kfz-Höchstfrequenzelektronik (KOKON, Laufzeit 01.09.2004 - 31.08.2007) arbeiteten die wichtigsten deutschen Halbleiterproduzenten (Infineon, Atmel), die bedeutendsten deutschen Fahrerassistenz-Entwicklungsfirmen (Bosch, Conti-Temic) und ein großer deutscher Automobilhersteller (DaimlerChrysler) zusammen, unterstützt durch kompetente Universitäten und Institute. Durch die gleichzeitige Betrachtung der Anwendung Fernbereichsradar bei 76,5 GHz und Nahbereichsradar bei 79 GHz („X-Modell“, s. Bild 1) wurde das für das volle Ausschöpfen des Kostenreduktionspotenzials erforderliche Marktvolumen adressiert. Projektziel war die Demonstration je eines Systems für den Nah- und Fernbereich in einem realen Fahrzeugumfeld.

Das Vorhaben sollte die Marktführerschaft der deutschen Automobil-Zulieferer und -Hersteller für die Zukunft sichern, Arbeitsplätze in Deutschland langfristig sichern oder schaffen, einen nachhaltigen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit und des Komfort im Straßenverkehr leisten und zur Reduzierung bzw. Vermeidung von Unfällen beitragen.

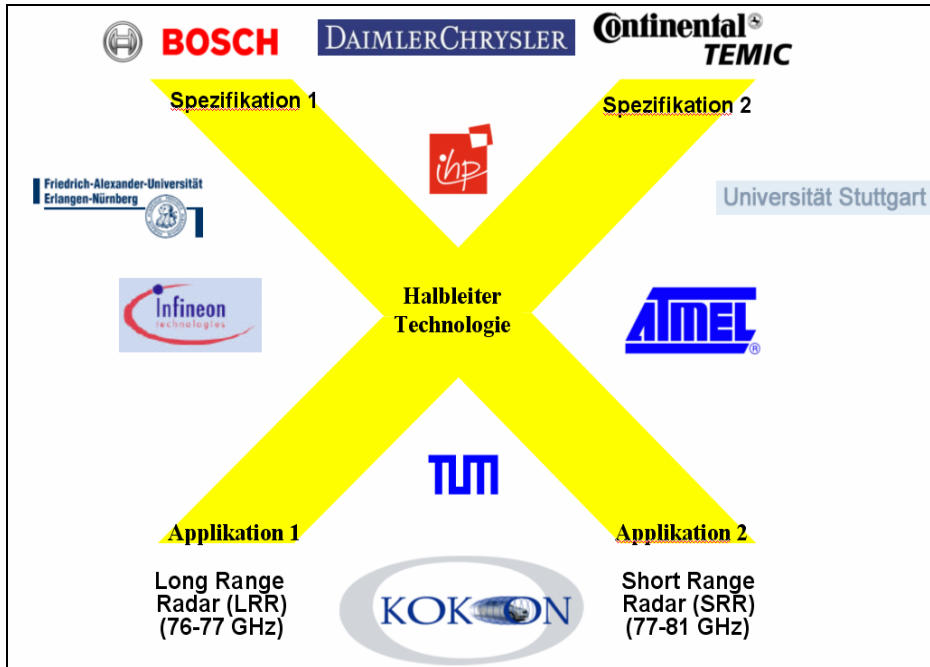


Bild 1: KOKON-Projektorganisation im „X-Modell“.

Die **DaimlerChrysler AG** hatte die Rolle des Konsortialführers im KOKON-Projekt inne. Im Rahmen der von DaimlerChrysler zu leistenden Projektbeiträge (Systemspezifikation und Bewertung) wurden sowohl Weitbereichssensoren im Frequenzband 76-77 GHz als auch Nahbereichssensoren im zukünftigen Frequenzband 77-81 GHz adressiert. Dies umfasste messtechnische Untersuchungen zur genauen Spezifikation der Erfassungseigenschaften derartiger Kfz-Radare, die Ableitung von Kriterien für den Systementwurf in Abhängigkeit von der jeweiligen Applikation, die Bewertung und den Vergleich verschiedener Konzepte mit Spezifikation für kritische Einzelkomponenten sowie abschließende Testfahrzeug-Erprobung und Bewertung der im Rahmen des Gesamtprojekts entstandenen Sensor-Prototypen. Insbesondere wurden die Betriebs- und Fahrzeugintegrationsaspekte von Nahbereichssensoren intensiv untersucht, da die einschlägige Wissensbasis bei den hohen Frequenzen sehr gering ist. Ein zentrales Problem war in diesem Kontext die Betrachtung des Einflusses von (lackierten) Stossfängern auf den Betrieb der hierunter verdeckt verbauten Nahbereichsradare. Als Ergebnis konnte den Sensor-, Stossfänger- und Lackherstellern wichtige Hinweise zur Wechselwirkung „Stossfänger-Sensor“ sowie zur Optimierung der Basis- und Lackmaterialien an die Hand gegeben werden. Eine weitere wesentliche Aufgabe war die Einflussnahme auf Frequenzregulierung und Standardisierung sowohl der Nahbereichs- als auch der Weitbereichsradare. Für die Weiter- und



Neuentwicklung der Sensoren wurden Schaltungskonzepte, Hochfrequenzkomponenten und Aufbautechniken identifiziert, die insbesondere bei großen Stückzahlen attraktive Endpreise versprechen.

Die Arbeiten wurden wirkungsvoll durch Simulationsarbeiten des Unterauftragnehmers Universität Erlangen-Nürnberg (Prof. Weigel) unterstützt.

27. Februar 2008

Seite 6 von 46

Atmel Germany hat im KOKON-Projekt eine Technologie und Schaltungsblöcke für ein 77GHz „short range radar“ (SRR) entwickelt. Die Arbeiten wurden als Weiterentwicklung der vorhandenen SiGe2-Prozesslinie für eine 0,35 μm Technologie-Generation aufgesetzt. Einer der wichtigsten Punkte war somit die Umsetzung und Verkleinerung der Strukturen und Erstellung der damit einhergehenden Modelle für die Schaltungsentwicklung. Weiterhin mussten technologische Optimierungsarbeiten zur Erhöhung der Transistorgeschwindigkeit durchgeführt werden. In einigen Teilbereichen wurde hierbei die Expertise der Unterauftragnehmer IHP, sowie der Universität Stuttgart, Prof. Kasper, genutzt. Die Schaltungsentwicklung und das Layout wurden unterstützt im Rahmen eines Unterauftrags an die Universität Ulm, Prof. Schumacher, der auf seine langjährigen Erfahrungen und Expertise im Bereich SiGe-Schaltungsentwicklung aufbauen konnte.

Bei der Technologieentwicklung war der Schwerpunkt die Steigerung der Transistorgeschwindigkeit mit einem Zielwert von 150GHz für die Transitfrequenz f_T und die maximale Schwingfrequenz f_{max} . Hierzu wurde der Kollektoraufbau der Transistoren untersucht, alternative Konzepte mit vergrabenen Siliziden überprüft und eine Optimierung der Basis vorgenommen. Als Ergebnis wurde die Dicke der Kollektorepitaxie neu eingestellt, eine zusätzliche „elevated buried layer“ Implantation eingeführt, das SiGe-Basis-Profil optimiert und eine selektiv abgeschiedene Leitbasis eingeführt. Diese Prozessschritte wurden dann auf die 0,35 μm Technologie angepasst. Durch die verzögerte Investition in die nötigen Anlagen konnte der ursprüngliche Zeitplan nicht mehr eingehalten werden. Dadurch konnten innerhalb der Projektlaufzeit nicht alle Verbesserungen einfließen und die maximal erreichte Geschwindigkeit liegt bei 130 GHz für die Transit- und ebenfalls für die maximale Schwingfrequenz. Die Modellbildung für die neuen Transistoren erfolgte parallel zur Technologieentwicklung mit Unterstützung der TU Dresden, Prof. Schröter. Hierfür wurden in Zusammenarbeit mit der TU Dresden ein Parametersatz für das Entwicklungstool „TRADICA“ erstellt, mit dem die für die Schaltungsentwicklung notwendigen Modelle generiert wurden.

Die Schaltungsentwicklung erfolgte in engem Kontakt mit dem Partner Continental. Mit ihm zusammen wurden die Komponenten für ein SRR definiert und die Spezifikationen für folgende Schaltungsblöcke abgestimmt: VCO, Mischer, 32x-Teiler und für einen optionalen LNA. Durch die verzögerte Bereitstellung der Technologie wurde eine erste Generation von Schaltungsblöcken beim IHP Frankfurt/Oder auf deren MPW-Durchläufen erstellt. Es konnten funktionsfähige Schaltungsblöcke nachgewiesen werden, die nahe an den geforderten Spezifikationen lagen. Der dynamische Teiler zeigte einen Arbeitsbe-



reich von bis zu 93 GHz. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde eine zweite Generation der Schaltungsblöcke erarbeitet, die zum Projektende noch bei Atmel im Prozessdurchlauf waren.

27. Februar 2008

Seite 7 von 46

Von **Infineon** wurde eine für automotive Höchsthfrequenzanwendungen geeignete Silizium-Germanium Technologie entwickelt und damit Radarfrontend MMICs für das 76-81 GHz Band entworfen und hergestellt. Die MMIC Anforderungen wurden zusammen mit den Projektpartnern Bosch (für 77 GHz LRR) und CAS (für 79 GHz SRR) spezifiziert. Die abschließenden Evaluierungen im System erfolgten ebenfalls bei diesen Partnern. Alle vereinbarten Arbeiten konnten erfolgreich und termingerecht abgeschlossen werden.

Die entwickelte Bipolar-Technologie bietet unterschiedliche SiGe-NPN-Transistortypen, mit Grenzfrequenzen von 200 GHz (f_t) und 250 GHz (f_{max}) bei einer Spannungsfestigkeit von $BV_{CE0} = 1.8$ V für den Ultra-High-Speed-Transistor bzw. 35 / 120 GHz bei $BV_{CE0} = 3.5$ V für den Hochvolttransistor. Das Bauelemente-Spektrum wird durch einen vertikalen PNP, 2 Poly-Si-Widerstandstypen (150 und 1000 Ohm/sqr), einen Metallfilm-Präzisionswiderstand (20 Ohm/sqr), einen hochgütigen Metall-Metall-Kondensator (MIM), Laserfuses, eine Varaktordiode, und ein Gold-Pad erweitert. Die Implementierung eines sogenannten „Doppel-Epi“ Konzepts ermöglichte dabei die gleichzeitige Integration eines Ultra-High-Speed-Transistors, der eine dünne Kollektor- bzw. Epitaxieschicht erfordert, mit einer Varaktordiode (spannungsgesteuerte Kapazität), die für eine ausreichend große Tuning-range eine möglichst große Epitaxiedicke erfordert. Eine auch bei hohen Stromdichten sehr zuverlässige, 4-lagige Kupfermetallisierung gestattet die Realisierung sehr kompakter, hochintegrierter Mikrowellendesigns.

Durch entwicklungsbegleitende Zuverlässigkeitsuntersuchungen konnte gezeigt werden, dass dieser Prozess die erhöhten Qualitätsanforderungen der Automobilindustrie erfüllen wird. Besonders kritisch sind diesbezüglich HF-Leistungsverstärker, da hier die SiGe-HBTs teilweise über ihrer Kollektor-Emitter-Durchbruchspannung betrieben werden müssen, um die geforderten Mikrowellen-Leistungen an 50 Ohm erzeugen zu können. Durch extensive Zuverlässigkeits-Untersuchungen konnte der Nachweis ausreichender Langzeitstabilität der Transistoreigenschaften in diesem Betriebsmodus erbracht werden.

Im Arbeitspaket Schaltungsentwicklung konnte erstmals demonstriert werden, dass mit rein Silizium basierten MMICs ausreichende Performancedaten für automotive Long- und Short-Range-Radarsensoren im 76-81 GHz Band über den vollen Temperatur-Einsatzbereich realisiert werden können. Zwei Beispiele seien herausgegriffen:

Ein VCO mit integrierten Leistungsverstärkern, Teilern und integrierter Sensorik für Chip-Temperatur liefert bei einer Chipfläche von weniger als 2 mm² und 5.5 V Versorgungsspannung eine HF-Ausgangsleistung von 16 dBm! Das Phasen-Rauschen beträgt nur -95 dBc/Hz (bei 1 MHz Offset).



Eine aktive I/Q-Mischer-Schaltung mit integrierten Low-Noise-Amplifier erreicht eine Gesamt-Verstärkung von > 28 dB bei einer Rauschzahl von < 12 dB über den gesamten Frequenzbereich von 76-81 GHz. Diese und ähnliche Schaltungsblöcke wurden von unseren Projektpartnern erfolgreich in LRR- und SRR-Sensoren erprobt.

27. Februar 2008

Seite 8 von 46

Die Forschungsarbeiten wurden wesentlich durch Design- und Modellierungsarbeiten unserer universitären Unterauftragnehmer (Universität Erlangen-Nürnberg und TU München) sowie durch ergänzende Charakterisierungs- und Zuverlässigkeits-Untersuchungen beim IHP unterstützt.

Die **Robert Bosch GmbH** beteiligte sich im Rahmen des Projektes KOKON an folgenden Arbeitspaketen:

- Spezifikation von Schlüsselkomponenten in SiGe für LRR-Sensoren.
- Charakterisierung und Evaluierung der SiGe-Komponenten.
- Entwicklung und Evaluierung einer Aufbau- und Verbindungstechnik für SiGe-Komponenten.
- Darstellung von Demonstratoren basierend auf den entwickelten Technologien.
- Integration von SiGe-Komponenten in LRR-Sensoren.

Basierend auf den Ergebnissen von KOKON lassen sich folgende Kernaussagen treffen:

- Mit SiGe lassen sich die Spezifikationen von Automobilradaren an elektronische Komponenten mit einer Betriebsfrequenz von 77 GHz erfüllen.
- Gegenüber auf dem Markt befindlichen GaAs-Komponenten weisen SiGe-MMICs signifikante Vorteile bezüglich Performance, Zuverlässigkeit, Prüftechnik und Kosten auf.
- SiGe eröffnet ganz neue Möglichkeiten der Hochintegration. Weiterentwicklungen basierend auf den Ergebnissen aus KOKON sollen zu konfigurierbaren SingleChip-Radaren mit integrierten Diagnosemöglichkeiten führen.
- Der Einsatz von SiGe ermöglicht Integrationstechnologien, welche den Anforderungen einer Automobilfertigung genügen können.
- Auf SiGe basierende Weitbereichsradare bestehen das Benchmarking mit auf dem Markt befindlichen Systemen.
- SiGe-MMICs werden als Schlüsselkomponenten in die kommende Generation des Weitbereichsradars der Robert Bosch GmbH eingesetzt.

Die Robert Bosch GmbH wurde bei der Entwicklung von SiGe-HBTs und bei der Systemsimulation effizient von der Universität Stuttgart (Prof.Kasper) und der Universität Erlangen-Nürnberg (Prof.Weigel) unterstützt.



Die **Continental Temic** arbeitete innerhalb des Gesamtvorhabens an einem Demonstrator eines zukünftigen Nahbereichsradarsensors (NBR) bei 79 GHz. In enger Kooperation mit den Partnern im Konsortium wurden dazu nach der Definition des System- und Demonstratorkonzepts die notwendigen SiGe-Komponenten spezifiziert. Benötigt werden insbesondere leistungsfähige Mischer und VCOs. Die Kernaufgabe lag in der Erarbeitung einer für die SiGe-Technologie geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik, die sowohl den elektrischen Anforderungen im vorliegenden Höchsthfrequenzbereich als auch den sehr anspruchsvollen mechanischen Randbedingungen durch die Umwelt- und Zuverlässigkeits-erfordernisse gerecht wurde. Eine besondere Herausforderung stellen die Bond-Übergänge zwischen Chip und Träger dar, die möglichst verlustfrei aufzubauen sind sowie die auf kleinstem Raum lokalisierte Wärmeproduktion, die über das Board abgeführt werden muss. Mit Hilfe der Arbeitsergebnisse wurde anschließend ein kompletter Radardemonstrator bestehend aus Antenne, SiGe-basiertem Höchsthfrequenz-Frontend, sowie einem Elektronik-Modul zur Steuerung und Datenauswertung aufgebaut. Dabei konnte das Potential der 79 GHz-Sensorik aufgezeigt werden, die Baugröße heutiger 24GHz-Sensorik deutlich zu unterschreiten. Der Demonstrator wurde zunächst im Labor bezüglich seiner Leistungsparameter charakterisiert und anschließend auf Prüfständen in seiner Grundfunktionalität bewertet, um die Anwendbarkeit der SiGe-basierten Radarsensorik im Höchsthfrequenzbereich 76-81 GHz erstmalig für automobiler Anwendungen nachzuweisen. Mithilfe eines bistatischen Aufbaus und zwei Empfangskanälen konnte gezeigt werden, dass das Konzept einer digitalen Strahlformung bei den gegebenen Frequenzen von 76 – 81 GHz für die anvisierten Anwendungen nutzbar ist. Der Demonstrator zeigte eine Reichweite von ca. 30m auf Fahrzeuge und eine Winkelgenauigkeit von etwa 3°.

Die Continental Temic wurde unterstützt vom Institut für Halbleitertechnik IHT der Universität Stuttgart bei der theoretischen Untersuchung der Chip-Board- und Board-Antenne-Schnittstellen, möglichen Anpassungsnetzwerken und Koppelstrukturen, sowie der Konzeption und Simulation der Antennen. Zum Einsatz im Demonstrator kamen seriell gespeiste Patchantennen.

Die Ergebnisse des KOKON-Projektes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Weltrekord für Höchsthfrequenzelektronik mit SiGe-Technologie von Infineon Technologies
- Weltweit erste Demonstration SiGe basierter HF-Frontends für automobiler Radarsensorik im 76-81 GHz-Band und Realisierung von MMICs
- Demonstration der weltweit ersten SiGe basierten automobiler Radarsensoren (77 GHz Weitbereichssensor durch Bosch, 79 GHz-Nahbereichssensor durch Continental Automotive).



- Standardisierung durch gemeinsame Spezifikation von SiGe-Komponenten.

27. Februar 2008

Seite 10 von 46

Insgesamt ist das Projekt als sehr erfolgreich zu bewerten: die gesamte Kette vom Halbleiter- über den Modul- und System- bis zum Autohersteller war involviert, ein großer Schritt in Richtung kostengünstiges SiGe basiertes Radar wurde getan und der Ausbau der Marktführerschaft deutscher Firmen in der Automobilelektronik wurde wirksam unterstützt. Dies wird unterstrichen durch die auf den KOKON-Ergebnissen aufbauende, weltweit erstmalige, Markteinführung eines SiGe basierten ACC-Radarsensors durch Bosch (Vorstellung des ACC-Radarsensors LRR3 bei der SAE2008).

Abschliessend sei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des KOKON-Projekts und die stets wohlwollende Begleitung während der Laufzeit gedankt.



KOKON

I. Zusammenfassung (Robert Bosch GmbH)

Ziele:

Ziel von KOKON war die Entwicklung von Technologien für den Einsatz SiGe-basierter Mikrowellenschaltungen in automotiven Radarsensoren.

- Spezifikation von Schlüsselkomponenten in SiGe für LRR-Sensoren.
- Charakterisierung und Evaluierung der SiGe-Komponenten.
- Entwicklung und Evaluierung einer Aufbau- und Verbindungstechnik für SiGe-Komponenten.
- Darstellung von Demonstratoren basierend auf den entwickelten Technologien.
- Integration von SiGe-Komponenten in LRR-Sensoren.

Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens:

Die Entwicklungen in KOKON bezogen sich als Voraussetzung für die Förderung auf den vorwettbewerblichen Bereich.

Grundlage für die Durchführung des Vorhabens war der in der integrierten Vorhabensbeschreibung dargelegte Arbeitsplan mit hinterlegten Meilensteinen.

Stand der Technik zu Beginn des Vorhabens:

Technische Grundlage von KOKON war der Prototyp eines SiGe-VCOs /Li, Rein/. Zu Beginn des Vorhabens war nicht klar, ob diese Komponente die Spezifikationen der Automobilindustrie hinsichtlich Funktionalität, Zuverlässigkeit und Fertigbarkeit erfüllen kann.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

Die in KOKON entwickelten SiGe-MMICs wurden dem Vorhaben KRAFAS zur Verfügung gestellt. In KRAFAS werden neue Integrationstechnologien (Chip in Duromer – CID) und Antennenkonzepte (DBF – Elektronische Strahlformung) entwickelt.

KOKON

27. Februar 2008

Seite 12 von 46

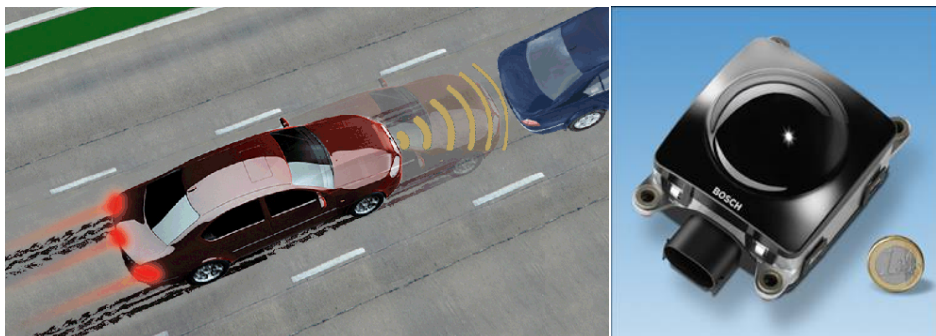
II. Abschlussbericht der Robert Bosch GmbH

Die Robert Bosch GmbH beteiligte sich im Rahmen des Projektes KOKON an folgenden Arbeitspaketen:

- Spezifikation von Schlüsselkomponenten in SiGe für LRR-Sensoren.
- Charakterisierung und Evaluierung der SiGe-Komponenten.
- Entwicklung und Evaluierung einer Aufbau- und Verbindungstechnik für SiGe-Komponenten.
- Darstellung von Demonstratoren basierend auf den entwickelten Technologien.
- Integration von SiGe-Komponenten in LRR-Sensoren.

Fazit:

- Mit SiGe lassen sich die Spezifikationen von Automobilradaren an elektronische Komponenten mit einer Betriebsfrequenz von 77 GHz erfüllen.
- Der Einsatz von SiGe ermöglicht Integrationstechnologien, welche den Anforderungen einer Automobilfertigung genügen können.
- Auf SiGe basierende Weitbereichsradare bestehen das Benchmarking mit auf dem Markt befindlichen Systemen.
- SiGe-MMICs werden als Schlüsselkomponenten in die kommende Generation des Weitbereichsradars der Robert Bosch GmbH eingesetzt.



1. Spezifikation von Schlüsselkomponenten in SiGe für LRR-Sensoren

27. Februar 2008

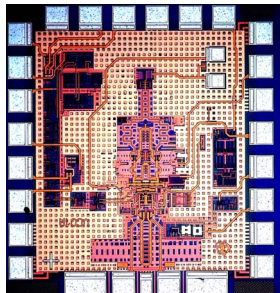
Seite 13 von 46

Inhalte des Arbeitspaketes:

- Spezifikation wichtiger SiGe-Komponenten (VCO, DRO, Mischer)
- Spezifikation von Onchip-Prüftechnik
- Spezifikation der Schnittstellen
- Spezifikation der Zuverlässigkeitsparameter

Fazit:

In diesem Arbeitspaket konnte gezeigt werden, dass SiGe-Komponenten die geforderten Spezifikation für Automobilradare erfüllen können. Mit der Spezifikation von Funktionsblöcken für die Onchip-Diagnose wurde ein wesentlicher Beitrag zur Vereinfachung und Kostenoptimierung der Prüftechnik für 77 GHz-Komponenten geleistet. Die Definition elektrischer und mechanischer Schnittstellen ermöglicht die Integration von SiGe-Komponenten in komplexe Radarsysteme. Die gemeinsam mit CAS (ADC) und Infineon (IFX) erarbeitete Spezifikation trägt wesentlich zur Standardisierung solcher Komponenten bei.





Spezifikation Schlüsselkomponenten

27. Februar 2008

Seite 14 von 46

VCO

In KOKON wurden Schlüsselkomponenten für 77 GHz Automobilradare in SiGe spezifiziert. Der Fokus lag auf der Spezifikation eines 77 GHz VCOs. Diese Spezifikation wurde gemeinsam mit den Projektpartnern IFX und CAS (ADC) durchgeführt, um einer Standardisierung von SiGe-Komponenten näherzukommen.

Die Spezifikation des VCOs umfasste folgende Komponenten:

- HF-Eigenschaften
- Zuverlässigkeitsparameter (Temperaturbereich, Lebensdauern, etc.)
- Mechanische Dimensionen und Padframe
- Schnittstellen
- Prüftechnik und OnChip-Diagnose

Der VCO in KOKON wurde als Fundamentaloszillator bei 77 GHz in differentieller Schaltungstechnik ausgelegt und spezifiziert. Diese VCO-Spezifikation ermöglicht das Design extrem kompakter MMICs mit geringer Störanfälligkeit (Gleichtaktunterdrückung) und fehlender Aussendung von Störfrequenzen. Bei auf dem Markt befindlichen GaAs-VCOs erfolgt die Frequenzerzeugung bei tieferen Frequenzen (z.Bsp. 13 GHz) mit anschließender Frequenzvervielfachung. Dadurch kommt es zur Aussendung unerwünschter Störfrequenzen, welche durch aufwändige Filterung und Packagingmaßnahmen unterdrückt werden müssen.

Ein wesentlicher Faktor für die Kosten von 77 GHz Komponenten ist die Prüftechnik. Der Anteil der Prüfkosten liegt bei auf dem Markt befindlichen GaAs-MMICs im Bereich von 30 %, falls eine aufwändige 77 GHz Prüftechnik notwendig ist. Der in KOKON spezifizierte und entwickelte SiGe-VCO bietet hier signifikante Vorteile. SiGe ermöglicht die Integration von Sensorik auf dem VCO-Chip, welche in der Endprüfung der Wafer keine Messtechnik bei 77 GHz erforderlich macht. Konkret bedeutet dies die Integration von Teilern, welche abhängig vom eingestellten Teilverhältnis die Messung der Oszillatorfrequenz (i.e. 77 GHz) im MHz- oder kHz-Bereich ermöglicht. Frequenzmessungen in diesem Bereich können standardmäßig von Halbleitertestern, die in der Mikroelektronikindustrie eingesetzt werden, durchgeführt werden.

Weiterhin wurde auf dem VCO-Chip ein Power-Sensor spezifiziert und implementiert, welcher die Messung der Ausgangsleistung des VCOs ermöglicht. Diese Sensorik vereinfacht nicht nur die Prüftechnik, sondern ermöglicht eine OnChip-Diagnose, die gerade beim Einsatz von Automobilradaren in sicherheitsrelevanten Anwendungen und dem dabei geforderten Sicherheitskonzept eine wesentliche Rolle spielt.

Der in KOKON spezifizierte VCO umfasst weiterhin verschiedene Schnittstellen, die die Integration des VCOs in ein Radarsystem erlauben. Erwähnt sei hier der 19 GHz Ausgang, mit dem die Anbindung an einen DRO ermöglicht wurde. Weiterhin kann die Ausgangsleistung des VCOs abgesenkt werden (über steuerbaren PA), wodurch es möglich ist, Vorschriften der ETSI für den Betrieb von Radarsensoren im Stand zu erfüllen.

27. Februar 2008

Seite 15 von 46

Bild 1.1 zeigt den in KOKON spezifizierten VCO mit den beschriebenen Funktionsblöcken.

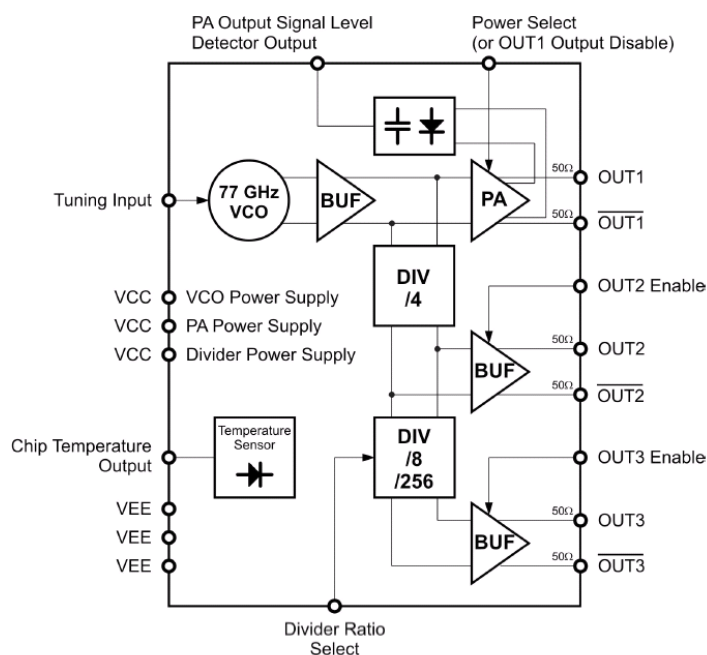


Bild 1.1: Blockschaubild des 77 GHz VCOs

DRO

Um eine Frequenzstabilisierung und die Generierung von Rampen in einem FMCW-Radar über eine PLL zu ermöglichen, wurde ein 19 GHz SiGe-DRO mit externem keramischen Resonator zur Minimierung des Phasenrauschens spezifiziert. Weiterhin beinhaltet dieses Bauelement als Schnittstelle zum 77 GHz VCO einen Mischer, um ein ZF-Signal als Input für die Regelschleife (PLL) zu erzeugen. An diesen Funktionsblöcken wird ein anderer wesentlicher Vorteil der SiGe-Technologie offensichtlich. In SiGe können Oszillatoren mit aktiven Gilbertzellmischern monolithisch integriert werden. Bei GaAs-MMICs werden i.d.R. Schottky-Diodenmischer verwendet. Allerdings ist die Technologie von Schottkydioden nicht kompatibel mit der pHEMT- oder HBT-Technologie für die Oszillatoren, wodurch Multichiplösungen notwendig werden.

Bild 1.2 zeigt das Blockschaftbild dieses SiGe-MMICs (SiGe-DRO).

27. Februar 2008

Seite 16 von 46

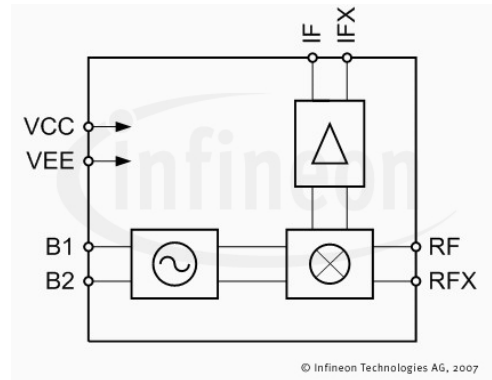


Bild 1.2: 19 GHz SiGe-DRO mit Funktionsblöcken

Mischer

Als weitere Schlüsselkomponente wurden Mischer für den Empfangszweig spezifiziert. Dies beinhaltete die Spezifikation der eigentlichen Mischerzelle (noise figure, gain) und zusätzlich deren Integration in ein monostatisches Radar. Monostatische Radare benutzen passive Elemente (Koppler) um bei gemeinsam benutzter Antenne eine Sende- / Empfangstrennung durchzuführen. Solche Koppler wurden in die Spezifikation der Mischer implementiert. Weiterhin wurde die Spezifikation auf Mehrkanalradare ausgedehnt, d.h. auf einem MMIC wurden mehrere Mischerzellen unter Beachtung der geforderten Unterdrückung von Übersprechen spezifiziert.

Bild 1.3 zeigt schematisch den Aufbau eines monostatischen Radars mit dem zugehörigen Transfermischer.

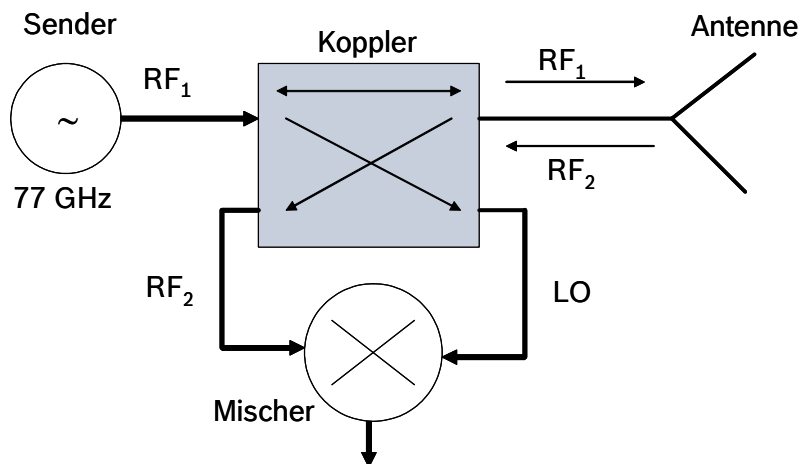


Bild 1.3: Monostatisches Radar mit Transformermischer

- MMIC-Designs der Robert Bosch GmbH

In KOKON wurden von der Robert Bosch GmbH weiterhin passive Komponenten, wie der oben beschriebene Koppler, sowie Teststrukturen für die Aufbau- und Verbindungstechnik in SiGe spezifiziert, designt und von IFX gefertigt. In Bild 1.4 ist ein verkürzter Koppler in SiGe gezeigt.

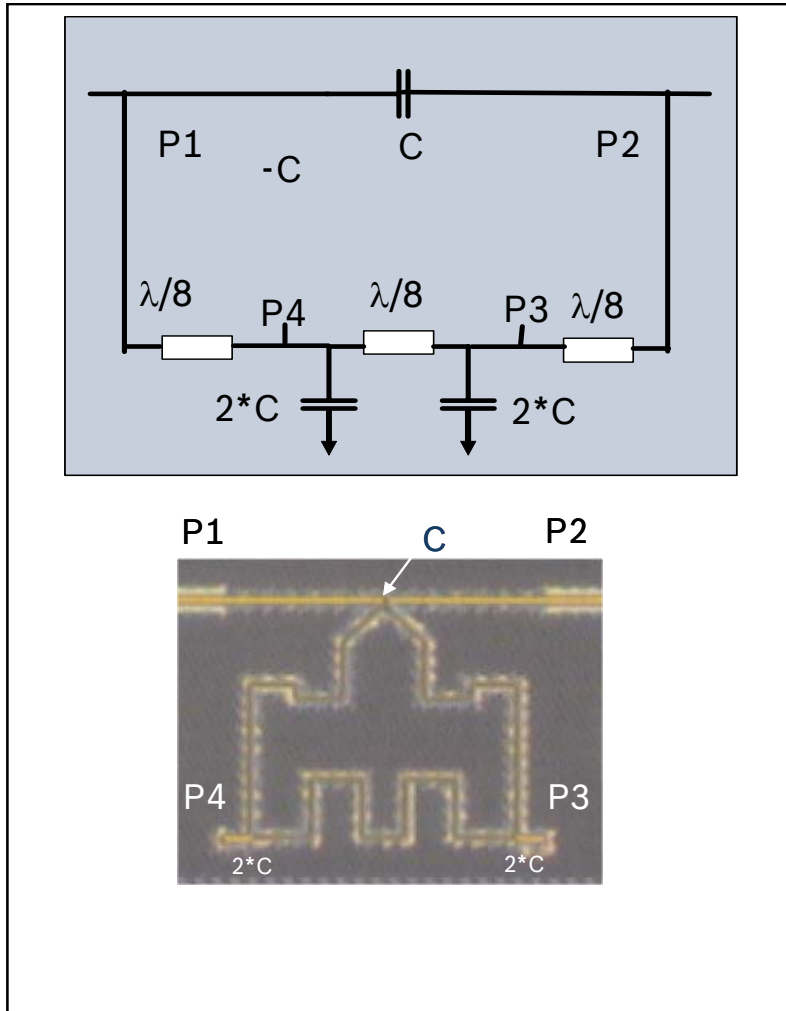


Bild 1.4: Passive Kopplerstruktur in SiGe



2. Charakterisierung und Evaluierung der SiGe-Komponenten

27. Februar 2008

Seite 19 von 46

Inhalte des Arbeitspaketes:

- Charakterisierung von SiGe-Komponenten onchip und im aufgebauten Zustand.
- Evaluierung der Parameterdriften im geforderten Temperaturbereich.
- Zuverlässigkeitserprobung von SiGe-Komponenten.
- Systemsimulation (UA Universität Erlangen-Nürnberg)
- Komponentencharakterisierung (UA Universität Stuttgart).

Fazit:

In diesem Arbeitspaket wurden SiGe-Komponenten charakterisiert und die geforderten Spezifikationen verifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass die wesentlichen Spezifikationen mit der gewählten Technologie erfüllt werden können. Die untersuchten VCOs wiesen verglichen mit Wettbewerbstechnologien eine signifikant verbesserte Temperaturstabilität auf. Die durchgeführten Zuverlässigkeitserprobungen (Hochtemperaturdauerläufe, Temperaturwechsel, Feuchte/Wärme, chemische Umwelterprobung) bestätigten die hohe Zuverlässigkeit der gewählten SiGe-Technologie.

Systemsimulationen der Universität Erlangen-Nürnberg zur Integration von SiGe-Komponenten in Radarsysteme führten zur Identifikation kritischer Pfade und deren nachhaltiger Optimierung.

Charakterisierung und Evaluierung der SiGe-Komponenten

27. Februar 2008

Seite 20 von 46

VCO

Die in KOKON entwickelten SiGe-MMICs mit Fokus auf dem 77 GHz VCO wurden im aufgebauten Zustand und onchip charakterisiert. Ein wichtiger Gesichtspunkt für den Einsatz solcher Komponenten in Radarsystemen ist die Erfüllung der Spezifikation im geforderten Temperaturbereich (-40 – 125 °C). Bild 2.1 zeigt den in KOKON entwickelten SiGe-VCO. Die von diesem VCO abgegebene 77 GHz Leistung als Funktion der Rückseitentemperatur des Chips ist in Bild 2.2 dargestellt.

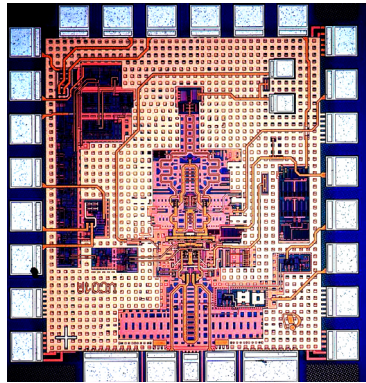


Bild 2.1: 77 GHz SiGe-VCO

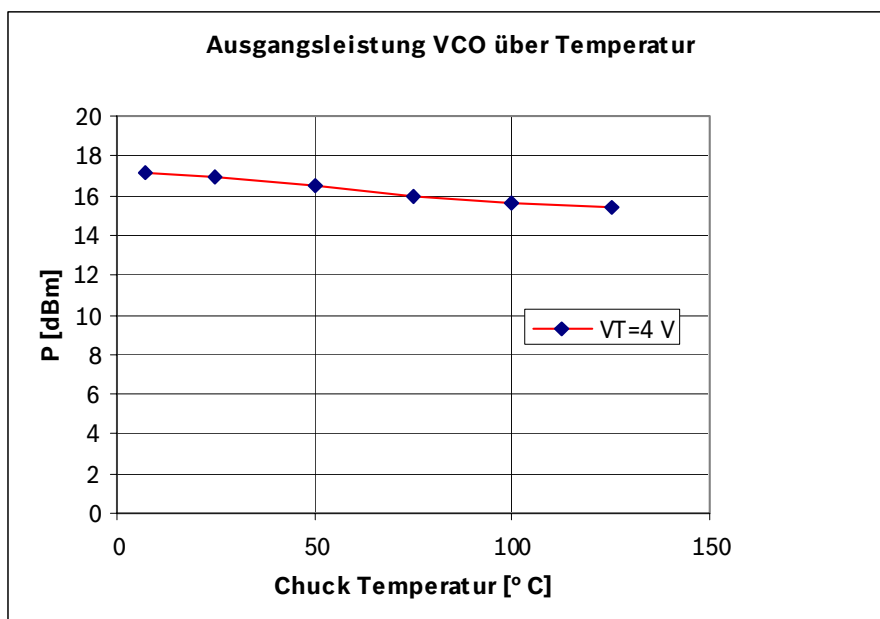


Bild 2.2: Ausgangsleistung des 77 GHz SiGe-VCOs

Die gemessene Abnahme der Ausgangsleistung von Raumtemperatur zu 125 °C Rückseitentemperatur von ca. 1.5 dB ist verglichen mit auf dem Markt befindlichen GaAs-MMICs deutlich geringer, was primär mit der hohen Grenzfrequenz der eingesetzten SiGe-HBTs zusammenhängt.

In Bild 2.3 ist der abstimmbare Frequenzbereich (Tuningkennlinie) zu sehen. Für Fernbereichsradare genügt ein Abstimmbereich von einem GHz. Allerdings muss dieser Frequenzbereich (76-77 GHz) im kompletten Temperaturbereich eingehalten werden. Aufgrund signifikanter Frequenzdriften über der Temperatur ist ein deutlich größerer Abstimmbereich notwendig, um über eine Regelschleife (PLL) die Frequenz im zugelassenen Bereich zu halten. Hierfür wurden zwei Tuningeingänge implementiert: Mit dem Coarse-Tune wird die VCO-Frequenz in den zugelassenen Bereich gebracht; mit dem Fine-Tune erfolgt die Modulation (FMCW) des VCOs.

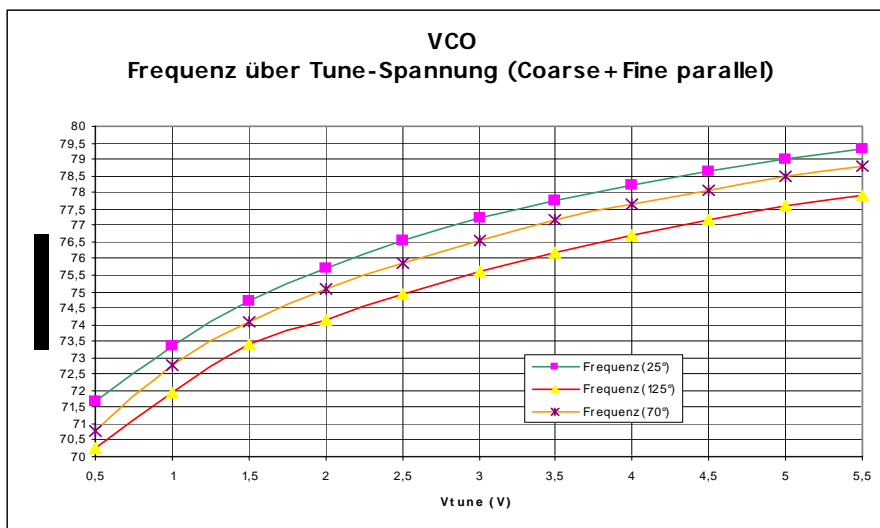


Bild 2.3: Tuningkennlinie des SiGe-VCOs

Wie Bild 2.3 veranschaulicht, besitzen die entwickelten SiGe-VCOs einen Abstimmbereich von ungefähr 8 GHz. Hiermit lassen sich die oben erwähnten Temperaturdriften der Frequenz aber auch Fertigungstoleranzen bei der Chipherstellung ausgleichen.

Zur Absicherung der Zuverlässigkeit dieser SiGe-Komponenten wurden in Anlehnung an die Vorgaben der Automobilindustrie Erprobungen der VCOs durchgeführt. Hierzu wurden die VCOs auf Leiterplatten aufgebaut, in ein ACC2-Gehäuse integriert und potenziell auftretende Parameterdriften während der Erprobung aufgenommen.

Folgende Erprobungen / Dauerläufe wurden durchgeführt:

27. Februar 2008

Seite 22 von 46

- Hochtemperaturlagerung bei 100 °C (48 h)
- Dauerläufe bei 85 °C (650 h) (HTOL)
- Temperaturwechsel -40 – 90 °C (500 h)
- Feuchte / Wärme (85/85)
- Chemische Umwelterprobung bei 100 °C (48 h)

Beispielhaft ist in Bild 2.4 das Ergebnis der chemischen Umwelterprobung dargestellt.

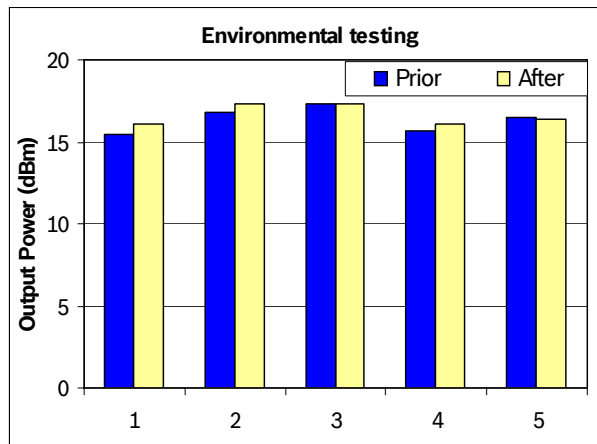


Bild 2.4: Chemische Umwelterprobung von SiGe-VCOs
(Reagenzien: 1 Methanol, 2 Dieselkraftstoff,
3 Motorenöl, 4 Frostschutzmittel, 5 Batteriesäure)

In Bild 2.4 ist die Ausgangsleistung des SiGe-VCOs vor und nach der durchgeführten Erprobung bei verschiedenen Chemikalien dargestellt. Bei dieser Erprobung wurde keine signifikante Degradation der Parameter festgestellt. Auch bei den anderen, oben aufgelisteten Erprobungen wurde eine ausgeprägte Stabilität der VCO-Parameter ermittelt.

Im Rahmen von KOKON wurden Unteraufträge an die Universität Stuttgart (Prof. Kasper) und an die Universität Erlangen-Nürnberg (Prof. Weigel) auf den Gebieten Komponentenentwicklung und Integration von SiGe-Komponenten in ein Radarsystem (Systemsimulationen) vergeben:

27. Februar 2008

Seite 23 von 46

Systemsimulation (Universität Erlangen-Nürnberg)

An der Universität Erlangen-Nürnberg wurden Systemsimulationen mit ADS durchgeführt. Mit diesen Simulationen sollten Erkenntnisse über die Integration von SiGe-Komponenten in Radarsysteme und darauf basierend eine Systemoptimierung durchgeführt werden. Bild 2.5 zeigt den Aufbau der verwendeten Systemsimulation. Die Parameter der verwendeten Funktionsblöcke wurden aus Messungen und Simulationen der applizierten SiGe-Komponenten entnommen.

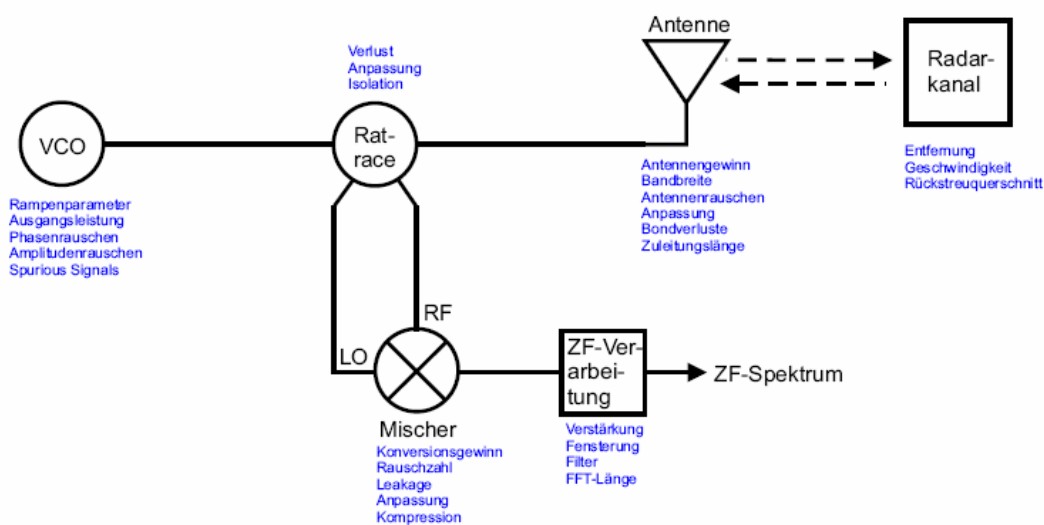


Bild 2.5: Funktionsblöcke der aufgesetzten Systemsimulation

In Tab. 2.1 sind die Funktionen, die in diese Systemsimulation implementiert wurden, zusammengestellt.

Ein wesentlicher Aspekt dieser Simulationen war der Einfluss verschiedener Rauschmechanismen auf die Systemperformance. Bild 2.6 zeigt beispielhaft simulierte Rauschspektren (Phasen- und Amplitudenrauschen).

Funktion	Beschreibung
Lineare Frequenzmodulation	Mit den Parametern f_{hub} und T lässt sich die Steigung der linearen Frequenzrampe variabel einstellen
Stepped-FMCW	Das VCO-Modell besitzt die Möglichkeit die Frequenz stufenförmig zu ändern. Es kann so beispielsweise das Sendesignal eines LFMSK-Modulators nach [5] realisiert werden.
variable Ausgangsleistung	Die Ausgangsleistung des VCOs kann in Abhängigkeit der Zeit geändert werden. Bei einem linearen Zusammenhang zwischen Zeit und Ausgangsfrequenz (LFM) lässt sich auf diese Weise eine quasi frequenzabhängige Ausgangsleistung definieren.
Phasenrauschen	Das Phasenrauschspektrum lässt sich anhand von Stützstellen definieren. Dabei ist es auch möglich, Extremwerte im Phasenrauschspektrum zu realisieren, wie sie z.B. durch den Einfluss einer PLL zustande kommen. (siehe Abbildung 2)
Amplitudenrauschen	Das Amplitudenrauschen lässt sich wie das Phasenrauschen über Stützstellen definieren.
Spurious Signals	Störsignale, die durch eine PLL-Regelung zustande kommen können, lassen sich definieren. Harmonische der Störsignale können dabei zusätzlich angegeben werden.

Tab.2.1: In Systemsimulation integrierte Funktionen

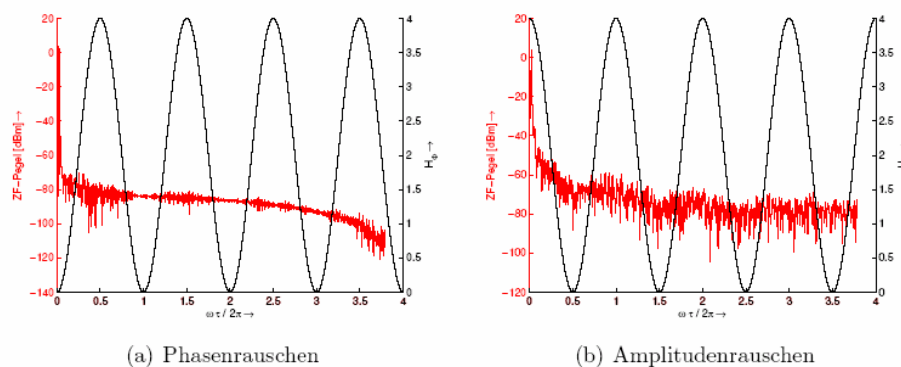


Bild 2.6: Simulierte Rauschspektren

Weiterhin wurde in den Systemsimulationen das Thema Übersprechen (Leakage) untersucht. Insbesondere bei monostatischen Radaren existieren verschiedene Übersprechpfade, welche die Großsignalfestigkeit beeinflussen können. Dieses Problem kann durch den Einsatz eines bistatischen Radarsystems (dieser Weg wurde in KOKON nicht besprochen) oder durch Analyse der Übersprechpfade und konsequentes Anpassen der eingesetzten Komponenten und Spezifikation der notwendigen Isolation von Komponenten umgangen werden. Die Simulationen der Universität Erlangen-Nürnberg trugen wesentlich zur Identifikation von Übersprechpfaden bei. Als Konsequenz hiervon wurde die Spezifikation und Anpassung einzelner Funktionsblöcke erweitert und optimiert. Bild 2.7 zeigt die verwendeten Funktionsblöcke und mögliche Übersprechpfade.

27. Februar 2008

Seite 25 von 46

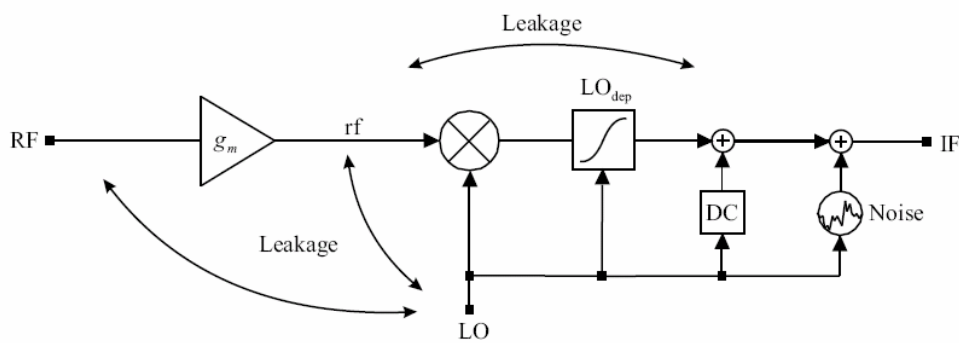


Bild 2.7: Systemsimulation mit Übersprechpfaden / Leakage

Komponentencharakterisierung (Universität Stuttgart)

27. Februar 2008

Seite 26 von 46

An der Universität Stuttgart (Institut für Halbleitertechnik – Prof.Dr. E.Kasper) wurden SiGe-HBTs charakterisiert und basierend auf den Ergebnissen Modelle als Input für Schaltungssimulationen erstellt.

Eine zentrale Spezifikation für den Einsatz von SiGe-Komponenten in Automobilradaren ist neben der Betriebsfrequenz von 77 GHz die notwendige Ausgangsleistung. Diese beiden Spezifikationen führen zu im Prinzip gegenläufigen Forderungen: Hohe Betriebsfrequenzen lassen sich durch Skalierung der Transistoren erreichen. Eine Verkürzung der Bauelementdimensionen in Stromflussrichtung limitiert aufgrund auftretender Durchbruchmechanismen die maximal anlegbare Kollektor-Emitter-Spannung (V_{CE0}) und somit auch die erzielbare Ausgangsleistung. Bild 2.8 veranschaulicht diese Abhängigkeit (sog. Johnson-Limitierung).

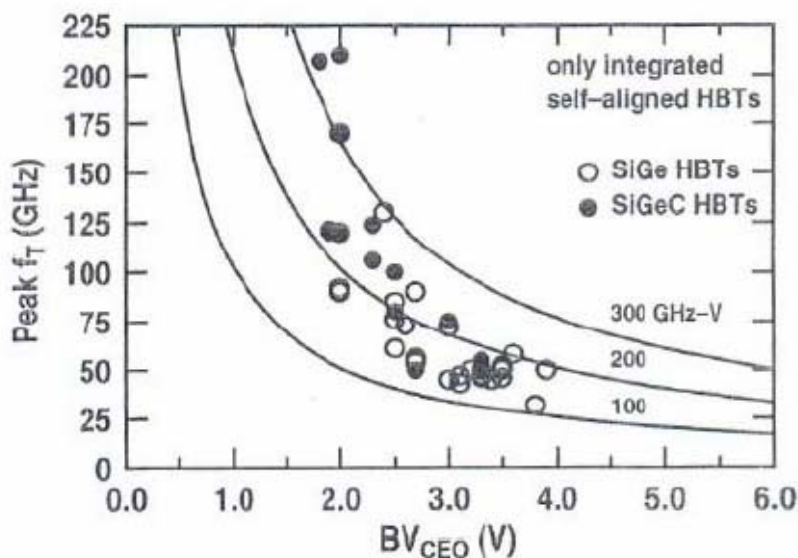


Bild 2.8: Johnson-Limit bei SiGe-HBTs

Für das Schaltungsdesign, die Optimierung der Ausgangsleistung und für den zuverlässigen Betrieb dieser Transistoren ist somit die Kenntnis von Durchbruchvorgängen essentiell. Die Modellierung solcher Vorgänge erfordert die Betrachtung von Lawinenmultiplikation in der Basis dieser HBTs (Bild 2.9).

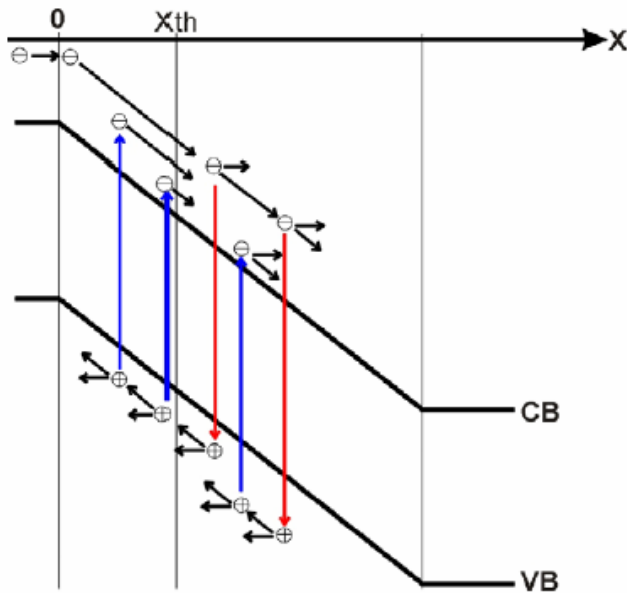


Bild 2.9: Lawinenmultiplikation in der Basis von SiGe-HBTs

Von der Universität Stuttgart wurde ein Verfahren („dead space“) zur Optimierung des existierenden „weak avalanche“-Verfahrens entwickelt, mit dem Schwächen des existierenden Modells verbessert werden konnten. Dieses erweiterte Modell wurde in ADS implementiert und steht für das Schaltungsdesign zur Verfügung. Bild 2.10 zeigt HBT-Kennlinien im Vergleich zwischen altem und neuem Modell.

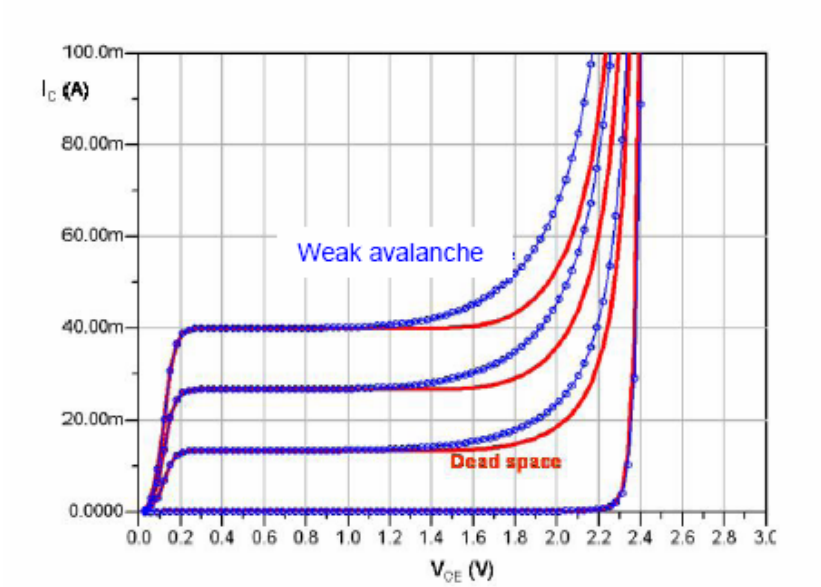


Bild 2.10: Transistorkennlinien im Vergleich zwischen „dead space“ und „weak avalanche“-Modell

3. Entwicklung und Evaluierung einer Aufbau- und Verbindungstechnik für SiGe-Komponenten.

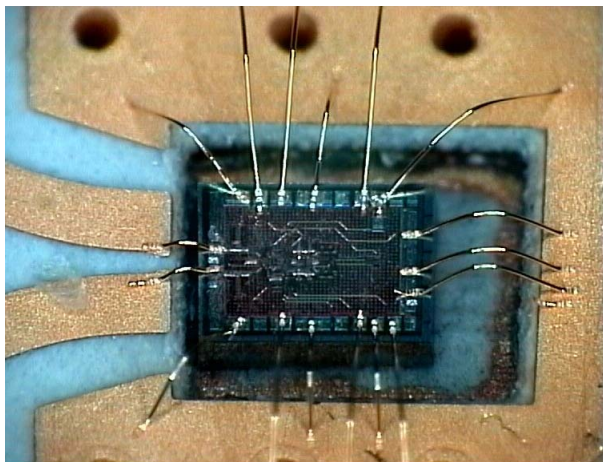
Inhalte des Arbeitspaketes:

- Entwicklung von Bondprozessen zur Kontaktierung von SiGe-MMICs.
- Charakterisierung und Optimierung der HF-Eigenschaften von HF-Übergängen.
- Entwicklung von Substrattechnologien zur Versenkung der SiGe-Komponenten.
- Entwärmungskonzepte.
- Zuverlässigkeitserprobung der entwickelten Technologien.

Fazit:

Es wurden verschiedene Bondtechnologien und Bondübergänge entwickelt und bewertet. Differenzielle Übergänge bieten inhärente Vorteile bezüglich HF-Performance und Störfestigkeit. Allerdings existiert z.Zt. keine differenzielle Messtechnik bei diesen Frequenzen, was den Einsatz in einer Serienproduktion deutlich erschwert. Durch Optimierung der Bondübergänge konnte eine Anpassung im Bereich von -15 dB für die Übergänge erzielt werden.

Essentiell für den Einsatz von SiGe-MMICs ist eine effiziente Entwärmung dieser Komponenten über die Leiterplatte. Es konnte gezeigt werden, dass eine effiziente Entwärmung über in der Leiterplatte integrierte dicke Kupferlagen möglich ist. Bezüglich Zuverlässigkeit wurden kritische Prozesse identifiziert und für die Anforderungen im Automobilbereich optimiert.



Bondübergänge

Eine Schlüsseltechnologie für die Integration von SiGe-MMICs bei 77 GHz in ein Automobil ist die Dimensionierung und reproduzierbare Herstellung von Drahtbonds. Bei SiGe-MMICs befindet sich im Gegensatz zu GaAs-MMICs die HF-Masse nicht auf der Unterseite des Halbleiters. Die HF-Masse wird bei SiGe-MMICs aus einer Metallisierungsebene des Backends gebildet. Somit entsteht durch die Montage der MMICs keine Verbindung zwischen den HF-Massen von Leiterplatte und SiGe-MMIC. Verbindungen zwischen den HF-Massen können über Durchkontaktierungen auf der Leiterplatte sowie bei den SiGe-MMICs und Drahtbonds geschaffen werden (Koplanarübergang). Bild 3.1 zeigt einen Koplanarübergang zwischen SiGe-MMIC und Leiterplatte mit den beschriebenen Durchkontaktierungen und Drahtbondverbindungen.

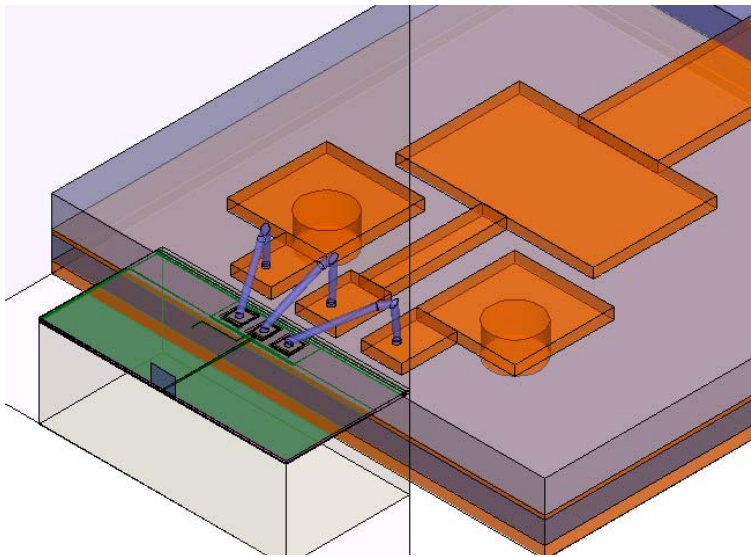


Bild 3.1: Koplanarübergang zwischen SiGe-MMIC und Leiterplatte

Bei differenzieller Leitungsführung auf dem SiGe-MMIC und der Leiterplatte kann die Verbindung der HF-Massen entfallen, da sich die Ströme in der HF-Masse am Übergang schließen (Differenzieller Bondübergang Bild 3.2).

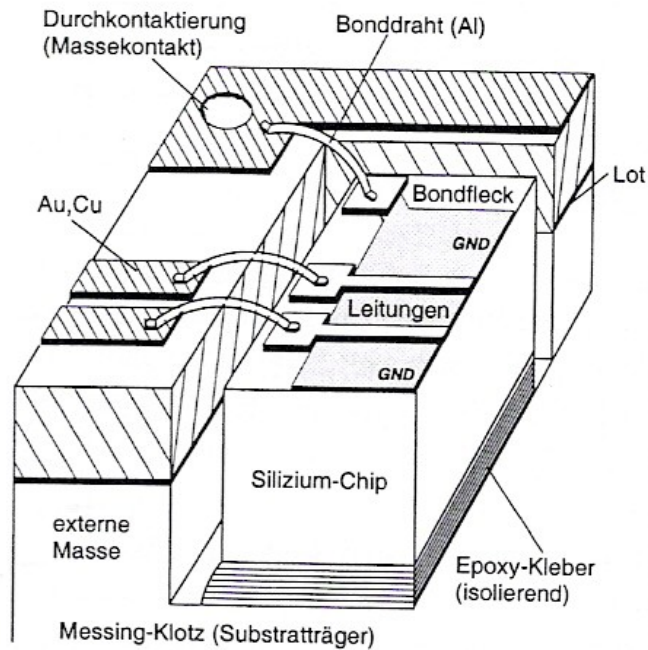

 008
16

Bild 3.2: Differenzieller Bondübergang

Differenzielle Bondübergänge bieten signifikante Vorteile:

- Auf der Leiterplatte sind keine Durchkontaktierungen notwendig.
- Die induktive Kopplung der Bonds reduziert die Bondinduktivität.
- Differenzielle Schaltungen an sich reduzieren den Einfluss von Störungen auf der Versorgungsspannung durch Gleichtaktunterdrückung.

Ein gravierender Nachteil differenzieller Bondübergänge liegt in der fehlenden Messtechnik für differenzielle Leitungsführung bei diesen hohen Frequenzen. Um Onwafermesstechnik einsetzen zu können, muss über Baluns ein Übergang zwischen Differenziell und Singleended geschaffen werden. Unsicherheiten bei der Kalibration solcher Strukturen erschweren die Charakterisierung und Optimierung differenzieller Übergänge. In Bild 3.3 ist ein differenzieller Bondübergang zwischen zwei differenziellen Leitungen auf Leiterplatte zu sehen.



27. Februar 2008

Seite 32 von 46

Bild 3.3: Differenzieller Übergang

Aufgrund der auftretenden Induktivitäten sind auch bei differentiellen Übergängen Anpassstrukturen auf der Leiterplatte zur Reduzierung von Reflexionen notwendig. Die Übergänge wurden mit HFSS simuliert und entsprechende Anpassstrukturen designt. In Bild 3.4 sind die entsprechenden Modelle (ohne und mit Anpassstruktur) zu sehen. Weiterhin ist die simulierte Anpassung und Transmission mit und ohne Anpassstruktur gezeigt.

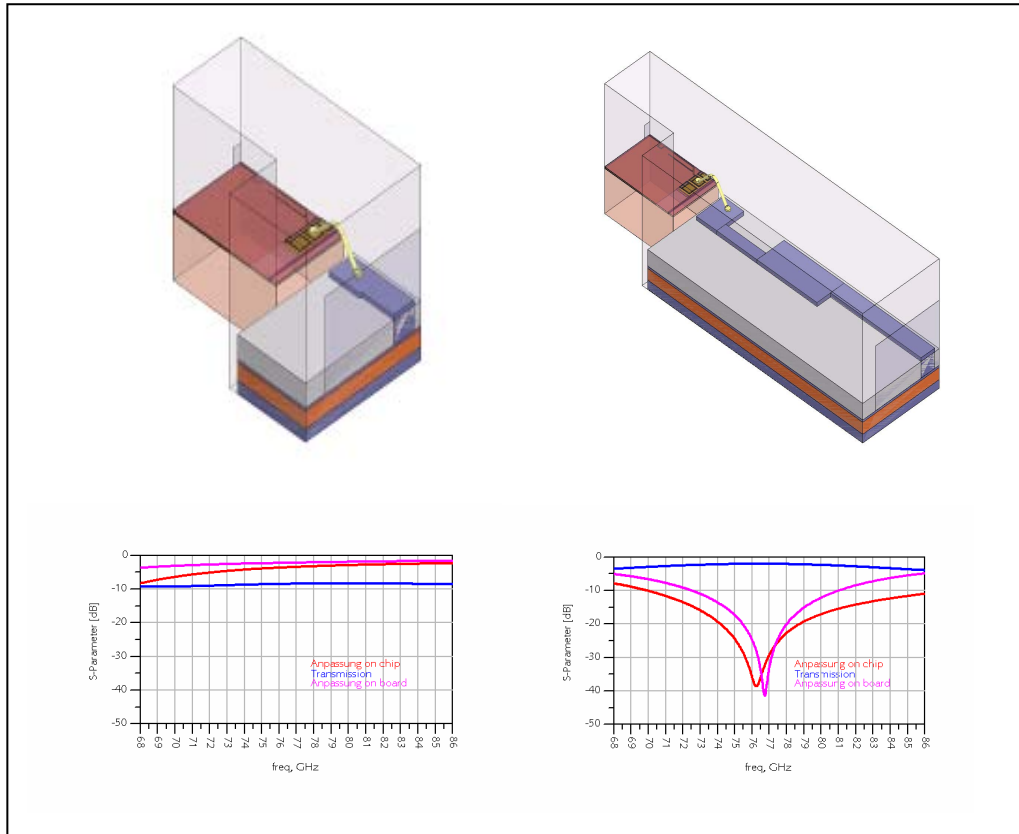


Bild 3.4: Vergleich differenzieller Bondübergänge mit und ohne Anpassstruktur

Aufgrund der oben erwähnten fehlenden Mess- und Prüftechnik für differenzielle Übergänge fiel die Entscheidung auf koplanare Bondübergänge, für welche Onwafer-Messtechnik verfügbar ist.

Für koplanare Bondübergänge wurden deshalb ebenfalls Anpassstrukturen entwickelt. Bild 3.5 zeigt Transmission und Anpassung koplanarer Bondübergänge. In Bild 3.5 ist weiterhin der Einfluss von Ätztoleranzen bestimmter geometrischer Längen auf die Resonanzfrequenz der Anpassung zu sehen. Die relative Änderung einer Länge der Anpassstruktur um 10 % führt zu einer Verschiebung der Resonanzfrequenz um ca. 3 GHz.

27. Februar 2008

Seite 34 von 46

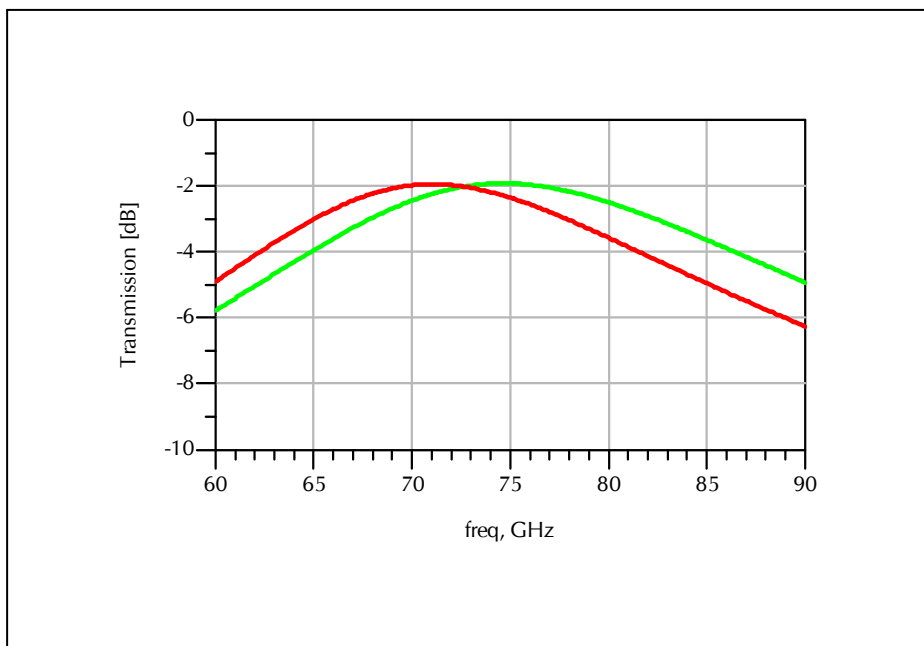
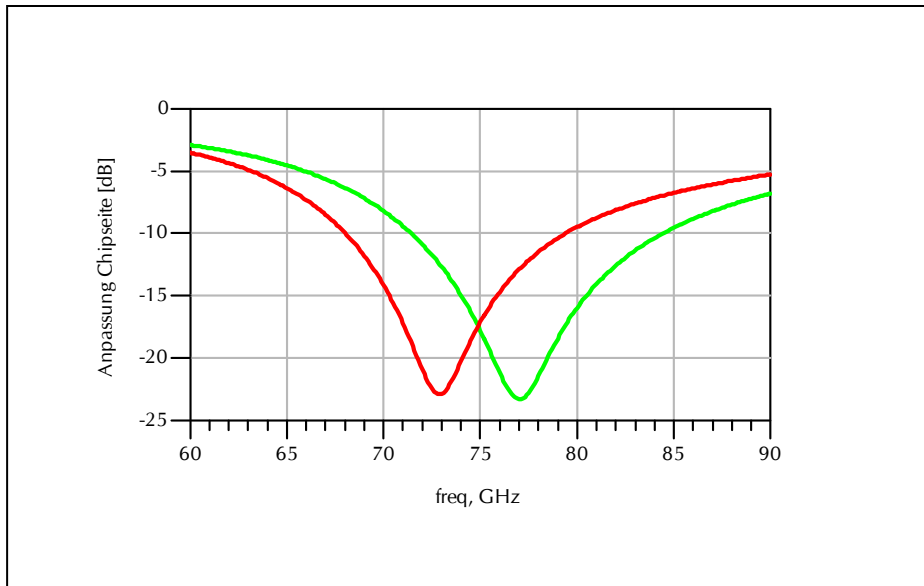


Bild 3.5: Anpassung / Transmission von Koplanarbonds und Einfluss von Toleranzen

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse und zur Charakterisierung der designten Koplanarübergänge wurden Testchips entworfen, mit denen die HF-Eigenschaften dieser Übergänge gemessen werden konnten. Allerdings ist die HF-Kalibrierung problematisch, da eine Onwaferspitze auf dem Testchip

und eine Onwafer Spitze auf der Leiterplatte kalibriert werden muss. Ein Photo dieser Teststruktur mit dem Koplanarübergang auf Leiterplatte ist in Bild 3.6 gezeigt.

27. Februar 2008

Seite 35 von 46

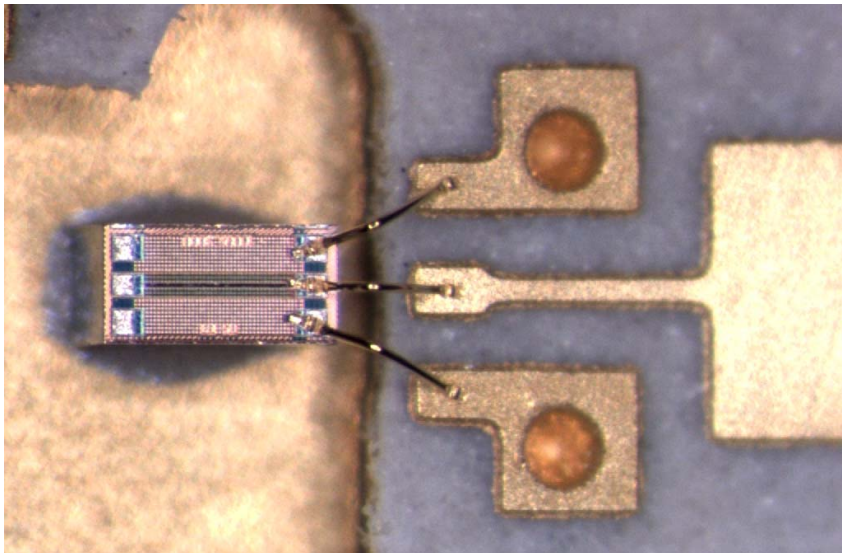


Bild 3.6: Testchip und Koplanarübergang

Die gemessene Anpassung dieses Koplanarübergangs ist in Bild 3.7 zu sehen. Durch Optimierung konnte eine Anpassung im Bereich von 15 dB erzielt werden.

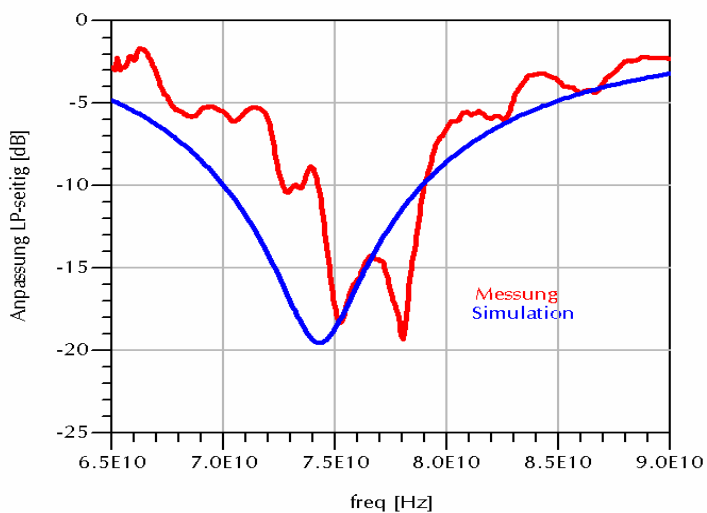


Bild 3.7: Messergebnisse Testchip und Koplanarübergang



Entwärmung

27. Februar 2008

Seite 36 von 46

Ein zentraler Punkt bei der Integration von SiGe-MMICs betrifft die Entwärmung der Chips. Der VCO-Kern produziert eine Verlustleistung von ca. 1.2 W, die über eine Fläche von 1 mm² abgeführt werden muss. Verglichen mit GaAs-MMICs ist die Verlustleistung von SiGe-MMICs deutlich geringer, allerdings ist aufgrund des höheren Integrationsgrades von SiGe-MMICs die Fläche wesentlich kleiner, sodass die MMIC-Klebung und die Wärmespreizung einen signifikant höheren Stellenwert bekommt.

In KOKON wurden verschiedene leitfähige Klebstoffe mit unterschiedlichen Füllstoffen evaluiert. Mit diesen Klebstoffen wurden spezifische Wärmeleitfähigkeiten im Bereich bis 10 W/mK erreicht. Ein weiterer zentraler Punkt betrifft die Schichtdicke der Klebstoffschicht. Als Ergebnis der Prozessentwicklung wurde eine Kleberschichtdicke von 20 µm gewählt, welche sowohl eine ausreichende mechanische Festigkeit als auch eine effiziente Entwärmung gewährleistet.

Neben der Dicke und Auswahl eines geeigneten Klebstoffes spielt die Wärmespreizung in der Leiterplatte eine entscheidende Rolle. Weiterhin muss das MMIC in das HF-Laminat versenkt werden, um flache und somit auch kurze Bondübergänge zu ermöglichen. In KOKON wurden verschiedene Möglichkeiten evaluiert, über dicke Kupferlagen oder Kupferinlays die Wärmespreizung und -ableitung zu optimieren. Eine Möglichkeit besteht in der Integration einer Kupferpille in die Leiterplatte (Bild 3.8). Dieser Aufbau hat den Vorteil, dass nur dort, wo die Wärme lokal erzeugt wird, eine Wärmesenke in die Leiterplatte integriert ist.

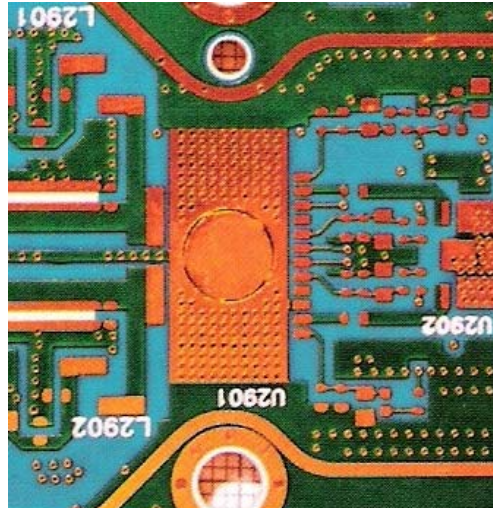


Bild 3.8: Leiterplatte mit integrierter Kupferpille (Quelle: Ruwel)

Alternativ wurden MMICs in Leiterplatten mit einer dicken Kupferlage zur Wärmespreizung aufgebaut. Die Versenkung der MMICs erfolgte durch Herauslasern des HF-Laminates (Bild 3.9).

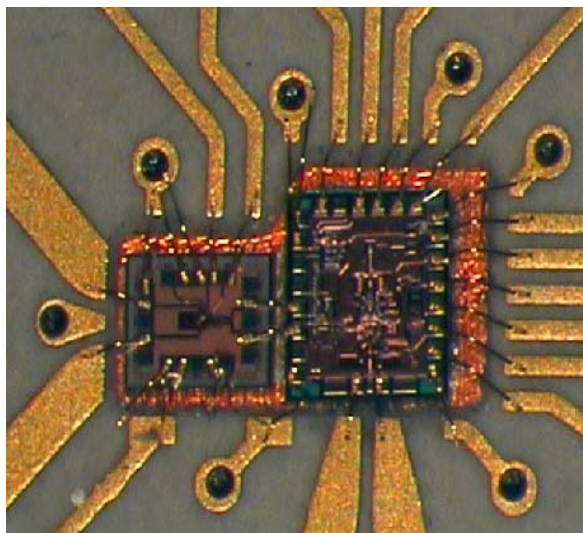


Bild 3.9: SiGe-MMICs in gelaserten Kavitäten

Mit diesem Entwärmungskonzept konnte eine effiziente Entwärmung der MMICs erzielt werden. Die Temperaturdifferenz zwischen Leiterplattenoberseite und Chipoberseite lag im Bereich von ca. 17 K. Messungen dieser Temperaturdifferenz von 16 aufgebauten VCOs sind in Bild 3.10 zu sehen.

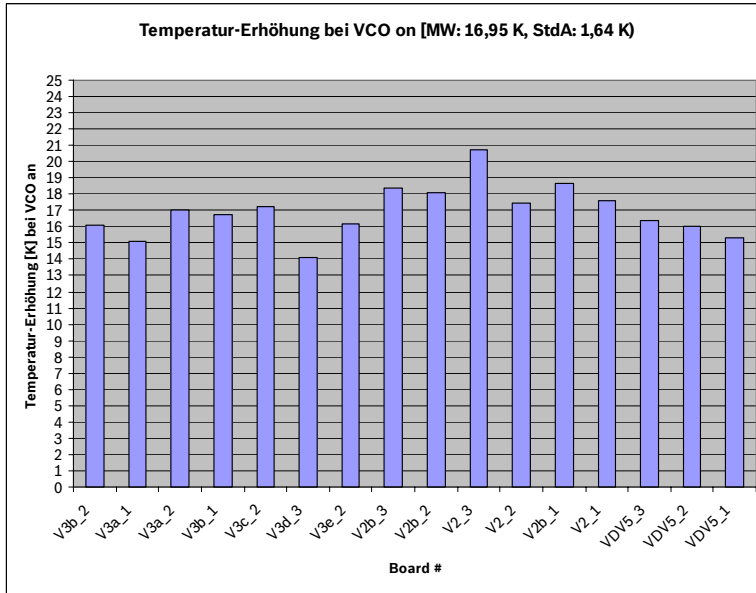


Bild 3.10: Entwärmung von SiGe-VCOs

Zur Entwärmung der Chips auf der Leiterplatte wurden mit ANSYS Thermo-simulationen durchgeführt. Kernaussage dieser Simulationsrechnungen ist eine effiziente Wärmespreizung bereits im Silizium. Hot Spots, die lokal mit starken Temperaturerhöhungen verbunden sind, werden eben aufgrund der thermischen Eigenschaften von Silizium weitgehend reduziert. In Bild 3.11 ist der Aufbau einer thermischen Simulation zu sehen.

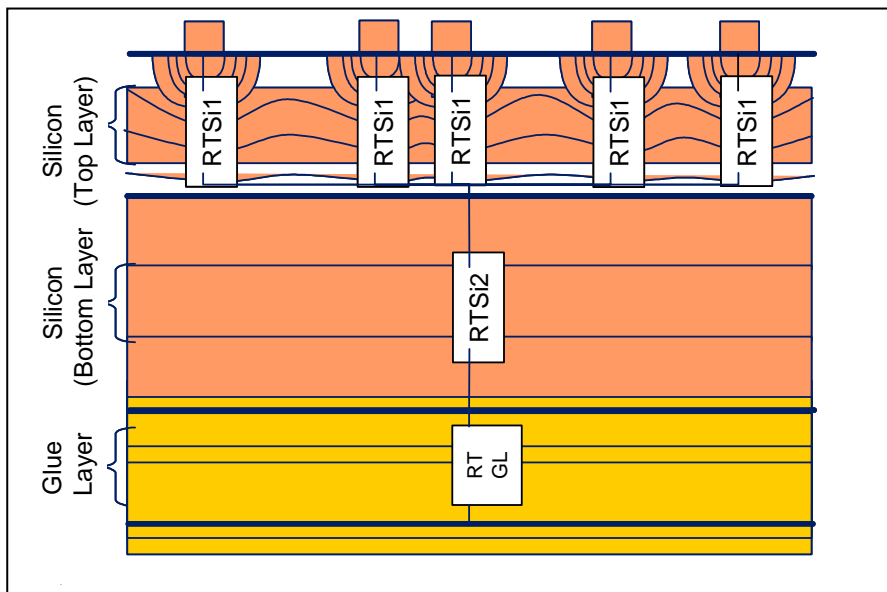


Bild 3.11: Netzwerkmodell zur thermischen Simulation

4. Demonstratoren mit SiGe-Komponenten

27. Februar 2008

Seite 39 von 46

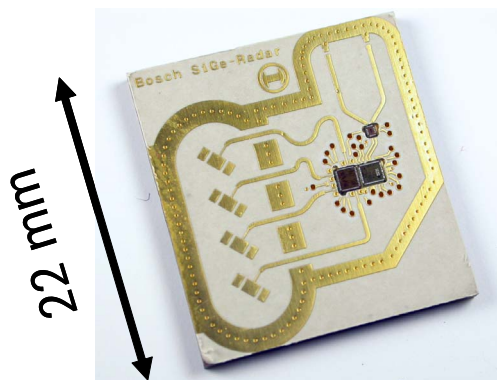
Inhalte des Arbeitspaketes:

- Integration von SiGe-Komponenten in Demonstratoren
- Anbindung der SiGe-Komponenten an die Schaltungperipherie von Radarsystemen
- Charakterisierung der Demonstratoren und Benchmarking mit ACC2
- Studie eines hochintegrierten SiGe-Radars

Fazit:

SiGe-VCOs wurden erfolgreich in ACC2-HF-Leiterplatten integriert und an die Schaltungperipherie angebunden. Durch Frequenzstabilisierung über eine PLL konnte das von der Applikation geforderte Phasenrauschen erreicht werden. Weiterhin konnte über die PLL eine FMCW-Modulation mit hoher Linearität der Rampe angewandt werden. Durch Vergleich mit der Performance von ACC2-Modulen konnte die Eignung der entwickelten SiGe-Komponenten für Weitbereichsradare bestätigt werden.

Hochintegrierte SiGe-Radare zeigen ein herausragendes Potenzial bezüglich Bauraumreduzierung, Steigerung der Kosteneffizienz und Zuverlässigkeit.



Demonstratoren

27. Februar 2008

Seite 40 von 46

Integration VCO

Zur Verifikation der erarbeiteten Konzepte wurden verschiedene Demonstratoren aufgebaut und charakterisiert. Als erster wichtiger Demonstrator wurde der SiGe-VCO aus KOKON in die ACC2-Leiterplatte integriert. Im ACC2 wird ein Gunn-Oszillator zur Frequenzerzeugung eingesetzt. Der Gunn-Oszillator erfordert einen dreidimensionalen feinwerktechnischen Aufbau, was eine Hochintegration des Radars behindert. Das Volumen des Gunn-Oszillators beträgt, wie aus Bild 4.1 abgeschätzt werden kann, ca. 1 cm^3 . Bild 4.1 zeigt weiterhin die Größe der HF-Leiterplatte von ACC2. Neben dem Gunn-Oszillator enthält die HF-Leiterplatte die Antennenelemente, den Referenzoszillator (DRO) und die Mischerdioden nebst Verteilnetzwerk.

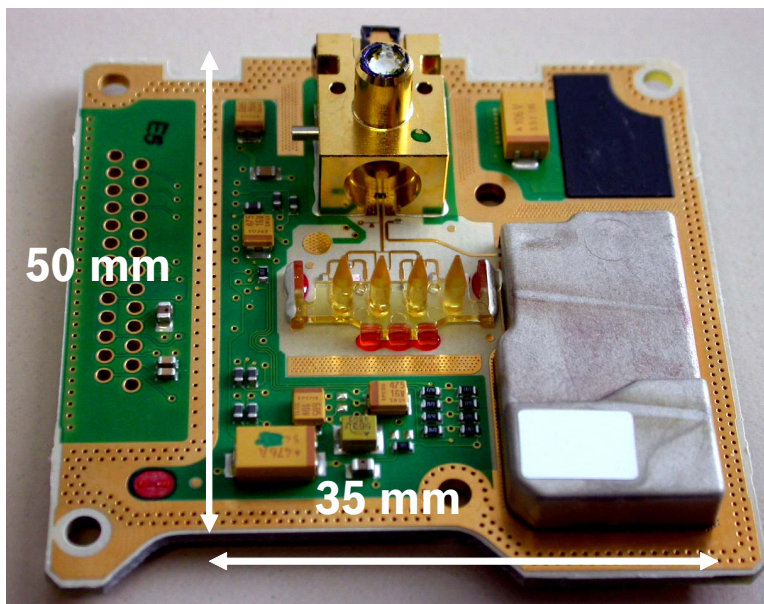
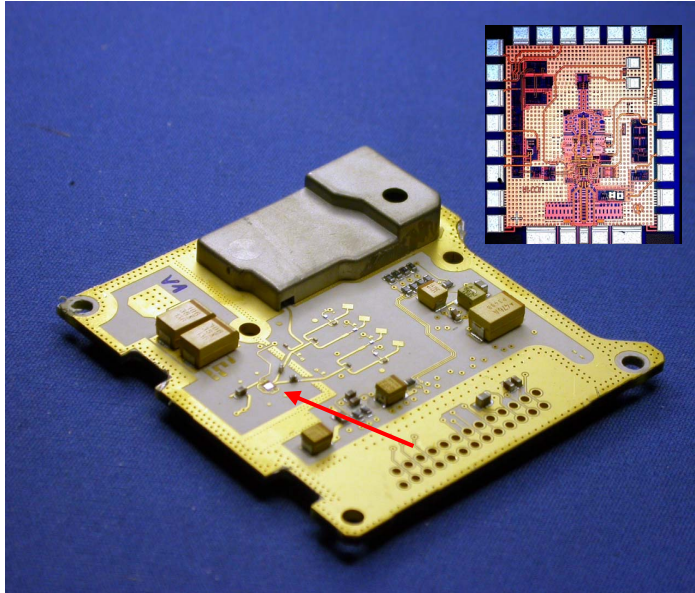


Bild 4.1: HF-Leiterplatte (ACC2)

Der SiGe-VCO wurde in Chip on Board-Technologie in die HF-LP von ACC2 integriert. Dies erforderte weiterhin die Adaption des HF-Verteilnetzwerkes, da für den SiGe-VCO ein differentieller Übergang mit zwei Ausgängen Verwendung fand. Bild 4.2 zeigt wiederum eine ACC2-HF-Leiterplatte mit integriertem SiGe-VCO. Aus Bild 4.2 wird offensichtlich, welchen Vorteil die Verwendung von SiGe-Komponenten bzgl. der Hochintegration bietet. Weiterhin ist ersichtlich, dass eine Darstellung des Referenzoszillators in SiGe ein weiterer wichtiger Schritt zur Hochintegration darstellt.



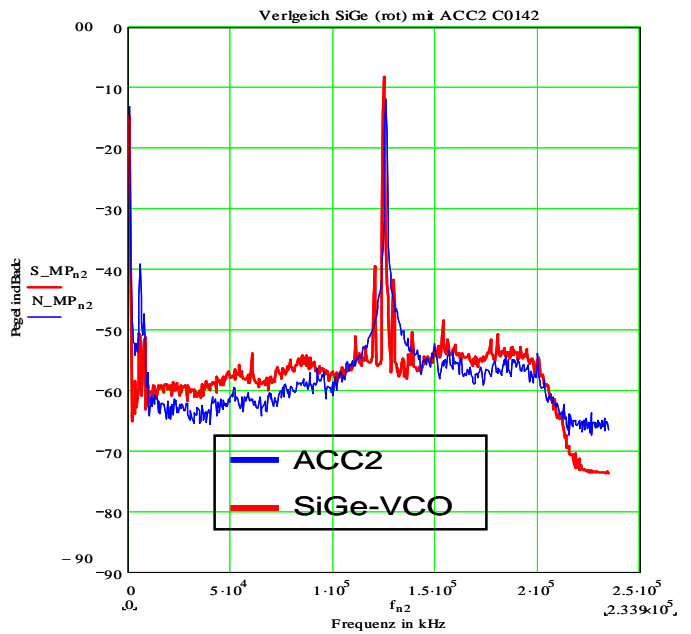
27. Februar 2008

Seite 41 von 46

Bild 4.2: ACC2-HF-LP mit SiGe-VCO

Zur Verifikation des Konzeptes wurde der SiGe-VCO an die Ansterelektro-
nik angebunden. Über eine PLL wird hierbei die Frequenz des VCOs stabili-
siert und die Frequenzrampen für das FMCW-Verfahren werden generiert.
Durch Anbindung an den Referenzoszillator über die PLL konnte ein Phasen-
rauschen von -86 dBc/Hz bei 100 kHz Frequenzablage erzielt werden, was
innerhalb der geforderten Spezifikationen liegt.

Bild 4.3 zeigt die Funktionsweise des Radarsensors mit SiGe-VCO am Bei-
spiel eines Frequenzscans für ein Normziel. Zum Vergleich wurde ein ACC2-
Sensor als Benchmark herangezogen. Die erzielte Performance ist, wie Bild
4.3 veranschaulicht, vergleichbar, was das erzielte S/N und auch die
Peakbreite anbelangt. Diese Konzeptverifikation war ein wichtiger Schritt zur
Akzeptanz von SiGe-Komponenten für LRR-Sensoren.



27. Februar 2008

Seite 42 von 46

Bild 4.3: Frequenzscan an Normziel

Hochintegriertes Radar

In einem zweiten Schritt wurde in Form einer Studie aus den in KOKON spezifizierten und entwickelten Komponenten ein hochintegriertes Radar dargestellt. Hierbei wurden neben dem VCO auch der Empfangsmischer und der Referenzoszillator in SiGe dargestellt. Bild 4.4 zeigt dieses hochintegrierte Radar mit vier Strahlen. Im Vergleich zu ACC2 konnte die Fläche der HF-Leiterplatte auf ein Viertel reduziert werden. Bild 4.4 bestätigt explizit das Potenzial von SiGe-Komponenten für 77 GHz Radare.

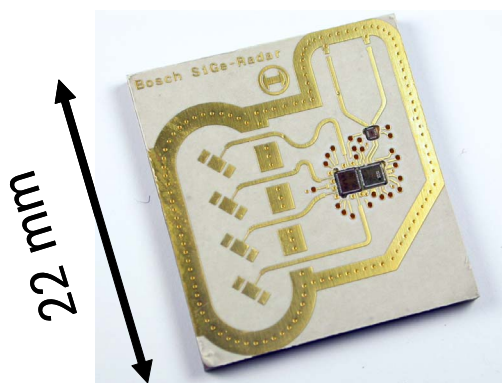


Bild 4.4: Studie hochintegriertes Radar

5. Entwicklung von LRR-Sensoren mit SiGe-Komponenten

27. Februar 2008

Seite 43 von 46

Inhalte des Arbeitspaketes:

- Entwicklung eines Weitbereichsradars basierend auf SiGe-Komponenten.
- Charakterisierung der Performance und der Zuverlässigkeit.
- Entscheidung über den Einsatz von SiGe-Komponenten in zukünftigen Radargenerationen.

Fazit:

Die Performance und die demonstrierte Zuverlässigkeit des entwickelten Weitbereichsradars mit SiGe-Komponenten führten zu der Entscheidung, SiGe-basierte Bauelemente als Schlüsselkomponenten zukünftiger Radargenerationen der Robert Bosch GmbH einzusetzen.



LRR-Sensoren

27. Februar 2008

Seite 44 von 46

Nach der Spezifikation, Entwicklung und Verifikation von SiGe-Komponenten wurde ein Fernbereichsradar basierend auf SiGe-Komponenten realisiert. Dieses Radar beinhaltet 4 SiGe-Mischer, einen SiGe-VCO und einen SiGe-DRO (Bild 5.1). Neben der Integration der SiGe-Komponenten bildete die Anbindung an die Steuergerätperipherie die zentrale Aufgabe dieses Arbeitspaketes. Hierunter fällt die Frequenzstabilisierung und die Erzeugung der Frequenzrampen über eine PLL sowie Filterung, Vorverstärkung und AD-Wandlung des ZF-Signals.

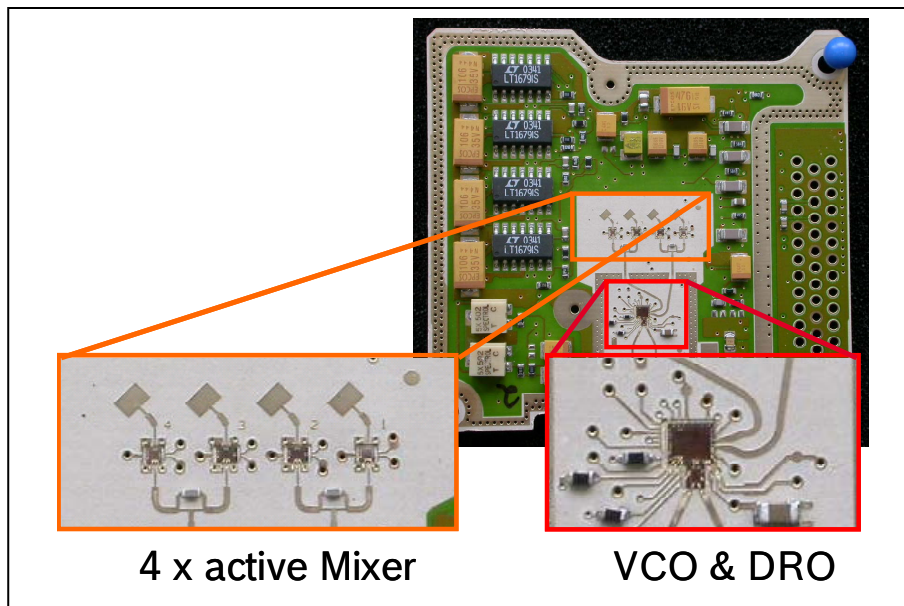


Bild 5.1: HF-Leiterplatte des SiGe-basierten Fernbereichsradars

Die Charakterisierung der aufgebauten Sensoren ergab folgende zentrale Ergebnisse:

- Über die Frequenzstabilisierung durch die PLL konnte ein Phasenrauschen bei 77 GHz von -89 dBc / Hz bei 100 kHz Ablage demonstriert werden, womit die gestellten Forderungen sogar übertroffen wurden.
- Mit dem aufgebauten Sensor konnte ein Modulationshub (FMCW-Verfahren) von mehr als 500 MHz realisiert werden. Diese signifikante Erhöhung des Hubes gegenüber ACC2 ist dem Einsatz des SiGe-VCOs zuzuschreiben.
- Mit diesen Sensoren konnten Objekte in einer Entfernung von mehr als 150 m detektiert werden. Eine Analyse der Ursachen für das ermittelte S/N ergab ein signifikantes Optimierungspotenzial durch einen erhöhten Integrationsgrad.

- Mit dem vierstrahligen Radar war analog zum ACC2 Winkeldetektion möglich.
- Das entwickelte Entwärmungskonzept konnte mit Hilfe der durchgeführten Erprobungen verifiziert werden.

27. Februar 2008

Seite 45 von 46

Beispielhaft ist in Bild 5.2 das Sendespektrum mit ausgezeichnetem Phasenrauschen zu sehen.

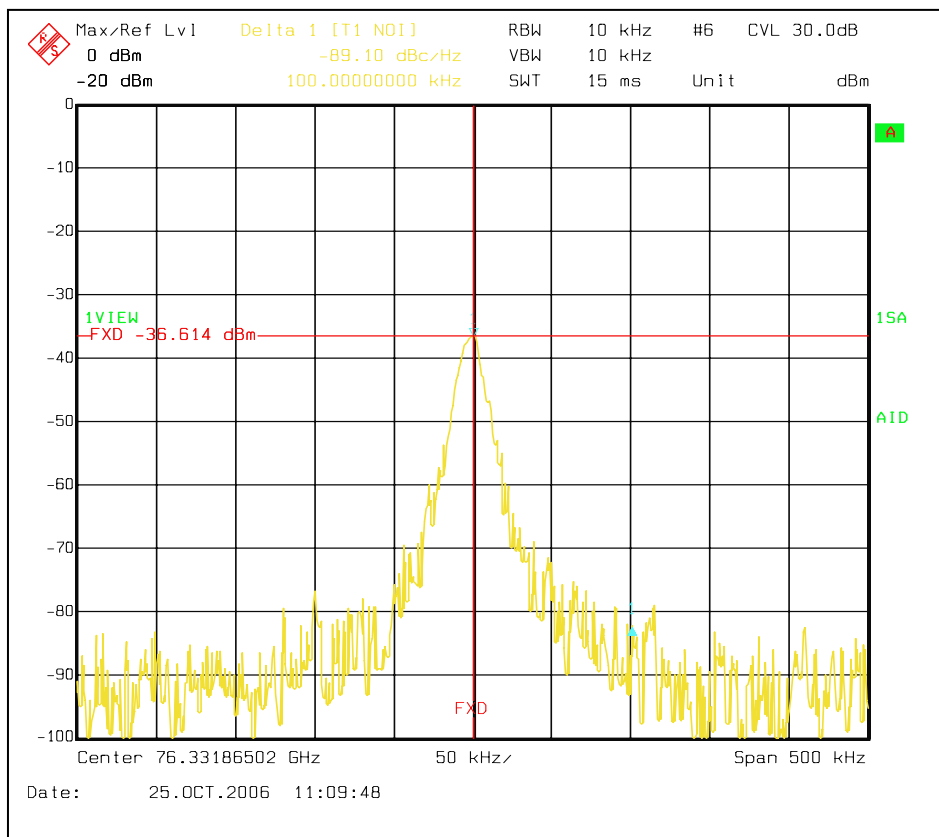


Bild 5.2: Sendespektrum des SiGe-basierten Radars

Nach erfolgreichen Fahrversuchen und Verifikation der Konzepte aus KOKON wurde der Entschluss gefasst, SiGe-MMICs in der kommenden Generation des Weitbereichsradars der Robert Bosch GmbH einzusetzen (LRR3). Damit wird basierend auf Entwicklungen aus „KOKON“ weltweit das erste Silizium-basierte Radar auf den Markt gebracht. Die Fertigung dieses Radarsensors wird am deutschen Standort Kusterdingen erfolgen.



Veröffentlichung der Ergebnisse

27. Februar 2008

Seite 46 von 46

M.Schneider, GeMIC 2005, Ulm, 2005

J.Hildebrandt, Th.Walter, EEEfCOM 2005, Ulm, 2005

M. Schneider, Th. Walter, "Hochintegrierte 77 GHz Weitbereichsradarsensorik für zukünftige Fahrerassistenzsysteme", Öffentliches Statusseminar des BMBF Verbundvorhabens „Kfz-Höchstfrequenz-Elektronik KOKON“, Radio-TecC 2005, 26.-27. Oktober 2005, Berlin

J.Hildebrandt, Th.Walter, EEEfCOM 2006, Ulm, 2006

D.Freundt, Th.Walter – Fachforum Fahrerassistenzsysteme, Heilbronn, 2006.

D.Steinbuch – VDE-Kongress 2006, Aachen, 2006

J.Hildebrandt, Th.Walter, EEEfCOM 2007, Ulm, 2007

D.Steinbuch, öffentliches Abschlussseminar „KOKON“, München, 2007

D.Freundt, B.Lucas, „Long Range Radar sensor for high-volume driver assistance market“, Veröffentlichung bei der SAE2008