

Infineon Technologies AG



Abschlussbericht zum Teilvorhaben Halbleiterbasierende innovative Sensorik zur Windfeldmessung

des Verbundprojekts

URBANSens

**Umwelteffiziente Flugroutenberechnung autonomer, vernetzter
Flugsysteme mit innovativer Sensorik zur Windfeldmessung**

Förderkennzeichen:	20D2106A
Zuwendungsempfänger:	Infineon Technologies AG
Verbundprojekt:	Umwelteffiziente Flugroutenberechnung autonomer, vernetzter Flugsysteme mit innovativer Sensorik zur Windfeldmessung
Teilvorhaben:	Halbleiterbasierende innovative Sensorik zur Windfeldmessung
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2022 - 30.06.2025
Zusammenstellung:	Gábor Pfitzner

Gefördert durch:



Luftfahrtforschungsprogramm VI
LuFo VI: Programm 2020 – 2024



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALTSVERZEICHNIS

I.	Kurzbericht.....	1
I.1	Aufgabenstellung.....	1
I.2	Voraussetzungen.....	1
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	4
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
II.	Eingehende Darstellung.....	6
II.1	Projektergebnisse	7
II.2	Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	39
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	39
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses.....	40
II.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	40
	Anhänge	41
	Veröffentlichungen	41
	Tabellen	41
	Abbildungen.....	42

I. Kurzbericht

I.1 Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben URBANSens hatte den effizienten Einsatz vernetzter unbemannter Luftfahrzeuge (UAS) in einer urbanen Umgebung durch die Entwicklung von neuen Sensor- und Kommunikationsstrategien sowie neuartiger Regelungsmethoden zur Ausnutzung von lokalen Wettereffekten als Vorgabe.

Die erarbeiteten Beiträge adressieren das förderpolitische Ziel „Leistungsfähige und effiziente Luftfahrt“ mit dem Fokus „Neue Mobilität der Zukunft“. Die untersuchten Technologien sind außerdem von Belang für eine umweltfreundlichere bemannte Luftfahrt, z.B. im Bereich der "Urban Air Mobility".

Ein Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines Flugbahnplanungsalgorithmus und der notwendigen Bahnregelung zur energieeffizienten Nutzung eines UAS Netzwerks im urbanen Gebiet. Dies ist notwendig, um einen umweltaffizienten Einsatz von UAS in urbanem Gebiet zu gewährleisten. Das Erstellen dieser Flugpläne in einem komplexen urbanen Umfeld erfordert detaillierte Kenntnis der aktuellen mikroskaligen meteorologischen Bedingungen, welche nur schwer vorhersagbar sind.

Im Rahmen des Teilvorhabens „Halbleiterbasierende innovative Sensorik zur Windfeldmessung“ wurde der Einsatz von radarbasierten und akustischen Sensoren zur Windfeldmessung untersucht und weiterentwickelt.

Auf Seiten der Infineon Technologies AG war das Ziel, eine Sensorik für die Messung der lokalen Windgegebenheiten im Nah- und Mittelbereich eines UAS auf Basis von akustischen und radarbasierten Sensoren zu realisieren. Hierzu wurde zum einen den akademischen Partnern im Projekt die jeweils verfügbare Sensortechnologie von Infineon zur Verfügung gestellt, zum anderen war vorgesehen, daß Infineon die erforderlichen Sensorparameter für eine Weiterentwicklung von den Partnern erhält und das erarbeitete wissenschaftliche Know-How an Infineon in der Rolle als Industriepartner übertragen wird.

I.2 Voraussetzungen

Die fortschreitende Urbanisierung erfordert neue, umweltfreundliche und leistungsfähige Mobilitätskonzepte. Elektrisch betriebene unbemannte Flugsysteme (UAS) bieten ein großes Potential zur Bewältigung der „Letzte-Meile-Logistik“. Einerseits bietet diese Technologie Vorteile, wie die Reduzierung des städtischen Verkehrs und eine drastische Verkürzung der Lieferzeiten, insbesondere für abgelegene Standorte, andererseits muss die Energieeffizienz sorgfältig geprüft werden, da UAS im Vergleich zu konventionellen Liefersystemen eine geringere Nutzlast aufweisen.

Zur energieeffizienten Flugwegplanung für UAS sind Verbesserungen im Bereich der Bahnplanungs-Algorithmik und hierfür eine verbesserte Messung des Windfeldes erforderlich. Bisherige Messverfahren erfassen lediglich die Windverhältnisse am Fluggerät selbst, daher sollten im Rahmen des Projektes grundlegende Arbeiten zur Bewertung und Entwicklung von Sensorik zur Messungen des Windfeldes in der Umgebung des UAS unternommen werden.

Zur Gewinnung dieser Echtzeit-Messdaten für die Flugbahnplanung wurden die Messprinzipien „Radar“ (in der Meteorologie etabliert) sowie „Infraschall“ (bekannt aus dem Tierreich, technisch nicht erschlossen) betrachtet.

Radar in meteorologischen und automobilen Anwendungen

Radarsysteme kommen bereits in der Meteorologie, u.a. für die Ortung und Erkennung der Bewegung von Unwettern, Böenfronten, Windscherungen und Turbulenzen, zum Einsatz. Diese Systeme decken einen Frequenzbereich von 2 GHz bis üblicherweise 35 GHz ab und die eingesetzten Bandbreiten sind sehr schmal. Alle beschriebenen Systeme sind sehr groß und schwer und somit nicht für Integration in UAS geeignet. Radarsysteme mit Frequenzen über 100 GHz mit dem Ziel der Erkennung örtlicher meteorologischer Phänomene im Bereich von 10 bis 1000 m sind nicht bekannt.

Zur Untersuchung stand die Einsetzbarkeit von Radarsystemen aus dem Automobilsektor, wo Erkennung und Entfernungsbestimmung von Hindernissen die Kernaufgaben bilden. Mit Frequenzen im Sub-Terahertz-Bereich und aufgrund ihres geringen Gewichtes und Volumens bieten diese Systeme grundsätzlich die Voraussetzungen für eine UAS-Integration.

Infraschall-Windsensoren

Derzeit sind keine Systeme bekannt, die mittels Infraschall Aufwindgebiete oder Turbulenzen detektieren. Halbleiterintegrierte MEMS-Mikrofone bieten neben geringer Größe und geringem Leistungsbedarf hohe Empfindlichkeit, Linearität und Dynamik. Allerdings liegen die untere Grenzfrequenzen bei ca. 40 Hz, weshalb aktuelle Modelle für Infraschall nicht geeignet sind.

Die Nutzbarmachung akustischer Sensoren für Infraschall in Verbindung mit hochentwickelten Signalverarbeitungsalgorithmen zur Erschließung für UAS bildet Gegenstand der in URBANSens durchgeführten Untersuchungen.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt URBANSens wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20D2106A (Infineon Technologies AG) gefördert.

An der Durchführung waren folgende Partner beteiligt:

- Infineon Technologies AG
- Ruhr-Universität Bochum:
 - Lehrstuhl für Integrierte Systeme (RUB)
- Technische Universität Dresden:
 - Professur für Flugmechanik und -regelung (TUD-FMR)
 - Professur für Hochfrequenztechnik (TUD-HFT),
 - Professur für Sprachtechnologie und Kognitive Systeme (TUD-STKS).

Infineon Technologies AG übernahm in URBANSens die Konsortialführung.

Mit dem Online-Kick-Off zu Projektbeginn im Januar 2022 erfolgte der Start der Aktivitäten in den einzelnen Arbeitspaketen; im Mai 2022 wurde ein ergänzendes Online-Kick-Off mit dem Projektträger DLR durchgeführt, in dem eine detaillierte Vorstellung der Partner und ihrer Aktivitäten erfolgten. Präsenztreffen des gesamten Konsortiums fanden jeweils in Bochum (2023), München (2024) und Dresden (2025) statt.

Arbeitsstand und Planung im Gesamtkonsortium wurden fortlaufend im monatlichen Jour fixe unter Leitung von Infineon Technologies abgestimmt.

Im Rahmen der Projektkoordination erfolgte eine fortlaufende Überwachung und Bewertung von Risiken. Diese wurden in den regelmäßigen Projektbesprechungen im Kontext mit den betreffenden Arbeitspaketen adressiert, um die Auswirkungen auf die Zielerreichung sowie auf den den Projektverlauf analysieren zu können.

Von Projektbeginn an war unzureichend geklärt, welche physikalischen Phänomene für eine hinreichend gute Detektion von Scherwinden mittels Mikrofon- und Radarmessungen in Frage kommen können. Daher war es nötig, weit ausführlicher als im Projektantrag geplant die Grundlagen zu erarbeiten und deren Eignung messtechnisch zu prüfen. Auf das technische Risiko im Zusammenhang mit den gewählten Messprinzipien wurde bereits im Projektantrag verwiesen.

Da weder durch Radarsensoren noch durch MEMS-Mikrofone Ergebnisse aus der Messung von Luftströmungen zeitgerecht im Labor nachgewiesen werden konnten, die für den gewünschten Einsatz verwertbar sind, wurde eine Projektverlängerung um sechs Monate beantragt und bewilligt.

Für Infineon Technologies und den Partner Ruhr-Universität Bochum stand hierbei im Vordergrund, die Dynamikeigenschaften der Radarsensoren weiter zu verbessern und ihren Einsatz in der Labormesstechnik für die Fortführung der Grundlagenuntersuchungen zu ermöglichen.

Für das Gesamtkonsortium eröffnete die Verlängerung der Projektlaufzeit die Möglichkeit, erarbeitete Teilergebnisse und Erkenntnisse zu konsolidieren und noch noch ausstehende Nachweise zu erbringen.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Energie-effiziente Flugwegplanung für UAS

Mikroskalige (10 - 100 m) Windauftriebsphänomene wie thermische Konvektion werden häufig von Vögeln und Segelfliegern genutzt, um ihre Reichweite zu erhöhen oder ihren Energieverbrauch zu senken. Viele Starrflügel-UAS haben ähnliche Flügelbelastungen wie gewöhnliche Seglervögel (Apodiformes) und Segelflugzeuge. Daher wurden in den letzten Jahren Studien durchgeführt, um die Energieeffizienz von kleinen UAS durch die Anwendung der sogenannten "Soaring Control" zu erhöhen. Diese Voruntersuchungen zeigen, dass ein großes Potenzial in der Ausnutzung lokaler Windphänomene (Talwinde, Hangwinde, etc.) in der UAS-Führung und -Steuerung liegt, haben jedoch folgende Schwächen: Es wird davon ausgegangen, dass das Windfeld um das Flugzeug bekannt ist, oder es werden rudimentäre Schätzungen der Thermik vorgenommen, die auf der Abschätzung der Energie des UAS basieren. Es wird ein theoretisches Szenario oder eine einzelne spezifische Quelle für Aufwinde, z. B. die Leeseite eines Bergrückens, betrachtet. Außerdem wird nur ein einzelnes, allein operierendes UAS berücksichtigt.

UAS-gestützte Windmessung

Die Messung von Windgeschwindigkeit und -richtung kann auf verschiedene Weise mittels UAS durchgeführt werden. Starrflügel-UAS und größere Luftfahrzeuge nutzen üblicherweise Strömungssonden; Multirotor-UAS nutzen Ultraschall-Anemometer mit sehr hoher zeitlicher Auflösung. Die Messung kann auch indirekt durch die Flugdynamik erfolgen: Mittels kinematischer Modelle wird die Wind-Information allein aus der Raumlage berechnet, die durch eine inertielle Messeinheit bestimmt wird. Dynamische Modelle berücksichtigen zusätzlich die Flugdynamik, d.h. die Wirkung von Kräften und Impulsen auf die Beschleunigung des Luftfahrzeugs. Die Systeme sind allerdings nicht in der Lage, Messungen auf Entfernung durchzuführen; dies stellt eine große Einschränkung dar und verringert die Wahrscheinlichkeit, den günstigsten Flugweg zu finden, erheblich. Die aktuell einzige verfügbare Methode mit der Fähigkeit, Windfeldparameter auf Entfernung zu messen, ist mittels eines Dauerstrich-LIDAR realisiert. Das System ist allerdings nicht komplett auf dem UAS untergebracht: die Auswerte-Elektronik befindet sich am Boden und ist mit langen Glasfaser-Kabeln mit dem UAS verbunden.

Radar in meteorologischen und automobilen Anwendungen

Radar kommt bereits verbreitet auch in der Meteorologie zum Einsatz. Die dort üblichen Radarsysteme sind sehr groß und sind entweder stationär, auf Flugzeugen oder auf Fahrzeugen montiert. Diese Systeme arbeiten in Reichweiten von einem bis mehreren 100 km und Auflösungen im Bereich von 1 – 100 m. Eine Ausnahme bilden die (üblicherweise stationären) nach oben gerichteten Wind-Profil-Radare: sie beobachten ein

seitlich vergleichsweise kleines, kegelförmiges Gebiet bis hinauf in die Ionosphäre. Der abgedeckte Frequenzbereich erstreckt sich von 2 GHz bis üblicherweise 35 GHz, je nach Anwendung auch bis 95 GHz. Allerdings sind die eingesetzten Bandbreiten mit einer relativen Bandbreite von maximal 10% sehr schmal. Alle beschriebenen Systeme sind sehr groß und schwer und damit nicht für Integration in UAS geeignet. Radarsysteme mit Frequenzen über 100 GHz mit dem Ziel der Erkennung örtlicher meteorologischer Phänomene im Bereich von 10 bis 1000 m sind nicht bekannt. Dem stehen Radarsysteme für den Automobilsektor gegenüber, wo Erkennung und Entfernungsbestimmung von Hindernissen die Kernaufgaben bilden. Die verfügbaren Systeme sind sehr klein, und Frequenzen im Sub-Terahertz-Bereich (zwischen 100 und 500 GHz) rücken in den Focus. Solche Radarsysteme eignen sich auch aufgrund ihres geringen Gewichtes und Volumens für eine UAS-Integration.

Infraschall-Windsensoren

Die Idee zur Erforschung der Detektion von Aufwindgebieten mittels Infraschall stammt aus dem Tierreich: viele Vögel können Töne mit einer Frequenz unter 20 Hz wahrnehmen. Der Grund für diese Fähigkeit ist nicht endgültig geklärt. Die wahrscheinlichste Erklärung ist, dass Vögel sie nutzen, um entfernte Aufwindgebiete (um dorthin zu fliegen) oder turbulente Zonen, z.B. Stürme (um diese Zonen zu meiden), zu orten. Akustische Sensoren für Infraschall und hochentwickelte Signalverarbeitungsalgorithmen (z.B. auf Basis von KI-Methoden) mit diesen Fähigkeiten wären für UAS von großem Nutzen. Halbleiter-integrierte MEMS-Mikrofone (MEMS = mikro-elektromechanisches System) bieten hierfür viele Vorteile. Neben geringer Größe und geringem Leistungsbedarf bieten sie hohe Empfindlichkeit, Linearität und Dynamik. Allerdings liegt die untere Grenzfrequenz bei ca. 40 Hz, weshalb aktuelle Modelle überwiegend nicht für Infraschall geeignet sind. Manche MEMS-Mikrofone integrieren bereits Treiber- und Auslese-Schaltkreise im Package, wodurch die Größe verringert und die Rauschempfindlichkeit verbessert wird. Eine Integration des AD-Wandlers kann die Rauschempfindlichkeit weiter verbessern, da somit alle analogen Komponenten im package integriert wären. Um auch unter rauen Umweltbedingungen die Funktionstauglichkeit sicherzustellen, müssen die Mikrofone durch geeignete Massnahmen am Gehäuse geschützt werden.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Außer der Zusammenarbeit im Konsortium fand keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen statt, die über den üblichen informellen Austausch unter Entwicklern und Wissenschaftlern hinausging.

II. Eingehende Darstellung

Das Verbundprojekt URBANSens gliederte sich in nachfolgend abgebildeten technischen Hauptarbeitspakete und Aufgabenfelder:

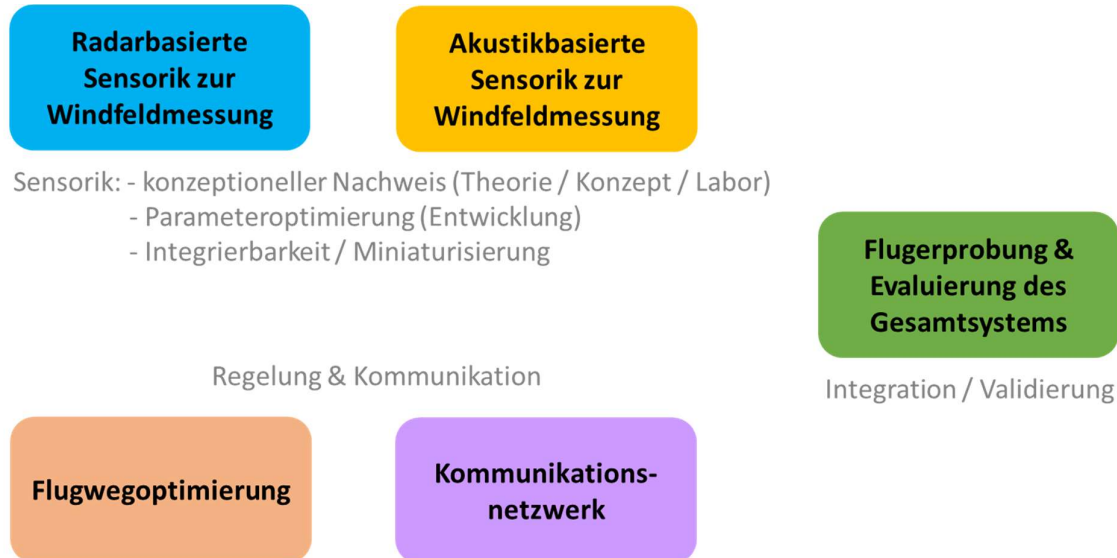


Abbildung 1: Darstellung der technischen Arbeitspakete und spezifischen Aufgabenfelder im Verbundprojekt URBANSens

Projektmanagement: Infineon Technologies koordinierte das Gesamtvorhaben, hielt hierbei das Berichtswesen aufrecht und überwachte die Risiken im Projektverlauf.

Flugwegoptimierung: Infineon Technologies war an den wissenschaftlich-technischen Arbeiten nicht unmittelbar beteiligt (Federführung: TUD-FMR).

Kommunikationsnetzwerk: Infineon Technologies war an den wissenschaftlich-technischen Arbeiten nicht unmittelbar beteiligt (Federführung: TUD-HFT).

Radarbasierte Sensorik zur Windfeldmessung: Die Sensorentwicklung zur Bestimmung des Windfeldes mittels radarbasierter Sensoren bildete das umfangreichste Aufgabenfeld für Infineon Technologies (Zusammenarbeit mit RUB, TUD-HFT, TUD-STKS).

Akustikbasierte Sensorik zur Windfeldmessung: Infineon Technologies stellte Sensoren zur Infraschallmessung bei (Zusammenarbeit mit TUD-STKS, TUD-FMR).

Flugerprobung & Evaluierung des Gesamtsystems: Hierzu erfolgten keine Aktivitäten seitens Infineon Technologies. Aufgrund von Verzögerungen im Projektverlauf konnte keine weiterentwickelte Sensortechnologie im Flugbetrieb erprobt und bewertet werden.

Die in der Vorphase der Projektplanung skizzierten Hauptarbeitspakete 3 (*Wetterdaten & Downscaling*) und 4 (*Lidarbasierte Sensorik zur Windfeldmessung*) wurden im deutschen URBANSens-Konsortium nicht umgesetzt.

II.1 Projektergebnisse

Hauptarbeitspaket 0 – Projektkoordination

Infineon Technologies koordinierte das Gesamtvorhaben; Aufwände in diesen Arbeitspaket wurden nicht geltend gemacht.

Die Erreichung der Projektziele wurde in Abstimmungen zu den betreffenden Arbeitspaketen sowie insbesondere anhand der Feststellungen zu den Meilensteinen bzw. vorgegebenen Berichten analysiert und verfolgt. Wegen der abzusehenden Abweichungen vom Arbeitsprogramm nach Ablauf des zweiten Projektjahres wurden im Rahmen des Risikomanagements die in den Vorhabensbeschreibungen benannten bzw. neu erkannten Risiken zu allen relevanten Bereichen durch das Konsortium gelistet und mit Aussagen zum Arbeitsstand neu bewertet; der Projektträger wurde hierzu informiert. In weiten Bereichen waren Risiken nicht eingetreten oder hatten nur geringe Auswirkungen.

Aufgrund des zeitlichen und ressourcenmäßigen Ansatzes in der Projektplanung konnten die Erkenntnisse und Spezifikationen aus den Grundlagenuntersuchungen und Laborversuche nicht vollständig zeitgerecht in der gewünschten Detaillierung für die Sensorentwicklung und -integration bereitgestellt werden. Weder mit der bestehenden noch mit der im Projektverlauf weiterentwickelten Sensortechnologie konnte eine Detektion bzw. Bestimmung von Windvektordaten erreicht werden; dies gilt sowohl für die Radar- als auch für akustische Sensoren. Die Untersuchungen zur Erfassung verwertbarer Phänomene auf Laborebene sowie ihrer möglichen Messbarkeit im Feld wurde daher in beiden Bereichen bis Projektende fortgesetzt; die Strategie im Radarbereich zielte dabei auf das Variieren der Luftqualität bei den Labormessungen.

Für die im Rahmen des Projekts erbrachten technischen Weiterentwicklungen von Sensoren konnte der praktische Nachweis nicht im gewünschten Umfang werden; dies betrifft insbesondere auch Planung und Ziele von Infineon Technologies zum möglichen Einsatz kleiner, preisgünstiger Sensoren aus etablierten Technologielinien bei UAS bzw. in der Luftfahrt allgemein. Auf dem Gebiet der Radaruntersuchungen und des Radarsensoreinsatzes im Labor stand gegen Ende des ursprünglich geplanten Projektverlaufs die bereits geplante Anwendung neu entwickelter Schaltkreise für den Systemprototyp an, deren Ergebnisse Aufschlüsse über die Chancen des Einsatzes der behandelten Radarsensoren zur Windfeldmessung bzw. zu darüber hinausgehenden möglichen Einsatzgebieten geben sollten; die Integration zum Systemprototyp verzögerte sich jedoch aus technischen Gründen und konnte bis Projektende nicht abgeschlossen werden.

Eine Projektverlängerung wurde mit der Vorgabe in die Wege geleitet, unter Bewertung der bestehenden Situation und Ergebnisse möglichst nahe an Erreichung der ursprünglichen Ziele heranzukommen.

Das Projektkonsortium bewertete abschließend die in den Vorhabensbeschreibungen formulierten „SMARTen“ Ziele, um mit den hierzu geeigneten Metriken eine geeignete, aussagefähige Gesamtbewertung des Projekterfolges darzulegen.

Nachfolgende Tabelle veranschaulicht stichpunktartig einige wesentliche Ergebnisse, die Dank der Verlängerung der Projektlaufzeit erzielt werden konnten.

Tabelle 1: Ergebnisstand vor / mit Verlängerung der Projektlaufzeit

Arbeitspaket	Reguläre Projektlaufzeit	Projektverlängerung
Flugwegoptimierung	Flugbahnregelung für Energieeffizienz, autark (ohne Sensorbeteiligung)	abgeschlossen Flugbahnregelung offen für Sensoreinsatz
Kommunikationsnetzwerk	Kommunikation des Drohnenschwarms autark (ohne Sensorbeteiligung) original vorgesehener „FLARM UAS E-ID“ Standard vom Hersteller abgekündigt	abgeschlossen Kommunikationsnetzwerk offen für Sensoranwendung (Positionsdaten, Uhrzeitdaten...) Neue Hardware > platzsparender Aufbau des Kommunikationssystems
Radarbasierte Sensorik	Strömungsmessungen ohne Nachweis Entwicklung Sensorsysteme techn. verzögert (Leistung, Frequenz, SNR)	erste Messeffekte zu Geschwindigkeit von Partikelströmen bei Partikelgrößen ~ 180 µm (extrapoliert: < 100 µm) revidierter Laborprototyp mit 480 GHz, Einsatz für parameteroptimierte Labormessungen (erwartet: ~ 10 µm) (Flugeinsatz zeitlich nicht mehr möglich)
Akustikbasierte Sensorik	Ansatz mit Analogmikrofon-Array (Gewichtsprobleme), später Digitalmikrofon-Array; Simulation. Einschränkungen aufgrund Geometrie, Signalübertragung, Synchronisierung, Störquellen... Ortungsversuche mit Infraschall-Referenzquelle (analog)	Detektion mit Infraschall-Referenzquelle nachgewiesen (Analog-Array) Ortungsversuch / Evaluation von Störquellen im Flugversuch mit Infraschall-Referenzquelle (digital)
Flugerprobung	Erste Versuche Flugbahnregelung / Kommunikationssystem	Miniaturisierung und Integration: Optimierungen & vereinfachtes Mikrofonarray im Flugversuch (Detektion / Ortung der Infraschall-Referenzquelle)

Hauptarbeitspaket 4: Radarbasierte Sensorik zur Windfeldmessung

Hauptarbeitspaket 4 verfolgte den Einsatz von Terahertz-Radar für Windfeldmessungen mittels Integration kostengünstiger Automotive-Radar-Technologie in das Luftfahrzeug. Für die Anwendung der entsprechenden Radartechnologie trug Infineon Technologies in Zusammenarbeit mit RUB zur Entwicklung bzw. Fertigung von Sensorsystemprototypen bei und optimierte die Schaltungskomponenten eines Radarchips, um Leistungssteigerungen zu erzielen sowie Störeinflüsse zu reduzieren.

Radar-Untersuchungen und Messungen von Scherströmungen

Labormessungen von Turbulenzen und Scherströmungen wurden mit vorhandener Labortechnik durchgeführt, um wichtige Erkenntnisse für die Anforderungen ans RADAR-Sensorsystem, wie Dynamikumfang, erreichbare Ortsauflösung usw., zu erlangen. Primäre Aufgabenstellung hierbei war es, Luftbewegungen mit Radarmessungen nachzuweisen. Hierzu bereiteten die Partner RUB mit TUD-HFT physikalische Grundlagen der Streuung elektromagnetischer Wellen an Aerosolen und Luftmolekülen auf und untersuchten die Nutzbarkeit der Phänomene für die Radarmessung. Messtechnische Untersuchungen wurden in den Laboren der Partner RUB und TUD-HFT durchgeführt; Abstimmungen zum Laboraufbau sowie zur Messdatenbewertung erfolgten im Zuge der fortlaufenden, langjährig etablierten Zusammenarbeit zwischen Infineon und RUB. Für die Range- und Doppler-Messungen (Entfernung, Ortsveränderung basierend auf Druckdifferenzen) der RUB wurde ein geeignetes Signalverarbeitungsverfahren entworfen und eingesetzt; dabei kamen bestehende FMCW-Sensoren (FMCW = Frequency Modulated Continuous Wave) mit 80 GHz und 240 GHz zum Einsatz.



Abbildung 2: Ultra-Breitband 80 GHz / 240 GHz FMCW Radarsysteme (RUB)

Die Untersuchungen konnten nicht im vorgesehenen Planungszeitraum abgeschlossen werden und wurden – gegenüber der ursprünglichen Zeitplanung von 6 Monaten – bis zum Ende des Projektes (einschließlich Verlängerung) weitergeführt, um eine detailliertere Betrachtung messbarer Phänomene zu ermöglichen. Auf Messungen im Windkanal wurden zugunsten von Untersuchungen mit Testaufbauten im Laborumfeld im Projektverlauf

verzichtet, da letztere als geeigneter für die Machbarkeitsanalyse angesehen wurden. Die bei Messungen mit bewegter Luft beobachteten Messeffekte konnten Messunsicherheiten und Störungen nicht zweifelsfrei ausschließen; jedes Phänomen verursachte einzeln zu schwache Reflexionen für die Detektion. Aussichtsreiches Nutzungspotenzial wurde in der Kombination mehrerer Phänomene gesehen. Nachdem anhand der Laborversuche zur Messung bewegter Luft mit den bestehenden Radarsensoren kein Messeffekt nachgewiesen werden konnte, wurden die Untersuchungen in der Folge auf neue Messungen mit Aerosolströmen und freien Partikeln umgestellt. Für die Messung eines Wind-Vektorfelds müssen Informationen über Entfernung und Bewegungsrichtung der Aerosole bzw. freien Partikel gewonnen werden, da die räumliche Genauigkeit der Flugroutenplanung davon abhängt. Daraus ergaben sich je nach Ansatz auch Anforderungen an die Bandbreite des Sensors: für ein dreidimensionales Windgeschwindigkeitsvektorfeld werden Informationen zur Entfernung benötigt. Dies kann über FMCW erreicht werden; für FMCW-Verfahren sind höhere Bandbreiten notwendig.

Der Sensor musste auch in der Lage sein, im Vergleich zur Sendeleistung sehr kleine Empfangsleistungen zu detektieren. Unter den Anforderungen an das Radarsystem ist daher besonders die hohe Dynamik hervorzuheben. Zusammenfassend konnten in einer frühen Phase als Sensoranforderungen für die zu optimierenden Schaltungen auch die die Eigenschaften verbessertes Phasenrauschen des VCO sowie eine verbesserte Rauschzahl des Empfangsmischers formuliert werden.

Da bei sehr geringen Partikelgrößen um $1\ \mu\text{m}$ noch kein Messeffekt nachgewiesen werden konnte, wurden weitere Laboruntersuchungen an der RUB mit größeren Partikeln vorgesehen und bis Projektende durchgeführt. Im Fokus stand dabei das Erstellen eines Messaufbaus mit verbesserten Partikelströmungseigenschaften. Hierzu kamen Partikel mit definierte Durchmessern und bekannten Materialeigenschaften zum Einsatz, deren Durchflussmenge mit einem Dispenser gesteuert werden konnte. Höhere Frequenzen wirken sich dabei positiv auf den Messeffekt aus, solange die Wellenlänge größer als der Partikeldurchmesser ist. Die Messungen sollten daher ab Mitte 2024 mit höherer Frequenz bzw. mit neuen Schaltkreisen fortgeführt werden. Hierzu war beabsichtigt, die Schaltkreise des Infineon B12HFC-Tapeout mit verbessertem Oszillator, Leistungsverstärker, Frequenzvervielfacher sowie Transmitter verfügbar zu machen. Aufgrund technisch bedingter Verzögerungen beim Aufbau des Sensor-Systemprototyps konnten Messungen mit höherer Frequenz bzw. mit neuen Schaltkreisen von Infineon jedoch trotz Verlängerung nicht mehr im Projektzeitrahmen umgesetzt werden.

Bei den mit den beiden RUB-Sensoren (80 GHz, 240 GHz) durchgeführten FMCW-Doppler-Messungen mit Glaspartikeln in verschiedenen Größen konnte ein Messeffekt im Frequenzspektrum beobachtet werden, dessen Intensität mit sinkender Partikelgröße abnimmt. Ist die Intensität zu schwach, um ein ausreichendes Signal-zu-Rauschverhältnis zu gewährleisten, können die Partikel nicht mehr detektiert werden. Dies ist bei den

verwendeten Sensoren, basierend auf einer Extrapolation der Messdaten, bei einem Partikeldurchmesser von etwa 100 µm der Fall. Die Messergebnisse ermöglichen damit die Definition einer unteren Grenze für den Einsatz dieser Sensoren zur Vermessung der Geschwindigkeit von Partikel- bzw. Aerosolströmen.

Entwicklung eines Sensor-System-Prototyps im Labormaßstab

Anhand der Testaufbauten und Laboruntersuchungen wurde die Realisierbarkeit eines Messsystems zur Bestimmung von Windströmen ermittelt. Mit den dabei durchgeführten Messungen wurden für die Applikation relevante Radarparameter, wie Betriebsfrequenz, Ausgangsleistung, Dynamik und kritische Antennenparameter, bestimmt. Auf Basis der erlangten Parameter sowie der erkannten Einschränkungen wurde das Systemkonzept eines Radar-Demonstrators für die Messung von Windströmen erarbeitet und in Richtung der Projektapplikation weiter konkretisiert. Im Rahmen der Grundlagenuntersuchungen seit Beginn des URBANSens-Projektes wurden Testaufbauten zur Untersuchung verschiedener Szenarien mit bewegter Luft beim Projektpartner RUB mit bestehenden 80 GHz- und 240 GHz-Radarsensoren im Laborumfeld definiert, abgestimmt und realisiert. Infineon Technologies stimmte sich bei der Integration und Untersuchung der Radarsensoren im Rahmen der fortlaufenden, etablierten Zusammenarbeit zwischen Infineon Technologies und RUB ab.

Mit der Bewertung der aufgenommen Messreihen konnten Parameter für die erste Iteration des zu entwickelnden Radarsensors abgeleitet werden. Obgleich die grundlegenden Laboruntersuchungen nicht im vorgesehenen Planungszeitraum abgeschlossen wurden, konnten im Laboraufbau mit den bestehenden Sensoren geeignete Ansätze zur Signalverarbeitung für die Messungen erarbeitet sowie bereits Systemparameter als Vorgaben für die Miniaturisierung und Halbleiterintegration gewonnen werden. Wie erwartet stellt die Messung der Windströme hohe Anforderungen an die Dynamik. Für die weitere Chip-Iteration zu entwerfende Schaltungen mußten daher bei der Optimierung neben verbessertem Phasenrauschen des VCO und verbesserter Rauschzahl des Empfangsmischers der Trennung von Sende- und Empfangsantennen Rechnung tragen.

Im Rahmen der Projektanwendung wurde ein speziell angepasster Sensor bereitgestellt, wofür ein Kompromiss aus Ausgangsleistung, Rauschen und Frequenz erforderlich war. Der gewählte Ansatz ist ein multistatisches System, das bei etwa 300 GHz arbeitet und in der B12HFC-Technologie von Infineon realisiert wurde, da diese eine Transitfrequenz um 300 GHz bietet. Das gewählte multistatische Konzept mit getrennten MMICs (Monolithic Microwave Integrated Circuit) für Sender und Empfänger minimiert das Risiko, den Empfänger direkt durch ungewolltes Durchsprechen des Senders zu übersteuern und somit zu sättigen. Auch können mit diesem Konzept mehrere Empfänger gleichzeitig verwendet werden, was unterschiedliche geometrischen Anordnungen ermöglicht.

Die Schaltkreise (URBANTX1, URBANRX1) wurden bei Infineon Technologies gefertigt und im Labor der RUB vermessen. Aufgrund von Unzulänglichkeiten wurde im Juni 2024 eine überarbeitete Version zur Produktion eingereicht, die im Frühjahr 2025 an der RUB eintraf; im Verlängerungszeitraum von URBANsens wurde daran gearbeitet, die MMICs zu einem Radarsystem zu integrieren und zu validieren.

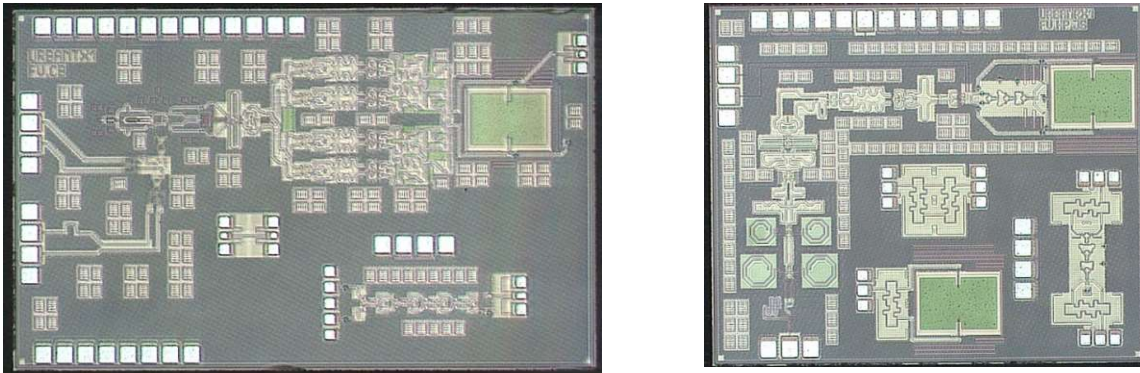


Abbildung 3: Bilder der MMICs URBANTX1 und URBANRX1 (RUB)

Der Sender-MMIC (URBANTX1) beinhaltet die Signalgenerierung und den Sendepfad des 300 GHz Radarsystems. Die Sendeantenne ist auf der rechten Seite des Chips zu erkennen; das Power-Combining Netzwerk vor der Antenne kombiniert vier zuvor parallele Pfade zu einem. Als Ergebnis der Sendeleistungsmessungen wurde eine maximale Leistung von -3 dBm ermittelt. Verglichen mit den im Vorfeld entwickelten Simulationsergebnissen zeigte sich allerdings eine deutliche Abweichung von bis zu 10 dB, mit denen die Ausgangsleistung des Sendesignals unter den Erwartungen lag. Diese Abweichung deutete auf ein unerwünschtes Verhalten im Combining-Netzwerk hin welches auf eine, durch die sehr langen Mikrostreifenleitungen und die hohen Frequenz von 300 GHz bedingte ungenaue Simulation oder einen nicht korrekt berücksichtigten Effekt zurückgeführt wurde. Aufgrund dieser Abweichungen erfolgte die vorgehend genannte Revision des MMICs wobei das Combining-Netzwerk vollständig neu entwickelt und simuliert wurde, dies verspricht nun eine Verbesserung auf etwa 5 dBm.

Auch der Empfangschip (URBANRX1) wurde im Labor auf Funktionsfähigkeit überprüft und hat sich dabei als funktional erwiesen.

In der Phase der Projektverlängerung (seit Frühjahr 2025 wird) wurde an einer System-Integration und Validierung der beiden MMICs zu einem Radarsystem gearbeitet. Aufgrund technisch bedingter Verzögerungen beim Aufbau der Backend-Hauptplatine des Sensor-Systemprototyps konnte das Sensorsystem auch bis zum verlängerten Projektende nicht fertiggestellt werden.

Miniaturisierung & Halbleiter-Integration

Die Arbeiten zur Miniaturisierung und Halbleiter-Integration zielten auf die Entwicklung und Implementierung eines in BiCMOS-Technologie realisierten Radar-MMIC im Terahertz-Betrieb für die Eignung zur Windfeldvermessung. Infineon Technologies fokussierte sich dabei auf den Entwurf und die Analyse der Schaltungskomponenten sowie deren Charakterisierung. Dafür wurden sowohl die massenfertigungstaugliche B11HFC-Technologie als auch die sich noch in der Technologieentwicklung befindende B12HFC-Technologie genutzt. Als Vorzüge der B12HFC-Technologie sind die deutlich höhere maximale Betriebsfrequenz des Silizium-Germaniums sowie die kleineren CMOS-Knoten für kompaktere digitale Schaltungen anzuführen. Infineon Technologies kooperierte hierbei für die Integration der Schaltungskomponenten eng mit Projektpartner RUB.

Da für die Anwendung sehr hohe Betriebsfrequenzen angestrebt werden mußten und dadurch eine genaue Vorhersage der real erzielbaren Leistungswerte und des Schaltungsverhaltens enorm erschwert wurde, erwies es sich als notwendig, Schaltungskomponenten mit gesteigerter Leistung iterativ zu entwickeln und – neben den Simulationen – in Testchips zu implementieren, um sie physisch zu untersuchen, abzugleichen und die verwendeten Modelle zu kalibrieren.

Konkret wurden hier insbesondere die Schaltkomponenten leistungsstarker Ausgangsverstärker bei 240 GHz, eine rauscharme Signalquelle und rauscharme Misch- und Verstärkerstufen im Empfänger entwickelt. Die einzelnen Schaltungskomponenten sollten entsprechend der aus den Laboruntersuchungen abgeleiteten Anforderungen entworfen werden; nach ersten Ergebnissen war das vom Windfeld reflektierte Radarsignal zu gering. Als Anforderung für eine Verbesserung der Ergebnisse ergab sich ein deutlich erhöhter Signal-Rausch-Abstand (SNR) des Systems bzw. Pegel des reflektierten Signals. Einige der Erkenntnisse aus den Radar-Grundlagenuntersuchungen wurden erst nach Abschluss des ersten Schaltungsentwurfs und bis Projektende gewonnen; die Schaltkreisentwicklung konnte jedoch trotzdem wie geplant begonnen werden, da der Frequenzbereich hier frühzeitig festgelegt wurde.

Parameter

Der erste Parameter (System-SNR) wird durch die Entwicklung eines Radarsystems mit niedrigem Signal-Rausch-Abstand erreicht. Der SNR eines Radarsystems kann durch die folgende Gleichung vereinfacht werden:

$$\text{SNR (dB)} \propto 174 \text{ (dBm/Hz)} - \text{NF_SSB (RX, dB)} + \text{Pout (TX, dBm)}.$$

NF_SSB: Rauschzahl Einseitenbandmodulation, RX: Radarempfänger, P_{out}:Ausgangsleistung, TX: Radarsender

Die wichtigsten Elemente für ein rauscharmes Radarsystem sind

1. ein Millimeterwellen-Leistungsverstärker (PA) mit folgenden Vorgaben:

- höhere Ausgangsleistung
 - ein niedriges Amplitudenrauschen als Voraussetzung für niedrigen System-SNR
 - ein Avalanche-Durchbruchmodell für höhere Ausgangsleistung, um die richtige Ausgangsleistung im Millimeterwellenbereich zu entwickeln und zu optimieren;
2. niedrige Rauschzahl (NF) eines Millimeterwellen-Mischers (sie wird nach PA- und rauscharmen VCO-Designs geplant);
 3. niedriges Phasenrauschen eines spannungsgesteuerten Oszillators (VCO).

Der zweite Parameter (Pegel des reflektierten Signals) kann durch eine Erhöhung der Betriebsfrequenz auf 240 GHz oder den 300 GHz-Bereich verbessert werden. Jedoch wird bei höheren Frequenzen die Leistung der Schüsselschaltkreise aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit der Chipkomponenten stark beeinträchtigt.

In dieser Frage haben die Arbeitsabstimmungen mit RUB zu dem Schluss geführt, daß es zielführend ist, parallel zwei Frequenzdesigns zu verfolgen:

1. Infineon Technologies entwickelte die Schüsselschaltkreise bei 240 GHz;
2. RUB entwickelt wird hauptsächlich die Schaltkreise für den 300 GHz-Bereich.

In Absprache mit Projektpartner RUB wurden außerdem die nachfolgend aufgezeigten Spezifikationen für die Bausteine festgelegt.

A) Spannungsgesteuerter Oszillator (Push-Push-Ausgangsfrequenz bei 80 GHz; im System wird ein Frequenzvervielfacher benötigt) mit folgenden Parametern:

Parameter	Spezifikationen	Anmerkungen
Frequenz	80 GHz	
Phasenrauschen	-102 dBc/Hz	@1MHz offset
Frequenzabstimmungsbereich	> 5 GHz >15 GHz	@80 GHz - Temperaturbereich: -40 ... 125 °C @240 GHz

B) Leistungsverstärker mit hoher Ausgangsleistung bei 240 GHz mit folgenden Parametern:

Parameter	Spezifikationen	Anmerkungen
Frequenz	230~250 GHz	
Ausgangsleistung	>3 dBm	Temperaturbereich: -40 to 125 °C
Amplitudenrauschen	-132 dBc/Hz	@1MHz offset

Der Entwurf des 240-GHz-Radarsenders erforderte ein Block-Level-Design:

- VCO / Multiplikator / Leistungsverstärker

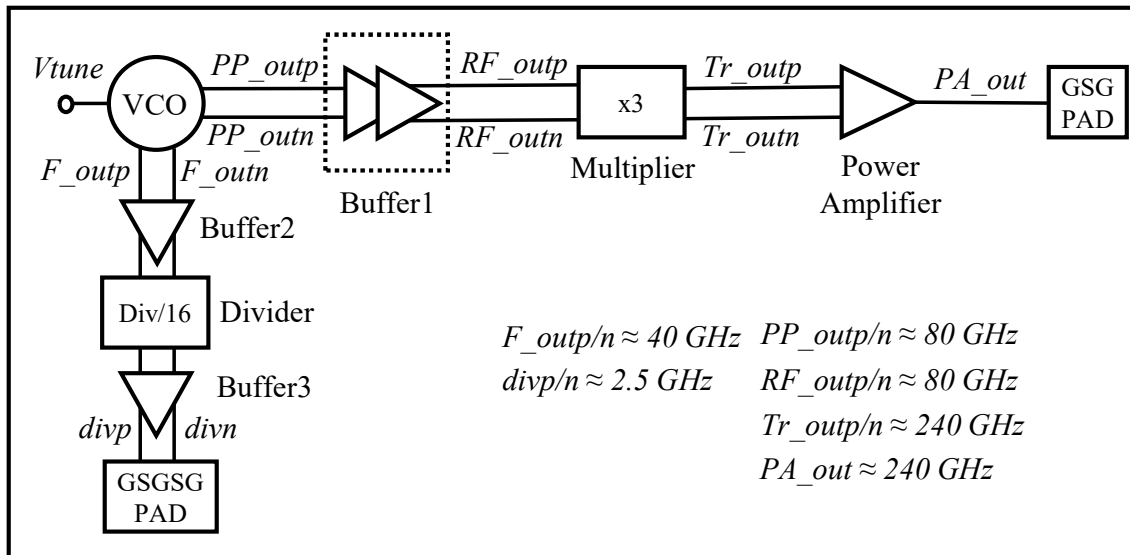


Abbildung 4: Block-Level-Design des 240-GHz-Radarsenders (Infineon)

A) Spannungsgesteuerter Oszillator (VCO)

Basierend auf den vorangehend beschriebenen Abstimmungen und Spezifikationen zu den Schaltungskomponenten entwickelte Infineon Technologies zunächst die VCOs mit geringem Phasenrauschen. VCO-Architekturen mit geringem Phasenrauschen wurden systematisch untersucht und die entsprechenden VCOs wurden initial in B11HFC-Technologie entwickelt. Durch die Schaltungsentwürfe und die Optimierung konnte eine sehr gute VCO-Leistung erreicht werden. Die VCOs wurden in einer 130-nm-SiGe-BiCMOS-Technologie implementiert, die HBTs mit f_T und f_{max} von 250 GHz und 370 GHz umfasst. Außerdem sind passive Elemente wie Varaktoren mit hohem kapazitiven Abstimmungsverhältnis und Transformatoren / Übertragungsleitungen in dieser BiCMOS-Technologie verfügbar.

Die weitere Optimierung der entwickelten VCO-Schaltungen wurde für die Infineon B12HFC-Technologie (90-nm-SiGe-BiCMOS) durchgeführt, wobei die Simulationen eine weitere Verbesserung des Phasenrauschens (um etwa 2 dB) erwarten ließen; diese Ergebnisse wurden dann auch in den Messungen bestätigt (siehe auch Tabelle 2).

Die Zeiträume zwischen den einzelnen Tapeouts sowie der Verfügbarkeit der Siliziumwafer nach den jeweiligen Tapeouts beträgt erfahrungsgemäß mehrere Monate, wodurch die Erprobung der Ergebnisse und die Entwicklungsiteration der Schaltkreise erschwert wird.

Tabelle 2 bietet eine Übersicht über die Planung und Umsetzung der Tapeouts für die von Infineon Technologies entwickelten VCO-Schaltkreise.

Tabelle 2: Übersicht der Tapeouts zum spannungsgesteuerten Oszillator (VCO) in URBANsSens (Infineon)

IFX-Technologie	Frequenz (GHz)	Typ	Gemessene Leistung		Highlights
			Phasenrauschen bei 1 MHz (dBc/Hz)	Abstimmbereich (%)	
B11 HFC TO: 23. Januar, Si: 23. Mai	80 GHz	Kapazitiver CC-VCO	-101	9,25	Design als Referenz
		Magnetischer CC-VCO	-104	10,75	Erster transformatorgekoppelter VCO bei 80 GHz
B12 HFC TO: 23. Juni, Si: 23. Dezember	80 GHz	Kapazitiver CC-VCO	-105	7	Bester Single-Core-VCO-PN bei 77/80 GHz, der bisher veröffentlicht wurde
		Colpitt-VCO	-102,3	8	Design als Referenz
		Verbesserter Colpitt-VCO	-104,1	8,4	<ul style="list-style-type: none"> • Neue Technik zur Verbesserung von PN, bestätigt durch Simulation und PN-Berechnung. • Die Technik wird auch bei anderen VCO-Typen als Gegenprüfung eingesetzt und zeigt Verbesserungen.
		Dual-Core-Colpitt-VCO	-105,2	7,5	Neue Kopplungstechnik für 2 VCO-Kerne bei 77/80 GHz mit einer perfekten Verbesserung um 3 dB
B12 HFC TO: 24. April, Si: 25. Januar	120 GHz	Kapazitiver CC-VCO	-102,5	7,5	Neue TX-Architektur mit 120-GHz-VCO + Doubler (anstelle eines Triplers)
		Colpitt-VCO	-103	7,75	

Nachfolgend sind die Blockdiagramme, Chipaufnahmen und gemessene Leistungsdaten für exemplarisch ausgewählte VCO-Entwicklungen dargestellt.

VCO – Magnetisch gekoppelter VCO in B11HFC-Technologie

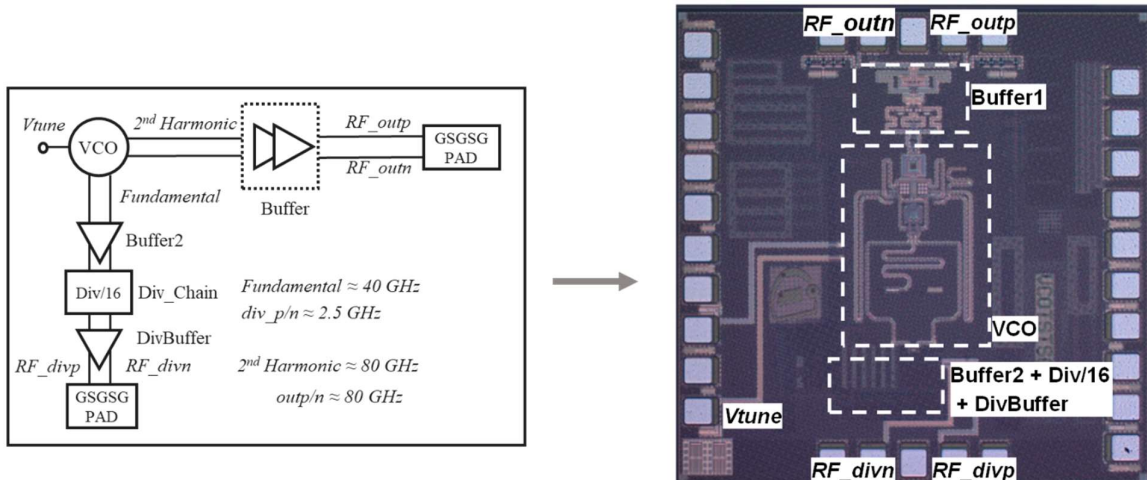


Abbildung 5: Magnetisch gekoppelter VCO in Bipolar-Technologie - Blockdiagramm und Chip-Foto (Infineon)

Vtune (V)	PN @ 1MHz (dBc/Hz) 25°C	PN @ 1MHz (dBc/Hz) 125°C
3	-104	-101.8
Tuning Range	8.6 GHz	9.3 GHz

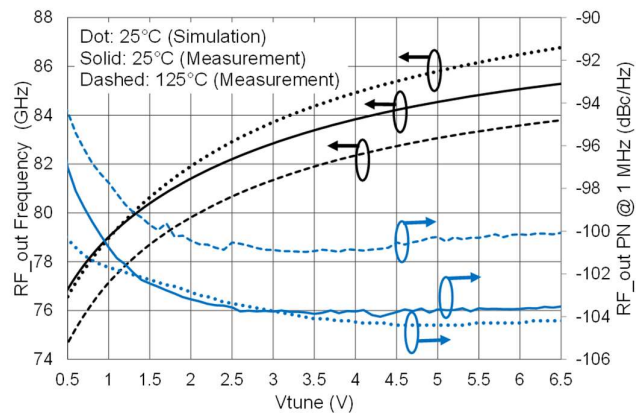


Abbildung 6: Magnetisch gekoppelter VCO in Bipolar-Technologie - Gemessene Leistung

VCO – Verbesserter Single-Core-Colpitts-VCO in B12 HFC-Technologie

Verbesserung eines Single-Core-Colpitts-VCO zur Optimierung des Phasenrauschens

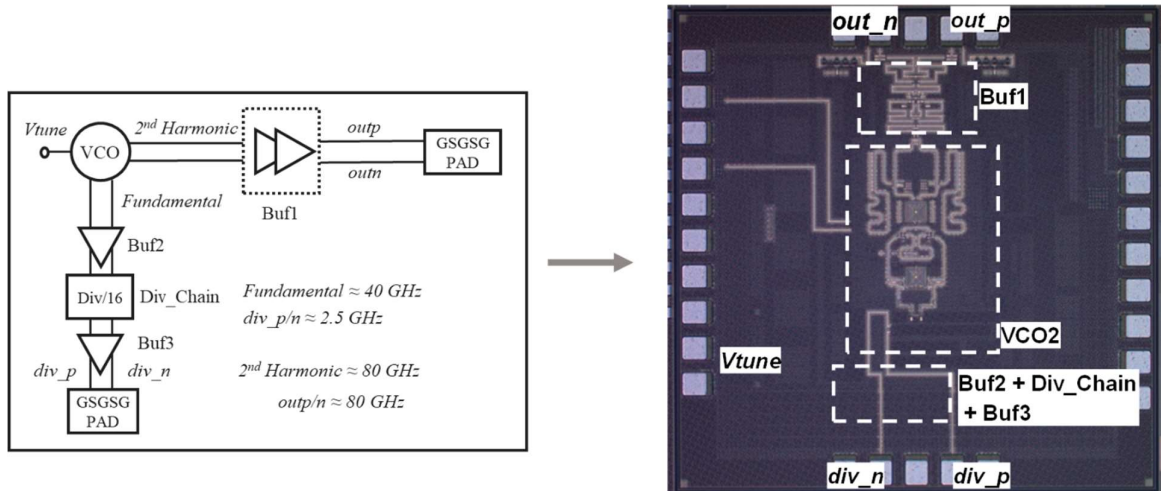


Abbildung 7: Verbesserter Single-Core-Colpitts-VCO in B12 HFC-Technologie - Blockdiagramm und Chip-Foto (Infineon)

Vtune (V)	PN bei 1 MHz (dBc/Hz) 25 °C	PN bei 1 MHz (dBc/Hz) 125 °C
3	-103,8	-101,9
Abstimmber eich	8,4 %	8,4 %

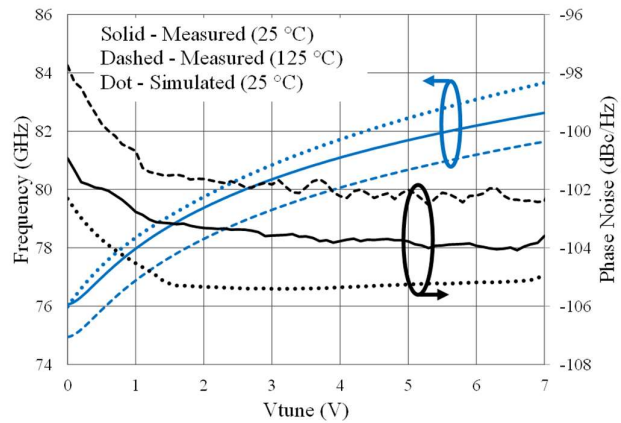


Abbildung 8: Verbesserter Single-Core-Colpitts-VCO in B12 HFC-Technologie –Leistungsdaten (gemessen)

VCO – Dual-Core-Colpitts-VCO in B12 HFC

Weitere Verbesserung des Phasenrauschens durch Implementierung eines Dual-Core-VCO

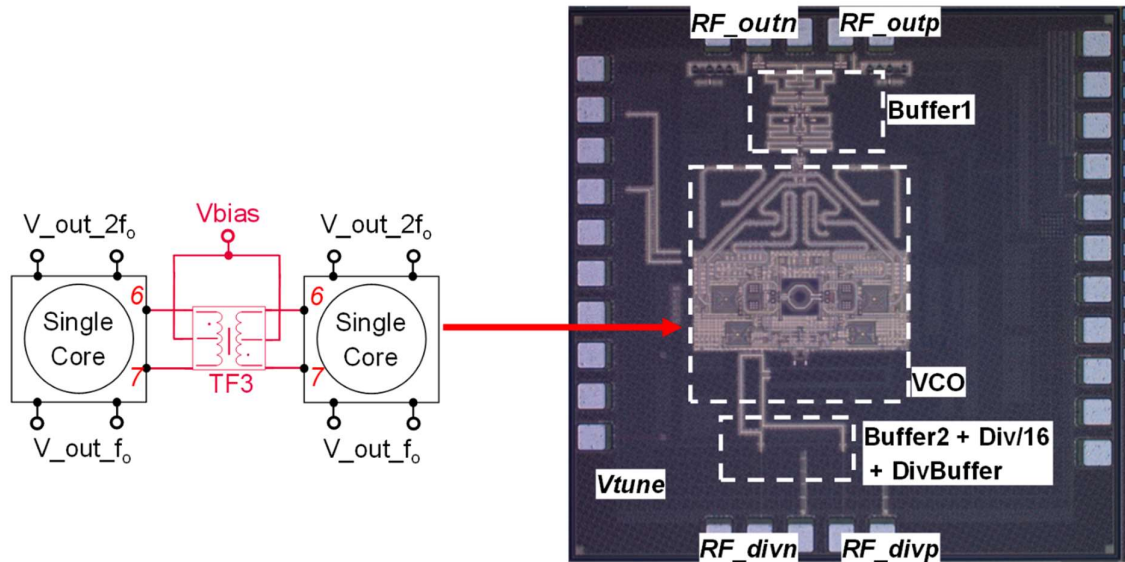


Abbildung 9: Dual-Core-Colpitts-VCO in B12 HFC -Technologie – Blockdiagramm und Chip-Foto

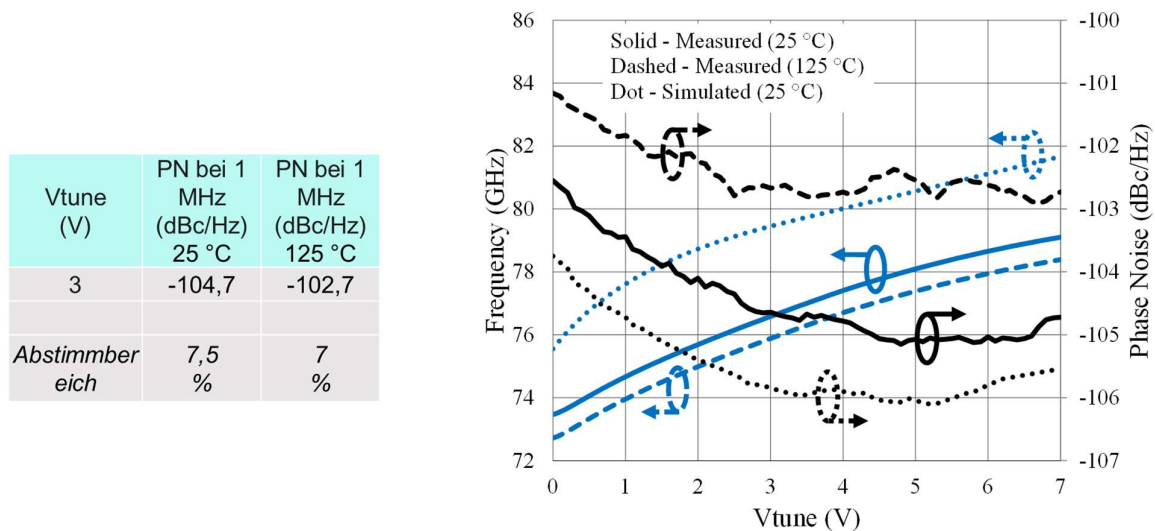


Abbildung 10: Dual-Core-Colpitts-VCO in B12 HFC -Technologie – Leistungsdaten

Bewertung der VCO-Entwicklung

Mit der VCO-Entwicklung basierend auf Silizium-Germanium-Technologie (hier: B12HFC) konnte ein sehr niedriges Phasenrauschen als einer der wichtigsten Systemparameter auf dem neuesten Stand der Technik erreicht werden:

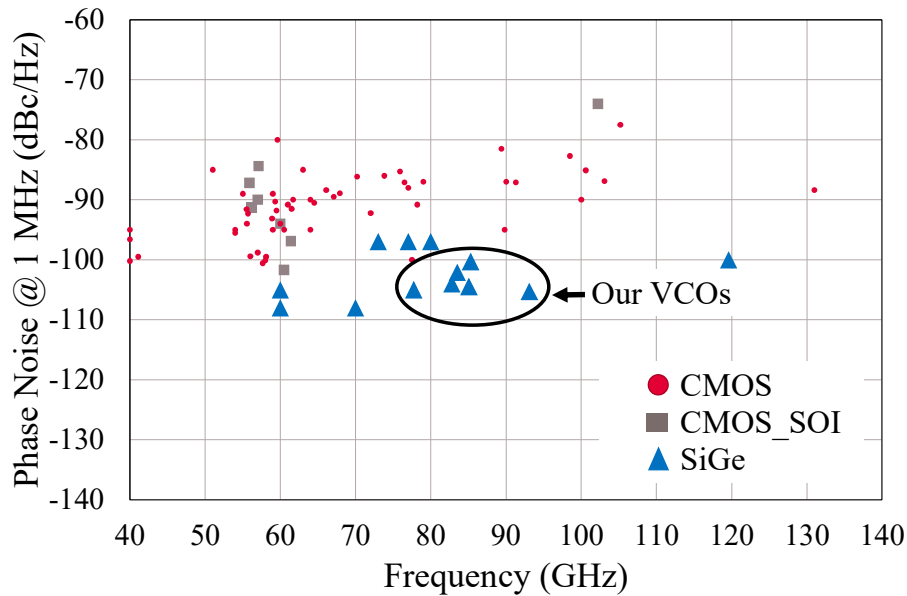


Abbildung 11: VCO – Vergleich des Phasenrauschens mit dem Stand der Technik

Ebenso wurden bei der Leistungszahl/Figure of Merit (FOM) hervorragende Werte erzielt:

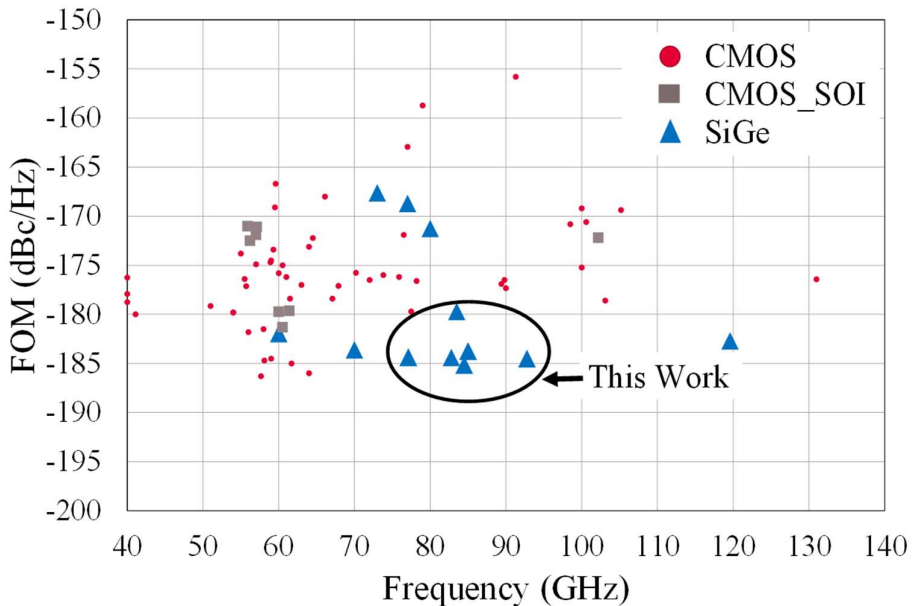


Abbildung 12: VCO – Vergleich der Leistungszahl (FOM) mit dem Stand der Technik

Die Figure of Merit ($FOM = PN(\Delta f) - 20\log(F_{out}/\Delta f) + 10\log(\text{Power}/1\text{mW})$) als Maß für die Leistungsfähigkeit eines spannungsgesteuerten Oszillators gibt an, wie gut ein VCO die erforderliche Frequenz und Phase eines Signals erzeugt, die von einer angelegten Signalspannung gesteuert wird. Ein VCO mit hoher FOM kann in Anwendungen eingesetzt werden, bei denen eine genaue Frequenz- oder Phasenänderung erforderlich ist.

B) Leistungsverstärker (PA) und Sender (TX)

Die Leistungsverstärkerarchitektur wurde in B12HFC-Technologie untersucht, um die erforderliche Leistung des Schaltungsbausteins zu erzielen.

Um die beste Leistung zu erreichen bzw. die Übereinstimmung von Simulation und Messung zu verbessern, wurde das verfügbare bipolare Spice-Gummel-Poon-Modell um den Avalanche-Durchbruchseffekt erweitert. Dieses Modell wird durch das Design eines 80-GHz-Leistungsverstärkers in B12HFC-Technologie verifiziert.

Aufgrund der sehr hohen Übergangsfrequenz f_T (300 GHz) und Maximalfrequenz f_{max} (500 GHz) der aktiven Bauelemente und aus schaltungstechnischer Sicht vorteilhaften 7 Metallschichten, die die B12HFC-Technologie bietet, konnte mit dieser fortschrittlichen Technologie ein sehr effizienter und starker Leistungsverstärker (PA) entwickelt werden.

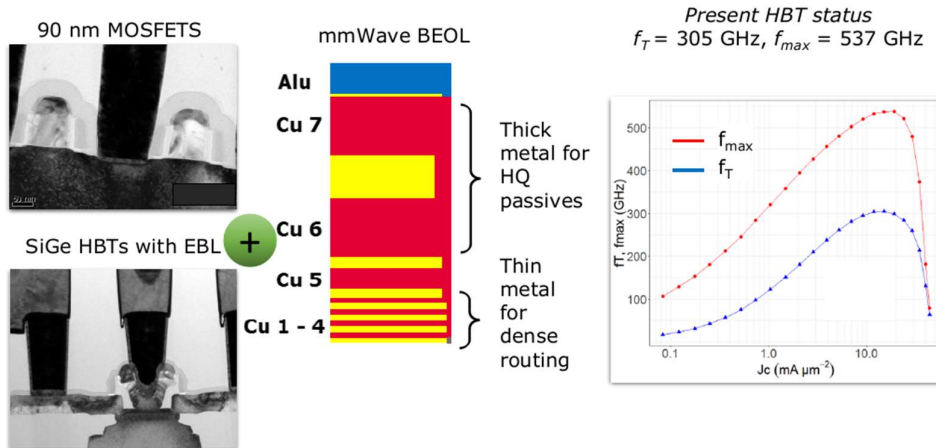


Abbildung 13: Bauteilintegration und die BEOL-Schichten des Leistungsverstärkers in Infineon B12HFC-Technologie

Tabelle 3 zeigt die Umsetzung der Tapeouts für die von Infineon Technologies entwickelten Leistungsverstärker / Sender.

Tabelle 3: Tapeouts zum Leistungsverstärker (PA) und Sender (TX) in URBANSens (Infineon)

IFX-Technologie	Frequenz (GHz)	Typ	Anfänglich gemessene Leistung		Anmerkungen
			Leistung (dBm)	Bandbreite (GHz)	
B12 HFC TO: 24. April, Si: 25. Januar	240 GHz	PA	8,1	50	<ul style="list-style-type: none"> • Innovation durch gestapelte Ausgangsstufe, die eine hohe Ausgangsleistung bestätigt • Funktionsfähigkeit durch Messung mit einem Signalanalysator bestätigt • Ausgangsleistung von mehr als 12 dBm möglich → Designfehler entdeckt • Veröffentlichung des Artikels aufgrund eines Designfehlers in einigen PA-Stufen verschoben • Verursacht Stabilitätsprobleme
		TX	7,9	Voller VCO-Bereich	<ul style="list-style-type: none"> • Funktionsfähigkeit durch Signalanalysator bestätigt • Papierverfassung aufgrund eines Designfehlers in PA verschoben • Verursacht Stabilitätsprobleme und erschwert somit die Integration in das Empfängersystem

Leistungsverstärker PA – B12HFC

Das Leistungsverstärkerdesign umfaßt eine innovative gestapelte Architektur in der Ausgangsstufe (PA2), die eine hohe Ausgangsleistung ermöglicht.

Der Leistungsverstärker ist in 90-nm-SiGe-BiCMOS-Technologie (B12HFC) implementiert, die HBTs mit f_T und f_{max} von 300 GHz und 520 GHz umfasst. Er ist für eine Frequenz von 240 GHz und eine erwartete Ausgangsleistung von mehr als 8 dBm ausgelegt. Es gibt zwei Versionen des Leistungsverstärkers: eine Standardversion (PA1) und eine verbesserte Version (PA2).

Das Schaltbild der beiden PA-Typen ist in Abbildung 14 dargestellt:

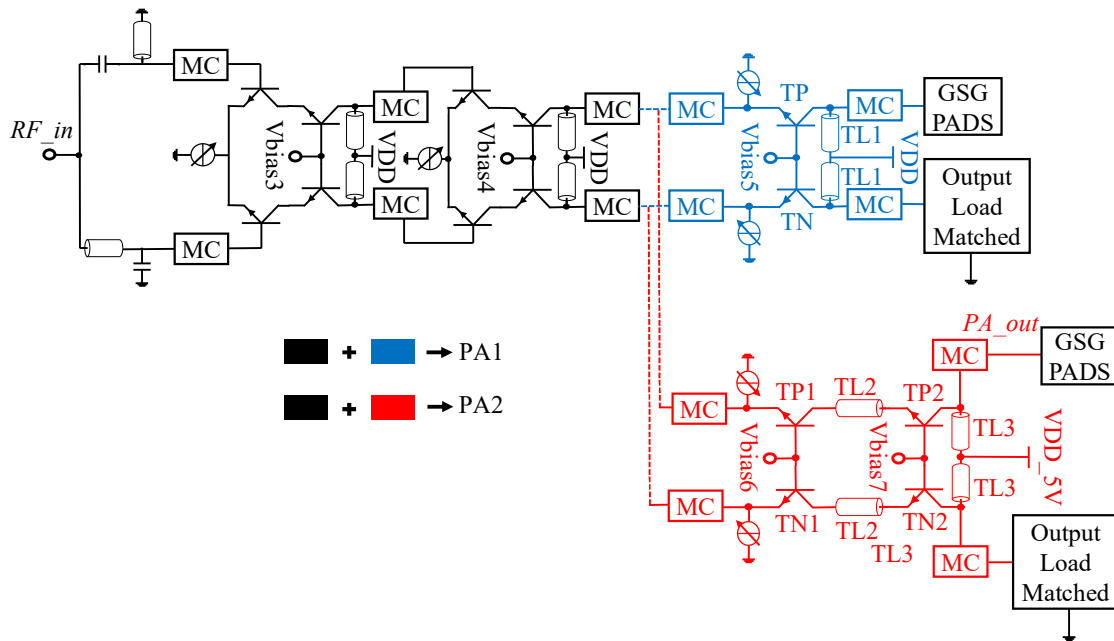


Abbildung 14: Vereinfachte Darstellung des implementierten Leistungsverstärkers mit einer verbesserten Endstufe (PA2) und einer Standard-Endstufe (PA1).

Simulationsergebnisse:

eine vergleichende Analyse der Simulationsergebnisse zeigt die Verbesserung von PA2 im Vergleich zu PA1.

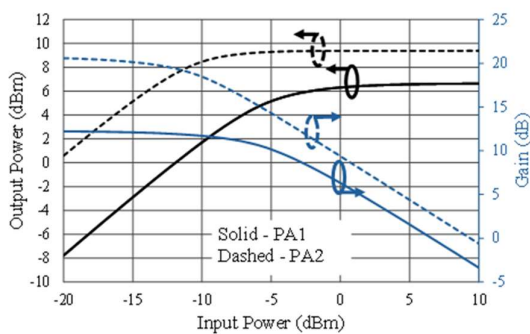


Abbildung 15: Simulierte Ausgangsleistung (schwarz) und Verstärkung (blau) von PA1 (durchgezogen) und PA2 (gestrichelt) über der Eingangsleistung.

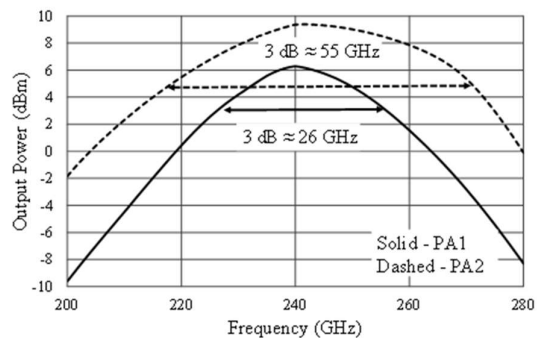


Abbildung 16: Simulierte Ausgangsleistung von PA1 (durchgezogen) und PA2 (gestrichelt) über die Betriebsfrequenz

Ergebnisse der Messung:

Messaufbau und ein Foto des Testchips sind in Abbildung 17 dargestellt:

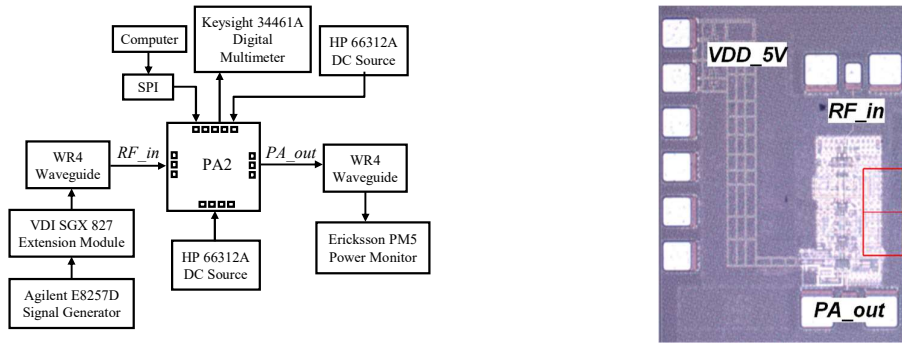


Abbildung 17: Messaufbau für die Charakterisierung von PA2 und Chipfoto von PA2

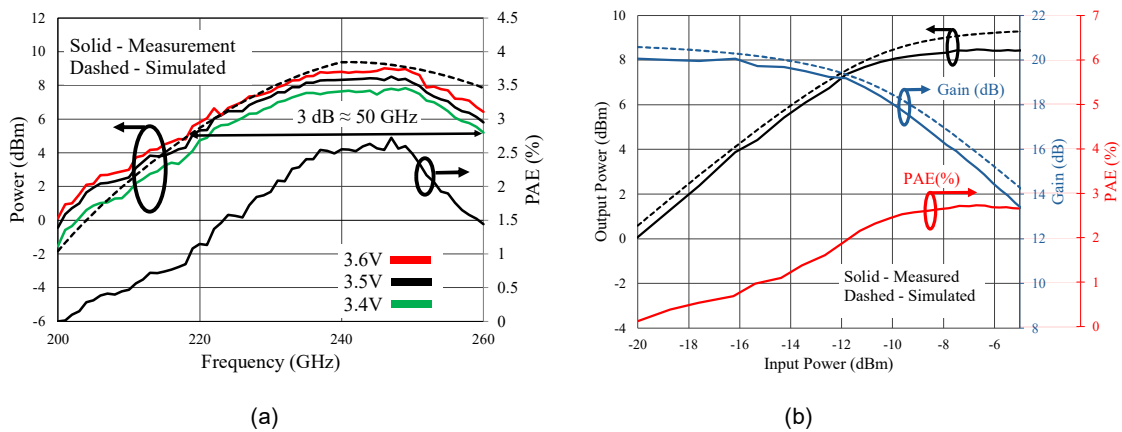


Abbildung 18: Gemessene Ausgangsleistung und PAE über die Betriebsfrequenz (a). Gemessene Ausgangsleistung (schwarz), Verstärkung (blau) und PAE (b)

Sender (TX)

Der Sender ist in einer 90-nm-SiGe-BiCMOS-Technologie implementiert, die HBTs mit f_T und f_{max} von 300 GHz und 520 GHz umfasst. Chipfoto und Messaufbau und Messergebnisse sind nachfolgend dargestellt:

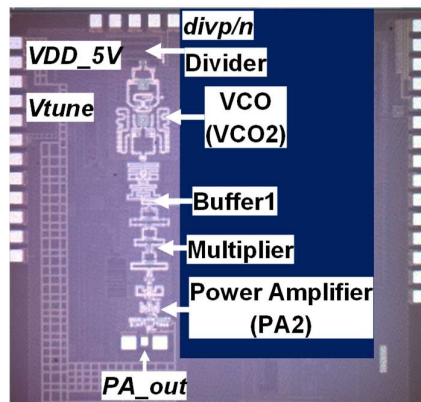


Abbildung 19: Chipfoto des Senders (TX)

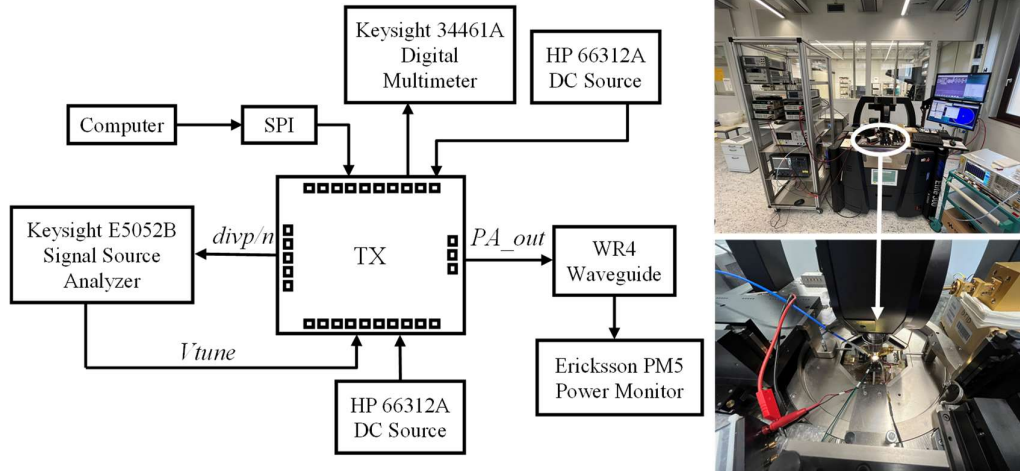


Abbildung 20: Simulationsaufbau für die Charakterisierung des Senders (TX)

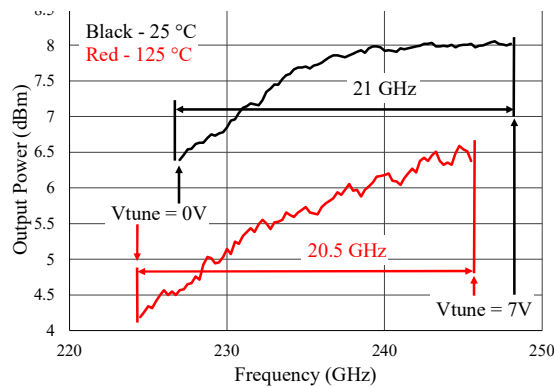


Abbildung 21: Gemessene Ausgangsleistung des implementierten Senders (TX) bei 25 °C (schwarz) und 125 °C (rot).

Der TX-Chip weist in der letzten Tapeoutphase einen Designfehler auf, der während des Messprozesses festgestellt wurde. Dieser Fehler verursacht eine Instabilität in der Leistung.

Obwohl die Leistung des Senders, wie oben gezeigt, gut und mit den neuesten bekannten Leistungsergebnissen vergleichbar ist, muss der Fehler behoben werden, um den Sender mit dem bei Projektpartner RUB entwickelten Empfänger zu integrieren; die Instabilität in der Leistung schränkt die weitere Sender-Empfänger-Integration ein.

Der Fehler erfordert einen verhältnismäßig geringen Designaufwand; eine komplette Neuentwicklung ist hier nicht nötig. Eine Integration bis zum Projektende war trotz der Laufzeitverlängerung nicht mehr möglich.

Einordnung der Ergebnisse der Radarentwicklung

Dieses Arbeitspaket lieferte Testchips zu Charakterisierung von Schaltungskomponenten eines Radarchips in BiCMOS-Technologie. Mit innovativen Architekturen und Technologien wurde eine herausragende VCO-Leistung erzielt; eine neue Leistungsverstärkerarchitektur wurde implementiert und weist eine hohe Ausgangsleistung auf. Im Design-Flow wurden Modelle auf Transistorebene erstellt, um die Auswirkungen hoher Frequenzen zu verstehen.

Die Fertigung mehrerer Testchip-Varianten erfolgte in der SiGe-BiCMOS-Technologie B12HFC von Infineon. SiGe-BiCMOS-Technologien vereinen die hohe Geschwindigkeit und guten analogen Eigenschaften von Silizium-Germanium-Heterostruktur-Bipolartransistoren mit der hohen Integrationsfähigkeit und Skalierbarkeit von Standard-CMOS-Technologien. Tabelle 4 zeigt die Entwicklung der Silizium-Germanium-Technologien bei Infineon; die Entwicklung in Richtung der Produktionsphase beinhaltet weitere halbleitertechnologische Verbesserungen sowie die Optimierung der Produktionskosten.

Tabelle 4: Entwicklung der SiGe-Technologien bei Infineon

	B7HF200	B11HFC	B12HFC
Emitterbreite	180 nm	130 nm	120 nm
f_t	200 GHz	250 GHz	300 GHz
f_{max}	250 GHz	370 GHz	530 GHz
Gate-Verzögerung	3,8 ps	2,6 ps	1,9 ps
CMOS	n. a.	130 nm	90 nm
rel. TX-Leistung	60	100	140
rel. Leistungsaufnahme	140	100	60

Einen allgemeineren Überblick über den Stand der SiGe-BiCMOS-Technologien gibt Tabelle 5. Aktuell stehen für die industrielle Fertigung Technologien mit einer maximalen Oszillationsfrequenz f_{max} von knapp 400 GHz zur Verfügung. Die maximale Oszillationsfrequenz ist die maximale Grenzfrequenz, bei der theoretisch eine aktive Verstärkung oder Oszillation möglich ist. In der Praxis müssen Anwendungsfrequenzen von Verstärkern oder Fundamental-Oszillatoren jedoch deutlich unter dieser Frequenz liegen. SiGe-BiCMOS-Technologien haben kostengünstige Si-basierte Lösungen wie beispielsweise Automobilradar im Bereich um 80 GHz ermöglicht, was entscheidend für eine umfassende Akzeptanz und Verbreitung dieser Anwendung war. Für die Prototypen-Entwicklung stehen in der Forschung bereits Technologien mit f_{max} von über 500 GHz zur Verfügung.

Diese Technologien, wie sie auch in UrbanSense genutzt werden, eröffnen den Ausblick auf günstige, effiziente Si-basierte Sub-THz-Radar- und Kommunikationslösungen mit den Vorteilen hoher Integrationsfähigkeit, Skalierbarkeit und letztlich Kosteneffizienz.

Neben der maximalen Oszillationsfrequenz sind in der Tabelle die weiteren Performance-Parameter f_T (Stromverstärkungsgrenzfrequenz, also die Frequenz, bei der die Stromverstärkung auf 1 abgesunken ist) und, soweit verfügbar, die minimale Gatterverzögerungszeit angegeben.

Außerdem wird der Fertigungsstandort genannt. Infineons BiCMOS-Wafertechnologien werden vollständig in Deutschland, in den Fabriken in Dresden und Regensburg, gefertigt.

Tabelle 5: Stand der Technik für SiGe BiCMOS-Technologien

Bereich	Firma	f_T [GHz]	f_{max} [GHz]	Gatter- Laufzeit [ps]	Technologie- knoten [nm]	Referenz	Standort
Forschung	GlobalFoundries	415	610	1.76	45	[Jain 2022]	USA
	IHP	470	610	1.5	130	[Rücker 2019]	D
	Infineon	300	530	1.85	90	[Böck 2025]	D
	Tower Semiconductor	300	500	-	180	[Phillips 2021]	USA
Industrielle Produktion	GlobalFoundries	310	370		90	9HP	USA
	Infineon	250	370	2.5	130	B11HFC	D
	NXP	260	350		180	xHBT2	USA
	STMicroelectronics	320	370		55	B55	F
	Tower Semiconductor	300	340		180	SBC18H5	USA
	Texas Instruments	290	290		130	SiGe130	USA

Referenzen:

[Böck 2025] J. Böck, K. Aufinger, H. Knapp, A. Mukherjee, H. D. Wohlmuth, V. Komenko, S. Rothenhäußer, D. Tschumakow, M. Stavrev, "530GHz f_{max} 90nm SiGe BiCMOS Technology for Sensing and Communication Applications", Proc. of GeMiC 2025, pp. 358-361, DOI: 10.23919/GeMiC64734.2025.10979048

[Jain 2022] V. Jain, J. Pekarik, C. Kenney, J. Holt, C. Durcan, J. B. Johnson, S. Saroop, M. Nafari, V. Ruparelia, S. K. Gedela, P. K. Sharma, V. Ontalus, S. Khokale, S. Chaurasia, V. Vanukuru, A. Joseph, "415/610GHz f_T/f_{MAX} SiGe HBTs Integrated in a 45nm PDSOI BiCMOS process," Proc. of the IEEE IEDM, 2022, pp. 11.6.1-11.6.4, doi: 10.1109/IEDM45625.2022.10019417.

[Phillips 2021] S. Phillips, E. Preisler, J. Zheng, S. Chaudhry, M. Racanelli, M. Müller, M. Schröter, W. McArthur, D. Howard, "Advances in foundry SiGe HBT BiCMOS processes through modeling and device scaling for ultra-high speed applications," Proc. of IEEE BCICTS 2021.

[Rücker 2019] H. Rücker and B. Heinemann, "Device Architectures for High-speed SiGe HBTs," Proc. of the IEEE BCICTS, 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/BCICTS45179.2019.8972757.

Hauptarbeitspaket 6 – Akustikbasierte Sensorik zur Windfeldmessung

Hauptarbeitspaket 6 hatte die Bestimmung von Windfeldern und Luftströmungen mittels akustischer Messungen zum Thema. um den Aufbau eines auf akustischen Sensoren basierenden und in einem UAS integrierbaren Demonstrationssystems zu ermöglichen. Die Untersuchung und Evaluation von Sensorkonzepten zur Infraschallmessung von Windverhältnissen erfolgte federführend durch Partner STKS; mit dem neuen Anwendungsfall wurde von Infineon angestrebt, die Windfeldmessung mittels günstiger MEMS-basierender akustischer Sensoren in das Luftfahrzeug zu integrieren und diese Integration in kleine UAS durch Miniaturisierung der Sensorik kostengünstig zu ermöglichen. Infineon Technologies unterstützte die Realisierung dieser Anwendung mit der spezifikationsgerechten Bereitstellung und konstruktiven Anpassung von MEMS-Mikrofonen sowie deren Signalverarbeitung.

Untersuchung und Evaluation von Sensor-Konzepten

Die Konzipierung des Meßsystems (STKS) basierte auf den Eigenschaften einer der UAS-Geometrie angepassten Mikrofonanordnung zur Ortung windfeldbasierter Infraschall-emissionen. Geometrisch bedingt wurde, aufgrund der relativ kleinen möglichen Abmessungen, ein differentielles Mikrofonarray (DMA) untersucht. Aufgrund des Verhältnisses der Flugzeugabmessungen zu den sehr großen Wellenlängen unterhalb von 20 Hz sind der räumlichen Auflösung und Ortbarkeit Grenzen gesetzt. Neben der Eignung des realisierten DMA spielt daher die untere Grenzfrequenz der eingesetzten Mikrofone eine zentrale Rolle.

Im Zuge des Projektes stellte Infineon Technologies verschiedene Typen von MEMS-basierten Sensoren für die Untersuchung zur Verfügung. Die Sensoren unterscheiden sich im Interface und in der akustischen Performance. Vor allem die Performance des Mikrofons im tieffrequenten Bereich ist für den Erfolg des Projektes von besonderer Bedeutung.

Zur ersten Evaluierung stellte Infineon das Mikrofon vom Typ IM68A130A bereit; bei diesem Typ handelt es sich um ein analoges Mikrofon mit einer Sensitivität bis zu 10 Hz.

Im Verlauf von URBANSens hat Infineon ein neues, digitales MEMS-basiertes Mikrofon weiterentwickelt, das neben dem digitalen Interface für die Benutzung via A2B Bus auch eine noch tiefere Grenzfrequenz von 7 Hz vorweist (Pre-Release IM66D130A, digital, Januar 2023).

Abbildung 22 zeigt den verbesserten Frequenzgang des Mikrofons Typ IM66D130A im Vergleich zu dem analogen Mikrofon. Durch die Verwendung eines neuen MEMS-Sensorelements konnte die Performance des Mikrofons sowohl im hochfrequenten als auch im tieffrequenten Bereich verbessert werden.

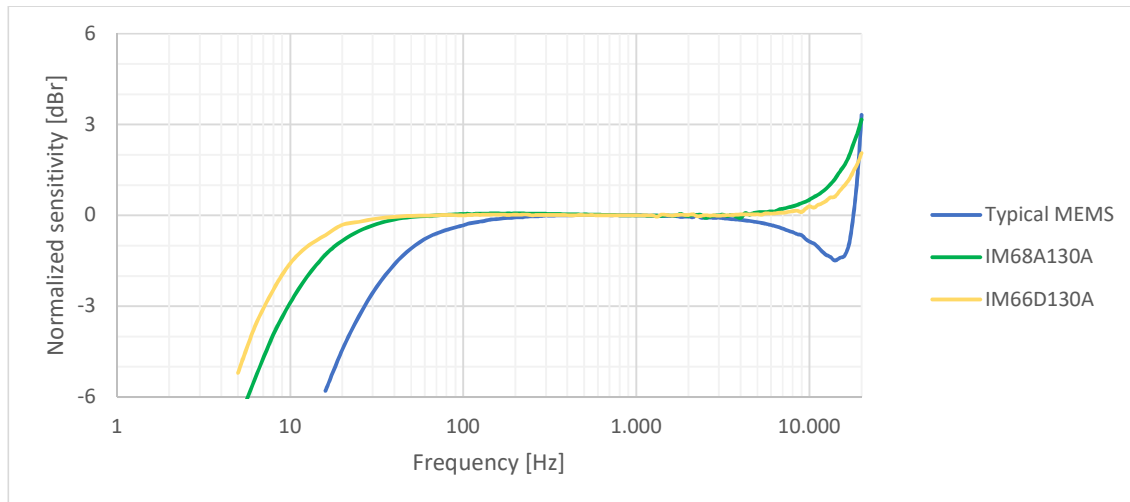


Abbildung 22: Frequenzgang von IM66D130A (Digitalmikrofon) im Vergleich zu IM68A130A (Analogmikrofon) und anderen, marktgängigen Mikrofontypen (Infineon)

Infineon MEMS-Mikrofone bestehen aus drei Komponenten, die auf unterschiedlichen Wegen Einfluss auf die akustische Performanz haben. Die drei Komponenten sind eine Membran, ein ASIC und das Gehäuse. Den größten Einfluss auf die Grenzfrequenz im tiefen Bereich hat der Flächeninhalt der Membran. Für den Mikrofontyp IM66D130A hat Infineon die Größe der sensitiven Fläche auf der Membran vergrößert und damit eine tiefere Grenzfrequenz erreicht. Die bereitgestellten Mikrofone verfügen über ein System zur aktiven Reduzierung unerwünschter Hintergrundgeräusche.

Implementierung des MEMS-basierten Wind-Akustik-Prototypsystems im Labormaßstab

Die Arbeiten zum Wind-Akustik-Prototypsystem basierten auf der die Konstruktion eines maßstabsgetreuen UAS-Modells als Meßsystem im Labormaßstab durch Projektpartner STKS. Versuchsplanung und -durchführung dienen der Ortung von Windereignissen mittels Referenzquelle; Projektpartner STKS realisierte hierzu die Entwicklung und den Aufbau einer Referenzquelle zur künstlichen Erzeugung von Infraschall.

Infineon Technologies unterstützte die Entwicklung des MEMS-basierten Akustik-Prototypsystems zur Windfeldmessung – neben der Beistellung von MEMS-Sensoren – auch bei deren Integration in das prototypische System als differentielle Mikrofonarrays (DMA). Die in der ersten Phase entwickelte Konzipierung der Sensoranordnung im Labormaßstab erfolgte unter Verwendung der von Infineon Technologies bereitgestellten Analog-Mikrofone vom Typ IM68A130A. Für den im Projektverlauf verfolgten Umstieg auf digitale Sensoren (MEMS-Mikrofone des Typs IM66D130A) ergaben sich neue Spezifikationen an

die Systemarchitektur. Das Messsystem wurde hinsichtlich Gewicht, Verkabelung und Signalstabilität optimiert. Anforderungen betrafen die möglichen Leitungslängen sowie die synchrone Auslesbarkeit aller Kanäle (8 Mikrofone) über USB. Die Prototypen sind nur für Bodenmessungen geeignet.

Zum Schutz vor einem direktem Einblasen des Windes in die Apertur der MEMS-Mikrofone wurden diese mit Windschutzvorrichtungen aus Akustikvlies und langflorigem Kunstfell bestückt (STKS). Infineon Technologies arbeitete im Rahmen von URBANSens an einer generischen Lösung zum Schutz von MEMS-Mikrofonen gegen ungewünschte Umwelteinflüsse (Environmental Barrier > Miniaturisierung für UAS-Integration).

Implementierung der Signalverarbeitung und Klassifikation für Infrashall-basierte Winddetektion

Die Implementierung eines grundlegenden Beamforming-Algorithmus durch Partner STKS ermöglicht den Betrieb eines differentiellen Mikrofonarrays mit einer planaren Anordnung; überdies entwickelte STKS eine Simulation, die eine Geräuschquelle und mehrere Störquellen erzeugt und versucht zu orten. Es konnte keine Klassifizierung durchgeführt werden, weil durchgängig bis Projektende an der Ortung der Infrashallquelle gearbeitet wurde. Infineon Technologies konnte im Projektverlauf von URBANSens keine wesentlichen Aktivitäten zu diesem Themenbereich beitragen.

Miniaturisierung für UAS-Integration

Bei der UAS-Integration akustischer Sensoren arbeitete Partner STKS an der Implementierung von Evaluationsboards mit je zwei Mikrofonen als Flügelsegmente. Da während der Labor- und Bodentests mit den digitalen MEMS-Mikrofon des Typs IM66D130A Störungen in der Clock-Stabilität bei längeren Leitungswegen auftraten, die nicht zeitig behoben werden konnten, wurde entschieden, eine reduzierte Integration mit wenigen Mikrofonen umzusetzen. Diese Lösung wurde entwickelt, um grundsätzlich eigenständig Daten (während des Flugversuchs) erfassen zu können und später eine modulare Erweiterung und einfache Integration in das Gesamtsystem zuzulassen. Die Akustiksensoren sind hierbei zur Anbringung an den Flügelspitzen und ggf. ergänzend am Heck des UAS vorgesehen; für Flugversuche ist noch der Einsatz eines autonomen Loggers erforderlich. Infineon Technologies unterstützte die Implementierung durch Bereitstellung der erforderlichen Mikrofontechnik.

Des Weiteren wurde am Windschutz für die zu integrierenden Flügelsegmente gearbeitet. Die Anpassung der Sensorhardware für die UAS-Integration umfaßte auch den Schutz der Akustiksensoren gegen ungewünschte Umwelteinflüsse (Feuchtigkeit, Verunreinigungen, Einblasen des Windes in die Mikrofon-Apertur). Infineon Technologies arbeitete im Rahmen

von URBANSens an einer integrierten Lösung zum Schutz von MEMS-Mikrofonen gegen solche ungewünschte Umwelteinflüsse (Environmental Barrier).

Da die MEMS-Mikrofonmembranen, die in der Regel aus dünnem Polysilizium bestehen, zerbrechlich sind und oft nicht die erforderliche Robustheit bieten, müssen zusätzliche Schutzkomponenten (z. B. Netze oder Membranen) in die Schallkanäle oder Gehäuse integriert werden, um die Mikrofone vor störenden Substanzen zu schützen. Das daraus resultierende höhere Schutzniveau hat jedoch auch negative Auswirkungen, da das Hinzufügen einer Barriere in einem akustischen Kanal zu Einfügungsverlusten und/oder einer Erhöhung des Rauschens führt, was wiederum das SNR des Systems verschlechtern kann. Daher bestand die Herausforderung darin, Schutzkomponenten herzustellen, die sowohl ein hohes Schutzniveau (z. B. hohe Partikelfilterung) als auch eine hervorragende akustische Leistung bieten.

Der Entwicklungsansatz zur Environmental Barrier ist generisch für Infineon-MEMS-Mikrofone; die Schutzwirkung bildet daher auch eine vorteilhafte Option bei der Miniaturisierung für UAS-Integration.

Die hergestellte Schutzbarriere war anfangs aus Glas gefertigt, später wurden integrierte Nanofasernetze untersucht. Physikalische und chemische Eigenschaften beider Materialien (Isolator, inertes Material) gewährleisten deren gute Eignung für elektronische Bauteile; zum Nachweis der Schutzwirksamkeit des Glasgewebes gegen Verunreinigungen und Wasser wurden verschiedene Bewertungen durchgeführt.

Das Glasgitter kann das Mikrofon vor Verunreinigungen im Mikrometerbereich schützen. Abbildung 23 zeigt einen Haarpartikel (80 µm Durchmesser), der durch das Glasgitter herausgefiltert wurde.



Abbildung 23: Durch Glasgitter gestopptes Haarstück

Der Wasserkontaktwinkel (Water Contact Angle, WCA) gibt wichtige Hinweise auf die Fähigkeit eines mikrodesignten Bauteils, das Eindringen von Wasser zu verhindern. Für das Glasgitter der entwickelten Environmental Barrier beträgt dieser Wert 120° (Abbildung 24), was belegt, dass ein hohes Schutzniveau gegen das Eindringen von Feuchtigkeit gewährleistet ist.

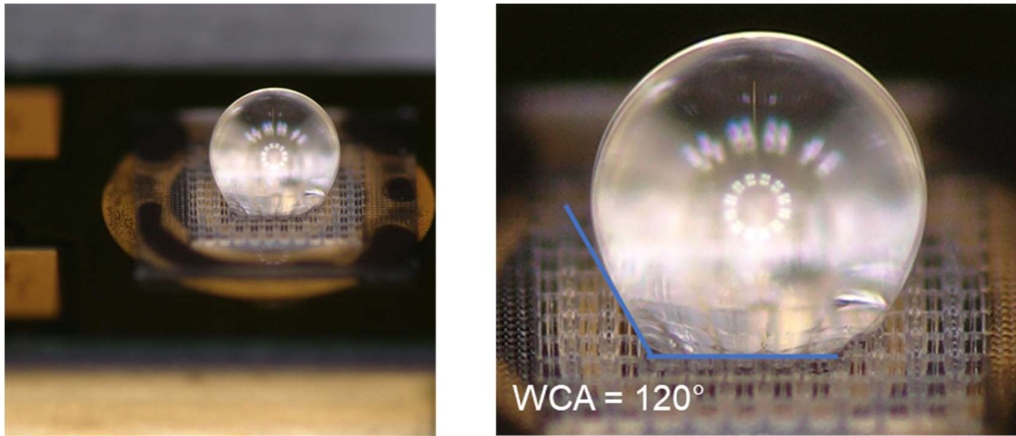


Abbildung 24: Wassertropfen auf Glasschutz mit WCA=120°

Um die akustischen Auswirkungen der Schutzkomponente auf die Leistung des Mikrofons zu bewerten, wurden elektroakustische Messungen durchgeführt. Wie aus dem folgenden Diagramm (Abbildung 25) ersichtlich, bleibt der Frequenzgang auch durch die Umgebungsbarriere auf digitalen SDM-MEMS-Mikrofonen fast völlig unverändert, vor allem im niedrigen Frequenzbereich (<100 Hz):

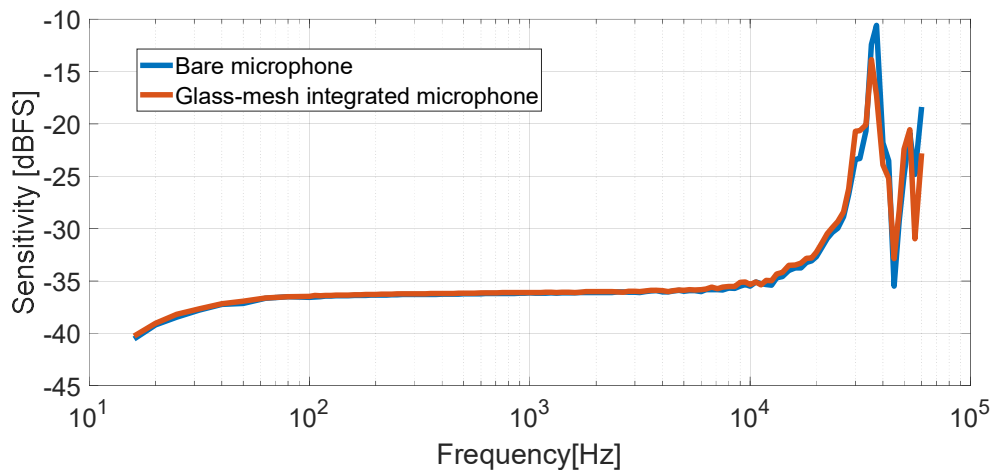


Abbildung 25: Frequenzgangvergleich des Mikrofons ohne/mit Environmental Barrier (Glass-Mesh)

In Zuge der im Projektverlauf erzielten Weiterentwicklung gegenüber der ersten, aus Glas gefertigten Generation konnten im zweiten Schritt MEMS-Mikrofone mit integrierten Nanofasernetzen (Abbildung 26) hergestellt und getestet werden, die ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) vorweisen.

Hierbei wurden Polyimid (PI)-Nanofasern in Kombination mit Polyetheretherketon (PEEK)-Monofilament-Geweben entwickelt und hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften unter Verwendung von MEMS-Mikrofonen mit hohem SNR bewertet. PI-Nanofasern eignen sich aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften (d.h. hohe mechanische Festigkeit, Porosität, Temperaturstabilität, chemische Beständigkeit und Hydrophobie) besonders gut als Schutzkomponenten für akustische Sensorgeräte wie MEMS-Mikrofone.

PI-Nanofasern sind nicht nur robust gegenüber rauen Umgebungsbedingungen, sondern auch sehr widerstandsfähig gegenüber dem Reflow-Lötprozess eines gehäuseten Mikrofons bei einer Spitztemperatur von 260 °C.

Die Anwendung des schützenden Nanofasergewebes wurde an einem hochleistungsfähigen digitalen MEMS-Mikrofonen von Infineon im Industriestandardaufbau anhand von zwei Gewebetypen demonstriert und bewertet.

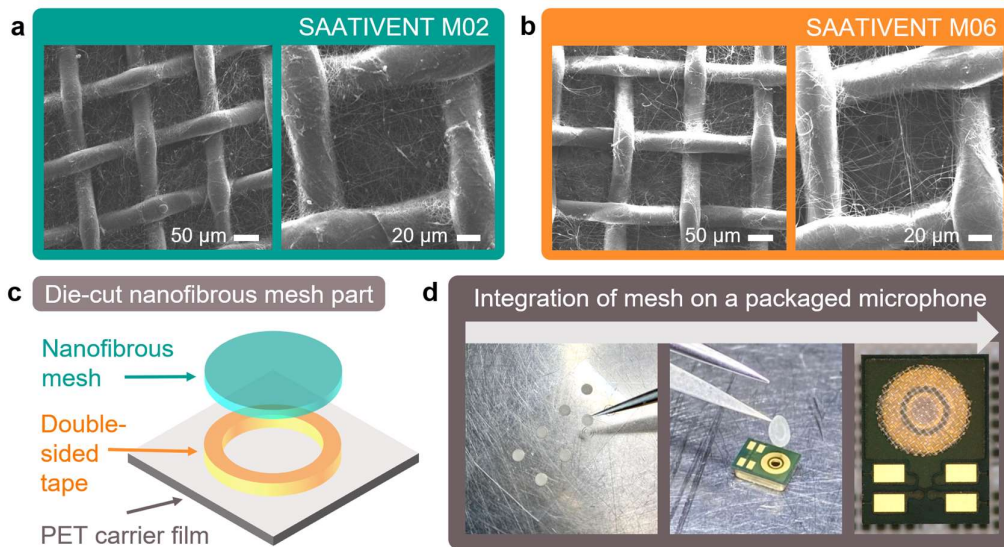


Abbildung 26: Umgebungsschutzkomponenten, bei denen Polyimid-Nanofasern auf monofilament Polyetheretherketon (PEEK)-Gewebe mit gewebten Maschen kombiniert werden

Luftpartikelfiltration und Drucktests:

Die entwickelten Nanofasergewebe wurden in verschiedenen Robustheitstests untersucht. Zum einen wurden Luftpartikelfiltrationstests durchgeführt, wobei Partikel mit verschiedenen Nanopartikelgrößenverteilungen (d.h. 340, 470, 630 und 840 nm) verwendet wurden. Dabei wurden die zahlenmäßige Konzentration der strömenden Partikel vor und nach dem Durchgang durch den Maschenstanzteil aus Nanofasernetz verglichen, um die Partikelfiltereffizienz zu bestimmen. Das Nanofasergewebe erreicht eine Filtrationseffizienz von bis zu 94% für Submikronpartikel mit 840 nm und beweist damit seine Funktionalität als Schutzelement gegen unerwünschte Umgebungseinflüsse.

Zum anderen wurde ein statischer Drucktest zur Charakterisierung der mechanischen Robustheit von Membranen bei hohem Druck an dem Maschenstanzteil durchgeführt. Im Versuchsaufbau wurde eine Düse zur Druckbeaufschlagung auf einer Probe positioniert und das Druckniveau schrittweise erhöht anschließend gemessen. Im Gegensatz zu den Nanofasern, die bei niedrigem Druck (bereits ab 50 kPa) beschädigt wurden, blieb das PEEK-Stützgewebe auch bei einem höheren Druck von 800 kPa stabil und unverändert.

Elektroakustische Charakterisierung:

Die Elektroakustische Leistung wird von der Dichte der elektrogesponnenen Nanofasern beeinflusst, wobei gegen die Umgebungsrobustheit abzuwägen ist:

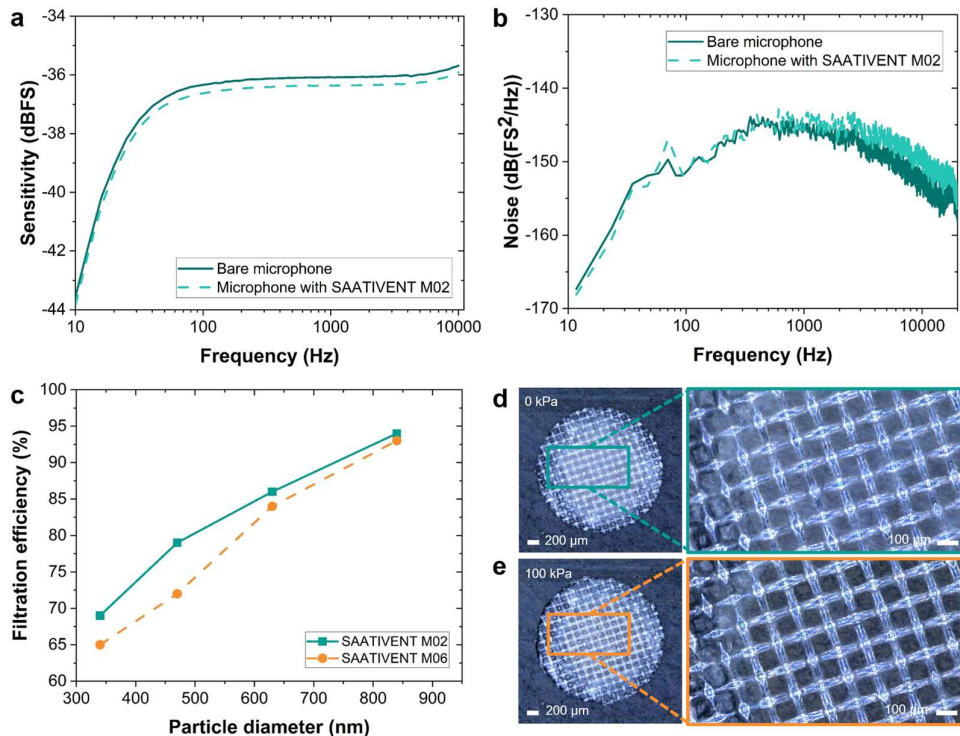


Abbildung 27: Elektroakustische Leistung von MEMS-Mikrofonen mit integriertem Nanofasergewebe und Robustheitstests von gestanzten Netzen (Infineon)

Vergleich Glass-Mesh – Nanofasergewebe:

Im Vergleich zu dem durch laserinduziertes Tiefätzen gefertigten Glas-Mikrogitterchip weist die gestanzte Nanofasergewebemembran eine überlegene Partikelfilterleistung auf. Das Nanofasernetz kann Nanopartikel mit einer Größe von $< 1 \mu\text{m}$ filtern, während das Glasnetz nur große Mikropartikel mit einer Größe von $> 80 \mu\text{m}$ filtern kann. Diese Eigenschaft wird durch die Kombination von elektrogewebenen PI-Nanofasern mit einem PEEK-Netz ermöglicht. Dieser Vorteil poröser Strukturen und kleinerer Maschenweiten ($< 1 \mu\text{m}$) geht jedoch mit einer größeren Beeinträchtigung der elektroakustischen Leistung einher.

Bei Verwendung derselben MEMS-Mikrofone (IM72D128V01) als Testvehikel ist der durch das Nanofasernetz verursachte SNR-Verlust (d.h. $(2,05 \pm 0,16) \text{ dB(A)}$) etwa dreimal höher als der des Glasnetzes (d.h. $(0,65 \pm 0,05) \text{ dB(A)}$). Dieser SNR-Verlust kann vermutlich durch Änderung der Produktionsparameter und damit der Nanofasereigenschaften reduziert werden. Ein detaillierter Vergleich zwischen dem Nanofasernetz und seinem Gegenstück aus Glas ist in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Vergleich von Geweben als Schutzkomponenten für MEMS-basierte Mikrofone

Parameter	Glasgewebe	Nanofasergewebe
Material	Glas	PI-Nanofasern, kombiniert mit PEEK-Gewebe
Herstellungsverfahren	Laserinduziertes Tiefätzen (LIDE)	Elektrospinnen
Skalierbarkeit	8-Zoll-Wafer-Level-Maßstab	Großmaßstab (Roll-to-Roll)
Kompatibilität mit Prozessen der Halbleiterindustrie	Hoch	Gering
Form und Größe des Chips (Prüfprobe)	Rechteckig; Chipgröße = $1,7 \times 1,7 \text{ mm}^2$	Rund; Innendurchmesser = 1,4 mm, Außendurchmesser = 2,2 mm
Maschenweite	$80 \mu\text{m}$	$< 1 \mu\text{m}$
Empfindlichkeitsänderung	$(0,11 \pm 0,04) \text{ dBFS}$	$(0,30 \pm 0,11) \text{ dBFS}$
SNR-Verlust	$(0,65 \pm 0,05) \text{ dB(A)}$	$(2,05 \pm 0,16) \text{ dB(A)}$
SNR des durch ein Netz geschützten MEMS-Mikrofons	$(71,24 \pm 0,11) \text{ dB(A)}$	$(70,05 \pm 0,17) \text{ dB(A)}$
Partikelfilterleistung	Mikropartikel ($> 80 \mu\text{m}$)	Nanopartikel ($< 1 \mu\text{m}$)
Wasserkontaktwinkel	$(133,1 \pm 10,3)^\circ$	$(132,8 \pm 5,1)^\circ$

Einordnung der Ergebnisse der Akustik-Untersuchungen

Für die Untersuchung von Wind- bzw. Strömungsverhältnissen ist u.a. eine bestmögliche Empfindlichkeit Infraschallsensoren im Niederfrequenzbereich erforderlich. Die Ergebnisse der Grundlagenermittlung zur akustikbasierten Sensorik erbrachten keine zielführende Auswertungen für den Einsatz der von Infineon Technologies beigestellten MEMS-Mikrofone oder zur weiteren Mikrofonentwicklung nutzbare neue Spezifikationen.

Die Beiträge zur akustischen Sensorik wurden daher auf den Schwerpunkt der Miniaturisierung für die UAS-Integration gelegt, wobei ein platzsparender Schutz der Akustiksensoren gegen ungewünschte Umwelteinflüsse im Fokus der Entwicklungen und Untersuchungen stand (> Miniaturisierung für UAS-Integration).

Die für die Verlängerungsphase des Projektes beabsichtigte Ausweitung der Untersuchungen zur elektroakustischen Leistung auf den in URBANSens bereitgestellten und von STKS eingesetzten Mikrofontyp IM68D130A konnte aus zeitlichen Gründen nicht mehr erfolgen; eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse und Folgerungen läßt sich allerdings aufgrund der baulichen Ähnlichkeiten dieser MEMS-Sensoren annehmen.

Hauptarbeitspaket 7 – Flugerprobung und Evaluierung des Gesamtsystems

In Hauptarbeitspaket 7 wurde angestrebt, einen flugfähigen Demonstrator mit den zu optimierenden Komponenten auszustatten und damit – unter Gewinnung von Daten durch radarbasierte bzw. akustische Sensoren in Echtzeit – realistische Flugversuchsdaten zur Windfeldmessung und zur Bestimmung einer optimierten Flugbahnregelung zu erzielen.

Soft- und Hardwareentwicklung Flugregelung

Als Ergebnis der Soft- und Hardwareentwicklung zur Flugregelung war die Soft- und Hardware-Implementierung des Flugregelungssystems auf den zu testenden UAS-Plattformen mit der begleitenden Beteiligung von Infineon Technologies vorgesehen. Auf dem während der Projektlaufzeit von URBANSens erzielten Erkenntnisstand zu den Spezifikationen und wegen der daraus resultierenden mangelnden Einsatzfähigkeit neu zu entwickelnder Radar- bzw. akustischer Sensorik konnte Infineon Technologies lediglich durch Beistellung verfügbarer Hardware zur Integration der Sensoren im Gesamtsystem beitragen.

Integration des Kommunikationssystems und der Sensoren ins UAS

Die Integration des Kommunikationssystems und der Sensoren ins UAS-Gesamtsystem zielte darauf, Hardware sowie entwickelte Software zu installieren und zu testen. Mangels der Spezifikationen und Einsatzfähigkeit neuentwickelter Radar- bzw. akustischer Sensorik konnte dahingehend kein Beitrag zur Integration durch Infineon Technologies erfolgen. Für die mögliche Integration von Infineon-MEMS-Mikrofonen in das UAS bildet die von Infineon Technologies neu entwickelte generische Environmental Barrier eine Schutzkomponente, die dem Ziel der Miniaturisierung bei der Integration ins Gesamtsystem entgegenkommt.

Um zumindest eine reduzierte Integration mit wenigen Mikrofonen umzusetzen, die eigenständig Daten während des Flugversuchs erfassen kann, wurden je zwei digitale MEMS-Mikrofone vom Typ IM66D130A auf einer Leiterplatte in eine 3D-gedruckte Kapsel integriert, welche an verschiedenen Positionen der Tragflächen verschraubt werden kann:

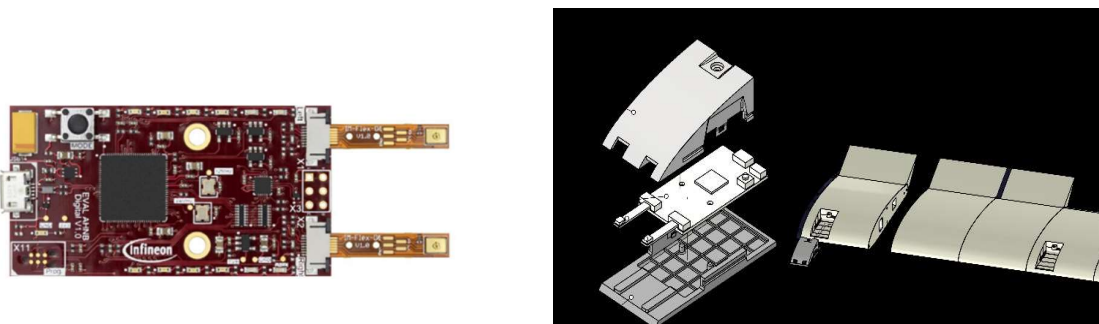


Abbildung 28: Evaluation-Board / Prototypische Umsetzung der MEMS-Mikrofonintegration (Infineon / STKS)

Diese Lösung der reduzierten Integration mit wenigen Mikrofonen wurde kurzfristig entwickelt, um unabhängig von den Ergebnissen der weiteren Arbeitspakete (Winderkennungssensorik) die Integrierbarkeit akustischer Sensorik ins Gesamtsystem zu erproben; eine spätere modulare Erweiterung ist impliziert.

Flugversuch

Flugversuche wurden von Projektpartner FMR mit Beteiligung von HFT durchgeführt; dabei standen die Flugbahnregelung und das integrierte Kommunikationssystem zur Erprobung. Mangels der Einsatzfähigkeit beigestellter/neuentwickelter Radar- bzw. akustischer Sensorik erfolgte keine aktive oder begleitende Beteiligung von Infineon.

In der Verlängerungsphase des Projekts konnte noch ein ergänzender Testflug durchgeführt werden, in dem die prototypische Integration der beigestellten MEMS-Mikrofone (Typ IM68D130A) erprobt werden konnte. Im Flugversuch wurden Doppelmikrofone mit angepasster Kapsel in einem Tragflächensegment integriert. Während des Versuchs traten Probleme mit einem der MEMS-Evaluationboards auf. Sehr starke Windgeräusche während des Fluges bestätigen den Bedarf an einem expliziten Windschutz. Zusätzliche Einblicke in Propeller-, Servo- und Umgebungsgeräusche wurden gewonnen; die Daten dienen der besseren Charakterisierung von Störquellen und deren späterer Kompensation. Langfristig kann mit der Nutzung des A2B-Busses, der laut Spezifikation deutlich größere Leitungslängen ermöglicht, ein Konzept entwickelt werden, das die Abmessungen des UAS weit überschreitet; entsprechende A2B-Lösungen liegen bei Infineon Technologies bereits vor.

Gesamtheitliche Bewertung und Verwertungsstudie

Die Gewinnung von Daten zur Windfeldmessung in Echtzeit durch radarbasierte bzw. akustische Sensoren konnte im Projekt weder auf Laborebene, noch im Flugversuch in der erwünschtermaßen fortgeschriebenen und deutlich dezidierten Form hergeleitet werden. Mögliche Verwertungswege für die erzielten Sensorverbesserungen abseits der Flugbahnregelung mit Hilfe von Windvektormessungen wurden und werden geprüft.

Einordnung der Ergebnisse der Flugversuche

Aus Sicht von Infineon Technologies waren die Flugversuche bezüglich der Sensorik-Technologie vordergründig auf Konstruktionsaspekte und Integrationstests ausgelegt.

II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Infineon Technologies AG wurde im Projekt URBANSens mit einer Förderquote von 50 % unterstützt. Wichtigste Position waren dabei die Personalkosten. Für die Flugerprobung und Evaluierung des Gesamtsystems in Hauptarbeitspaket 7 vorgesehene, aber nicht umgesetzte Aufwendungen konnten kostenneutral in die Fortführung der Radarentwicklung in Hauptarbeitspaket 4 verschoben werden. Materialkosten wurden lediglich für ein B11HFC-Tapeout sowie für bereitgestellte Mikrofontechnik geltend gemacht; infolge erheblicher Kostensteigerungen wurden die weiteren Tapeouts Infineon-intern getragen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten liefern Beiträge zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der Luftfahrt. Durch vernetzte Kommunikation und verbesserte Energieeffizienz bezüglich der Flugbahnplanung kann zudem die Umwelt geschützt werden, insbesondere in urbanen Gebieten, wo Luftqualität und Verkehrssicherheit eine große Herausforderung darstellen. Mit URBANSens soll eine deutlichere Positionierung in dieser Branche erreicht und ein stärkeres Bewusstsein für das Potential an modernen Sensorkonzepten in der Luftfahrtindustrie geschaffen werden; die Entwicklung komplexer, innovativer Sensorkonzepte und Systeme für Luftfahrtanwendungen und sowie deren Darstellung mittels voll funktionsfähiger Demonstratoren stellt eine große Herausforderung dar. Hier waren technologische Grundlagen zu erarbeiten und innovative Lösungswege aus unterschiedlichen Bereichen zu bündeln; daher konnte dieses für die Luftfahrt wichtige Vorhaben von Infineon Technologies nicht unabhängig von den akademischen Partnern angegangen werden. Fördermittel zur Unterstützung waren daher unentbehrlich, um die herausfordernden Aufgaben in der notwendigen wissenschaftliche Breite in einem hochqualifizierten, interdisziplinären Team zu bearbeiten. Das Risiko, die angestrebten Ziele nicht vollständig erreichen zu können, ist während des Projektverlaufs eingetreten.

Im Bereich der Radar- und Akustik-Windfeld-Sensoren wurden grundlegende Arbeiten zur Bestimmung der Systemparameter der Sensorsysteme durchgeführt. Für Akustik- wie auch und Radarmessungen wurde erarbeitet, welche physikalischen Phänomene grundsätzlich für eine hinreichend gute Detektion von Scher- oder Aufwinden in Frage kommen. Daher war es nötig, die Grundlagen zu erarbeiten, deren Eignung messtechnisch zu prüfen und dazu geeignete Messaufbauten für kontrollierte und wiederholbare Messungen zu entwerfen. Dank der kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit konnten wesentliche Grundlagenerkenntnisse zur Machbarkeit konsolidiert werden (> Tabelle 1). In der Radarentwicklung konnten überdies noch deutliche Fortschritte in der SiGe-BICMOS-Technologie erzielt werden, die den Weg für verschiedene sich abzeichnende Verwertungsmöglichkeiten in der Luft- und Raumfahrt ebnet.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses

Für die Radarsensorik zur Windfeldmessung wurden im Rahmen theoretischer Betrachtungen erforderliche Leistungsparameter für ein reales System ermittelt sowie durch Messungen im Labor und im Windkanal verifiziert. Mit den akustischen Windfeldsensoren wurde ein neuartiges Messprinzip erstmals systematisch untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in weitere Untersuchungen ein, mit dem Ziel der Ermittlung der notwendigen Leistungsparameter für einen Einsatz u.a. auch auf UAV.

Infineon Technologies wird die im Verbundvorhaben gewonnenen Erfahrungen und Technologien über einen langfristigen Zeitraum für die Entwicklung von Radarsystemen und deren Komponenten nutzen. Infineon erwartet, durch diese Entwicklungen weiterhin Technologieführer bei SiGe-basierten Radar-Frontends zu bleiben. Infineon hat bereits erhebliche finanzielle Mittel in die Entwicklung seiner SiGe-BiCMOS-Technologien investiert und arbeitet zurzeit intensiv an der Weiterentwicklung der B12RFC-Technologie. Für integrierte Schaltungen in SiGe-BiCMOS-Technologie zeichnet sich eine Reihe zukünftiger Verwertungsmöglichkeiten in der Luftfahrt ab:

- Radarsensoren: SiGe-BiCMOS-Technologie kann für die Entwicklung von Radar- und Sensorsystemen in der Luftfahrt verwendet werden, etwa für autonomes Fliegen von Drohnen (Detect&Avoid) und anderen Flugobjekten oder ähnlich wie in diesem Projekt für das Erkennen von Wetterbedingungen.
- Kommunikationssysteme: SiGe-BiCMOS-Technologie wird als Schlüsseltechnologie bei der Entwicklung von (LEO-) Satelliten-kommunikations-systemen angesehen.
- Auch in Navigationssystemen können integrierte Schaltungen in SiGe-BiCMOS-Technologie eine wichtige Rolle spielen.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung sind keine Fortschritte anderer Stellen bekannt geworden, die zum Stand der Technik beitragen.

Anhänge

Veröffentlichungen

- G. Acanfora, S. Anzinger, B. Winkler, M. Fueldner, E. Peiner and H. S. Wasisto, „Laser-Processed Protective Glass Micromesh Chips for Acoustic MEMS Sensors“. IEEE Sensors Journal, vol. 23, no. 24, pp. 30194-30201, 15 Dec.15, 2023.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3329054>
- Wasisto, H.S., Anzinger, S., Acanfora, G. et al., „Acoustically semitransparent nanofibrous meshes appraised by high signal-to-noise-ratio MEMS microphones“. Commun Eng 3, 136 (2024).
<https://doi.org/10.1038/s44172-024-00283-4>
- Shuvadip Ghosh, Hao Li, Nils Pohl, „Low Phase Noise and Low Power Consumption Magnetic Cross-Coupled Push-Push VCO in SiGe BiCMOS Technology“. BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS) 16-18 Oct. 2023 Conference Paper.
<https://doi.org/10.1109/BCICTS54660.2023>
- S. Ghosh, H. Li and N. Pohl, "Low and Stable Phase Noise W-Band Capacitive Cross Coupled VCO across tuning range in 90 nm SiGe BiCMOS Technology". 2025 16th German Microwave Conference (GeMiC), Dresden, Germany, 2025, pp. 653-656.
<https://doi.org/10.23919/GeMiC64734.2025.10979133>

Tabellen

Tabelle 1: Ergebnisstand vor / mit Verlängerung der Projektlaufzeit

Tabelle 2: Übersicht der Tapeouts zum spannungsgesteuerten Oszillator (VCO) in URBANSens (Infineon)

Tabelle 3: Tapeouts zum Leistungsverstärker (PA) und Sender (TX)) in URBANSens (Infineon)

Tabelle 4: Entwicklung der SiGe-Technologien bei Infineon

Tabelle 5: Stand der Technik für SiGe BiCMOS-Technologien

Tabelle 6: Vergleich von Geweben als Schutzkomponenten für MEMS-basierte Mikrofone

Abbildungen

Abbildung 1: Darstellung der technischen Arbeitspakete und spezifischen Aufgabenfelder im Verbundprojekt URBANSens	6
Abbildung 2: Ultra-Breitband 80 GHz / 240 GHz FMCW Radarsysteme (RUB)	9
Abbildung 3: Bilder der MMICs URBANTX1 und URBANRX1 (RUB).....	12
Abbildung 4: Block-Level-Design des 240-GHz-Radarsenders (Infineon).....	15
Abbildung 5: Magnetisch gekoppelter VCO in Bipolar-Technologie - Blockdiagramm und Chip-Foto (Infineon).....	17
Abbildung 6: Magnetisch gekoppelter VCO in Bipolar-Technologie - Gemessene Leistung	17
Abbildung 7: Verbesserter Single-Core-Colpitts-VCO in B12 HFC-Technologie - Blockdiagramm und Chip-Foto (Infineon).....	18
Abbildung 8: Verbesserter Single-Core-Colpitts-VCO in B12 HFC-Technologie – Leistungsdaten (gemessen).....	18
Abbildung 9: Dual-Core-Colpitts-VCO in B12 HFC -Technologie – Blockdiagramm und Chip-Foto	19
Abbildung 10: Dual-Core-Colpitts-VCO in B12 HFC -Technologie – Leistungsdaten	19
Abbildung 11: VCO – Vergleich des Phasenrauschens mit dem Stand der Technik	20
Abbildung 12: VCO – Vergleich der Leistungszahl (FOM) mit dem Stand der Technik	20
Abbildung 13: Bauteilintegration und die BEOL-Schichten des Leistungsverstärkers in Infineon B12HFC-Technologie	21
Abbildung 14: Vereinfachte Darstellung des implementierten Leistungsverstärkers mit einer verbesserten Endstufe (PA2) und einer Standard-Endstufe (PA1).....	23
Abbildung 15: Simulierte Ausgangsleistung (schwarz) und Verstärkung (blau) von PA1 (durchgezogen) und PA2 (gestrichelt) über der Eingangsleistung.....	23
Abbildung 16: Simulierte Ausgangsleistung von PA1 (durchgezogen) und PA2 (gestrichelt) über die Betriebsfrequenz	23
Abbildung 17: Messaufbau für die Charakterisierung von PA2 und Chipfoto von PA2.....	24
Abbildung 18: Gemessene Ausgangsleistung und PAE über die Betriebsfrequenz (a). Gemessene Ausgangsleistung (schwarz), Verstärkung (blau) und PAE (b) ..	24
Abbildung 19: Chipfoto des Senders (TX).....	24
Abbildung 20: Simulationsaufbau für die Charakterisierung des Senders (TX).....	25
Abbildung 21: Gemessene Ausgangsleistung des implementierten Senders (TX) bei 25 °C (schwarz) und 125 °C (rot).....	25
Abbildung 22: Frequenzgang von IM66D130A (Digitalmikrofon) im Vergleich zu IM68A130A (Analogmikrofon) und anderen, marktgängigen Mikrofontypen (Infineon)	29

Abbildung 23: Durch Glasgitter gestopptes Haarstück.....	31
Abbildung 24: Wassertropfen auf Glasschutz mit WCA=120°	32
Abbildung 25: Frequenzgangvergleich des Mikrofons ohne/mit Environmental Barrier (Glass-Mesh).....	32
Abbildung 26: Umgebungsschutzkomponenten, bei denen Polyimid-Nanofasern auf monofilem Polyetheretherketon (PEEK)-Gewebe mit gewebten Maschen kombiniert werden.....	33
Abbildung 27: Elektroakustische Leistung von MEMS-Mikrofonen mit integriertem Nanofasergewebe und Robustheitstests von gestanzten Netzen (Infineon)..	34
Abbildung 28: Evaluation-Board / Prototypische Umsetzung der MEMS-Mikrofonintegration (Infineon / STKS)	37