

Kurzbericht (Teil I des Schlussberichts)

Dieser Bericht hebt die Innovationen im Bereich der Millimeterwellen-Antennen- und Gehäusetechnologie hervor, die in diesem Projekt erzielt wurden, mit dem Ziel, Radarsysteme im Hochfrequenzbereich (über 100 GHz) zu verbessern. Es werden auch die Fortschritte in der Radarsignalverarbeitung skizziert, die direkt die gestenbasierte Erkennung mittels Radar unterstützen, eine aufstrebende Technologie für Benutzeroberflächen. Diese Innovationen versprechen signifikante Verbesserungen in der Leistung der radar-basierten Gestenerkennung für Anwendungen wie z.B. in Automobilsystemen.

Millimeterwellen-Antennen und Gehäuseinnovationen für miniaturisierte Radar-System-in-Package

1. **Breitbandige und hochgewinn Antennendesigns im D-Band Frequenzbereich 110 – 170 GHz:** Innovative Antennendesigns wurden für Millimeterwellen-Frequenzen entwickelt, mit dem Fokus auf die Verbesserung des Gewinns und der Bandbreite. Die im Rahmen dieses Projekts entwickelten Millimeterwellen-Antennen umfassen:
 - **Differenzielle Antennen:** Diese Antennen, wie der Electric Split Ring Resonator (eSRR) kombiniert mit einem hornförmigen Reflektor, erzielten rekordverdächtige Signalstärken über 100 GHz mit kostengünstigen Fertigungsmethoden.
 - **Einzel-End-Antennen:** Designs wie das Array des Differential Split Ring Resonators (SSRR) bieten breite Bandbreiten und sind für kompakte, leistungsstarke Verpackungen optimiert.
 - Die Wahl spezieller Antennen, wie des ecken-genährten Patch-Elements, im finalen System-in-Package für die Sender-integrierte Schaltung balanciert hohe Leistung mit praktischen Größenbeschränkungen.
2. **Hochleistungs-Antenne-in-Package:** Bei hohen Frequenzen können unerwünschte Oberflächenwellen die Leistung einer Antenne-in-Package beeinträchtigen. Das Fehlen traditioneller Strukturmaßnahmen in kostengünstigen Fertigungsprozessen stellte eine Herausforderung dar. Die entwickelten Lösungen zur Bewältigung dieser Herausforderungen umfassen:
 - **Präzise Antennenplatzierung:** Die optimale Antennenposition wurde in Bezug auf die Gehäuseränder bestimmt, um Oberflächenwellenreflexionen zu eliminieren.
 - **Oberflächenwellen-Stornungs-Antennen (Surface Wave Cancellation, SWC):** Eine neue Art von Antenne wurde entwickelt, um gleichzeitig zwei Arten von Oberflächenwellen zu adressieren, was den Weg für eine zuverlässige Hochfrequenzbetrieung in kompakten Geräten ebnet.
3. **Innovationen in Millimeterwellen-Signalverbindungen:** Verbindungen sind die kleinen Wege, die Signale zwischen den verschiedenen Komponenten eines Radarsystems übertragen. Mehrere Fortschritte wurden erzielt, um mit den massiven Datenraten und höheren Taktfrequenzen umzugehen, die für fortschrittliche Radarsysteme erforderlich sind:
 - **Hochbandbreiten-Verbindungen:** Eine neuartige quasi-koaxiale Verbindung ermöglicht effiziente Signalübergänge bei noch nie dagewesenen Geschwindigkeiten, die für zukünftige Radar-Anwendungen entscheidend sind.
 - **Kompakte Designs:** Optimierungen wie das "Schmetterlings"-Design gewährleisten eine robuste Leistung und sparen gleichzeitig Platz.
4. **Proof-of-Concept Gehäuse:** Die Praktikabilität des System-in-Package-Designs wurde erfolgreich durch die Herstellung von Testsystemen demonstriert. Diese Systeme enthielten fortschrittliche Verbindungen, effiziente Verpackungen und eine effektive Integration von Antennen mit Hochfrequenz-Radar-Chips. Die in diesem Projekt erzielten Messergebnisse zeigten:
 - Ausgezeichnete Signalperformance über verschiedene Frequenzbereiche hinweg.

- Die Herstellbarkeit mit eingebetteter Wafer-Level Ball-Grid Array (eWLB)-Technologie, eine kostengünstige Gehäuselösung.

Bedeutende Errungenschaften im Bereich der Radarsignalverarbeitung

1. **Bestimmung optimaler PN-Sequenzen:** Das Radarsignalverarbeitungssystem in diesem Projekt wurde entwickelt, um die Funktionalität und Effizienz, insbesondere für Anwendungen wie die Gestenerkennung, zu verbessern. Im Kern des Systems stehen Pseudo-Rausch (PN)-Sequenzen, speziell M-Sequenzen, die aufgrund ihrer einfachen Implementierung und zuverlässigen Autokorrelations-Eigenschaften ausgewählt wurden. Diese Sequenzen minimieren Signalinterferenzen und balancieren Leistung und Hardware-Ressourcenanforderungen. Obwohl alternative Sequenzen wie Gold oder Kasami eine bessere Rauschunterdrückung bieten, machen ihre Komplexität und die größeren Chipflächenanforderungen M-Sequenzen zu einer praktischeren Wahl für diese Anwendung. Zur weiteren Trennung von Signalen in einer Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO)-Radar-Konfiguration verwendet das System 8-Bit Hadamard-Codes für die äußere Kodierung. Diese zusätzliche Schicht sorgt für eine klare Signaltrennung, auch in Fällen, in denen eine perfekte Synchronisation zwischen den Kanälen nicht garantiert werden kann.
2. **Datenratenreduktion:** Angesichts der hohen Datenraten, die von Radarsystemen benötigt werden, war die Reduzierung des zu verarbeitenden und zu übertragenden Datenvolumens ein wesentlicher Fokus. Zwei Methoden wurden bewertet: komprimiertes Sensing und alternatives Abtasten. Während komprimiertes Sensing Potenzial zur Reduzierung der Datenraten zeigte, erwies es sich als inkompatibel mit der gewählten Hadamard-Codierungsstruktur. Alternativabtasten erwies sich als eine praktikablere Lösung, da unvollständige Sequenzen zu einem vollständigen Radarsignal kombiniert werden können. Dieser Ansatz erzielt eine erhebliche Datenreduktion, ohne die Signalqualität zu beeinträchtigen. Ein optimaler Abtaststratenreduktionsfaktor von 5 wurde ermittelt, um ein Gleichgewicht zwischen der Aufrechterhaltung der Phasen-Kontinuität und den Hardware-Beschränkungen zu finden.

Um den Hochgeschwindigkeitsdatenverkehr zu unterstützen und präzises Timing sicherzustellen, übernimmt das System eine modifizierte Implementierung des JESD204B-Standards. Dies beinhaltet Synchronisationssignale wie SYNC, SYSREF und CLK, die eine fehlerfreie Datenübertragung mit Raten von bis zu 12,5 GHz ermöglichen. Die Integration dieser Signale stellt sicher, dass das Radarsystem auch unter anspruchsvollen Bedingungen zuverlässig arbeitet.

3. **Konvolutionale Neuronale Netzwerke (CNNs):** Für die Gestenerkennung verwendet das System konvolutionale neuronale Netzwerke (CNNs) zur Klassifizierung von Radardaten. Ein Datensatz mit sieben gängigen Handgesten wurde unter Verwendung eines FMCW-Radars gesammelt und dient als Grundlage für das Training und die Validierung der neuronalen Netzwerke. Dieser innovative Ansatz ermöglicht die Echtzeitverarbeitung und ist besonders geeignet für Anwendungen wie gestenbasierte Steuerungssysteme in Fahrzeugumgebungen. Die neuronalen Netzwerkmodelle nutzen radar-erzeugte Bilder, was das System robust und anpassungsfähig an verschiedene betriebliche Szenarien macht.

Im endgültigen Design zeigt die Radarsignalverarbeitungspipeline eine harmonische Integration von effizienter Kodierung, fortschrittlichen Algorithmen und modularer Flexibilität. Diese Merkmale verbessern nicht nur die Fähigkeiten des Systems für Hochgeschwindigkeitsbetrieb, sondern ermöglichen auch eine robuste Gestenerkennung, was das Radar für vielseitige Anwendungen von der Mensch-Computer-Interaktion bis zu Fahrzeugsteuerungssystemen positioniert.

ForMikro – REGGAE

FKZ: 16ES1061

ausführlicher Sachbericht (Teil II des Schlussberichts)

1. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt hat die Entwicklung von Millimeterwellen-Antennen vorangetrieben und dabei bemerkenswerte Verbesserungen in Bezug auf Bandbreite und Gewinn erzielt. Differentialantennendesigns wie das eSRR (Electric Split Ring Resonator), integriert mit einem Hornreflektor, erreichten einen Spitzengewinn von 10,2 dBi und eine Bandbreite von 26,9 % im Frequenzbereich von 127-166 GHz. Unter den Single-Ended-Designs zeigte die Corner-Fed-Patch-Antenne eine wettbewerbsfähige Kombination aus einer Bandbreite von 34 % (115-162 GHz) und einem Gewinn von 6 dBi, während das SSRR (Differential Split Ring Resonator)-Antennen-Array eine Bandbreite von 28,6 % (120-160 GHz) und einen Gewinn von 6,8 dBi erzielte. Diese Designs erfüllen die Systemanforderungen und bieten eine breite Frequenzabdeckung sowie eine verbesserte Leistung für Millimeterwellenanwendungen, insbesondere in der eWLB (Embedded Wafer Level Ball Grid Array)-Gehäusetechnologie.

Die Leistung des Radarsystems wurde anhand verschiedener Parameter bewertet, insbesondere im Hinblick auf die Handgestenerkennung. Die gewählte M-Sequenz mit einer Länge von 2047 und einem Unterabtastfaktor von 5 bietet eine optimale Balance zwischen Datenrate und Systemkomplexität. Die Bandbreite des Systems und die Frequenzreichweite wurden auf Basis von umfangreichen Simulationen und Messungen festgelegt, wobei die maximale eindeutige Geschwindigkeit und die Radarquerschnittsfläche (RCS) an die Anforderungen der Handgestenerkennung angepasst wurden. Für die Handgestenerkennung wurden Convolutional Neural Networks (CNNs) verwendet, wobei ein Datenset für sieben verschiedene Gesten aufgezeichnet wurde. Dieses Datenset hat die Grundlage für die Validierung der Algorithmen geliefert und dient als Vergleichsmatrix für radarbasierten Gestenerkennungssysteme. Die genaue Erfolgsquote der Gestenerkennung wurde in den entsprechenden Veröffentlichungen dokumentiert und dient als Benchmark für das System. In Bezug auf die Radarleistung liegt der Fokus auf der Trennbarkeit der MIMO-Kanäle und der robusten Isolierung der Kanäle mithilfe von Hadamard-Codes. Diese Optimierungen tragen zur Effizienz und Leistung des Systems bei und ermöglichen eine hochpräzise und zuverlässige Gestenerkennung bei der Anwendung im Auto-Innenraum.

Trotz der auftretenden Komplikationen bei der Implementierung des JESD204B-Protokolls, insbesondere der Inkompatibilität zwischen dem ADC-Chip und dem FPGA-IP-Block, konnten dennoch wesentliche funktionale Tests und Messungen durchgeführt werden, um die grundlegende Funktionalität des Systems zu validieren. Zunächst wurde das JESD204B-Protokoll erfolgreich auf einem einzelnen FPGA implementiert und messtechnisch validiert. In einem ersten Testaufbau konnte das System bei einer 12,5-GHz-Bitrate fehlerfrei übertragen werden. Diese Übertragung wurde mit Testsignalen und einem integrierten Internal Logic Analyzer (ILA) Block überprüft. Anschließend wurde eine FPGA-Implementierung mit zwei separaten Boards erstellt, wobei eines das Verhalten des ADCs emulierte und das andere als JESD-Empfänger fungierte. In diesem Setup konnte eine fehlerfreie Datenübertragung über das JESD-Protokoll gezeigt werden. Die Interoperabilität der beiden Protokollvarianten hinsichtlich des Decodings wurde ebenfalls simulativ überprüft, wobei Testdaten des REGGAE-ADCs verwendet wurden. Ein zweiter Testaufbau, der den geplanten Demonstrator nachahmte, konnte aufgrund der Inkompatibilität des ADCs mit dem FPGA-IP-Block jedoch nicht vollständig umgesetzt werden. Insbesondere die ILA-Sequenz und die SYSREF- und SYNC-Signale des ADCs wichen vom Standard ab, was eine erfolgreiche Synchronisation mit dem FPGA blockierte. Trotz

dieser Schwierigkeiten konnte eine funktionale Validierung des Systems mit kommerziellen Komponenten durchgeführt werden. Ein Testaufbau, bei dem eine simulierte m-Sequenz ins D-Band gemischt und mit einer Hornantenne abgestrahlt wurde, zeigte die prinzipielle Funktionsweise des Systems. Der Empfänger konnte das Signal empfangen, und sowohl die gesendeten als auch empfangenen Daten wurden auf einem Oszilloskop erfasst. Eine anschließende Signalverarbeitung in Matlab ermöglichte eine Validierung der prinzipiellen Funktionsweise, auch wenn die Korrelationen unkalibriert waren und keine absolute Entfernungsmessung durchgeführt werden konnte. Obwohl die vollständige Integration der Tx- und Rx-Chips aufgrund des zeitlichen Rahmens nicht realisiert werden konnte, zeigen diese Tests und Messungen die grundlegende Funktionsfähigkeit der entwickelten Technologien und bestätigen die Effektivität der Systemarchitektur, trotz der Herausforderungen mit dem JESD204B-Protokoll.

Im Rahmen des Projekts wurden umfangreiche Simulationen durchgeführt, um die Systemfunktionalität sicherzustellen und die Optimierungsansätze zu validieren. Der Fokus lag auf der MIMO-Kanaltrennbarkeit und der Effizienz alternativer Sampling-Methoden zur Reduzierung der Datenrate.

MIMO-Kanaltrennbarkeit: Simulationen zeigten, dass eine PN-Sequenz mit outer Coding, insbesondere 8-Bit-Hadamard-Codes, eine bessere Trennung der MIMO-Kanäle ermöglicht als orthogonale Sequenzen aus derselben PN-Sequenzfamilie. Der 8-Bit-Hadamard-Code erwies sich als optimal, da er eine effektive Kanaltrennung bei vier Sendern gewährleistet, selbst bei nicht perfekter Synchronisation.

Datenratenreduktion mit Alternate Sampling: Der Alternate Sampling-Ansatz erwies sich als effektive Methode zur Reduzierung der Datenrate bei gleichzeitiger Bewahrung der Informationsvollständigkeit. Im Vergleich zu Compressed Sensing ermöglichte dieser Ansatz eine Reduzierung der Datenrate ohne die Komplikationen der Anpassung des Outer Codings, mit nur minimalem Verlust an Verarbeitungseffizienz aufgrund reduzierter Akkumulationen.

Optimierung des Unterabtastfaktors: Die Wahl eines Unterabtastfaktors von 5 stellte sich als optimal heraus. Höhere Faktoren führten zu Phasendiskontinuitäten im Datenstrom, während zu niedrige Faktoren die Anzahl der Verbindungen zwischen ADC und FPGA erhöhten, was die Hardware-Implementierung erschwerte.

Finale Systemparameter: Die finalen Sequenzparameter umfassen eine Sequenzlänge von 2047, 30 Akkumulationen, einen 8-Bit-Hadamard-Code und einen Unterabtastfaktor von 5. Simulationen bestätigten die Systemfunktionalität und die Eignung für die geplante Anwendung, wobei der PN-Sequenzgenerator eine flexible Anpassung der Sequenzanzahl ermöglichte.

Insgesamt haben die Simulationen eine wesentliche Rolle bei der Feinabstimmung der Systemparameter gespielt und die Effektivität der entwickelten Technologien zur MIMO-Kanaltrennung und Datenratenreduktion bestätigt.

Das Projekt hat bedeutende wissenschaftliche Beiträge geleistet, was durch die zahlreichen Veröffentlichungen in zentralen Bereichen wie Antennen- und Gehäusetechnologie sowie Radarsystemen belegt wird. Diese Publikationen verdeutlichen die Auswirkungen des Projekts auf die Weiterentwicklung von Technologien in den Bereichen Hochfrequenzkommunikation, Radar-Signalverarbeitung und MIMO-Systemen.

Innovation in Antennen und Gehäusetechnologien: Das Projekt hat mehrere Arbeiten zu innovativen Antennendesigns, insbesondere im D-Band und im 140 GHz-Frequenzbereich, veröffentlicht, die für zukünftige Radar- und Kommunikationssysteme von entscheidender Bedeutung sind.

Bemerkenswerte Publikationen beinhalten Arbeiten zu aperture-coupled Antennen, differentialen Antennen und Breitbandlösungen in Embedded Wafer-Level Ball Grid Array (eWLB)-Technologie. Diese Fortschritte wurden auf renommierten internationalen Konferenzen wie der European Microwave Conference (EuMC), der European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) und dem International Workshop on Antenna Technology (iWAT) vorgestellt. Mehrere Arbeiten befassten sich mit der Integration hochfrequenter Antennen in fortschrittliche Verpackungstechnologien.

Forschung zu Radarsystemen und MIMO-Technologien: Die Beiträge des Projekts im Bereich Radarsysteme, insbesondere in den Themen Dopplerverschiebungstoleranz, MIMO-PMCW-Radar und radarbasierte Gestenerkennung, spiegeln sich in zahlreichen Publikationen wider. Diese Studien, die in hochrangigen Fachzeitschriften veröffentlicht und auf führenden Radar-Konferenzen wie dem International Radar Symposium (IRS) und der IEEE Radar Conference (RadarConf23) präsentiert wurden, belegen den Einfluss des Projekts auf die Verbesserung der Radarleistung in dynamischen Umgebungen. Themen wie Dopplerrobustheit, Outer-Coding für MIMO-Systeme und neue Methoden zur Radar-Signalverarbeitung wurden untersucht, was zu einem besseren Verständnis von Radarsystemen unter realen Bedingungen führte.

Interdisziplinäre Beiträge: Zusätzlich hat das Projekt mit Arbeiten zur radarbasierten Gestenerkennung seine Auswirkungen auf interdisziplinäre Felder ausgeweitet. Diese Forschung, die auf der European Radar Conference (EuRAD) und anderen Veranstaltungen präsentiert wurde, ist besonders relevant für neue Anwendungen in den Bereichen Mensch-Maschine-Interaktion, Gesundheitswesen und Sicherheit.

Diese Publikationen belegen nicht nur die wissenschaftliche Relevanz des Projekts, sondern sind auch ein klarer Indikator für die Auswirkungen auf die Radar-, Mikrowellen- und Antennentechnologiefelder. Die Ergebnisse des Projekts wurden weit verbreitet und unterstreichen seinen Wert sowohl für die akademische Welt als auch für die Industrie.

2. Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Notwendigkeit der Projektarbeit:

- 1. Bewältigung der Hauptprobleme im Hochfrequenzdesign:** Der Fokus des Projekts lag darauf, ein System-in-Package für den Hochfrequenzbereich von 110 bis 170 GHz zu entwickeln, was entscheidend war, da es mit den technischen Herausforderungen der Signalintegrität, Entkopplung und Miniaturisierung von Komponenten befasst ist. Die Arbeit war notwendig, um Lösungen zu entwickeln, die die Integration von Sender- (Tx) und Empfängerchips (Rx) mit ihren jeweiligen Antennen in einer Weise ermöglichen, die eine ordnungsgemäße Leistung im anspruchsvollen Frequenzband sicherstellt.
- 2. Komplexität der Verpackung:** Zunächst wurde der Designansatz vorgeschlagen, mehrere Tx- und Rx-Chips innerhalb desselben System-in-Package unter Verwendung von eWLB (embedded wafer-level ball grid array technology) zu integrieren, um eine Multiple-Input-Multiple-Output-Radararchitektur zu realisieren. Durch umfangreiche Diskussionen mit den Projektpartnern wurde jedoch klar, dass die Verpackung mehrerer Tx- und Rx-Chips im gleichen eWLB aufgrund von Größen- und Signalroutierungsbeschränkungen nicht praktikabel gewesen wäre. Diese Problematik erforderte eine Neubewertung des Designs und führte zur Entwicklung von zwei separaten eWLB-Modulen für die Tx- und Rx-Chips, die jeweils mit ihren Antennen integriert wurden.
- 3. Signalintegrität und Entkopplung:** Der niedrige Radarquerschnitt (RCS) des empfangenen Signals eines Handgestes (-45 dBsm) stellte eine erhebliche Herausforderung hinsichtlich der Entkopplung dar. Ohne ausreichende Entkopplung könnte das leistungsstarke Tx-Signal das Rx-

Chip stören und es in die Kompression treiben. Daher war es erforderlich, eine hohe Entkopplung zwischen den Tx- und Rx-Modulen sicherzustellen, um den Erfolg des Projekts zu gewährleisten.

4. **Fertigungstechnische Einschränkungen:** Die Fertigungsgrenzen der eWLB-Technologie, insbesondere die maximale Paketgröße von 9 mm x 9 mm, machten es klar, dass es nicht machbar war, mehrere Tx- und Rx-Chips in einem einzigen eWLB-Paket zu integrieren. Diese Einschränkung verdeutlichte die Notwendigkeit eines umstrukturierten Ansatzes mit separaten Tx- und Rx-Modulen.

Angemessenheit der Projektarbeit:

1. **Anpassung an technologische Einschränkungen:** Der Wechsel von einem einzigen System-in-Package zu zwei separaten Modulen (eines für Rx und eines für doppelte Tx) war eine direkte und angemessene Reaktion auf die technologischen Einschränkungen und Herausforderungen, die während des Projekts auftraten. Die Entscheidung, separate Module zu verfolgen, stellte sicher, dass das Gesamtsystem effektiv arbeiten konnte, ohne die Leistung aufgrund von Signalstörungen, Größenbeschränkungen oder Routing-Problemen zu gefährden.
2. **Innovation im System-in-Package-Design:** Durch die Wahl des alternativen Ansatzes leistete das Projekt einen bedeutenden Beitrag zum Bereich des System-in-Package-Designs für Hochfrequenzanwendungen. Die Innovation in der Verpackungstechnologie, insbesondere die Integration von Chips mit Antennen in einem kommerziell verfügbaren eWLB-Paket, stellt einen bemerkenswerten Fortschritt dar, insbesondere für Hochfrequenzsysteme, die im GHz-Bereich (110 bis 170 GHz) arbeiten. Dieser Ansatz eröffnete neue Möglichkeiten für zukünftige Designs in diesem Frequenzbereich.
3. **Praktische Umsetzung und Ingenieurtechnische Machbarkeit:** Obwohl die Produktion separater Tx- und Rx-Module (acht Rx- und vier Tx-Module) und deren Montage auf einer PCB eine praktikable Option gewesen wäre, hätte dies erhebliche Ingenieurherausforderungen mit sich gebracht und zu unerwünschten Effekten wie Gitterkeulen geführt. Dieses Problem tritt auf, weil bei hohen Frequenzen die Entfernung zwischen den Tx- und Rx-Antennen viel größer als die halbe Wellenlänge gewesen wäre, was zu potenziellen Interferenzmustern geführt hätte, die die Gesamtleistung des Systems verringern. Allerdings ermöglichte die Produktion eines einzelnen Rx- und eines dualen Tx-Moduls in separaten eWLB-Paketen ein besser handhabbares Design, das eine kürzere und kontrolliertere Entfernung zwischen den Modulen aufrechterhielt. Dieser Ansatz löste nicht nur das Problem der Gitterkeulen, sondern stimmte auch mit den wissenschaftlichen Zielen des Projekts überein. Es konzentrierte sich darauf, ein einfacheres, skalierbares MIMO (Multiple Input, Multiple Output)-System zu demonstrieren, insbesondere einen MISO (Multiple Input, Single Output)-Fall, der später auf ein vollständiges MIMO-System erweitert werden kann. Durch die Wahl dieses alternativen Ansatzes fokussierten sich die Projektpartner auf die wissenschaftliche Machbarkeit der Demonstration eines funktionierenden Systems mit reduzierter Komplexität, während gleichzeitig die Möglichkeit einer Skalierung auf ein vollständiges MIMO-System in der Zukunft erhalten blieb. Diese Entscheidung wurde nach sorgfältiger Überlegung der wissenschaftlichen Ziele des Projekts getroffen, anstatt lediglich den Ingenieuraufwand für die Produktion mehrerer Module zu adressieren.
4. **Projektziele und -ergebnisse:** Die Entscheidung, ein Rx- und ein duales Tx-Modul zu entwickeln, anstatt ein Transceiver-Modul zu erstellen, zeigte den Fokus des Projekts auf die Erreichung seiner Hauptziele. Dieser Ansatz balancierte die wissenschaftlichen Anforderungen (z. B. Sicherstellung einer hohen Entkopplung zwischen den Chips, Vermeidung von Signalinterferenzen) mit den ingenieurtechnischen Realitäten des Fertigungsprozesses, der Paketgrößenbeschränkungen und der Distanzbegrenzungen und stellte sicher, dass das Projekt praktikable Lösungen für reale Anwendungen liefern konnte.

Die Projektarbeit war sowohl notwendig als auch angemessen, angesichts der technischen Herausforderungen und der Einschränkungen der verfügbaren Fertigungstechnologie. Die während des Projekts getroffenen Entscheidungen basierten auf der Notwendigkeit, eine effektive Systemleistung sicherzustellen, während gleichzeitig komplexe Ingenieur- und Fertigungseinschränkungen berücksichtigt wurden. Durch Innovation und sorgfältige Abwägung dieser Faktoren hat das Projekt den Stand der Technik im Bereich des System-in-Package-Designs für Hochfrequenzanwendungen weiterentwickelt.

3. Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Antennen-in-Package und Chip-zu-Package-Verbindungen, die in einer kommerziell verfügbaren Gehäusetechnologie von Infineon (Embedded Wafer Level Ball Grid Array, eWLB) realisiert wurden, waren vor Beginn dieses Projekts ausschließlich für Antennen und Gehäuse mit einer maximalen Betriebsfrequenz von etwa 77 GHz vorgesehen. Im Rahmen dieses Projekts wurden jedoch die passiven Komponenten, wie Antennen-in-Package und Chip-zu-Package-Verbindungen, entwickelt und experimentell in einem deutlich höheren Frequenzbereich im D-Band (110 – 170 GHz) validiert. Die Ergebnisse sind äußerst vielversprechend, da sie zeigen, dass in naher Zukunft ein D-Band System-in-Package für Radar- oder Kommunikations-Sender-/Empfänger-ICs in einem kommerziell verfügbaren Standard-Fertigungsprozess wie eWLB für eine Massenmarktanwendung realisiert werden kann.

Des Weiteren zeigt die im Projekt demonstrierte Signal-Übergang von eWLB-Gehäuse zu PCB eine große Bandbreite von DC bis zu 100 GHz, was darauf hinweist, dass mit diesem entwickelten System-in-Package-Konzept eine breite Basisbandbreite unterstützt werden kann. Dies ist besonders nützlich für drahtlose Kommunikation, bei der die Zwischenfrequenz häufig im Bereich von mehreren Dutzend Gigahertz liegt. Diese Ergebnisse bestätigen, dass das im Projekt entwickelte eWLB-basierte System-in-Package-Konzept auch für zukünftige 6G-Anwendungen von Bedeutung sein kann.

Es ist wichtig zu betonen, dass im Rahmen dieses Projekts ausschließlich die Standardfertigungsmerkmale von eWLB genutzt wurden, um das System-in-Package zu entwickeln. Im Gegensatz dazu zeigen Veröffentlichungen aus andere Forschungsgruppen System-in-Packages bei ähnlichen oder sogar höheren Frequenzen, die jedoch signifikant unterschiedliche Fertigungsmerkmale verwenden, die in der Standard-eWLB-Fertigung nicht verfügbar sind.

Insgesamt bieten die Ergebnisse dieses Projekts eine vielversprechende Grundlage für die zukünftige Integration von D-Band-Systemen in kommerzielle Anwendungen und könnten die Grundlage für die Weiterentwicklung von 6G-Kommunikationssystemen und Radartechnologien bieten.

Die durchgeführten Systemüberlegungen und Simulationen haben zu weitreichenden Erkenntnissen zu den Möglichkeiten sowie limitierenden Faktoren in PMCW Radaren geführt, die für zukünftige Systemauslegungen relevant sind. Außerdem ermöglichen sie eine begründete Systemauswahl und realistische Auslegung in nachfolgenden Projekten.

Auch das aufgenommene Datenset mit Handgesten ist von großem wissenschaftlichen Interesse, da es einen Grundstock für zukünftige Forschung legt. Anhand dieses Sets können nicht nur neue Klassifikationsstrukturen erprobt und verglichen werden, es ermöglicht darüber hinaus auch eine planbare und zeitnahe Inbetriebnahme von Demonstratoren für die radarbasierte Gestenerkennung, da nicht zunächst große Mengen von Daten für das Training der Klassifikationsstruktur aufgenommen werden müssen.

Somit tragen die erreichten Ergebnisse signifikant zur Durchführung und zum Erfolg zukünftiger Projekte bei und leisten einen wichtigen Beitrag für die wissenschaftliche Arbeit in ähnlichen Bereichen.

4. Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit gab es verschiedene Veröffentlichungen auf dem Gebiet des Vorhabens. PMCW MIMO Radare mit verschiedenen Schwerpunkten und Charakteristiken wurden vorgestellt ([1],[2]). Der Schwerpunkt liegt hierbei aber nicht bei vergleichbaren Anwendungen und die genutzten Frequenzbänder differieren. Die Arbeit [1] betrachtet ein 79 GHz 2x2 MIMO PMCW Radar für autonomes Fahren mit entsprechend der Anwendung deutlich größerer Auflösung und geringerer Datenrate. [2] befasst sich mit Methoden der Transmitter Leakage Unterdrückung für ein solches System. In [3] wird der Einfluss von Dopplerverschiebungen auf die Orthogonalität von Sequenzen untersucht, gleichfalls für ein 79 GHz MIMO PMCW Radar für autonomes Fahren.

Texas Instruments hat einen auf die Gestenerkennung spezialisierten Radarsensor mit entsprechendem Demoboard (AWR6843AOP) herausgebracht ([4]). Dieser Sensor arbeitet mit FMCW bei 60 GHz und einer dem Frequenzband entsprechend niedrigen Distanzauflösung von 4 cm.

Auch im D-Band wurde ein monostatisches breitbandiges FMCW-Radar zur Gestenerkennung veröffentlicht ([5]). Das Radar arbeitet im Frequenzbereich von 130-175 GHz und verfügt sowohl in Entfernung als auch in Geschwindigkeit über eine bessere Auflösung in Vergleich zum REGGAE Radar. Eine erfolgreiche Unterscheidung von 6 Gesten konnte gezeigt werden.

Das Packaging-Konzept nutzt eine Kombination aus Hochfrequenz-Leiterplatte und Split-Block-Technologie, mit einem Edge-Launch-Wellenleiter und einer dielektrischen Linsenantenne.

Die vorgestellten Radar unterscheiden sich in der genutzten Modulation (FMCW statt PMCW) und oder der angestrebten Anwendung, woraus eine anders gerichtete Optimierung resultiert. Die Nutzung einer PMCW Radars für die Gestenerkennung macht das REGGAE Radar flexibler in der Anwendung, beispielsweise in Bezug auf eine gemeinsame Nutzung für Radar und Kommunikation.

[1] D. Guermandi *et al.*, "A 79-GHz 2 \times 2 MIMO PMCW Radar SoC in 28-nm CMOS," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 10, pp. 2613-2626, Oct. 2017, doi: 10.1109/JSSC.2017.2723499.

[2] M. Bauduin and A. Bourdoux, "Mixed-Signal Transmitter Leakage Cancellation for PMCW MIMO Radar," *2018 15th European Radar Conference (EuRAD)*, 2018, pp. 293-296, doi: 10.23919/EuRAD.2018.8546652.

[3] J. Overvest, F. Jansen, F. Uysal and A. Yarovoy, "Doppler Influence on Waveform Orthogonality in 79 GHz MIMO Phase-Coded Automotive Radar," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 16-25, Jan. 2020, doi: 10.1109/TVT.2019.2951632.

[4] M. Sand, "How to Design Automotive In-Cabin Gesture Systems and More With One Multifunction 60-GHz Radar Sensor," Technical Article, Texas Instruments Incorporated, 2023.

[5] S. Abouzaid, L. Nothelle, T. Jaeschke and N. Pohl, "Fine Hand Gesture Recognition Using D-band FMCW Radar," *2023 20th European Radar Conference (EuRAD)*, Berlin, Germany, 2023, pp. 246-249, doi: 10.23919/EuRAD58043.2023.10289591.

[6] S. Kueppers, T. Jaeschke, N. Pohl und J. Barowski, "Versatile 126-182 GHz UWB D-Band FMCW Radar for Industrial and Scientific Applications," in *IEEE Sensors Letters*, vol. 6, no. 1, pp. 1-4, Jan. 2022, Art no. 3500204, doi: 10.1109/LENS.2021.3130709.

5. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Die nachfolgenden Publikationen erfolgten im Rahmen des Projektes und stellen die Ergebnisse der verschiedenen Forschungsanteile dar. Bei allen Publikationen sind Projektbezug und Förderzeichen angegeben.

1. L. Valenziano, E. Bekker, V. Issakov, T. Zwick and A. Bhutani, "A 135 GHz Aperture-Coupled Antenna for D2D Communication Using Fused Silica and eWLB Technology," *2024 54th European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, 2024, pp. 449-452, doi: 10.23919/EuMC61614.2024.10732108.
2. E. Bekker et al., "Broadband packaging solution in embedded wafer level ball grid array technology for D-band PMCW radar," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, pp. 1–12, 2024. doi:10.1017/S1759078724000266
3. A. Bhutani, E. Bekker, L. G. de Oliveira, M. Pauli and T. Zwick, "140 GHz Broadband Antenna in Embedded Wafer-Level Ball Grid Array Technology," *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Dusseldorf, Germany, 2021, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411122.
4. A. Bhutani, E. Bekker, T. Li, L. G. de Oliveira and T. Zwick, "140 GHz Differential Antennas in Embedded Wafer Level Ball Grid Array Technology," *2021 51st European Microwave Conference (EuMC)*, London, United Kingdom, 2022, pp. 881-884, doi: 10.23919/EuMC50147.2022.9784312.
5. E. Bekker, A. Bhutani, L. G. de Oliveira, T. Antes and T. Zwick, "Broadband Split Ring Resonator-Based Antennas at 140 GHz in Embedded Wafer Level Ball Grid Array Technology," *2022 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, Dublin, Ireland, 2022, pp. 60-63, doi: 10.1109/iWAT54881.2022.981105
6. E. Bekker, A. Bhutani, L. G. de Oliveira, T. Antes and T. Zwick, "Differential Split-Ring Resonator-Based Antenna at 140 GHz in Embedded Wafer Level Ball Grid Array Technology," *2022 52nd European Microwave Conference (EuMC)*, Milan, Italy, 2022, pp. 528-531, doi: 10.23919/EuMC54642.2022.9924286.
7. Giroto de Oliveira, L.; Antes, T.; Nuss, B.; Bekker, E.; Bhutani, A.; Diewald, A.; Alabd, M.B.; Li, Y.; Pauli, M.; Zwick, T. Doppler Shift Tolerance of Typical Pseudorandom Binary Sequences in PMCW Radar. *Sensors* 2022, 22, 3212. <https://doi.org/10.3390/s22093212>
8. T. Antes, L. G. de Oliveira, E. Bekker, A. Bhutani and T. Zwick, "Doppler Robustness Analysis of Orthogonal Sequences for MIMO PMCW Radar," *2022 23rd International Radar Symposium (IRS)*, Gdansk, Poland, 2022, pp. 384-389, doi: 10.23919/IRS54158.2022.9904975.
9. L. Giroto de Oliveira *et al.*, "Doppler Shift Tolerance of Accumulation and Outer Coding in MIMO-PMCW Radar," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 3, pp. 257-260, March 2022, doi: 10.1109/LMWC.2021.3123691.
10. T. Antes, L. G. De Oliveira, A. Diewald, E. Bekker, A. Bhutani and T. Zwick, "Velocities in Human Hand Gestures for Radar-based Gesture Recognition Applications," *2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23)*, San Antonio, TX, USA, 2023, pp. 1-5, doi:10.1109/RadarConf2351548.2023.10149720.
11. T. Antes, E. Bekker, A. Bhutani, and T. Zwick, "A Flexible Data Set for Radar-based Gesture Recognition," angenommen für die German Microwave Conference 2025.