

LS für Hochfrequenztechnik · Cauerstraße 9 ·  
D-91058 Erlangen

---

## Teil II Ausführlicher Schlussbericht

### Verbundprojekt:

6G-Forschungs-Hub für offene, effiziente  
und sichere Mobilfunksysteme - 6GEM

### Teilvorhaben:

Kooperative (quasi-) kohärente 6G-  
Netzwerke für intelligente Mobilität und  
Robotik

**Ansprechpartner:** Tobias Kögel

**Telefon:** +49 9131 85-20635

**E-Mail:** [tobias.koegel@fau.de](mailto:tobias.koegel@fau.de)

**Projektverantwortlicher:** Martin Vossiek

**Telefon:** +49 9131 85-20773

**E-Mail:** [martin.vossiek@fau.de](mailto:martin.vossiek@fau.de)

**FKZ:** 16KISK044

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.08.2021 –  
31.07.2025



## **1. Ablauf des Vorhabens**

Das Teilvorhaben „Kooperative (quasi-) kohärente 6G-Netzwerke für intelligente Mobilität und Robotik“ des 6G Forschungs-Hub für offene, effiziente und sichere Mobilfunksysteme „6GEM“ hat sich mit der Vernetzung von Integrated Sensing and Communication (ISAC) – Knoten beschäftigt. Dafür wurde das Teilvorhaben in drei große Arbeitspakete mit jeweils weiteren untergeordneten Teilarbeitspaketen aufgegliedert. Im Folgenden sollen die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten ausführlicher dargestellt und die Ergebnisse im Kontext der aktuellen Forschungslandschaft präsentiert und bewertet werden.

### **1.1 AP 5.1 Untersuchung optimierter Wellenformen zur Lokalisierung und JCS**

Die Aufgabenstellung des ersten Arbeitspakets (AP5.1) im Teilvorhaben umfasste die Konzeption und Implementierung einer Simulationsumgebung, mit der die im Arbeitspaket AP5.3MV zu entwickelnden Verfahren zur kohärenten Vernetzung und Lokalisierung bereits im Vorfeld virtuell untersucht und bewertet werden können.

Da die Simulationsumgebung sowohl zur Vernetzung ungekoppelter Radar-Kommunikations- (RadCom-) Knoten als auch zur Erprobung von Algorithmen zur Umgebungserfassung vorgesehen war, ergab sich folgendes Anforderungsprofil:

- Die Simulation muss eine realistische Verzerrung von Line-of-Sight-Signalen durch Mehrwegeeffekte abbilden können.
- Die Simulation muss in der Lage sein, die Streuung elektromagnetischer Wellen an komplexen Umgebungsstrukturen zu modellieren, um die Untersuchung bildgebender Verfahren zu ermöglichen.
- Zur realistischen Abbildung bistatischer Signale zwischen ungekoppelten Radarsystemen müssen im Signalmodell folgende Nichtidealitäten berücksichtigt werden:
  - Zeitoffset
  - Frequenzoffset
  - unkorreliertes Phasenrauschen

Durch die Entwicklung eines Raytracing-Simulators konnten die ersten beiden Anforderungen erfüllt werden. Der gewählte Raytracing-Ansatz erlaubt aufgrund der quasioptischen Eigenschaften elektromagnetischer Wellen im Mikrowellenbereich eine

realistische Modellierung des Streu- und Ausbreitungsverhaltens. Darüber hinaus bleibt die Simulationslaufzeit dank der effizienten Nutzung von Grafikprozessoren (GPU-Beschleunigung) auch bei komplexen Szenarien in einem praktikablen Rahmen, sodass selbst detaillierte Umgebungen realitätsnah abgebildet werden können.

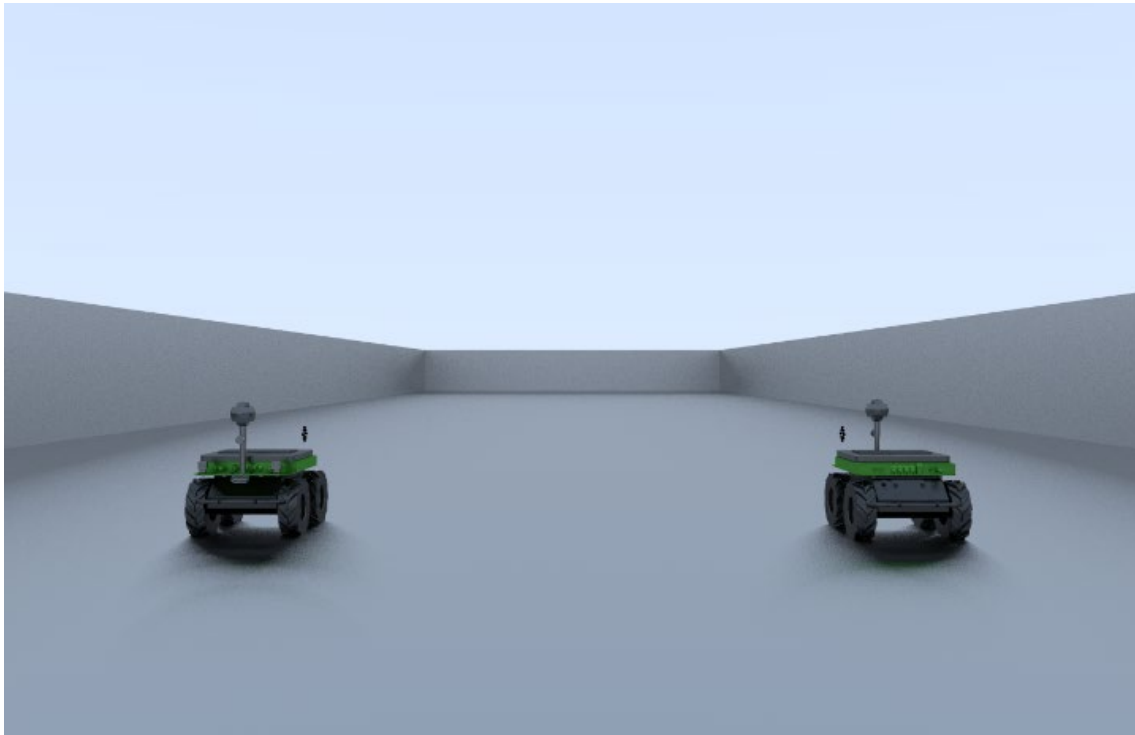


Abbildung 1: Vereinfachtes Umgebungsbeispiel des Raytracing Simulators mit digitalen Zwillingen der Rettungsroboter der TU Dortmund und des MIMO-6G-RadCom-Systems

Abbildung 1 zeigt ein einfaches Szenario des entwickelten Raytracing-Simulators. Hierfür wurden die CAD-Modelle sowie die Antennengeometrie des entworfenen MIMO-6G-RadCom-Systems verwendet, um einen digitalen Zwilling des Gesamtsystems zu erstellen. Bereits in diesem vereinfachten Szenario werden die Vorteile des sogenannten *Shooting-and-Bouncing-Rays-* (SBR-) Ansatzes deutlich.

Für die Simulation werden von einer Sendeantenne aus Strahlen (*Rays*) emittiert, die mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb der bevorzugten Richtcharakteristik der jeweiligen Antenne liegen. Abhängig von der Umgebung treffen diese *Rays* auf Objekte, an denen sie reflektiert oder gestreut werden (*Bounce*), und gelangen – entweder direkt oder über mehrere weitere Reflexionen – zurück zur Empfangsantenne. Die von einem *Ray* zurückgelegte Pfadlänge dient dabei zur Berechnung der zeitlichen Verzögerung des entsprechenden Signalanteils am Empfangsort.

Abbildung 2 zeigt die Simulation der in Abbildung 1 dargestellten Umgebung. Dargestellt

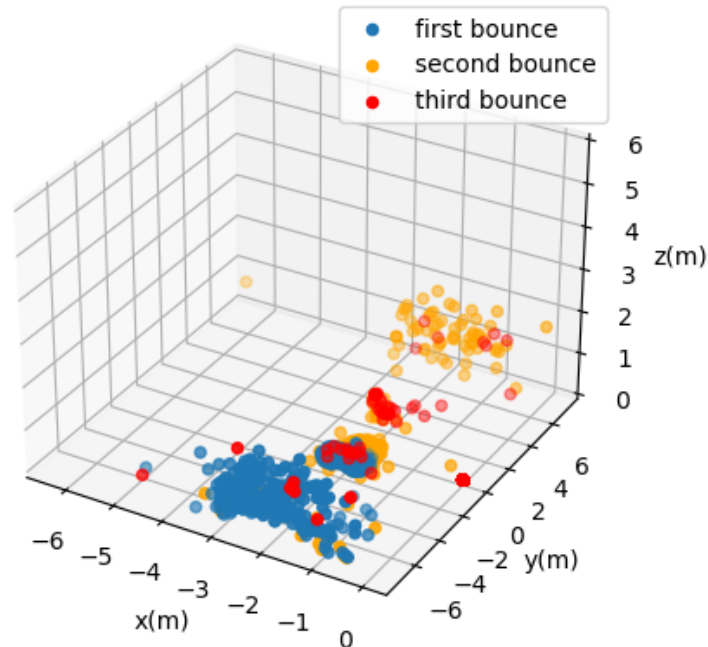


Abbildung 2: Ergebnisse des Raytracingsimulators:  
Position der Reflektionspunkte mit jeweiliger Ordnung

sind die Reflexionspunkte (Bounces) für eine Sende- und Empfangsantenne, die auf dem rechten Roboter positioniert sind. Die Reflexionen sind farblich nach first, second und third bounce klassifiziert, wodurch die Funktionsweise des Raytracing-Verfahrens anschaulich nachvollzogen werden kann.

Am gegenüberliegenden Roboter treten aufgrund seiner komplexen Geometrie alle drei Reflexionsordnungen auf. Die glatte Wand hinter diesem Roboter weist hingegen überwiegend first bounces auf, also Strahlen, die erstmals mit einem Objekt interagieren. An der Wand hinter dem Senderroboter dominieren dagegen second bounces, die entstehen, nachdem die Strahlen zuvor bereits an der gegenüberliegenden Wand reflektiert oder gestreut wurden.

Darüber hinaus sind Mehrwegeausbreitungen über den Boden im Bereich vor dem angestrahlten Roboter sowie entlang der Wand deutlich als *second bounces* erkennbar. Diese Beobachtungen unterstreichen die im Anforderungsprofil formulierte Notwendigkeit, den Einfluss von Mehrwegeeffekten auf Line-of-Sight-Signale realistisch zu modellieren, da die Signalanteile direkt nach diesen Kategorien aufgeschlüsselt werden können.

Dass es sich bei den beobachteten „second bounces“ tatsächlich um Mehrwege über den Boden handelt, lässt sich mithilfe einer weiteren Eigenschaft des Raytracing-Simulators

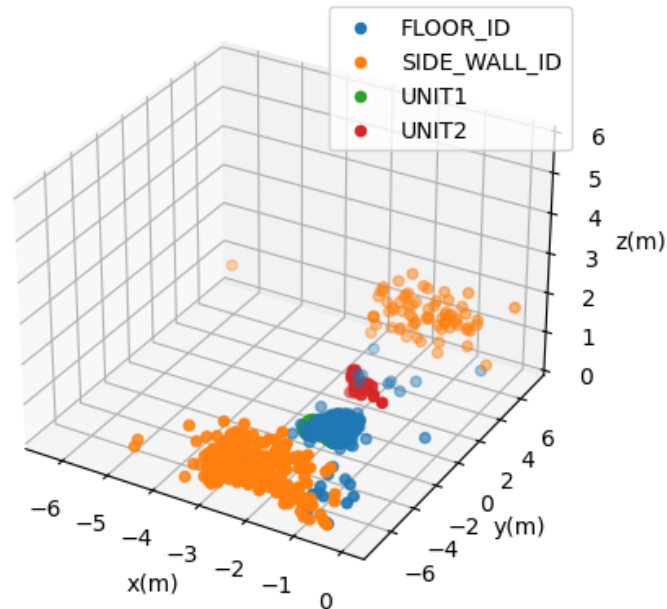


Abbildung 3: Simulierte Reflektionen mit eindeutigen IDs

bestätigen. Objekte in zuvor erstellten Szenarien können mit eindeutigen IDs versehen werden. Durch den Vergleich von Abbildung 2 und Abbildung 3 kann so nachvollzogen werden, dass die betreffenden „second bounces“ sowohl vor der Wand als auch vor dem Roboter dem Bodenobjekt (FLOOR\_ID) zuzuordnen sind. Diese Funktionalität ermöglicht es, gezielt Signalanteile bestimmter Objekte aus der Simulation auszuschließen oder einzubeziehen. Auf diese Weise kann beispielsweise der Einfluss von Bodenmehrwegen selektiv deaktiviert oder hinzugefügt werden, um deren Auswirkungen systematisch zu untersuchen.

Für eine vollständige Simulationsumgebung wurden zudem geeignete Signalmodelle integriert. Im Kontext von ICAS sind insbesondere OFDM- und FMCW-Signalformen relevant. OFDM bietet hervorragende Eigenschaften für die Kommunikation, erfordert jedoch bei breitbandigen Systemen einen erheblichen Implementierungs- und Ressourcenaufwand in der Basisbandverarbeitung. Für die Umgebungserfassung und Lokalisierung sind jedoch breitbandige Systeme mit mehreren Kanälen notwendig. Daher wurden die Algorithmen zunächst auf Basis von FMCW-Signalen umgesetzt. Diese lassen sich mit überschaubarem Anpassungsaufwand auch auf OFDM-Systeme übertragen, sobald zukünftige FPGA-Generationen eine effiziente Implementierung breitbandiger OFDM-Verarbeitung unterstützen.

Die Signalmodelle wurden um relevante Nichtidealitäten wie Zeitoffset, Frequenzoffset und unkorreliertes Phasenrauschen, wie in Artikel [1] beschrieben, erweitert. Für die Simulation des Phasenrauschens wurden zufallsverteilte Zeitsamples aus einem zuvor gemessenen Oszillator-Rauschprofil erzeugt, um daraus mehrfach unkorrelierte Rauschrealisierungen mit dem charakteristischen gefärbten Spektrum ableiten zu können.

Mit der Implementierung des Raytracers und der zugehörigen Signalmodelle sowie deren Erweiterung zur Simulation bildgebender Verfahren wurden die Teilarbeitspakete AP 5.1MV und AP 5.1MV A erfolgreich abgeschlossen.

## **1.2 AP 5.2 Konzeption und Entwurf der Demonstrator Hardware**

Ziel des AP 5.2 war der Entwurf einer voll funktionsfähigen, hoch flexiblen Demonstrator-Plattform für ein 6G-RadCom System. Für maximale Flexibilität in der Wahl der Signalform und der Hardwareansprüche wurde in Teil AP 5.2.MV1 alle Einzelkomponenten für ein Software Defined Radio entworfen. Folgende Teilkomponenten wurden im Zuge des Projekts konzeptioniert und entworfen und werden im Folgenden vorgestellt:

- Referenztakt-Erzeugung
- Lokal Oszillator (LO) – Signalgeneration
- Frontend zur Frequenzumsetzung und Verstärkung der HF-Signale
- Einzelantennen (Dual- und Monopolarisiert)
- MIMO-Array

### **1.2.1 Referenztakt/LO-Erzeugung**

Die Referenzplatine wurde auf maximale Flexibilität bei der Auswahl und Verteilung des Referenztakts ausgelegt. Inhärent unterstützt sie die Umschaltung zwischen zwei integrierten Oszillatoren; im Rahmen der Arbeiten wurde überwiegend ein 122,88-MHz-DCTCXO eingesetzt, da dieser eine feine digitale Frequenzabstimmung im ppb-Bereich ermöglicht und gezielt zur Frequenzsynchronisation zwischen den RadCom-Knoten genutzt wurde.

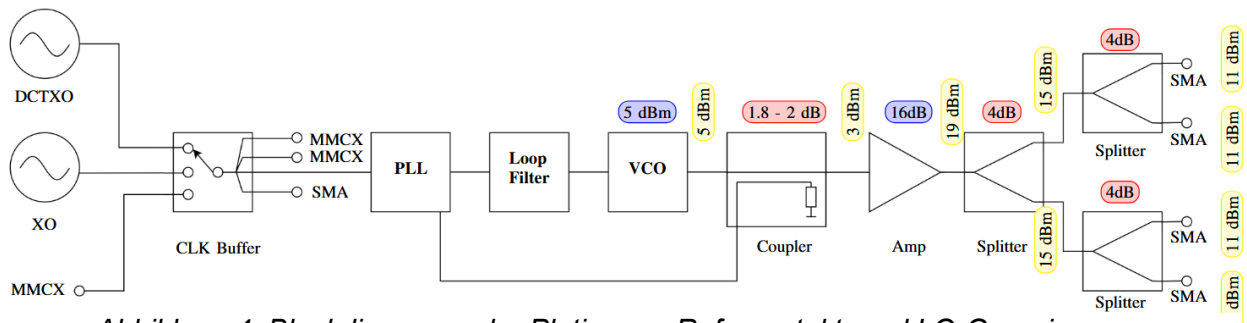


Abbildung 4: Blockdiagramm der Platine zur Referenztakt- und LO-Generierung

Zusätzlich kann eine externe Referenzquelle eingebunden werden, um mehrere Taktplatinen direkt zu koppeln. Dadurch lassen sich Frequenzoffsets und unkorreliertes Phasenrauschen gezielt eliminieren und deren Einfluss auf die Systemleistung separat untersuchen. Mithilfe von Clock-Buffern wird der Referenztakt anschließend auf weitere Platinen verteilt, sodass alle Komponenten eines Knotens – einschließlich ADCs und DACs – kohärent getaktet sind.

Ab Revision 2 ist zudem die Erzeugung des Local Oscillators (LO) direkt in die Referenzplatine integriert. Hierzu kommt eine PLL mit breitbandigem VCO zum Einsatz, die wahlweise ein kontinuierliches Trägersignal oder FMCW-Rampen bereitstellt. Dies ermöglicht eine analoge Vorverarbeitung und reduziert den Rechenaufwand in der digitalen Signalverarbeitung auf dem FPGA. Das Phasenrauschprofil des LO ist in Abbildung 5 dargestellt; über einen Integrationsbereich von 30 Hz bis 300 MHz ergibt sich ein integrierter Jitter von etwa 400 fs, trotz der auf hohe relative Bandbreite ausgelegten PLL.

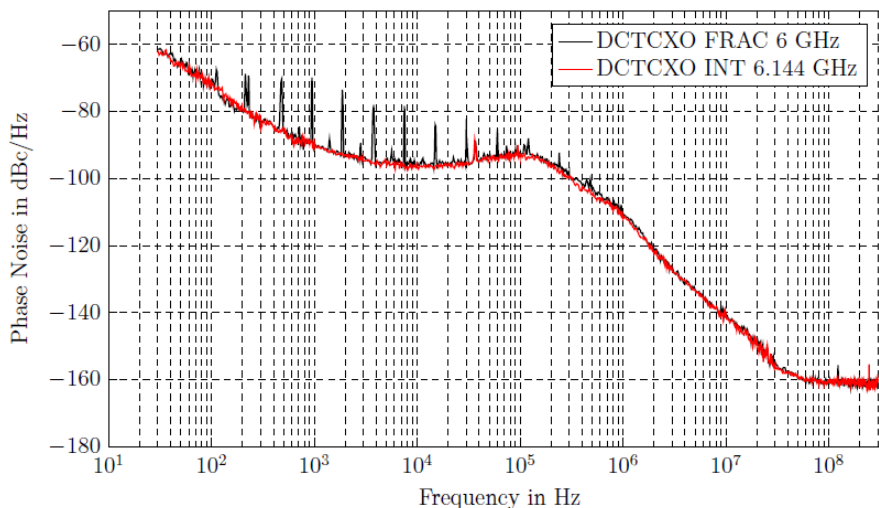


Abbildung 5: Phasenrauschprofil des erzeugten LO-Signals

Der erzeugte LO wird über ein aktives Verteilnetzwerk auf der Referenz-PCB sowie über zusätzliche Koaxialkabel an die vier Frontend-Module verteilt.

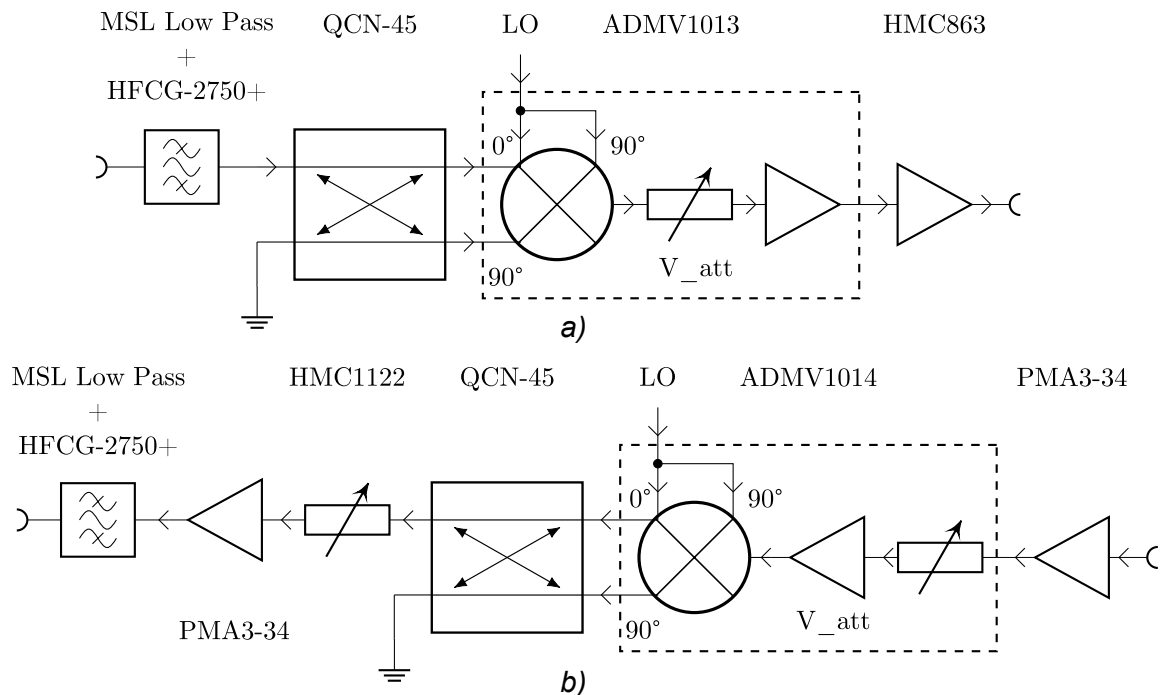


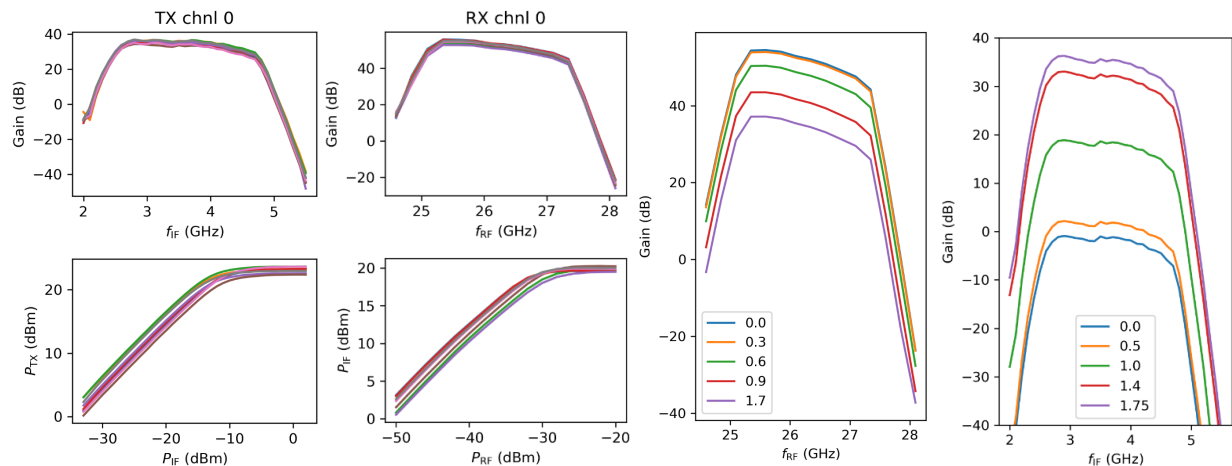
Abbildung 6: Blockdiagramme des Sende (a) und Empfangspfads (b) der Frontendes

### 1.2.2 Frontend-Module

In den Frontend-Modulen wird das Local-Oscillator- (LO-) Signal jeweils auf zwei Aufwärts- und zwei Abwärtsmischer verteilt. In den Mischstufen wird die LO-Frequenz vervierfacht und zur Umsetzung der Basisband- und Empfangssignale verwendet, sodass Trägerfrequenzen im Bereich von etwa 24 bis 26 GHz realisiert werden können. Die Frontends sind zudem mit Basisbandfiltern (2,5 GHz bis 5 GHz), HF-Filtern sowie Leistungsverstärkern (Power Amplifiers, PA) und rauscharmer Vorverstärkung (Low Noise Amplifiers, LNA) ausgestattet. IF-Verstärker und digitale Dämpfungsglieder ermöglichen eine flexible Anpassung des Dynamikbereichs.

Zur Realisierung besonders guter Lokalisierungs- und Bildgebungseigenschaften wurden vier Frontend-Module eingesetzt, die gemeinsam eine Frequenzumsetzung für acht Sende- und acht Empfangskanäle bereitstellen. Der Aufbau eines Sende- und Empfangspfads ist in Abbildung 6 anhand vereinfachter Blockdiagramme dargestellt.

Da für den Aufbau mehrerer vollständiger Radarmodule eine hohe Anzahl an Frontend-Modulen erforderlich ist, wurde eine automatisierte Charakterisierung durchgeführt.



*Abbildung 7: Links Vergleich des TX und RX Gains aller Frontends;  
Rechts: Änderung des Gains über Abstimmung der  
ADMV1013/1014 Chips zur Verbesserung des Dynamikbereichs*

Abbildung 7 zeigt die Vermessung der Sende- und Empfangspfade aller Frontends zur Verifikation der Modulfunktion sowie zur Detektion möglicher Lötfehler. Zusätzlich wurde die Wirkung der integrierten Dämpfungsglieder untersucht (vgl. Abbildung 8), die eine Erweiterung des nutzbaren Dynamikbereichs erlauben und beispielsweise eine flexible Reaktion auf gesättigte ADCs oder LNAs ermöglichen. Dabei wurden Gain-Schwankungen von bis zu etwa 3 dB beobachtet, die sowohl auf Lötteranzen als auch auf Bauteilstreuungen zurückzuführen sind.

Insgesamt weisen die Sendewege mit einer Ausgangsleistung von etwa 20 dBm bei P1dB sehr gute Leistungswerte auf, während im Empfangspfad ein Gesamtgain von rund 50 dB erzielt wird. Zudem ist die Filterwirkung der IF-Filter deutlich erkennbar, die den angestrebten zweiten Nyquist-Bereich zwischen etwa 2,6 GHz und 4,8 GHz präzise abdecken. Damit konnte das Design der eigens entwickelten Mikrostreifenleitungs-(MSL-)Filter erfolgreich umgesetzt werden. Ergänzende Messungen zeigen darüber hinaus eine über die gesamte genutzte Bandbreite hinweg sehr gute Rauschzahl von etwa 3 dB im Empfangspfad.

Nach erfolgreicher Funktionsverifikation wurden die Frontends in Aluminiumgehäuse integriert, um Übersprechen zwischen den Kanälen zu minimieren und eine effiziente Wärmeabfuhr zum Schutz der Platinen vor Überhitzung sicherzustellen.

### 1.2.3 Antennen und Arrays

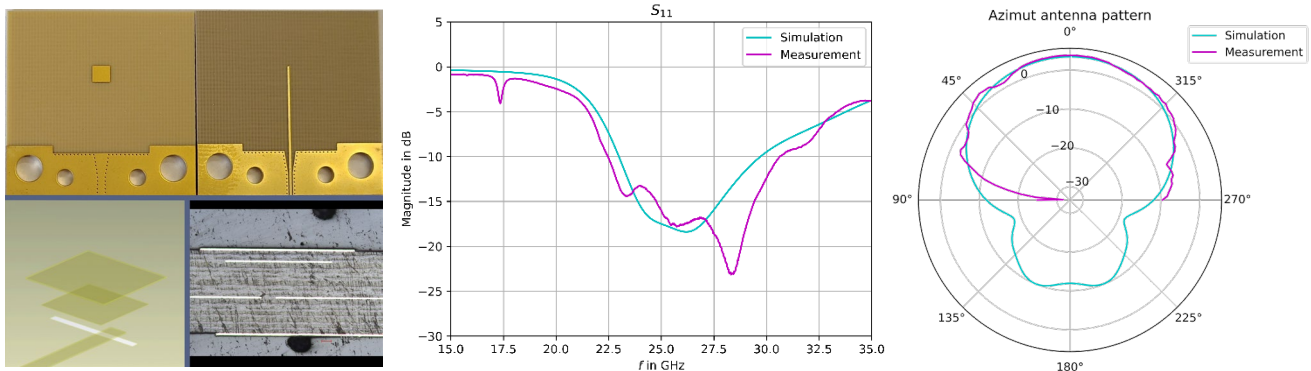


Abbildung 8: Fotos und Messergebnisse der breitbandigen Einzelantennen

Die letzten für das Demonstratorsystem benötigten Einzelkomponenten sind die Antennen. Aufgrund der erforderlichen hohen relativen Bandbreite war der Einsatz einer einfachen Patchantenne nicht ausreichend. Stattdessen wurden mehrere Resonanzstellen durch die Überlagerung einer Slotantenne mit zwei Patchantennen realisiert, wodurch eine gute Anpassung und effiziente Abstrahlung im Frequenzbereich von 22,5 bis 30 GHz erreicht wird.

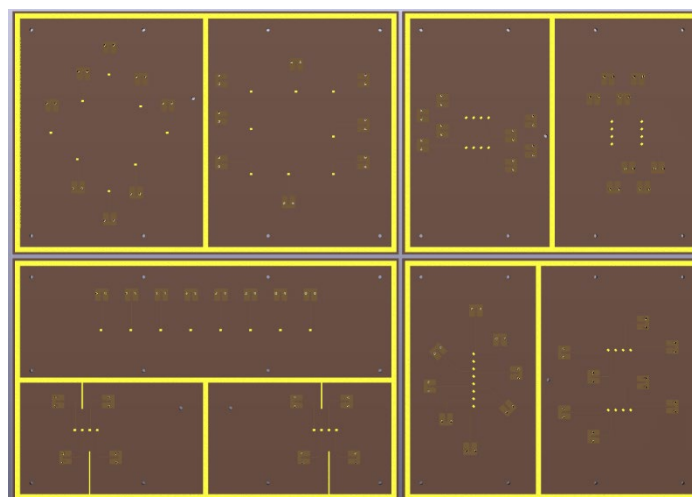


Abbildung 9: Gefertigte Antennenarraykonfigurationen für Bildgebung und Lokalisierung

Nach der messtechnischen Verifikation der Einzelantennen (vgl. Abb. 8) wurden darauf aufbauend verschiedene MIMO-Arrays für Anwendungen in der Lokalisierung und Bildgebung entwickelt. Diese umfassen sowohl bewährte Antennenkonfigurationen wie lineare und vollbesetzte Arrays als auch eigens simulativ entworfene Array-Geometrien

(vgl. Abb. 9, links oben). Letztere ermöglichen eine optimierte Antennenverteilung für iterative Winkelschätzverfahren sowie zusätzliche quasi-redundante Messungen zur Plausibilitätsprüfung und damit zur Unterdrückung fehlerbehafteter Messungen, beispielsweise infolge von Mehrwegeausbreitung.

#### 1.2.4 Gesamtsystem

Zur Integration der Teilmodule zu einem Gesamtsystem wurden KNOWRES-Carryboards eingesetzt. Hierzu wurde auf den RFSoc-FPGA-Modulen die erforderliche Hardware in der Programmable Logic (PL) synthetisiert. Ergänzend wurde auf dem integrierten Processing System (PS) ein Linux-System betrieben, auf dem ein Jupyter-Notebook-Server gehostet ist. Auf diese Weise entstand eine flexible, webbasierte Benutzeroberfläche zur Konfiguration und Steuerung der Hardware.

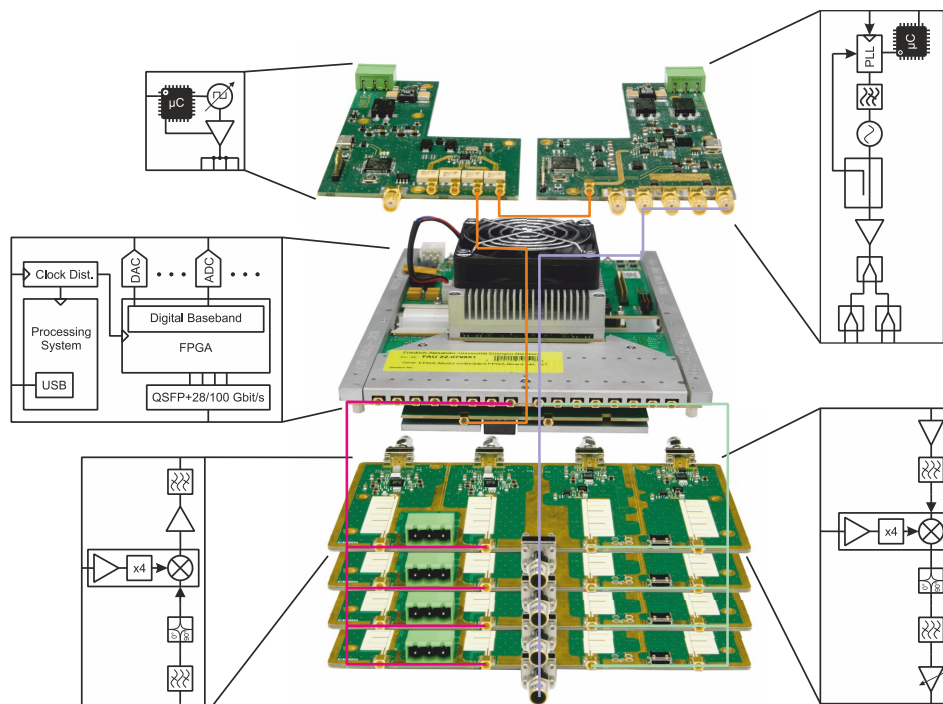


Abbildung 10: Überblick der Einzelnen Module von oben nach unten:  
Referenztakt-/LO-Generation, Basisband, Frontend Module

Die leistungsfähigen digitalen Analog- und Digitalschnittstellen des RFSoc wurden dabei direkt aus der PL heraus genutzt, um die gewünschte Basisbandsignalmodulation zu realisieren.

Zur effizienten Nutzung der hohen Abtastraten der acht ADCs und DACs wurden eigens entwickelte, hochparallelisierte VHDL-Module implementiert. Diese übernehmen sowohl

die Signalerzeugung als auch die Signalverarbeitung. Hierzu zählt unter anderem ein Modul zur direkten digitalen Synthese (DDS), das die Erzeugung breitbandiger Signale mit frei wählbaren Rampenparametern ermöglicht. Die von den ADCs erfassten Signale werden zudem in Echtzeit digital gefiltert und in ihrer Datenrate reduziert, bevor sie im RAM gespeichert werden.

Einen Überblick über das Gesamtsystem bietet Abbildung 10; Abbildung 13 zeigt das System während der finalen Messkampagne in Dortmund.

### **1.3 AP 5.3 Verteilte Signalverarbeitung und Algorithmen durch vernetzte JCS Sensoren**

Die Vernetzung mehrerer *Joint Communication and Sensing* (JCS)-Knoten zu einem kooperativen Gesamtsystem stellt insbesondere dann eine erhebliche Herausforderung dar, wenn die einzelnen Knoten keiner gemeinsamen Taktquelle folgen. Zeit- und Frequenzoffsets zwischen den JCS-Knoten führen ohne geeignete Kompensation zu signifikanten Fehlern in der Distanz- und Geschwindigkeitsschätzung sowie zu erhöhten Bitfehlerraten in Kommunikationssignalen. Besonders kritisch wirken sich dabei bereits Synchronisationsfehler im Pikosekundenbereich aus, wenn Messungen phasenkohärent zu einer synthetischen Apertur überlagert werden sollen, um eine hochauflösende Abbildung der Umgebung zu ermöglichen.

Im Arbeitspaket AP5.3 wurden daher fortgeschrittene Algorithmen entwickelt, die diese Nichtidealitäten durch die gezielte Kombination unterschiedlicher Messungen schätzen und kompensieren. Dadurch werden bildgebende Verfahren auch mit nicht kohärent getakteten Knoten ermöglicht. Darüber hinaus erlauben die Verfahren durch die Ausnutzung korrelierter Phasenrauschanteile eine wirksame Unterdrückung entsprechender Störeinflüsse. Die detaillierte Beschreibung der zugrunde liegenden Synchronisationsalgorithmen ist den Veröffentlichungen [1] und [2] zu entnehmen.

#### **1.3.1 Vorsynchronisation**

Eine zentrale Erkenntnis des Projekts war, dass eine grobe Vorsynchronisation zur Laufzeit die Anforderungen an das Gesamtsystem erheblich reduziert. Bereits geringe Abweichungen des Messstartzeitpunkts bei Full-Duplex-Messungen zwischen zwei Radarsystemen führen zu deutlichen Verschiebungen der Beatfrequenzen. In der Folge können Signale entweder den Nyquist-Bereich der ADCs überschreiten oder bei Frequenzmultiplexing in benachbarte Kanäle überlaufen.

Zur Vermeidung dieser Effekte wurden zwei Verfahren zur Laufzeit-Vorsynchronisation entwickelt. Im ersten Ansatz wurde ein dedizierter QPSK-Kommunikationskanal realisiert, der – analog zu etablierten PTP-Verfahren – die Schätzung von Zeitoffsets im zweistelligen Nanosekundenbereich zwischen den Radarmodulen ermöglicht (vgl. Abb. 11). Durch wiederholte Schätzungen konnten mithilfe eines Kalmanfilters zudem

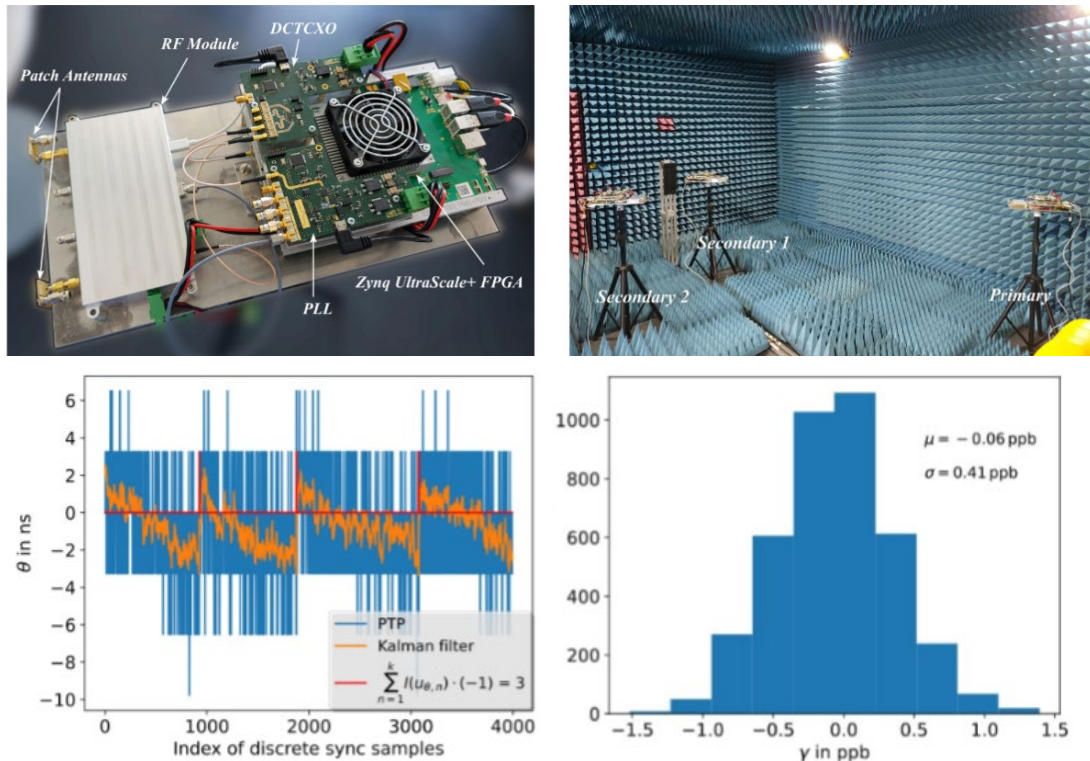


Abbildung 11: Vorsynchronisation auf Basis von PTP; Schätzung von Zeit- (links unten) und Frequenzoffset (rechts unten) zwischen drei Radaren

Frequenzoffsets im ppb-Bereich sowie eine grobe Distanzschätzung im zweistelligen Zentimeterbereich erzielt werden [3]. Obwohl dieser Ansatz ein robustes Beispiel für ein integriertes Kommunikations- und Sensorsystem darstellt, schränkt die hohe Komplexität der Modulations- und Demodulationsverfahren (z. B. Costas-Loop, Fehlerkorrektur) die vollständige Ausnutzung der verfügbaren Bandbreiten und Kanäle ein.

Aus diesem Grund wurde ein zweites Vorsynchronisationsverfahren entwickelt, das auf derselben Chirp-Sequenz-Signalform und einer ähnlichen Verarbeitung wie die präzisen Synchronisationsalgorithmen basiert. Dadurch entfällt zusätzlicher Implementierungsaufwand im FPGA, ebenso wie der Bandbreitenbedarf eines separaten Kommunikationskanals, wie er im ersten Verfahren erforderlich ist.

Das Verfahren minimiert den Einfluss großer initialer Zeit- und Frequenzoffsets, indem zunächst pro Radar nur ein einzelner TX-Kanal genutzt wird, sodass die maximale IF-Bandbreite diesem Kanal zur Verfügung steht. Gleichzeitig werden zu Beginn große Rampendauern bei reduzierter Bandbreite gewählt, um die durch Zeitoffsets verursachte Verschiebung der Beatfrequenzen zu begrenzen. Nach einer ersten groben Korrektur von

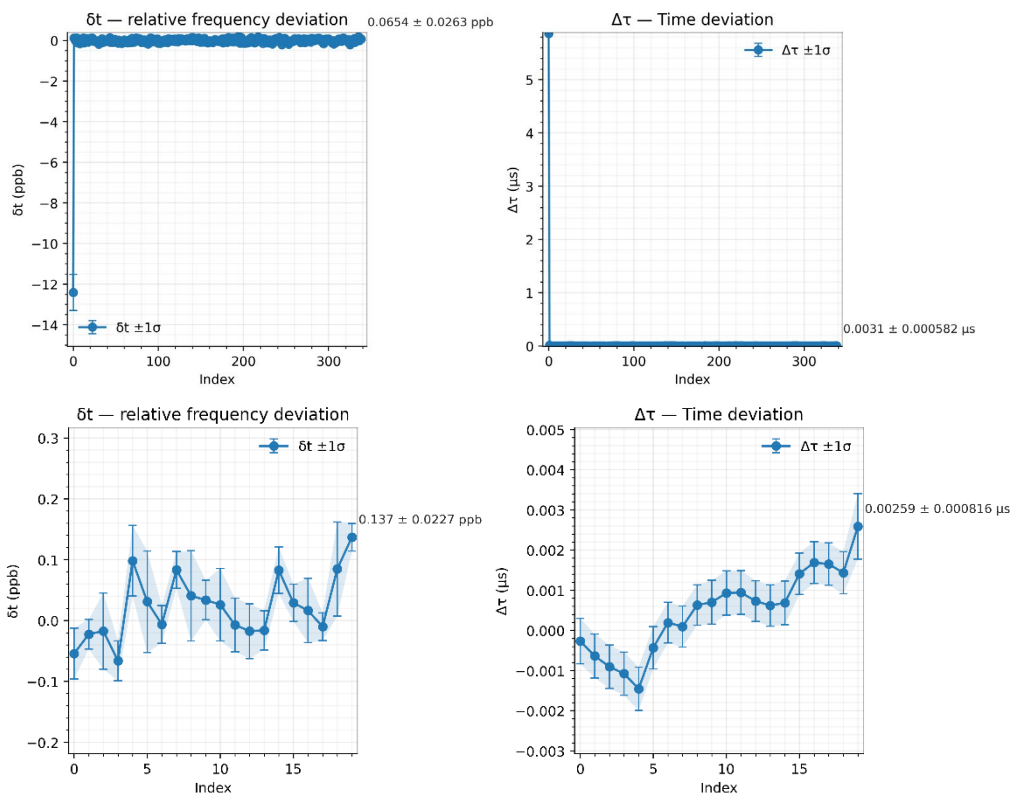


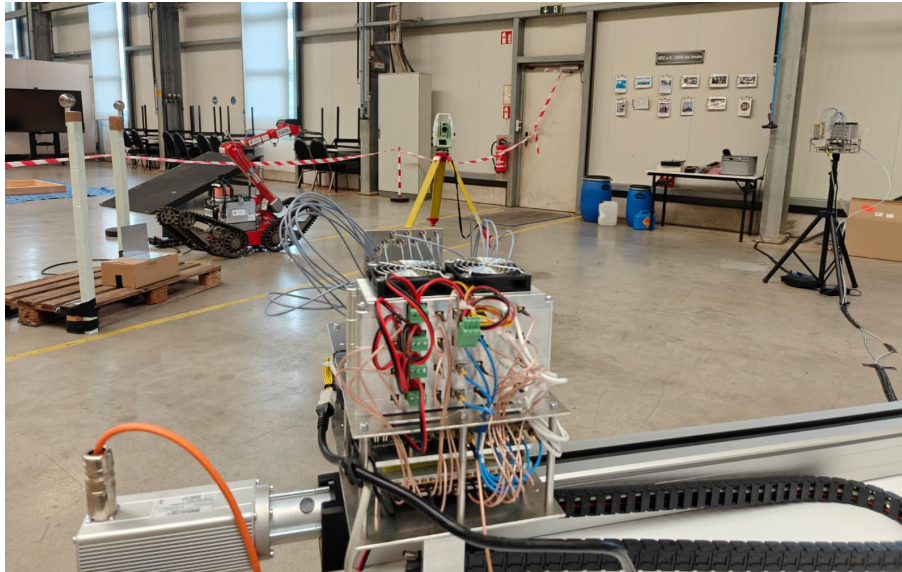
Abbildung 12: Gemessene Zeit- und Frequenzoffsets aus der Abschlussmessung in Dortmund (Oben gesamte Messung; Unten 20 Messpunkte nach der initialen Korrektur)

Zeit- und Frequenzoffset können sowohl die Bandbreite als auch die Anzahl der aktiven Sendekanäle schrittweise erhöht werden.

Die Synchronisationsergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt. Deutlich erkennbar ist die große initiale Abweichung bei der ersten Synchronisation, mit etwa 14 ppb Frequenzoffset und 6  $\mu\text{s}$  Zeitoffset. Diese Abweichung kann nur durch die verlängerte Messdauer und die reduzierte Bandbreite der initialen Messungen toleriert werden. Nach der ersten Korrektur liegen die verbleibenden Zeitabweichungen im Nanosekundenbereich (vgl. Abb. 12, untere Messungen), sodass die Messbandbreite anschließend wieder auf die vollen 2 GHz erhöht werden kann.

### 1.3.2 Konstellationsschätzung und präzise Synchronisation

Die entwickelten Vorsynchronisationsalgorithmen stellen sicher, dass große initiale Zeit- und Frequenzoffsets in den aufgezeichneten Messdaten nicht zu einer Unterabtastung der Beatsignale führen. Die so vor-synchronisierten Daten bilden die Grundlage für eine anschließende präzise Synchronisation und die gezielte Kompensation der verbleibenden



*Abbildung 13: Abschluss Messung im DRZ; Die Verwendung der Chirp-Sequence basierten Vorsynchronisation erlaubt die Nutzung der vollen Bandbreite und Kanalanzahl*

Fehlerterme. Die hierfür erforderlichen Verarbeitungsschritte sind in Abbildung 14 dargestellt.

Das Verfahren basiert auf einem Two-Way-Ranging-Prinzip, das ausnutzt, dass sich Zeit- und Frequenzfehler in einer Full-Duplex-Messung zwischen zwei ungekoppelten Radarsystemen mit entgegengesetztem Vorzeichen ausprägen. Diese Eigenschaft gilt insbesondere dann, wenn der Ausbreitungskanal aus Sicht beider Radare reziprok ist. Da dies bei getrennten Sende- und Empfangsantennen nicht für beliebige Orientierungen gewährleistet ist, erfolgt zunächst eine Schätzung der MIMO-Konstellation mittels Angle-of-Arrival-Verfahren (hier MUSIC) in Kombination mit fehlerfreien Round-Trip-Distanzmessungen.

Anschließend wird der relative Frequenzoffset der Radare anhand aufeinanderfolgender Messungen innerhalb einer Chirp-Sequenz bestimmt. Der verbleibende Zeitoffset tritt danach in beiden Systemen mit umgekehrtem Vorzeichen auf und kann durch Vergleich geschätzt und kompensiert werden. Nach der Korrektur von Zeit- und Frequenzoffsets entsteht erneut eine partielle Korrelation der Phasenrauschanteile beider Radare, die zur wirksamen Unterdrückung des Phasenrauschens genutzt wird. Auf Basis des so rekonstruierten idealen bistatischen Signals ist anschließend eine phasenkohärente Überlagerung der Einzelmessungen und damit eine hochauflösende Bildgebung der Umgebung möglich.

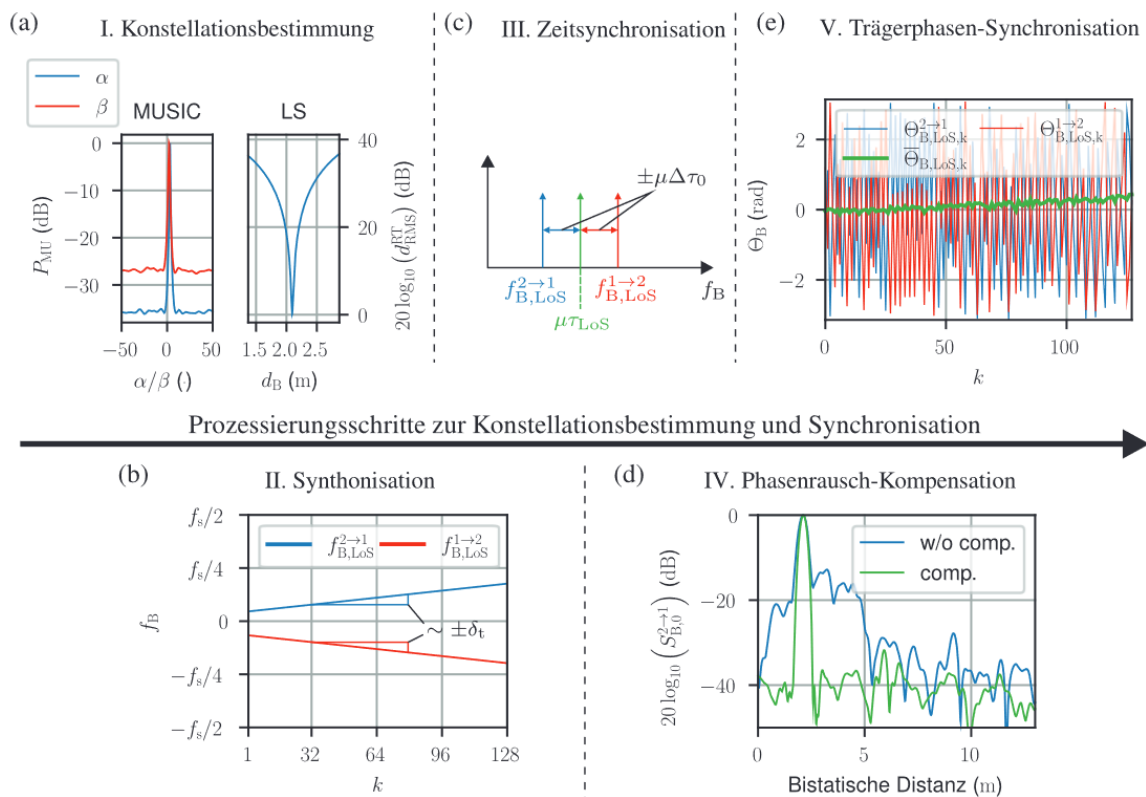


Abbildung 14: Graph zu den Prozessierungsschritten nach [1]

Die Algorithmen wurden zunächst im Labor validiert. Die linke Hälfte von Abbildung 15 zeigt ein Szenario mit mehreren dicht beieinanderliegenden Zielen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass ein schwächeres Ziel zunächst vom Phasenrauschschweif stärkerer Reflektoren überlagert wird und erst nach Phasenrauschkompensation eindeutig separierbar ist.

Im rechten Teil der Abbildung wurde ein lineares Empfangsarray verwendet, um ein Bild einer Metallplatte aufzunehmen. Hierbei wurden sowohl der monostatische als auch der bistatische Signalpfad ausgewertet. Während die Metallplatte im monostatischen Bild kaum erkennbar ist, da ein Großteil der Signalenergie spiegelnd vom Radar weg reflektiert wird, kann der bistatische Pfad diese reflektierte Energie erfassen. Durch die Vernetzung der Radare wird das Ziel dadurch deutlich sichtbar.

Die Messungen demonstrieren zwei zentrale Stärken des vorgestellten Verfahrens: Zum einen ermöglicht die Phasenrauschkompensation durch Ausnutzung korrelierter Phasenrauschanteile in beiden Beatspektren eine Signalqualität, die mit monostatischen Systemen vergleichbar ist. Zum anderen zeigt sich der deutliche Informationsgewinn

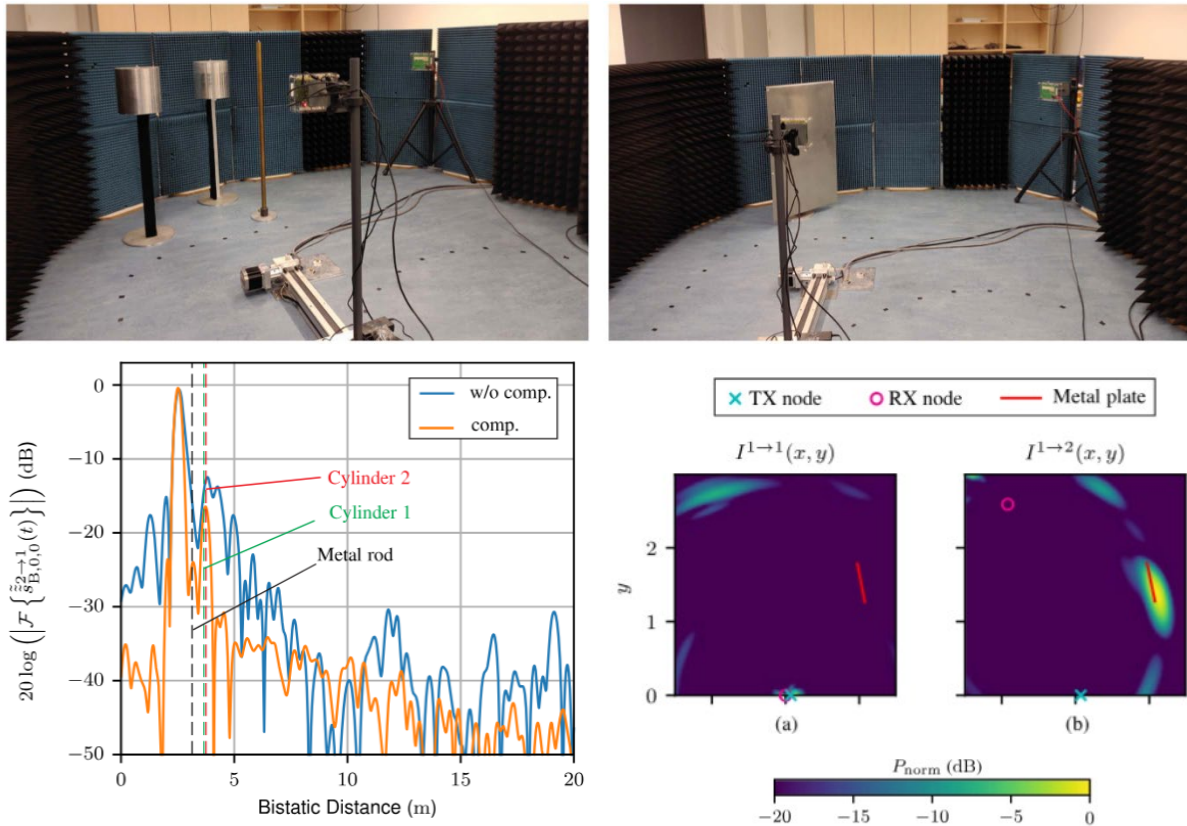


Abbildung 15: Labor Messszenario und Ergebnisse

durch die Vernetzung mehrerer Radare, insbesondere bei der Detektion spiegelnder Ziele.

Abbildung 16 zeigt ein realitätsnahes Messszenario mit einem Fahrrad und mehreren Elektrorollern. Links ist eine Raytracing-Simulation dargestellt, die verdeutlicht, dass selbst bei einem Fahrrad spiegelnde Oberflächen dazu führen, dass ein Großteil der reflektierten Leistung nicht zum Sender zurückgestreut und nur durch Verteilung von Sender und Empfänger modul effizient genutzt werden kann. Die Messergebnisse auf der rechten Seite bestätigen diese Beobachtung: Insbesondere von der Querstange des Fahrradrahmens kann im bistatischen Fall deutlich mehr Signalenergie für die Bildgebung genutzt werden. Die Vernetzung mehrerer Radarsysteme trägt somit wesentlich zu einer verbesserten Umgebungserkennung bei und kann beispielsweise die Sicherheit autonomer Fahrfunktionen erhöhen.

Darüber hinaus wurden KI-gestützte Algorithmen zur weiteren Verbesserung der Bildqualität entwickelt. Hierbei wurde ausgenutzt, dass der Raytracing-Simulator Szenarien sowohl mit als auch ohne Mehrfachreflexionen abbilden kann. Auf dieser Basis wurde ein neuronales Netzwerk gezielt zur Unterdrückung von Geisterzielen infolge von Mehrfachreflexionen trainiert. Die in Abbildung 17 dargestellten Ergebnisse wurden

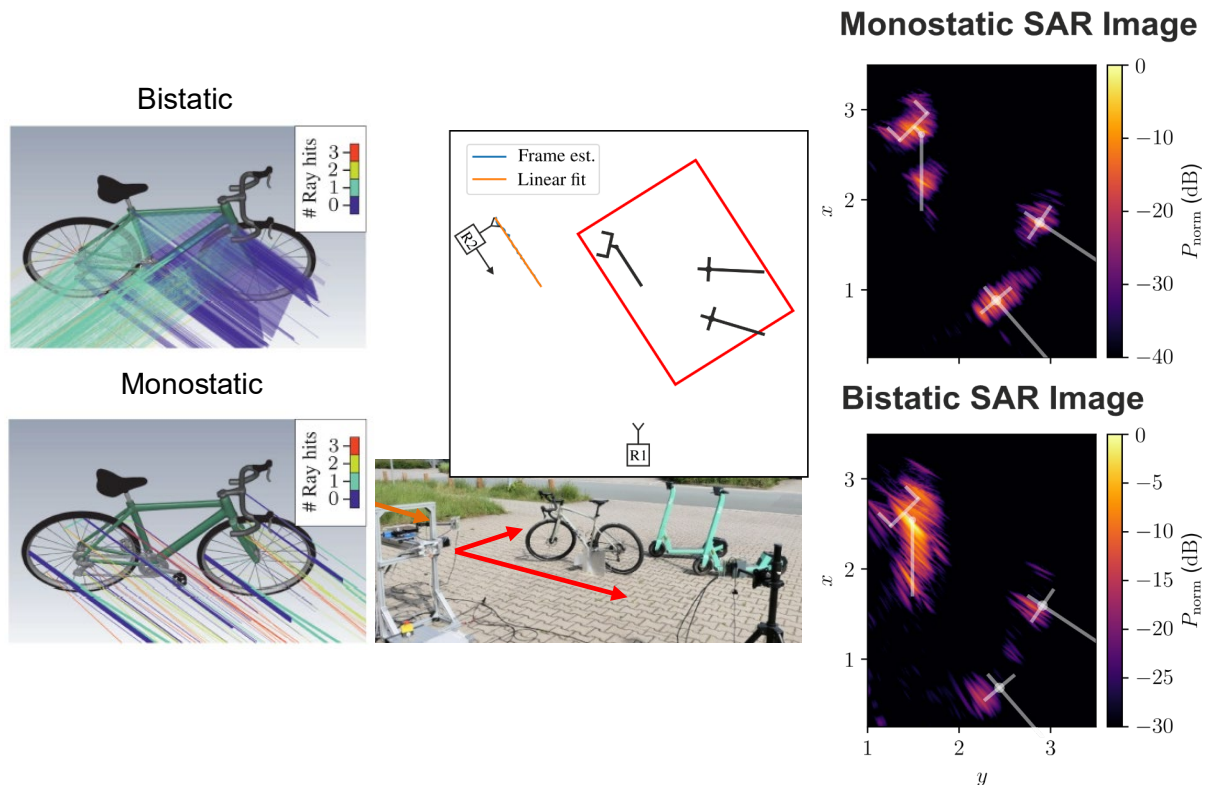


Abbildung 16: Simulation (links), Bilder (mitte) und Ergebnisse (rechts) eines Messszenarios mit E-Rollern und Fahrrädern

jedoch bewusst ohne den Einsatz dieser KI-Algorithmen erzeugt, um die hohe Bildqualität und Leistungsfähigkeit der entwickelten Verfahren transparent darzustellen.

## 2. Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Im zukünftigen Mobilfunkstandard 6G werden verteilte MIMO- und RadCom-Systeme eine zentrale Rolle spielen, sowohl für breitbandige Kommunikation als auch für Ortungs- und Beamforming-Anwendungen. Voraussetzung hierfür ist eine präzise Synchronisation der verteilten Knoten, um eine gemeinsame und effiziente Signalverarbeitung zu ermöglichen. Konventionelle Synchronisationslösungen basieren häufig auf kostenintensiver Spezialhardware oder aufwendiger Taktverteilung, die insbesondere für mobile oder kooperative Systeme ungeeignet sind. Die vorliegende Arbeit zeigt hingegen, dass durch geeignete Mess- und Auswerteverfahren eine hochpräzise Synchronisation auch ohne hardwareseitige Kopplung möglich ist. Messungen im Kontext der Rettungsrobotik belegen zudem, dass die erreichte Synchronisationsqualität über längere Zeiträume stabil bleibt und eine zuverlässige Umgebungserfassung ermöglicht. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Nutzung bistatischer Pfade die Bildqualität signifikant verbessert und die Detektion relevanter Ziele – etwa Fahrräder – deutlich robuster macht. Damit

adressiert das Projekt eine Schlüsselproblematik zukünftiger 6G-Systeme mit hoher praktischer Relevanz, insbesondere im Kontext kooperativer und sicherheitskritischer Anwendungen.

### **3. Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Die im Projekt erzielten Ergebnisse besitzen ein hohes Verwertungspotenzial und wurden bereits während der Laufzeit aktiv in Kooperationsprojekte eingebracht. Insbesondere die entwickelten bistatischen Raytracing-Algorithmen fanden Anwendung im Austausch mit Industriepartnern und technologieorientierten Start-ups und bildeten die Grundlage für die Weiterentwicklung simulationsgestützter Methoden.

Darüber hinaus führte die im Projekt aufgebaute Hardware- und Systemkompetenz zur Identifikation konkreter Gründungspotenziale. In diesem Zusammenhang konnte erfolgreich eine Start-up-Förderung im Umfeld der 6G-Inkubatoren eingeworben werden, die eine Ausgründung im Rahmen des Projekts MISE/Comsentry vorbereitet. Parallel dazu wurde die Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Forschungseinrichtungen sowie mit dem Deutschen Zentrum für Rettungsrobotik weiter ausgebaut und nachhaltig gestärkt.

### **4. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

Im Rahmen des Teilprojekts wurden bereits zwei Zeitschriftenartikel zu präzisen Synchronisations-, Lokalisations- und Bildgebungsverfahren im Journal of Microwaves veröffentlicht [1], [2]. Die entwickelte PTP-basierte Vorsynchronisation wurde in einem weiteren Beitrag ebenfalls dort publiziert [3].

Zusätzlich wurden die im Projekt aufgebauten Hardwarekompetenzen im Rahmen der Student Design Challenge des IEEE International Microwave Theory and Techniques Symposium (IMS) erfolgreich demonstriert und mit dem ersten Preis ausgezeichnet, begleitet von einer Veröffentlichung im IEEE Microwave Magazine [4]. Ausdruck der guten Zusammenarbeit ist auch eine gemeinsame 6GEM-Publikation [5]. Weitere Publikationen zum Demonstratorsystem sowie zu den neuartigen Vorsynchronisationsverfahren sind in Vorbereitung.

### **5. Fortschritte im Forschungsbereich zur Laufzeit des Projekts**

Im Rahmen der Arbeiten zu 6GEM gab es eine enge Kooperation mit dem DFG-Graduiertenkolleg GRK 2680 „Kooperative Apertursynthese für Radar-Tomographie“, das sich mit kohärent vernetzten Radarsystemen auf UAVs zur Fernerkundung beschäftigt. Auch wenn die in 6GEM genutzte Hardwareplattform eine andere war als die in KoRaTo und in 6GEM spezifische Algorithmen verwendet wurden, konnte 6GEM sehr von den in KoRaTo erforschten Verfahren zur kohärenten Synchronisation und zur bistatischen Bildgebung profitieren, und es konnten große Synergien zum Vorteil beider Projekte

gehoben werden.

Wichtige Impulse zur Synchronisation und Vernetzung kooperativer RadKom-Netze setzt auch das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (FHR) [6] – das ebenfalls im 6GEM-Projekt involviert war - sowie das Institut für Mikrowellentechnik der Universität Ulm unter der Leitung von Prof. Christian Waldschmidt [7].

Das vorliegende Teilprojekt leistet hierzu einen eigenständigen Beitrag, indem es eine spezialisierte Simulationsumgebung mit einem eigens entwickelten SDR-basierten Demonstrator und effizienter Lokalisations- und Bildgebungsalgorithmik kombiniert. Die Vorteile multistatischer Bildgebung und der Phasenrauschunterdrückung konnten dabei erstmals konsistent in realen Messszenarien nachgewiesen und veröffentlicht werden.

## **Literaturverzeichnis**

- [1] "Constellation Estimation, Coherent Signal Processing, and Multiperspective Imaging in an Uncoupled Bistatic Cooperative Radar Network," in *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 4, no. 3, pp. 486-500, July 2024, doi: 10.1109/JMW.2024.3393120.
- [2] "Integrated Self-Contained Trajectory Estimation and Multistatic SAR Imaging in a Non-Static Uncoupled Bistatic Radar Network," in *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 5, no. 3, pp. 600-615, May 2025, doi: 10.1109/JMW.2025.3554050
- [3] "Ultrahigh-Performance Radio Frequency System-on-Chip Implementation of a Kalman Filter-Based High-Precision Time and Frequency Synchronization for Networked Integrated Sensing and Communication Systems," in *IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement*, vol. 4, pp. 1-15, 2025, Art no. 5500215, doi: 10.1109/OJIM.2025.3527532
- [4] "It's Tee Time: An Ultrabroadband Componentless Bias Tee: A Planar Ultrabroadband Componentless Bias Tee in Microstrip Line Technology," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 25, no. 6, pp. 65-71, June 2024, doi: 10.1109/MMM.2024.3378613
- [5] "6GEM Perspective on Joint Communication and Sensing," *WSA & SCC 2023; 26th International ITG Workshop on Smart Antennas and 13th Conference on Systems, Communications, and Coding*, Braunschweig, Germany, 2023, pp. 1-6.
- [6] F. V. Crespi, S. Sandenbergh, D. O'Hagan and P. Knott, "Dynamic Two-way time transfer between moving platforms for netted radar applications," *2023 24th International Radar Symposium (IRS)*, Berlin, Germany, 2023, pp. 1-10, doi: 10.23919/IRS57608.2023.10172403.
- [7] D. Werbunat *et al.*, "On the Synchronization of Uncoupled Multistatic PMCW Radars," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 72, no. 8, pp. 4932-4944, Aug. 2024, doi: 10.1109/TMTT.2024.3359035.