

## Abschlussbericht - Forschungsprojekt „PINK“

**Radarbasiertes, modulares Elektroniksystem mit höchster Präzision  
für industrielle Test- und Kalibrieraufgaben – PINK**

„KMU-innovativ: Elektronik und autonomes Fahren“

**Verbundprojekt-Nr.: EEE-533-030**

## Teilprojektbericht – 2pi-Labs GmbH

**FKZ: 16ME0176K**

Autor(en)	Anschrift	Kontaktdaten
Dr.-Ing. Timo Jaeschke	<b>2pi-Labs GmbH</b> Universitätsstraße 150 D-44801 Bochum	Tel.: +49 234 545069-11 E-Mail: timo.jaeschke@2pi-labs.com

### Projektlaufzeit:

01.01.2021 – 30.06.2024 (6 Monate zuwendungsneutrale Verlängerung)

### Verbundkoordinator:

Dr.-Ing. Timo Jaeschke, 2pi-Labs GmbH

### Verbundpartner:

2pi-Labs GmbH,  
iNOEX GmbH,  
Status Pro Maschinenmesstechnik GmbH,  
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Integrierte Systeme,  
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Hochfrequenzsysteme

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16ME0176K gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

## Teil 1 – Kurzbericht

Das Verbundvorhaben „PINK“ verfolgte das Ziel, neuartige Radarsensorkonzepte im Frequenzbereich von 126 GHz bis 182 GHz zu erforschen, die sowohl hochauflösende Bildgebungsverfahren als auch hochpräzise Entfernungsmessungen im Mikrometerbereich ermöglichen. Zentraler Anlass hierfür war die wachsende industrielle Nachfrage nach berührungslosen Messsystemen, die bei höchsten Anforderungen an Messgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit sowie Auflösung bislang nur unzureichend bedient werden konnten. Während herkömmliche Breitband-FMCW-Radarsensorik im Automobil- oder Füllstandsbereich durchaus etablierte Lösungen bietet, war deren Messgenauigkeit bisher für anspruchsvolle Messaufgaben in der industriellen Qualitätssicherung und Maschinenkalibrierung nicht ausreichend. Insbesondere fehlte es an Systemen mit ausreichend großer Modulationsbandbreite und sehr hoher Signalqualität, um hochpräzise sowie hoch aufgelöste Messungen im Entfernungsbereich von kurz hinter dem Sensor bis hin zu einigen Metern Entfernung zu ermöglichen. Hinzu kam die Tatsache, dass Frequenzbereiche oberhalb von 116 GHz und mit enorm großen Modulationsbandbreiten regulatorisch kaum erschlossen waren, was den Einsatz solcher neuartigen Sensoren im industriellen Umfeld erheblich erschwerte und zugleich hohe Anforderungen an die Normierungsarbeit stellte.

Im Verlauf von „PINK“ untersuchten die Projektpartner zunächst die spezifischen Anforderungen, um sowohl in der Extrusionsmesstechnik eine dreidimensionale Abbildung von Kunststoffrohren mit sub-Millimeter- bis Mikrometerauflösung als auch in der Werkzeugmaschinenkalibrierung hochgenaue Distanzmessungen zu realisieren, die den für Laserinterferometer typischen Genauigkeitsstandard erreichen. Hierzu entwickelte das Konsortium – bestehend aus KMU mit ausgewiesener Expertise im Bereich Radarchip- & Systemdesign, den industriellen Endanwendungen der Extrusionsmesstechnik & Maschinenkalibrierung und universitärer Forschung mit langjährigem Schwerpunkt in Hochfrequenztechnik – ein Systemkonzept, das auf einem von 2 $\pi$ -Labs entwickelten hochintegrierten Silizium-Germanium-(SiGe)-Radarchip mit außergewöhnlich großer spektraler Modulationsbandbreite basiert. Eine besondere Herausforderung bestand darin, alle wesentlichen Störgrößen, wie den Phasen- und den Amplitudengang sowie äußere Einflussfaktoren (Temperatur, Druck, Feuchte), derart gering zu halten, dass selbst über mehrere Meter Messdistanz eine Wiederholgenauigkeit im einstelligen Mikrometerbereich sichergestellt werden kann. Darüber hinaus waren umfangreiche Arbeiten zur Frequenzregulierung (in Eigenleistung parallel zum Projekt erbracht) unabdingbar, um die Zulassung im neu erschlossenen Frequenzband zu erwirken und künftige Markteinführungen von Sensoren mit der im Projekt geschaffenen Technologieplattform zu ermöglichen.

Der Hauptteil der Arbeiten des Projektpartners 2pi-Labs im Projekt PINK umfasste neben der Konzeption des modularen Frontends – bestehend aus einem breitbandigen SiGe-Transceiver, hochoptimierten PLL-Schaltungen und auf die jeweilige Anwendung zugeschnittenen Antennenschnittstellen – auch die Entwicklung eines speziell angepassten Backends zur Datenerfassung, Signalverarbeitung und Einbindung in Industrie-4.0-Umgebungen. Erste Laborversuche bestätigten, dass sich bei Bandbreiten von bis zu 56 GHz und Sweepzeiten im unteren Millisekundenbereich sowohl hochaufgelöste 3D-Bildgebung durch SAR-Scans als auch absolute Distanzmessungen im Sub-Mikrometerbereich realisieren lassen. Dabei erzielte das Projektteam beachtliche Verbesserungen hinsichtlich Rauschverhalten und Umgebungsstabilität, sodass es möglich war, selbst in Umgebungsluft mit teils stark variierenden Eigenschaften hochpräzise Messwerte im Mikrometerbereich zu erzielen. Für die Werkzeugmaschinenkalibrierung wurde außerdem ein umfassendes Verfahren zur Kompensation störender Einflüsse entwickelt, das die

Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle präzise in Abhängigkeit von Temperatur, Druck und Luftfeuchte modelliert und korrigiert.

In Anwendungsversuchen untersuchte der Projektpartner iNOEX die Eignung der entwickelten Systeme zur Detektion von Lunkern, Rissen und Verdichtungen in extrudierten Kunststoffrohren. Durch einen entsprechend ausgelegten SAR-Scanner ließ sich die interne Rohrstruktur hochaufgelöst darstellen, ohne wie in herkömmlichen Ultraschallverfahren ein wässriges Koppelmedium einsetzen zu müssen. Im Bereich der Werkzeugmaschinenkalibrierung und in Kooperation mit Status Pro belegte das radarbasierte Präzisionsmesssystem, dass es Laserinterferometer in etlichen Szenarien ersetzen oder sinnvoll ergänzen kann. Einer der maßgeblichen Vorteile des Radars ist seine Unempfindlichkeit gegenüber kurzzeitiger Verdeckung oder Schmutzpartikeln im Messstrahl, wodurch es sich insbesondere für den Einsatz in rauen (Staub, Schmutz, Zunder, ...) industriellen Umgebungen eignet. Parallel zum Projekt wurden die Grundlagen für industrielle 6G-Sensorlösungen im höheren Frequenzbereich geschaffen, indem in enger Kooperation mit der CEPT und mit Unterstützung der Bundesnetzagentur eine für die PINK-Systeme geeignete Frequenzulassung entwickelt wurde. Beispiele hierfür sind die ECC Decision (22)03 und die anschließende Allgemeinzuteilung der BNetzA in Deutschland sowie nationale Implementierungen der Regulierung in weiteren europäischen Ländern. Dadurch wird die industrielle Nutzung dieses neuen Frequenzbereichs für industrielle Präzisionsensorik erst möglich und ein wichtiges Zwischenziel für die Verwertung der Projektergebnisse wurde erreicht.

Während der gesamten Projektlaufzeit arbeiteten die beteiligten Forschungseinrichtungen und die am Projekt beteiligten KMU eng zusammen, um einen gezielten Technologietransfer zwischen universitärer Grundlagenforschung und industrieller Forschung zu gewährleisten. So erstellten insbesondere die Hochschulpartner, vertreten durch zwei Lehrstühle der Ruhr-Universität Bochum, weitreichende HF-Simulationen, führten Validierungen mittels spezieller Präzisionsmesstechnik durch und entwickelten Algorithmen für die SAR-Bildgebung. Die 2pi-Labs GmbH verantwortete maßgeblich den Aufbau und die Integration der Gesamtsysteme in reale Pilotanlagen, während die industriellen Anwender aus dem Bereich Extrusions- und Maschinenmesstechnik die Praxistauglichkeit in anwendungsnahen Demonstratoren erprobten und zentrales Feedback für die iterative Weiterentwicklung der Prototypen gaben.

Es konnte gezeigt werden, dass sich im D-Band nicht nur laborskalige Systeme, sondern auch robuste, anwendungsnahe und hochpräzise Radarlösungen für eine Vielzahl industrieller Szenarien umsetzen lassen. Dieser technologische Meilenstein trägt dazu bei, die Qualitätssicherung in verschiedensten Branchen zu automatisieren, zu beschleunigen und zugleich auf eine bisher unerreichte Messgenauigkeit auszuweiten. Die im Projekt entstandenen Demonstratoren erfüllen sämtliche formulierte Ziele und wurden durch mehrere internationale Preise und Auszeichnungen honoriert, womit die Relevanz des Forschungsvorhabens auch über den wissenschaftlichen Kontext hinaus eindrucksvoll bestätigt ist.

Das Projekt „PINK“ konnte seine Ziele vollständig erreichen. Der im Projekt entstandene Sensorbalkkasten bietet zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie. Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Implementierung der Technologien in Demonstratorsysteme, die in verschiedenen Anwendungsszenarien erfolgreich getestet wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Radarsensorik eine bedeutende Rolle in der zukünftigen zerstörungsfreien Prüfung, in Extrusionsapplikationen, bei der Zustandsüberwachung in der industriellen Prozessmesstechnik und bei der Materialanalyse spielen wird. Die Projektergebnisse bieten eine solide Grundlage für weitere Forschungen und die zukünftige Kommerzialisierung der entwickelten Technologien in verschiedensten breiten Anwendungsbereichen und liefern einen starken Beitrag, den Innovationsstandort Deutschland auch zukünftig zu sichern.

# Teil 2 – Eingehende Darstellung des Projekts

## 1. Einleitung und Motivation

Die stetig steigenden Anforderungen an Präzisions- und Qualitätsmessungen in der industriellen Fertigung führen zu einem wachsenden Bedarf an hochgenauen und gleichzeitig flexibel einsetzbaren Messsystemen. Das Verbundvorhaben „PINK“ (Radarbasiertes, modulares Elektroniksystem mit höchster Präzision für industrielle Test- und Kalibrieraufgaben) adressiert diesen Bedarf durch die Entwicklung einer neuen Generation von Breitband-FMCW-Radarsystemen im Frequenzbereich von 126 GHz bis 182 GHz. Diese hochintegrierten Sensortechnologie sollen in der Lage sein, bildgebende Messverfahren (z. B. synthetische Aperturverfahren, SAR) und hochpräzise Einzelmessungen (z. B. für Werkzeugmaschinenkalibrierung) auf einer vereinheitlichten Hardwareplattform zu realisieren. Damit soll sowohl die industrielle Extrusionsmesstechnik profitieren, in der Rohre und andere Kunststoff-Produkte zuverlässig auf Fehler untersucht werden, als auch der Bereich der Maschinenkalibrierung, in dem bislang oftmals nur teure Laserinterferometer hinreichend genaue Messungen erlauben.

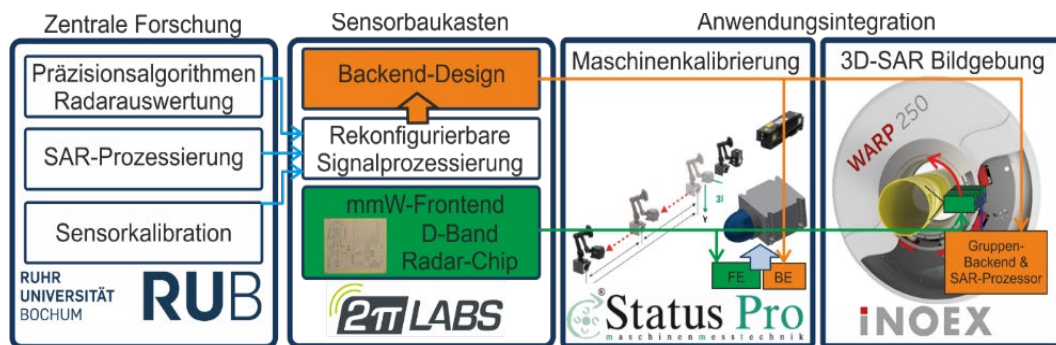


Abbildung 1: Gliederung der Projektthemen nach Verbundpartner

Ein zentrales Anliegen dieses Projekts besteht darin, Frontend, Backend und Signalverarbeitung des Präzisions-Radarsensors modular zu gestalten, damit die Sensorplattform sowohl für hochaufgelöste Bildgebung als auch für hochgenaue Distanzmessungen verwendet werden kann. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Senkung des Phasen- und Amplitudenrauschens, der Anpassung der PLL-Regelschleifen an große Modulationsbandbreiten und der Implementierung flexibler Schnittstellen wie OPC UA und USB/Ethernet, um eine nahtlose Integration in bestehende Industrie-4.0-Umgebungen zu gewährleisten. Dabei gilt es, das System für robuste Einsätze in realen Fertigungslinien oder in der Werkstattumgebung von Werkzeugmaschinen zu optimieren und durch geeignete wissenschaftliche Ansätze die Messgenauigkeit auf ein neues Niveau zu heben.

### 1.1 Ziele und Struktur des Vorhabens

Im Projekt „PINK“ verfolgten die Partner das Hauptziel eine Radar-Technologieplattform für zwei zentrale Anwendungsbereiche zu schaffen:

#### 1. 3D-Rohr-Extrusionsmesstechnik & SAR-Bildgebung

Für die Extrusionsmesstechnik sollte eine bildgebende Sensorlösung konzipiert werden, um Kunststoffrohre volumetrisch abzutasten. Dies bedeutet, dass auch innere Fehlstellen wie Lunker, Delaminationen oder andere Strukturen erfasst werden, die bei konventionellen Prüfmethode (z. B. Ultraschall) nur eingeschränkt oder mit hohem Wartungsaufwand (z.B. Austausch von Dichtungen wegen dem benötigten Wasser als Koppelmedium bei Verwendung von Ultraschall-Technologien) zu erkennen sind.

## 2. Hochpräzise Entfernungsmessung zur Kalibrierung von Werkzeugmaschinen

Ergänzend sollte ein breitbandiges FMCW-Radarsystem zum Einsatz in Anwendungen die höchstpräzise Entfernungsmessungen erfordern entstehen. Dazu sollte ein Radar für Werkzeugmaschinenkalibrierung entwickelt werden, das im Entfernungsbereich bis etwa 6 Meter eine Messgenauigkeit von einstelligen Mikrometern erreicht. Ein solches System kann in vielen Fällen Laserinterferometer ersetzen oder sinnvoll ergänzen, etwa wenn optische Messstrecken aufgrund von rauen Umgebungsbedingungen unzuverlässig sind oder kurzzeitig verdeckt werden.

Um diese ambitionierten Ziele zu erreichen, wurde ein Baukastensystem konzipiert, dessen Komponenten (HF-Frontend, Backend, Algorithmen) so ausgelegt sind, dass sie sowohl bei großen Abstraten und -flächen (Bildgebung) als auch bei extremen Genauigkeitsanforderungen (Kalibrieraufgaben) eingesetzt werden können. Daneben wurde die Signalqualität (Kurzzeit- und Langzeitstabilität) des Radarsensors für industrielle Anwendungen auf ein Niveau gehoben, welches bisher nur auf der Wissenschaft bekannt war. Die Entwicklung dieses Baukastens erforderte eine tiefe Abstimmung zwischen den beteiligten KMU (Experten für industrielle Radarsensorik sowie die beiden Endanwendungsbereiche) und universitären Forschungseinrichtungen.

## 2. Übersicht zur Projektstruktur

Die Projektstruktur in „PINK“ gliedert sich in mehrere Arbeitspakete (AP). Im Teilvorhaben welches durch die 2pi-Labs bearbeitet wurde standen insbesondere folgende Aspekte im Fokus:

- **AP1: Anforderungsanalyse & Sensorspezifikation**

*Ziel:* Erfassung und Spezifikation aller relevanten Parameter (z. B. Frequenzbereich, Leistungsbedarf, Schnittstellen, Sweeprate), um sowohl die Bildgebung als auch die Kalibrierung zu bedienen.

*Leistung 2pi-Labs:* Enge Abstimmung mit Anwendungspartnern iNOEX und StatusPro sowie den wissenschaftlichen Partnern, um sicherzustellen, dass die Radar-Systemarchitektur flexibel und leistungsfähig genug ist, um die Anforderungen beider Anwendungsbereiche abdecken zu können. So sollten zum Beispiel FMCW Rampen mit Frequenzhuben von bis zu 56 GHz bei kurzen Sweepzeiten ( $< 1$  ms) realisiert werden können, um den Anforderungen an die Messrate gerecht zu werden. Andere Punkte waren Anforderungen an die Stabilität, Kommunikationsinterfaces und Software-Schnittstellen die gemeinsam erarbeitet und festgelegt wurden, um eine Verwendbarkeit der Demonstrationssysteme in allen Anwendungen gewährleisten zu können.

- **AP2: Erforschung allgemeiner Grundlagen**

*Ziel:* Simulation und Untersuchung der PLL-Architektur, Kompensation externer Faktoren wie Luftfeuchte und Temperatur, Ermittlung optimaler Antennen- und Zielkonfigurationen.

*Leistung 2pi-Labs:* Aufbau von Simulationsmodellen (HF-Simulation, Systemsimulation), Evaluierung verschiedener PLL-Topologien (Sweeprate, Bandbreite und Phasenrauschen), Planung der HF-Leiterplatten-Layouts und Erprobung neuartiger Filterkonzepte. Zudem wurden Voruntersuchungen zur Auswahl

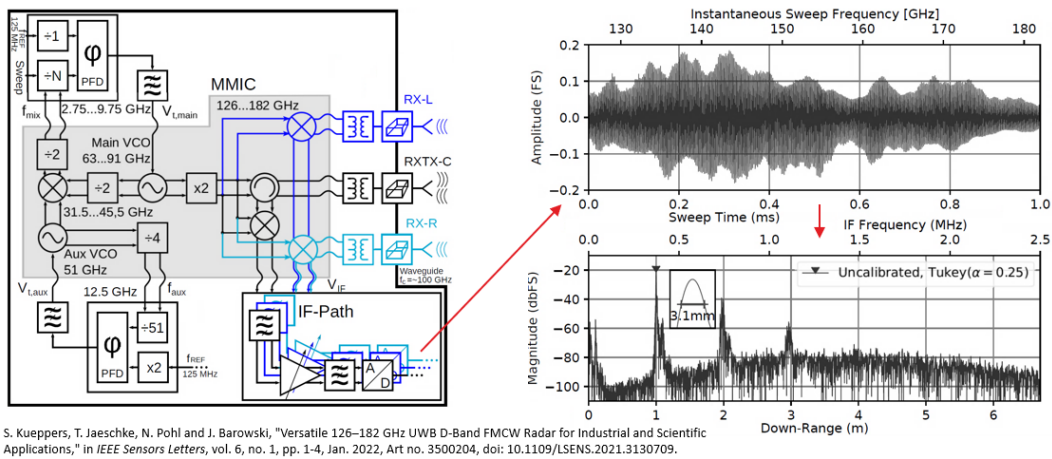
von Umweltsensoren vorgenommen, um eine leichte Integration zu gewährleisten. Darüber hinaus wurden Voruntersuchungen zur Realisierung eines Hohlleiterübergangs und von Antennenkonzepten durchgeführt, um die Wiederverwendbarkeit der Komponenten sicherzustellen. Des Weiteren wurden erste Voruntersuchungen zur erreichbaren Entfernungsmessgenauigkeit sowie notwendigen Zielgeometrien vorgenommen und die Projektpartner bei ersten Messungen unterstützt.

• **AP3: Sensorhardware & Software**

*Ziel:* Entwicklung von Hardware-Prototypen (HF-Frontend, Backend) und der zugehörigen Software (Firmware, Signalverarbeitung).

*Leistung 2pi-Labs:*

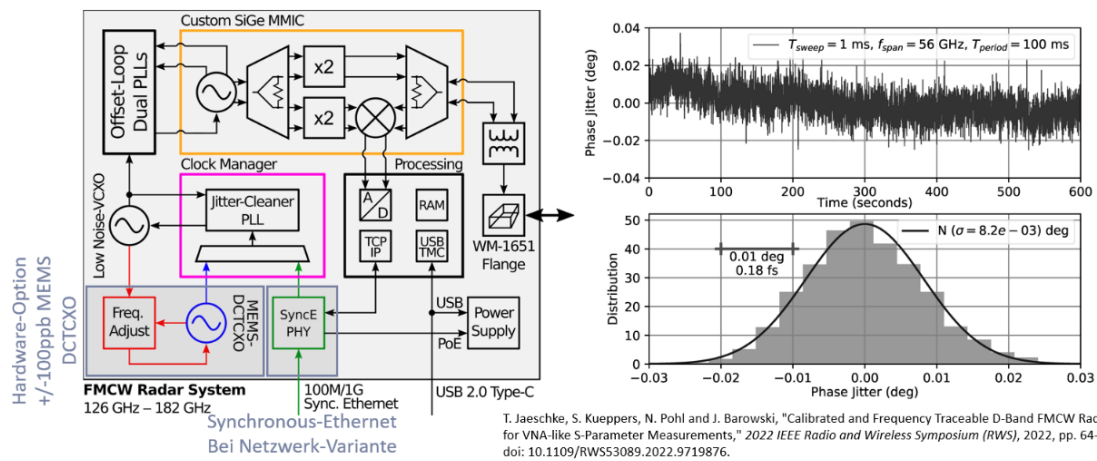
1. **Frontend:** Design und Test eines hochintegrierten SiGe-Radarchips mit kombinierten HF-Verstärkern, Mischern und VCOs; Layout der Antennenübergänge (z. B. SIW/Hohlleiter) in CST Microwave Studio, Implementierung einer leistungsstarken PLL-Regelung für herausragende Signalstabilität.



S. Kueppers, T. Jaeschke, N. Pohl and 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.

**Abbildung 2: Taktsystem des Millimeterwellen-Frontendmoduls mit ersten gemessenen IF-Signalen**

2. **Einzelbackend:** Schaffung eines FPGA & MCU-basierten Ansteuersystems für FMCW-Rampen, hochauflösende AD-Wandlung und Datentransfermodule (USB, Ethernet, OPC UA). Zusätzlich wurden eine hochstabile Takterzeugung und ausgefeilte & hochpräzise Triggermöglichkeiten implementiert.



T. Jaeschke, S. Kueppers, N. Pohl and J. Barowski, "Calibrated and Frequency Traceable D-Band FMCW Radar for VNA-like S-Parameter Measurements," *2022 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, 2022, pp. 64-67, doi: 10.1109/RWS53089.2022.9719876.

**Abbildung 3: Blockschaltbild des Radar Gesamtsystems mit Messergebnissen zur erreichten Stabilität.**

3. **Umgebungskompensation / Firmware:** Programmierung von Low-Level-Treibern, Integration von Kompensationsalgorithmen und externer Triggerung (z. B. SPS-Signale oder Inkrementalgeber). Der realisierte Trigger-Eingang wird im 3D-SAR Demonstrator zur schnellen Positionssynchronen Datenaufnahme genutzt. Somit ist es möglich  $720 \times 720 = 518400$  Messpunkte positionssynchron in ca. 10 Minuten aufzunehmen und zu speichern. Im Bereich Software/Firmware wurde in enger Kooperation mit den Projektpartnern das dort gewonnene Know-how für die Präzisionsentfernungsmessung und die SAR-Bildgebung zur Nutzung in den Demonstratoren adaptiert und implementiert.

- **AP4: Demonstratoren & Anwendungsintegration**

*Ziel:* Erstellung konkreter Demonstrationsaufbauten für SAR-Bildgebung und als Präzisionsradar in der Maschinenkalibrierung sowie die Validierung der entwickelten Verfahren unter realistischen Bedingungen. Hier wurden im Projekt die drei Demonstrationssysteme „SAR-Bildgebungsscanner“, „Schwebende Kugel“ sowie „Präzisions-Entfernungsmessung“ entwickelt. Darüber hinaus wurden die Projektpartner bei der Integration der Systeme in ihre Anwendungsdemonstratoren unterstützt.

*Leistung 2pi-Labs:* Unterstützung bei mechanischer Integration (Scan-Systeme), Datenauswertung, Umsetzung und Optimierung neuartiger Triggerfunktionen, Anpassung der Firmware / Hardware an Feedback aus den Praxistests.

Darüber hinaus beteiligte sich 2pi-Labs in Eigenleistung und parallel zum Vorhaben an Normungsaktivitäten zur Sicherstellung der Verwertbarkeit der Ergebnisse und Nutzbarkeit des neuen Frequenzbereichs nach Projektende. Parallel zum Vorhaben wurden wissenschaftliche Veröffentlichungen in Form von Konferenzbeiträgen, Öffentlichkeitsarbeit, das Projektmanagement, sowie Messebesuche von Leitmesse in der Hochfrequenztechnik zum Erkenntnisgewinn durchgeführt.

### 3. Methodik und technisches Vorgehen

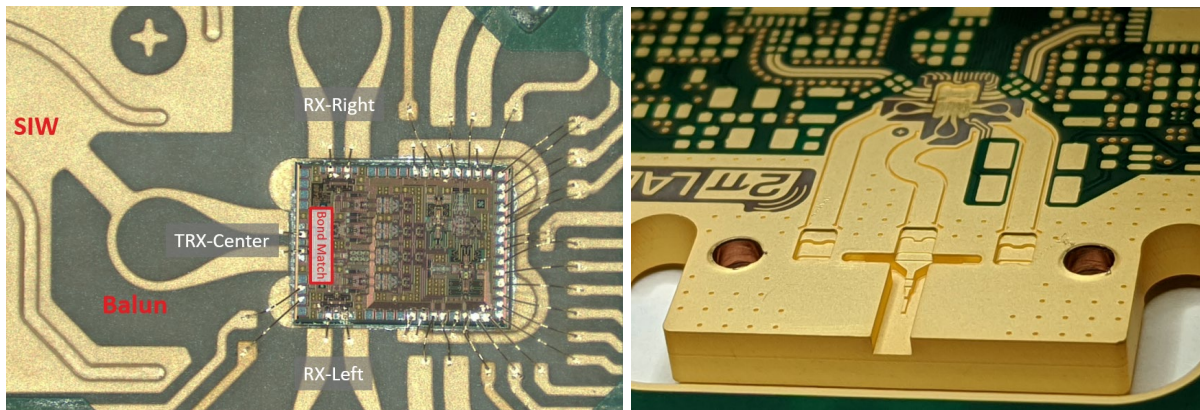
Dieser Abschnitt beschreibt das Vorgehen im Projekt und einige dabei erreichte Teilziele.

#### 3.1 Architektur der Radarsensorik

Im Zentrum der Radararchitektur stand ein neuartiger, breitbandiger von 2pi-Labs entwickelter SiGe-basierter FMCW-Radar-Chipsatz, der Frequenzhub-Bandbreiten von bis zu 56 GHz im D-Band erreichen kann. In PINK wurden hauptsächlich die Teile des Systems um den Chip herum entwickelt die besondere technische Raffinesse erfordern und somit sehr forschungsnah sind. Es konnten im Projekt besonders im Bereich Signalerzeugung / Stabilität und Signalverarbeitung signifikante Fortschritte erreicht werden und Grundlagen für industrielle Radarmesstechnik geschaffen werden die deutlich über den aktuellen Stand der Technik hinausgehen. Um die Anforderungen verschiedener Applikationen zu erfüllen, wurde das System modular aufgebaut und in folgende Teilkomponenten zerlegt:

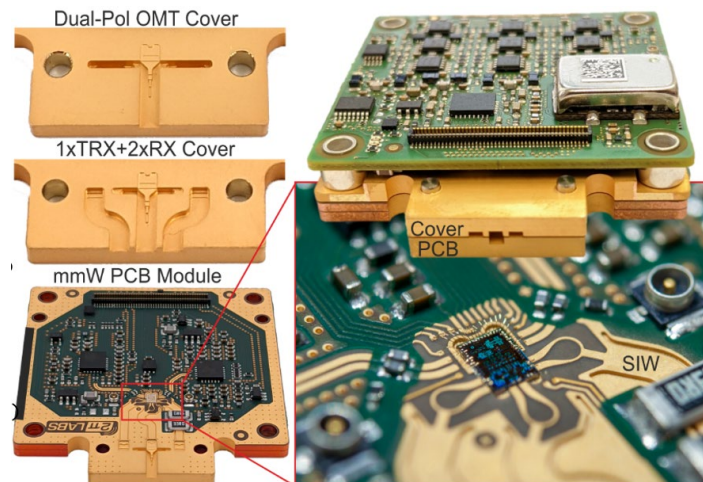
- **mmWellen-HF-Frontend Modul**

- SiGe-MMIC: VCOs, Frequenzverdoppler und Mischer in einem kompakten durch 2pi-Labs entwickelten und bereits vor Projektbeginn verfügbaren Chip.

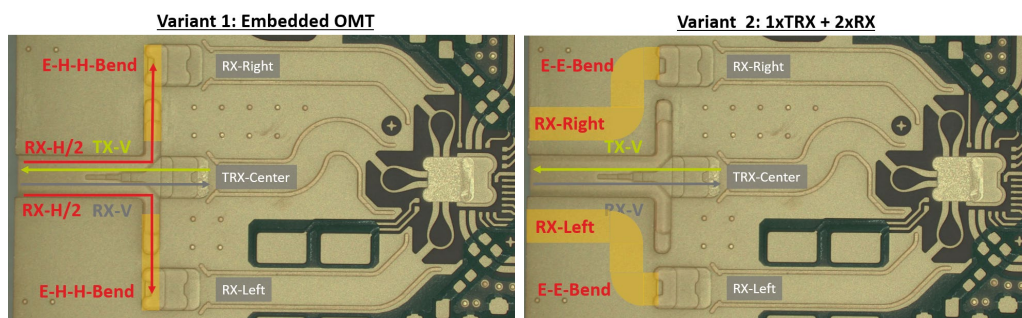


**Abbildung 4: mmWellen-Frontend mit MMIC und SIW Übergang.**

- HF-Leiterplatten-Design: Einsatz hochwertiger HF-Substrate (Rogers RT5880 mit dicker Rückseitenmetallisierung) und einer innovativen Koppelstruktur zur Realisierung geringster Dämpfungswerte und Implementierung der Funktion eines Orthomodens-Transducers (OMT) zum Empfang beider Polaritäten oder zur Realisierung von zwei zusätzlichen RX-Kanälen.

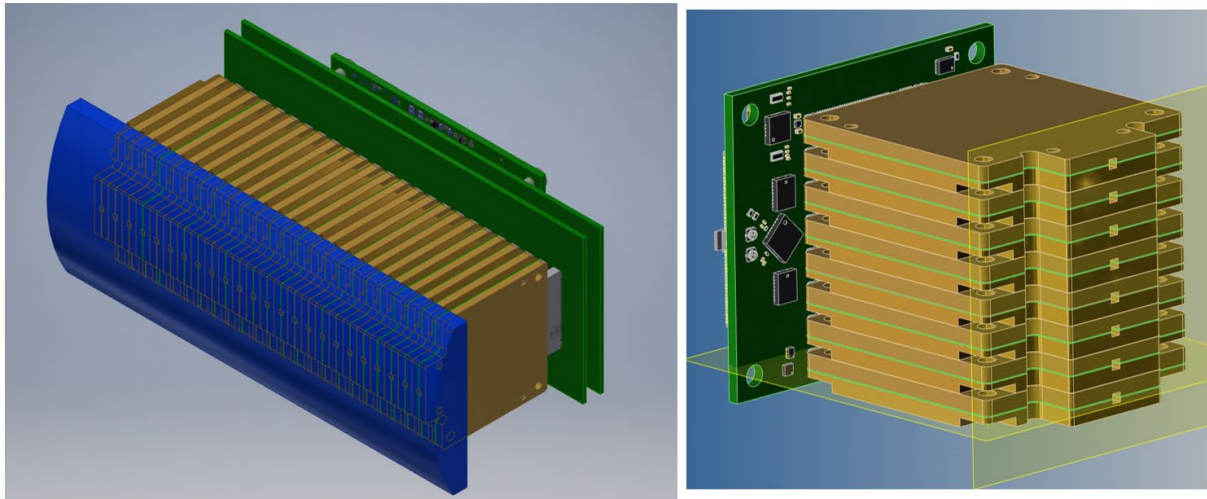


**Abbildung 5: Frontend-Modul mit MMIC und OMT sowie 1TRX+2RX Option.**



**Abbildung 6: Veranschaulichung der beiden Konfigurationsmöglichkeiten zur Realisierung der OMT- & Mehrkanalfunktion im mmW-Pfad des Systems.**

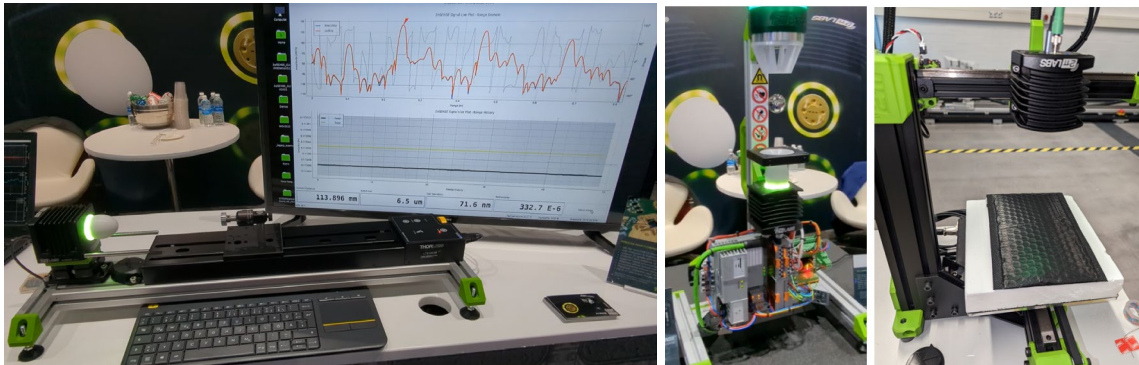
- Scanzeilen-Taugliches Design des Moduls als Realisierungsoption für vielkanalige MIMO-Systeme.



**Abbildung 7: CAD Modell von Gruppen-Backend zur Demonstration der Scanzeilen-Tauglichkeit des mmW-Moduls.**

- Zweischleifige hochoptimierte PLL-Stabilisierung des SiGe MMICs mittels aktiven Schleifenfilterstrukturen und ausgeklügeltem Filterdesign. Die Auslegung wurde auf bestmögliche Kurzzeitstabilität des Messsystems sowie zeitgleich schnelle Messraten optimiert.
- **Radar Backend Modul**
  - Rampengenerator: FPGA in Kombination mit PLL-Regelschleife, um schnelle, wiederholbare und präzise triggerbare FMCW-Sweeps durchzuführen. Die Konfiguration wurde dabei weitgehend digital parametrierbar gehalten.
  - Datenerfassung: Hochauflösende ADCs zur Digitalisierung des IF-Signals, FPGA-basierte Signalverarbeitung, Streaming der Messdaten über USB/Ethernet über SCPI-Protokoll als digitales IF-Rohsignal oder OPC-UA Pub Sub als Messwert.
  - Schnittstellen: Bluetooth BLE zur Anbindung von Umweltsensorik (z.B. kommerziell verfügbares Ruuvi-Tag oder Status Pro Messstation für Umgebungsparameter), OPC-UA Pub Sub (TSN vorbereitet) für Echtzeitanbindung in Industrie-4.0-Umgebungen, optional Trigger-Ein- und -Ausgänge zur positionssynchronen Messung.
- **Radar Firmware & Signalverarbeitung**
  - Algorithmen zur Phasenbasierten Entfernungsmessung und digitalen Filterung des IF-Signals (u. a. Kalibrierung der IF- & HF-Übertragungsfunktionen des Systems).
  - Umweltkompensation: Direkte Einbindung von Temperatur-, Feuchte-, Druckmessung in Echtzeit zur Korrektur der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Geschwindigkeit der Luft.
  - SAR- und Distanz-Berechnung: GPU-beschleunigte Berechnung komplexer SAR-Datenvolumina (extern auf Mac Metal/Nvidia CUDA), Adaption der hochpräzisen Algorithmen für Entfernungsmessungen im Sub-Mikrometerbereich von den Forschungspartnern.

## 3.2 Versuchsaufbauten und Validierung



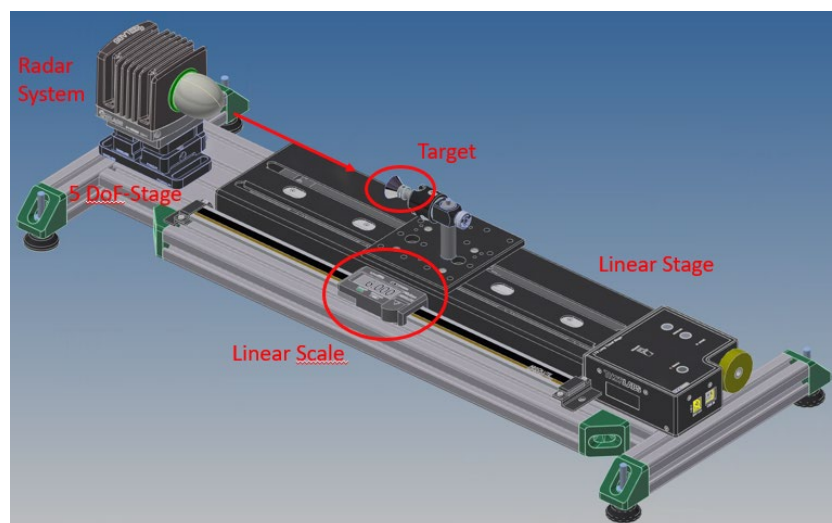
**Abbildung 8:** Im Projekt realisierte portable Demonstrationssysteme zur Evaluation der Systemperformance und der Möglichkeiten der Technologie in konkreten Anwendungssituationen. Präzisionsentfernungsmessung (links) "Schwebende Kugel" (mitte) SAR-Bildgebung (rechts)

Im Rahmen des Vorhabens „PINK“ wurden drei zentrale Demonstratoren entwickelt, um die Leistungsfähigkeit und Vielseitigkeit der neu konzipierten Radarsensorik umfassend zu erproben und zu evaluieren. Jeder Demonstrator adressiert unterschiedliche Anforderungen und untersucht das Systemverhalten unter spezifischen Bedingungen. Gemeinsam ergeben sie ein ganzheitliches Bild von der Präzision, Robustheit und industriellen Einsetzbarkeit der im Projekt entstandenen FMCW-Radarsysteme. Abbildung 8 zeigt als Überblick die realisierten portablen Demonstrationssysteme, die im Folgenden näher erläutert werden.

### 3.2.1 Demonstrator „Präzisionsentfernungsmessung“

Ein wesentliches Ziel im Projekt bestand darin, ein hochgenaues Radarverfahren zu realisieren, das hochpräzise Distanzmessungen ermöglicht. Hierzu wurde ein Aufbau mit präzisiertem Linearaktuator im Laborumfeld geschaffen, bei dem der Radarsensor (Frontend- und Backend-Elektroniken im Gehäuse mit Antenne) auf einer stabilen Plattform montiert ist. Ein Metallreflektor in der Größe von etwa einer 2-Euro-Münze oder alternativ ein speziell definierter Radar-Reflektor wird auf einer motorisierten Präzisionsachse positioniert. Die Entfernung zwischen Radarsensor und Reflektor kann mittels Software in ca. 1  $\mu\text{m}$  Schrittweite kontrolliert werden.

#### Aufbau und Referenz



**Abbildung 9:** CAD-Modell des portablen Demonstrators zur Evaluation der Ergebnisse zur Entfernungsmessgenauigkeit.

Zur Bestimmung der absoluten Messgenauigkeit dienen normalerweise etablierte Referenzsensoren, beispielsweise ein Laserinterferometer. Solch ein Aufbau wurde auch in dem vom Projektpartner RUB entwickelten Demonstrationsaufbau genutzt. Dabei werden die Referenzentfernungsmesswerte kontinuierlich mit den Radar-Daten abgeglichen, sodass sich für jeden Positionierschritt ein direkter Vergleich zwischen Soll- und Ist-Wert ergibt. Um die Portabilität des Demonstrators zu gewährleisten und die Kosten im wirtschaftlichen Rahmen zu halten wurde hier auf ein Laserinterferometer als Referenzsystem verzichtet und stattdessen ein hochpräziser Linearaktuator mit Hersteller-Kalibrierdaten verwendet. Dies ermöglicht eine für z.B. Messe-Demonstrationen ausreichende Genauigkeit im Bereich von einigen 10 Mikrometern. Messungen mit höheren Genauigkeitsanforderungen wurden auf dem erweiterten Messaufbau mit Laserinterferometer des Projektpartners RUB realisiert.

### **PLL- und Kompensationsaspekte**

Die zur Realisierung der guten Entfernungsauflösung notwendige hohe Bandbreite (bis zu 56 GHz) des FMCW Systems im D-Band erfordert eine besondere Doppelschleifen-PLL-Architektur, damit das Phasenrauschen der Frequenzrampe in allen Teilbereichen ausreichend gering bleibt. Mit den im Projekt erreichten Werten lassen sich Standardabweichungen für die Positionsmessung zu einem festen Radarziel von ca. 30 nm realisieren. Zusätzlich wurde in diesem Demonstrator die Umweltkompensation (Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck) integriert: Ein BLE-Sensor liefert kontinuierlich Umgebungsdaten, die im Firmware-Algorithmus verwendet werden, um die Ausbreitungsgeschwindigkeit (Refraktivität der Luft) der Radarwelle zu korrigieren. Versuchsreihen und Simulationen bei unterschiedlichen Feuchtwerten und Temperaturen belegen, dass sich die Messfehler dadurch signifikant reduzieren lassen. Besonders die Luftfeuchte ist eine für die Messgenauigkeit kritische Größe und muss mit der durch den Projektpartner Status Pro realisierten Messstation für Umgebungsparameter präzise gemessen werden. Die für den Demonstrator genutzten Signalverarbeitungsalgorithmen basieren auf den Arbeiten des Forschungspartners RUB.

### **Ergebnisse und Relevanz**

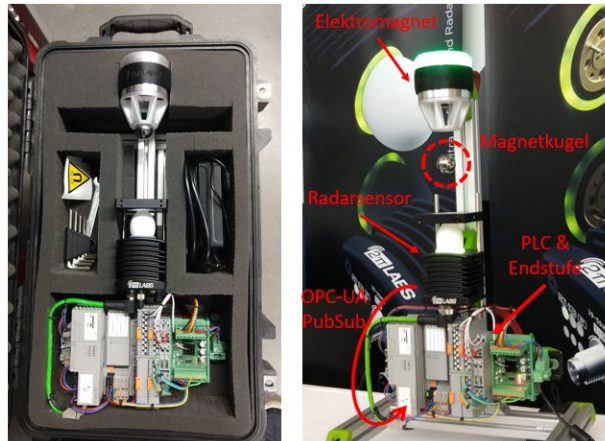
Die Messkampagnen zeigten, dass das Radar – bei korrekter Kalibrierung, Signalauswertung und Kompensation der Umgebungsparameter – Wiederholgenauigkeiten im einstelligen Mikrometerbereich erreicht. Auch unter störenden Einflüssen wie leichten Vibrationen und abrupten Positionswechseln reagierte das System robust, sodass eine stabile Positionsbestimmung gewährleistet blieb. Dieses Resultat bestätigt die Eignung des entwickelten Sensors für Werkzeugmaschinenkalibrierungen, die üblicherweise nur mit deutlich kostspieligeren Laserinterferometer-Lösungen realisierbar sind.

### **3.2.2 Demonstrator „Schwebende Kugel“ mittels schneller Radar-Positionsmessung**

Ein zweiter Demonstrator, der speziell die hohe Messrate und die Echtzeitfähigkeit des Systems illustriert, ist der Aufbau einer schwebenden Metallkugel, die durch einen Regelkreis über einem Elektromagneten in einer vorgegebenen Position gehalten wird.

#### **Funktionsprinzip und Aufbau**

In diesem Szenario wird eine Kugel (Neodym-Magnet) knapp unterhalb eines Elektromagneten positioniert. Damit die Kugel nicht an den Magneten angezogen oder unkontrolliert fallen gelassen wird, ist ein schneller Positionsregelkreis nötig, der den Strom im Magneten stetig justiert. Hier kommt das Radar zum Einsatz: Über einen vertikal angebrachten Sensor misst es in rascher Folge (bis zu 1 kHz Messrate) den Abstand zwischen Kugel und Sensor bzw. Magnet.



#### LeviSphere-Demo:

- Präzise Positionierung
- Hohe Auflösung
- Schnelle und präzise Messung
- Live-Datenausgabe
- OPC UA und PubSub
- Radar-Onboard Distance Processing
- PLC-Einbindung

**Abbildung 10: Portabler Demonstrator "Schwebende Kugel". Mittels eines Präzisionsradarsensors und den in PINK entwickelten Algorithmen wird die Position einer Magnetkugel gemessen und diese mit Hilfe einer schnellen Regelschleife in Levitation gehalten.**

### **Externer Trigger und Firmware**

Für diese Anwendung musste die Firmware des Radars eine zeitlich deterministische Abtastung ermöglichen und Totzeiten der Regelschleife klein gehalten werden. Dazu wurden interne Trigger-Mechanismen wie ein synchron zurücksetzbares Takt- und Triggernetzwerk im FPGA implementiert, sodass das FMCW-Radar seine Sweeps exakt im vorgegebenen Zeittakt startet. Diese deterministische Erfassung der Entfernung in Kombination mit der kontinuierlichen Ausgabe der Messwerte (z. B. via OPC UA Pub Sub über Ethernet) gestattet dem nachgeschalteten Regelsystem (kommerzielle PLC mit selbst implementiertem Regler), den Strom des Elektromagneten innerhalb weniger Millisekunden an die neue Kugelposition anzupassen und die Kugel damit auf eine feste Sollposition zu regeln.

### **Ergebnisse und Erkenntnisse**

Die Schwebedemonstration gelang selbst unter Störeinflüssen (blatt Papier im Radar-Strahlengang, leichte Erschütterungen, leichtes Schwingen der Kugel), was die Dynamik und Robustheit der Radar-Messung als Sensor für industrielle Positioniert- und Regelanwendungen unterstreicht. Indem das System Messraten im Bereich von 500 Hz bis 1 kHz realisiert und dabei eine Genauigkeit in der Größenordnung weniger Mikrometer beibehält, eignet es sich prinzipiell auch für andere, ähnlich schnelle Anwendungen, beispielsweise Closed-Loop-Regelungen in Pick-and-Place-Robotern, hochdynamische Antriebstechnik oder vibroakustische Untersuchungen an Bauteilen. Der Demonstrator präsentiert eindrucksvoll die erzielbare Messgenauigkeit des Radarsensors bei zeitgleich im Sensor eingebetteter Signalverarbeitung, hohen Messraten und Nutzung moderner Industrie 4.0 Schnittstellen zu Standard-PLC-Komponenten.

### **3.2.3 Demonstrator „SAR-Scanner für hochauflösende SAR-Bildgebung“**

Die dritte zentrale Validierungsplattform zielte auf die bildgebenden Fähigkeiten des radarbasierten Systems ab. Hierfür wurde ein SAR-Scanner (Synthetic Aperture Radar) konzipiert, der es erlaubt, zweidimensionale oder dreidimensionale Messdaten zu erzeugen.

#### **Scanaufbau und Mechanik**

Der Kern des SAR-Scanners besteht aus einer XY-Portalachse, auf dem das HF-Frontend in definierten Schritten verfahren wird. Das Objekt (z. B. Kunststoffplatten, Testkörper oder Rohrsegmente) ruht auf einer Halterung. Bei jedem Messschritt erfasst das Radar ein FMCW-Rampen-Signal, dessen reflektierte Echos digitalisiert und abgespeichert werden. Da ein kompletter Scan durchaus Tausende von Einzelerfassungen umfassen kann, fallen

Rohdatenvolumina von mehreren Gigabyte an. Die Radarmessungen werden dabei positionsgetriggert erfasst, indem eine 3D-Drucker Open Source Plattform zu einem Scanner umkonstruiert wurde. Der Schrittmotorkanal für den auf der Plattform entfernten Extruder wird verwendet, um die Radarmessungen positionsgenau auszulösen. Somit lassen sich bei Abtastung in 250 µm Schrittweite Scanbereiche von 18×18 cm<sup>2</sup> in ca. 10 Minuten scannen. Dabei müssen – je nach genutzter Kanalanzahl – Datenraten von bis zu 30 MB pro Sekunde verarbeitet werden was hohe Anforderungen an die Softwareinterfaces stellt.

### GPU-beschleunigte Auswertung

Um diese Datenmengen zeitnah zu verarbeiten, nutzte das Projektteam GPU-basierte Rekonstruktionsalgorithmen (Backprojection-Methode auf Nvidia CUDA und Mac Metal GPU Architekturen) die in enger Zusammenarbeit mit RUB-HFS entwickelt wurden. Damit ließ sich die Rekonstruktionszeit für ein 18×18 cm<sup>2</sup> großes Scanareal auf wenige Minuten reduzieren, was gegenüber reiner CPU-Verarbeitung einen signifikanten Beschleunigungsfaktor darstellt. Die resultierenden 3D-Bilder zeigen die innere Struktur von Werkstoffen, mögliche Risse oder Delaminationen sowie deren Tiefenlage.

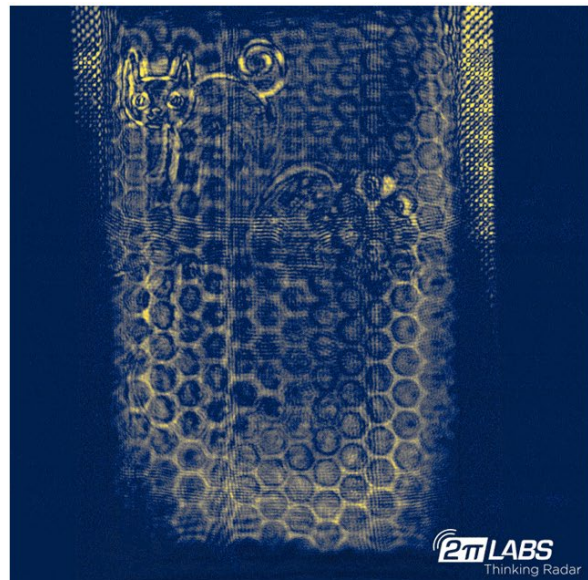


Abbildung 11: Ergebnis-SAR-Bilder des Demonstrators für Radar-Bildgebung am Beispiel einer Parkscheibe sowie eines Luftpolsterumschlags.

### Leistungsfähigkeit und Erkenntnisse

Die Experimente belegen, dass der SAR-Scanner Fehlstellen mit einer Auflösung von ca. 0,75 mm Größe sicher detektiert, was die Eignung für viele industrielle Non-Destructive Testing (NDT) unterstreicht. Die erreichte Bildqualität ist dabei als herausragend zu bewerten und übertrifft den Stand der Technik. Selbst bei stärkeren Reflexionen von Schichtübergängen (z. B. Objekte mit mehreren Kunststofflagen) gelang es, die relevanten Signale durch die hohe Bandbreite sowie geeignete Filterung und Signalverarbeitung klar vom Hintergrund zu unterscheiden. Die Auflösung in axialer Richtung hängt maßgeblich von der genutzten Bandbreite (bis 56 GHz) ab, was sich in experimentellen Messkampagnen bestätigte: Höhere Bandbreite korreliert mit einer feineren Abstandsdiskriminierung in Mehrschichtaufbauten wie der Parkscheibe, so dass Schichtdicken im Bereich weniger Millimeter aufgelöst werden können.

## Zusammenfassung der Demonstratoren

Jeder der drei vorgestellten Aufbauten beleuchtet eine andere Facette der „PINK“-Radarsensor Technologieplattform. Die Präzisionsentfernungsmessung zeigt das Potenzial zur hochgenauen Längen- und Positionsbestimmung im Mikrometerbereich, was für die Maschinenkalibrierung und ähnliche Aufgaben von großer Bedeutung ist. Die „Schwebende Kugel,“ unterstreicht die Fähigkeit, hochdynamische Szenarien mit Messraten bis in den Kilohertzbereich zu regeln und damit auch anspruchsvolle Closed-Loop-Aufgaben zu meistern. Schließlich dokumentiert der SAR-Scanner die hervorragende Eignung des breitbandigen FMCW-Radars für 3D-Bildgebungsverfahren, die beispielsweise in der Extrusionsmesstechnik oder im Non-Destructive-Testing-Umfeld genutzt werden können. Gemeinsam demonstrieren diese drei Versuchsaufbauten eindrucksvoll, wie vielseitig und zugleich präzise die im Projekt entwickelten Radarsysteme arbeiten.

## 4. Ergebnisse und Meilensteine

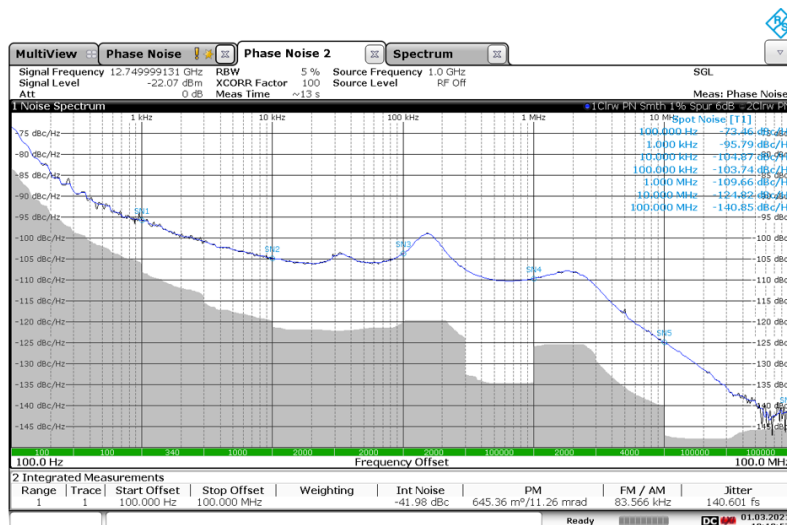
### 4.1 AP1 und AP2: Anforderungsanalyse & Grundlagenforschung

Früh zeichnete sich ab, dass der Frequenzbereich über 116 GHz eine besonders aufwändige PLL-Architektur und deutlich verbessertes Leiterplatten-Design erfordert, um große Bandbreiten in Verbindung mit kurzen Sweepzeiten und bei akzeptablem Phasenrauschen zu ermöglichen. Dank zahlreicher Simulationen (HF- und Systemsimulation) sowie Labor-Tests wurden die Anforderungen auf 56 GHz Bandbreite, ca. 1 ms Sweepldauer, sowie  $<0,01^\circ$  Standardabweichung der Phase für die Kurzzeitstabilität konkretisiert. Ein zentrales Ergebnis war zudem die Einsicht, dass Umweltparameter wie Luftfeuchte störende Abweichungen in der Messgenauigkeit erzeugen können und somit eine präzise Messung der Umweltbedingungen und deren Kompensation unabdingbar ist für Genauigkeiten im Sub-Mikrometerbereich.

### 4.2 AP3: Sensorhardware & Softwareintegration

#### PLL-Optimierungen

In mehreren Iterationen wurden die zwei PLL-Regelkreise optimiert, um eine ausgezeichnete Phasenrauschleistung zu erzielen. 2pi-Labs entwickelte hierfür eigene HF-Layouts mit sehr kurzen Signalwegen. Eine besondere Herausforderung lag in der Reduktion parasitärer Effekte und der Stabilisierung von VCO und Loop-Filter Spannungsversorgungen.

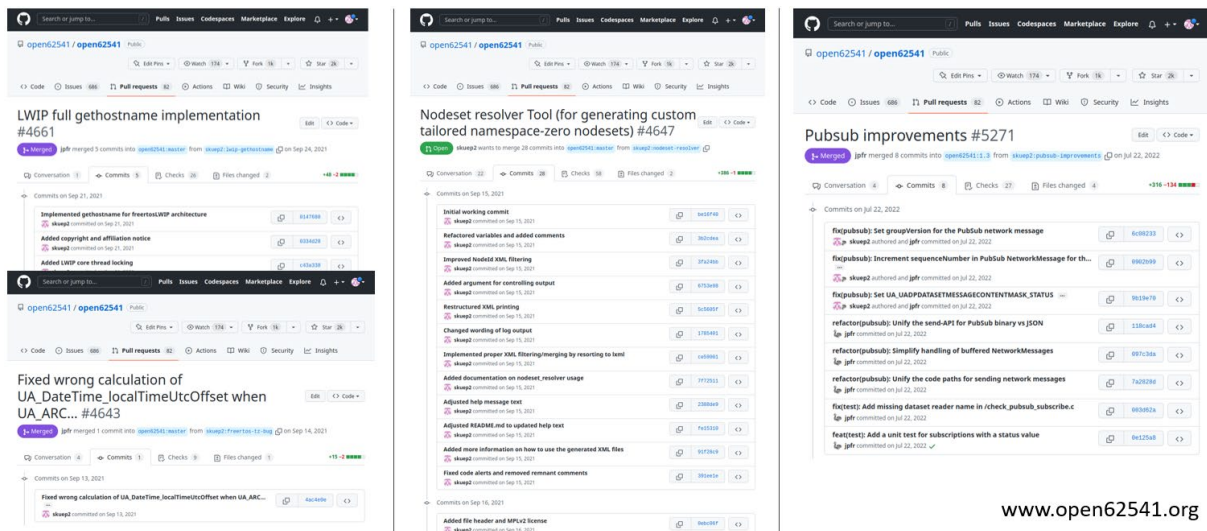


#### PLL-Optimierung:

- Maßgeblich für den Mess-Jitter
- Optimierung von:
  - Allen Spannungsversorgungen
  - Allen Takt-Komponenten
  - PCB Layout
- Abschließende Aussage erst in neuer HW-Revision möglich
- Optimierungen sehr aufwändig
  - → Aber: Es lohnt sich

Abbildung 12: Ergebnis einer Phasenrauschmessung. Derartige Messungen und Optimierungen sind sehr zeitaufwändig, aber unerlässlich um bestmögliche Signalqualität zu erreichen.





www.open62541.org

**Abbildung 15: Beitrag zum Open 62541 OPC UA Stack zur Ermöglichung der ressourcenschonenden Nutzung des Stacks auf Mikrocontrollern.**

Ein weiteres Highlight des Backend-Systems ist der externe Trigger: Die Firmware unterstützt eingehende Triggersignale, um eine positionssynchrone Datenerfassung zu realisieren (z. B. Kopplung an eine Rotationsachse oder eine Linearverfahrsschiene). Das ist insbesondere für hochpräzise Entfernungs- oder SAR-Messungen erforderlich, wenn mechanische Bewegungen exakt mit der HF-Signalerzeugung korreliert sein müssen, um hochpräzise Messergebnisse zu gewährleisten.

Zur Anbindung der Umweltkompensation implementierte 2pi-Labs eine BLE-Schnittstelle, über die ein externes Messmodul (z.B. kommerziell wie z.B. Ruuvi-Tag oder die hochpräzise durch Status Pro realisierte Messstation für Umgebungsparameter) laufend aktuelle Messwerte für Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte melden kann. Ein spezieller vom Projektpartner RUB entwickelter Algorithmus kompensiert die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Luft basierend auf diesen Parametern. Im Ergebnis konnten Messfehler von ~5–10 µm auf unter 1 µm reduziert werden.

### 4.3 AP4: Industrie-Demonstratoren & Anwendungsintegration

Die zentralen Ergebnisse im Arbeitspaket sind die bereits weiter oben beschriebenen Demonstratoren für die verschiedenen Anwendungsbereiche. Diese wurden auch für weitere iterative Optimierungen und Tests der Teilkomponenten genutzt.

### 4.3.1 SAR-Demonstrator

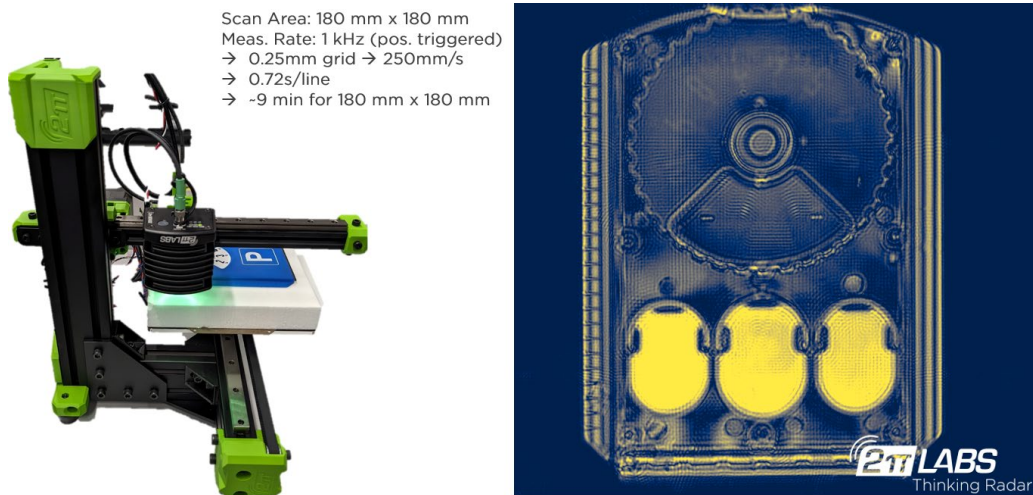


Abbildung 16: SAR-Scanner Demo-Aufbau und XY-Schnitt eines Radarbilds einer Parkscheibe.

Als weiteres Highlight in diesem Arbeitspaket ist die Integration der Ergebnisse aus dem BMBF Projekt KI-ROJAL in einen gemeinsamen Demonstrator zu nennen. Die in diesem Projekt entwickelten KI-Algorithmen zur Detektion von Fehlstellen und Klassifikation von Objekten zeigen in Verbindung mit dem in PINK realisierten Radar SAR-Scanner eindrucksvoll die zukünftigen Möglichkeiten für robuste und hochauflösende zerstörungsfreie Prüfung von Materialien. So konnten in einer typischen Pappschachtel mit Schokoladenpralinen fehlende Pralinen sicher detektiert werden. Dies zeigt eindrucksvoll die Möglichkeiten in der zerstörungsfreien Prüfung durch Kombination von KI-Algorithmen mit höchstauflösender mmWellen-Bildgebung. Diese Technologie zeigt besonders großes Potential für Non-Destructive Testing (NDT) von Kunststoff- und Verbundwerkstoffen.

### 4.3.2 Rohr-Prüfsystem (iNOEX)

In Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner iNOEX und RUB-HFS wurde die Integration der Sensorik und Testmessungen für ein bildgebendes System durchgeführt, welches eine besonders hohe Sensitivität zur Detektion von Fehlstellen erreicht. Dabei entwickelte 2pi-Labs eine angepasste Antennenlösung, die helikale Scanpfade entlang des Rohrs erlaubt und somit eine lückenlose Prüfung des Innenbereichs gewährleistet. Die Durchdringung von Wandstärken von mehreren Zentimetern bis hinunter in den unteren Millimeterbereich und die Detektion kleinster Risse (<1 mm) demonstrieren eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit der Entwickelten mmWellen-Radartechnologieplattform.

### 4.3.3 Präzisionsradar für Werkzeugmaschinen

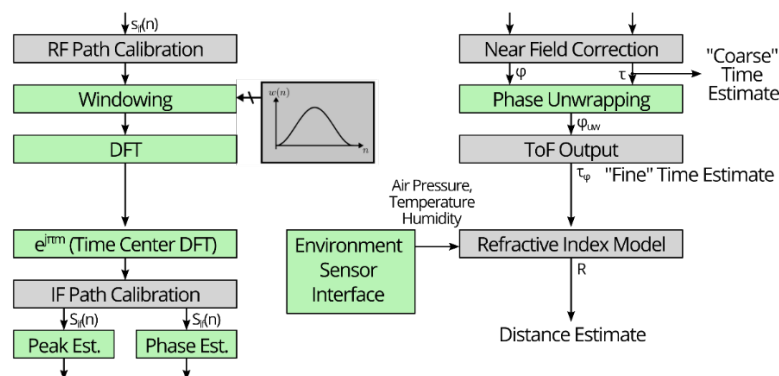


Abbildung 17: Implementierte Signalverarbeitungskette für Präzisionsentfernungsmessungen.

Zusammen mit StatusPro und RUB-INSYS entstand ein Prototyp, der bei typischen Werkzeugmaschinen wie Fräszentren oder Drehbänken Wegstrecken bis zu 6 m hochgenau vermessen kann. Dabei bewies das System, dass es bei geringeren Kosten nahe an die Lösungen auf Basis von Laserinterferometern heranreicht, sofern die Umgebungsfaktoren richtig kompensiert sind und eine optimierte Signalverarbeitung genutzt wird. Darüber hinaus hat Radar den Vorteil unempfindlicher gegen temporäre Verdeckungen oder Verschmutzungen zu sein und auch bei ungenauer Ausrichtung zumindest grobe Messwerte zu liefern.

## 5. Herausforderungen und Abweichungen

### 5.1 Lieferkettenprobleme

Die beschränkte Verfügbarkeit zentraler Bauelemente (z. B. FPGAs) aufgrund der globalen Lieferproblematik stellte eine erhebliche Belastung für den Zeitplan dar. Teilweise mussten teure Broker-Käufe getätigt werden, und ein Wechsel des EMS-Dienstleisters war unumgänglich, um eine gleichbleibend hohe Verarbeitungsqualität sicherzustellen.

### 5.2 Personelle Engpässe

Der Fachkräftemangel in der Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik führte dazu, dass 2pi-Labs verstärkt auf bestehendes Personal zurückgreifen musste. Dies hat jedoch den Vorteil, dass es sich dabei um erfahrene, bereits eingearbeitete Mitarbeitende handelt, die aber teils parallel in andere Aufgabenbereiche eingebunden waren und damit nur zeitlich eingeschränkt zur Verfügung standen. Dies und die eingeschränkte Bauteilverfügbarkeit sowie Lieferkettenprobleme verlängerten einige Entwicklungsschritte, weshalb eine zuwendungsneutrale Projektverlängerung um sechs Monate beantragt und bewilligt wurde. Mit der Verlängerung konnten alle gesetzten Ziele dann leicht verspätet erreicht werden.

## 6. Verwertung und Standardisierung

### 6.1 Regulatorische Aspekte

Mit der ECC Decision (22)03 und den anschließenden nationalen Allgemeinzuteilungen in Deutschland und anderen CEPT-Ländern wurde ein entscheidendes regulatorisches Fundament für die kommerzielle Anwendung von breitbandigen Radarsystemen oberhalb 116 GHz gelegt. Parallel existiert in den USA eine Einzelgenehmigung (FCC Part 18), welche den Markteintritt in Nordamerika vereinfacht. Damit sind wesentliche Hürden für eine internationale Verwertung der PINK-Technologieplattform abgebaut.

### 6.2 Patentlage

Die während des Vorhabens intensivierte Patentstrategie deckt kritische Elemente wie Frequenzverdopplung, SIW-Einkopplung, phasenkalibrierte Referenzoszillatoren und spezielle Packaging-Konzepte ab. Durch diese Absicherungen wird eine zentrale Wertschöpfung am Standort Deutschland gewährleistet, gleichzeitig werden OEM-Partnerschaften oder Lizenzmodelle ermöglicht, um die Technologie weltweit zu verbreiten. Es sind keine Patente oder parallele Arbeiten anderer bekannt, die einer Verwertung der Projektergebnisse entgegenstehen. Zudem zeigen die in PINK erreichten Ergebnisse die Technologieführerschaft in allen bearbeiteten Bereichen.

### 6.3 Wirtschaftliche Verwertung

Ein zentrales Anliegen im Projekt „PINK“ war die frühzeitige Ausrichtung auf konkrete Anwendungsmärkte und Geschäftsmodelle, um die entwickelten Radarsysteme zeitnah nach Projektabschluss wirtschaftlich verwerten zu können. Dabei verfolgen die beteiligten

Industriepartner jeweils unterschiedliche, aber sich ergänzende Strategien. So plant die iNOEX GmbH, die im Projekt entstandenen Radar-Sensortechnologie in ihre bestehenden Extrusionsmessanlagen zu integrieren und dadurch eine kontinuierliche 3D-Qualitätskontrolle von Kunststoffrohren direkt in der laufenden Produktion zu ermöglichen. Darüber hinaus eröffnet die Fähigkeit des Radarverfahrens, ohne Koppelmedium zu arbeiten und hohe Auflösungen zu erzielen, auch Potenziale für Folien- und Plattenanwendungen, bei denen herkömmliche Messverfahren oftmals nur eingeschränkt einsetzbar sind.

Die Status Pro Maschinenmesstechnik GmbH fokussiert sich hingegen auf die Entwicklung und Vermarktung eines radar-basierten Kalibrierinstruments für Werkzeugmaschinen. Damit erweitert das Unternehmen sein Portfolio von Laser- und Inklinometer-basierten Systemen um ein zuverlässiges, robustes und zugleich präzises Verfahren, das in vielen Fällen kostengünstiger ist und sich weniger empfindlich gegenüber Schmutz oder kurzzeitigen Signalunterbrechungen zeigt. Das Radar-System kann Laserinterferometer sinnvoll ergänzen oder sogar ersetzen, beispielsweise wenn große Messbereiche oder besonders staubige Arbeitsumgebungen die optischen Verfahren an ihre Grenzen bringen.

Die 2pi-Labs GmbH, als Hersteller der Kernkomponenten (HF-Frontend und Backend) und Inhaberin wichtiger Patentrechte, nimmt eine zentrale Stellung in der OEM-Belieferung ein. Durch ihre fundierte Expertise in Radarchip-Design und Hochfrequenz-Hardware ist 2pi-Labs in der Lage, Sensorbaugruppen für verschiedene Industriezweige anzupassen und zu skalieren. Neben der Extrusions- und Werkzeugmaschinenbranche bestehen relevante Absatzmärkte in Bereichen wie Stahl- und Glasproduktion, Luftfahrt oder der Automobilzulieferindustrie, wo hochauflösende berührungslose Messmethoden zunehmend gefragt sind. Zusammen stellen diese drei Verwertungsansätze sicher, dass die in „PINK“ erarbeiteten Technologien langfristig ein breites Anwendungsspektrum abdecken und so die Innovationskraft der beteiligten Unternehmen nachhaltig stärken.

## 7. Wissenschaftliche Publikationen und Auszeichnungen

Im Rahmen des Projekts wurden Beiträge bei IEEE IMS, EuMW und RWW, sowie in Fachjournalen (IEEE Sensors Letters, T-MTT, etc.) veröffentlicht. Mehrere Auszeichnungen, darunter Best Paper Awards und der Outstanding Young Engineer Award der IEEE MTT-S, belegen die große wissenschaftliche Relevanz und den technischen Fortschritt, den das Projekt „PINK“ erzielt hat. Eine genaue Auflistung befindet sich im Anhang.

## 8. Ausblick auf Anschlussvorhaben

Die genehmigten Projekte EFRE NRW MeRePOLY und EFRE NRW TIGER greifen bereits Konzepte aus PINK auf und knüpfen an Ergebnisse an, um einerseits kostengünstige Packaging-Technologien für Hochvolumen-Sensorik zu erforschen (MeRePOLY) und andererseits puls-basierte THz-Verfahren zu untersuchen (TIGER). In beide Projekte fließen die im Vorhaben PINK entwickelten Frontend- und Backend-Kompetenzen sowie die algorithmische Expertise für hohe Frequenzbereiche ein. Gleichzeitig entstehen weitere Chancen in Richtung 6G-Sensorik, wo Frequenzen von 100 – 750 GHz angestrebt werden und die Bandbreite der Systeme noch einmal erhöht werden soll.

## 9. Zusammenfassung und Fazit

Trotz unerwarteter Lieferkettenengpässe und personeller Herausforderungen hat das Verbundvorhaben „PINK“ seine hochgesteckten Ziele vollständig erreicht. Mit einem modularen SiGe-Radarchipsatz, der Bandbreiten von bis zu 56 GHz im D-Band bewältigen kann, wurden sowohl SAR-basierte Bildgebungsverfahren für die Extrusionsmesstechnik als auch ultra-präzise Distanzmessungen für Werkzeugmaschinen erfolgreich realisiert. Die dabei entstandenen Demonstratoren dokumentieren eindrucksvoll, dass sich die Technologie unter realen Fertigungsbedingungen einsetzen lässt und Laserinterferometer in bestimmten Anwendungen ablösen oder wenigstens ergänzen kann.

Darüber hinaus konnten parallel zum Projekt wesentliche Beiträge zu Fortschritten in der Regulierung des Frequenzbereichs >116 GHz erzielt werden, sodass eine internationale Vermarktung von neuartiger breitbandiger mmWellen-Spektroskopie als eine der ersten 6G-Sensing Anwendungen erheblich vereinfacht wird. Umfassende Patentstrategien sichern das entstandene Know-how, während wissenschaftliche Veröffentlichungen und Konferenzpräsentationen die Forschungsgemeinschaft weiter voranbringen und zu einem Ausbau der Vernetzung von Industrie und Wissenschaft geführt haben. In Summe stellt „PINK“ einen Meilenstein in der industriellen Hochfrequenz-Sensorik dar: Die Technologie kann die Qualitätssicherung revolutionieren, in vielen Produktionsbereichen signifikant Ausschuss reduzieren, Kalibrierprozesse erleichtern und zusätzliche Einsparpotenziale (Energie / Abfallvermeidung durch zerstörungsfreie In-Line Prüfung) in der Fertigung freisetzen.

Diese Errungenschaften belegen, dass die enge Zusammenarbeit von KMU (2pi-Labs sowie den industriellen Endanwendern iNOEX und Status Pro) und universitären Forschungseinrichtungen (wie RUB-INSYS und RUB-HFS) zu tiefgreifenden Innovationen führt, die weit über den Stand der Technik hinausreichen. Die im Projekt entstandenen Radarbaugruppen und Softwarewerkzeuge können nun in zahlreiche weitere Märkte (z. B. Stahl- oder Glasproduktion, Automobilzulieferung, Luftfahrtindustrie) transferiert werden, wodurch „PINK“ eine nachhaltige Wirkung für den Technologie- und Forschungsstandort Deutschland entfaltet.

Das Projekt „PINK“ konnte seine Ziele vollständig erreichen. Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Implementierung der Technologien in Demonstratorsysteme, die in verschiedenen Anwendungsszenarien erfolgreich getestet wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Radarsensorik eine bedeutende Rolle in der zukünftigen zerstörungsfreien Prüfung, in Extrusionsapplikationen, bei der Zustandsüberwachung in der industriellen Prozessmesstechnik und bei der Materialanalyse spielen wird. Die Projektergebnisse bieten eine solide Grundlage für weitere Forschungen und die zukünftige Kommerzialisierung der entwickelten Technologien in verschiedensten breiten Anwendungsbereichen und liefern somit einen starken Beitrag, den Innovationsstandort Deutschland auch zukünftig zu sichern.

## Liste der Veröffentlichungen im Projekt

### Veröffentlichungen mit Projektbezug:

1. L. Piotrowsky, J. Barowski and N. Pohl, "Near-Field Effects on Micrometer Accurate Ranging With Ultra-Wideband mmWave Radar," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 21, no. 5, pp. 938-942, May 2022, doi: 10.1109/LAWP.2022.3152558. [Konsortialpartner]
2. T. Jaeschke, S. Kueppers, N. Pohl, J. Barowski, "Calibrated and Frequency Traceable D-Band FMCW Radar for VNA-like S-Parameter Measurements," 2022 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 2022, pp. 1-3
3. S. Kueppers, T. Jaeschke, N. Pohl and 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.
4. L. Piotrowsky, S. Kueppers, T. Jaeschke and N. Pohl, "Distance Measurement Using mmWave Radar: Micron Accuracy at Medium Range," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 70, no. 11, pp. 5259-5270, Nov. 2022, doi: 10.1109/TMTT.2022.3195235.
5. L. Piotrowsky and N. Pohl, "Considerations on Near-Field Correction:  $\mu\text{m}$  Accuracy with mmWave Radar," 2024 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2024, Washington, DC, USA, 2024, pp. 382-385, doi: 10.1109/IMS40175.2024.10600411. [Konsortialpartner]
6. J. Barowski and I. Rolfes, "A Range-Doppler Processing Based Calibration Method for Short-Range Millimeterwave FMCW Radar Imaging," 2024 15th German Microwave Conference (GeMiC), Duisburg, Germany, 2024, pp. 197-200, doi: 10.23919/GeMiC59120.2024.10485340. [Konsortialpartner]

### Sonstige Tagungs- & Konferenzteilnahmen mit Projektbezug:

IMS 2022 – International Microwave Symposium, Juni 2022 in Denver

RWW2022 – Radio Wireless Week, Januar 2022 in Las Vegas

Mittelstandskonferenz Berlin 2023 (2pi-Labs stellvertretend für Konsortium)

### Preise & Auszeichnungen mit Projektbezug:

1. 2021 AMA Innovationspreis "SONDERPREIS: Junes Unternehmen" für 2 $\pi$ SENSE – D-Band FMCW Software Defined Radar (126-182 GHz), Simon Küppers, Jan Barowski, Timo Jaeschke, Nils Pohl
2. 2023 VDE ITG Preis für Veröffentlichung „Distance Measurement Using mmWave Radar: Micron Accuracy at Medium Range“ in IEEE MTT (s. Veröffentlichung 4)
3. 2023 IEEE Sensors Letters Best Paper Award für Veröffentlichung "Versatile 126–182 GHz UWB D-Band FMCW Radar for Industrial and Scientific Applications"
4. 2023 IEEE Microwave Theory and Technology Society (MTT-S) Outstanding Young Engineer Award "...for outstanding early career achievements in advancing wideband millimeter-wave radar sensors for industrial applications." für Dr.-Ing. Timo Jaeschke  
Konsortialpartner:
5. 2022 Piergiorgio L. E. Uslenghi Letters Prize Paper Award für L. Piotrowsky, J. Barowski and N. Pohl, "Near-Field Effects on Micrometer Accurate Ranging With Ultra-Wideband mmWave Radar,"
6. 2024 VDE Promotionspreis für Lukas Piotrowsky