Schlussbericht gemäß NKBF 2017
zum Verbundprojekt IMOCO4.E

ZE: IMST GmbH	Förderkennzeichen: National: 16MEE0211 EU Funding: 101007311
Autor: Reinhard Kulke, Lars Meyer	
Vorhabenbezeichnung: IMOCO4.E - RADAR	
Projekt Laufzeit: 01.09.2021 – 31.08.2024	

IMOCO4.E-RADAR - „Innovative Radarsensorik und Sensorfusionsplattform zur Steuerung eines Autonomen Flurförderzeugs“

Im Rahmen des Gesamtvorhabens

IMOCO4.E

Intelligent Motion Control under Industry4.E

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Co-funded by European Union’s
Horizon 2020 programme

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung 3
1.1. Aufgabenstellung 3
1.2. Voraussetzung für die Durchführung des Projekts 5
1.3. Planung und zeitlicher Ablauf 5
2. Eingehende Darstellung des Projekts 6
2.1. WP-1: Project Management and Liason 9
2.2. WP-2: Business Requirements and Reference System Architecture 9
2.3. WP-3: Perception and Instrumentation Layer based on AI at the Edge 13
2.4. WP-4: Smart Control Layer Design and Development 16
2.5. WP-5: Digital Twins and Interaction with Cloud Layer 17
2.6. WP-6: Implementation and Integration of IMOCO4.E Platform 18
2.7. WP-7: Pilots and Demonstrators 22
2.8. WP-8: Dissemination, Exploitation, Communication Activities 23
2.9. Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplans 23
2.10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 24
2.11. Veröffentlichungen der Ergebnisse aus dem Projekt 24

1. Kurzdarstellung

IMOCO4.E ist ein europäisches Forschungsprojekt aus dem EU Förderrahmen ECSEL, H2020. Anteilig wird der nationale Teil des Projektes vom BMBF gefördert. Das Projekt befasst sich mit dem Thema „Intelligent Motion Control under Industry 4.E". Zu dem Konsortium gehören 46 Partner aus 13 europäischen Ländern. Experten aus Industrie und Wissenschaft entwickeln gemeinsam intelligente Lösungen für 5 Pilotanwendungen, 4 Use Cases und 4 Demonstratoren. Dazu gehören u.a. Prozesse für die Halbleiterherstellung und die Kosmetikindustrie, Röntgenroboter, Teleoperation, Vortriebsmaschinen für den Tunnelbau und intelligente Lagerlogistik. Innovative Sensorik kommt dabei zum Einsatz, die sich die Methoden der Künstlichen Intelligenz zunutze macht. Digitale Zwillinge dieser Technologien ermöglichen die Planung, den Entwurf und die Optimierung von Prozessketten in einer virtuellen Umgebung. Das spart Zeit und Kosten und sichert den hohen Technologie- und Innovationsstandard in Europa und in Deutschland. Die deutsche Gruppe innerhalb des Konsortiums besteht aus 7 Partnern, die gemeinsam den Prozess der Lagerlogistik hin zu autonom operierenden Gabelstaplern der Firma STILL voranbringen. IMST entwickelte dafür die Radar-Sensorik und einen Sensorknotenpunkt mit digitalen Datenschnittstellen und Cloud-Anbindung.

1.1. Aufgabenstellung

Im Projekt IMOCO4.E sollte von IMST eine 77 GHz Radarsensortechnologie entwickelt werden, die zum autonomen Navigieren eines Gabelstaplers („iGo neo" von Partner STILL) innerhalb einer industriellen Lagerhalle beiträgt. Die Messdaten des Radarsensors dienen dem Fahrzeug zur Hinderniserkennung, Kollisionsvermeidung, Fortbewegungsplanung, Wegefindung und Navigation. Andere Sensoren (z.B. Kamera oder Lidar) sowie intelligente Steuerungsalgorithmen sind ebenfalls feste Bestandteile für das autonome Navigieren. Diese wurden von anderen Partnern im Projekt entwickelt. Die Aufgaben von IMST unterteilen sich in die Entwicklung der Radarhardware ausgehend von einem Sensor aus dem „RoKoRa" Projekt, sowie der zum Sensor gehörenden Signalverarbeitung, die in Form einer Firmware im Sensor gespeichert ist und zur Radarmessung ausgeführt wird. Darüber hinaus sollte von IMST ein Sensorknoten entwickelt werden, an den mehrere Radarsensoren oder auch eine Kamera angeschlossen werden können mit dem Ziel, zeitsynchrone Sensordaten aufzeichnen und auswerten zu können, bevor diese an die Steuereinheit des Gabelstaplers weitergeleitet werden. Auch für den Sensorknoten, der als Mini-PC entworfen wurde, wurde entsprechende Software entwickelt.

Anforderungen, Spezifikationen und die Systemarchitektur sollten zusammen mit den Partnern im Work-Package 2 erarbeitet werden.

Die Hardware-Entwicklung sollte im Wesentlichen im Work-Package 3 mit folgenden Schwerpunkten durchgeführt werden: Radar-Antennen, Frontend und Backend, Radar-Firmware und Mini-PC Board mit Kommunikations- und Sensor-Schnittstellen.

Software-Entwicklung, Radarsignalverarbeitung, Schnittstellenimplementierung und Datenmanagement sollten im Work-Package 4 stattfinden.

Darüber hinaus war für IMST die Implementierung und Validierung der Hardware- und Software-Plattformen in Work-Package 6 geplant. Work-Package 7 war schließlich für die Integration der

Plattformen sowie die Testkampagnen und Validierungen der Demonstratoren vorgesehen. IMSTs Beteiligung war ausgerichtet auf Demonstrator 3 (Gabelstapler von STILL).

Abbildung 1 zeigt die in der Aufgabenstellung vorgesehenen Funktionsblöcke, an denen IMST maßgeblich beteiligt sein sollte. IMSTs Radarsensor und der Mini-PC als Sensorknoten waren den Funktionsblöcken 3 und 10 (Building Block 3: „Neuartige Sensoren" und Building Block 10: „autonome Navigation") zugeordnet.

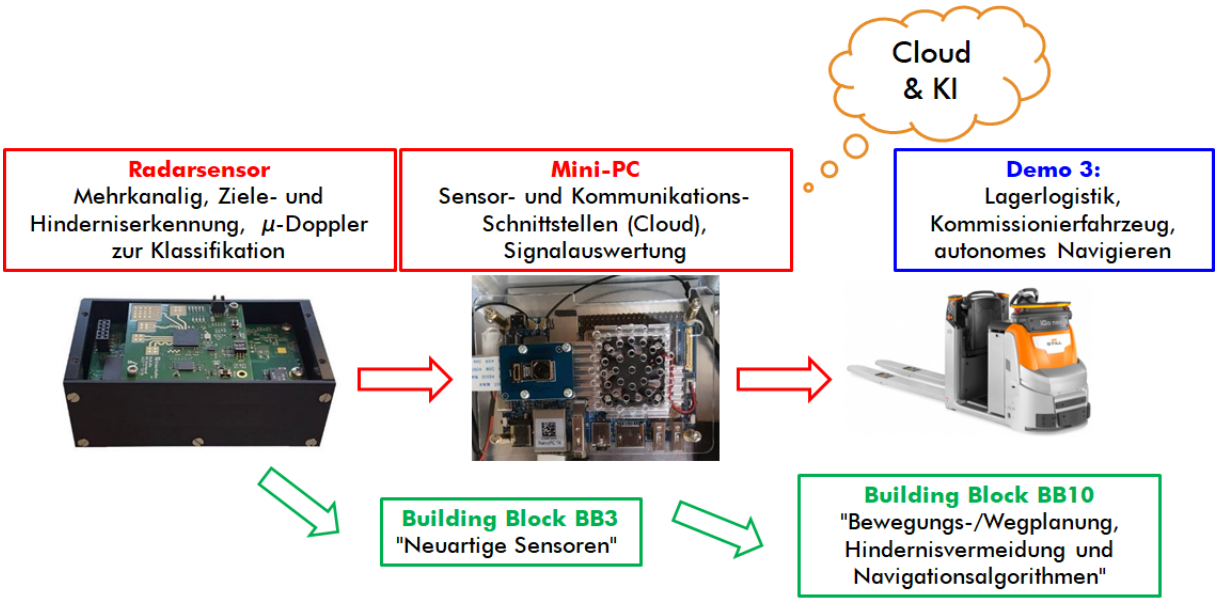


Abbildung 1: Funktionsblöcke mit Beteiligung von IMST

Die IMST GmbH verfolgte in ihrem Teilvorhaben diese wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele (H/W = Hardware, S/W = Software):

1. Unterstützung bei Definition, Spezifikationen und Anforderungen der Radarsensorik für Demo 3 zusammen mit Projektpartnern.
2. H/W: Entwickeln der integrierten Patch-Antennen nach MIMO-Verfahren (Multiple Input Multiple Output) angepasst an Anforderungen von Demo 3.
3. H/W: Aufbau des neuen Radar-Frontends mit integrierten Antennen und optimiertem Radom.
4. H/W: Aufbau der 77 GHz Radarsensoren in IP65 Gehäuse mit Ethernet-Schnittstelle und DC-Anschluss für Spannungsversorgung.
5. S/W (Firmware): Entwickeln der Radar-Signalverarbeitungsalgorithmen für Gabelstapleranwendung zur Erkennung von Hindernissen beim autonomen Navigieren des Fahrzeugs.
6. H/W: Aufbau eines Mini-PC als Sensorknoten für Radarsensoren und Kamera mit unterschiedlichen Kommunikationsschnittstellen.
7. S/W: Entwicklung von Algorithmen zur zeitsynchronen Aufnahme von Radar- und Videodaten mit dem Sensorknoten.
8. S/W: Erweiterung und Anpassung der Windows-Software SenTool von IMST zur Parametrisierung der Radareinstellungen und Darstellung der Radardaten in verschiedenen Plots.
9. Eigene Tests und Messreihen zur Verifikation und Validierung des Radarsensorsystems.
10. Integration des Radarsensorsystems in Demo 3 zusammen mit Partnern.

11. Tests und Messreihen zur Verifikation und Validierung des Radarsensorsystems in Demo 3 zusammen mit Partnern.

1.2. Voraussetzung für die Durchführung des Projekts

Voraussetzung für die Durchführung des Projektes sind technische Hilfsmittel zum Entwurf und zur Fabrikation von (hochfrequenten Radar-)Schaltungen und Möglichkeiten zur Validierung der gefertigten Hardware und Software auf den angestrebten Demonstratoren und Pilots. Diese Tools wurden teilweise durch IMST entwickelt oder wurden von extern beschafft. Letzteres war gegeben durch die Kooperation mit Partnern aus dem Projektkonsortium. Zusätzlich dazu wurden Softwaretools benötigt, die das Schreiben von Firmware und GUIs unterstützt. Diese sind auf Basis von Open Source Softwareentwicklungsumgebungen vorhanden. Grundsätzlich verfügt IMST über ein breites Spektrum an technischen Hilfsmitteln in Hardware und Software, die auch für die Entwicklung der im Projekt entstandenen Sensorik eingesetzt wurden. Dazu gehören unter anderem: HF-Schaltungs- und Antennenmesstechnik, Labore für den Aufbau und die Inbetriebnahme von Sensoren, Simulations- und Layout-Software wie ADS, Empire und Altium.

1.3. Planung und zeitlicher Ablauf

IMOCO4.E war ein europäisches Projekt im Rahmen von H2020 ECSEL. Der deutsche Projektteil wurde anteilig vom BMBF gefördert. Das europäische Projektkonsortium bestand aus 46 Partnern aus Industrie und Forschung. Zur nationalen Gruppe, geleitet von der Firma STILL, gehören 7 Partner:

- STILL GmbH
- IMST GmbH
- Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung E.v.
- Digital-Twin Technology GmbH
- Nuromedia GmbH
- Fraunhofer Gesellschaft IML
- SEMI Europe GmbH

Die deutsche Gruppe war eingebunden in die Gesamtorganisation und Struktur des IMOCO4.E Projektes. Dazu gehörte auch ein gemeinsamer Arbeitsplan mit 8 Arbeitspaketen, umfangreichen Meilensteinen und entsprechender Projektdokumentation und Reviews. Für das Projekt wurden 10 Funktionsblöcke definiert (BB = Building Blocks von 1 bis 10). IMST war an BB 3 und BB 10 beteiligt. Darüber hinaus gab es 4 Use Cases, 5 Pilots und 4 Demonstrators als Anwendungen für die Technologieentwicklungen. IMST war zusammen mit den deutschen Partnern in Demonstrator 3 „Warehouse Logistics“ eingebunden. Darüber hinaus hat IMST zusammen mit Partner PMS (Philips Medical Systems) eine Radarmessreihe in Pilot 4 „Health Care“ an einem Röntgenroboter durchgeführt.

Abbildung 2 zeigt das übergreifende Gantt-Chart des Gesamtprojektes. IMST war an den Work-Packages 2 bis 8 beteiligt. WP 8 „WP8: Dissemination, Exploitation, Communication Activities“ war von der BMBF Förderung ausgeschlossen. WP 1 war ausschließlich für den Projektkoordinator vorbehalten.

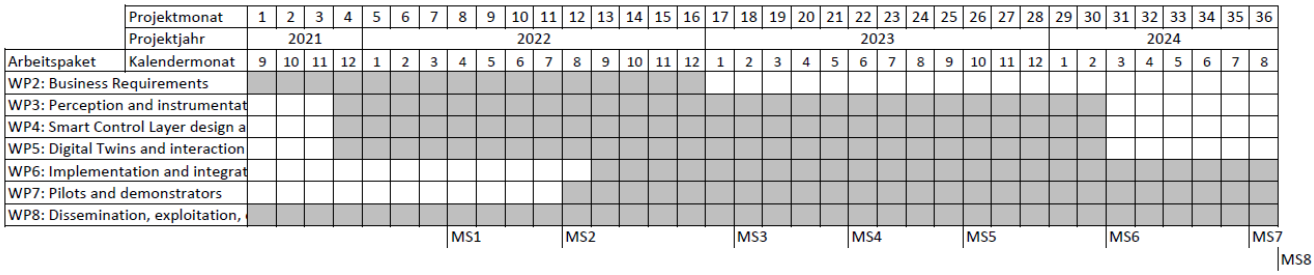


Abbildung 2: Projekt Gantt-Chart mit Meilensteinen

2. Eingehende Darstellung des Projekts

Der folgende Abschnitt enthält eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete sowie der im Rahmen des Projektes geleisteten Arbeiten. Zu den folgenden Meilensteinen hat IMST beigetragen:

MS1, März 2022:

- Radar: Datenblatt mit Auflistung der Spezifikationen: IMST erstellt ein erstes Datenblatt mit den Zielspezifikationen des gemeinsam definierten Radarmoduls
  → Erstes Datenblatt V0.1 im März 2022 erstellt, finales Datenblatt V1.2 im April 2023 fertiggestellt (siehe Abbildung 7)
- Lastenheft u.a. mit Anforderungen und Definitionen zum Radarsystem:
  IMST hat seinen Beitrag zur Erstellung des Lastenheftes insbesondere in Bezug auf die Radartechnologie beigetragen und im gemeinsamen Lastenheft ergänzt
  → Zusammen mit den Partnern wurden mögliche Szenarien besprochen, welche durch Radartechnologie unterstützt werden können, welche in Abbildung 6 zu sehen sind. IMST lieferte dabei Vorschläge, wie diese Szenarien definiert werden sollten. Weiterhin wurden gewünschte Daten (Zieleliste und Range-Doppler Karte) und die zugehörigen Schnittstellen definiert.

MS2, Juli 2022:

- IMST hat ihren Beitrag zur Definition des Demonstrators 3 geleistet, insbesondere:
  Erste, angepasste Radarschaltungen für Vorstudie verfügbar
  → IMST hat auf Basis des Lastenheftes eine Frontendschaltung für das Radar entwickelt und gefertigt. Für die geforderten Szenarien wurde eine geeignete MIMO Konstellation für die Radarantennen entwickelt. Es wurden die entsprechenden Anforderungen an die Sensorik (Antennenbreite in Azimut und Elevation für Höhendetektion) umgesetzt. In Abbildung 8 kann diese unter dem Eintrag „Frontend“ begutachtet werden.

MS3, Februar 2023:

- In MS3 sind die Ergebnisse aus diesen Tasks zusammengefasst, die IMST bearbeitet: 2.3, 3.1, 4.1 und 5.1. MS3 ist die zweite Iteration der Dokumentation über die IMOCO4.E Architektur und Anforderungen. Für IMST bedeutet das, dass die Spezifikationen und Anforderungen an die folgenden Einheiten final mit den Partnern angepasst, aktualisiert und dokumentiert wurden: BB3, BB10 und Demonstrator 3

→ Anforderungen und Spezifikationen wurden zusammen mit den Partnern in den Deliverables D2.3, D3.1, D3.2, D4.2, D5.2 erstellt und definiert.

MS4, Mai 2023:

- Ein erstes Radarmodul ist in H/W und S/W verfügbar
  →Ein vollständiges Radarmodul, welches Rohdaten empfängt und auf dem Backend weiterverarbeitet, wurde fertiggestellt. Hierfür wurde schließlich eine Firmware geschrieben, welche Rohdaten verarbeitet und Zielelisten and einen PC per Ethernet übertragen kann. Für den PC wurde eine dafür angepasste GUI (Graphical User Interface) programmiert.
  Ergebnisse zur Hardware sind in D3.3 dokumentiert, in welchem IMST die Führung übernommen hatte. Ergebnisse zur Software wurden in D4.5 (IMST als interner Reviewer) dokumentiert.
- Ein erster Mini-PC mit Kommunikationsschnittstellen ist in H/W und S/W verfügbar
  → Da Still ein System auf Jetson Basis betreibt, wurde ein NVIDIA Jetson AGX Orin akquiriert. Es wurden Softwaremethoden entwickelt, die das Ansprechen von mehreren Radarmodulen und Datenauslesen ermöglicht (siehe Abbildung 11.
- Diese werden zu ersten Validierungen von BB3, BB10 und Demonstrator 3 zur Verfügung gestellt
  → Für die Validierung von Demo3, BB3, BB10 wurden erste Tests durchgeführt.
  - Demo3: 1. Messkampagne bei Still
  - BB3: Testen des Radarsensors mit vorläufiger Firmware
  - BB10: Betrieb des Radarsensors durch einen NVIDIA Jetson Orin

MS5, September 2023:

- Die erste Validierung des Demonstrators 3 ist durchgeführt worden. Die IMST Radarsensorik ist Teil der Validierung und der Dokumentation
  → In einer Messkampagne Anfang 2023 wurde der IMST Radarsensor mithilfe von Stills iGo Plattform in den vorher definierten Szenarien getestet (Siehe Abbildung 15). Ergebnisse sind in D6.5 (August 2023) und D7.15 dokumentiert.

MS6, Februar 2024:

- Die Hardware- und Software-Entwicklungen der Radarsensorik und des Mini-PCs sind abgeschlossen. Die Einheiten sind fertig für den Einsatz in Demonstrator 3.
  → Ein vollständiger Radarsensor mit für diese Antenne entwickeltem Radom wurde getestet und steht zur Verfügung. Durch die Auswertung der ersten Messkampagnen hat IMST eine Nachverarbeitung von Radardaten implementiert.
- IMST hat die Beiträge zur Dokumentation zu BB3 und BB10 geliefert.
  → Finales Datenblatt zum Radarsensor erstellt. Beiträge zur finalen Präsentation in BB3 und BB10 wurden geliefert.

MS7, Juli 2024:

- Demonstrator 3 ist voll funktionsfähig, alle Building Blocks sind integriert. Dazu gehören auch die Radarsensoren und der Schnittstellen-PC von IMST.
  → In einer zweiten Testkampagne bei Still wurde das Radar auf dem Demonstrator zusammen mit einem Mini-PC erfolgreich getestet.

- IMST hat ihre entwickelten Einheiten dokumentiert.
  → In D3.4 wurden der Mini-PC in Zusammenspiel mit dem Radar final dokumentiert. Ergebnisse zu Demo3 wurden final in D6.10 und D7.19 dokumentiert (August 2024).

MS8, August 2024:

- Die IMST Radarsensorik wurde validiert in Hinblick auf die weitere kommerzielle Verwertungsmöglichkeiten und industrielle Einsetzbarkeit. Die Ergebnisse tragen zu den Richtlinien des IMOCO4.E Frameworks bei.
  → Ergebnisse dazu sind in D6.5, D6.10 und besonders in D7.19 & D7.11 nachzulesen, in denen die der Einsatz der Radarsensorik auf einem kommerziellen Gabelstapler und Röntgenroboter validiert wurde.

Arbeitspakete und Tasks, an denen IMST mitgearbeitet hat. Die spezifischen Aufgaben von IMST im Gesamtprojekt und in der Kooperation mit den deutschen Partnern wurden an die Projektstruktur angepasst.

- WP-2 „Business requirements and reference system architecture"

- WP-3 „Perception and instrumentation Layer based on AI at the edge"
  - Task 3.1: „Perception and instrumentation layer requirements and specifications"
  - Task 3.2: „Novel low-powered/self powered real-time sensors
  - Task 3.3: „New SoC, FPGA and multi-many core platforms for AI and smart data processing
- WP-4: „Smart Control Layer design and development"
  - Task 4.1: „Motion Control Layer requirements and specifications"
  - Task 4.5: „Path planning, trajectory generation, obstacle avoidance, navigation"

- WP5: „Digital Twins and interaction with cloud layer
  - Task 5.1: „Requirements & Specifications for twin driven condition monitoring & preventive maintenance"
  - Task 5.2: „Trustworthy and Secure Dataset management, storage and processing tools"

- WP6: „Implementation and integration of IMOCO4.E platform
  - Task 6.2 „ Validation of IMOCO4.E SW components/platform"
  - Task 6.3: „Validation of IMOCO4.E HW components/platform"

- WP7: „Pilots and demonstrators"
  - Task 7.2: „Definition, execution and validation of demonstrators (Business Model 2)"
  - Task 7.2.3: „Demo3: Warehouse logistics (Sill, DE)"

- WP: 8 „Dissemination, exploitation, communication activities"

2.1. WP-1: Project Management and Liason

WP-1 war ausschließlich dem Projektleiter „Sioux“ vorbehalten.

2.2. WP-2: Business Requirements and Reference System Architecture

In WP-2 hat IMST zusammen mit den Partnern und insbesondere mit der deutschen Gruppe im Konsortium die Anforderungen, Spezifikationen und die Systemarchitektur für Demo 3 „Warehouse Logistics“ erarbeitet. Die Aufgaben von IMST waren insbesondere, die Anforderungen an die Radartechnologie zu definieren und die typische Anwendungsszenarien vorzuschlagen. Abbildung 3 zeigt die vorgesehene Montage des Sensors in den Gabelstapler. Die Sichtweite des Radars sollte bis zu 10m betragen bei einer Durchfahrthöhe von bis zu ca. 5m. In Abbildung 4 und Abbildung 5 sind die spezifizierten Sichtbereiche (Field of View) des Sensors in Elevation und Azimut dargestellt. Diese Anforderungen wurden benötigt, um die Antenne des Sensors entwickeln zu können.

Abbildung 3: Geplanter und später umgesetzter Einsatz des Radarsensors im Gabelstapler von Partner Still

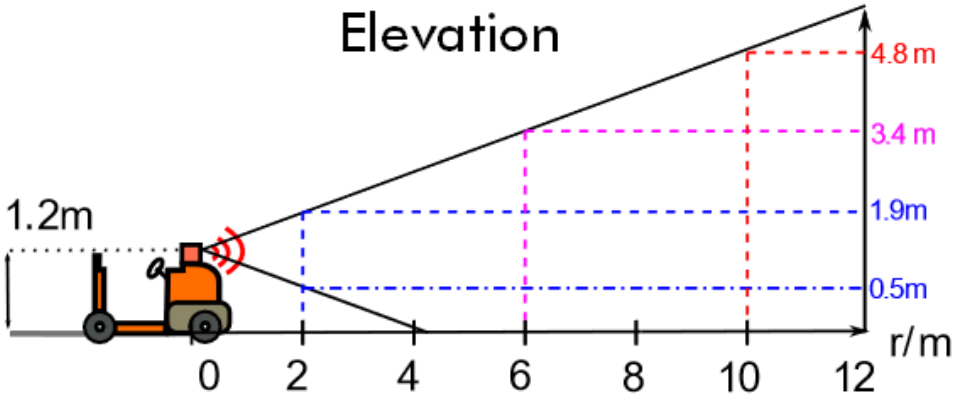


Abbildung 4: „Field of View“ für Radarsensor in Elevation

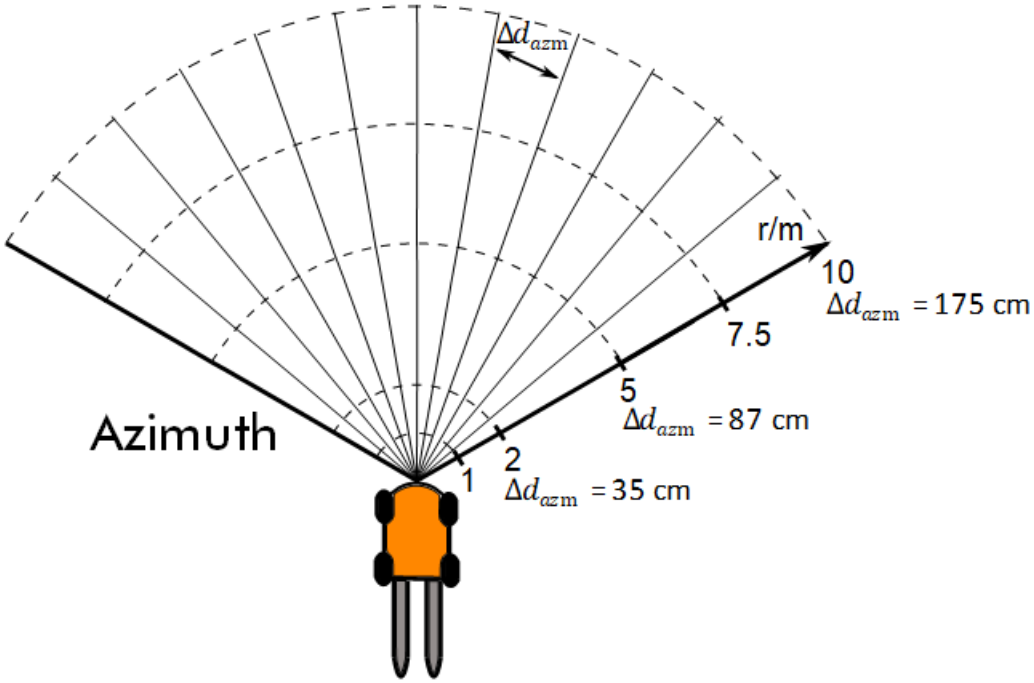


Abbildung 5: „Field of View" für Radarsensor in Azimut

Abbildung 6 veranschaulicht einige typische Anwendungsszenarien für Fahrwege eines Gabelstaplers in einer Lagerhalle, deren Fahrwege durch Wände, Regale und Hindernisse gekennzeichnet sind. Der Radarsensor soll mögliche Fahrwege und auch Kreuzungen erkennen. Ebenso ist es wichtig, statische Hindernisse als auch Personen im Fahrweg zu erkennen. Die detektierten Ziele sollen in einer Zieletabelle mit Informationen über Entfernung, Richtung, Geschwindigkeit und weiteren Eigenschaften an das Fahrzeug übergeben werden. Entsprechende Datenformate wurde spezifiziert. Diese beinhalten auch einen Zeitstempel der jeweiligen Sensoren, so dass die unterschiedlichen Sensordaten wieder miteinander in Verbindung gebracht werden können.

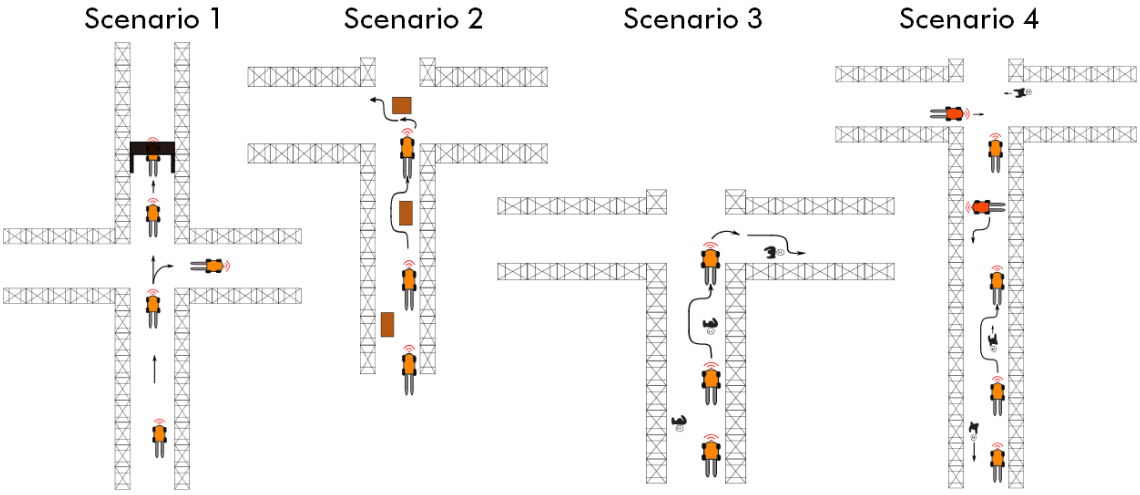


Abbildung 6: Typische Szenarien für Gabelstapler in einer Lagerhalle

Die spezifizierten Datenformate sind zusammengefasst:

- Zeitsynchrone Radar-/Videodaten mit Header-Infos und Zeitstempel
- Video: Einzelbilder im JPG-Format
- Radar-Zieletabelle:
  - Entfernung, Geschwindigkeit, Richtung, Intensität
- Radar-Mikrodoppler:
  - VT-Diagramme: „Geschwindigkeit über Zeit" bewegter Objekte

Schnittstellen

- Ethernet
- DC-Versorgung

Als Frequenzband für die Entwicklung und Anpassungen an den Radarsensor wurde das Band 77 bis 81 GHz gewählt. Dies ist originär für Anwendungen im Automotive-Bereich auch für das zukünftige autonome Fahren vorgesehen.

Abbildung 7 zeigt das finale Datenblatt zum Radarsensor. Während der Projektlaufzeit wurden die Versionen immer weiter aktualisiert. Somit erhielten die Projektpartner in regelmäßigen Abständen eine aktuelle Übersicht über den Entwicklungs- und Reifegrad des Sensors.

Die Ergebnisse aus WP-2 flossen mit in die Dokumentation zum Meilenstein MS-1 ein und wurden später in MS-2 ergänzt.

Darüber hinaus waren die Ergebnisse Grundlage für die Hardware-Entwicklung inklusive Radar-Firmware in Work-Package 3 als auch die Software-Entwicklung in Work-Package 4.

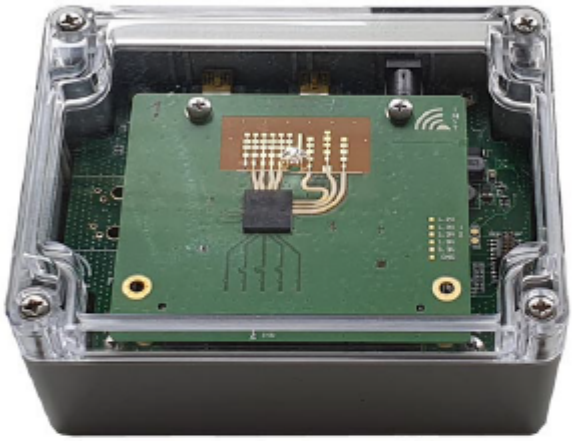
iMOCO4.E	Novel Sensors	77 GHz Radar Sensor	April 2023	IMST
Short Description	BB3	sR77-3404e	V 1.2	IMST GmbH

Radar sensor operating in the 77 GHz frequency band (equivalent to automotive applications) measuring distance, velocity and direction to targets. Additionally, micro-Doppler data of moving targets are recorded which allows target classification by AI. The radar sensor includes a commercial radar chip with 3 transmitters (Tx) and 4 receivers (Rx). FMCW, range-velocity evaluation and MIMO are applied within the sensor. Radar Micro-Controller Unit (MCU) and Digital Signal Processor (DSP) for Neural Network (NN) operations are included in the sensor.

Drawings | **Housing**: 115 x 90 x 55mm, IP 65, RND Components, 455-00184

Upper Board:
MIMO Antennas, Radar Chip and Frontend (on Backside)

Lower Board:
Radar Backend with Signal Processors and USB / Ethernet Interfaces



Radar chip: TI [redacted]

Specifications

Power supply: 12 V DC, 6.5 W
RF output power (EIRP): 24 dBm (tbc)
Range resolution/accuracy @ 4 GHz bandwidth: 3.75 cm / 1cm (tbc)
Range resolution/accuracy @ 1 GHz bandwidth: 15 cm / 5cm (tbc)
Speed resolution: 0.223 m/s , Angle resolution/accuracy: 16° / 1°
Antenna Field of View (FoV): (45°) @ 3dB and (90°) @ 10dB in azimuth,
(15°) @ 3dB and (35°) @ 10dB in elevation , (*) = measured without radome

Interfaces, Data Formats

Data interface(s), internal: CSI-2, SPI
Data interface(s), external: USB, Ethernet (data rate: 0.34 Mbit/s, depending on data)
Measurement Data: Target list with distance, velocity and direction; micro-Doppler spectra; radar raw data (optional)
Sensor configuration parameters: frequency band, RF output power, FMCW parameters ...

Firmware: Radar control, signal processing, digital interfacing (under development)
PC-Software: SenTool™ for parameter settings and data visualization (under development)
IMOCO4.E application(s): Demo 3 @ forklift (main), Pilot 4 @ healthcare robotics (optional)
AI Contribution: DSP can be applied for target classification with NNs
DT Contribution: upon request, sensor information and data can be made available
IMOCO4.E: Co-funded by European Union's Horizon 2020 programme and sponsored by German Federal Ministry of Education and Research

© IMST GmbH, 2022 www.radar-sensor.com radar@imst.de

Abbildung 7: Datenblatt 77 GHz Radar Sensor", April 2023, V1.2

2.3. WP-3: Perception and Instrumentation Layer based on AI at the Edge

Für IMST war die Hauptaufgabe in diesem Work-Package die Entwicklung der Radar-Hardware. Dies schloss auch die Radar-Firmware mit ein, die in den Arbeitsspeicher des Sensors kopiert wird und dort alle Steuerungs- und Signalverarbeitungsaufgaben übernimmt.

Die Radar-Hardware besteht aus einem Patch-Antennen-Array mit 3 Sende- und 4 Empfangsantennen, die direkt mit dem Radarchip von „Texas Instruments" verbunden sind. Abbildung 8 zeigt die inneren Platinen des Sensors. Oben ist das Frontend-Board mit Radar-Chip und Antennen. Auf der Platinen-Rückseite befinden sich weitere Frontend-Schaltungen und ein Schnittstellenstecker für die Verbindung zum Radar-Backend. Auf dem Backend sind diese Funktionsblöcke integriert: Signalprozessor für Radarsignalverarbeitung und Radarsteuerung mit EEPROM-Speicher, Signalprozessor zur Berechnung von einfachen neuronalen Netzen mit Flash-Speicher, Ethernet- und USB-Schnittstelle, DC-Stecker für 12 V und JTAG Programmierschnittstelle.

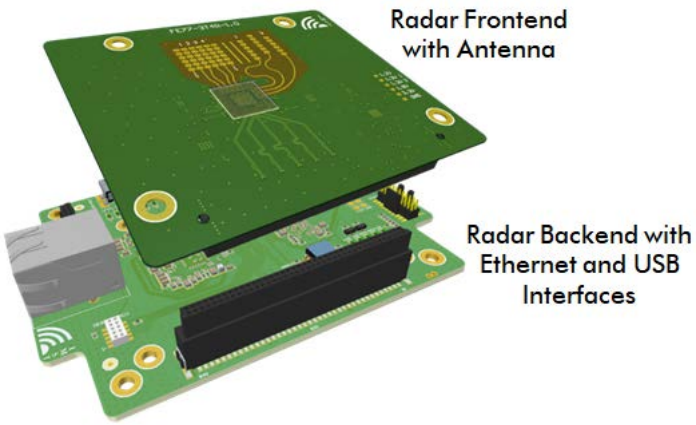


Abbildung 8: 77 GHz Radarsensor: Radar-Frontend mit Antenne (oben), Radar-Backend (unten)

Es wurde ein Gehäuse mit Schutzklasse IP65 zur Integration der Boards gewählt. Abbildung 9 zeigt ein Foto des Radarsensors im Gehäuse mit externer Videokamera. Durch den transparenten Gehäusedeckel ist der schwarze Radarchip deutlich zu erkennen. Die drei Anschlüsse auf der rechten Seite des Chips sind mit den drei Sendeantennen verbunden. Die vier Anschlüsse oberhalb des Chips gehen zu den Empfangsantennen. Das Design dieser Antenne wurde an den im Arbeitspaket 2 gezeigten Sichtbereich angepasst und optimiert. Der transparente Deckel wurde oberhalb des Chips und der Antennen ausgefräst. Eine weitere Plexiglasscheibe wurde in diese Öffnung eingesetzt. Abstand, Dicke und elektrische Eigenschaften dieses Einsatzes wurden vorab mit Simulationen ermittelt, um eine optimale Transmission der Radarsignale durch den Gehäusedeckel zu erzielen. Für die Antenne wird dieser Teil des Gehäuses auch als Radom bezeichnet.

Abbildung 9: 77 GHz Radarsensor mit externer Kamera

Zur Hardware-Entwicklung gehörte auch die Radar-Firmware. Der integrierte Signalprozessor führt zum einen die Datenkommunikation über die Ethernet- oder USB-Schnittstelle aus, zum anderen steuert er auch die Parametereinstellungen und führt die Radarmessungen selber durch. Nach den Radarmessungen werden durch die Firmware im Prozessor auch die Radarsignale weiter verarbeitet. Abbildung 10 veranschaulicht die implementierte Signalverarbeitungskette. Als Ergebnis entsteht pro Messzyklus eine Zieleliste, die über eine der Kommunikationsschnittstellen an einen Rechner oder den Sensorknoten weitergegeben wird. Die Radar-Zieletabelle enthält Informationen über Entfernung, Geschwindigkeit, Richtung und Intensität eines jeden Ziels oberhalb einer einstellbaren Detektionsschwelle. Darüber hinaus stehen noch die Doppler-Daten von sich bewegenden Zielen zur Verfügung. Diese Doppler-Daten sind ein Zeit-/Geschwindigkeitsprofil eines Ziels, wobei mit Geschwindigkeit nicht die Fortbewegung sondern die Eigenbewegungen gemeint sind. Bei einer laufenden Person sind die charakteristischen Eigenbewegungen das Schwingen der Arme und Beine sowie des Oberkörpers. Aus diesem Profil ergibt sich ein typisches Bewegungsmuster, das mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz (KI) durch trainierte Neuronale Netze (NN) zur Klassifizierung von Radarzielen verwendet werden kann. IMST hat selber keine KI im Projekt implementiert oder trainiert. Dazu fand jedoch ein enger Austausch mit den Partnern „Digital-Twin Technology GmbH“ und „Nuromedia GmbH“ statt, die sich um das Thema Digital-Twin gekümmert haben.

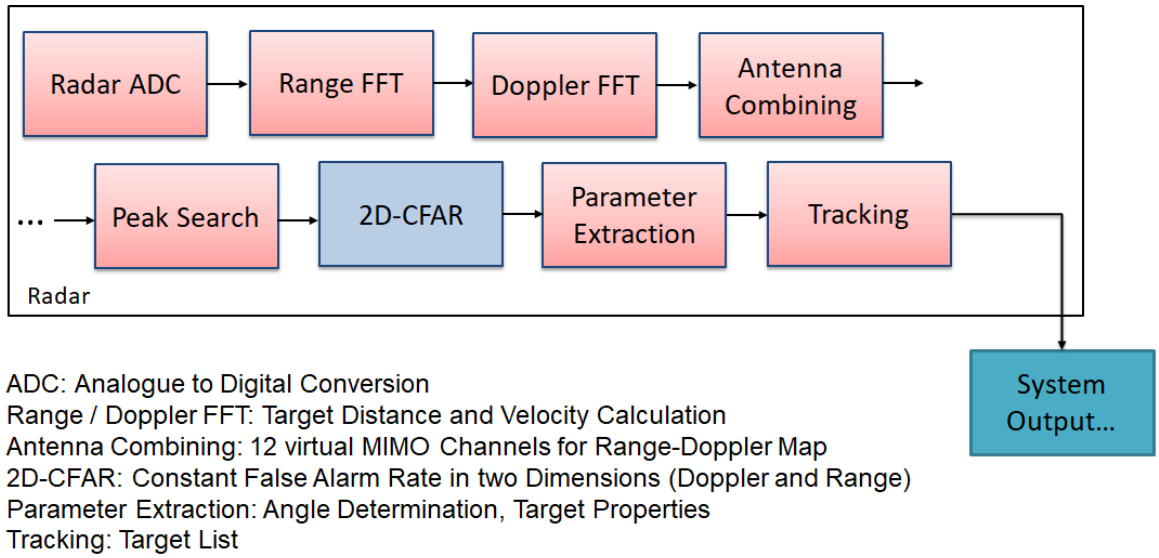


Abbildung 10: Radar-Signalverarbeitungskette der Firmware

Ursprünglich war geplant, ein eigenes Board als Sensorknoten zu entwickeln und aufzubauen. Es stellte sich jedoch heraus, dass das Datenvolumen insbesondere einer Videokamera, für die Standardprozessoren, die IMST in der Vergangenheit verwendet hat, zu groß für eine Datenfusion mit anderen Sensoren sind. Auch die Rechenzeit zur weiteren Datenverarbeitung muss für die Gabelstapleranwendung mit autonomer Navigation wesentlich kürzer sein, damit das System rechtzeitig bei der Erkennung von Hindernissen reagieren kann, denn zur Verarbeitungszeit des Sensorknotens muss noch die Latenzzeit des Steuergerätes addiert werden, bis das Fahrzeug ein Brems- oder Ausweichmanöver durchführen kann. Aus diesem Grund und zur Förderung der Kompatibilität der Programmierung und Schnittstellen wurde mit Partner STILL vereinbart, ein „NVIDIA Jetson AGX Orin Developer Kit“ im Rahmen des Projektes zu beschaffen und die weitere Sensorknotenprogrammierung auf diesem System durchzuführen. Abbildung 11 zeigt den Entwicklungsaufbau des Systems bei IMST. Zu Zwecken der Software-Entwicklung und Implementierung sind ein Radarsensor und eine Kamera angeschlossen. Die Software-Entwicklung wurde in Work-Package 4 durchgeführt.

Abbildung 11: Sensorknoten realisiert mit Jetson-PC, Kamera und Radarsensor

2.4. WP-4: Smart Control Layer Design and Development

In diesem Arbeitspaket hat IMST schwerpunktmäßig die Software-Algorithmen für den Sensorknoten (Jetson PC mit UNIX-Betriebssystem) und die Anpassung bzw. Erweiterung der GUI (Graphical User Interface) „SenTool" für Windows™ implementiert. Das Ablaufdiagramm in Abbildung 12 zeigt die Funktionsblöcke für die Sensorfusion im Jetson PC. Aus einer Konfigurationsdatei werden alle notwendigen Parameter geladen. Dazu gehören insbesondere alle einstellbaren Parameter wie IP-Adressen, Frequenzbandbreite, Leistungsparameter und umfangreiche Einstellungen zu den Algorithmen der Signalverarbeitung u.v.m. Die Radarparameter werden an das Radarmodul gesendet. Die Sensoren können über einen Konsolenbefehl gestartet werden und diese liefern dann im Streaming-Modus fortlaufend Sensordaten an den PC. Eine Referenzzeit wird vom PC vorgegeben, so dass die Sensordaten mit einem Zeitstempel versehen werden können. Die Kameradaten werden als Einzelbilder im JPEG-Format gespeichert und können somit einzelnen Radardaten aus der Zieltabelle zugeordnet werde.

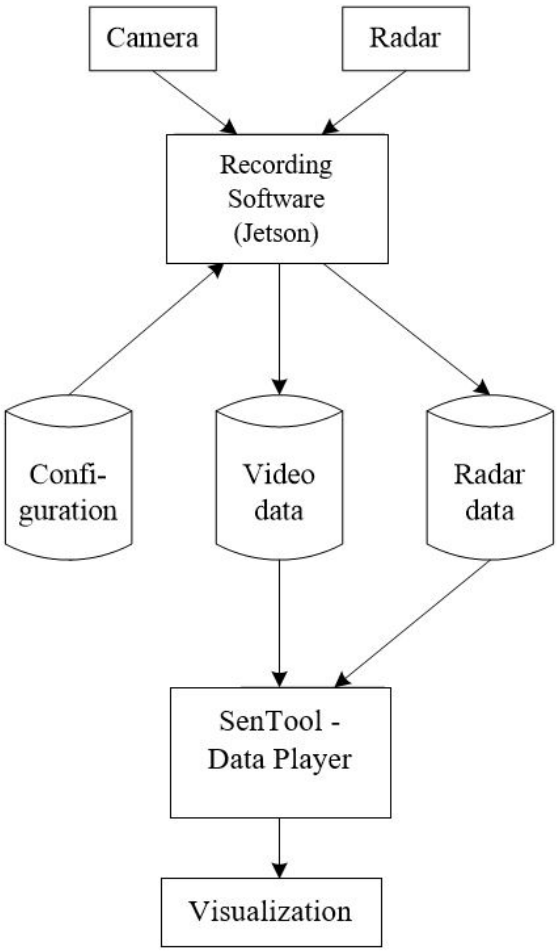


Abbildung 12: Implementierung der Datenaufnahme bis zur Datenausgabe auf dem Sensorknoten

In einem ersten Schritt erfolgte die Ausgabe und Visualisierung der Sensordaten über den „SenTool Data Player". Dieser wurde ebenfalls von IMST entwickelt und ist beispielhaft in Abbildung 14 zu sehen. Im Verlauf des Projektes wurden weitere Algorithmen zur Datenauswertung in der Jetson-PC Software implementiert und getestet. Dazu gehören beispielsweise eine Schätzung zur Eigengeschwindigkeit des Fahrzeuges oder auch die Zusammenfassung von statischen Zielen und die Er-

kennung von beweglichen Zielen. Dies ist auch in Abbildung 14 zu erkennen. Die Wände sind als rote Punkte mit Verbindungslinien sichtbar gemacht, während die detektierte Person als grüner Punkt in dem Winkeldiagramm erscheint. Der Jetson-PC bietet darüber hinaus auch ausreichend Rechenleistung, weitere Sensoren anzuschließen und KI-Funktionen anwenden zu können. Dieses System wurde auch bei einer Messkampagne in Eindhoven bei Partner Philips Medical Systems an einem Röntgenroboter getestet. Für diese Tests wurden 2 Radarsensoren und eine Kamera angeschlossen (siehe auch Abbildung 16).

2.5. WP-5: Digital Twins and Interaction with Cloud Layer

In diesem Work-Package hat IMST die nationalen Projektpartner „Digital-Twin Technology GmbH" (Partner DTT) und „Nuromedia GmbH" (Partner Nuro) dabei unterstützt, digitale Twins und eine „Virtuelle Wirklichkeit" (VR: Virtual Reality) zu entwickeln. In dieser Kooperation ging es im Wesentlichen um Radardaten zur Erkennung von Hindernissen und zur Klassifizierung von Radarzielen. Detektionen von Hindernissen werden im Digital Twin mittels analytischer Näherungsformeln nachgebildet, die DDT aus der Literatur herausgearbeitet und an die spezifischen Szenarien im Projekt angepasst hat. IMST hat beim Abgleich der Formelergebnisse mit realen Messdaten aus dem Radar unterstützt. Mit Hilfe des Mikro-Doppler-Spektrums, das vom IMST's Radar-Sensor von sich bewegenden Objekten aufgenommen wird, können Klassifikationen mittels KI durchgeführt werden. IMST hat diese Radar-Daten in den Messkampagnen aufgenommen. Typische Ziele in den Szenarien waren Personen und Fahrzeuge, die sich innerhalb der Lagerhallen bewegen und somit Hindernisse für den Gabelstapler darstellen. Mittels KI und trainierter Neuronaler Netze können Zieleklasse wie z.B. „Person geht vorweg", „Person kreuzt Fahrweg", „Person geht und trägt Gegenstand" oder „Fahrzeug fährt". Entsprechende Datensätze wurden den Partner zur Verfügung gestellt und die Ergebnisse diskutiert und bewertet. Die Ergebnisse flossen ins Digitale Twin und in die VR mit ein.

Mit dem von IMST implementierten Sensorknoten, der aus dem oben beschriebenen Jetson-PC besteht, wurde ein Edge-Computing für Sensoren (Radar und Video) realisiert. Das bedeutet, das Sensordaten auf der Ebene des Endgerätes mit geringer Latenzzeit weiterverarbeitet und ausgewertet werden können. Als Endgerät kann man in der vorliegenden Anwendung den Gabelstapler bezeichnen, der Sensordaten für die autonome Navigation benötigt. Radardaten werden in jedem einzelnen Sensor bis hin zu einer fortlaufenden Zieltabelle erzeugt und an den Sensorknoten geleitet. Dort werden die Zieledaten aus verschiedenen Sensoren und der Kamera fusioniert und ein Gesamtszenario errechnet, in dem die statische Umgebung und die dynamischen Ziele vor dem Fahrzeug ermittelt werden. Diese Daten dienen dem Fahrzeug zur Ermittlung von „Fahrbefehlen" an die Lenkung, Beschleunigung und Bremsung. Auch die Verarbeitung einer KI ist in gewissen Grenzen im Jetson-PC möglich. Ein konkretes Neuronales Netz wurde in IMOCO jedoch nicht implementiert. Eine Cloud-Anbindung wird dann interessant und notwendig, wenn ein Edge-Computing für eine „Echtzeitverarbeitung" der Fahrbefehle nicht mehr ausreicht. Für diesen Fall sollten die Daten an die „STILL-Cloud" gesendet und dort mit hoher Rechenleistung verarbeitet und zum Fahrzeug zurückgesendet werden. Die „STILL-Cloud" wäre in diesem Fall das drahtlose (WLAN-) Netzwerk von Partner STILL in der Fahrzeugtesthalle von STILL in Hamburg. Der Sensorknoten von IMST ist durch seine WLAN-Schnittstelle grundsätzlich in der Lage, sich mit einem WLAN zu verbinden. Dies wurde auch im IMST-Gebäude getestet und genutzt. Eine Anbindung an das WLAN von STILL wurde jedoch nicht mehr realisiert. Dies war für die Experimente auch nicht

notwendig, da ausreichend Edge-Computing Kapazität zur Verfügung stand. Darüber hinaus waren die Sicherheitsanforderungen sehr hoch, wenn man sich mit Lese- und Schreibrechten mit dem (lokalen) Firmennetzwerk verbinden wollte.

2.6. WP-6: Implementation and Integration of IMOCO4.E Platform

In diesem Work-Package wurde die Radar-Sensorplattform von IMST validiert und in Anwendungen implementiert und getestet. Es gab drei wesentliche Testumgebungen. Die erste waren die Flure und Labore der IMST GmbH. Radarsensor, Kamera, Sensor-Knoten und Notebook wurden auf einem Laborwagen montiert. Dieser konnte durch die Flure des Bürogebäudes geschoben werden. Abbildung 13 zeigt ein typisches Szenario. Der Aufbau wird durch einen Flur mit offenen Bürotüren geschoben. Die Wände bestehen aus einem Ständerwerk mit Gipskartonplatten in Trockenbauweise. Durch das Ständerwerk und die Türrahmen aus Metall ist diese Umgebung sehr ähnlich (aus Sicht eines Radarsensors) dem eines Lagers mit Regalwänden. Auf dem Foto ist der Monitor des Laptops zu erkennen, auf dem sowohl das Video als auch die Radardaten in der Software SenTool dargestellt sind. Die Wände rechts und links werden durch die Reflektionen an den Metallteilen, erkennbar an den grünen Punkten, sichtbar.

Abbildung 13: Messaufbau für interne Messungen: Radar, Kamera und PC auf Rollwagen im Bürotrakt von IMST

Im Laufe des Projektes wurde die Nachbearbeitung der Radardaten erweitert und verbessert. Abbildung 14 zeigt die gleiche Messsituation mit einer gehenden Person im Flur. Die Radarauswertung unterscheidet zwischen statischen und dynamischen Zielen, indem die Eigengeschwindigkeit des Rollwagens geschätzt wird. Statische Ziele werden als rote und dynamische als grüne Punkte dargestellt. Statische Punkte werden mit einer Linie verbunden, wenn diese während der Fortbewegung einen zusammenhängenden Bereich darstellen, so wie das bei einer Wand der Fall ist.

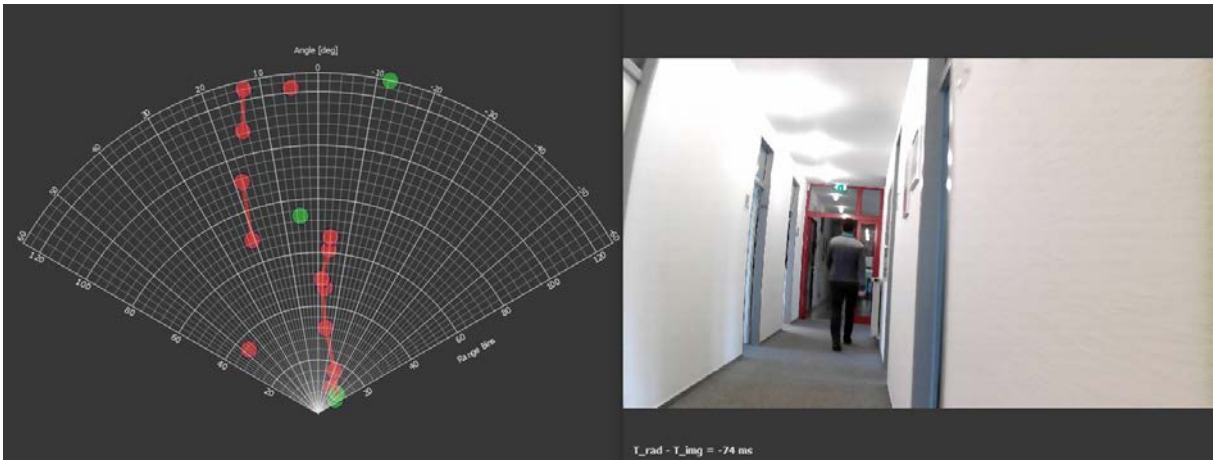


Abbildung 14: Datenaufnahme mit dem Sensorknoten im Büroflur von IMST: Video und Radardaten werden zeitsynchron dargestellt

Nach umfangreichen Tests in der eigenen Firma wurden die Radar-Systeme bei Projektpartnern installiert. Die folgenden drei externen Messkampagnen wurden während der Projektlaufzeit durchgeführt:

- STILL, Hamburg: 27.+28.2.2023 (im Rahmen von WP-6 zur Validierung)
- Philips, Eindhoven: 12.6.2023 (als zusätzliches Experiment für die Radar-Technologie)
- STILL, Hamburg: 9.7.2024 (im Rahmen der Integration und Demonstration von WP-7)

Die Messungen bei STILL gehörten zum Demonstrator 3 des Projektes. IMSTs Beteiligung war von Anfang eingeplant. Die Radar-Entwicklung war auf die Anwendung im Gabelstapler ausgerichtet. Durch Meetings und Diskussionen im europäischen Konsortium kam auch der Kontakt zu Partner PMS (Philips Medical Systems) zustanden. Die Anwendung des Röntgenroboters schien ebenfalls interessant und vielversprechend, so dass IMST und PMS eine weitere Messkampagne geplant und durchgeführt haben.

In Abbildung 15 ist eine Szene aus der ersten Messkampagne bei und mit STILL zu erkennen. Radar und Kamera wurden auf einer experimentellen Plattform vor dem Fahrer montiert. Beide Sensoren zeigen in Fahrtrichtung des „iGo neo“. Das Besondere an diesem Fahrzeug ist, das die Gabeln nach hinten ausgerichtet sind. Somit hat man in Fahrtrichtung immer ein freies Sichtfeld für Radar und Kamera. Zur Datenaufzeichnung und Steuerung der Sensoren wurden diese an ein Laptop angeschlossen. Eine Reihe von Szenarien wurden vorab definiert und dann in der Testhalle von STILL „nachgespielt“. Die Szenen reichten vom Fahren entlang von Regalreihen bis hin zu Fahrwegen mit Hindernissen, kreuzenden Personen und anderen Fahrzeugen. Es wurden Aufnahmen aus dem stehenden und dem fahrenden Gabelstapler gemacht. Während der zwei Messtage wurden umfangreiche Daten aufgenommen, gespeichert und im Nachhinein ausgewertet. Die Erkenntnisse

führten zu Verbesserungen und Erweiterungen in der Signalauswertung, insbesondere in der Datennachbearbeitung am Computer (Sensor-Knoten).

Abbildung 15: Demo 3: Messkampagne mit Gabelstaplern von STILL (Hamburg, 27.+28.2.2023)

Pilot 4 bestand aus einem Röntgenroboter von Philips im Projekt. Ein C-förmiger Arm (ARC) besitzt an einem Ende des C's eine Röntgen-Röhre (x-ray tube) und am gegenüberliegenden Ende den Detektor (detector). Zwischen *tube* und *detector* liegt der Patient auf einer Liege. Der *ARC* kann über unterschiedliche Achsen vielseitig gedreht werden, so dass 3-dimensionale Röntgen-Aufnahmen von bestimmten Körperregionen gemacht werden können. Die genauen Bewegungsabläufe des ARC werden vom Computer berechnet und ausgeführt. Es gibt Sicherheitsmechanismen, um Kollisionen mit dem Patienten zu verhindern. Dennoch besteht ein Risiko, dass ein Ausleger mit dem Patienten, dem medizinischen Personal oder auch anderen Gegenständen im Raum kollidiert. Um dieses Risiko weiter zu minimieren, wurden die Radarsensoren von IMST in diesem Aufbau getestet. Abbildung 16 zeigt den *ARC* des Röntgenroboters mit einem Dummy-Patienten auf einer Liege. Am unteren Ende befindet sich der *tube* und darüber der *detector*. Zwei Radar-Sensoren wurden jeweils um 90° zueinander gedreht und zusammen mit einer Kamera im Innenradius des *ARC* montiert. Durch die gedrehte Orientierung der Sensoren sollten die unterschiedlichen Winkelauflösungen des Radars untersucht werden. Verschiedene Szenarien und Bewegungsabläufe

des Roboters wurden durchgespielt und am Monitor eines Laptops beobachtet. Radar- und Video-Daten wurden aufgezeichnet. Es stellte sich heraus, dass es schwierig ist, die Körperabmessungen des Patienten deutlich und sicher zu erkennen. Zum einen wurden die Radar-Sensoren und insbesondere das Field-of-View der Antennen für die Gabelstapleranwendung optimiert und nicht für den Röntgenroboter. Der wesentliche Grund für die schlechte Sichtbarkeit des Patienten lag jedoch in der Tatsache, dass die metallischen Teile und insbesondere der *tube* und der *detector* so starke Reflektionen im Radar-Signal hervorriefen, dass schwach reflektierende Körper in der Nähe kaum noch von stark reflektierenden Zielen zu unterscheiden sind. Eine Montage der Radar-Sensoren direkt an *tube* und *detector* wäre aussichtsreicher für eine Kollisionsvermeidung mit Hilfe der Radartechnologie, ähnlich wie es im RoKoRa-Projekt für einen Roboter der Autoindustrie erforscht wurde. Das Experiment hat IMST interessante Erkenntnisse eingebracht, die auch den Projektpartner vorgestellt wurden. Das Thema wurden dann jedoch nicht weiterverfolgt.

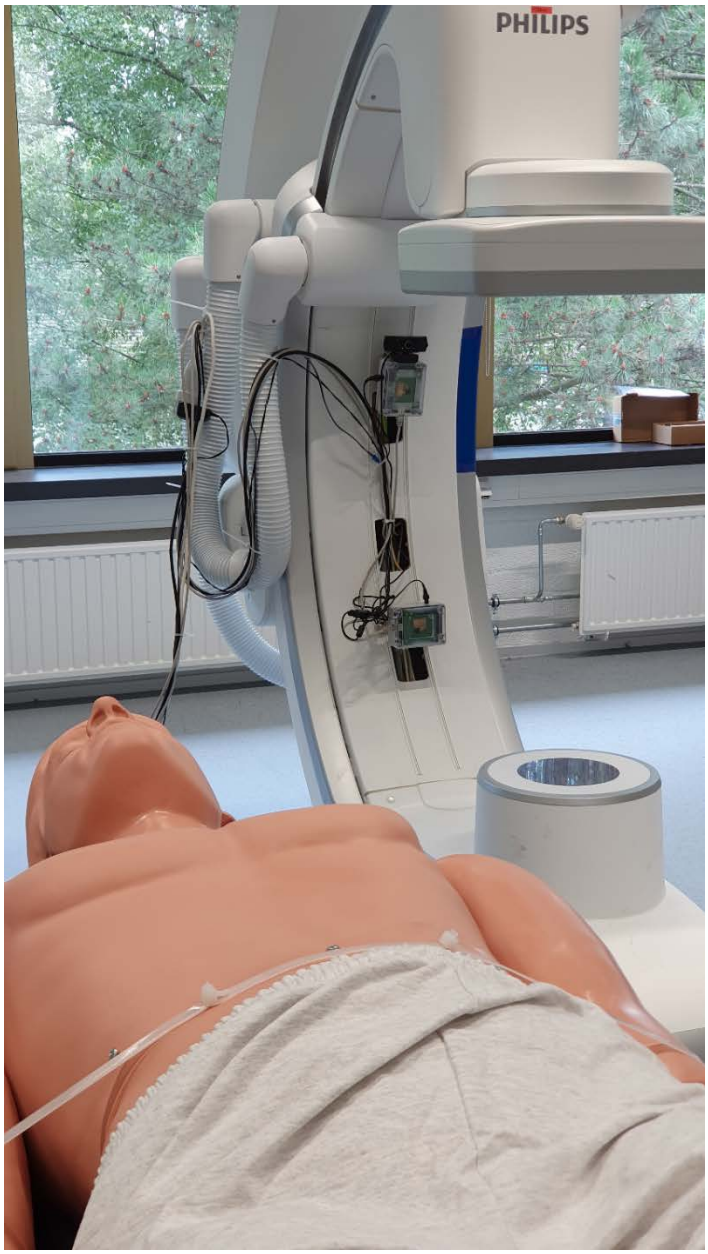


Abbildung 16: Pilot 4: Messaufbau am Röntgenroboter bei PMS (Eindhoven, 12.6.2023)

2.7. WP-7: Pilots and Demonstrators

Gut 1 ½ Jahre nach den ersten Messungen bei STILL wurde eine zweite und finale Messkampagne geplant und durchgeführt. Es wurden zwei Radar-Sensoren installiert, die um 90° zueinander gedreht waren. Dies ermöglichte die Aufnahme von Radar-Zielen mit einer Winkelauflösung in Azimut und Elevation. Die Elevationsauflösung ist von Bedeutung, wenn das Fahrzeug unter einem Hindernis hindurchfahren soll. Mit diesem Aufbau konnte die Durchfahrtshöhe genauer bestimmt werden. Verbesserte Signalverarbeitungsalgorithmen konnten abschließend getestet werden. In Abbildung 18 ist Momentaufnahme einer Messung dargestellt. Links sieht man ein Szenenfoto mit geparkten Gabelstaplern links und rechts von Fahrweg. In der Mitte ist die Range-Doppler-Map aufgetragen und rechts sieht man die Detektionspunkte der Radar-Messung. Der freie Fahrweg in der Mitte ist deutlich zu erkennen.

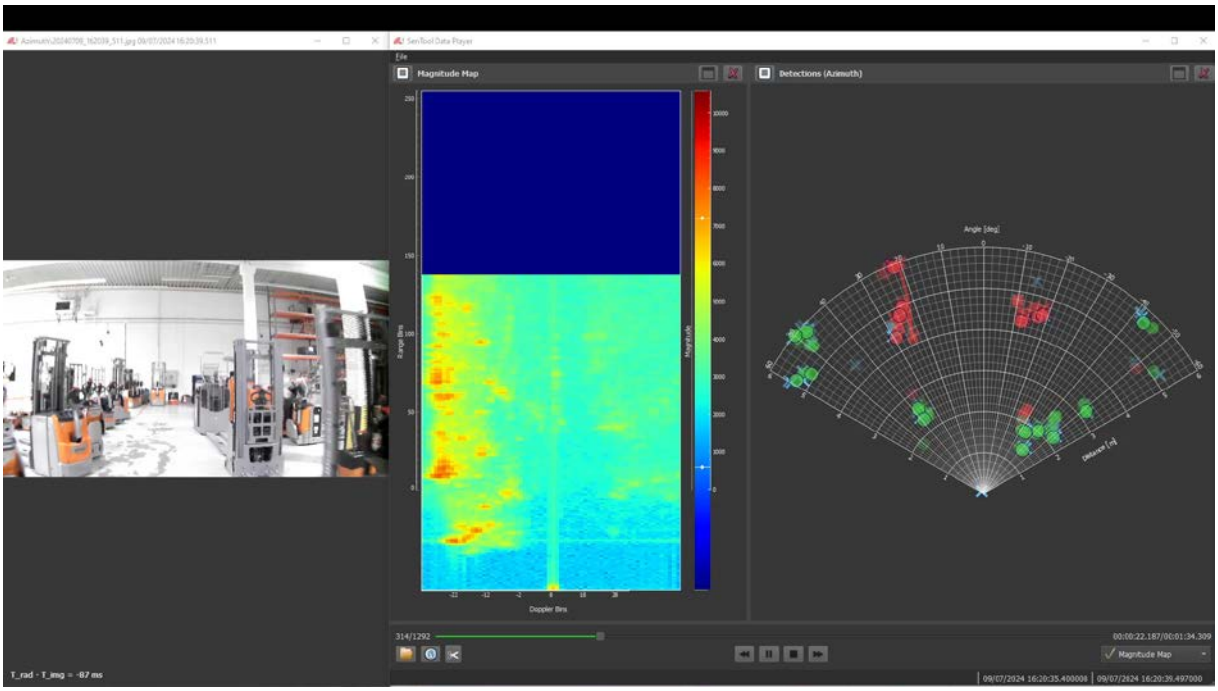


Abbildung 17: Demo 3: Momentaufnahme einer Messung; links: Szenenfoto, Mitte: Range-Doppler-Map, rechts: Detektionspunkte

Diese Messkampagne erfüllte auch den Zweck, die zwischen Radar-Daten und Fahrzeug festgelegte Kompatibilität zu erproben. Auch wenn zum Testfahrzeug selber keine physikalische Schnittstelle implementiert wurde, so wurden die Daten dennoch nachträglich ausgetauscht und ausgewertet. In Work-Package 7 konnte demonstriert werden, dass die Radar-Daten für die Fahrzeugnavigation eingesetzt werden können. Die Übertragung von Sensordaten an das Fahrzeug wird grundsätzlich praktiziert, da im aktuellen System bereits LIDAR Sensoren existieren, welche Daten im selben Format übertragen. Weitere Schritte zur Industrialisierung bis hin zur praktischen Anwendung und zum Produkt sind erforderlich. Für IMST steht ein Demonstrationsmodul mit Firmware und Software zur Verfügung, dass Interessenten gezeigt oder für Tests überlassen werden kann.

2.8. WP-8: Dissemination, Exploitation, Communication Activities

IMST hat mit Informationen und Inhalten zum IMOCO-Newsletter und projektspezifischen Internetseiten beigetragen. Die Projekt-URL lautet: https://www.imoco4e.eu/

IMST informiert über das Projekt auf der eignen Internetseite mit Verlinkung zur offiziellen Projektseite: https://radar-sensor.com/research-projects/imoco4.e.html

IMST besucht regelmäßig nationale und internationale Messen und Konferenzen. Das in IMOCO entwickelte 77 GHz Radar-Modul steht als Demonstrator für Akquisitionszwecke zur Verfügung und wird regelmäßig auf Fachmessen gezeigt und vorgeführt.

Veröffentlichung im Rahmen von IMOCO4.E:
L. Meyer, R. Jetten, R. Kulke: **„Radar for Industrial Vehicular Application“**, International Radar Symposium IRS 2023, Berlin, 26. May 2023

Work-Package 8 wurde ausschließlich durch den EU-Anteil gefördert und war von der BMBF-Förderung ausgeschlossen. Aus dem Zuwendungsbescheid, „Weitere Nebenbestimmungen und Hinweise“, Abschnitt (6): „Nicht zuwendungsfähig sind Kosten für die Verwertungsplanung und die Verwertung“

2.9. Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplans

Wissenschaftliche Verwertbarkeit

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass mit genaueren Messverfahren eine Abbildung der Umgebung durch Radar zur Sicherheit von bewegten Industriesystemen und -Fahrzeugen beitragen kann. Das Hinzufügen von mehreren Radarmodulen hilft in diesem Fall nur begrenzt. Aus diesem Grund kann eine Erhöhung der hier untersuchten MIMO-Winkelauflösung durch eine Kaskadierung von mehreren Frontendschaltungen zu einer erhöhten Konfidenz in den Messverfahren führen. Dies könnte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Wirtschaftliche Verwertbarkeit

In der Industrie werden durch die zunehmende Integrationsdichte von Sensoren und Industrie 4.0 Sensorknoten immer interessanter. Aus diesem Grund würden sich potentielle Industrieaufträge in diesem Bereich akquirieren lassen. IMST hat wichtige Erfahrungen im IMOCO-Projekt gesammelt, die es ermöglichen Sensorknoten zu entwickeln, die auf weitläufig genutzten Plattformen (NVIDIA, Linux, Raspberry PI) funktionsfähig sind. IMST hat auf der neu gewonnen Erfahrungsbasis ein Demonstratorkit erstellt, das auf Messen gezeigt oder interessierten Kunden zur Verfügung gestellt werden kann. Darüber hinaus werden die Erkenntnisse aus IMOCO im Bereich der Signalverarbeitung potentiellen Kunden für die Implementierung innovativer Radarsignalauswertung angeboten.

2.10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem Autor sind keine vorhabenbezogenen Arbeiten anderer Stellen bekannt.

2.11. Veröffentlichungen der Ergebnisse aus dem Projekt

Siehe Kapitel 2.8 “WP-8: Dissemination, exploitation, communication activities“.

Kurzbericht gemäß NKBF 2017 zum Verbundprojekt IMOCO4.E

ZE:	IMST GmbH	Förderkennzeichen: National: 16MEE0211 EU Funding: 101007311	
Autor:	Reinhard Kulke	Vorhabenbezeichnung:	IMOCO4.E
Laufzeit:	01.09.2021 – 31.08.2024		

1. Aufgabenstellung

Im Projekt IMOCO4.E sollte von IMST eine 77 GHz Radarsensortechnologie entwickelt werden, die zum autonomen Navigieren eines Gabelstaplers („iGo neo“ von Partner STILL) innerhalb einer industriellen Lagerhalle beiträgt. Die Messdaten des Radarsensors dienen dem Fahrzeug zur Hinderniserkennung, Kollisionsvermeidung, Fortbewegungsplanung, Wegefindung und Navigation. Andere Sensoren (z.B. Kamera oder Lidar) sowie intelligente Steuerungsalgorithmen sind ebenfalls feste Bestandteile für das autonome Navigieren. Diese wurden von anderen Partnern im Projekt entwickelt. Die Aufgaben von IMST unterteilen sich in die Entwicklung der Radarhardware ausgehend von einem Sensor aus einem Vorgängerprojekt, sowie der zum Sensor gehörenden Signalverarbeitung, die in Form einer Firmware im Sensor gespeichert ist und zur Radarmessung ausgeführt wird. Darüber hinaus sollte von IMST ein Sensorknoten entwickelt werden, an den mehrere Radar-Sensoren oder auch eine Kamera angeschlossen werden können mit dem Ziel, zeitsynchrone Sensordaten aufzeichnen und auswerten zu können, bevor diese an die Steuereinheit des Gabelstaplers weitergeleitet werden. Auch für den Sensorknoten, der als Mini-PC entworfen wurde, wurde entsprechende Software entwickelt.

2. Ablauf des Vorhabens

Anforderungen, Spezifikationen und die Systemarchitektur wurden zusammen mit den nationalen Partnern im Work-Package 2 erarbeitet.

Die Hardware-Entwicklung von IMST fand im Wesentlichen im Work-Package 3 mit folgenden Schwerpunkten statt: Radar-Antennen, Frontend und Backend, Radar-Firmware und Mini-PC Board mit Kommunikations- und Sensor-Schnittstellen.

IMST’s Software-Entwicklung, Radarsignalverarbeitung, Schnittstellenimplementierung und Datenmanagement wurden im Work-Package 4 durchgeführt.

Darüber hinaus war für IMST die Implementierung und Validierung der Hardware- und Software-Plattformen in Work-Package 6 geplant. Work-Package 7 war schließlich für die Integration der Platt-

formen sowie die Testkampagnen und Validierungen der Demonstratoren vorgesehen. IMSTs Beteiligung war ausgerichtet auf Demonstrator 3 (Gabelstapler von STILL).

3. Wesentlichen Ergebnisse sowie Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das europäische Projektkonsortium bestand aus 46 Partnern aus Industrie und Forschung. Zur nationalen Gruppe, geleitet von der Firma STILL, gehören 7 Partner: STILL GmbH, IMST GmbH, Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung E.v., Digital-Twin Technology GmbH, Nuromedia GmbH, Fraunhofer Gesellschaft IML und SEMI Europe GmbH. Eine enge Zusammenarbeit fand im Wesentlichen mit den nationalen Partnern im Projekt statt. IMST hat regelmäßig an Online- und Präsenztreffen des Gesamtprojektes teilgenommen und Kontakt zu weiteren europäischen Partnern gepflegt.

Zu den Wesentlichen Ergebnissen von IMST im IMOCO4.E-Projekt gehören diese Hardware- und Softwarekomponenten (H/W und S/W) sowie Technologieintegration und Tests:

1. H/W: Entwickelung einer integrierten Patch-Antennen nach MIMO-Verfahren (Multiple Input Multiple Output) angepasst an Anforderungen von Demo 3.
2. H/W: Aufbau eines neuen Radar-Frontends mit integrierten Antennen und optimiertem Radom.
3. H/W: Aufbau der 77 GHz Radarsensoren in IP65 Gehäuse mit Ethernet-Schnittstelle und DC-Anschluss für Spannungsversorgung.
4. S/W (Firmware): Entwickelung der Radar-Signalverarbeitungsalgorithmen für Gabelstapleranwendung (Demo 3) zur Erkennung von Hindernissen beim autonomen Navigieren des Fahrzeugs.
5. H/W: Aufbau eines Mini-PC als Sensorknoten für Radarsensoren und Kamera mit unterschiedlichen Kommunikationsschnittstellen.
6. S/W: Entwicklung von Algorithmen zur zeitsynchronen Aufnahme von Radar- und Videodaten mit dem Sensorknoten.
7. S/W: Erweiterung und Anpassung der Windows-Software SenTool™ von IMST zur Parametrisierung der Radareinstellungen und Darstellung der Radardaten in verschiedenen Plots.
8. Eigene Tests und Messreihen zur Verifikation und Validierung des Radarsensorsystems.
9. Integration des Radarsensorsystems in Demo 3 zusammen mit nationalen Partnern.
10. Tests und Messreihen zur Verifikation und Validierung des Radarsensorsystems in Demo 3 zusammen mit Partnern.

Am Ende des Projektes stehen ein voll funktionstüchtiger Radar-Demonstrator bei 77 GHz in H/W und S/W sowie ein Sensorknoten (Mini-PC mit Sensorschnittstellen und S/W zur Datenfusion) zur Verfügung, die in unterschiedlichen Anwendungsszenarien getestet wurden. Datenblatt und Dokumentation wurden für die weitere Verwertung der Radartechnologie erarbeitet.