

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

**Bericht**

Ausgabe      Version 1.0  
Thema         **Radar4FAD Abschlussbericht**  
Beschreibung  Schlussbericht zum BMBF Projekt Radar4FAD der Robert Bosch GmbH

**Inhaltsverzeichnis**

**1 Kurzdarstellung..... 2**

1.1 Aufgabenstellung..... 2

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde..... 3

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens..... 3

1.4 wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden ..... 3

1.5 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste..... 4

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ..... 4

**2 Eingehende Darstellung ..... 4**

2.1 der erzielten Ergebnisse: ..... 4

2.1.1 AP1 - Applikationsanforderungen, Spezifikation Radarparameter, Gap-Analyse .. 4

2.1.2 AP2 - Gesamtkonzept und Systemarchitektur des modularen Radarmodulbaukastens & AP3 - Modulkomponenten: RF-Frontend, Basisband-Implementierung, Antennenkonfigurationen..... 16

2.1.3 AP4 - Radarmodulationsverfahren und Prozessierung ..... 26

2.1.4 AP5 - Zuverlässige Heterogene Integration des Radarmoduls: 3D-Chip-Stacking und Modulpackage ..... 40

2.1.5 AP6 - RADAR-Modul Demonstration, Test und Evaluierung..... 59

2.2 des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen ..... 68

2.3 des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen ..... 69

2.4 der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses ..... 71

Von  
CC/PJ-RADBearbeiter  
Martin KunertTelefon  
+49 711 811-37468Leonberg  
23.09.2020

Bericht

Ausgabe Version 1.0

Thema Radar4FAD Abschlussbericht

# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Das erklärte Ziel des Projekts **radar4FAD** „**Universelle Radarmodule für das vollautomatisierte Fahren**“ ist die Entwicklung eines leistungsfähigen, hochflexiblen, kosteneffizienten, ausfallsicheren (fail-operational) und großserientauglichen RADAR-Modulbaukasten für alle Arten von RADAR-Anwendungen im Anwendungsgebiet des hochautomatisierten Fahrens.

Technologie, Komponente, Modul, System und Architektur bestimmen oder beeinflussen die Leistungsfähigkeit der Radar Sensorik hinsichtlich Detektionsempfindlichkeit, Orts-, Winkel- und Geschwindigkeitsauflösung, Robustheit gegenüber interferierenden Störsignalen und Ausfallsicherheit. Neue Lösungsansätze müssen dazu entwickelt und erprobt werden, wie

- Effizientere Modulationsverfahren (OFDM, PM, CDM, CS-TDM ...)
- Parallel arbeitende MIMO-Konzepte
- Adaptives digitales „smarteres“ Beamforming beim Senden/Empfangen
- Effizientere Signalverarbeitungsverfahren für CS-TDM
- Effektivere Nutzung der nutzbaren Bandbreite im 76-81 GHz Band

**radar4FAD** setzt auf dem aktuellsten Stand der Technik auf und erforscht ausgehend von einer Gap-Analyse die RADAR-Sensortechnologie auf Basis der oben genannten Lösungsansätze fokussiert weiter. Die Konzepterprobung und Bewertung soll auf Basis eines zu entwickelnden modularen Radarsensorbaukastens erfolgen, der im Idealfall auf Basis derselben Hardware-Komponenten (RF ICs, Basisbandelektronik, Antennenarrays etc.) die Implementierung und Variation unterschiedlicher Systemkonzepte erlaubt. Eine detaillierte Spezifikation der aus dem hoch- und vollautomatisierten Fahren resultierenden funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen ermöglicht ein tragfähiges Konzept für einen flexiblen RADAR-Modulbaukasten. Schlüssel hierzu ist der Ansatz Software Defined RADAR (SDR) und bedeutet, dass die zu entwickelnde höchstintegrierte Modullösung aus Antennenarray, RF-Frontend, und Hochleistungs-Basisband-IC den notwendigen Freiheitsgrad verschaffen wird um gezielt und im besten Fall softwaregesteuert neue und relevante methodische Ansätze von Modulations- und Auswerteverfahren implementieren zu können.

Von  
CC/PJ-RADBearbeiter  
Martin KunertTelefon  
+49 711 811-37468Leonberg  
23.09.2020

Bericht

Ausgabe Version 1.0

Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Die RADAR-Module müssen hinsichtlich Performanz, Bauraum, Gewicht und Zuverlässigkeit so konzipiert sein, dass eine spätere Überführung in kostenoptimierte, konkurrenzfähige Produkte möglich ist, die alle automobilen Qualitäts- und die Sicherheitsanforderungen des autonomen Fahrens erfüllen können.

Die angestrebte universelle Auslegung des Sensormoduls mit softwarebasierter Konfigurierbarkeit -ein erfolgreiches Konzept aus dem Mobilfunkbereich- wird für die Hardware zu so hohen Stückzahlen und damit zu so niedrigen Kosten führen, dass rasch eine hohe Marktpenetranz und letztlich die Nutzung in allen Fahrzeugklassen erreichbar ist. Auf dem Weg zum vollautomatischen Fahren können die kostengünstigen und flexiblen **radar4FAD**-Module bereits Eingang in ADAS-Systeme und in diverse Industrie- und Smart-City-Anwendungen finden.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Konsortium haben sich mit BOSCH, Infineon, Daimler, IMST, Uni Ulm, KIT, Ruhr Uni Bochum, FhG ENAS, FHR, CWM und IHP führende Akteure auf dem Gebiet der Radar-Technologie zusammengeschlossen. Die Kompetenzen der beteiligten Partner in **radar4FAD** greifen nahtlos ineinander über und waren eine der Grundvoraussetzungen für eine erfolgreiche Realisierung des Vorhabens. Sämtliche Systemansätze wurden mit entsprechenden Radar Demonstratoren verifiziert und validiert. Bei BOSCH stand der TDM-FCS Radar (DEM#2a) und der ADR Radar (DEM#2b) im Fokus. Der DEM#2a wurde erfolgreich in einem Versuchsträger mit 360° Radar-Rundumsicht, bestehend aus 6 Radarprototypen, implementiert.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Projektvorhabens **radar4FAD** sind detailliert auf Konsortialebene in der GvB (Gesamtvorhabenbeschreibung) und für die Robert Bosch GmbH in der TvB (Teilvorhabenbeschreibung) beschrieben. Der Projektablauf ist in den entsprechenden Gantt-Plänen monatsweise aufgelistet.

## 1.4 wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Für **radar4FAD** gab es kein Vorgängerprojekt, auf welches aufgesetzt werden konnte. Der wissenschaftliche und technische Stand zum Projektstart entsprach dem State-of-the-Art

Von  
CC/PJ-RADBearbeiter  
Martin KunertTelefon  
+49 711 811-37468Leonberg  
23.09.2020

Bericht

Ausgabe Version 1.0

Thema Radar4FAD Abschlussbericht

im Bereich der Automobil-Radartechnik. Vorhandene Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte kamen beim Start von **radar4FAD** nicht zum Einsatz.

### 1.5 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die Verwendung von Fachliteratur basierte vornehmlich auf Konferenzveröffentlichungen der relevanten Domänen (i.e. EUMW, GeMIC, etc.), wobei webbasierte Informationsdienste wie Research Gate zum Einsatz kamen.

### 1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit herrschte ein reger Austausch mit thematisch ähnlichen Förderprojekte. Bezüglich Radarinterferenz entstand ein reger Austausch mit dem BMBF Förderprojekt IMIKO. Bei der Sensordatenverarbeitung wurde eng mit dem ELEVATE-Partnerprojekt KoRRund und dem BMWi Förderprojekt iFUSE kooperiert.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 der erzielten Ergebnisse:

#### 2.1.1 *AP1 - Applikationsanforderungen, Spezifikation Radarparameter, Gap-Analyse*

Die Robert Bosch GmbH ist der Arbeitspaketleiter für AP1. Die geplante und die tatsächliche Ausführungszeit für AP1 ist in Abbildung 1 dargestellt (grün=Plan, rosa=ist und blauer Stern=Deadline für Ergebnisbericht). Wegen des verspäteten Projektstarts wurde direkt nach dem Kick-off Meeting am 14./15. März 2017, das bei Infineon in Neubiberg/München stattfand, der Fokus auf eine schnellere Abarbeitung der Tasks in AP1 gelegt. Die Ergebnisse der drei Tasks in AP1 wurden in den entsprechenden Ergebnisberichten

- E1.1 Anforderungsprofil Radar-Sensor
- E1.2 Festlegung der Radar-KPIs
- E1.3 Bericht zur Gap-Analyse

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

dokumentiert und auf dem Projekt-Datenserver allen Partnern zur Verfügung gestellt.

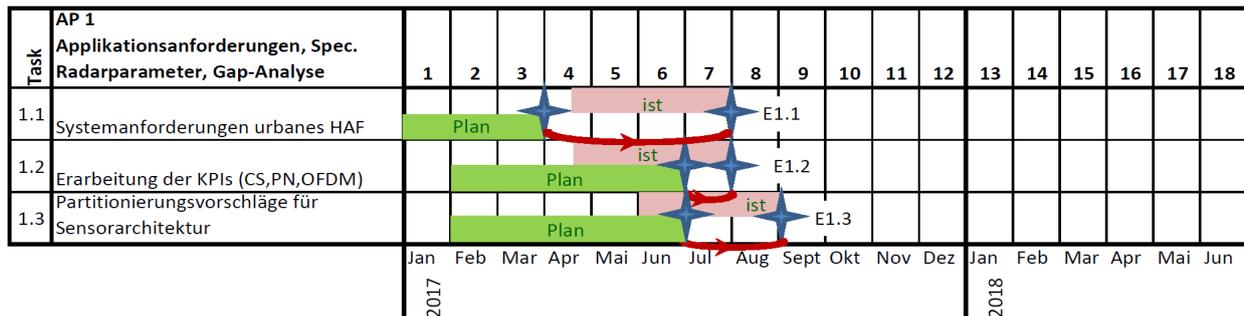


Abbildung 1: Zeitplan und Anpassungen für das Arbeitspaket 1

Der Meilenstein M1 (Plan Monat 6) war mit der Abgabe des E1.2 im Monat 7 erfüllt. Die KPIs für Chirp-Sequence (CS), Pseudo-Noise (PN) und Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Radar-Frontends lagen mit der Erreichung von M1 vor und wurden dann in AP2 zur Weiterverwertung und Konzeptentwicklung des modularen RADAR-Modulbaukastens benutzt. In AP1 wurden hierzu, abgeleitet aus der urbanen HAF Systemspezifikation, die wichtigsten KPIs (Key Performance Indicators) definiert. Auf oberster Funktionsebene wurden die 3 Modulationsarten in entsprechenden Blockdiagrammen beschrieben und mögliche Schaltungsrealisierungen skizziert.

Eine detailliertere Vorgehensweise für die Durchführung der Arbeiten in AP1 wurde unter den Projektpartnern im AP1 Kick-off in Neubiberg und in einer Telefonkonferenz am 31.03.2017 entworfen und dann systematisch weiterentwickelt und abgearbeitet (siehe Abbildung 2).

Ausgehend von den Radar-Systemanforderungen für die Fahrerassistenzsysteme (ADAS) und den besonderen Herausforderungen für das urbane HAF wurden die vorhandenen Radarspezifikationen auch für den HAF-Betrieb erweitert und daraus die KPIs ermittelt. Ein Vergleich der Systemanforderungen zwischen ADAS und HAF für die Radar-KPIs in den geplanten Ausprägungsformen (CS TDM, PN und OFDM) konnte nur für die sich bereits auf dem Markt befindlichen CS TDM Systeme durchgeführt werden, da hier bereits State-of-the-Art ADAS Sensorspezifikationen vorlagen und damit eine GAP-Analyse für die neue HAF-taugliche Spezifikation möglich war.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

## Durchsicht AP1 in der Gesamtvorhabenbeschreibung

## radar4FAD

### Allgemeines Vorgehen in AP1:

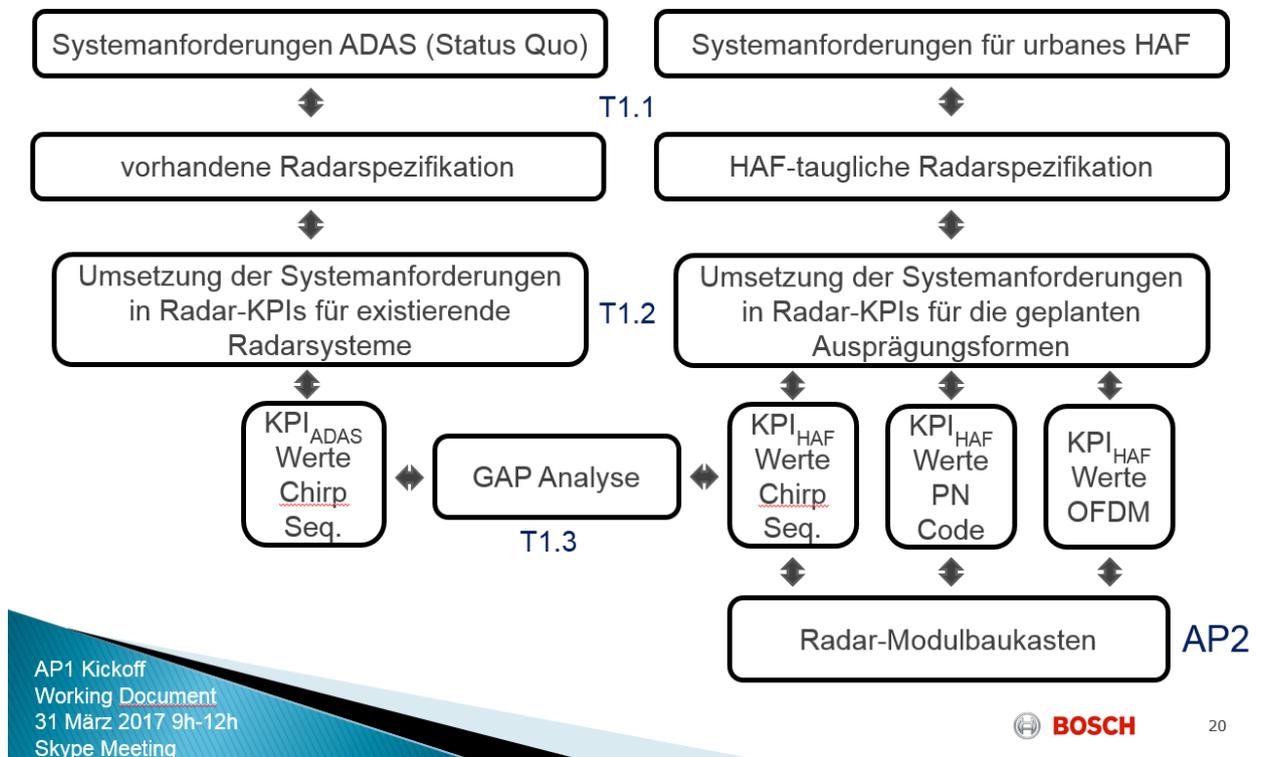


Abbildung 2: Durchführungsplan für AP1

Für PN und OFDM Radarsystemkonzepte wurde, abgeleitet von den CS TDM KPIs für HAF die entsprechenden Spezifikationen ebenfalls entwickelt, wobei auf eine Nachformulierung für ADAS-taugliche PN und OFDM Radare verzichtet wurde.

Die KPI-Werte für urbanes HAF der drei ausgewählten Modulationsformen fließen zur Dimensionierung und Auslegung der einzelnen Komponenten in den Radar-Modulbaukasten von AP2 ein. Durch die entsprechende Beschreibung der Modulationsformen auf oberster Systemebene ist eine Identifizierung und Zuordnung von identischen oder baugleichen Modulkomponenten sehr einfach möglich, wie in der Abbildung 3 bis Abbildung 5 zu erkennen ist.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

➤ TDM Chirp-Sequence Radar MIMO (single)

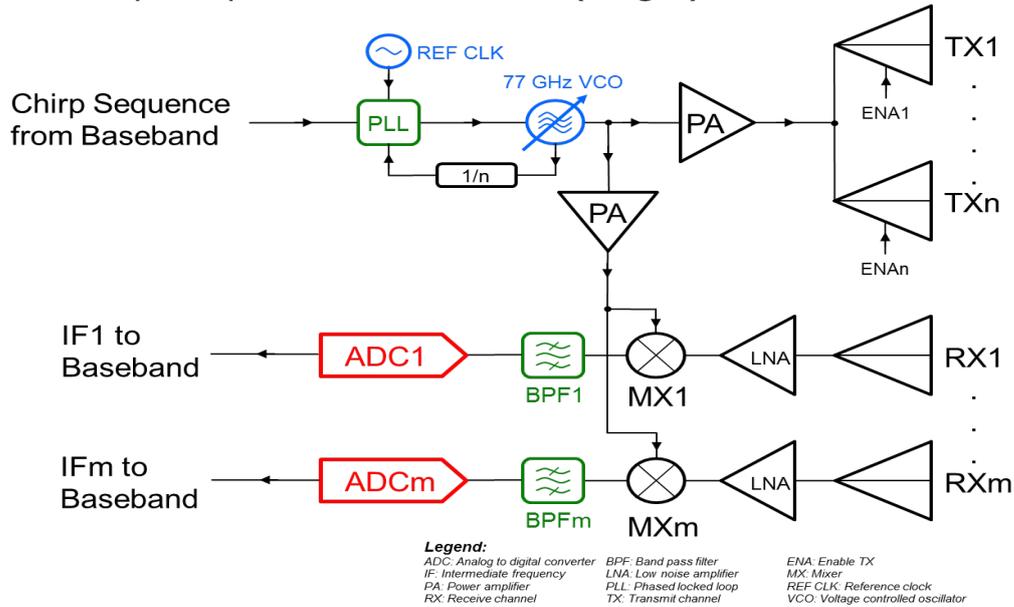


Abbildung 3: Blockschaltbild des CS TDM Modulationskonzepts

➤ Pseudo-Noise Radar

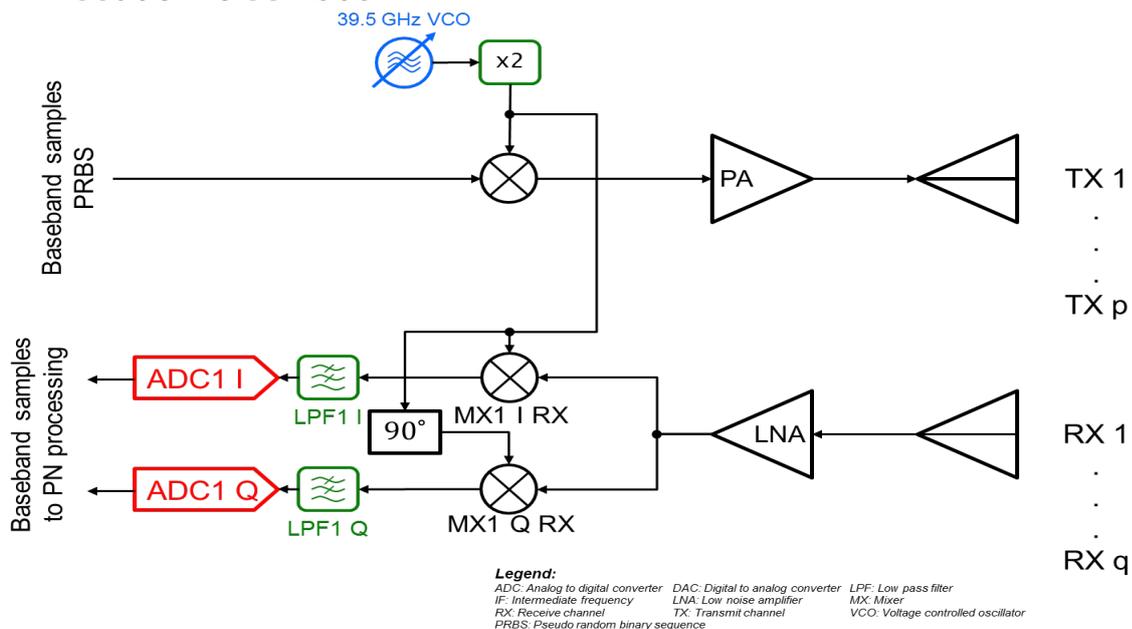


Abbildung 4: Blockschaltbild des PN Modulationskonzepts

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

➤ OFDM Radar

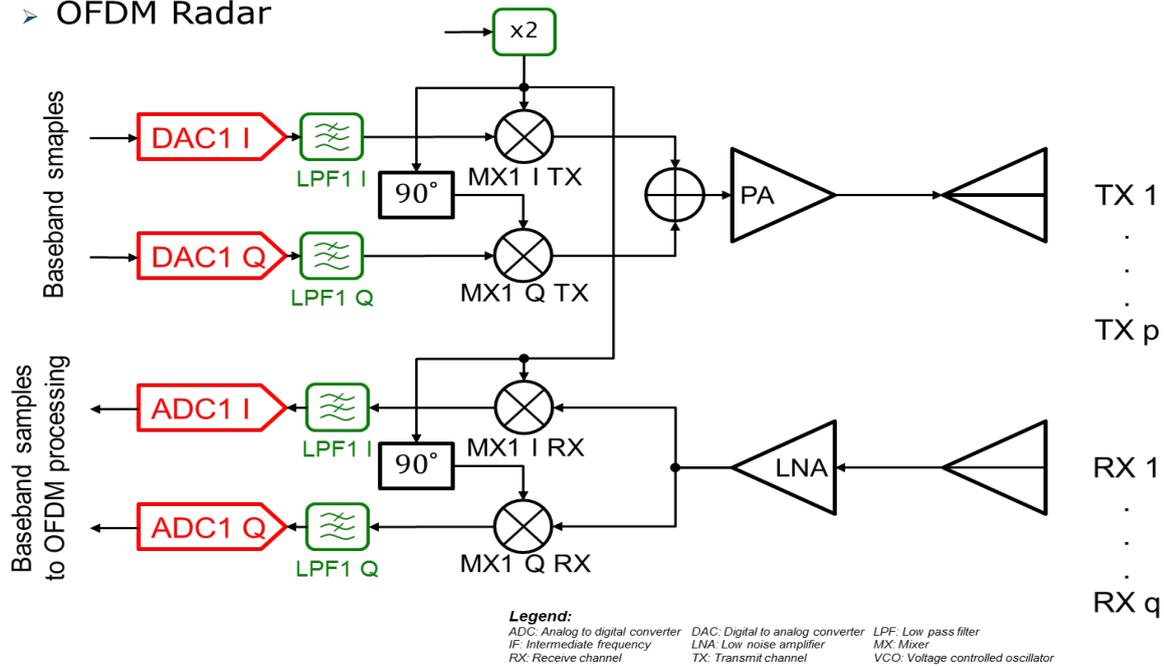


Abbildung 5: Blockschaltbild des OFDM Modulationskonzepts

Für jedes der drei untersuchten Modulationskonzepte wurden die grundlegenden physikalischen und systemtheoretischen Zusammenhänge erarbeitet und dokumentiert. Damit ist eine bessere Charakterisierung und Parametrisierung der Komponenten des Modulbaukastens möglich. In Abbildung 6 sind die Grundzusammenhänge für das Chirp-Sequence TDM Modulationskonzept formuliert.

➤ TDM Chirp-Sequence Radar - Grundzusammenhänge

$B$ :	Modulation Bandwidth	$ v_r^{\max}  \leq \frac{c_0}{4 \cdot f_c \cdot T_{RRi}} = \Delta v_r \cdot \frac{K}{2}$
$f_c$ :	Center Frequency	
$f_{R_{\max}}$ :	Maximum IF Range Frequency	
$T_{meas}$ :	Measurement Time	
$T_{chirp}$ :	Single Chirp Time	
$T_{RRi}$ :	Chirp Repetition Time	$R_r^{\max} \leq \frac{f_{R_{\max}} \cdot T_{chirp} \cdot c_0}{2 \cdot B} = \frac{N_{FFT} \cdot c_0}{4 \cdot B} = \frac{N_{FFT}}{2} \cdot \Delta R_r$
$K$ :	Number of Chirps	
$N_{FFT}$ :	Number of points-first FFT	
$\Delta R_r$ :	radial Range accuracy	$\Delta v_r \geq \frac{c_0}{2 \cdot f_c \cdot T_{meas}} = \frac{c_0}{2 \cdot f_c \cdot K \cdot T_{RRi}}$
$\Delta v_r$ :	radial Speed accuracy	
$R_r^{\max}$ :	Maximum radial Range	
$v_r^{\max}$ :	Maximum radial Speed	
$c_0$ :	Speed of Light	$\Delta R_r \geq \frac{c_0}{2 \cdot B}$

Abbildung 6: Mathematische Zusammenhänge der KPIs für CS TDM Modulation

Von  
 CC/PJ-RAD

 Bearbeiter  
 Martin Kunert

 Telefon  
 +49 711 811-37468

 Leonberg  
 23.09.2020

 Bericht  
 Ausgabe      Version 1.0  
 Thema        Radar4FAD Abschlussbericht

Die entsprechenden KPIs für das CS TDM Modulationsverfahren sind in Abbildung 7 für ADAS und HAF Systemauslegung aufgelistet und der entsprechende GAP-Faktor (i.e. der wertemäßige Unterschied des entsprechenden KPIs zwischen ADAS und HAF) ausgewiesen. In Abbildung 8 sind für PN und OFDM die entsprechenden KPI-Werte angegeben. Diesmal jedoch nur für die HAF Systemanforderungen und ohne den GAP-Faktor, da es bisher noch keine PN oder OFDM basierte Radarsysteme für ADAS auf dem Markt gibt.

Symbol	Parameter	State of the Art	HAF	GAP factor
$f_c$	Center frequency	76,5 GHz	79 GHz	-
$K$	Num. of chirps	256	1024	4
$ADC_{freq}$	ADC sampling frequency	10 MHz	100 MHz	10
$ADC_{bit}$	ADC number of bits	12 bit	14 bit	1,16
$B$	Total chirp sequence bandwidth	0.3 GHz	1.5 GHz	5
$T_{chirp}$	Single chirp duration	50 $\mu$ s	20 $\mu$ s	:2,5
$FFT_{Range}$	FFT size for Range	512	2048	4
$FFT_{RangeDoppler}$	FFT size for RangeDoppler	512	2048	4
$T_{meas}$	Total measurement duration	12,8 ms	20,48 ms	1,6
$\Delta R_r$	Radial range resolution	0,5 m	0,1 m	:5
$\Delta v_r$	Radial velocity resolution	0,2 m/s	0,1 m/s	:2
$R_r^{max}$	Max. radial unambiguous range	250 m	250 m	1
$V_r^{max}$	Max. radial unambiguous velocity	$\pm 70$ m/s	$\pm 80$ m/s	1,14
$G_p$	Processing gain	54 dB	66 dB	15,85

**Abbildung 7: KPIs für CS TDM Modulationsverfahren für ADAS, HAF und entsprechender GAP-Faktor**

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe      Version 1.0  
Thema         Radar4FAD Abschlussbericht

**PN Modulation**

Symbol	Parameter	State of the Art	HAF	GAP factor
$f_c$	Center frequency	n.a. <sup>1)</sup>	79 GHz	- <sup>1)</sup>
$ADC_{digital}$	ADC digital-sampling	n.a.	1,5 GHz IQ	-
$ADC_{bit}$	Digital ADC number of bits (digital)	n.a.	10 bit	-
$ADC_{freq}$	ADC sampling frequency	n.a.	100 MHz	-
$ADC_{bit\_digital}$	ADC number of bits (analog)	n.a.	~10 bit	-
$B$	Total PN sequence bandwidth	n.a.	1,5 GHz	-
$T_{s2s}$	Time sequence to sequence	n.a.	20 $\mu$ s	-
$T_{meas}$	Total frame duration	n.a.	20 ms	-
$\Delta R_r$	Radial range resolution	n.a.	0,1 m	-
$\Delta V_r$	Radial velocity resolution	n.a.	0,1 m/s	-
$R_r^{max}$	Max. radial unambiguous range	n.a.	250 m	-
$V_r^{max}$	Max. radial unambiguous velocity	n.a.	$\pm 80$ m/s	-
$G_p$	Processing gain	n.a.	78 dB	-

<sup>1)</sup>no product on market  
 $ADC_{digital}$  => correlation implemented in SW algorithms  
 $ADC_{freq}$  => hardware-correlator on chip

**OFDM Modulation**

Symbol	Parameter	State of the Art	HAF	GAP factor
$f_c$	Carrier frequency	n.a. <sup>1)</sup>	79 GHz	- <sup>1)</sup>
$N$	Num. of subcarriers	n.a.	2048	-
$\Delta f_c$	Subcarrier spacing	n.a.	488 kHz	-
$B$	Total signal bandwidth	n.a.	1 GHz	-
$f_{ADC}$	Analog/Digital IQ sampling frequency	n.a.	1,5 GHz	-
$ADC_{bit}$	ADC number of bits	n.a.	~10 bit	-
$T_0$	Elementary symbol duration	n.a.	2,0 $\mu$ s	-
$T_{cp} = T_{guard}$	Cyclic Prefix duration	n.a.	0,5 $\mu$ s	-
$M$	Num. of OFDM symbols	n.a.	4096	-
$P$	Num. Of parallel Tx channels	n.a.	4	-
$T_{obs} = T_{frame}$	Total frame duration (observation time)	n.a.	10,5 ms	-
$\Delta R_r$	Radial range resolution	n.a.	0,15 m	-
$\Delta V_r$	Radial velocity resolution	n.a.	0,18 m/s	-
$R_r^{max}$	Max. radial unambiguous range	n.a.	75 m (@4 Tx)	-
$V_r^{max}$	Max. radial unambiguous velocity	n.a.	$\pm 370$ m/s	-
$V_r^{max}$	Max. radial velocity due to subcarrier spacing	n.a.	$\pm 90$ m/s	-
$G_p$	Processing gain	n.a.	69 dB	-

**Abbildung 8: KPIs für PN und OFDM Modulationsverfahren für HAF Anforderungen**

Eine Zusammenfassung des Einflusses der relevanten Stellgrößen ist für die betrachteten Modulationsverfahren in Abbildung 9 zu sehen. Die Anforderungen bezüglich Hardwareaufwand und Rechenleistung steigen dabei von links nach rechts stetig an. Die vollständig digitale OFDM Modulation mit dem höchsten Gesamtaufwand ist dabei in der Lage, sämtliche andere Modulationsverfahren zu emulieren, was diese zu einem Universaltool für Benchmarking und Funktionstests befähigt. Ob der hohe zusätzliche Hardwareeinsatz sich auch (in gleichem Maße) auf die Leistungsfähigkeit des OFDM Systems niederschlägt, wurde planungsgemäß im Projektverlauf eingehender beleuchtet und analysiert.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

	CS-TDM	CS-FDM	PN analog	PN digital	OFDM
I/Q receiver	no	no	yes	yes	yes
fast slope PLL	yes	yes	no	no	no
fast DACs	no	no	no	no	yes
fast ADCs	100 MHz	100 MHz	100 MHz	1,5 GHz	1,5 GHz
ADC bits	14 bit	14 bit	10 bit	10 bit	10 bit
measurement cycle	20,48 ms	20.48 ms	20 ms	20 ms	10,5 ms
memory storage per RX and cycle	~ 28,67 Mbit	none => parallel FPGA processing	~ 2 Mbit	~ 60 Mbit (I/Q channel)	~ 31,5 Mbit (I/Q channel)
calculation power per RX and cycle	2048 + 2048 FFTs	(2048+2048)*TX FFTs	4096 Integrations 4096 FFTs (Doppler)	4096 Correlations 4096 FFTs (Doppler)	4096 *(complex Div, FFT, IFFT)
performance index	low	medium	low	high	high
interference robustness	medium	medium	medium	medium	high
overall rating	+	++	+	+	++

**Abbildung 9: GAP Analyse - Einfluss und Abhängigkeit der Stellgrößen**

In der Task1.3 wurden neben der GAP Analyse auch noch Partitionierungsvorschläge für die Sensorsystemarchitektur mittels einer funktionalen Analyse der Hauptanforderungen erarbeitet, die insbesondere bei der ASIL Auslegung von Einzelmodulen bis hin zum Gesamtsystem von Bedeutung sind. Der Zwiespalt zwischen zentraler und dezentraler Datenverarbeitung und Chipintegration konnte, wie in Abbildung 10 zu erkennen, sehr gut aufgezeigt werden. Eine universelle, allgemeingültige Lösung dieses Konflikts war erwartungsgemäß jedoch nicht zu finden.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

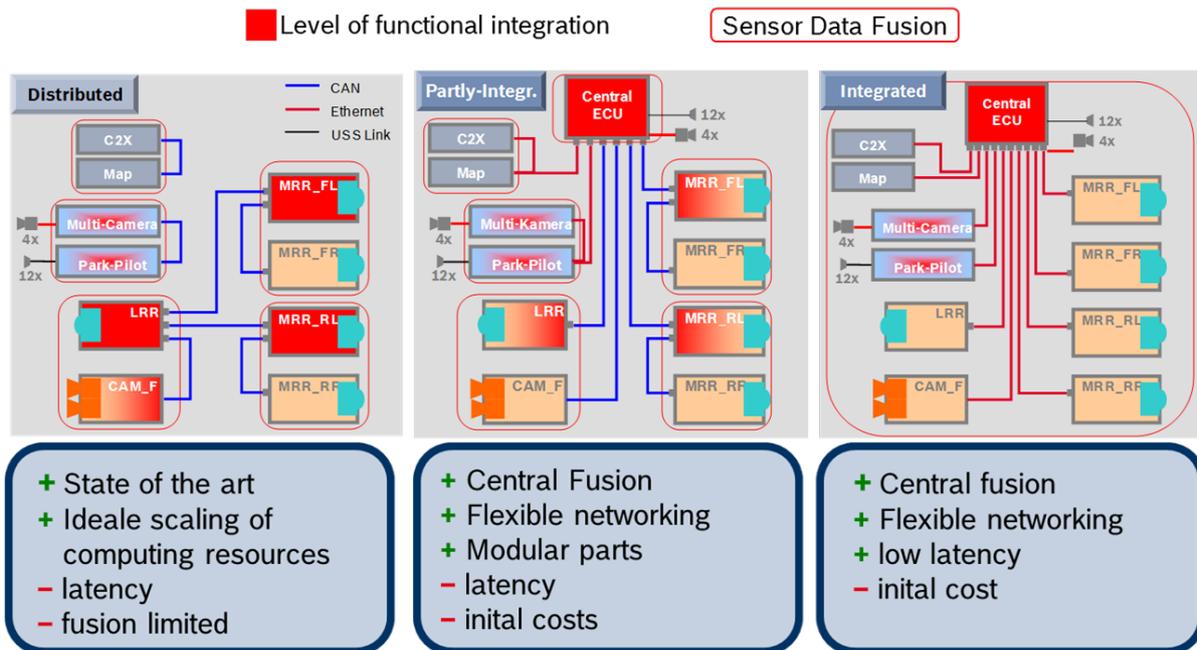


Abbildung 10: Partitionierungskonzepte für HW-Architekturen

Vielmehr wird sich fast immer, abhängig von den vorherrschenden Randbedingungen und Vorgaben, ein Verschnitt aus völlig verteiltem und komplett zentralisierten Architekturen ergeben. Dies wird sofort deutlich, wenn man die zur Erreichung von ASIL D nutzbringende ASIL Dekomposition für E/E Architekturen zu Hilfe nimmt, die durch redundantes, paralleles Aufspalten in Subsysteme mit niedrigerer ASIL Stufe (z.B. 2-mal ASIL B) für das übergeordnete Modul dann eine höhere ASIL Stufe (z.B. hier dann ASIL C) erreichen kann. Dieses ASIL „Zerlegungskonzept“ ist für ein Radar, bestehend aus MMIC-FrontEnd und Signalverarbeitungseinheit (SPU), in Abbildung 11 beispielhaft dargestellt.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

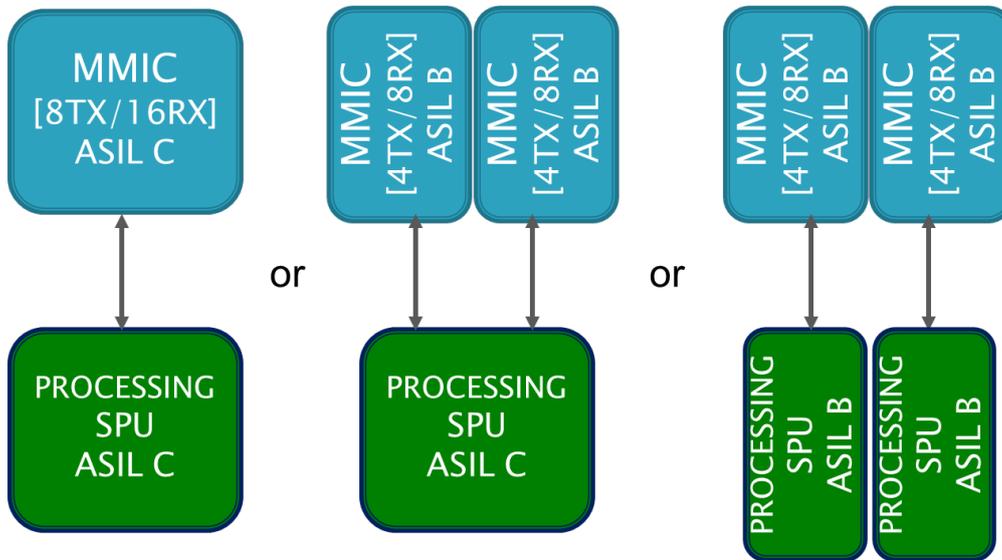


Abbildung 11: ASIL Dekomposition für Radar Frontend und SPU (Signal Processing Unit) zur Reduzierung des ASIL Levels mittels Parallelisierung

Die über die E/E Architektur hinausgehenden, bisher noch nicht regulierten bzw. normierten ASIL Anforderungen hinsichtlich Störungen oder Systemfehlerverhalten wurden wegen der Komplexität der Aufgabe nur peripher adressiert und dokumentiert (siehe Abbildung 12).

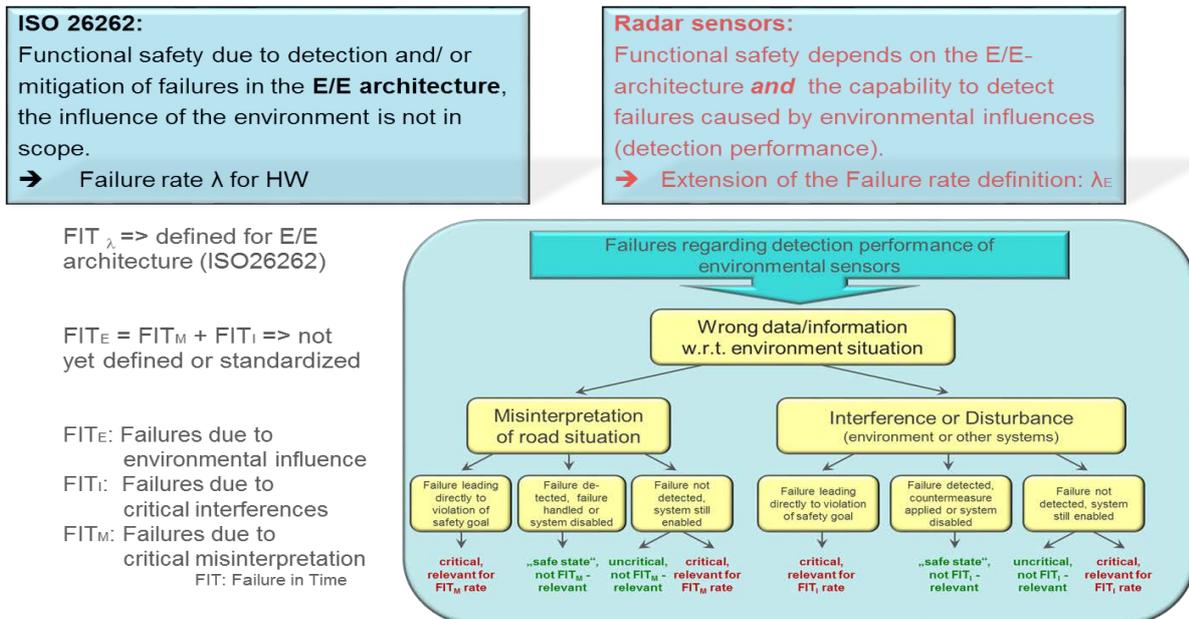


Abbildung 12: Bisher noch nicht regulierte ASIL Anforderungen, die für HAF von Relevanz sind

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

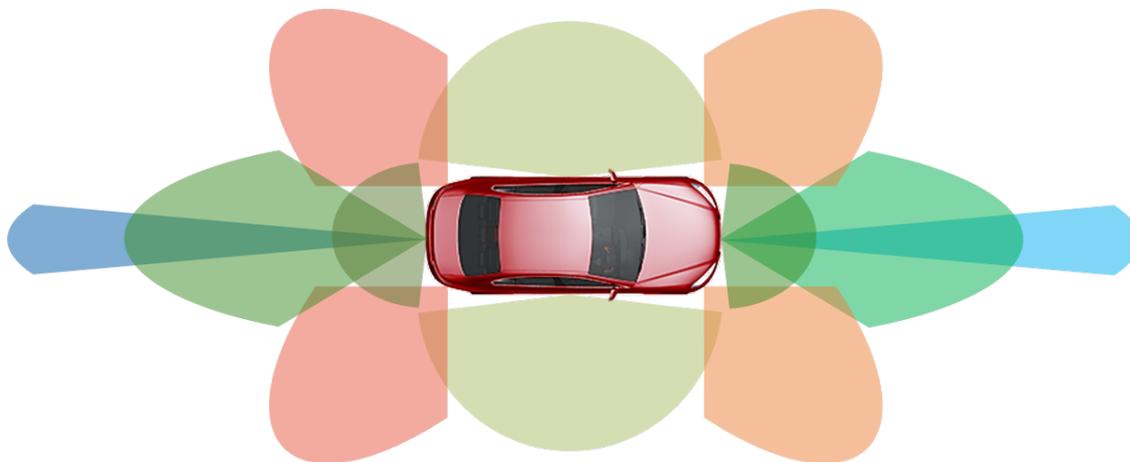
Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Die in Abbildung 12 adressierten Herausforderungen werden als SOTIF (Safety of intended functionality) bezeichnet und in einer internationalen ISO Arbeitsgruppe (ISO/WD PAS 21448) in größerem Rahmen vollumfänglich bearbeitet (in ähnlicher Vorgehensweise wie die ASIL Arbeitsgruppe ISO 26262 vor mehreren Jahren gestartet ist).

Im Verlauf der Arbeiten zu AP1 konnte beim Vergleich der Modulationsverfahren festgestellt und validiert werden, dass die erzielbare Winkelauflösung unabhängig von den anderen KPIs lediglich von der effektiven Antennenapertur abhängt, die sich aus der Anzahl der verwendeten Sende- und Empfangskanäle ergibt. Damit kann dieser, für den Anwendungsfall sehr wichtige KPI Parameter, beim Vergleich und Benchmark der untersuchten Modulationsverfahren außer Acht gelassen werden, was eine deutliche Vereinfachung bei den Vergleichsmessungen und Testreihen mit sich bringt.

Die Ableitung der notwendigen Radar-KPIs aus den Systemanforderungen für das hochautomatisierte Fahren (HAF) wurde anhand des Schaubilds in Abbildung 13 vorgenommen.



**Anmerkung:**  
Sektoraufteilung ist willkürlich und keineswegs Implementierungsvorschrift für die verwendeten Umfeld-Sensoren

FF: Front Fern  
HF: Heck Fern  
FEL: Front Ecke Links  
HEL: Heck Ecke Links  
SL: Seite Links

FM: Front Mitte  
HM: Heck Mitte  
FER: Front Ecke Rechts  
HER: Heck Ecke Rechts  
SR: Seite Rechts

FN: Front Nah  
HN: Heck Nah

**Abbildung 13: Perzeptionsanforderungen für urbanes hochautomatisiertes Fahren (uHAF) – Sektoraufteilung am Fahrzeug mit mehreren Zonen**

Von  
 CC/PJ-RAD

 Bearbeiter  
 Martin Kunert

 Telefon  
 +49 711 811-37468

 Leonberg  
 23.09.2020

 Bericht  
 Ausgabe      Version 1.0  
 Thema        Radar4FAD Abschlussbericht

Für jeden der markierten Sektoren wurden die entsprechenden funktionalen Anforderungen definiert und wie beispielhaft für den Bereich Front Fern ( FF) in Abbildung 14 dokumentiert.

Perzeptionswert	min.	typ.	max.	Einheit
Maximaler Detektionsbereich in radialer Richtung <sup>1)</sup>	150	200	300	m
Minimaler Detektionsbereich in radialer Richtung	0,2	0,5	1,0	m
Öffnungswinkel für Beobachtungszone (Azimuth)	± 10	± 15	± 20	Grad
Öffnungswinkel für Beobachtungszone (Elevation)	± 5	± 7,5	± 10	Grad
Eindeutigkeitsbereich für radiale Entfernung	200	250	350	m
Eindeutigkeitsbereich für radiale Geschwindigkeit	±50	±70	±80	m/s
Auflösung für radiale Entfernung	0,1	0,2	0,5	m
Auflösung für radiale Geschwindigkeit	0,1	0,2	0,5	m/s
Trennfähigkeit für radiale Entfernung <sup>2)</sup>	0,3	0,6	1,5	m
Trennfähigkeit für radiale Geschwindigkeit <sup>2)</sup>	0,3	0,6	1,5	m/s
Winkelauflösung in Azimuth	0,5	1,0	2,0	Grad
Winkelauflösung in Elevation	1,0	2,0	4,0	Grad
Winkeltrennfähigkeit zweier Objekte (Azimuth) <sup>3)</sup>	1,0	2,0	4,0	Grad
Winkeltrennfähigkeit zweier Objekte (Elevation) <sup>3)</sup>	2,0	4,0	8,0	Grad
Anzahl der detektierbaren Objekte	100	400	10000	Stk.
Neue Objekt-Erfassungszeit	100	200	300	ms
Messzykluszeit	10	50	100	ms
Robustheit	A	B	C	ASIL
Abmessungen (Länge x Breite x Tiefe)	0,06x0,08x0,03	0,1x0,1x0,05	0,2x0,2x0,1	m

<sup>1)</sup>Für RCS=10 dBsqm    <sup>2)</sup>Trennfähigkeit ~ 3x Auflösung    <sup>3)</sup>Winkeltrennfähigkeit ~ 2x Winkelauflösung

**Abbildung 14: Definition der Perzeptionswerte für den Sektorbereich Front Fern (FF)**

In Abbildung 15 sind die allgemeinen Betriebsanforderungen an Automobilradare rudimentär spezifiziert. Die tatsächlichen Anforderungen an ein Serienprodukt sind wesentlich ausführlicher und detaillierter beschrieben und umfassen eine Vielzahl von technischen Normen und Prüfvorschriften.

Bei der Auslegung eines Automobilradars sind neben den reinen Performance-Parametern auch die generellen Betriebsanforderungen zu berücksichtigen. Diese können sowohl im Einklang mit den KPI-Anforderungen stehen oder diesen auch widersprechen. Eine globale Optimierung über alle Anforderungen, seien es die auf Leistung oder die auf funktionale Integrität hin gemünzten Anforderungen, sind daher stets anzustreben und gegebenenfalls mit fairen und ausbalancierten Kompromissen zu implementieren.

Für die zukünftigen Radarsysteme wird eine Anbindung an Cloud-Services (z.B. via 5G) und OTA (Over The Air) Systemupdates eine immer zentralere Rolle einnehmen.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Perzeptionswert	min.	typ.	max.	Einheit
Betriebsspannung	12	13,6	15	V
Leistungsaufnahme	1	5	10	W
Betriebstemperaturbereich	-40	+20	+125	Grad Celsius
Lagertemperaturbereich	-40	+15	+150	Grad Celsius
Load Dump	40	60	80	V
EMV Störfestigkeit (EN 61000-6-1)	100	150	200	V/m
Dichtheitsanforderungen		IP68		
Vibration (IEC 60068-2-6) • Anregungsart • Beschleunigung (rms) • Frequenzbereich • Dauer		Rauschen 55 10-500 je 24 Std. pro Raumachse		- m/s <sup>2</sup> Hz h
Mechanischer Schock (IEC 60068-2-27) • Anregungsart • Beschleunigung • Dauer (Einzelschock)		Halbsinus 300 6		- m/s <sup>2</sup> ms
Einbauhöhe (Pkw)	0,15	0,5	1,8	m
Einbauhöhe (Lkw)	0,3	1,0	3,8	m
Wetterbedingungen		allwetter- tauglich		
Lichtverhältnisse		Tag und Nacht		
Robustheit Gesamtsystem (ASIL Level)	B	C	D	ASIL
Störfestigkeit / Interferenz		ASIL equivalent		

**Abbildung 15: Allgemeine Betriebsanforderungen an Automobilradare**

**2.1.2 AP2 - Gesamtkonzept und Systemarchitektur des modularen Radarmodulbaukastens & AP3 - Modulkomponenten: RF-Frontend, Basisband-Implementierung, Antennenkonfigurationen**

In AP2 und AP3 wurde der universelle Radarmodulbaukasten bezüglich Definition und Design entworfen. Der stark ungleiche Entwicklungsstand zwischen den Chirp-Sequence und den PN bzw. OFDM Systemkonzepten führte zu einer Aufteilung der geplanten Radardemonstratoren in zwei unterschiedliche Stufen.

In einer ersten Stufe wurden alle drei Modulationsformen auf einem gemeinsamen FPGA-basierten Prototypenframework mit geringer Kanalzahl (max. 2 TX Sendekanäle und 2 RX Empfangskanäle) implementiert. Die verschiedenen Frontends kommen dabei für die PN-Modulation vom IHP und für die OFDM Modulation von der Ruhr-Universität Bochum (RUB). Der gemeinsame FPGA –Framework, bestehend aus SPU (ein Xilinx Zync FPGA) und ADC bzw. DAC Mezzanine-Boards, wird vom IMST und von der Infineon AG realisiert.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Nach erfolgreicher Realisierung und Inbetriebnahme der PN und OFDM Radar-Frontends wurde dann eine Portierung auf den Demonstrator der Stufe 2 mit mehreren Sende- und Empfangskanälen durchgeführt. Durch die bereits stattgefundene Standardisierung der Schnittstellen zwischen den verschiedenen Frontend Modulen war der Transfer auf den Demonstrator der Stufe 2 wesentlich einfacher zu gestalten und umzusetzen.

Von den in radar4FAD im Konsortium entwickelten Demonstratoren lagen die Bosch Aktivitäten auf den DEM#2a&b Demonstratoren (siehe Abbildung 16).

Identifizier	DEM#1a	DEM#1b	DEM#2a	DEM#2b	DEM#3	DEM#4
<b>Picture</b>  <small>Source: Ruhr University Bochum Robert Bosch GmbH</small>					Virtual Prototype	
<b>Responsible</b>	IMST&KIT&RUB	Univ. Ulm & IHP	Bosch	Bosch & RUB	all	Infineon
<b>Baseband-HW</b>	Xilinx Zync MPSoC ZU9EG	Xilinx Ultrascale RFSoc ZCU111	Xilinx Zync MPSoC ZU9EG	Xilinx Zync MPSoC ZU9EG	FPGA or ASIC	Aurix 2G evo
<b>Antenna concept</b>	MIMO (I/Q) 2TX/2RX	MIMO (I/Q) 4TX/4RX	MIMO (I) 4TX/16RX	MIMO (I/Q) 4TX/4RX	MIMO t.b.d.	MIMO (I) 3TX/4RX
<b>Modulation</b>	OFDM,PN,FCS	OFDM,PN,FCS	FCS	OFDM,PN,FCS	All Digital	FCS
<b>ADC &amp; DAC</b>	1 Gsps / 1 Gsps	4 Gsps / 6 Gsps	250 Msps / nop	1 Gsps / 1 Gsps	t.b.d.	50 Msps / nop
<b>MMIC-Chipset</b>	RUB SiGe 130nm	IHP SiGe130nm	IFX SiGe 130nm	RUB SiGe 130nm	SiGe/RFCMOS	RXS8160PL
<b>Framework</b>	PC in lab	PC in lab	Linux/ROS in car	Linux/ROS in lab	no realization	PC in lab

ASIC: Application Specific IC FCS: Fast Chirp Sequence FPGA: Field Programmable Gate Array MIMO: Multiple Input Multiple Output OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
PN: Pseudo Noise RX: Receive Channel SiGe: Silicon Germanium SoC: System on Chip sps: samples per second TX: Transmit Channel

**Abbildung 16: Übersicht der radar4FAD Demonstratoren (Bosch Fokus ist rot markiert)**

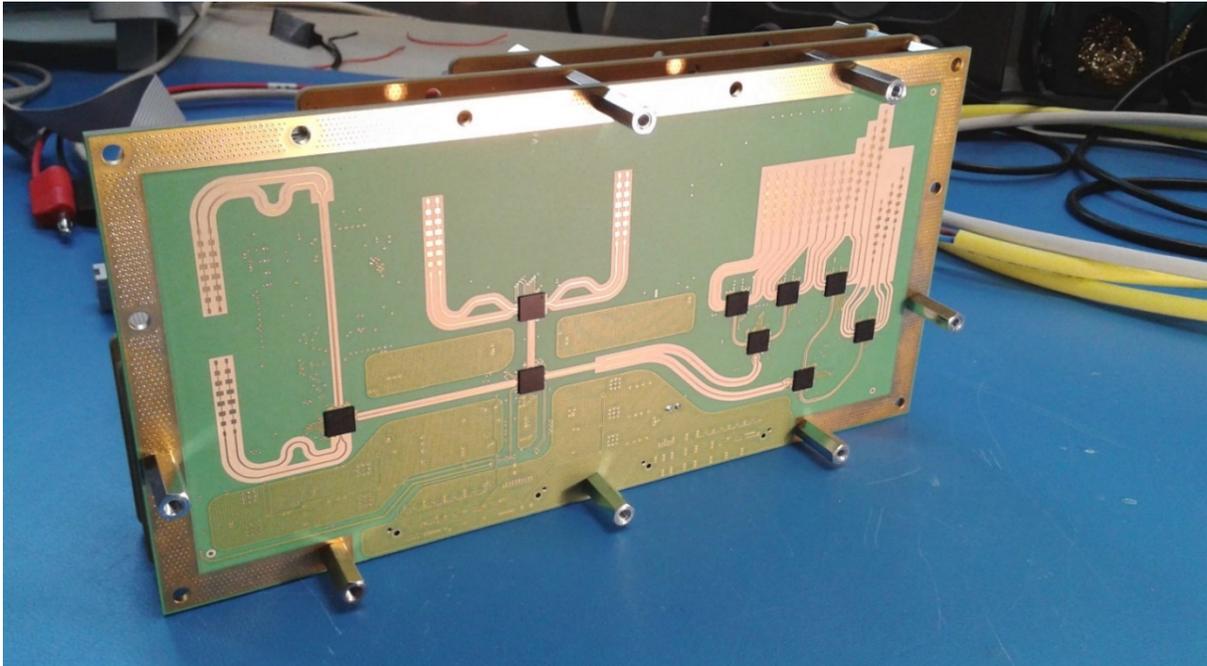
Der Fokus der Robert Bosch GmbH lag zu Projektbeginn auf dem bereits gut entwickelten Fast Chirp-Sequence TDM Modulationsverfahren. Das realisierte Frontend mit 4 TX und 16 RX Kanälen wurde entworfen und der SPU-Teil mit einem zu den Demonstratoren der Stufe 1 (i.e. DEM#1a und DEM#1b) baugleichen Xilinx Zync FPGA realisiert (siehe Abbildung 17).

Von  
 CC/PJ-RAD

 Bearbeiter  
 Martin Kunert

 Telefon  
 +49 711 811-37468

 Leonberg  
 23.09.2020

 Bericht  
 Ausgabe      Version 1.0  
 Thema        Radar4FAD Abschlussbericht


**Abbildung 17: FCS TDM Frontend mit 4 TX und 16 RX für ein HAF-taugliches, bildgebendes Radar**

Mithilfe dieses geschickt entworfenen Betriebskonzeptes war es dann möglich, die Demonstratoren der Stufe 1 in einem fairen und ausgewogenen Vergleich und Benchmark über alle betrachteten Modulationsarten zu betreiben und dann später die Konzepte und Module des radar4FAD Baukastens nach einer ausgiebigen Testphase auf das FCS TDM Frontend der Stufe2 zu portieren.

In Abbildung 19 ist die zum Frontend aus Abbildung 17 zugehörige Basisbandplatine dargestellt. Über zwei 80-polige SAMTEC Stecker (in der Mitte unten zu erkennen) werden alle notwendigen Signale, Versorgungsspannungen und Steuerleitungen von der Basisbandplatine zum Frontend geführt.

Die Rückseite der Basisbandplatine zeigt die Abbildung 20. Diese ist von der entgegengesetzten Seite des als Rahmenträger konstruierten Gehäuses erreichbar. Den Verbau des Xilinx Zync MPSoC Moduls zeigt die Abbildung 18.

**Abbildung 18: Montiertes Zync MPSoC Modul auf der Basisbandplatine**



Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

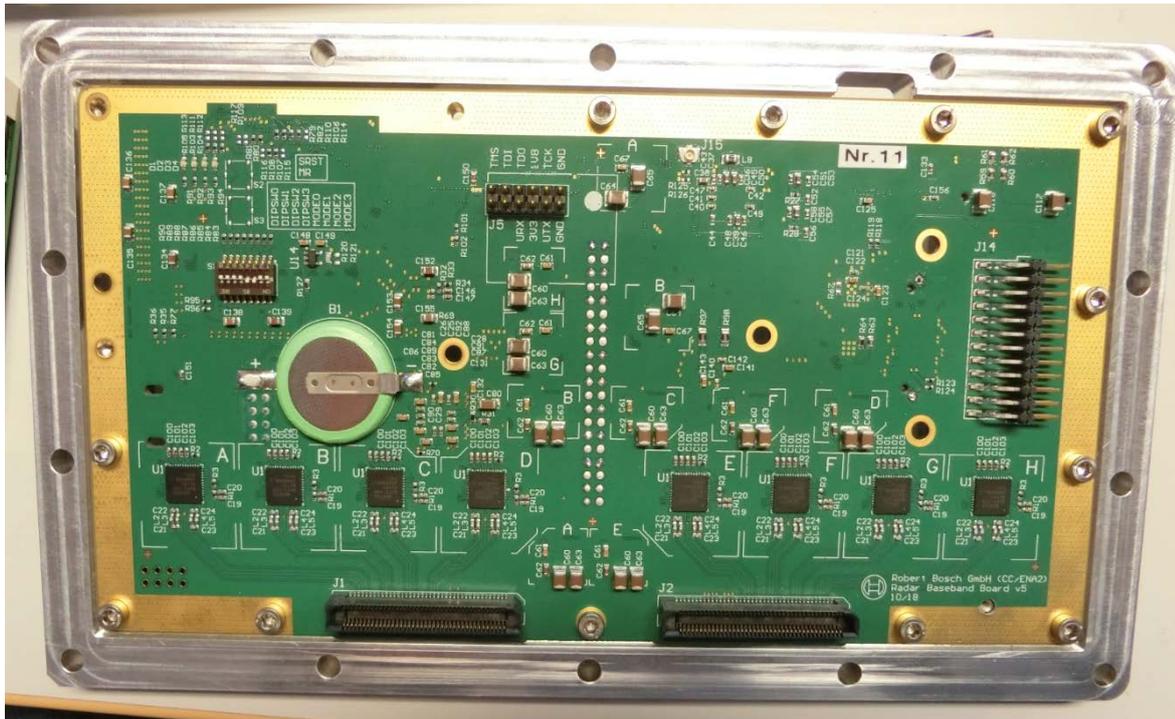


Abbildung 19: FCS TDM Basisband Board (im Gehäuse montiert)

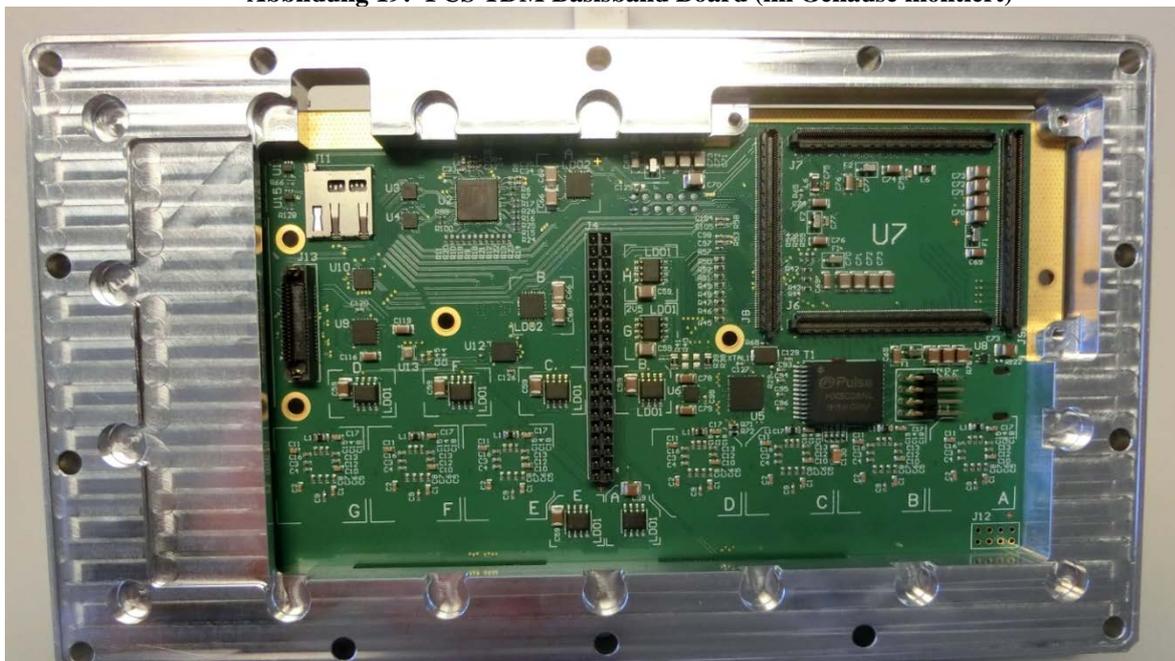


Abbildung 20: Rückseite der Basisbandplatine mit Aufnahmesockel für den Zynq MPSoC von Xilinx (U7)

Von  
CC/PJ-RAD

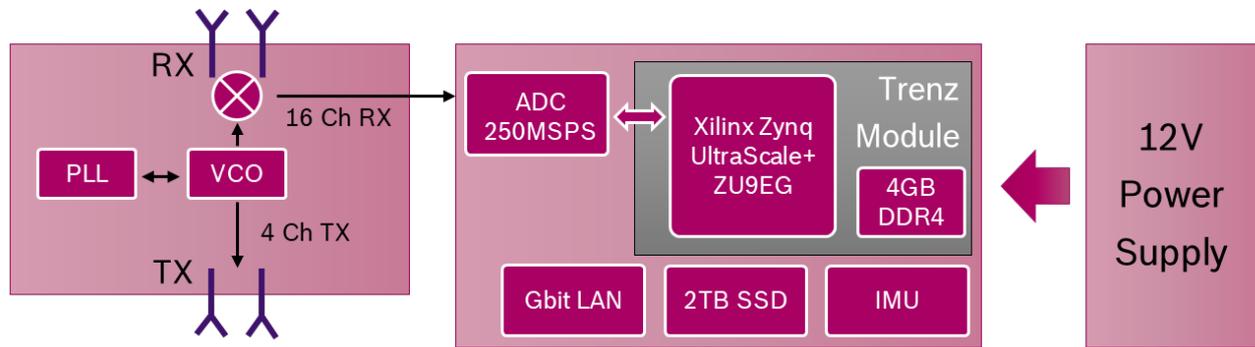
Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

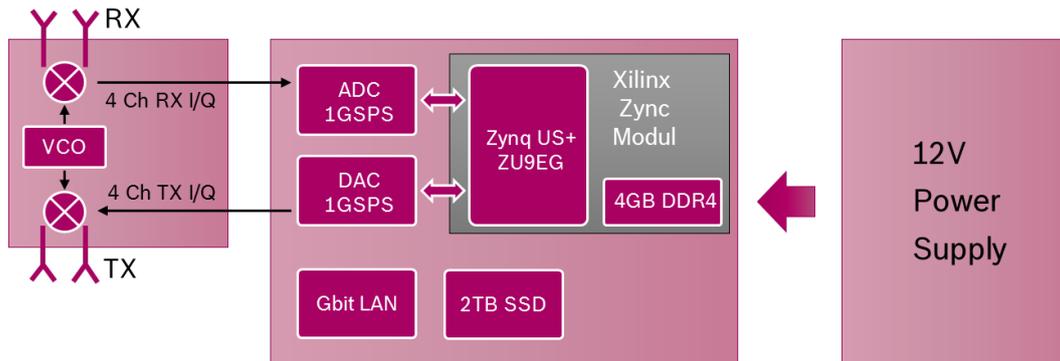
Das generische Blockschaltbild des FCS TDM Radars (DEM#2a) ist in Abbildung 21 dargestellt.



IMU: Inertial measurement unit    PLL: Phase-locked loop    VCO: Voltage-controlled oscillator    ADC: Analog-to-digital converter

**Abbildung 21: Blockschaltbild des FCS TDM Radars (DEM#2a)**

In der zweiten Hälfte des radar4FAD Projektes zeichnete sich bereits ab, dass die Prototypen DEM#1a und DEM#1b mit ihren dazugehörigen MMICs ausreichend gute Performanz erzielten, sodass zusammen mit der Ruhr Universität Bochum ein weiterer „Kür“-Demonstrator in Angriff genommen wurde, der die Bezeichnung DEM#2b hat und als ADR (All Digital Radar) bezeichnet wird. Mit diesem ADR Radar können beliebige Modulationsarten, angefangen von slow FMCW über FCS TDM oder FDM bis hin zu den digitalen Modulationsformen PN oder OFDM, erzeugt werden. Das Blockschaltbild ist in Abbildung 22 skizziert.



**Abbildung 22: Blockschaltbild des ADR Radars (DEM#2b)**

Bei dem ADR Radar sind Prinzip bedingt die Sende- und Empfangskanäle komplex mit I/Q (In-Phase und Quadratur) Signalpfaden versehen. Auf der Basisbandplatine sind die 250 Msp/s

Von  
CC/PJ-RADBearbeiter  
Martin KunertTelefon  
+49 711 811-37468Leonberg  
23.09.2020Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

ADC Wandler durch 1 Gbps Versionen ersetzt. Anstelle einer PLL wird die komplexe Modulation mit je zwei 1Gbps DAC Wandler pro Sendekanal realisiert. In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind die Basisbandplatine und das Frontend des ADR Radars (DEM#2b) abgebildet.

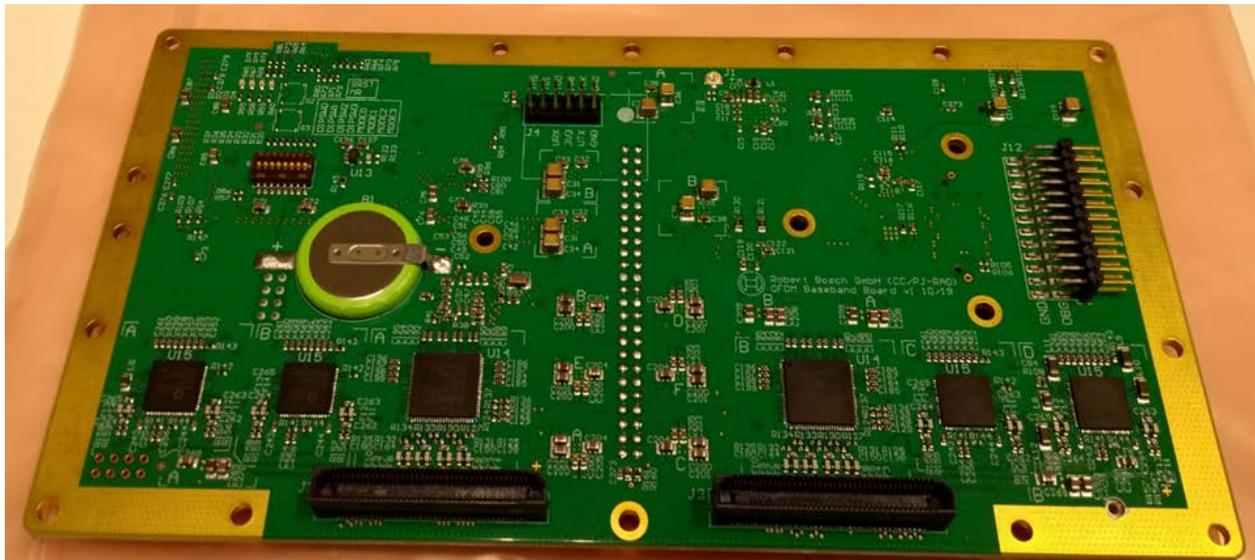


Abbildung 23: Basisbandplatine des ADR Radars (Dem#2b)

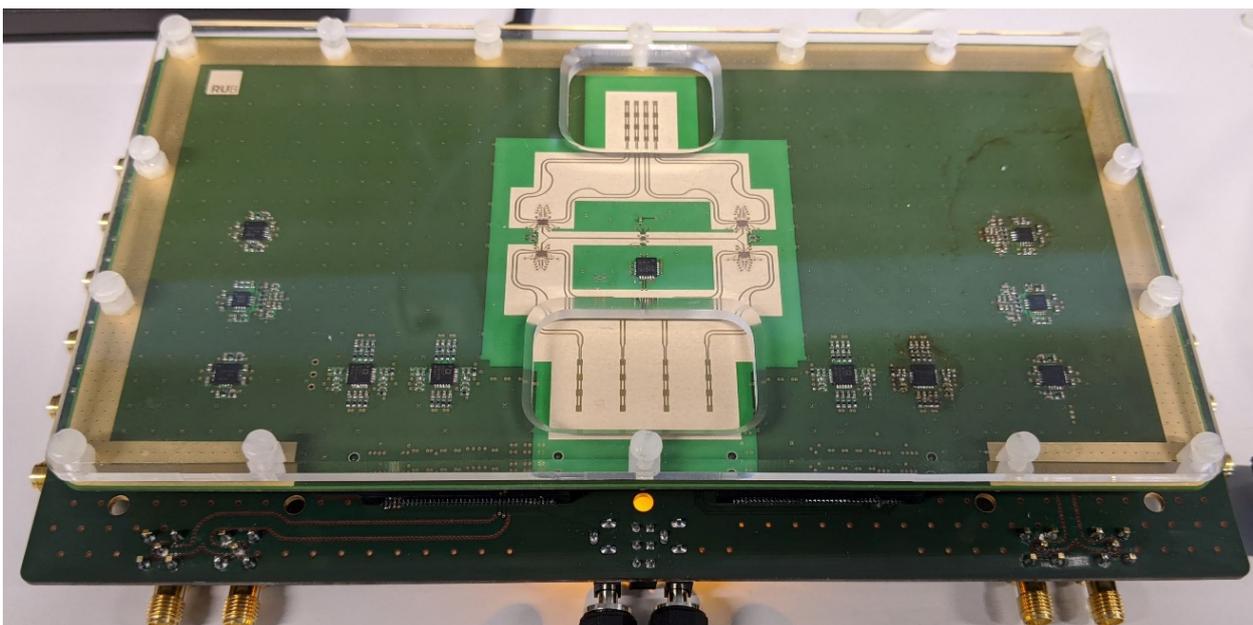


Abbildung 24: Frontend-Platine des ADR Radars (Dem#2b)

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

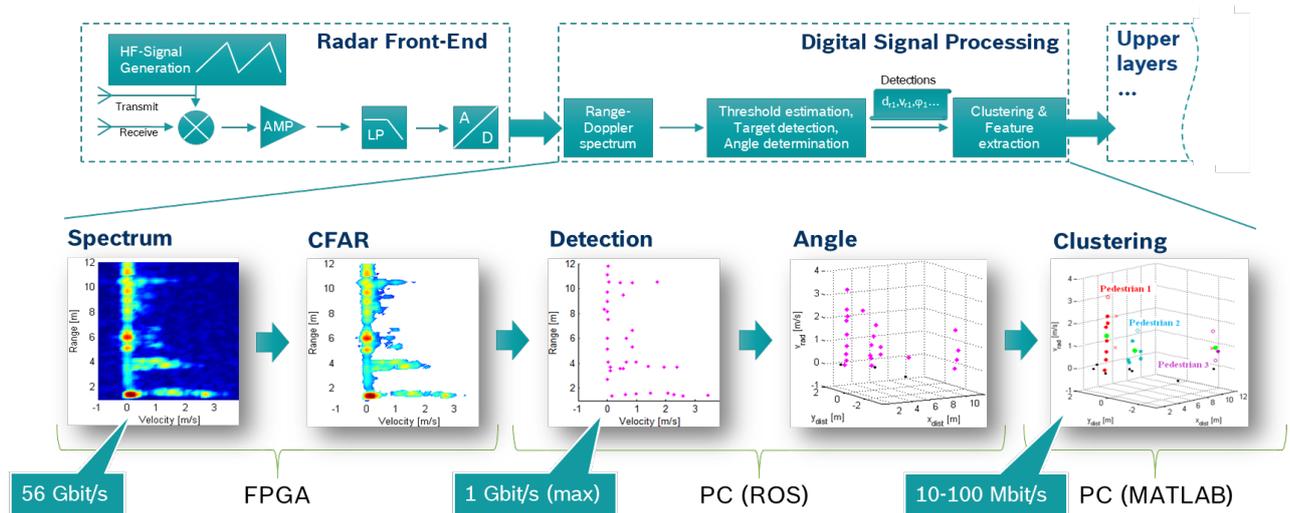
Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Die Platinen des ADR Radars wurden mit dem gleichen Formfaktor wie die des FCS TDM Radars entworfen und fabriziert, sodass für beide Demonstratoren dasselbe Gehäuse verwendet werden konnte. Eine Inbetriebnahme des gesamten DEM#2b Radars steht noch aus und wird noch bilateral mit der Ruhr Universität Bochum nach dem Projektende von radar4FAD im Juli 2020 stattfinden. Der DEM#2b bietet sich als idealer Einstiegspunkt für ein Nachfolgeprojekt von radar4FAD an, falls dieses sich noch ergeben sollte.

Ein Überblick über die Signalverarbeitungskette des FCS TDM MIMO Radars (DEM#2a) ist in Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 25: High-level Übersicht der Signalverarbeitungskette im Bosch Demonstrator#2a**

Für den ADR Demonstrator#2b sieht die Verarbeitungskette prinzipiell genauso aus wie für den DEM#2a in Abbildung 25. Der entscheidende Unterschied liegt in der digitalen Signalerzeugung im Radar Front-End und der Berechnung des Spektrums (i.e. die Range-Velocity oder auch Range-Doppler Matrix), die sich wesentlich aufwändiger und komplexer gestaltet.

Sollen mehrere Sendekanäle gleichzeitig betrieben werden, wie dies beim OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) Modulationsverfahren der Fall ist, dann ist eine komplexe Erzeugung des orthogonalen Sendesignals notwendig, um unkorrelierte Sendesignale erzeugen zu können, die dann im Empfangspfad wieder getrennt werden können.

In Abbildung 26 ist der Signalfussplan eines OFDM Radars skizziert, wobei  $d_{TX}(m,n)$  die Matrix aus  $m$  Symbolen über  $n$  Subcarrier darstellt.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

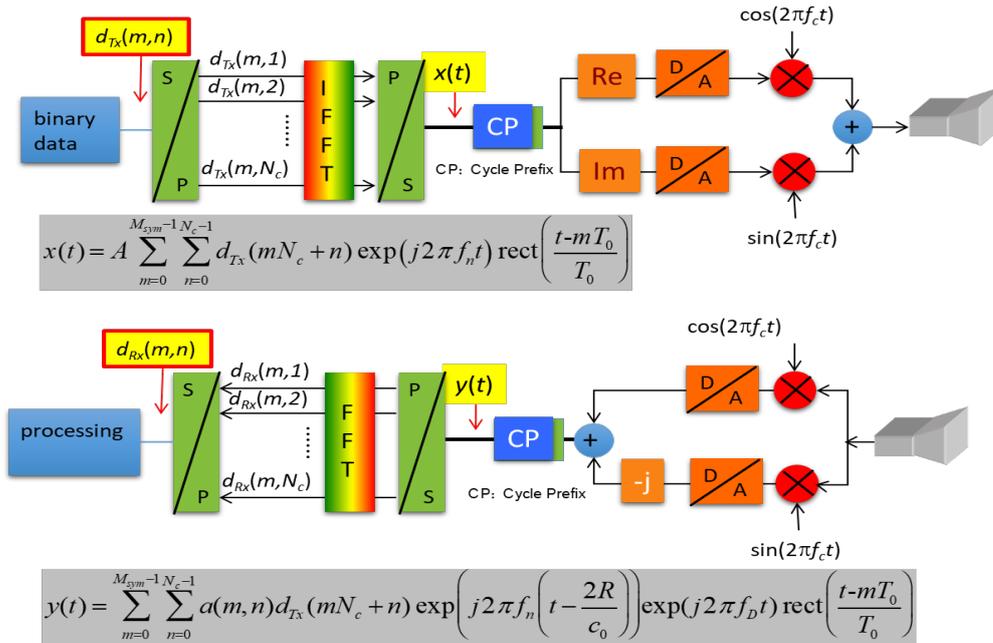


Abbildung 26: Signalfusslauf bei der OFDM Radar Modulation

Das Empfangssignal  $y(t)$  kann in einen entfernungs- und geschwindigkeitsabhängigen Term umgeformt werden, wie in Abbildung 27 gezeigt.

Received OFDM signal  $y(t)$  reflected at a moving object in distance  $R$ :

$$y(t) = \sum_{m=0}^{M_{\text{sym}}-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} a(m,n) d_{Tx}(mN_c + n) \exp\left(j2\pi f_n \left(t - \frac{2R}{c_0}\right)\right) \exp(j2\pi f_D t)$$

$$y(t) = \sum_{m=0}^{M_{\text{sym}}-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} d_{Rx}(mN_c + n) \cdot \exp(j2\pi f_n t) \cdot \underbrace{\exp\left(-j2\pi f_n \frac{2R}{c_0}\right)}_{\text{range}} \underbrace{\exp(j2\pi f_D mT_{\text{OFDM}})}_{\text{Doppler}}$$

Linear phase rotation of  $y(t)$  along OFDM by:

- subcarrier index  $n$
  - modulation symbol index  $m$
- } IFFT/FFT for Range and Doppler

Abbildung 27: Umformung des OFDM Empfangssignals in Entfernung- und Geschwindigkeitsterm

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

In Abbildung 28 ist der Zusammenhang zwischen OFDM Sendematrix  $D_{Tx}$  und Empfangsmatrix  $D_{Rx}$  eingehender beleuchtet.

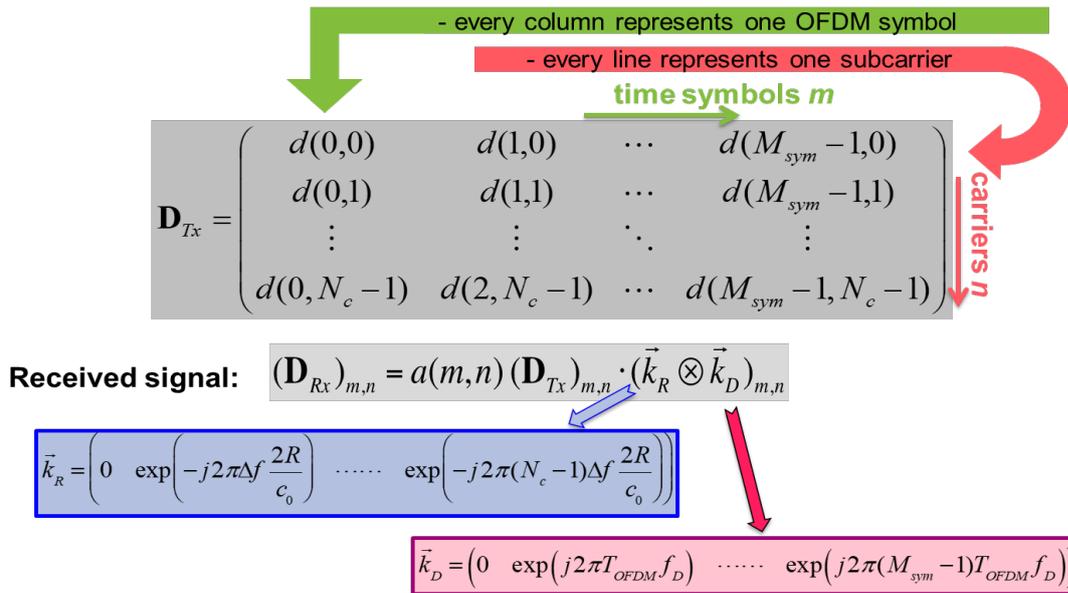


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen OFDM Sendematrix  $D_{Tx}$  und Empfangsmatrix  $D_{Rx}$

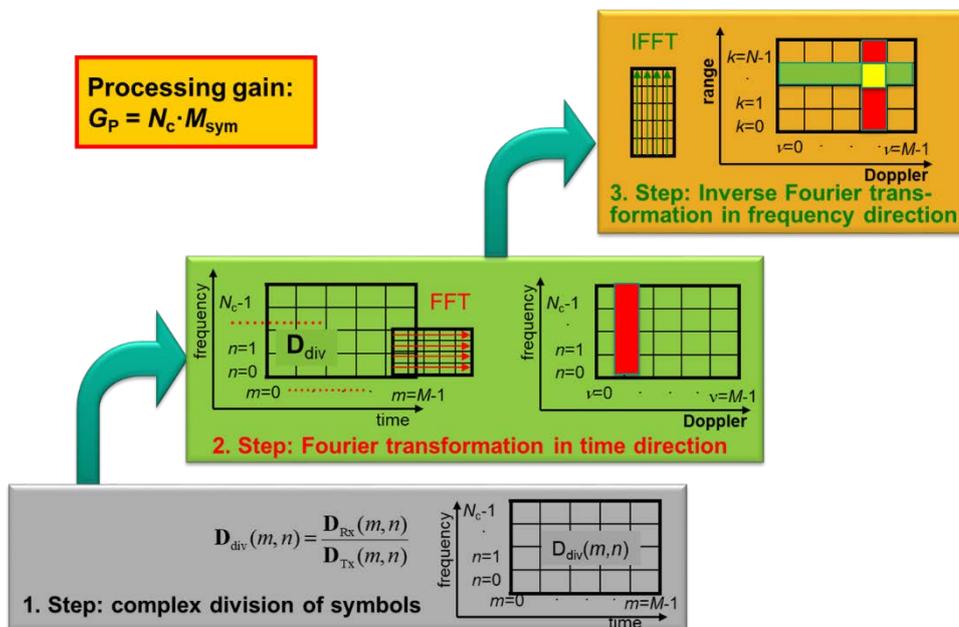


Abbildung 29: Range-Doppler Matrix durch elementweise Division in  $D_{div}$  mit anschließender FFT und IFFT

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

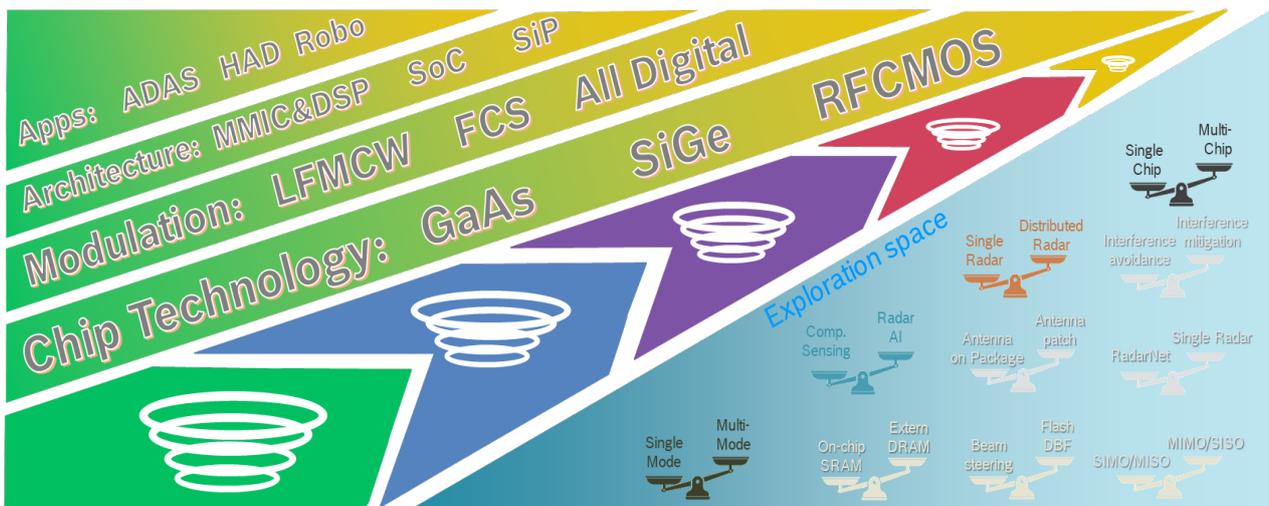
Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Durch elementweise Division der OFDM Sendematrix  $D_{Tx}$  durch die Empfangsmatrix  $D_{Rx}$  und anschließender FFT in der Zeitdomäne kann die Doppler-Information extrahiert werden. Mittels IFFT in der Frequenzdomäne wird dann schließlich die Entfernungsinformation gewonnen. Dieser Drei-Schritte Prozess ist in Abbildung 29 beschrieben.

Die weitere Signalverarbeitung (i.e. CFAR, Detektion, Winkelbestimmung und Objektclustering) verläuft dann für die beiden Radardemonstratoren DEM#2a und DEM#2b identisch.

Innerhalb der Projektgruppe im radar4FAD Konsortium wurde auch das „Big Picture“ der Radarentwicklungen sowohl retrospektiv als auch für die Zukunft (i.e. roadmap to the future) diskutiert. Abbildung 30 zeigt das „big picture“ der automobilen Radar Arena in den vorherrschenden Entwicklungspfaden (i.e. Applikation, Architektur, Modulation und Chip Technologie) und das zukünftige Entwicklungspotenzial (i.e. Explorationsraum, Exploration space).



ADAS: Advanced Driver Assistant Systems AI: Artificial Intelligence DBF: Digital Beam Forming DSP: Digital Signal Processing FCS: Fast Chirp Sequence Wave GaAs: Gallium Arsenid HAD: Highly Automated Driving LFMCW: Low Frequency Modulated Continuous MI MO: Multiple Input Multiple Output MISO: Multiple Input Single Output MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuit SIMO: Single Input Multiple Output SiP: System in Package SoC: System on Chip SiGe: Silicon Germanium SISO: Single Input Single Output

**Abbildung 30: Momentan Aufnahme der automobilen Radar Arena – Status Quo und Zukunftspotenzial**

Im Vergleich zu den anderen Perzeptionssystemen (i.e. Video und LiDAR) ist der Explorationsraum für die Radarentwicklung noch weitgehend unerschlossen und die Anzahl der möglichen Entwicklungsrichtungen noch sehr groß. Umso wichtiger ist es in Anbetracht der limitierten Ressourcen, hier die richtigen Pfade und Technologien zu identifizieren und anzugehen. Eine Konvergenz auf ein einheitliches Konzept und ein von allen Stakeholdern akzeptierter Radarsystemansatz ist noch nicht zu erkennen. Einzig eine fortschreitende Digitalisierung und zunehmende Integration in immer kleiner werdende Technologieknoten zeichnet sich bereits jetzt ab.

Von  
 CC/PJ-RAD

 Bearbeiter  
 Martin Kunert

 Telefon  
 +49 711 811-37468

 Leonberg  
 23.09.2020

 Bericht  
 Ausgabe      Version 1.0  
 Thema        Radar4FAD Abschlussbericht

### 2.1.3 AP4 - Radarmodulationsverfahren und Prozessierung

In AP4 wurde zusammen mit den Projektpartnern eine Bewertung des Hardwareaufwands bezüglich der HF-Frontends und der Datenprozessierung (Bewertungsparameter sind in Abbildung 31 aufgelistet) durchgeführt.

Symbol	Parameter	Value
$FS_{range}$	signal dynamic range	dBfs
$d_A$	Required aperture size	$\#\lambda$
$ADC_{freq}$	ADC sampling frequency	MHz
$ADC_{bit}$	ADC number of bits	Bit
$B_{Rx}$	Receiver (Rx) IF-Bandwidth	MHz
$IQ_{stat}$	IQ-Receiver	Yes/no
$DAC_{bit}$	DAC number of bits	Bit
$DAC_{freq}$	DAC sampling frequency	MHz
$Storage_{RAM}$	memory storage per RX and cycle	Mbit
$RX_{raw}$	Receiver raw data rate (per Rx)	Gbit/s
$P_{MIPS}$	calculation power per RX and cycle	Mips
$PLL_{dev}$	PLL linearization	% deviation
$N, F$	Receiver noise / noise figure	dBm, dB
$P_{IP3}$	Dynamic compression (IP3)	dBm
$SNR_{10m\_10dBsm}$	SNR for target @10m, 10dBsm	dB
$P_{EIRP}$	Overall EIRP	dBm
$SPU_{area}$	Required chip surface (SPU)	mm <sup>2</sup>
$FE_{area}$	Required chip surface (HW-Frontend)	mm <sup>2</sup>
$Cs_{sens_{sav}}$	Compressed Sensing Hardware saving	%
$Cs_{sens_{ohead}}$	Compressed Sensing calculation increase	%

**Abbildung 31: Bewertungskriterien für den Hardware Aufwand**

Besonderes Augenmerk wurde neben den physikalischen Auswirkungen der einzelnen Parameter auf die Robustheit gegenüber Interferenz von anderen Radarsensoren und möglichen weiteren Frequenzbandnutzern gelegt. Dieser Aspekt ist hinsichtlich der geforderten ASIL Fähigkeit

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

von signifikanter Bedeutung, auch wenn bisher von der ISO/WD PAS 21448 (i.e. SOTIF – Safety of the intended function) noch keine Anforderungen bzw. Limits definiert worden sind. In einer theoretischen Bewertungsstudie wurden die verschiedenen Modulationsarten für unterschiedliche Anwendungsfälle (z.B. Nahbereich mit 4 Transmitter MIMO Konzept) teilweise an den Bewertungskriterien aus Abbildung 31 reflektiert.

	CS-TDM	CS-FDM	PN analog	PN digital	OFDM
I/Q receiver	no	no	yes	yes	yes
fast slope PLL	yes	yes	no	no	no
fast DACs	no	no	no	no	yes
Fast ADCs	no	yes	no	yes	yes
ADC bits	16 bit	16 bit	16 bit	16 bit	16 bit
Measurement bandwidth	1,5 GHz	1,5 GHz (no sub- or guard bands)	1,5 GHz	1,5 GHz	1,5 GHz
Range resolution	0,1 m	0,1 m	0,1 m	0,1 m	0,1 m
Measurement cycle	12,2 ms	12,2 ms	11,2 ms	11,2 ms	11,3 ms
Velocity resolution	0,16 m/s	0,16 m/s	0,2 m/s	0,2 m/s	0,17 m/s
Output sample rate	0,31 MSPS	0,31 MSPS ( $N_{Tx}$ parallel ADCs or samp. rate increased by $N_{Tx}$ )	366 kSPS	1,5 GSPS	1,5 GSPS
Memory storage for 4 RX per cycle (16 bit ADC)	16*128*64*4 bit = 524,3 kbit = 65,5 kByte	16*128*64*4 bit = 524,3 kbit = 65,5 kByte	16*2*4096*4 bit = 524 kbit = 65 kbyte	16*2*4096*4096*4 bit = 2148 Mbit = 268 Mbyte	16*2*4096*4096*4 bit = 2147,5 Mbit = 268,4 MByte
Number of ramps / PN sequences / OFDM symbols	64	64	4096	4096	4096
Number of samples per ramp / PN sequence / OFDM symbol	(60) 128	(60) 128	4096	4096	4096 (+32 Cyclic Prefix)
Unambiguous range	3 m	3 m	25m	409,6 m	102,4 m
Unambiguous velocity	5 m/s / $N_{Tx}$	5 m/s	2,8 m/s	347,7 m/s	231,8 m/s
calculation power per RX and cycle	128 * 50 FFTs	128 * 50 FFTs	16 FFTs	4096 corr+4096 FFTs 250 corr to achieve 25m range	4096*4096 Complex Mult. 4096 + 4096 FFTs
Processing gain per Rx channel	39,13 dB	39,13 dB + 10·log <sub>10</sub> ( $N_{Tx}$ )	54,2 dB ?	78,2 dB (incl. Tx beamforming)	10 · log <sub>10</sub> (4096 · 4096) = 72,2 dB (incl. Tx beamforming)
SNR for a target in $R = 50$ m, $v = 0$ m/s, $RCS = 10$ m <sup>2</sup> per ch.	t.b.d.	t.b.d.	t.b.d.	t.b.d.	23,0 dB (theo. mit $P_{Tx} = 10$ dBm)

**Abbildung 32: Parametrisierung im Nahbereich für die verschiedenen Modulationsarten**

Abbildung 32 zeigt die Auswertung über die verschiedenen Bewertungskriterien für die fünf untersuchten Modulationsarten (in grün) unter sonst vergleichbaren Voraussetzungen (in schwarz). Es ist hier gut zu erkennen, wie der Hardware-Aufwand von links nach rechts zunimmt und sich z.T. über mehrere Größenordnungen erstreckt. Die Leistungsfähigkeit zwischen den untersuchten Modulationsarten ist annähernd gleich gewählt (schwarze Werte in der Tabelle von Abbildung 32), was sich aber bei weitem nicht in gleichem Maße wie der höherer Hardwareaufwand in den abgeleiteten Performancewerten (grün) widerspiegelt. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die digitalen Radarkonzepte vergleichsweise mit höherem Aufwand verbunden sind und es eines signifikanten Grundes bedarf, warum man auf diese zurückgreifen sollte.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Eine gute Begründung ist wohl die wesentlich bessere Flexibilität bei der Sendesignalerzeugung und die sich daraus ergebende Interferenzfestigkeit, wenn entsprechende Standardisierungen im Sendepfad weltweit umgesetzt sind.

Dies war auch eine der Haupttriebfedern beim Mobilfunk, der sich von analogen 1G zu voll digitalen 5G Systemen weiterentwickelt hat.

Für die Umsetzung möglicher Regularien in verbindliche Frequenzstandards (siehe Abbildung 33) entstand ein reger, informeller Austausch mit dem BMBF Projekt IMIKO.

Region	Regulatory	Standards	77/79GHzRadar
International 	ITU-R ITU-T 	ISO International Organization for Standardization 	Resolution 759 (WRC15) ITU-R M.1452-2 ITU-R M.2057
Regional (EU) 	ECC / CEPT 	ETSI 	EN 301 091-1 EN 302 264-1 CEPT/REC 70-03
(USA) 	FCC 	FCC Federal Communications Commission 	47 CFR §15.253 Part 95-Subpart M <sup>1)</sup>
(Asia) 	SRMC China (MIIT)  MIC Ministry of Internal Affairs and Communications  MINISTRY OF INFORMATION AND COMMUNICATIONS REPUBLIC OF KOREA 	ARIB Association of Radio Industries and Businesses  SRRC 	ARIB STD-T48 SRTC MRE (XIV) <sup>2)</sup>
National 	BNetzA  ANFR AGENCE NATIONALE DES FREQUENCES 	VDE / VDA DIN / DKE  	EU DIRECTIVE 2014/53/EU (CE-conformity)

<sup>1)</sup> New subpart M – The 76-81 GHz Band Radar Service §95.330x | ET Docket No. 15-26 June 22, 2017  
<sup>2)</sup> Technical Specification for Micropower (Short Distance) Radio Equipments (XIV) Vehicle Distance Finding Radar

Abbildung 33: Regulativer Framework für Radarsensoren

Der Störeinfluss durch Interferenz oder das Versagen einer szenenrichtigen Sensorperzeption wird bisher bei der Entwicklung von neuen Radarsensoren nur unzureichend, wenn überhaupt, berücksichtigt. Diese störenden Auswirkungen lassen sich aktiv nur a priori im Vorfeld wirksam durch entsprechende Standardisierungen vermeiden; sind die Frequenzbänder durch unkoordinierte Radarsysteme interferenztechnisch erst einmal „verseucht“, dann ist eine Abhilfe nur noch sehr schwerlich möglich.

Diese Bedrohung kann daher als das über der Radarsensor-Vermarktung (insbesondere für das hochautomatisierte Fahren der SAE Stufen 4 und 5) schwebende Damokles-Schwert gesehen werden, was einen schnellen Handlungsbedarf in dieser Richtung erfordert, damit zukünftige Radarsensoren der Einzug in den hochautomatisierten Markt nicht verwehrt wird.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Mit zunehmender Verbreitung von Automobilradaren im ADAS Level2 Markt wird auch hier das Interferenzaufkommen vermehrt zu Störungen und Funktionsausfällen kommen, da bei dieser Gruppe von Radarsensoren bisher noch keine aktive, koordinierte Interferenzvermeidung im Sendepfad implementiert ist und lediglich eine Interferenzmitigation im Empfangspfad eingesetzt wird.

Da für das hochautomatisierte Fahren die funktionalen Sicherheitsanforderungen wesentlich höher als für die Fahrerassistenzfunktionen (i.e. ADAS bis SAE Level 2) eingestuft werden müssen, wurde eine erste Grobaufteilung der relevanten Sicherheitsanforderungen vorgenommen.

Safety Class	Operational Safety	Functional safety	Functional Performance	Cyber Security
covered by	SAE J 3016 <small>(for taxonomy and definitions)</small>	ISO 26262	ISO DPAS 21448	SAE J 3061 <small>(guidebook for cyber-physical vehicle systems)</small>
Topic adressed	Safe Driving Level and Expectations	E/E architecture	Vehicle System Limits	Cyber attack OTA
Category	forseeable misuse	systematical failure	system nominal function limits	system vulnerability
Example	ACC in dense urban traffic	random faults in ECU	radar can't see roadmarkings	high-jack

Directive 2001/95/EC on general product safety:



European Community Rapid Information System

ACC: Adaptive Cruise Control ASIL: Automotive Safety Integrity Level E/E: Electric/Electronic FMEDA: Failure modes, effects, and diagnostic analysis HARA: Hazard And Risk Analysis OTA: Over The Air DPAS: Draft Publicly Available Specification

**Abbildung 34: Sicherheitsanforderungen für das hochautomatisierte Fahren**

In Abbildung 34 sind die relevanten Sicherheitsanforderungen für das hochautomatisierte Fahren aufgezählt. Die ISO 26262 (ASIL für die rein elektrische Ausfallsicherheit) und die ISO DPAS 21448 (SOTIF-Safety Of The Intended Functionality für das „richtige“ Erkennen) stehen dabei zentral im Mittelpunkt der benötigten Anforderungen.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

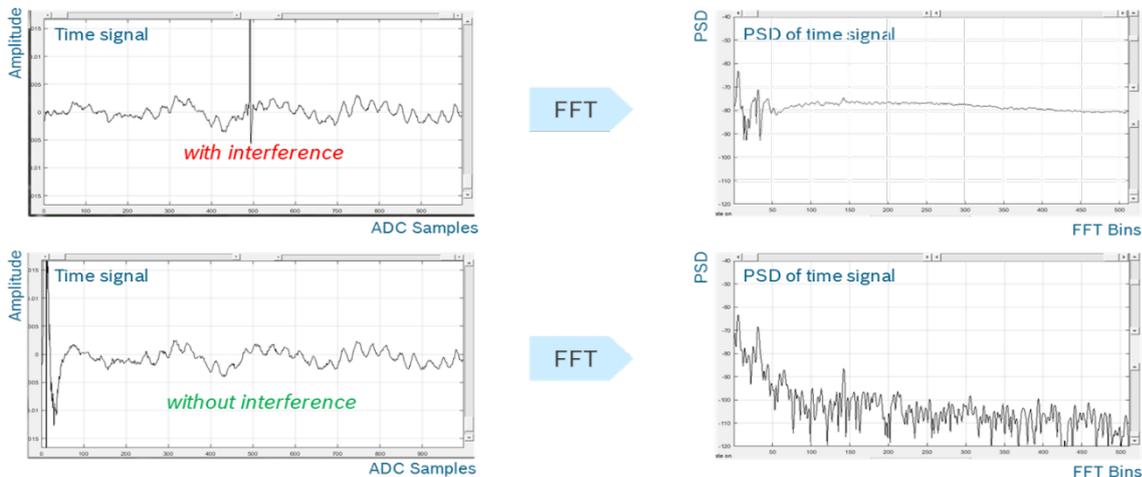
Während der Laufzeit des AP4 wurde auch eine theoretische Bewertung der Interferenzeffekte zwischen den einzelnen Modulationsarten analysiert und dokumentiert, wie in Abbildung 35 ersichtlich.

Victim / Interferer	LFMCW Radar	Fast CS Radar (TDM/FDM)	OFDM/PN Radar	SDR Radar
LFMCW Radar	short time, single sample or medium time, chirp-like or full sample length chirp-like	short time, single sample [each chirp with one corrupted sample]	short time, single symbol [one RX subband carrier at an instant time]	short time, single symbol [one RX subband carrier at an instant time]
Fast CS Radar (TDM/FDM)	short time, multi-sample [many RX samples corrupted]	short time, single sample or medium time, chirp-like or full sample length chirp-like	short time, multi symbol [many RX subband carrier at an instant time, no RX repair possible]	short time, multi symbol [many RX subband carrier at an instant time, no RX repair possible]
OFDM/PN Radar	receiver noise level increase [no RX repair possible]	receiver noise level increase [no RX repair possible]	receiver noise level increase [no RX repair possible]	receiver noise level increase [no RX repair possible]
SDR Radar	receiver noise level increase [no RX repair possible]	receiver noise level increase [no RX repair possible]	receiver noise level increase [no RX repair possible]	receiver noise level increase [no RX repair possible]

LFMCW: Low Frequency Modulated Continuous Wave CS: Chirp Sequence TDM: Time Division Multiplex FDM: Frequency Division Multiplex OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplex PN: Pseudo Noise SDR: Software Defined Radar

**Abbildung 35: Interferenzeffekte zwischen den verschiedenen Modulationsarten**

Die theoretischen Betrachtungen zur Radarinterferenz wurden durch Labortest und einer konzentrierten Messkampagne mit allen radar4FAD Demonstratoren verifiziert und validiert.



**Abbildung 36: FMCW Kurzzeitinterferenz durch FMCW Störer (stark unterschiedliche Frequenzrampe)**

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

In Abbildung 36 wird ein FMCW Radar durch einen anderen FMCW Radar mit stark unterschiedlicher Rampensteilheit gestört.

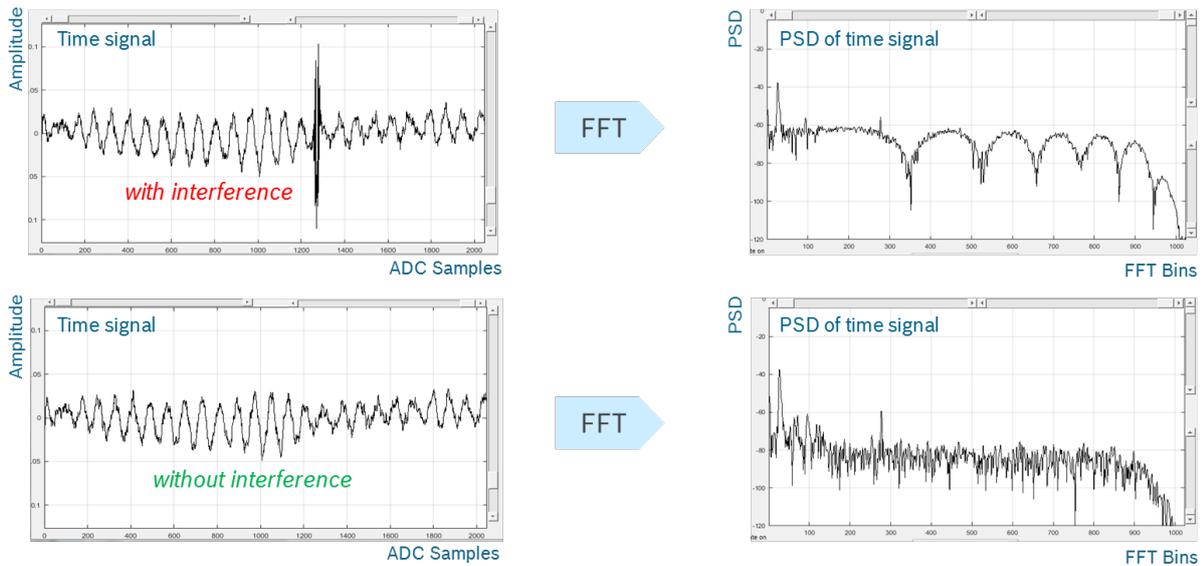


Abbildung 37: FMCW Interferenz durch FMCW Störer (leicht unterschiedliche Frequenzrampe)

In Abbildung 37 wird ein FMCW Radar durch einen anderen FMCW Radar mit leicht unterschiedlicher Rampensteilheit gestört.

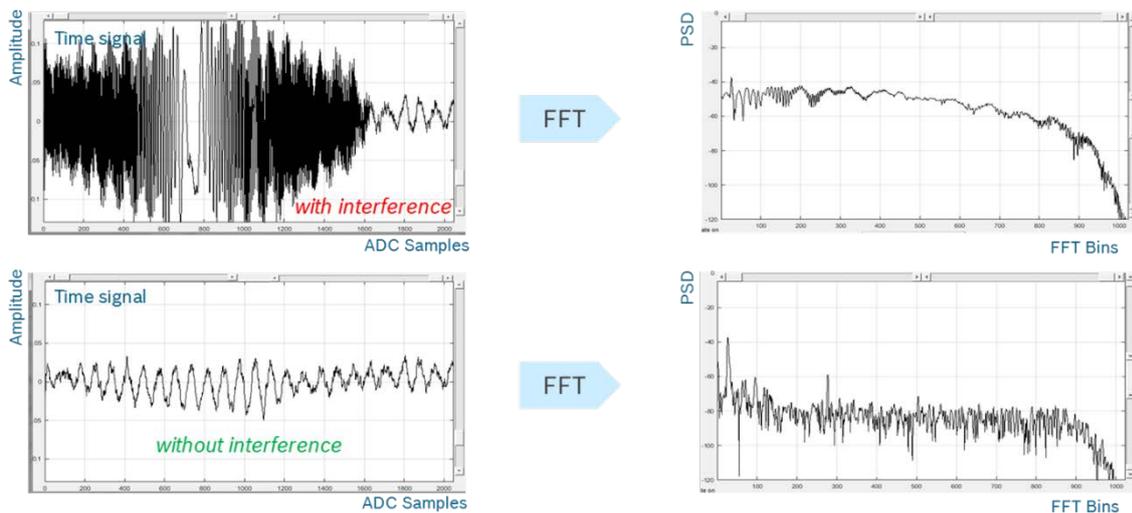


Abbildung 38: FMCW Interferenz durch FMCW Störer (mit fast identischer Frequenzrampe)

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

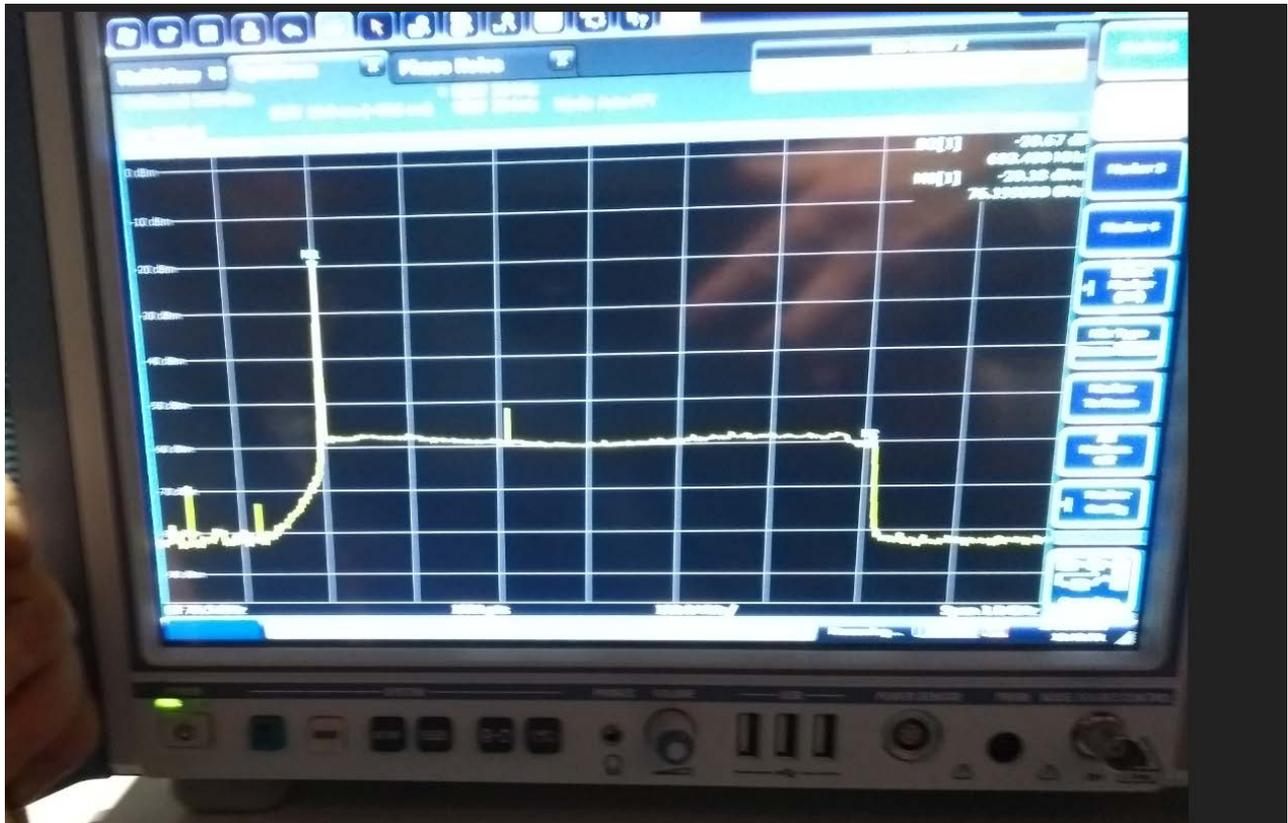
Bericht

Ausgabe Version 1.0

Thema Radar4FAD Abschlussbericht

In Abbildung 38 wird ein FMCW Radar durch ein anderen FMCW Radar mit fast identischer Rampensteilheit gestört. Hier sind fast alle Samplewerte korrupt und die Messrampe damit unbrauchbar, da eine Reparatur nicht mehr möglich ist.

Im Januar 2020 wurden zusammen mit den Demonstratoren #1 und #4 Interferenzmessungen mit dem Bosch Demonstrator#2a durchgeführt. Dafür wurde der Bosch-Demonstrator mit Chirp-Sequence Modulation sowohl als Störer als auch als Opferempfänger eingesetzt. Nach Vermessung des Emissionsspektrums (siehe Abbildung 39) wurde der Bosch Radar als



**Abbildung 39: Emissionsspektrum des Bosch Demonstrator#2**

Störer für die anderen Demonstratoren eingesetzt. Durch die variable und sehr flexible Ansteuerung der Betriebsparameter (Modulationshub, Chirpdauer, Chirp-zu-Chirp Rate, etc.) konnte bei den Opferempfängern das Modulationssignal eindeutig identifiziert und im Spektrum lokalisiert werden.

Von  
CC/PJ-RAD

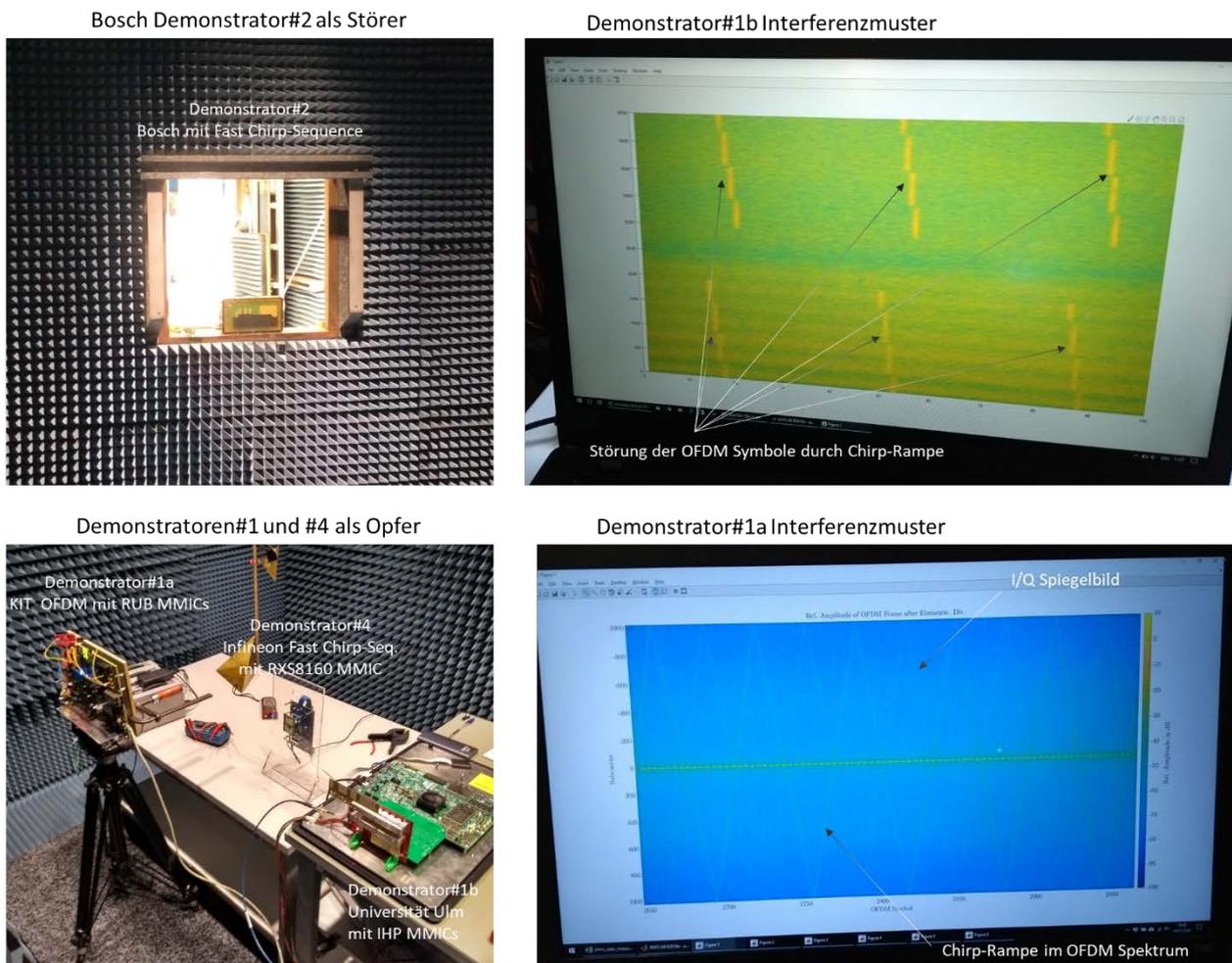
Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

siert werden (siehe Abbildung 40). Die frequenzmodulierten schnellen Rampen des Demonstrators#2a wurden bei der Störung von Demonstrator#1a als kontinuierlicher Sägezahn von Auf- bzw. Abwärtsrampen wahrgenommen. Die Entfernung zwischen Störer und Opfer betrug dabei ca. 4,5m; eine Situation, wie sie in normalen Straßenszenarien typischerweise oftmals vorkommen kann und nichts Außergewöhnliches darstellt.



**Abbildung 40: Interferenzmessung (Demonstrator #1a und b als Opfer)**

In Abbildung 41 sind die Interferenzeffekte vom Demonstrator#1b (OFDM Modulation) in den Bosch Demonstrator#2a aufgezeichnet.

Von  
CC/PJ-RAD

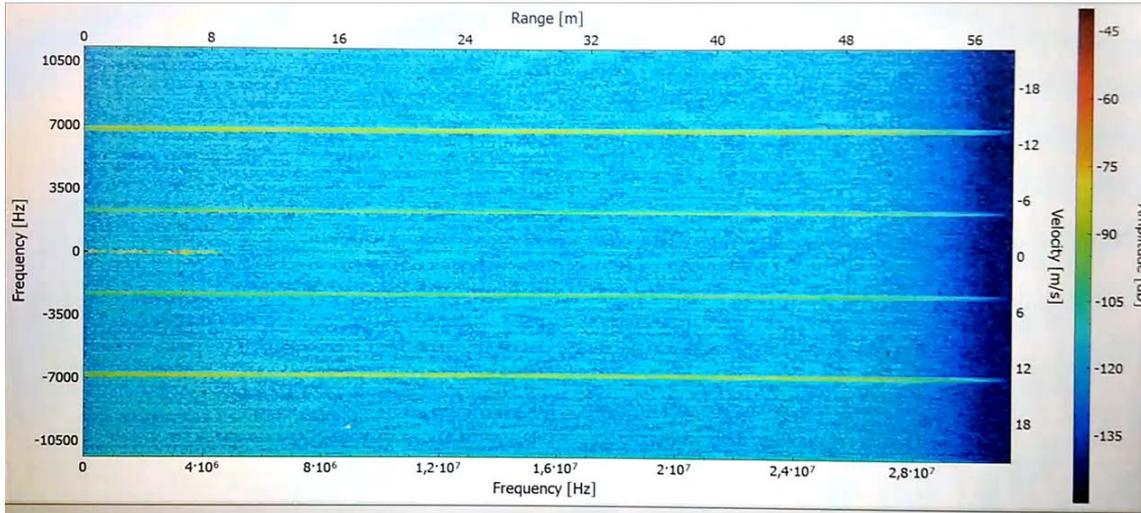
Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Störung durch OFDM Träger im Dauerstrichbetrieb



Störung durch OFDM Symbole während der Modulation

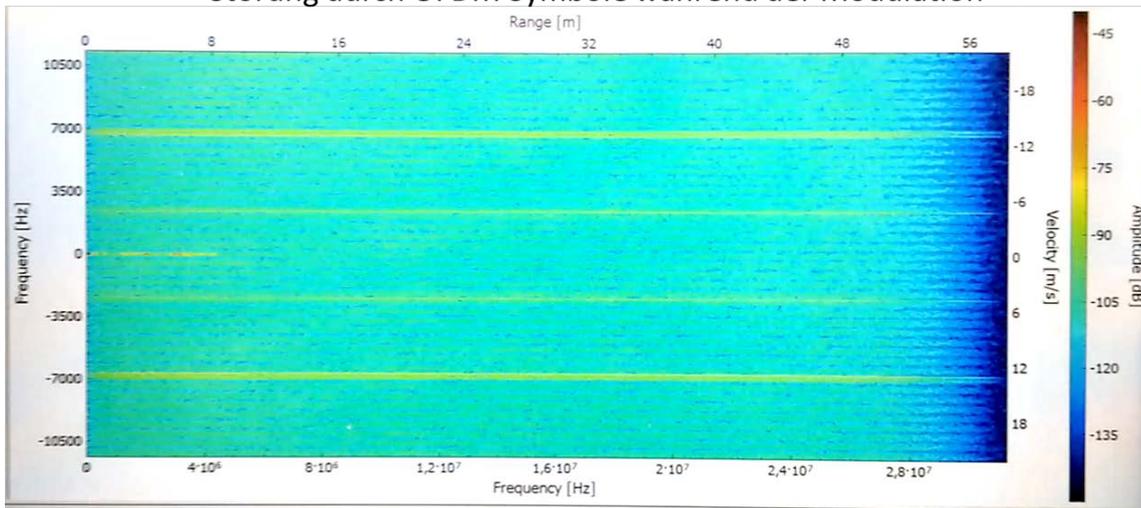


Abbildung 41: Interferenzmessung (Bosch Demonstrator #2 als Opfer)

Die Störungen durch die OFDM Trägerfrequenzen sind permanent sichtbar, da das OFDM Radar diese Träger im Dauerstrichverfahren ständig aussendet. Wird dieser OFDM Träger mit ei-

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

ner vorgegebenen Symbolrate moduliert, dann wird das gesamte Spektrum breitbandig mit einer um ca. 20 dB geringeren Störleistung (instantane, mittlere e.i.r.p. Leistung) vollkommen gestört.

In Abbildung 42 wurde eine Bewertung der MIMO-Tauglichkeit für den Mid-Range Bereich über die verschiedenen Modulationsarten durchgeführt. Die kritischen Werte sind rot markiert.

	TDM-OFDM	FDM-OFDM (Subcarrier interleaving)	FDM-OFDM (Subcarrier blocks)	CDM-OFDM	FDM-OFDM (mit Compressed Sensing)
Number of Tx	4	4	4	4	4
ADC bits	16 bit				
Measurement bandwidth	750 MHz				
Range resolution	0,2 m	0,2 m	0,8 m	0,2 m	0,2 m
Measurement cycle/time	12,82 ms				
Velocity resolution	0,15 m/s				
Output sample rate per channel	750 MSPS				
Number of OFDM symbols per frame	4096	4096	4096	4096	4096
Number of samples/subcarriers per OFDM symbol	2048 (+300 Cyclic Prefix)				
Unambiguous range	409,6 m	102,4 m	409,6 m	409,6 m	409,6 m
Unambiguous velocity	75,8 m/s	303,3 m/s	303,3 m/s	303,3 m/s	303,3 m/s
calculation power per RX and cycle	2048*4096 Complex Mult. 4096 + 2048 FFTs	2048*4096 Complex Mult. + 2048 FFTs + 4096 Optimierungen			
Processing gain per channel	63,23 dB	63,23 dB	63,23 dB	69,24 dB	~ 69,24 dB (not deterministic)
Max. theo. dynamic (16 bit resolution)	96 dB	96 dB	96 dB	69 dB	~ 96 dB (not deterministic)

**Abbildung 42: Vergleich der Parametrisierung eines 4TX MIMO Radars**

In Abbildung 43 sind die drei KPIs (Key Performance Indicators) für Entfernungs-, Geschwindigkeits- und Winkelauflösung angegeben. Da die drei KPIs voneinander unabhängig sind und von unitären Größen (i.e. Bandbreite B, Messdauer  $T_{mess}$  und virtuelle Apertur  $d_v$ ) abhängen, können diese im Bereich des physikalisch sinnvollen beliebig eingestellt werden.

Vom Gesichtspunkt einer maximal verfügbaren Rechenleistung ist es daher möglich, durch Reduzierung eines der KPI Parameter den anderen entsprechend zu Verbessern. Wann und wie ein derartiger Tradeoff angebracht und sinnvoll ist, hängt in starkem Maße von der entsprechenden Applikation ab (z.B. Autobahnfahrt oder Einparken).

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

The overall performance of automotive radar systems is mainly influenced by the following three factors:

Radial range resolution capability

$$\Delta d_r \geq \frac{c_0}{2 \cdot B}$$

Radial speed resolution capability

$$\Delta v_r \geq \frac{c_0}{2 \cdot f_c \cdot T_{meas}}$$

Angular resolution capability

$$\Delta \phi [rad] = 1.22 \cdot \frac{\lambda_0}{d_v} = 69.88 \cdot \frac{\lambda_0}{d_v} [deg] \quad (\text{Raleigh criterion})$$

- $d_v$ : virtual array aperture
- $\lambda_0$ : carrier wavelength
- $B$ : Modulation Bandwidth
- $f_c$ : Center Frequency
- $T_{meas}$ : Measurement Time
- $c_0$ : Speed of Light

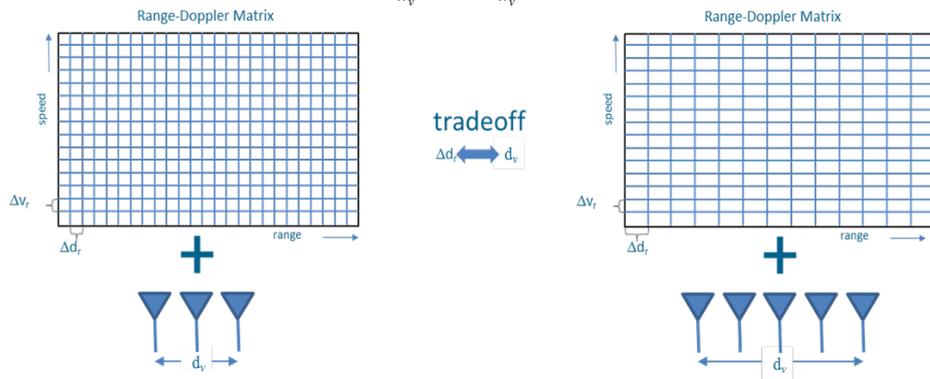


Abbildung 43: Tradeoff in MIMO Systemen – Winkel- gegen Entfernungsauflösung

Ein ähnlicher Tradeoff hat sich entwicklungstechnisch auch automatisch bei der Radar-Perfor- manz ergeben.

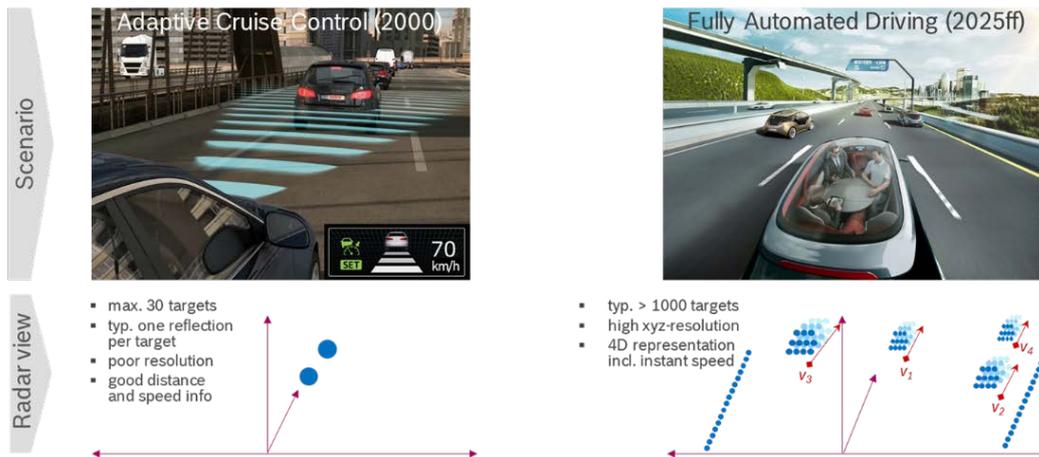


Abbildung 44: Tradeoff in der Radarperformanz

Wie in Abbildung 44 zu erkennen ist, war für ein ACC (Adaptive Cruise Control) System die Re- präsentation eines Fahrzeugs durch einen einzigen Radarpunkt vollkommen ausreichend. Für höherwertige Fahrfunktionen bis hin zum vollautonomen Fahren steigen dagegen die Anforder- ungen oftmals überproportional an. Für eine wirksame Fusion mit Video- oder LiDAR Daten

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

sollte die Anzahl der Detektionen eines Radars nicht um mehrere Größenordnungen unter denen von Video und LiDAR liegen.

Die typischen, minimalen und maximalen KPIs eines Automobilradars sind in Abbildung 45 angegeben.

The overall performance of automotive radar systems is mainly influenced by:

- Radial range resolution capability:  $\Delta d_r \geq \frac{c_0}{2 \cdot B}$
  - Radial speed resolution capability:  $\Delta v_r \geq \frac{\lambda_0}{2 \cdot T_{meas}}$
  - Pulse Compression Ratio:  $PCR = B \cdot T_{meas}$
  - Angular separation capability (Raleigh):  $\Delta \phi = 1.22 \frac{\lambda_0}{D_v} [rad] = 69,88 \frac{\lambda_0}{D_v} [deg.]$
- $D_v$ : virtual array aperture  
 $\lambda_0$ : carrier wavelength  
 $B$ : Modulation Bandwidth  
 $T_{meas}$ : Measurement Time  
 $c_0$ : Speed of Light  
 PCR: Pulse Compression Ratio

	Bandwidth B	Observation time T <sub>meas</sub>	Virtual aperture D <sub>v</sub>	Pulse Compression
typical value / ΔKPI	1 GHz / 0,15m	20 ms / 0,1 m/s	0,06m / 4,5 degree	2*10 <sup>7</sup> or 73 dB
min. value / ΔKPI	0,25 GHz / 0,6m	1 ms / 2 m/s	0,03m / 9,0 degree	2,5*10 <sup>5</sup> or 54 dB
max. value / ΔKPI	5 GHz / 0,03m	100 ms / 0,02 m/s	0,15m / 1,8 degree	5*10 <sup>8</sup> or 87 dB
limitation effect	frequency regulation	traffic dynamics	mounting space	allowed bandwidth
rationale	higher bandwidth only above 100 GHz possible	Heisenberg's uncertainty principle for obj. in motion	smaller wavelength -> Terahertz gap	pulse compression increases radar performance

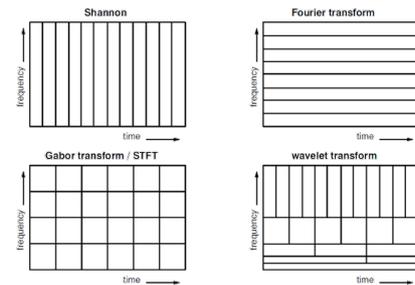
Abbildung 45: Typische, minimale und maximale KPI's eines Automobilradars

In Abbildung 46 und Abbildung 47 sind die KPI's aus Abbildung 45 formelmäßig beschrieben und parameterhaft dargestellt.

1. Signal to Noise ratio (SNR) =  $\frac{P_{Receive}}{P_{Noise}} = \frac{P_{Transmit} \cdot GT \cdot GR \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R^4 \cdot k \cdot T_0 \cdot B \cdot F \cdot L}$

2. Processing Gain (PG) for Fast Chirp Modulation:

- $PG_{FFT\_range} = 10 \log_{10}(N_{sample}) - 3 \text{ dB}$  "for real input signals only
- $PG_{FFT\_Doppler} = 10 \log_{10}(N_{chirps})$
- $PG_{FFT\_angle} = 10 \log_{10}(N_{Tx} \cdot N_{Rx})$  [Note: only for FFT-based DoA Estimators like Bartlett]



3. Pulse Compression (or Time Bandwidth product)

$$PC = T_{meas} \cdot B = \frac{c_0^2}{4 \cdot f \cdot \Delta R_{sep} \cdot \Delta V_{sep}}$$

$$\Delta R_{sep} \cdot \Delta V_{sep} = \frac{\lambda \cdot c_0}{4 \cdot T_{meas} \cdot B} = \frac{c_0^2}{4 \cdot f \cdot T_{meas} \cdot B}$$

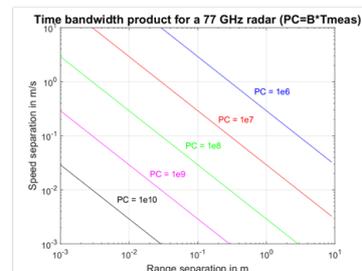


Abbildung 46: Die KPIs SNR, PG und PC

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

4. Antenna aperture and operational frequency

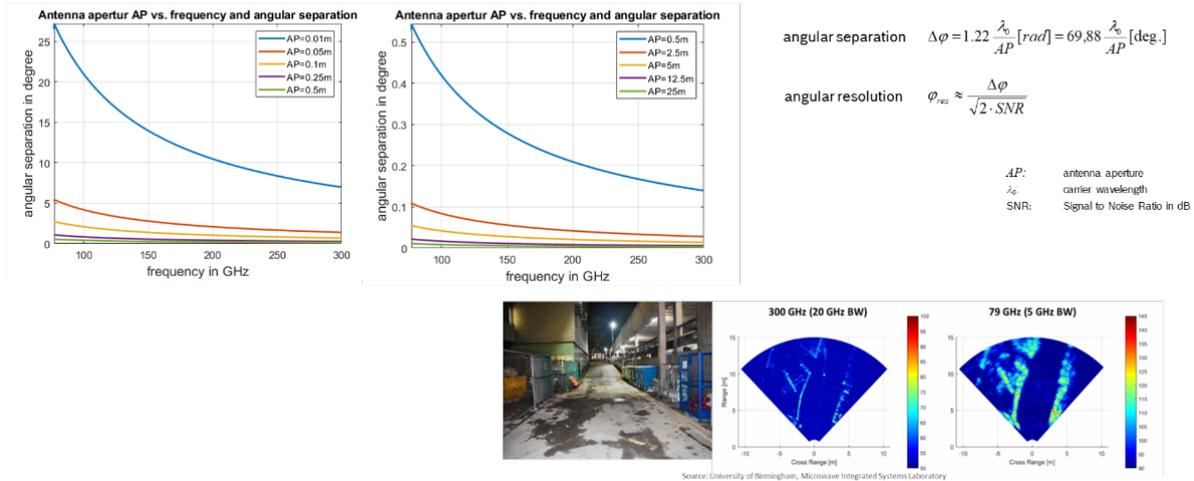


Abbildung 47: Die KPIs Antennenapertur und Betriebsfrequenz

Im letzten Schritt des AP4 wurden die kritischen Hardware Komponenten nochmals eingehender spezifiziert. Die erste Variante der Basisbandhardware des Demonstrators 2a (siehe Abbildung 48) umfasst 16 ADC Kanäle mit jeweils 250 MSPS Abtastrate. Die AD-Wandler sind über serielle Datenbusse an das Xilinx Zynq FPGA angeschlossen.

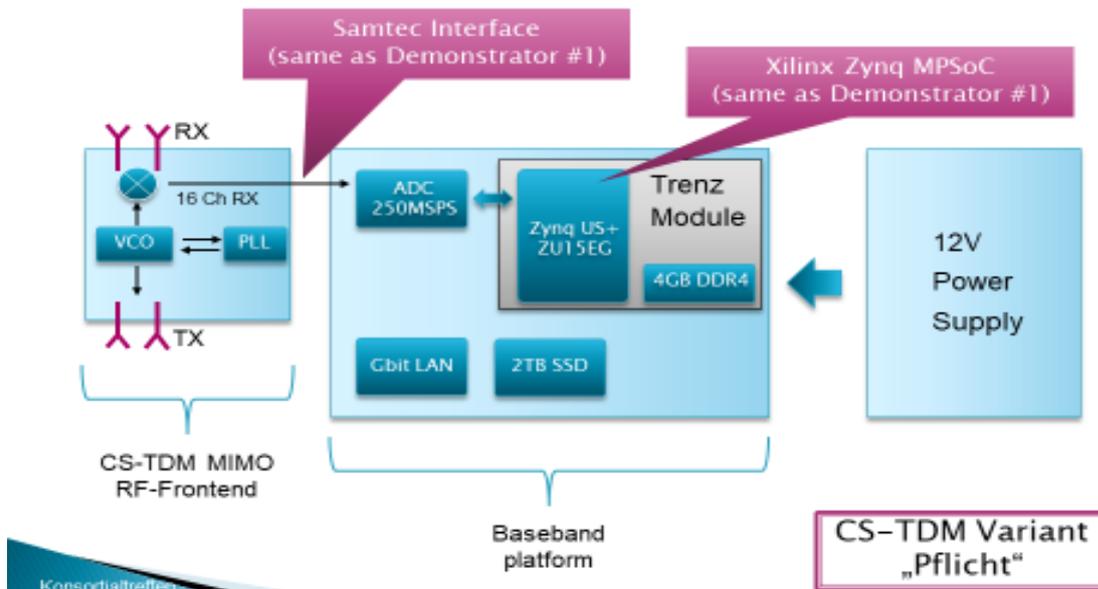


Abbildung 48: Blockdiagramm des Demonstrators DEM#2a

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Das Zynq FPGA ist auf einem separaten Modul der Fa. Trencz verbaut, welches über Stecker an die Basisband-Platine angebunden wird. Zusätzlich ist auf dem Modul ein 4GB DDR4 Speicher vorhanden, der an das Zynq System-on-Chip angebunden ist.

Als weitere Schnittstellen stehen auf der Basisband-Platine ein GBit-Ethernet Anschluss und eine NVMe SSD mit 2TB Speicherkapazität zur Verfügung, die beide direkt mit dem Zynq SoC verbunden sind.

Abhängig von den gewählten Betriebs- und Modulationsparametern ergibt sich für die typischen Werte von 150 m Reichweite, 55,6 m/s (=200 km/h) Geschwindigkeitseindeutigkeitsbereich, 0,1 m/s Geschwindigkeitsauflösung, 0,2m Entfernungsauflösung und 2 GHz Chirp-Bandbreite und einer ADC Abtastrate von 250 MHz folgender Speicherbedarf (pro TX Kanal):

16bit (ADC Auflösung) \* 1500 (ADC Samplewerte) \* 1111 (Anzahl Chirps) \* 16 (Anzahl Kanäle) = 53,3 MB (N.B.: Typischerweise wählt man 2er Potenzen für Sample- und Chirpwerte)

Für MIMO Konfiguration mit mehreren TX erhöht sich die Speichergröße noch um den Faktor Anzahl der TX.

Als kritische HW Komponenten sind daher die ADC Wandler mit ihren hohen Taktraten und der große Speicherbedarf von ~ 50 MB pro TX anzusehen.

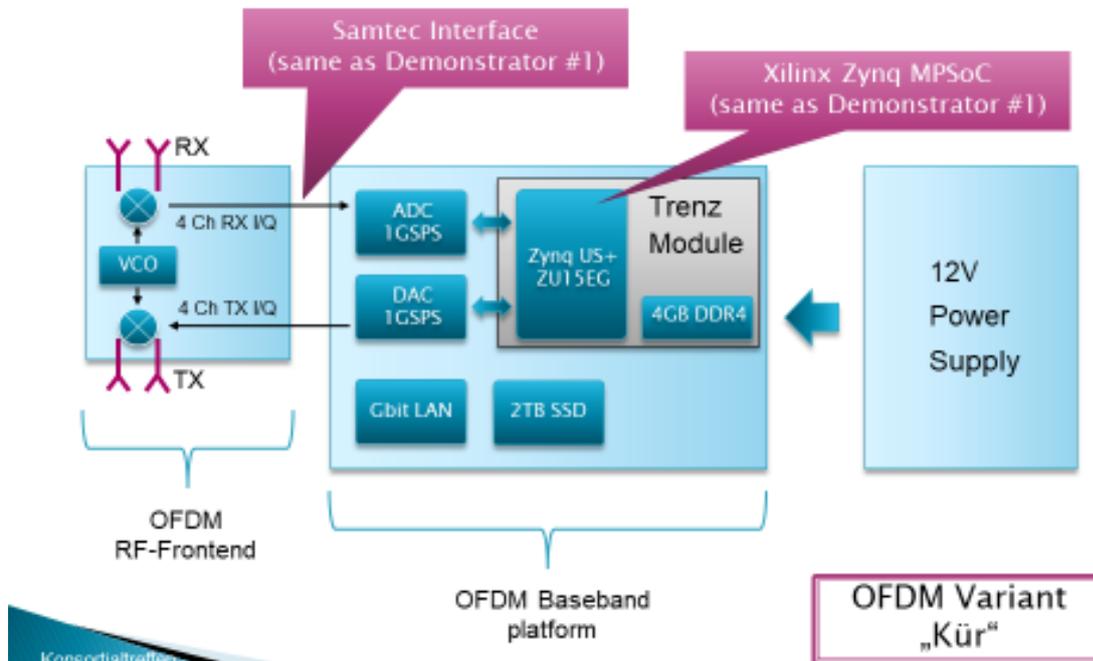


Abbildung 49: Blockdiagramm des Demonstrators DEM#2b

Von  
CC/PJ-RADBearbeiter  
Martin KunertTelefon  
+49 711 811-37468Leonberg  
23.09.2020Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Die zweite Variante der Basisbandhardware (Abbildung 49) ist bis auf folgende Unterschiede identisch mit der ersten Variante des DEM#2a.

- 1) Anstatt der 16 ADC Kanäle mit 250 MSPS werden nun 8 komplexe I/Q Kanäle mit einer Abtastrate von 1 GSPS eingesetzt
- 2) Zusätzlich sind nun auch Digital-Analog-Wandler verbaut (zur digitalen Senderansteuerung), die ebenfalls mit einer Taktrate von 1 GSPS betrieben werden.

Die restlichen Komponenten (FPGA, Ethernet, SSD) sind identisch mit der ersten Variante. Im Vergleich zum CS-TDM Betrieb der Basisvariante sind bei der OFDM Variante, die empfangsseitig I/Q Kanäle benötigt, nunmehr 4 RX Empfangskanäle vorhanden.

Folgender Speicherbedarf pro TX Kanal ergibt sich dann somit:

$16\text{bit (ADC Auflösung)} * 2048 \text{ (OFDM Symbol)} * 4096 \text{ (Anzahl der Symbole)} * 8 \text{ (4 I/Q Kanäle)} = 134,2 \text{ MB}$

Für MIMO Konfiguration mit mehreren TX erhöht sich die Speichergröße noch um den Faktor Anzahl der TX.

Als kritische HW Komponenten sind daher die ADC und DAC Wandler mit ihren hohen Taktraten (GSPS) und der große Speicherbedarf von ~ 130 MB pro TX anzusehen.

#### 2.1.4 *AP5 - Zuverlässige Heterogene Integration des Radarmoduls: 3D-Chip-Stacking und Modulpackage*

Die Aktivitäten in AP5 wurden erst mit dem Kick-off Meeting am 13. Dezember 2017 (i.e. M12) in Chemnitz gestartet.

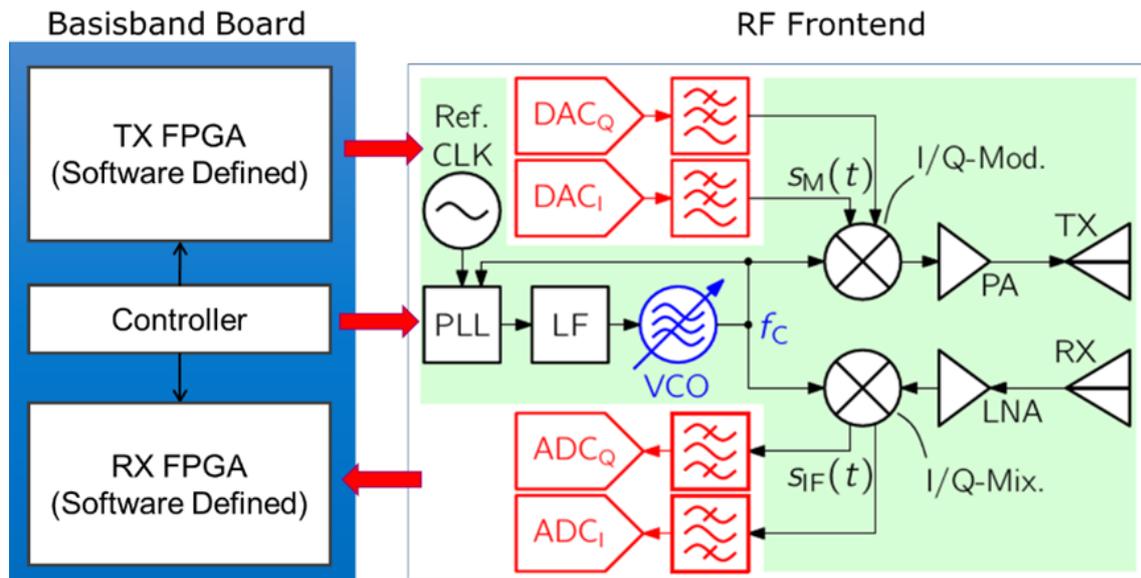
Zur Bestimmung der maximal erreichbaren Leistung bei den verschiedenen Modulationsverfahren wurde in AP5.3 ein idealer, virtueller Demonstrator #3 entworfen, der nicht in realer Hardware umgesetzt worden ist sondern sich aus „virtuellen“, bisher noch nicht in physikalischer Ausprägung vorliegenden Modulen und Komponenten des radar4FAD Modulbaukastens zusammensetzt. Diese universelle Systemarchitektur, wie in Abbildung 50 beschrieben, erlaubt mithin den Betrieb von beliebigen Modulationsarten bei höchster Systemperformanz.

Von  
 CC/PJ-RAD

 Bearbeiter  
 Martin Kunert

 Telefon  
 +49 711 811-37468

 Leonberg  
 23.09.2020

 Bericht  
 Ausgabe Version 1.0  
 Thema Radar4FAD Abschlussbericht


**Abbildung 50: Konzept eines universellen, software-defined radars (SDR)**

Mit einem SDR, wie in Abbildung 50 dargestellt, lässt sich somit jede beliebige Betriebsart (von langsamen FMCW Rampen bis hin zur voll-digitalen OFDM Modulation) emulieren.

Die Demonstratoren #1, #2, und #4 sind als sogenannte Pflicht-Demonstratoren von den Konsortialpartnern festgelegt worden, die in AP6 gegeneinander gemessen und verglichen wurden. Der Demonstrator #2b war das „Kürprogramm“, das sich erst im Laufe des Projektes aufgrund der guten Realisierungen der beiden Demonstratoren #1a und #1b herauskristallisierte. Als ADR (All Digital Radar) aus den verfügbaren Radarkomponenten des Modulbaukastens zusammengebaut kommt dieser einem SDR Radar schon sehr nahe.

Sämtliche Entwicklungsarbeiten in radar4FAD orientieren sich an der generellen, globalen Radar-Roadmap hin zum voll-digitalen SDR (siehe Abbildung 51).

Eine vollständige Digitalisierung der Radarmodule setzt zwangsläufig eine weitere Verdichtung und Integration in custom ASICs und System on Chip (SoC) voraus, um die auf der Kostenseite gesteckten Ziele überhaupt noch erreichen zu können.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

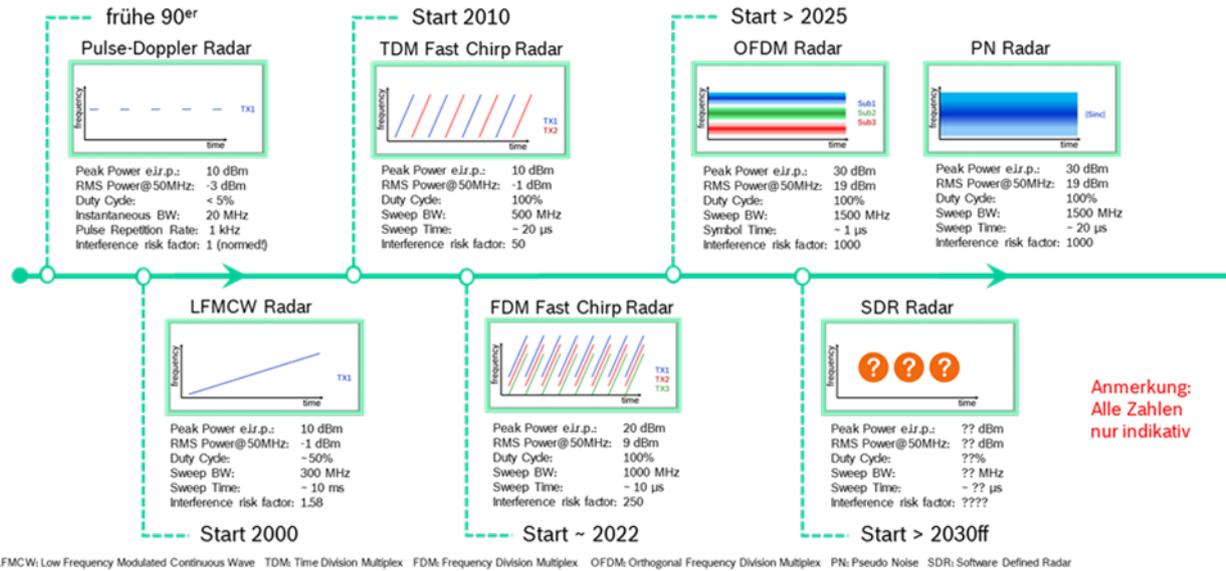
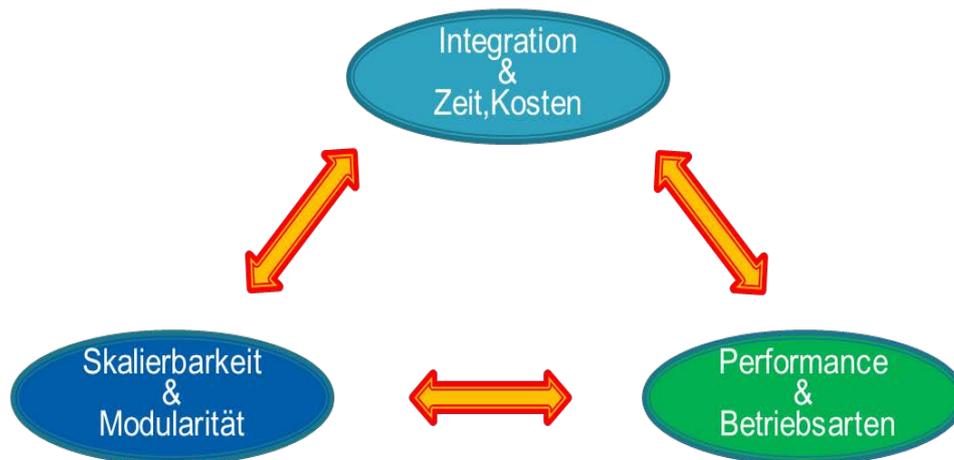


Abbildung 51: Entwicklungszyklen der Modulationsarten hin zum voll-digitalen Radar

Dieses Spannungsdreieck aus Integration-Skalierbarkeit-Leistung ist in Abbildung 52 dargestellt.

(nm-Knoten, SiGe<->RFCMOS, ASIC<-> FPGA, Time to market, ...)



(Single vs. MultiChip, Produktportfolio, etc.)

(CS vs. OFDM, ext. vs. int. RAM, high performance vs. commodity)

Abbildung 52: Das Spannungsfeld bei der Entwicklung zukünftiger Radarsysteme

Von  
CC/PJ-RAD

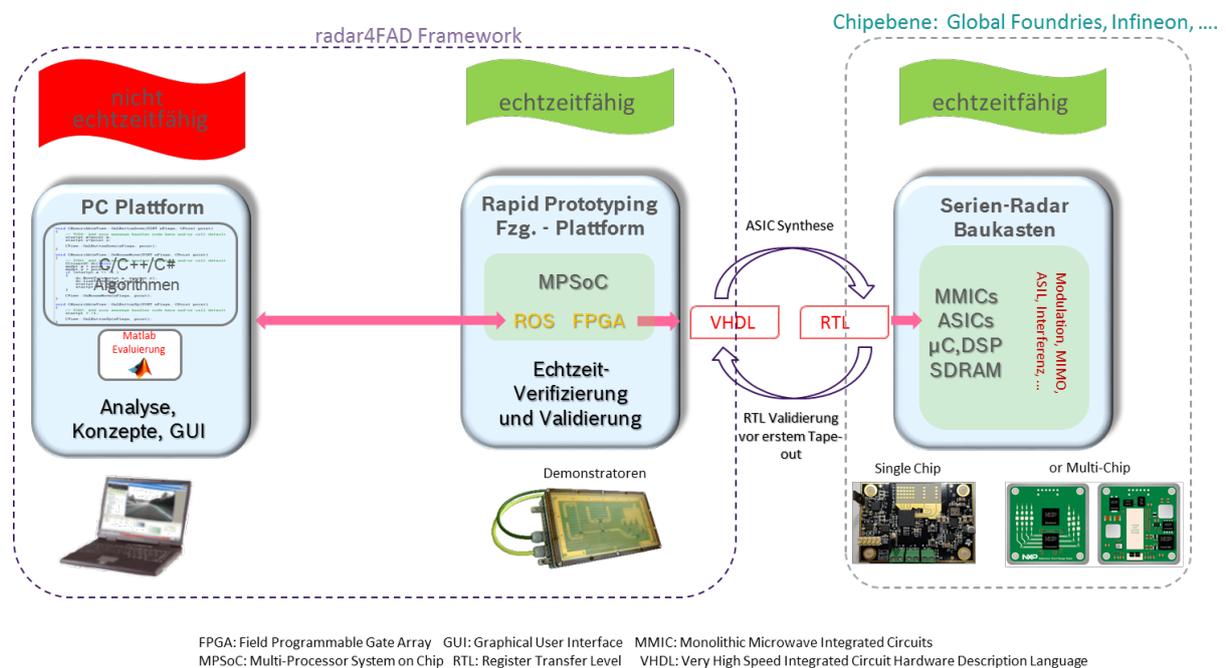
Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Ein weiterer Gesichtspunkt bei der Entwicklung und Umsetzung eines modularen Radarbaubaukastens für höherwertige Automatisierungsstufen ist einerseits die Beherrschung der stetig steigenden Komplexität des Gesamtsystems und andererseits die prototypenhafte Umsetzung der Algorithmen und Funktionen in Echtzeit vor einer finalen Implementierung in einem ASIC oder SoC Konzept.



**Abbildung 53: Zukünftiges Radar-Entwicklungskonzept – Von der Idee zum Chip**

Die in radar4FAD entwickelten Bosch Demonstratoren #2 entsprechen genau diesem in Abbildung 53 gezeigten Entwicklungsgedanken, den auch Firmen wie Xilinx durch die Bereitstellung von entsprechenden SoC Lösungen verfolgen und unterstützen. Zusammen mit den Projektpartnern wurden die Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen der verschiedenen Demonstratoren vereinheitlicht und konsolidiert. Das Interface zwischen HF-Frontend und sich anschließender Basisband-Signalverarbeitung war dabei von besonderem Interesse. Eine mechanische Kompatibilität (d.h. Verwendung des gleichen Steckers) war dabei eine Grundvoraussetzung, die so auch bei allen Demonstratoren umgesetzt wurde. Eine Pin-Kompatibilität wurde, soweit modulationsabhängig möglich, ebenfalls definiert und umgesetzt (siehe Abbildung 54).

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

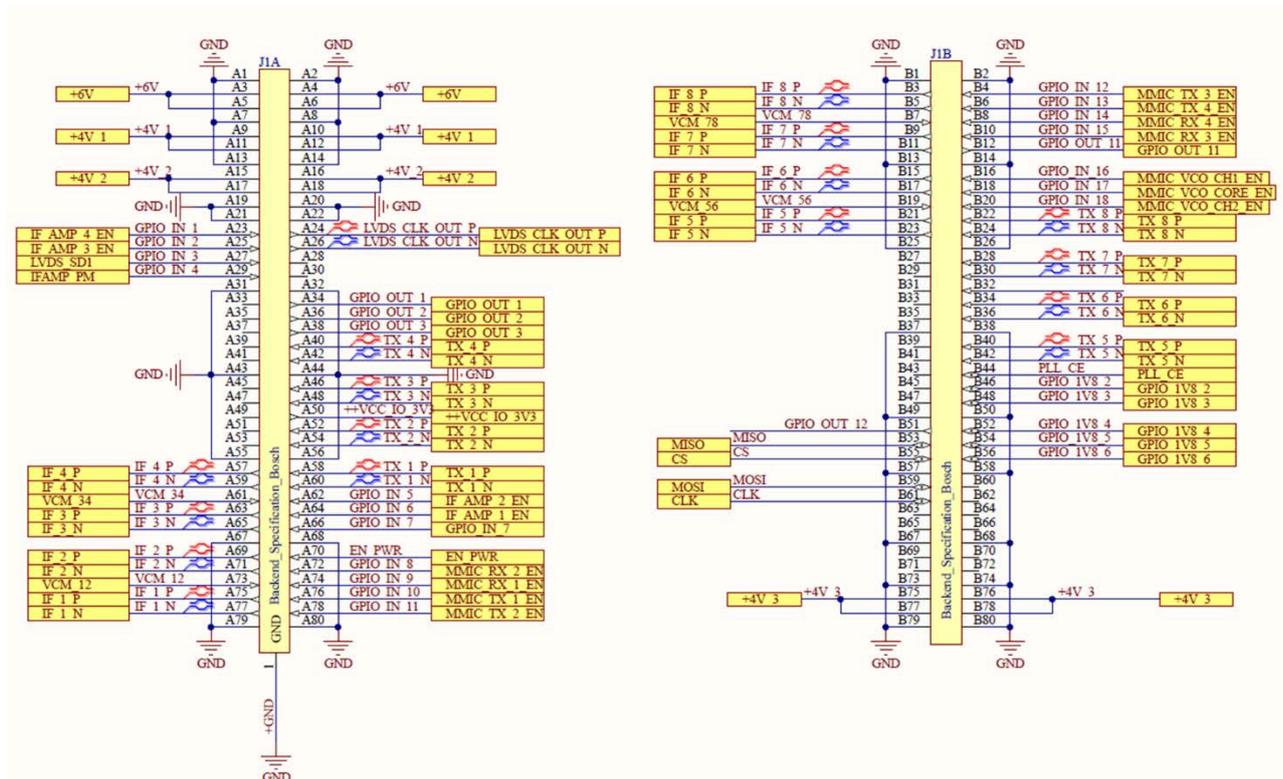


Abbildung 54: Pinbelegung der Frontend-Stecker X1 und X2 für DEM#2b

In dem AP5 wurden zusammen mit dem Fraunhofer ENAS Thermosimulationen des Bosch Radar Demonstrators #2a durchgeführt, um maximale Temperaturspitzen im Gehäuse zu identifizieren und das gesamte Entwärmungskonzept (nur passive Konvektion über Kühlrippen am Gehäuserückteil) zu validieren.

In Abbildung 55 ist die Vereinfachung des CAD-Modells des Prototypengehäuses und der Platinen gezeigt, damit eine Thermosimulation noch in einem erträglichen Zeitrahmen durchgeführt werden konnte. Überflüssige Rundungen, Kanten, Flächen und Leervolumen wurden entfernt und Bondkleber zum Befestigen von Bauteilen sowie Thermoleitpaste wurden vernachlässigt.

In Abbildung 56 sind die Simulationsergebnisse der thermischen Erwärmung des Radardemonstrators DEM#2a dargestellt. Die Erwärmung durch die thermische Verlustleistung der bestromten Bauteile führt zu einer maximalen Temperaturerhöhung von 59K über der Umgebungstemperatur.

Am Gehäuse selbst entstehen immer noch Temperaturen, die bei längerer Berührung zu leichten Verbrennungen an der Haut führen können.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

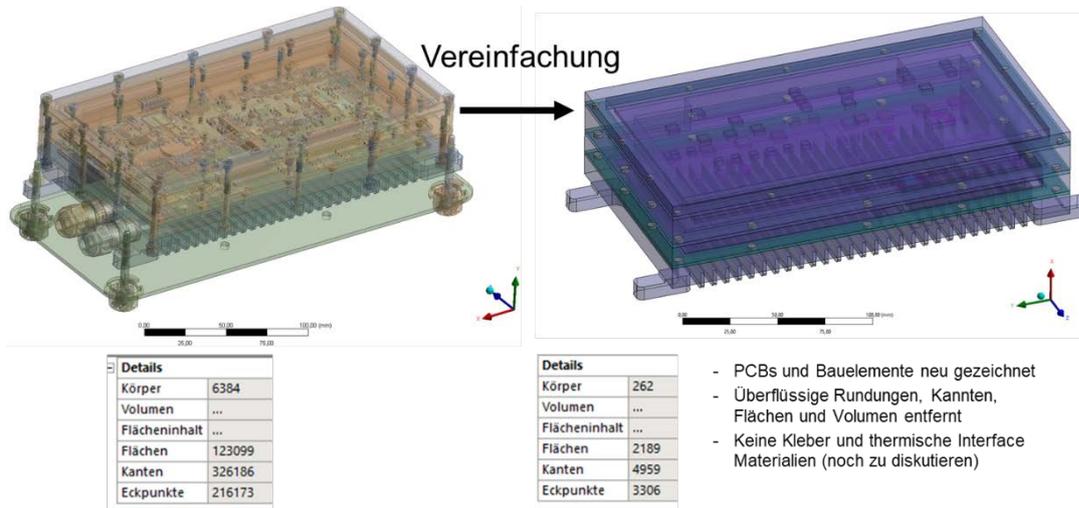


Abbildung 55: FEM für Thermosimulation (Vereinfachungen in der Modellierung)

Deshalb wurden am Gehäuse entsprechende Warnhinweise auf eine mögliche Verbrennungsgefahr angebracht. Im Fahrbetrieb am Auto ist durch die Luftkühlung mit einer geringeren Erwärmung zu rechnen, die sich jedoch im Standbetrieb durch Motorabwärme auch erhöhen kann.

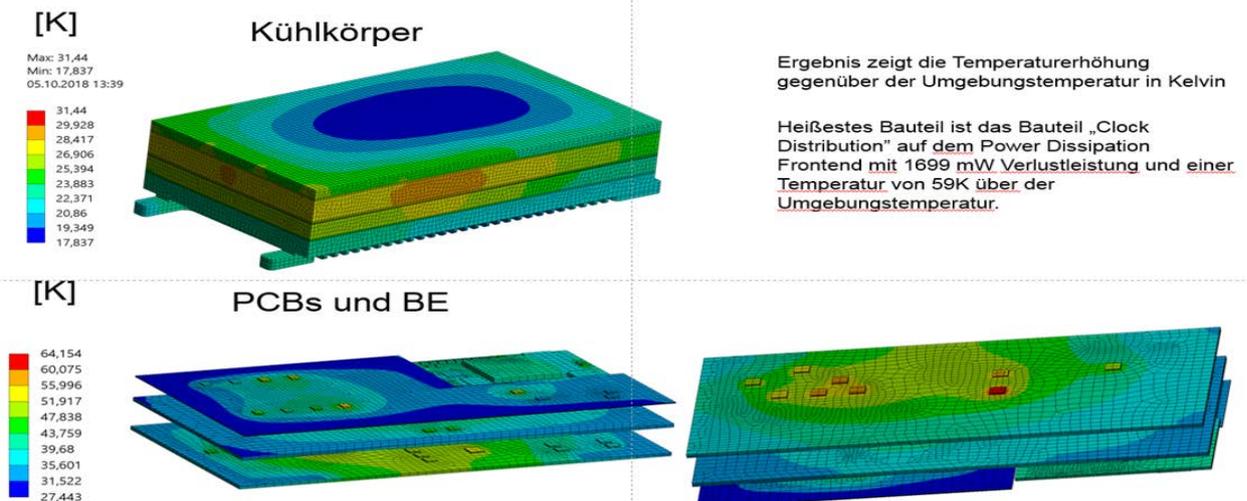


Abbildung 56: Thermosimulation des RB Demonstrators 2

Von  
CC/PJ-RAD

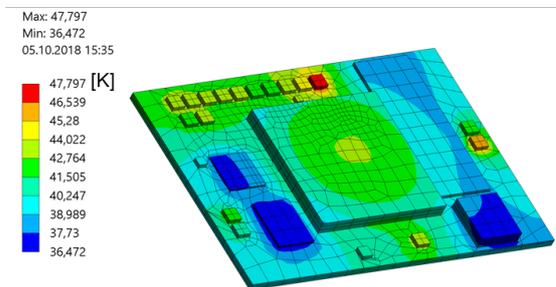
Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

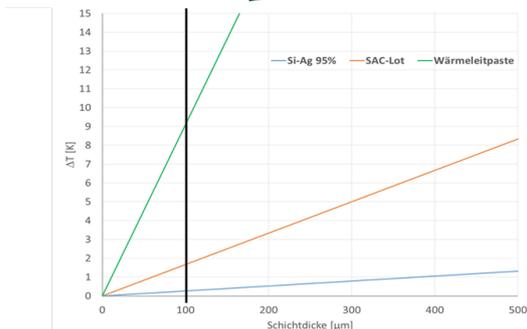
Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Die in Abbildung 56 aus der Simulation bestimmten Temperaturspitzen konnten in praktischen Messversuchen auch verifiziert werden. Bei Umgebungstemperaturen bis ca. 30°C ist ein prototypischer Betrieb des Radarsensors am Fahrzeug problemlos möglich. Der gesamte Radarsensor benötigt bei 12 Versorgungsspannung einen Betriebsstrom zwischen 4 und 5 Ampere, was einer Verlustleistung von 60W entspricht.



Optimale Anbindung an den Kühlkörper verhindert hohe Temperaturen.  
Thermische Interfacematerialien zwischen Bauelementen und Kühlkörper würden hier etwas höhere Temperaturen bedeuten.

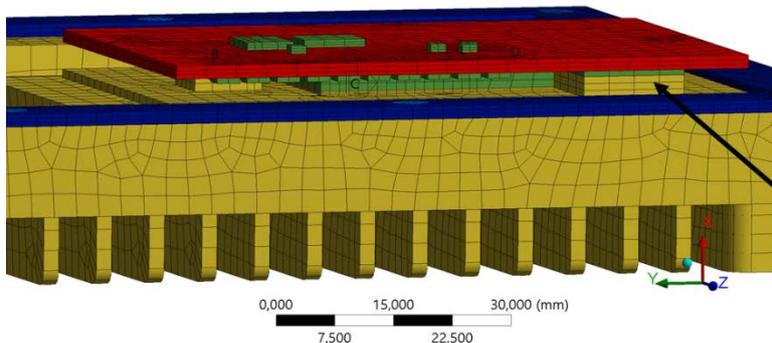


Angenommene spez. thermische Leitfähigkeiten k [W/(mK)]	
Si-Ag 95%	380
SAC-Lot	60
(gute) Wärmeleitpaste	11

Durch die einfache Beziehung  $T_2 - T_1 = \Delta T = \frac{d}{k}$  kann die erhöhte Temperatur gegenüber dem Kühlkörper auf den mit Wärmeleitpaste verbundenen Bauelementen berechnet werden. Hier würden sich also für eine 100μm dicke Wärmeleitpaste mit 11 W/mK ca. 9 Kelvin höhere Temperaturen ergeben.

Abbildung 57: Thermomessungen des Trenz FPGA Moduls

- dichtungen
- PCBs
- BE
- Heatsink
- Schrauben



Optimale Anbindung des Kühlkörpers an die FPGA Bauteile

Abbildung 58: Thermische Anbindung des Trenz-Moduls an das Gehäuse

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

In Abbildung 57 ist die thermische Simulation des Trenz FPGA-Moduls in Verbindung mit dem Gehäusekühlkörper mit entsprechenden Temperaturgradienten für Lötlot und Thermoleitpaste dargestellt. Abbildung 58 zeigt die mechanische Anbindung an das Gehäuse. Mit einer Thermokamera aufgenommene Bilder des DEM#2a sind in Abbildung 59 zu sehen.

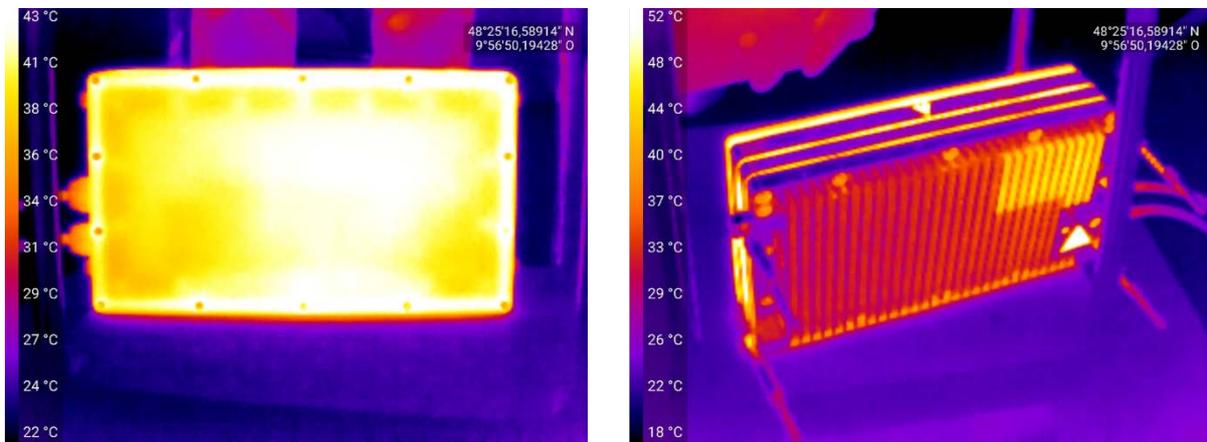


Abbildung 59: Thermomessungen am DEM#2a

Die erhöhte Temperaturabstrahlung des Trenz-FPGA Moduls ist in dem Bild rechts oben sehr gut zu beobachten. Die gleichmäßige Temperaturverteilung zeugt von einer guten Thermoanbindung.

Zusammen mit den Projektpartnern Fraunhofer ENAS und CWM wurden Scherkraftmessungen an seriennahen Radarmodulen durchgeführt.

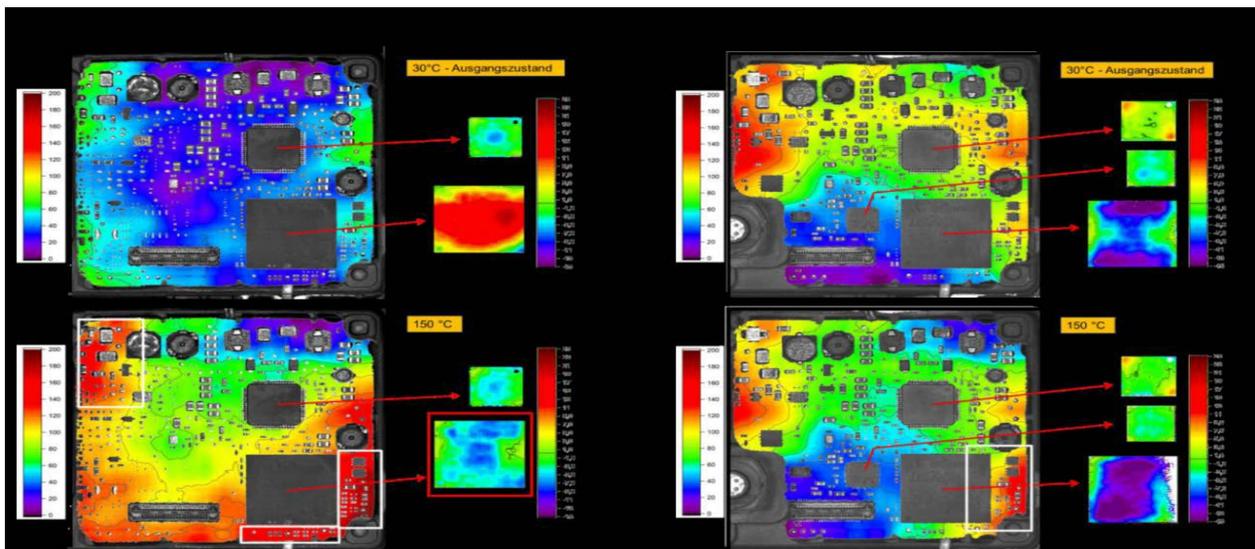


Abbildung 60: Verwölbungsmessungen an einem Vorserien-Radar Prototypen (rot=starke Verformung)

Von  
 CC/PJ-RAD

 Bearbeiter  
 Martin Kunert

 Telefon  
 +49 711 811-37468

 Leonberg  
 23.09.2020

 Bericht  
 Ausgabe Version 1.0  
 Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Dazu wurden zwei Vorserien-Radarsensoren einer thermo-mechanischen Stress-Untersuchung bei dem Projektpartner CWM zugeführt, die Aufschluss über die Scherkräfte an den Lötverbindungen und den daraus resultierenden Ausfallmechanismen brachten. In Abbildung 60 sind Teilergebnisse des Thermostresstests dargestellt.

Der virtuelle Demonstrator #3 diente den Projektpartnern in erster Linie zur Abschätzung des noch ungehobenen Potenzials beim Einsatz von optimalen Komponenten aus dem Radarbakasten. In Abbildung 61 ist der typische Parametersatz eines TDM FCS Radars angegeben. Die Wandlerraten der ADC Konverter liegen dabei typischerweise im niedrigen, zweistelligen MHz-Bereich. Die Bandbreite des FM-Sweeps ist unter 1 GHz und bewegt sich je nach Anwendungsfall zwischen einigen hundert Megahertz. Die Chirpdauer für eine Frequenzrampe liegt bei ca. 50µs und es werden typischerweise ca. 512 IF-Zeitsignalwerte hintereinander gesampled, welche damit einen kompletten Messdatenframe generieren. Mit entsprechenden Messpausen zwischen den Rampen (Duty cycle ca. 25%) ergibt sich damit eine Beobachtungszeit von 10 bis 20 ms. Der Prozessgewinn, welcher sich aus der Anzahl der Samplewerte und der Rampenanzahl berechnet, ist mit typisch 51 dB schon recht ansprechend, aber bei weitem noch nicht vollständig ausgereizt.

Symbol	Parameter	Value
$f_c$	Center frequency	76,5 GHz
$K$	Num. of chirps	256
$ADC_{freq}$	ADC sampling frequency	10 MHz
$ADC_{bit}$	ADC number of bits	12 bit
$B$	Total chirp sequence bandwidth	0.3 GHz
$T_{chirp}$	Single chirp duration	50 µs
$FFT_{Range}$	FFT size for Range	512
$FFT_{RangeDoppler}$	FFT size for RangeDoppler (c.f. K)	256
$T_{meas}$	Total measurement duration	10 ms
$\Delta R_r$	Radial range resolution	0,5 m
$\Delta v_r$	Radial velocity resolution	0,2 m/s
$R_r^{max}$	Max. radial unambiguous range	250 m
$V_r^{max}$	Max. radial unambiguous velocity	±55,6 m/s
$G_p$	Processing gain	51 dB

Abbildung 61: TDM FCS Radar – State-of-the-Art Parametersatz

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Der ideale Parametersatz für ein SIMO TDM FCS Radar steht in Abbildung 62.

Symbol	Parameter	Value
$f_c$	Center frequency	78,5 GHz
$K$	Num. of chirps	1000
$ADC_{freq}$	ADC sampling frequency	430 MHz
$ADC_{bit}$	ADC number of bits	16 bit
$B$	Total chirp sequence bandwidth	5 GHz
$T_{chirp}$	Single chirp duration	20 $\mu$ s
$FFT_{Range}$	FFT size for Range	8196
$FFT_{RangeDoppler}$	FFT size for RangeDoppler	512
$T_{meas}$	Total measurement duration	20 ms
$\Delta R_r$	Radial range resolution	0,03 m
$\Delta v_r$	Radial velocity resolution	0,1 m/s
$R_r^{max}$	Max. radial unambiguous range	122 m
$V_r^{max}$	Max. radial unambiguous velocity	$\pm 47$ m/s
$G_p$	Processing gain	$\sim 70$ dB

**Abbildung 62: TDM FCS Radar (SIMO) – idealer Parametersatz**

Hier ist, unter Berücksichtigung der gegenseitigen physikalischen Abhängigkeiten der relevanten KPIs, der optimale mögliche Parametersatz für ein SIMO Radar mit einem einzigen Sendekanal definiert. Der Prozessierungsgewinn gegenüber dem State-of-the-Art Radar ist um ca. 16 dB höher.

Symbol	Parameter	Value
$f_c$	Center frequency	78,5 GHz
$K$	Num. of chirps	1000/num_TX
$ADC_{freq}$	ADC sampling frequency	430 MHz
$ADC_{bit}$	ADC number of bits	16 bit
$B$	Total chirp sequence bandwidth	5 GHz
$T_{chirp}$	Single chirp duration	20 $\mu$ s
$FFT_{Range}$	FFT size for Range	8196
$FFT_{RangeDoppler}$	FFT size for RangeDoppler	512
$T_{meas}$	Total measurement duration	20 ms
$\Delta R_r$	Radial range resolution	0,03 m
$\Delta v_r$	Radial velocity resolution	0,1 m/s
$R_r^{max}$	Max. radial unambiguous range	122 m
$V_r^{max}$	Max. radial unambiguous velocity	$\pm 47$ m/s / num_TX
$G_p$	Processing gain	$\sim 70$ dB

**Abbildung 63: TDM FCS Radar (MIMO) – idealer Parametersatz (max. R optimiert)**

Von  
 CC/PJ-RAD

 Bearbeiter  
 Martin Kunert

 Telefon  
 +49 711 811-37468

 Leonberg  
 23.09.2020

 Bericht  
 Ausgabe Version 1.0  
 Thema Radar4FAD Abschlussbericht

In Abbildung 63 und Abbildung 64 sind die idealen Parametersätze für ein MIMO TDM FCS Radar dargestellt.

Symbol	Parameter	Value
$f_c$	Center <u>frequency</u>	78,5 GHz
$K$	Num. of <u>chirps</u>	1000
$ADC_{freq}$	ADC <u>sampling frequency</u>	430 MHz
$ADC_{bit}$	ADC <u>number of bits</u>	16 bit
$B$	Total <u>chirp sequence bandwidth</u>	5 GHz
$T_{chirp}$	Single <u>chirp duration</u>	20 $\mu$ s/num_TX
$FFT_{Range}$	FFT size for <u>Range</u>	8196/num_TX
$FFT_{RangeDoppler}$	FFT size for <u>RangeDoppler</u>	512
$T_{meas}$	Total <u>measurement duration</u>	20 ms
$\Delta R_r$	Radial <u>range resolution</u>	0,03 m
$\Delta v_r$	Radial <u>velocity resolution</u>	0,1 m/s
$R_r^{max}$	Max. radial <u>unambiguous range</u>	122 m/num_TX
$V_r^{max}$	Max. radial <u>unambiguous velocity</u>	$\pm$ 47 m/s
$G_p$	Processing <u>gain</u>	$\sim$ 70 dB

**Abbildung 64: TDM FCS Radar (MIMO) – idealer Parametersatz (max. v optimiert)**

Im ersten Fall sind die Parameter auf maximale Entfernungseindeutigkeit ausgelegt, der zweite Parametersatz ist auf größtmöglichen, eindeutigen Geschwindigkeitsbereich hin optimiert.

Allen drei idealen Parametersätzen ist der maximale Prozessgewinn von 70 dB gemeinsam, der mit ca. 16 dB weit über den State-of-the-Art Radarparametern liegt und mehr als eine Verdopplung der maximalen Detektionsreichweite bedeutet (16 dB entspricht dem Faktor 2,512 bei der Freiraumdämpfung). Natürlich ist es auch möglich, den „idealen“ Parametersatz auf noch höhere Eindeutigkeitsbereiche sowohl für Entfernung als auch für Geschwindigkeit auszulegen. Dies geht dann aber auf Kosten des Prozessierungsgewinns, da die abhängigen Betriebsparameter dann nicht mehr maximal angesteuert werden können (z.B. kann dann die maximal erlaubte Chirp-Bandbreite von 5 GHz nicht mehr vollständig abgefahren werden bzw. die Chirp-Dauer oder die Anzahl der Chirp-Rampen wird kleiner).

Für den Demonstrator #2b (All Digital Radar, entstanden in der Zusammenarbeit der Ruhr Universität Bochum und Bosch) wurde anhand der OFDM Modulation ein State-of-the-Art Parametersatz in Anlehnung an die Realisierungen der Demonstratoren aus Stufe 1 (i.e. DEM#1a und



Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht

Ausgabe Version 1.0

Thema Radar4FAD Abschlussbericht

DEM#1b) zusammengestellt (siehe Abbildung 65 für den SIMO Betrieb und Abbildung 66 für den MIMO Betrieb).

Symbol	Parameter	Value
$f_c$	Center frequency	76,5 GHz
$M$	Num. of OFDM symbols	4096
$N$	Num. of possible subcarriers	2048
$N_{\text{eff}}$	Num. of effectively used subcarriers	1536
$N_{\text{cp}}$	Cyclic prefix length	512
$ADC_{\text{freq}}$	ADC/DAC sampling frequency	1 GHz
$ADC_{\text{bit}}$	ADC/DAC number of bits	16 bit
$B$	Total signal bandwidth	0,75 GHz
$T_{\text{symbol}}$	OFDM symbol duration (without cyclic prefix)	2,05 $\mu$ s
$FFT_{\text{Range}}$	FFT size for Range	2048
$FFT_{\text{RangeDoppler}}$	FFT size for RangeDoppler	4096
$T_{\text{meas}}$	Total measurement duration	10,5 ms
$\Delta R_r$	Radial range resolution	0,2 m
$\Delta v_r$	Radial velocity resolution	0,19 m/s
$R_r^{\text{ua}}$	Max. radial unambiguous range	307 m
$R_r^{\text{max}}$	Max. radial range (cyclic prefix length)	77 m
$V_r^{\text{ua}}$	Max. radial unambiguous velocity	$\pm 383$ m/s
$V_r^{\text{max}}$	Max. radial velocity ( $f_{D,\text{max}} < \Delta f/10$ )	$\pm 96$ m/s
$G_p$	Processing gain	68 dB

Abbildung 65: SIMO ADR OFDM State-of-the-Art Parametersatz

Von  
 CC/PJ-RAD

 Bearbeiter  
 Martin Kunert

 Telefon  
 +49 711 811-37468

 Leonberg  
 23.09.2020

Bericht

Ausgabe Version 1.0

Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Symbol	Parameter	Value
$f_c$	Center frequency	76,5 GHz
$M$	Num. of OFDM symbols	4096
$N$	Num. of possible subcarriers	2048
$N_{\text{eff}}$	Num. of effectively used subcarriers	1536
$N_{\text{cp}}$	Cyclic prefix length	512
$ADC_{\text{freq}}$	ADC/DAC sampling frequency	1 GHz
$ADC_{\text{bit}}$	ADC/DAC number of bits	16 bit
$B$	Total signal bandwidth	0,75 GHz
$T_{\text{symbol}}$	OFDM symbol duration (without cyclic prefix)	2,05 $\mu$ s
$FFT_{\text{Range}}$	FFT size for Range	2048 (2048/num_TX for each channel)
$FFT_{\text{RangeDoppler}}$	FFT size for RangeDoppler	4096
$T_{\text{meas}}$	Total measurement duration	10,5 ms
$\Delta R_r$	Radial range resolution	0,2 m
$\Delta v_r$	Radial velocity resolution	0,19 m/s
$R_r^{\text{ua}}$	Max. radial unambiguous range (for subcarrier interleaving)	307 m / num_TX
$R_r^{\text{max}}$	Max. radial range (cyclic prefix length)	77 m
$V_r^{\text{ua}}$	Max. radial unambiguous velocity	$\pm 383$ m/s
$V_r^{\text{max}}$	Max. radial velocity ( $f_{D,\text{max}} < \Delta f/10$ )	$\pm 96$ m/s
$G_p$	Processing gain (inclusive Tx beamforming gain)	68 dB

**Abbildung 66: MIMO ADR OFDM State-of-the-Art Parametersatz (mit Subcarrier Interleave)**

Im Vergleich zum TDM FCS Radar State-of-the-Art Parametersatz sind beim ADR OFDM Radar die Betriebswerte signifikant anspruchsvoller, was sich eins-zu-eins auch in einem höheren Hardware-Aufwand niederschlägt.

Von  
 CC/PJ-RAD

 Bearbeiter  
 Martin Kunert

 Telefon  
 +49 711 811-37468

 Leonberg  
 23.09.2020

 Bericht  
 Ausgabe      Version 1.0  
 Thema        Radar4FAD Abschlussbericht

In Abbildung 67 ist der ideale Parametersatz für einen ADR SIMO OFDM Radar aufgeführt, bei dem die maximale Bandbreite von 4,375 GHz (abzüglich des Cycle Prefix und der Guard-Bänder) und eine Messdauer von 13,4 ms angenommen sind.

Symbol	Parameter	Value
$f_c$	Center frequency	78,5 GHz
$M$	Num. of OFDM symbols	4096
$N$	Num. of possible subcarriers	8192
$N_{\text{eff}}$	Num. of effectively used subcarriers	7168
$N_{\text{cp}}$	Cyclic prefix length	8192
$ADC_{\text{freq}}$	ADC/DAC sampling frequency	5 GHz
$ADC_{\text{bit}}$	ADC/DAC number of bits	16 bit
$B$	Total signal bandwidth	4,375 GHz
$T_{\text{symbol}}$	OFDM symbol duration (without cyclic prefix)	1,64 $\mu$ s
$FFT_{\text{Range}}$	FFT size for Range	8192
$FFT_{\text{RangeDoppler}}$	FFT size for RangeDoppler	4096
$T_{\text{meas}}$	Total measurement duration	13,4 ms
$\Delta R_r$	Radial range resolution	0,034 m
$\Delta v_r$	Radial velocity resolution	0,14 m/s
$R_r^{\text{ua}}$	Max. radial unambiguous range	246 m
$R_r^{\text{max}}$	Max. radial range (cyclic prefix length)	246 m
$V_r^{\text{ua}}$	Max. radial unambiguous velocity	$\pm 292$ m/s
$V_r^{\text{max}}$	Max. radial velocity ( $f_{D,\text{max}} < \Delta f/10$ )	$\pm 117$ m/s
$G_p$	Processing gain	75 dB

Abbildung 67: ADR SIMO OFDM - idealer Parametersatz

In Abbildung 68 ist der ideale Parametersatz für einen ADR MIMO OFDM Radar aufgeführt, bei dem Subcarrier Interleave eingesetzt ist.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht

Ausgabe Version 1.0

Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Symbol	Parameter	Value
$f_c$	Center frequency	78,5 GHz
$M$	Num. of OFDM symbols	4096
$N$	Num. of possible subcarriers	8192 (8192/num. TX for each channel)
$N_{\text{eff}}$	Num. of effectively used subcarriers	7168
$N_{\text{cp}}$	Cyclic prefix length	8192
$ADC_{\text{freq}}$	ADC/DAC sampling frequency	5 GHz
$ADC_{\text{bit}}$	ADC/DAC number of bits	16 bit
$B$	Total signal bandwidth	4,375 GHz
$T_{\text{symbol}}$	OFDM symbol duration (without cyclic prefix)	1,64 $\mu$ s
$FFT_{\text{Range}}$	FFT size for Range	8192 (8192/num. TX for each channel)
$FFT_{\text{RangeDoppler}}$	FFT size for RangeDoppler	4096
$T_{\text{meas}}$	Total measurement duration	13,4 ms
$\Delta R_r$	Radial range resolution	0,034 m
$\Delta V_r$	Radial velocity resolution	0,14 m/s
$R_r^{\text{ua}}$	Max. radial unambiguous range (for subcarrier interleaving)	246 m / num. TX
$R_r^{\text{max}}$	Max. radial range (cyclic prefix length)	246 m
$V_r^{\text{ua}}$	Max. radial unambiguous velocity	$\pm 292$ m/s
$V_r^{\text{max}}$	Max. radial velocity ( $f_{\text{D,max}} < \Delta f/10$ )	$\pm 117$ m/s
$G_p$	Processing gain (inclusive Tx beamforming gain)	75 dB

**Abbildung 68: ADR MIMO OFDM – idealer Parametersatz 1 (mit Subcarrier Interleave)**

In Abbildung 69 ist der ideale Parametersatz für einen ADR MIMO OFDM Radar aufgeführt, diesmal jedoch nicht mit Subcarrier Interleave sondern mit TDM.

Die beiden ADR MIMO OFDM Parametersätze haben mit 75 dB Prozessierungsgewinn den absolut höchsten Wert, der nochmals um 5 dB über den idealen Parametersätzen der TDM FCS Radare liegt. Im Vergleich zu den State-of-the-Art TDM FCS MIMO Radaren ist damit der Prozessierungsgewinn um ca. 21 dB höher, was wiederum eine Reichweitenerhöhung um den Faktor 3,35 nach sich zieht und damit nochmals ca. 33% höher als die Reichweitenerhöhung der idealen TDM FCS MIMO Radare liegt.

Bei den OFDM Radaren ist Prinzip bedingt der Eindeutigkeitsbereich für Entfernung und Geschwindigkeit wesentlich höher als bei den frequenzmodulierten Radaren. Daher ist es möglich,

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

durch Reduzierung dieser Werte einen anderen Betriebsparameter noch weiter zu optimieren oder aber auch ein modifiziertes Modulationsschema anzuwenden.

Symbol	Parameter	Value
$f_c$	Center frequency	78,5 GHz
$M$	Num. of OFDM symbols	4096 (4096/num. TX for each channel)
$N$	Num. of possible subcarriers	8192
$N_{eff}$	Num. of effectively used subcarriers	7168
$N_{cp}$	Cyclic prefix length	8192
$ADC_{freq}$	ADC/DAC sampling frequency	5 GHz
$ADC_{bit}$	ADC/DAC number of bits	16 bit
$B$	Total signal bandwidth	4,375 GHz
$T_{symbol}$	OFDM symbol duration (without cyclic prefix)	1,64 $\mu$ s
$FFT_{Range}$	FFT size for Range	8192
$FFT_{RangeDoppler}$	FFT size for RangeDoppler	4096 (4096/num. TX for each channel)
$T_{meas}$	Total measurement duration	13,4 ms
$\Delta R_r$	Radial range resolution	0,034 m
$\Delta V_r$	Radial velocity resolution	0,14 m/s
$R_r^{ua}$	Max. radial unambiguous range (for subcarrier interleaving)	246 m
$R_r^{max}$	Max. radial range (cyclic prefix length)	246 m
$V_r^{ua}$	Max. radial unambiguous velocity	$\pm 292$ m/s / num. TX
$V_r^{max}$	Max. radial velocity ( $f_{D,max} < \Delta f/10$ )	$\pm 117$ m/s
$G_p$	Processing gain (inclusive Tx beamforming gain)	75 dB

Abbildung 69: ADR MIMO OFDM – idealer Parametersatz 2 (mit TDM)

In einem weiteren Arbeitspaket von AP5 wurden die Einflussfaktoren bezüglich Kosten bei der Herstellung von Automobilradarsensoren analysiert.

In Abbildung 70 sind die Einflussfaktoren auf die Kosten eines Radarproduktes zu sehen. Die Wirkfaktoren geben eine Einschätzung darüber ab, inwieweit der entsprechende Kostenposten den Gesamtpreis des Produktes beeinflussen kann. Bei VVK (Vertriebs- und Verwaltungskosten) und EBIT (Gewinnmarge) sind die Wirkfaktoren verständlicherweise nicht besonders hoch.

Das Wirkpotenzial bei den Materialkosten wurde vom Konsortium als am weitreichendsten eingestuft, da z.B. durch die Wahl eines entsprechenden Technologieknotens (z.B. 130nm SiGe oder 45nm CMOS oder 7nm FinFET) sich die Chipfläche quadratisch ändert und hier leicht Faktoren im zwei- bis dreistelligen Bereich möglich sind.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht



Abbildung 70: Einflussfaktoren auf die Kosten eines Radarproduktes

In Abbildung 71 sind die verschiedenen Radargenerationen von Bosch zu sehen.



Abbildung 71: Die Radar-Generationen von Bosch

Es ist zu erkennen, dass sich über die Generationen sowohl die Technologie (Integration in komplexere ICs) als auch die Anzahl der Sende- und Empfangskanäle geändert hat. Gleichzeitig hat sich der Herstellungspreis bei steigender Performanz deutlich reduziert.

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

In Abbildung 72 ist der rasante Entwicklungsfortschritt bei der Chipintegration zu sehen. Mit 320 TOPS ist eine Rechenleistung erreicht, die für das hochautomatisierte Fahren angemessen zu sein scheint.

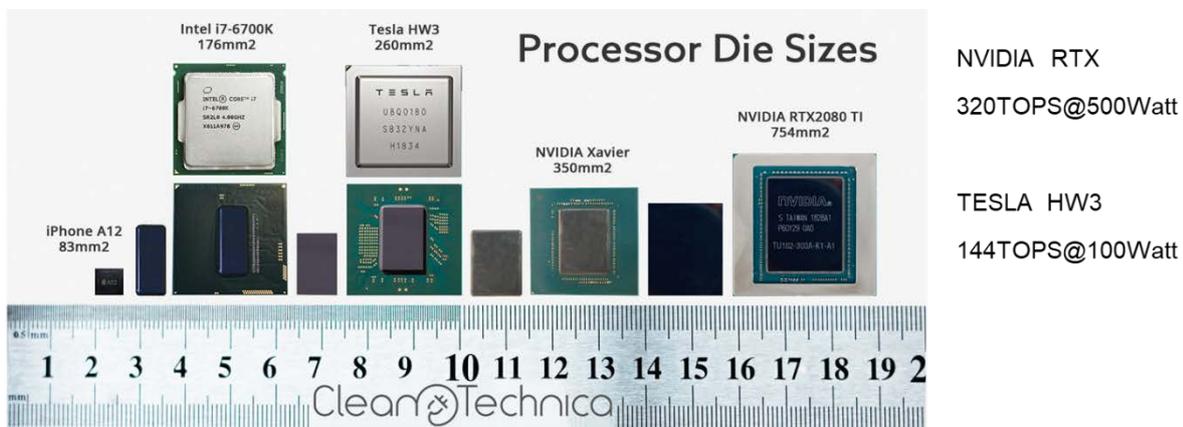
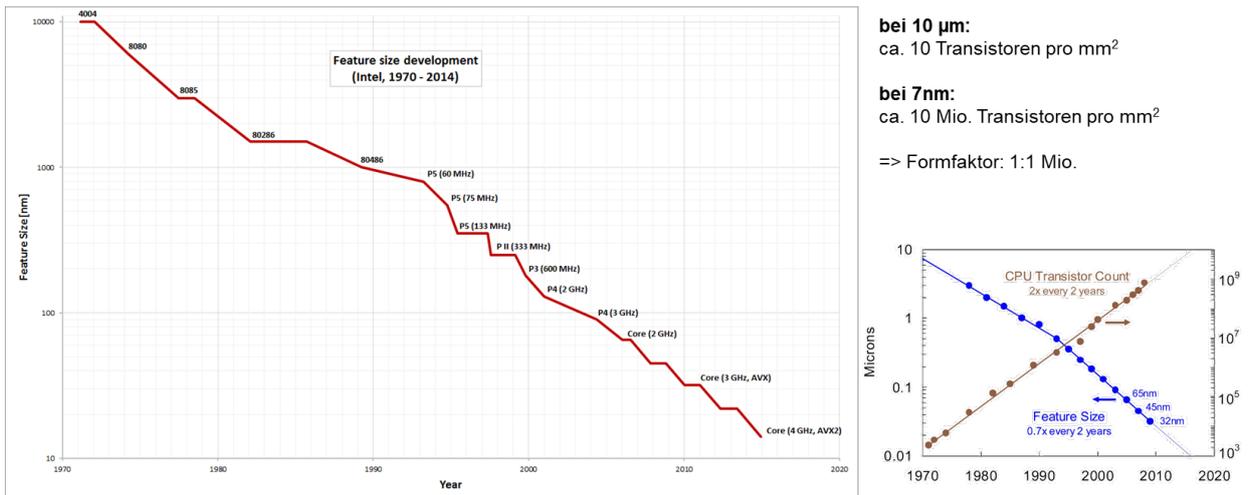


Abbildung 72: Der rasante Wettlauf in der Chipintegration

Innerhalb von 50 Jahren haben es die Halbleiterfirmen geschafft, die Strukturgröße bei ICs von 10µm auf 7 nm zu reduzieren, was einem Formfaktor von 1 Mio. entspricht (Abbildung 73).



Von 10 µm in 1970 zu 7nm in 2019 mit quadratischen Skalierungseffekt über die Fläche

Abbildung 73: Entwicklung der Strukturgröße von 1970 bis 2019

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe  
Thema

Version 1.0  
Radar4FAD Abschlussbericht



### Intel – from 10nm to 1.4nm until 2029

Abbildung 74: Intel Roadmap bis 2029

In Abbildung 74 und Abbildung 75 sind die nm-Knoten von Intel, GlobalFoundries, TSMC und Samsung zu sehen.

### Samsung und TSMC nm-Knoten

Advertised PPA Improvements of New Process Technologies						
Data announced by companies during conference calls, press briefings and in press releases						
	GF	Samsung				
	7nm DUV vs 14LPP	14LPP vs 28LPP	10LPE vs 14LPE	10LPE vs 14LPP	10LPP vs 10LPE	10LPU vs 10LPE
Power	>60%	60%	40%	30%	~15%	?
Performance	>30%	40%	27%	>10%	~10%	?
Area Reduction	>50%	50%	30%	30%	none	?
	TSMC					
	16FF+ vs 28HPM	16FF+ vs 20SOC	10FF vs 16FF+	7FF vs 16FF+	7FF vs 10FF	
Power	70%	60%	40%	60%	<40%	
Performance	65%	40%	20%	30%	?	
Area Reduction	~50%	none	>50%	70%	>37%	

Abbildung 75: Die nm-Knoten von GlobalFoundries, Samsung und TSMC

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

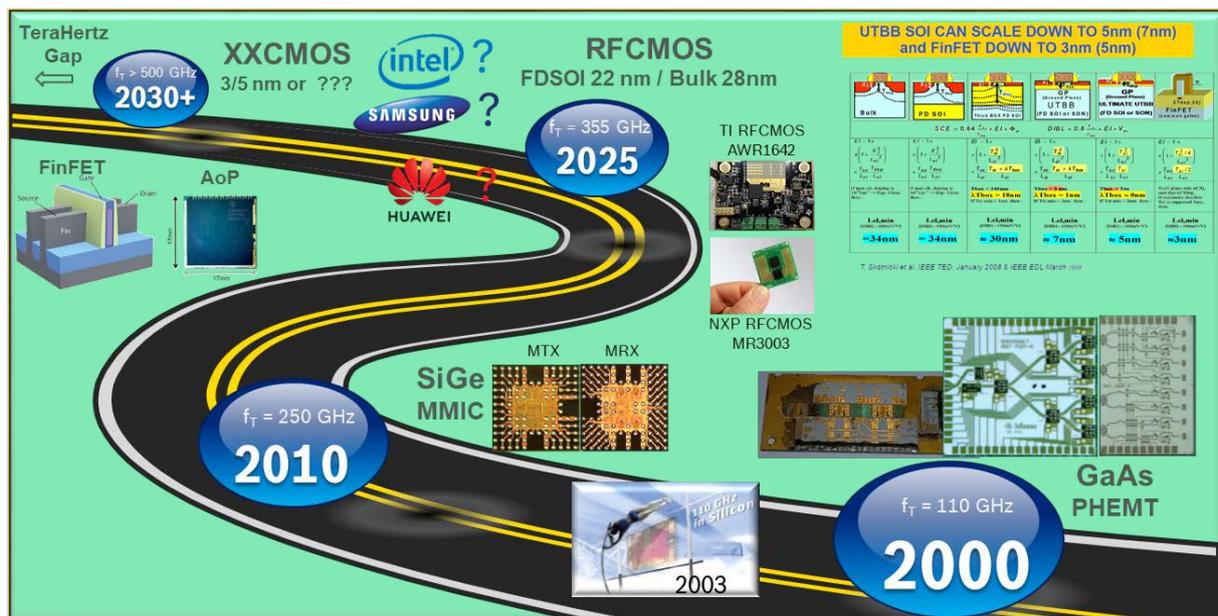
Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Neben der Migration in immer kleinere Technologieknoten (die wohl früher oder später an eine natürliche Grenze konvergieren wird) wird durch die Parallelisierung von Recheneinheiten (sogenannte Manycores) ein zukünftig noch signifikanter Performance-Boost zu erwarten sein, der praktisch unlimitiert ist und bei SiP (System in Package) Konzepten zu beliebig großen Manycore Modulen führt.

In Abbildung 76 ist die Technologieroadmap für Radarsensoren dargestellt. Ob es letztendlich zur Schließung der Terahertz-Lücke hin zu den langwelligen Infrarotsensoren mit 10 µm Wellenlänge kommt, bleibt abzuwarten.



AoP: Antenna on Package FDSOI: Fully Depleted Silicon On Insulator FinFET: Fin Field Effect Transistor GaAs: Gallium Arsenid MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuit  
MRX: Receive MMIC MTX: Transmit MMIC PHEMT: Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor SiGe: Silicium Germanium UTBB: Ultra-thin body and buried oxide

Abbildung 76: Technologieroadmap für Radarsensoren

Ob ein Radarbetrieb im TeraHertz-Bereich überhaupt noch sinnvoll ist, bleibt den Untersuchungen in zukünftigen Forschungsarbeiten vorbehalten.

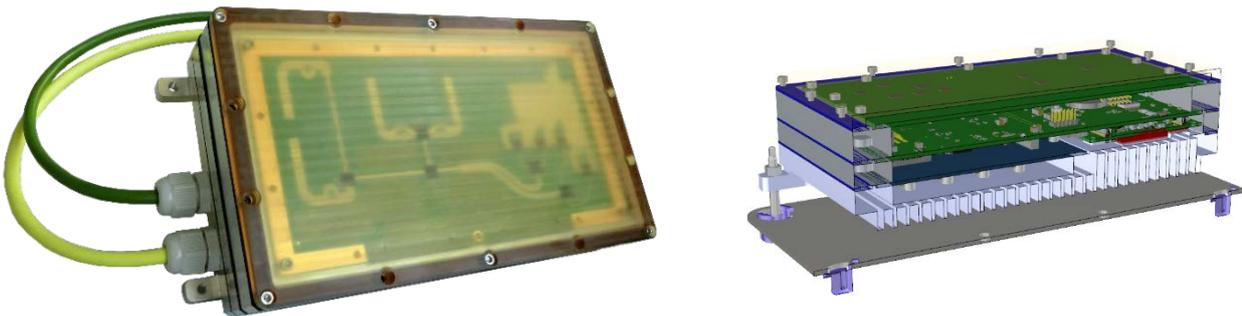
### 2.1.5 AP6 - RADAR-Modul Demonstration, Test und Evaluierung

In AP6 wurde ein Testkatalog zum Validieren und „Benchmarken“ der verschiedenen Radardemonstratoren aufgestellt. Ziel war es dabei, die verschiedenen Modulationsverfahren möglichst objektiv und fair miteinander zu vergleichen.

Von  
CC/PJ-RADBearbeiter  
Martin KunertTelefon  
+49 711 811-37468Leonberg  
23.09.2020Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

Durch den Einsatz von identischen oder zumindest baugleichen Basisband-Signalverarbeitungsplatinen sollte die Grundvoraussetzung für einen unverfälschten Vergleich gegeben sein. Bezüglich der Anzahl der Sende(TX)- und Empfangs(RX)-Kanäle wurde bei allen Modulationsarten jeweils dieselbe Anzahl verwendet. Dies war im einfachsten Testfall je ein Sende- und Empfangskanal (1TX, 1RX) und wurde je nach Kanalverfügbarkeit der entsprechenden Demonstratoren entsprechend erweitert. Die Betriebsparameter „benutzte Bandbreite“ und „Meßdauer“ werden entsprechend den Parametervorgaben für die verschiedenen Ausprägungsformen eingestellt.

Der Bosch Demonstrator #2a benötigt für den Einsatz von Messungen am Fahrzeug sowohl ein kompaktes als auch wasserdichtes Gehäuse.



**Abbildung 77: Bosch Demonstrator #2a**

Abbildung 77 zeigt den finalen Entwicklungsstand des Radar Demonstrator's #2a von Bosch. Die komplette Signalverarbeitungseinheit inkl. FPGA (Xilinx Zync MPSoC) ist im Gehäuse untergebracht. Eine Stromversorgung und eine Ethernet-Leitung sind die einzigen Verbindungen nach außen. Die HW Entwicklung wurde im Dez. 2018 mit der Leiterplatten- und Gehäusefertigung abgeschlossen. In 2019 und bis zum Projektende zum Juli 2020 standen dann die SW Entwicklung, basierend auf ROS (Robot Operation System) und embedded Linux im Vordergrund. Die Gehäusedimensionen wurden so konzipiert, dass auch die ADR Dem#2b (Kür)version darin genügend Platz fand.

Um eine bessere Winkelauflösung bei Radarsensoren zu erzielen, sind sehr große Antennenaperturen nötig, die sich in einer großen Anzahl von Empfangsantennen manifestiert. Dies hat eine große Anzahl an Datenkonvertern (ADCs) und demzufolge viel Datenspeicher zur Folge. Eine Optimierungsmöglichkeit zur Reduzierung des Hardware-Aufwandes besteht darin, ein

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

MIMO (Multiple Input, Multiple Output) Konzept zu verwenden, bei dem durch die Hinzunahme von mehreren Sendepfaden die Anzahl der Empfangskanäle signifikant gesenkt werden kann.

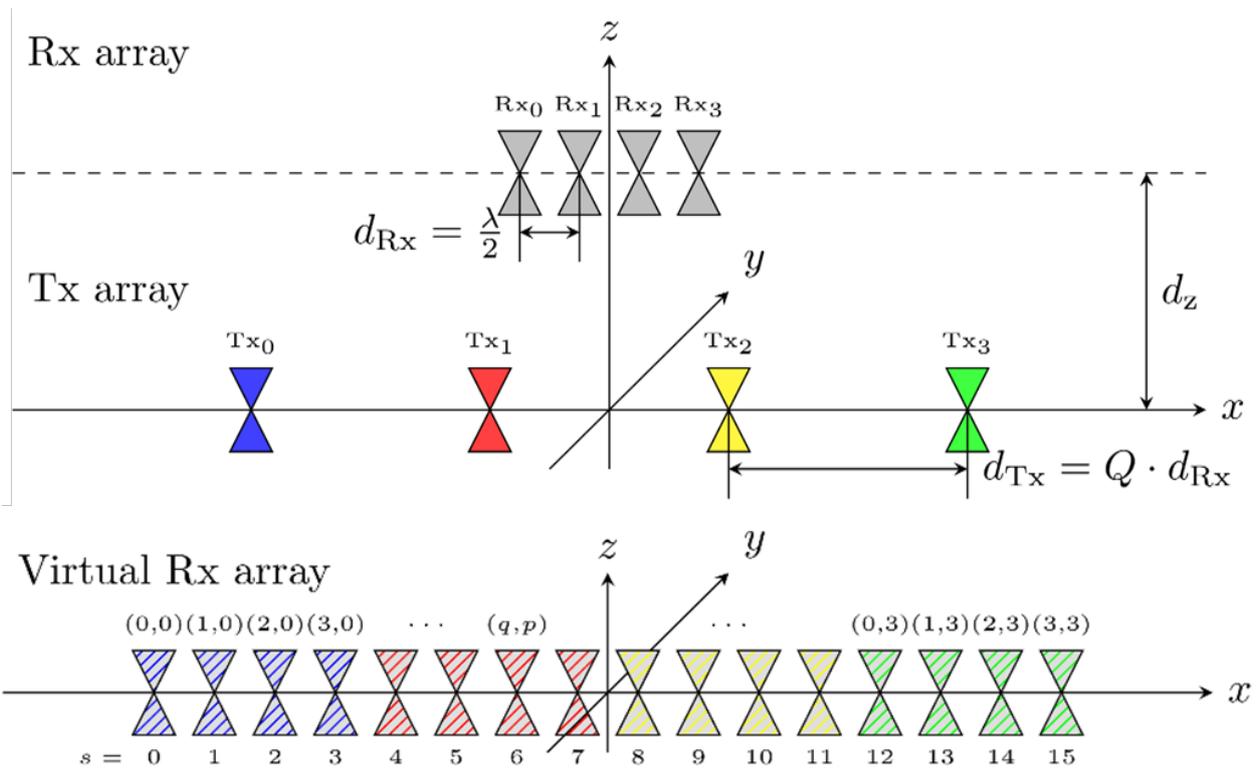


Abbildung 78: MIMO Antennen Array mit 4 TX und 4 RX Kanälen

In Abbildung 78 ist eine 4TX/4RX MIMO Antennenkonfiguration dargestellt. Durch die geschickte Anordnung der Sendeantennen ergibt sich daraus ein virtuelles Empfangsarray von 16 Kanälen (mit nur 4 physisch vorhandenen Empfangskanälen).

Der Betrieb der TX Sendeantennen geschieht üblicherweise mit einem der folgenden Verfahren:

- TDM (Time Division Multiplexing)
- (O)FDM ([Orthogonal] Frequency Division Multiplexing)
- CDM (Code Division Multiplexing)

Jedes dieser Verfahren hat intrinsische Vor- und Nachteile, die im Folgenden genauer beschreiben sind:

- Vorteile von TDM Chirp Sequence:
  - Beibehaltung der Signalbandbreite und damit der Entfernungsauflösung  $\Delta R_r$

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht

Ausgabe Version 1.0

Thema Radar4FAD Abschlussbericht

- Nur ein Oszillator bei einer Trägerfrequenz wird benötigt, da immer nur 1 TX aktiv ist
- Nachteile von TDM Chirp Sequence:
  - Verringerung des Eindeutigkeitsbereichs der Geschwindigkeit  $|v_r^{\text{unamb}}|$ , da verringerte Abtastung in Zeitrichtung pro TX-RX-Paar
  - Leichter Zeit- bzw. Phasenversatz zwischen den Radarbildern der verschiedenen TX (Stichwort: Motion Compensation)
  - Umschalter zwischen den TX-Kanälen werden benötigt
  - Die MIMO Zykluszeit ist länger wegen sequentieller TX Ansteuerung
- Vorteile von (O)FDM Chirp Sequence:
  - Alle Sender sind gleichzeitig aktiv
    - dadurch kein Zeit- bzw. Phasenversatz zwischen den Radarbildern der TX-RX-Paare
    - keine Verringerung des Eindeutigkeitsbereichs der Geschwindigkeit  $|v_r^{\text{unamb}}|$
    - Bei OFDM außerdem: Keine Erhöhung der Gesamtbandbreite
- Nachteile von (O)FDM Chirp Sequence:
  - Entweder Verringerung der Bandbreite jedes einzelnen Senders bei Beibehaltung der Gesamtbandbreite oder Erhöhung der Gesamtbandbreite bei Beibehaltung der Einzelbandbreite jedes TX (nur bei reinem FDM)
  - Mehrere frequenzversetzte parallele Oszillatoren werden benötigt (Frequenzversatz muss sehr genau bekannt bzw. eingestellt werden können), oder ein DA-Wandler auf der Sendeseite
  - Erhöhung der Abtastrate im Empfänger durch gleichzeitige Abtastung mehrerer frequenzversetzter Signale um circa Faktor  $P$  ( $P$  mal TX Antennen) oder  $P$  mal ADC für jeden TX (bei reinem FDM), bzw. erhöhte Abtastrate durch Verwendung von breitbandigen Signalen bei OFDM
  - Dopplereffekt beeinflusst die Orthogonalität der OFDM-Symbole und dadurch auch die Signalauswertung
- Vorteile von CDM Chirp Sequence:
  - Alle Sender sind gleichzeitig aktiv
    - dadurch kein Zeit- bzw. Phasenversatz zwischen den Radarbildern der TX-RX-Paare
    - keine Verringerung des Eindeutigkeitsbereichs der Geschwindigkeit  $|v_r^{\text{unamb}}|$
  - Keine Verringerung der Bandbreite  $\rightarrow \Delta R_r$  bleibt gleich
- Nachteile von CDM Chirp Sequence:

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

- Verringerte Unterdrückung der anderen TX-Signale bei der Separation der TX-RX-Kanäle → Code und Mehrwege abhängig
- Zusätzlicher Phasenmodulator im TX und RX wird benötigt
- Verbreiterung des Spektrums durch zusätzliche Phasenumtastungen während eines Chirps

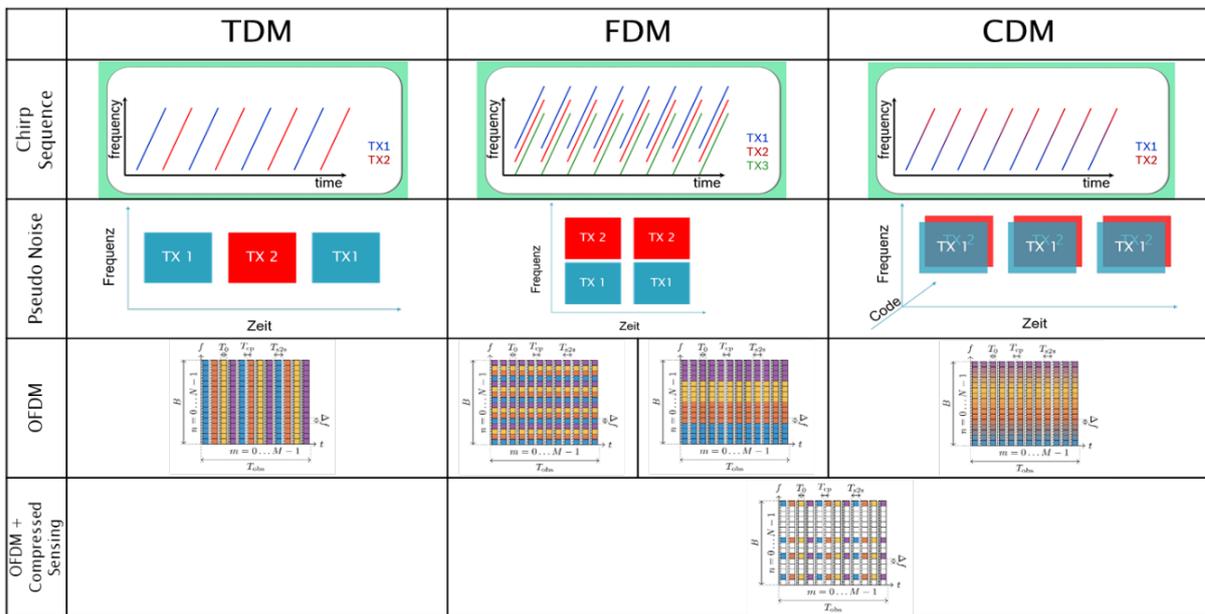


Abbildung 79: Graphische Übersicht der gängigen MIMO Konzepte

Abbildung 79 zeigt eine graphische Übersicht der gängigsten MIMO Konzepte.

Der in radar4FAD entwickelte Bosch Demonstrator#2a mit Fast Chirp Sequence Modulation wurde im Backend Bereich in mehreren Optimierungs-Zyklen noch weiter optimiert und auf Echtzeitanforderungen hin soweit getrimmt, dass Messwiederholraten je nach Konfiguration und Betriebsparameter zwischen 10 Hz bis zu 20 Hz im MIMO Verfahren möglich sind.

Für den DEM#2b wurden im Frontend Bereich komplexe I/Q Mischer im Sendepfad und Empfangspfad verwendet und im Backend Bereich schnelle ADCs mit 1 Giga-Samples per Second eingesetzt. Die analoge Signalerzeugung mittels PLL wurde durch schnelle DACs mit ebenfalls 1 Giga-Samples per Second erzeugt, wobei die DACs direkt aus dem FPGA angesteuert werden.

Das auf ROS (Robot Operation System) und embedded Linux basierte Entwicklungssystem inklusive der Anbindung an einen PC oder Laptop kann mit entsprechenden Anpassungen auch

Von  
 CC/PJ-RAD

 Bearbeiter  
 Martin Kunert

 Telefon  
 +49 711 811-37468

 Leonberg  
 23.09.2020

Bericht

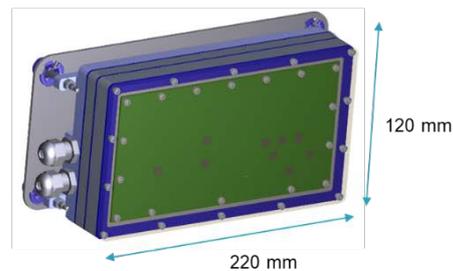
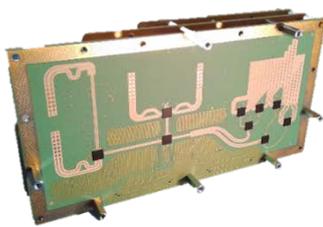
Ausgabe Version 1.0

Thema Radar4FAD Abschlussbericht

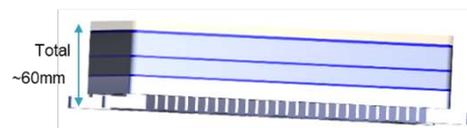
für die OFDM Variante des Demonstrators#2b eingesetzt werden. Die Arbeiten dafür wurden in 2019 begonnen und wurden bis zum Projektende weitergeführt.

Das 4TX/4RX ADR Frontend des DEM#2b wurde in enger Absprache mit der Ruhr Universität Bochum definiert und die Schnittstellen zum Basisband-Backend festgelegt. Das Redesign der Basisband-Backend Platine wurde nach der Architektur, wie in Abbildung 22 dargestellt, durchgeführt und eine Prototyp-Leiterplatte entworfen und bestückt. Durch den gleichen Formfaktor sowohl des ADR Frontends als auch des ADR Basisband-Backends ist es möglich, diese neuen Komponenten in das bereits vorhandene Gehäuse des Bosch Demonstrators#2a einzubauen.

► Top View



► Side view



**Abbildung 80: Der Bosch Demonstrator #2a**

In der Abbildung 80 sind die Bestandteile und Abmaße des Bosch DEM#2a dargestellt. Der gesamte Aufbau besteht aus mehreren Platinen, die über Steckverbinder miteinander verbunden sind und „gestapelt“ als „Platinenstack“ sukzessive in das mehrteilige Gehäuse verschraubt werden. Auf der Abstrahlseite des Radars (i.e. der Vorderseite der Frontend-Platine) ist ein radardurchlässiger Deckel wasserdicht verschraubt. Die beiden Kabeldurchführungen für Stromversorgung und Ethernet sind mit wasserdichten Quetschverschraubungen am Gehäuse fixiert. Mit den Außenmaßen 220mm x 120mm x 60mm ist der Radar schon relativ großvolumig, aber dennoch in einem PKW noch vernünftig verbaubar.

In Abbildung 81 sind die Verbauporte rund um das Demofahrzeug für die 6 Radare gezeigt. Die Verbaupositionen sind dabei so gewählt, dass sich ein lückenloser Überwachungsbereich von

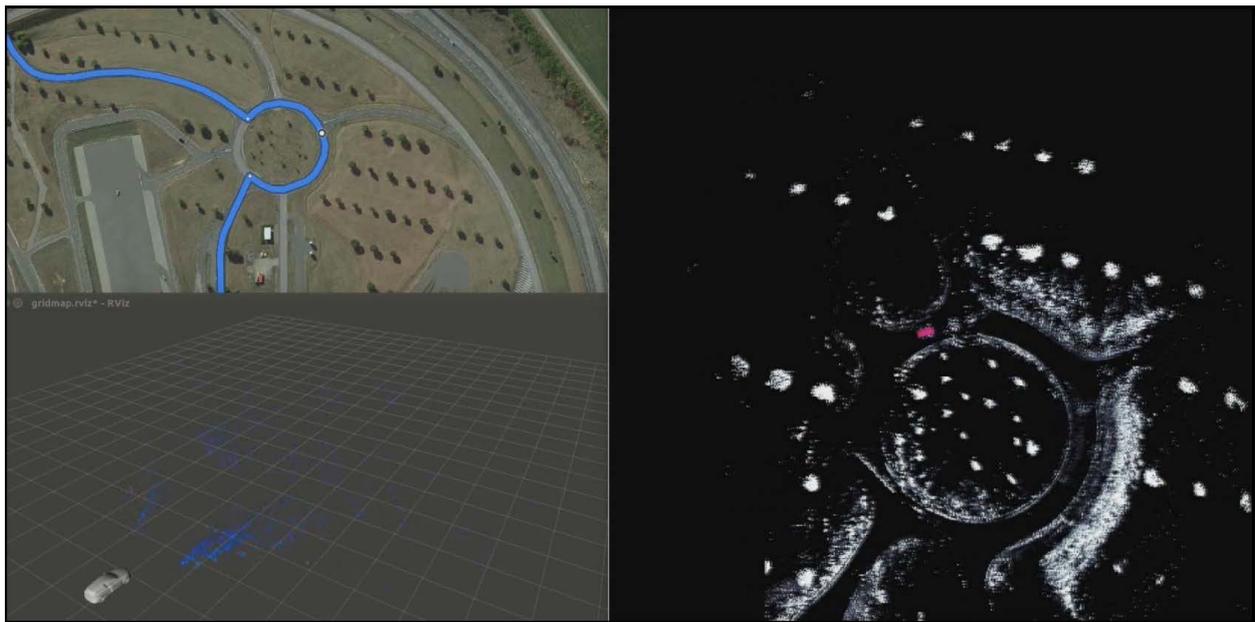
Von  
CC/PJ-RADBearbeiter  
Martin KunertTelefon  
+49 711 811-37468Leonberg  
23.09.2020Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

360° ergibt. Die gute Integrationen der Sensoren in die Fahrzeugaußenhaut, verbunden mit entsprechenden Schutzgittern und Einbaurahmen, macht einen gefahrlosen Betrieb auch auf öffentlichen Straßen ohne besondere Sonderfreigaben möglich.



**Abbildung 81: Verbau der 6 Bosch DEM#2a Radare in einen Golf7 Variant**

In Abbildung 82 ist eine Radaraufnahme mit dem Versuchsträger gezeigt.



**Abbildung 82: Radaraufnahme mit dem Versuchsträger**

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

In Abbildung 83 ist noch ein Validierungstest des verbauten Frontradars mit zwei Winkelreflektoren dargestellt. Mit einer Zufahrt auf die beiden Reflektoren wurde das SNR-Verhalten und die Wiederholgenauigkeit des Radarsystems überprüft. Bei dem Winkelreflektor mit 30 cm Bodenabstand sind die Effekte der Mehrwegeausbreitung sehr gut zu erkennen.

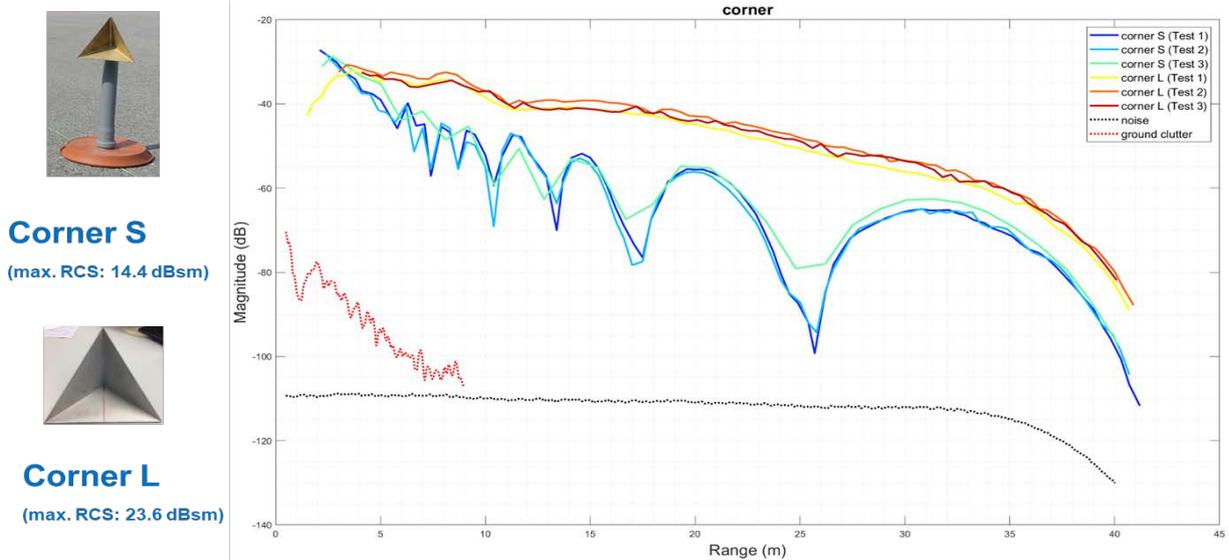


Abbildung 83: Validierungstest mit zwei verschiedenen Winkelreflektoren

In Abbildung 84 wurde ein Vergleich zwischen Radar und LiDAR (IBEO Lux) durchgeführt.

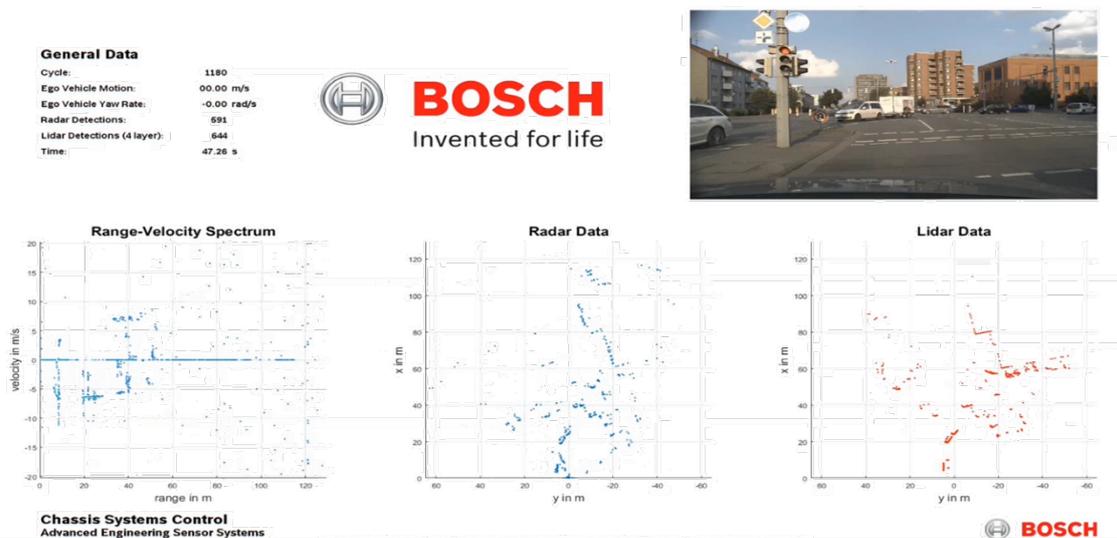


Abbildung 84: Benchmarking der Radar Dem#2a Daten mit einem LiDAR Scanner (IBEO Lux)

Von  
CC/PJ-RAD

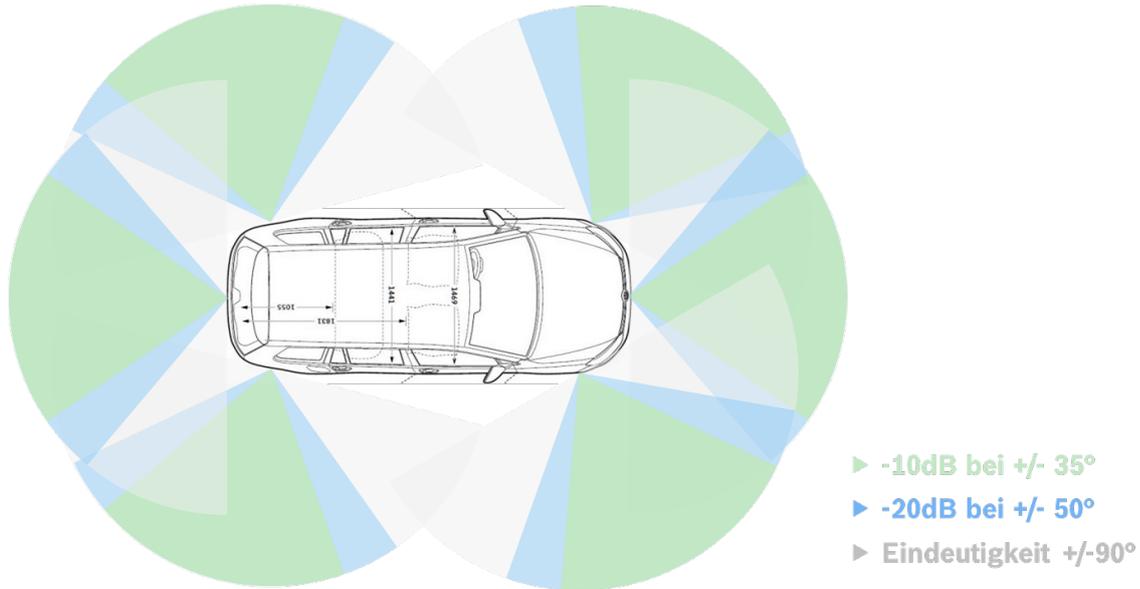
Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

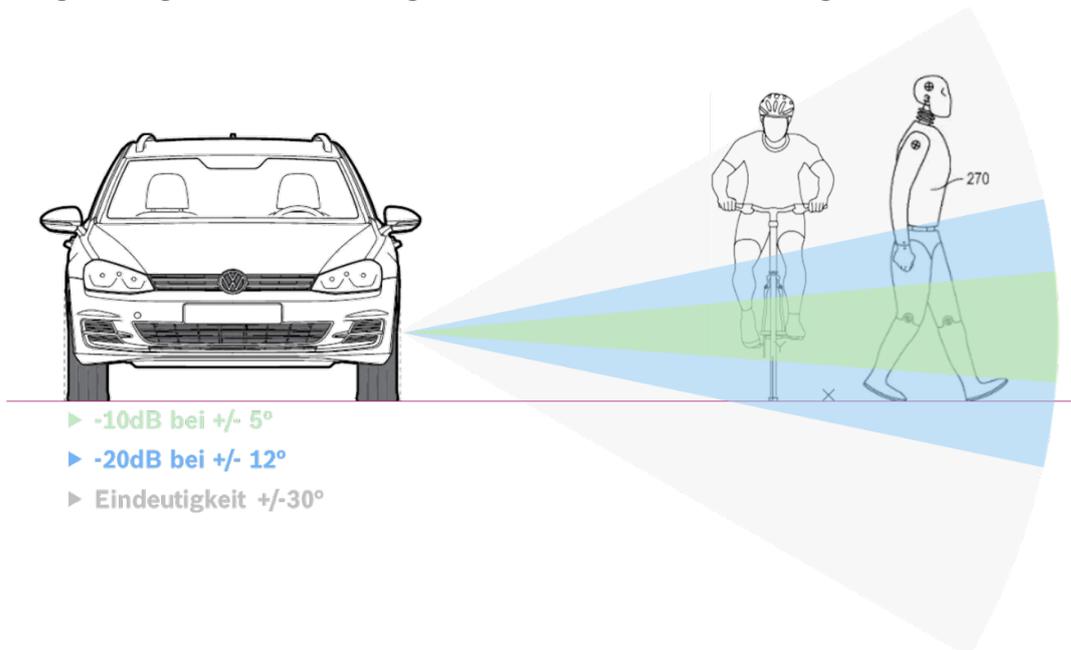
Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

In Abbildung 85 ist der Beobachtungsbereich des Versuchsfahrzeugs in Azimut gezeigt.



**Abbildung 85: 360° Rundumsicht des Versuchsträgers Golf7 Variant (Azimut)**

Abbildung 86 zeigt den Beobachtungsbereich des Versuchsfahrzeugs in Elevation.



**Abbildung 86: Beobachtungsbereich des Versuchsträgers Golf7 Variant in Elevation**

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

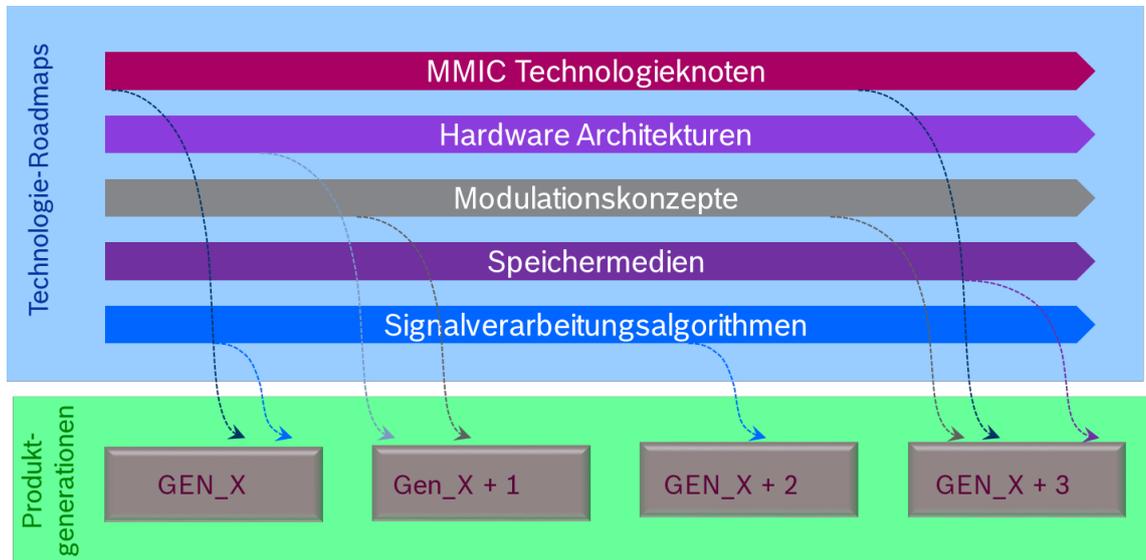
Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe      Version 1.0  
Thema          Radar4FAD Abschlussbericht

2.2 des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen

Die Verwertbarkeit der im Projekt erzielten Ergebnisse ist durchwegs positiv zu betrachten, da sämtliche Aktivitäten im Projektverlauf mit sehr zufriedenstellenden Ergebnissen abgeschlossen wurden. Der unmittelbare Nutzen erschließt sich im Transfer und in der Implementierung der Projektergebnisse in zukünftigen Radarprodukten der Robert Bosch GmbH. Insbesondere die Analyse und der KPI-Benchmark bei den untersuchten Modulationsarten führte zu einer zeitlich relativ präzisen Roadmap für zukünftige Markteinführungsszenarien. Die weiteren Ergebnisse aus den verschiedenen Arbeitspaketen (Speicherkonzepte, Rechnerarchitekturen, Aufbautechnik, Zuverlässigkeitsanalysen, Interferenzmechanismen, etc.) fließen in identischer Weise in die kommenden Radarproduktgenerationen ein, wobei je nach Reifegrad nicht alles gleichzeitig zu einem Zeitpunkt in eine neue Produktgeneration kommt sondern nach zeitlicher Verfügbarkeit zum entsprechenden Zeitslot für die geplanten Fahrzeug-Baureihen (siehe Abbildung 87).



**Abbildung 87: Zusammenhang zwischen Technologie-Roadmaps und Produktgenerationen**

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der im BMBF Förderprojekt AutoSWIFT intensiv beleuchtet wurde, ist die Herausforderung der globalen Optimierung über mehrere, teil-

Von  
CC/PJ-RAD

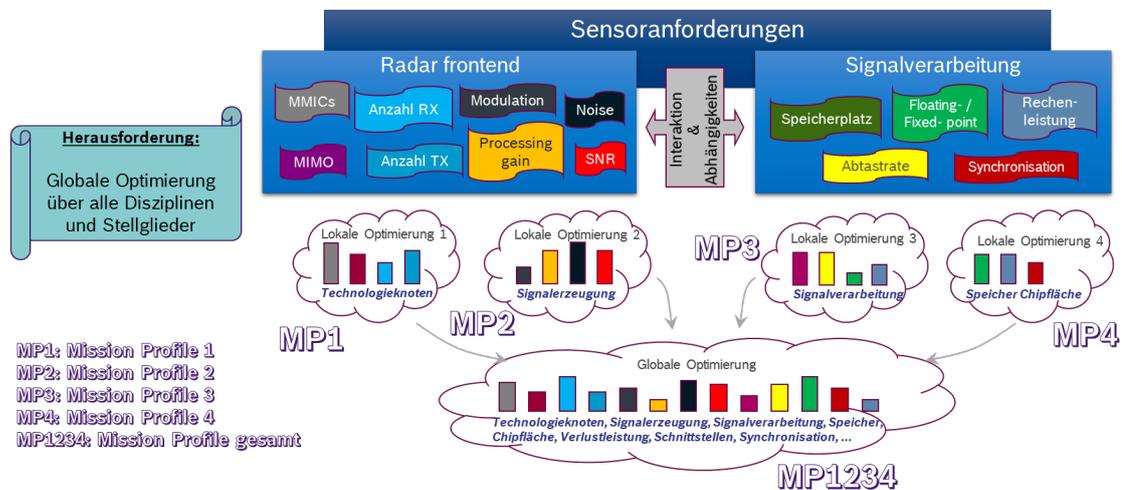
Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

weise antagonistischen Mission-Profiles (MPs). Gemäß dem in AutoSWIFT erarbeiteten Methoden wurden die Auswirkungen und Einflüsse des Mission Profiles „Modulationsart“ auf die anderen MPs sorgfältig untersucht und in den relevanten Ergebnisberichten dokumentiert. Die generelle MP-Methodik ist in Abbildung 88 dargestellt.



**Abbildung 88: Die Herausforderung: Globale Optimierung über mehrere Mission Profiles**

Grundlegende Erkenntnisse der teilweise sehr komplexen Zusammenhänge und Abhängigkeiten konnten identifiziert werden und werden praxisnah bei der Auswahl und Konzeption von zukünftigen Radarsystemen eingesetzt.

2.3

des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Der Fortschritt auf dem Gebiet der Automobil-Radartechnik wurde von den Projektpartnern kontinuierlich beobachtet und Erkenntnisse gegenseitig ausgetauscht. Es wurden zwei neue Hauptströmungen identifiziert, die sich zu einer signifikanten Bedrohung des etablierten Tier1 Radar-Zuliefermarktes entwickeln können (bzw. werden). Dies sind zum einen eine Vielzahl von neuen Radar Startup-Firmen, die „gesponsort“ durch große Venture-Kapitalgebern (z.B. Softbank) massiv in den existierenden Radarmarkt vordringen. Zum anderen versuchen sogenannte Quereinsteiger (engl. lateral entrants) wie Huawei, Samsung, Intel und NVIDIA ihr bestehendes Marktportfolio (wie z.B. den Mobilgerätemarkt) in Richtung Automobiltechnik auszuweiten, wobei der neue Mobilitäts-gedanke (MaaS: Mobility as a Service) dabei im Vordergrund steht. In Abbildung 89 ist

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht  
Ausgabe Version 1.0  
Thema Radar4FAD Abschlussbericht

der aktuell existierende Automobilmarkt und die neuen Mitspieler symbolhaft dargestellt.

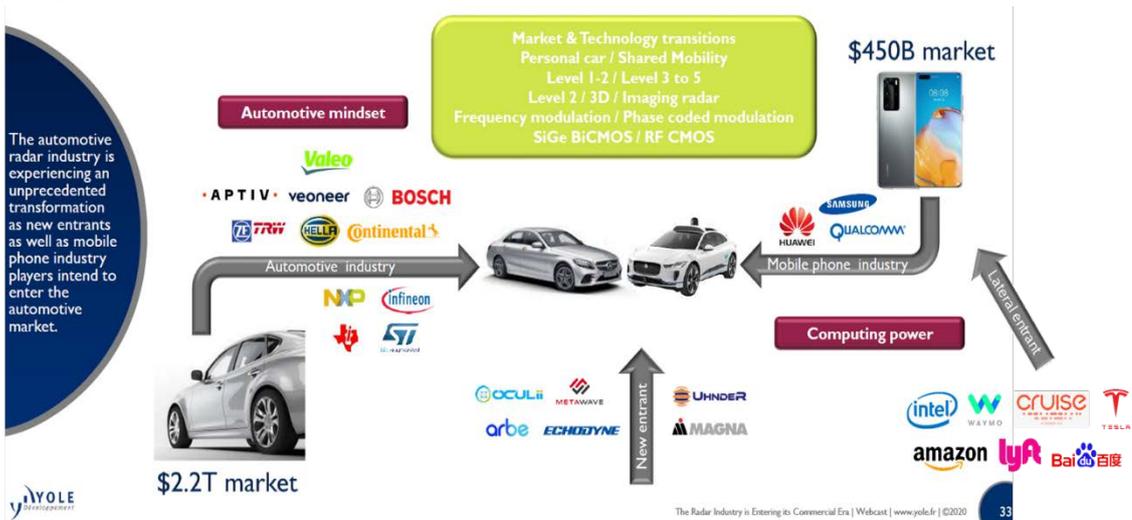


Abbildung 89: Der existierende Automobilmarkt und die „neuen Players“ (Quelle: Yole Développement/France)

Bemerkenswert ist, dass sich das Volumen des gesamten Mobilfunkmarktes in 2019 auf ca. 450 Milliarden US\$ belief, während der Automobilmarkt weltweit über 2.2 Billionen US\$ betrug. Abbildung 90 zeigt die weltweite Marktaufteilung in 2018, bei der Europa mit 45% noch dominiert hatte. In 2019 hatte Asien bereits 49,3% Marktanteil.

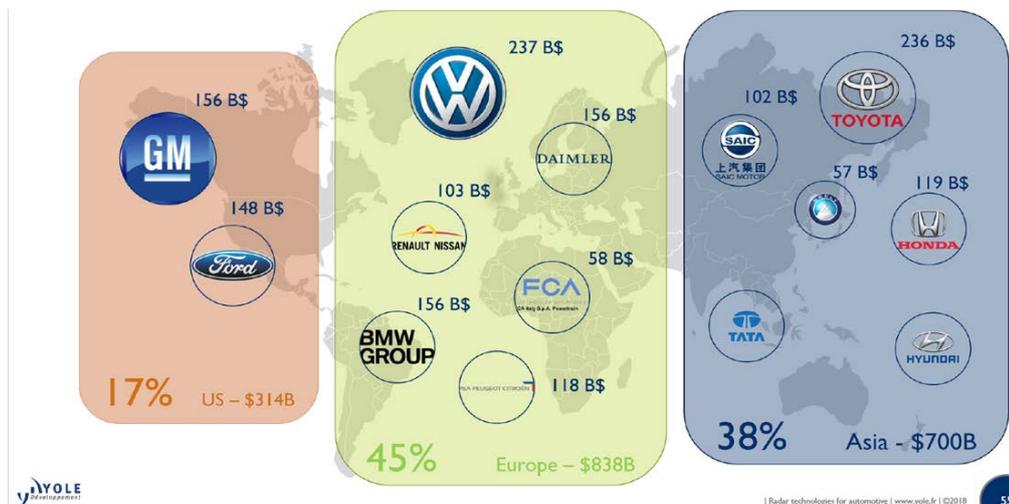


Abbildung 90: Aufteilung des Automobilmarktes in 2018 (Quelle: Yole Développement/France)

Von  
CC/PJ-RAD

Bearbeiter  
Martin Kunert

Telefon  
+49 711 811-37468

Leonberg  
23.09.2020

Bericht

Ausgabe Version 1.0

Thema Radar4FAD Abschlussbericht

## 2.4 der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses

Es wurden im Rahmen der Aktivitäten von radar4FAD seitens Bosch folgende Veröffentlichungen publiziert:

- *European Microwave Week 2018, 23. – 28. September 2018; Madrid/Spanien | WTh-07 - Challenging the Interference Mitigation Effectiveness with the tough ASIL D Requirements for automotive Radar Systems, Dr.-Ing. Martin Kunert, Robert Bosch GmbH*
- *European School of Antennas 2018 - Radar 2020 - Future Radar Systems, 2. – 6. Mai 2018, KIT Karlsruhe | AUTOMOTIVE RADAR „ON THE MOVE“, Dr.-Ing. Martin Kunert, Robert Bosch GmbH*
- *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Journal ISSN: 1524-9050, Lane Detection With a High-Resolution Automotive Radar by Introducing a New Type of Road Marking, Zhaofei Feng , Mingkang Li , Martin Stolz , Martin Kunert, and Werner Wiesbeck, Robert Bosch GmbH and KIT Univ. Karlsruhe*
- *Automotive Tech.AD Berlin, March 11-12, 2019 / Titanic Chaussee Berlin, Germany | Morning Workshop 1: Latest Developments & Applications of Radar in ADAS & Autonomous Vehicle Development – QUO VADIS , Holger Meinel & Martin Kunert*
- *German Microwave Conference GeMiC 2019, March 25-27, Stuttgart, Germany | Automotive Radars on the move – Achievements and future challenges, M. Kunert et Al., Robert Bosch GmbH*
- *European Microwave Week 2019, 29. Sept. – 4. Oct. 2019; Paris/France | Automotive Forum – The role of automotive radars in future automated driving functions, M. Kunert et Al., Robert Bosch GmbH*
- *International Radar Workshop, Online-Webinar, 16. Sept. 2020 | High-resolution fast chirp sequence imaging radar for automotive applications, Dr.-Ing. Martin Kunert, M. SC. Frank Meinel, Dr.-Ing. Martin Stolz, Dr.-Ing. Eugen Schubert, Dr.-Ing. Linus Boehm, M.SC. Marco Hoch, M. SC. Mingkang Li, Dipl.-Ing. Bernhard Kroppen, M. SC. Ferdous Alam, Dipl.-Ing. Setareh Jaber Ansari, Robert Bosch GmbH*
- *Scale-up 360 – Sensor & Radar Systems Europe (we.Connect online webinar) | An experimental radar prototyping platform to plumb the necessary features towards automated driving with classical and AI-based methods, Dr.-Ing. Martin Kunert, M. SC. Frank Meinel, Dr.-Ing. Martin Stolz, Dr.-Ing. Eugen Schubert, Dr.-Ing. Linus Boehm, M.SC. Marco Hoch, M. SC. Mingkang Li, Dipl.-Ing. Bernhard Kroppen, M. SC. Ferdous Alam, Dipl.-Ing. Setareh Jaber Ansari, Robert Bosch GmbH*



## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN n/a	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlußbericht
3. Titel Schlußbericht der Robert-Bosch-GmbH zum Beitrag im öffentlich geförderten Projekt radar4FAD Teilvorhaben Chip Sequence (CS) Time Division Multiplexing (TDM) Multiple Input Multiple Output (MIMO) Radardemonstrator	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr.-Ing. Martin Kunert	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2020
	6. Veröffentlichungsdatum November 2020
	7. Form der Publikation Schlußbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Robert Bosch GmbH Postfach 30 02 40 70442 Stuttgart	9. Ber. Nr. Durchführende Institution n/a
	10. Förderkennzeichen 16ES0555
	11. Seitenzahl 71
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 7 (radar4FAD Publikationen der Robert Bosch GmbH)
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 90
16. Zusätzliche Angaben keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover, im November 2020	
18. Kurzfassung  1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik Radarsensoren sind seit ca. 20 Jahren in Kraftfahrzeugen verbaut mit dem Fokus auf Fahrerassistenz (ADAS). Mit zunehmenden Automatisierungsgrad der Fahrfunktionen steigen auch die Anforderungen an die Radartechnik. SAE Level2 Radare sind bereits millionenfach im Kfz-Markt zugegen. Der Ruf nach hochperformanten, bildgebenden Radaren wird jedoch immer lauter. 2. Begründung/Zielsetzung der Untersuchung Mit einem universellen Baukastenkonzept werden verschiedene Ansätze von sogenannten Imaging-Radaren untersucht und gegeneinander bewertet. Die wichtigsten KPIs (key performance indicators) werden analysiert und neue Implementierungen in der Radartechnik (i.e. Modulation, Antennenkonzepte, Signalverarbeitung, AVT (Aufbau- und Verbindungstechnik), Interferenzvermeidung, Speicherkonzepte, etc.) untersucht. In 5 Demonstratoren werden die Erkenntnisse prototypenhaft dargestellt. 3. Methode Simulationen, Prototypenaufbauten, Labormessungen und Fahrversuche im Feld. 4. Ergebnis Fünf Radardemonstratoren mit unterschiedlichem Reifegrad. Dokumentation der Ergebnisse in umfangreichen Berichten. 5. Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten Die in radar4FAD erzielten Ergebnisse fließen unmittelbar in zukünftige Produktgenerationen ein. Der notwendige Innovationshub zum Erhalt der internationale Wettbewerbsfähigkeit wird durch interdisziplinäre Kooperation von Industrie und Universitäten abgesichert und fortgeschrieben.	
19. Schlagwörter Radar, modularer Baukasten, hochautomatisiertes Fahren, System on Chip, MMIC, RF-Systemtechnik, MIMO	
20. Verlag Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover	21. Preis n/a

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN n/a	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title  Schlußbericht der Robert-Bosch-GmbH zum Beitrag im öffentlich geförderten Projekt radar4FAD Teilvorhaben Chip Sequence (CS) Time Division Multiplexing (TDM) Multiple Input Multiple Output (MIMO) Radardemonstrator	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr.-Ing. Martin Kunert	5. end of project 31.07.2020
	6. publication date November 2020
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address)  Robert Bosch GmbH Postfach 30 02 40 70442 Stuttgart	9. originator's report no. n/a
	10. reference no. 16ES0555
	11. no. of pages 71
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 7 (radar4FAD papers/publications from Robert Bosch GmbH)
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 90
16. supplementary notes none	
17. presented at (title, place, date) Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover, planned in November 2020	
18. abstract 1. State-of-the-Art Radar devices are mounted on motor vehicles since 20 years with a focus on driver assistance (ADAS). With a higher automation level the requirements for radar sensors are increasing, too. SAE level 2 radar sensors are on the market in millions of pieces. The call for high-performance imaging radar sensors is steadily increasing. 2. Rationale/Project targets With an universal modular building block different concepts of so-named imaging radars were analysed and benchmarked. The important KPIs (key performance indicators) are investigated and novel realizations in the automotive radar domain (i.e. modulation, antenna layout, signal processing, manufacturing concepts, interference mitigation, storage concepts, etc.) are analyzed. In 5 prototype demonstrators new findings are shown. 3. Methods Simulations, prototype implementations, measurements in laboratory and in field tests on road and test tracks. 4. Results Five radar demonstrators with different degree of maturity. All results are well documented in project reports. 5. Conclusions/Applications The radar4FAD results can be transferred to next generation products step by step. The necessary innovation boost to keep competitiveness on international level can be maintained and fostered by an interdisciplinary cooperation between industry and universities.	
19. keywords radar, modular building blocks, highly automated driving, SoC (System on Chip), MMIC, RF-systems, MIMO	
20. publisher Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover	21. price n/a