



Prof.Dr.-Ing. Thomas Walter

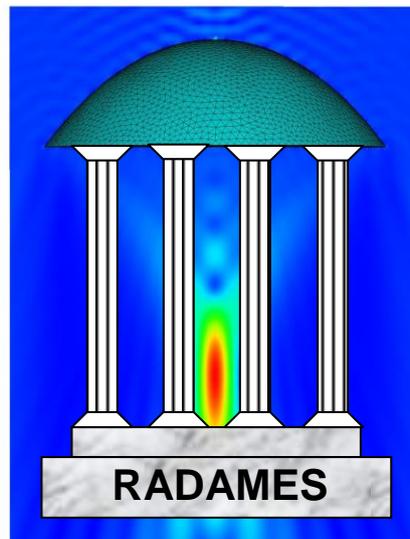
Hochschule Ulm

Fakultät Mechatronik und
Medizintechnik

Albert-Einstein-Allee 55
89081 Ulm

Tel. : 0731 50 28523

Mail : walter.th@hs-ulm.de



Abschlussbericht

RADAMES

FKZ: 17 018X 10

„Radarsensorik für
Automobilanwendungen mit
konfigurierbarer Strahlformung“

M.Eng. Steffen Lutz

Prof. Dr.-Ing. Thomas Walter

Angaben zum Projekt

Förderprogramm:

- FHProfUnt (BMBF)
- Förderkennzeichen: FKZ: 17 018X 10

Projektträger:

- AiF PT-FH / Projektträger Jülich

Projekttitle:

„Radarsensorik für Automobilenwendungen mit konfigurierbarer Strahlformung“

Projektpartner:

- Hochschule Ulm, Ulm
- Robert Bosch GmbH, Leonberg
- Elekonta Marek, Gerlingen
- Universität Erlangen-Nürnberg (kooperative Promotion)

Projektlaufzeit:

- 1.7.2010 – 30.6.2014

Projektsumme:

- 202.905 €

Projektleiter:

- Prof. Dr.-Ing. Thomas Walter, Hochschule Ulm

Wissenschaftlicher Mitarbeiter:

- Dr.-Ing. Marcel Mayer, Hochschule Ulm
- M.Eng. Steffen Lutz

Inhalt

| | |
|---|----|
| 1 Einleitung..... | 5 |
| 2 Aufgabenstellung und Ziele | 6 |
| 3 Methodik und Basistechnologien..... | 9 |
| 3.1 SiGe-MMICs und eWLB-Packages | 9 |
| 3.2 Leiterplatten-Technologie | 10 |
| 3.3 Antennencharakteristik und Simulation..... | 11 |
| 3.4 Winkelmessung | 12 |
| 3.5 Modulationsverfahren und Signalverarbeitung | 13 |
| 3.6 PLL..... | 15 |
| 3.7 MIMO-Prinzip | 16 |
| 4 MIMO-Radardemonstrator | 17 |
| 4.1 Radararchitektur..... | 17 |
| 4.2 Antennendiagramme | 19 |
| 4.3 Verifikation Radardemonstrator | 21 |
| 4.4 Feldmessungen..... | 24 |
| 4.5 Zielsimulator | 26 |
| 4.6 Verifikation Chirp-Sequence-Modulation | 28 |
| 5 Fazit aus RADAMES..... | 29 |
| 6 Verwertung der Ergebnisse | 30 |
| 7 Preise | 31 |
| 8 Aus RADAMES entstandene Publikationen und Vorträge..... | 32 |
| 9 Abbildungsverzeichnis..... | 33 |

Hochschule Ulm



1 Einleitung



Abbildung 1: Radarbasierte Fahrerassistenzsysteme

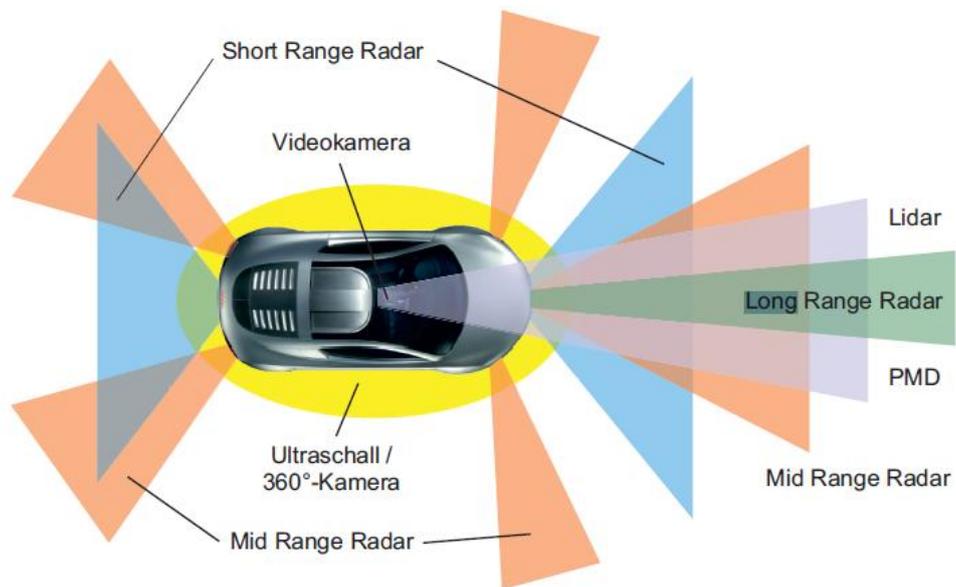


Abbildung 2: Konzept Rundumsicht für Fahrerassistenzsysteme

Radarbasierte Fahrerassistenzsysteme stellen eine wichtige Komponente moderner Fahrzeugsysteme dar. Radarsensorik im Fahrzeug (Abbildung 1) ermöglicht sowohl Komfortfunktionen wie ACC (Adaptive Cruise Control) als auch Sicherheitsfunktionen zur Kollisionsvermeidung. Neben diesen „klassischen“, radarbasierten Fahrerassistenzsystemen gewinnt die Vision des autonomen Fahrens immer mehr an Bedeutung. Gerade autonomes Fahren aber auch die angesprochenen Sicherheitsfunktionen verlangen die Beherrschung komplexer Verkehrsszenarien in urbanen Situationen (Abbildung 2). Derartige Anforderungen – heruntergebrochen auf Radarsensorik – führen

zu herausfordernden Spezifikationen, was die Funktionalität der Radare anbelangt. Hierunter fällt ein breiter Ortungsbereich mit gleichzeitig hoher Winkeltrennfähigkeit und Mehrzielfähigkeit. Diese scheinbare Diskrepanz adressiert RADAMES mit der Entwicklung sogenannter MIMO-Radare, die derartige Spezifikationen erfüllen können.

Das Konsortium bestehend aus der Robert Bosch GmbH, Elekonta Marek, der Universität Erlangen-Nürnberg und der Hochschule Ulm beinhaltet sowohl kompetente industrielle Partner auf den Gebieten Radar- und Leiterplattenentwicklung als auch Hochschulen mit anerkanntem KnowHow auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme.

2 Aufgabenstellung und Ziele

Primäres Ziel in RADAMES ist die Entwicklung und Darstellung von MIMO-Radarsensorik für Fahrerassistenzsysteme in komplexen, urbanen Verkehrsszenarien. MIMO steht hierbei für „Multiple Input – Multiple Output“ und zielt letztendlich auf eine konfigurierbare Strahlformung ab. Abbildung 3 und Abbildung 4 veranschaulichen verschiedene MIMO-Konzepte zur konfigurierbaren Strahlformung. Sind einzelne Antennenelemente bei einem linsenbasierten Radar schaltbar, wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt, lässt sich der Radarstrahl schwenken, womit eine eindeutige Lokalisierung von Objekten in der Winkelablage ermöglicht wird. Diese Trennfähigkeit ist insbesondere in der sogenannten „Gassenfahrt“ signifikant, bei der sich Fahrzeuge auf der linken und rechten Spur des Ego-Fahrzeuges befinden, wobei die mittlere Spur frei ist. Das Erkennen einer solchen Situation ist für „klassische“ Radare kritisch, da oftmals die erforderliche Winkeltrennfähigkeit oder Mehrzielfähigkeit fehlt. Mit MIMO-Radaren konnte in RADAMES gezeigt werden, dass solch kritische Situationen besser beherrschbar werden.

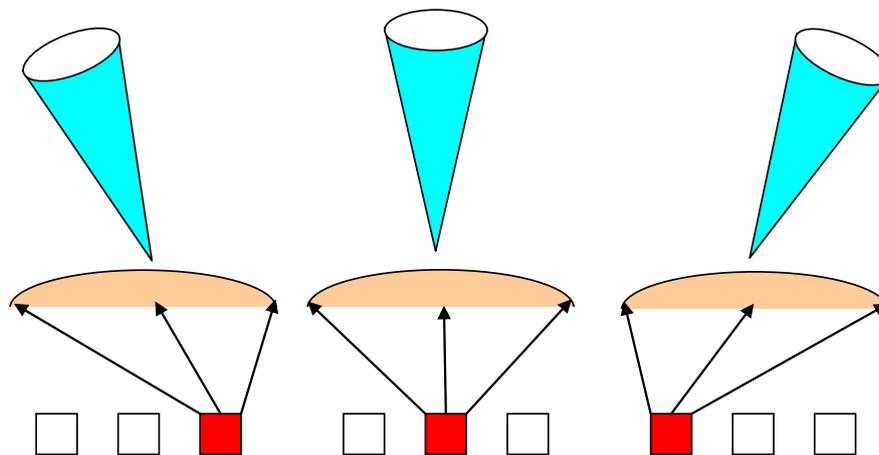


Abbildung 3: Elektronisch schwenkbarer Radarstrahl

Ein weiteres Beispiel für ein konfigurierbares Radar ist in Abbildung 4 veranschaulicht. Durch Zu- und Abschalten einzelner Antennenelemente lässt sich der Öffnungswinkel des Radarstrahls konfigurieren, wodurch das Radar mehr in die Ferne oder mehr in die Breite schauen kann. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch die Implementierung verschiedener Schaltzustände, welche den Radarstrahl

konfigurieren können, mehr Information über Objekte gewonnen werden kann, wodurch die Funktionalität der Sensorik signifikant erhöht wird.

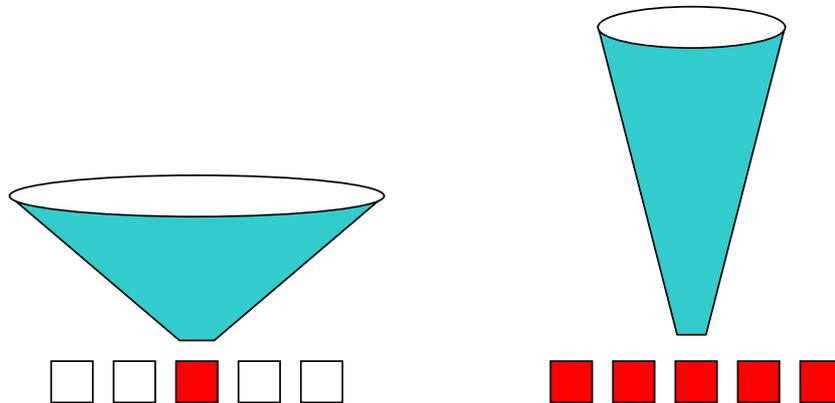


Abbildung 4: Konfigurierbares Ortungsfeld von MIMO-Radaren

In RADAMES wurden folgende technische Ziele verfolgt:

- **Technologieentwicklung:** Der wesentliche Aspekt bei der Technologieentwicklung betraf den Einsatz gehäuseter SiGe-MMICs (sogenannte eWLB-Packages) in Kombination mit einer PLL zur FMCW-Modulation. Bei der HF- und Antennenentwicklung wurde auf Ergebnisse der beiden Projekte „RAMSES“ und „RoCC“ zurückgegriffen.
- **Konzeptentwicklung:** In RADAMES wurden Konzepte für MIMO-Radare mit konfigurierbarer Strahlformung entwickelt. Die Strahlformung erfolgte hierbei linsenbasiert, was gegenüber dem Stand der Technik einen signifikanten Innovationsschritt darstellt. Weiterhin wurden Modulationsverfahren (Chirpmodulation) entwickelt, mit denen eine gute Orts- und Geschwindigkeitstrennfähigkeit erzielbar wurde.
- **Signalverarbeitung:** Ein wesentlicher Aspekt bei der Darstellung von MIMO-Radaren ist die Entwicklung einer geeigneten Signalverarbeitung, welche die Erreichung der geforderten Spezifikationen ermöglicht. Im Bereich der Winkeltrennfähigkeit wurden verschiedene „Beamformer“ (Korrelationsverfahren, MUSIC, ...) an MIMO-Radare adaptiert und bewertet. Für eine verbesserte Orts- und Geschwindigkeitstrennfähigkeit wurde eine Chirp-Sequence-Modulation implementiert, mit welcher Mehrdeutigkeiten bei der Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung zumindest deutlich reduziert werden können. Ausgewertet wurden diese Modulationsverfahren mit einer 2D-FFT. Als innovativen Ansatz wurde ein Verfahren, welches auf Algorithmen des „compressed sensings“ beruht, an das entwickelte Radar adaptiert und implementiert.
- **Darstellung von Prototypen:** Ein zentrales Ziel von RADAMES bestand in der prototypischen Darstellung und Bewertung von MIMO-Radarsensoren. Für diese Radarsensoren wurde nicht nur die HF-Elektronik sondern auch ein geeignetes Gehäuse, Elektronik für die Basisbandsignale sowie Schnittstellen zur digitalen Signalverarbeitung entwickelt. Weiterhin wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Bosch ein

Zielsimulator dargestellt, welcher es ermöglicht, bewegte Ziele in einem bestimmten Abstand zu simulieren, was für die Verifikation der Sensorkonzepte unerlässlich ist.

- **Konzeptverifikation:** Zentral für RADAMES war die Verifikation der erarbeiteten Konzepte und entwickelten Radarsensoren. So wurden verschiedene Szenarien nachgestellt, mit welchen die zentrale Forderung nach einer verbesserten Winkeltrennfähigkeit bei großem und breitem Ortungsfeld verifiziert werden konnte. Die Spezifikation für Orts- und Geschwindigkeitstrennfähigkeit konnte mit dem entwickelten Zielsimulator nachgewiesen werden. Generell konnten die Vorteile von MIMO-Radaren für komplexe, urbane Verkehrsszenarien verifiziert und zu den Projektpartnern transferiert werden.

Weiterhin sollte mit RADAMES die Grundlage für Folgeprojekte auf dem Gebiet Radarsensorik geschaffen werden, um den Umfang möglicher Einsatzgebiete für Mikrowellensensorik zu verbreitern. Die Einbringung von RADAMES in die Lehre an der Hochschule Ulm verfolgte das Ziel, das Gebiet Fahrerassistenzsysteme als essentieller Bestandteil zukünftiger Fahrzeuggenerationen nachhaltig in Lehre und Forschung zu verankern. In Kooperation mit der Universität Erlangen-Nürnberg wurde eine Promotion erfolgreich zu Ende gebracht (Dr.-Ing. Marcel Mayer) sowie die Grundlage für eine zweite Promotion gelegt.

3 Methodik und Basistechnologien

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen und Prinzipien erläutert, welche zur Realisierung kompakter und hochfunktionaler MIMO-Radarsensoren eingesetzt wurden.

3.1 SiGe-MMICs und eWLB-Packages

Eine Schlüsseltechnologie zur Realisierung hochintegrierter Radarsensoren war die Bereitstellung integrierter Bausteine auf SiGe-Basis für 77 GHz-Schaltungen. Die Einsetzbarkeit von SiGe-MMICs bei 77 GHz beruht auf Heterostrukturen und Nanoelektronik. Dadurch können Grenzfrequenzen oberhalb von 200 GHz erzielt werden, was notwendig ist, um Schaltungen bei 77 GHz zu realisieren. Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der Grenzfrequenzen verschiedener SiGe-Technologien (Infineon Technologies). Durch weitere Skalierung bzw. Optimierung sollten in absehbaren Entwicklungszeiträumen Grenzfrequenzen oberhalb von 500 GHz darstellbar sein. Ein wesentlicher Schritt zum Einsatz dieser Technologie gelang im Forschungsprojekt „RoCC“, an welchem die Hochschule Ulm ebenfalls beteiligt war. Essentiell für die Darstellung von MIMO-Radaren war die Verfügbarkeit konfigurierbarer SiGe-MMICs. Solche hochintegrierten Bauelemente (von Infineon Technologies) wurden durch den Projektpartner Robert Bosch dem Projekt zur Verfügung gestellt und in MIMO-Radare implementiert.

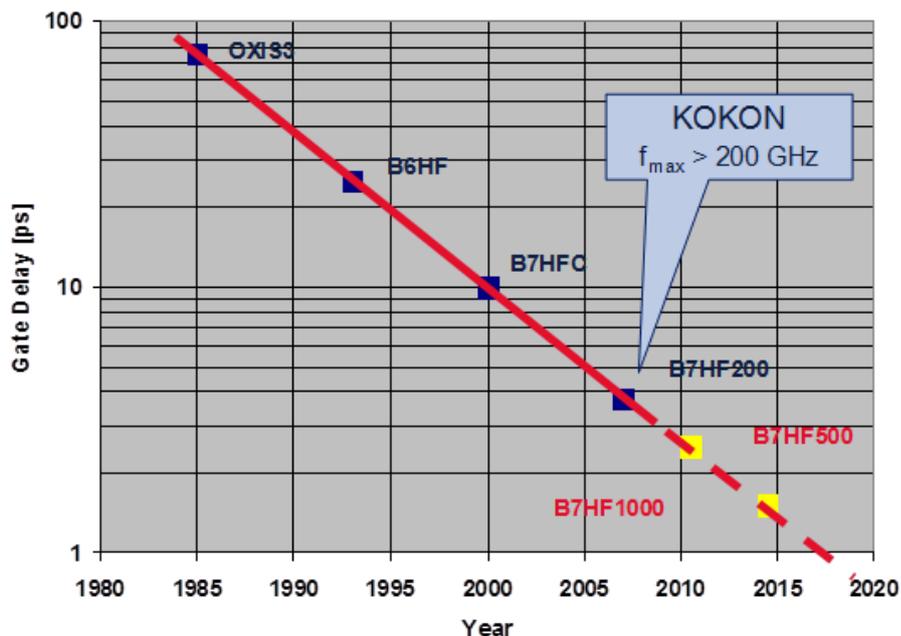


Abbildung 5: SiGe-Roadmap für Höchstfrequenzanwendungen

Die Gehäuse- und Integrationstechnologie für diese MMICs sind zentral für die Entwicklung und Darstellung komplexer und hochintegrierter Radarsensoren, was sich an dem in RADAMES entwickelten 8-kanaligen MIMO-Radarsensor plausibilisieren lässt. Während die in den Vorgängerprojekten eingesetzten SiGe-MMICs Dünndrahtbonds auf Leiterplatte benötigten, wurden in RADAMES gehäuste MMICs bei 77 GHz eingesetzt. Bei der Gehäusetechnologie handelt es sich um sogenannte eWLB-Packages (embedded wafer level ball grid array). Die prinzipiellen Technologieschritte vom wafer bis zum gehäusten MMIC sind in Abbildung 6 dargestellt. eWLB-Gehäuse gehören zu den SMD-Gehäusen, wobei während der Bestückung und während des Lötvorganges deutlich engere Toleranzen einzuhalten sind. Es ist an dieser Stelle festzuhalten, dass

mit diesen Gehäusen in RADAMES Technologien zum Einsatz kamen, die erst jetzt in kommerziellen Produkten zum Einsatz kommen. Der Zugang zu diesen Technologien erfolgte über den Projektpartner Bosch.

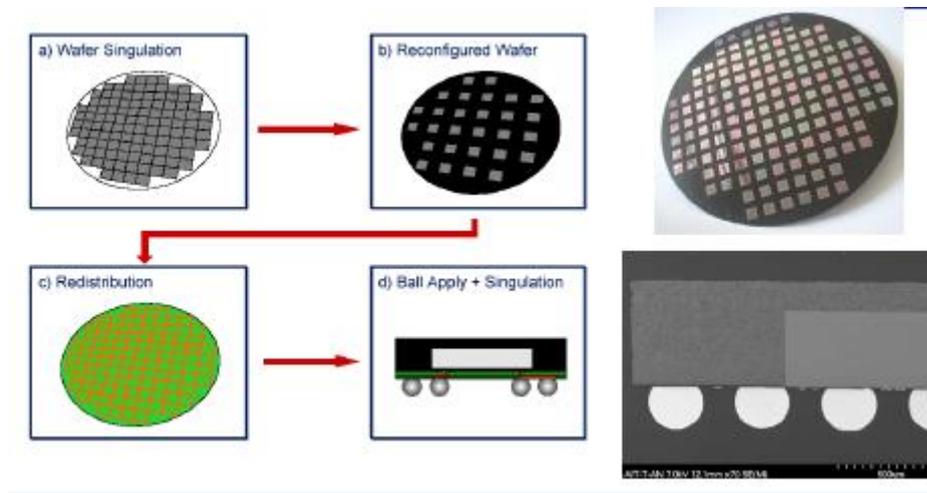


Abbildung 6: Herstellung von eWLB-Packages (Quelle: Infineon Technologies)

3.2 Leiterplatten-Technologie

Ein wichtiger Aspekt bei der Darstellung von MIMO-Radaren war die Entwicklung einer geeigneten, adaptierten Leiterplatten-Technologie, welche in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Elekonta Marek entwickelt wurde. Dies betraf primär die Antennenelemente auf dem HF-Laminat sowie den mehrlagigen Aufbau der Leiterplatte zur Entflechtung der Anschlüsse der SiGe-MMICs in den eWLB-Packages. Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die Entwärmung der Bauelemente. Hierfür wurde ein integriertes Leiterplatten-Gehäuse-Konzept entwickelt, mit welchem die signifikante Verlustleistung der MMICs an die Umgebung abgeführt werden konnte. Weiterhin wurde für den Demonstrator ein Aufbau bestehend aus mehreren Leiterplatten eingesetzt, wofür geeignete Steckverbinder ausgewählt und implementiert wurden. Eine Testleiterplatte mit bestückten SiGe-MMICs und Antennenelementen ist in Abbildung 7 zu sehen.

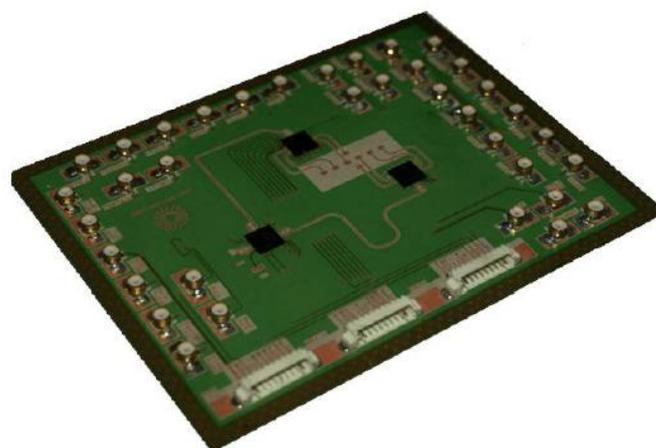


Abbildung 7: Leiterplatte mit bestückten SiGe-MMICs und Antennenelementen

3.3 Antennencharakteristik und Simulation

Gerade in der Entwicklung von Mikrowellenschaltungen ist die Simulationsfähigkeit essentiell. Einerseits ist die Herstellung und Charakterisierung derartiger Komponenten sehr zeit- und kostenintensiv, andererseits ist der Zugang zu bestimmten Subkomponenten mit Messtechnik teilweise unmöglich, sodass das Design solcher Komponenten im wesentlichen über Simulation zu erfolgen hat. In den Vorgängerprojekten wurde diese Simulationsfähigkeit erlangt und anhand von Teststrukturen auch verifiziert. Basierend auf diesen Vorgängerprojekten wurden in RADAMES 3D-EM-Simulationen insbesondere für die Auslegung der Antennensysteme inkl. der Linsen zur Strahlformung durchgeführt. Abbildung 8 zeigt exemplarisch die beugungsbestimmte (simulierte) Feldverteilung im Nahfeld einer dielektrischen Linse.

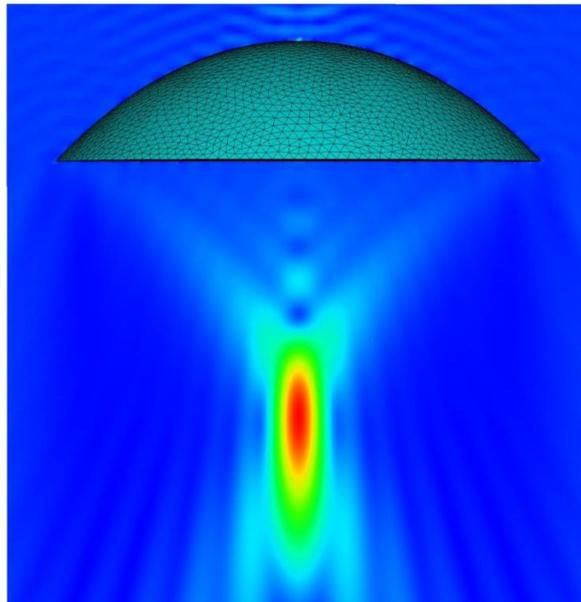


Abbildung 8: Nahfeldsimulation einer dielektrischen Linse

Weiterhin wurden Methoden zur Simulation der Sensorperformance unter den gegebenen Randbedingungen, die vom Projektpartner Bosch übernommen wurden, auf die entwickelten MIMO-Radare appliziert. Bei diesen Methoden sind Autokorrelationsverfahren zur Bestimmung von Mehrdeutigkeiten und die Berechnung der Cramer-Rao-Grenze (CRLB) zur Quantifizierung der erzielbaren Genauigkeit zu nennen. Abbildung 9 zeigt wiederum exemplarisch ein Kreuzkorrelationsdiagramm, womit Mehrdeutigkeiten bei der Winkelschätzung bestimmt werden können. Auf den Einsatz dieser Methoden zur Verifikation von MIMO-Radarkonzepten wird später eingegangen.

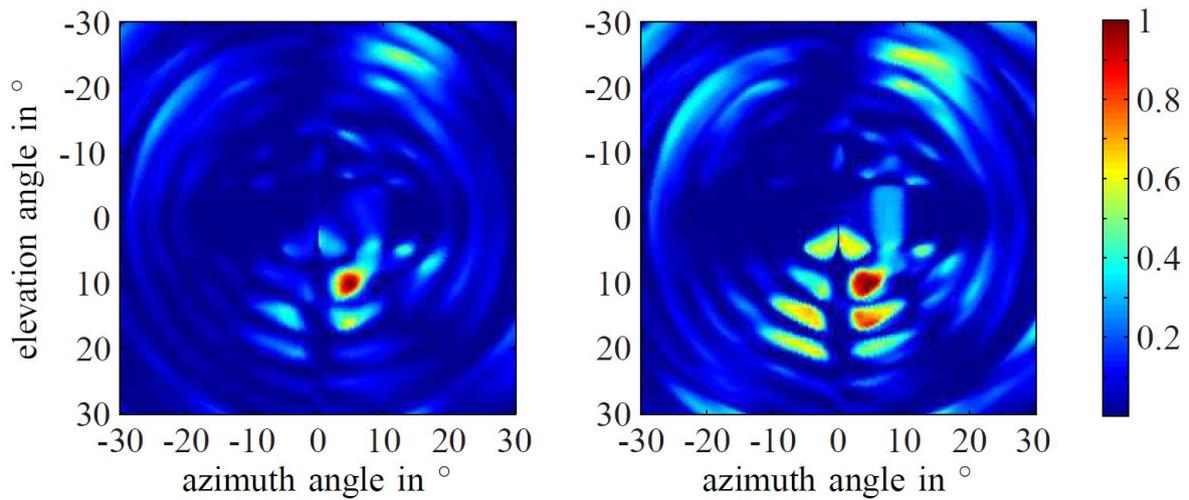


Abbildung 9: Kreuzkorrelationsdiagramme zur Bestimmung von Mehrdeutigkeiten

3.4 Winkelmessung

Zur Winkelmessung oder Winkelschätzung wurden verschiedene Verfahren (sogenannte „Beamformer“) eingesetzt. Mit diesen „Beamformern“ kann die Winkelablage von Objekten basierend auf gemessenen oder simulierten Antennendiagrammen bestimmt bzw. geschätzt werden. Zu diesen Verfahren, die in RADAMES zum Einsatz kamen, zählen konventionelle „Beamformer“ wie das Kreuzkorrelationsverfahren oder hochauflösende Verfahren wie MUSIC. Abbildung 10 zeigt die Winkelschätzung bei 8 Objekten unter Verwendung des MUSIC-Verfahrens für ein konventionelles (blau) und für ein MIMO-Radar (rot) basierend auf simulierten Antennendiagrammen. Aus dieser Abbildung ist klar ersichtlich, dass MIMO-Radare, welche in RADAMES entwickelt wurden, in komplexen Mehrzielszenarien einen klaren Vorteil gegenüber einer konventionellen Radararchitektur ohne MIMO-Funktionalität besitzen.

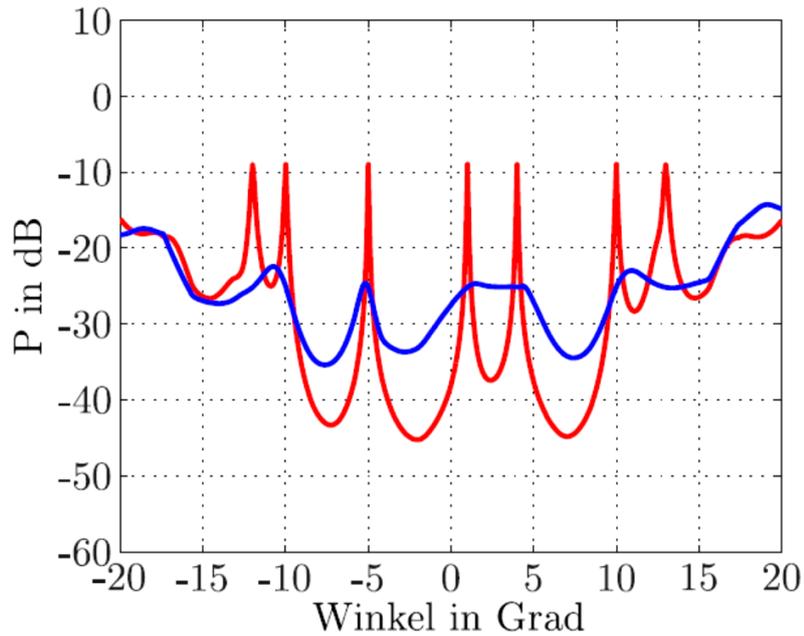


Abbildung 10: MUSIC-Verfahren bei 8 Objekten

3.5 Modulationsverfahren und Signalverarbeitung

Zur Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit müssen Radarsensoren moduliert werden. In RADAMES wurde zunächst ein FMCW-Verfahren (Frequency Modulated Continuous Wave) eingesetzt, welches lineare Frequenzrampen erfordert, wie Abbildung 11 veranschaulicht. Abstands- und Geschwindigkeitsinformation sind in der Frequenz des ZF-Signals kodiert. Eine Auswertung der ZF erfolgt über Fouriertransformation / FFT.

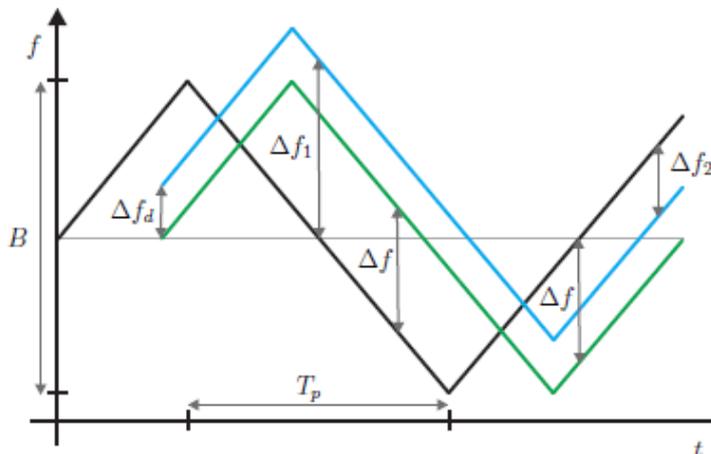


Abbildung 11: FMCW-Modulation

Das Problem bei einer FMCW-Modulation mit einer Rampe ist die Abstands- / Geschwindigkeitsmehrdeutigkeit. Üblicherweise wird diese Problematik durch die Verwendung mehrerer Rampen mit unterschiedlichen Steigungen und anschließendem „matching“, was prinzipiell die Lösung eines linearen Gleichungssystems bedeutet, gelöst. In komplexen Verkehrssituationen mit mehreren Objekten kann dies dennoch zu Mehrdeutigkeiten und Geisterzielen führen. Ein alternativer Ansatz, der diese Mehrdeutigkeiten vermeidet, ist die sogenannte Chirp-Sequence-Modulation, welche sehr schnelle Rampen beinhaltet ($< 100 \mu\text{s}$), sodass bei einer einzelnen Rampe die Relativgeschwindigkeit

keine Rolle spielt und nur der Abstand über die erste Fouriertransformation ermittelt werden kann. Allerdings ändert sich aufgrund des Dopplereffektes von Rampe zu Rampe die Phase des ZF-Signals, sodass mit einer zweiten FFT die Relativgeschwindigkeit bestimmt werden kann. Abbildung 12 veranschaulicht die im zweiten Teil von RADAMES eingesetzte Chirp-Sequence-Modulation mit aufeinanderfolgenden, identischen Frequenzrampen.

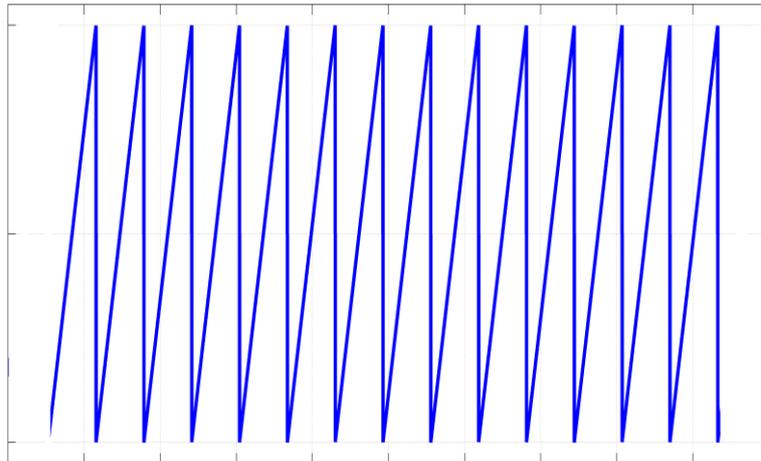


Abbildung 12: Chirp-Sequence-Modulation

Die Auswertung dieser Chirps erfolgt über zwei ineinandergeschachtelte FFTs. Mit dieser 2D-FFT erhält man ein „Bild“, aus welchem Abstand und Relativgeschwindigkeit eines Objektes abgelesen werden kann. Abbildung 13 zeigt ein solches Diagramm für zwei Objekte mit unterschiedlichem Abstand und unterschiedlicher Relativgeschwindigkeit. Dieser Ansatz klingt einfach; allerdings stellen solch schnelle Rampen hohe Anforderungen an die Elektronik, die AD-Wandlung, den Datentransfer und die digitale Signalverarbeitung. In RADAMES wurden die erwähnten Komponenten für diese Chirp-Modulation entwickelt und erfolgreich implementiert. Zur Verifikation dieses Modulationskonzeptes wurde gemeinsam mit dem Projektpartner Bosch ein Zielsimulator entwickelt, auf den in einem späteren Abschnitt eingegangen wird.

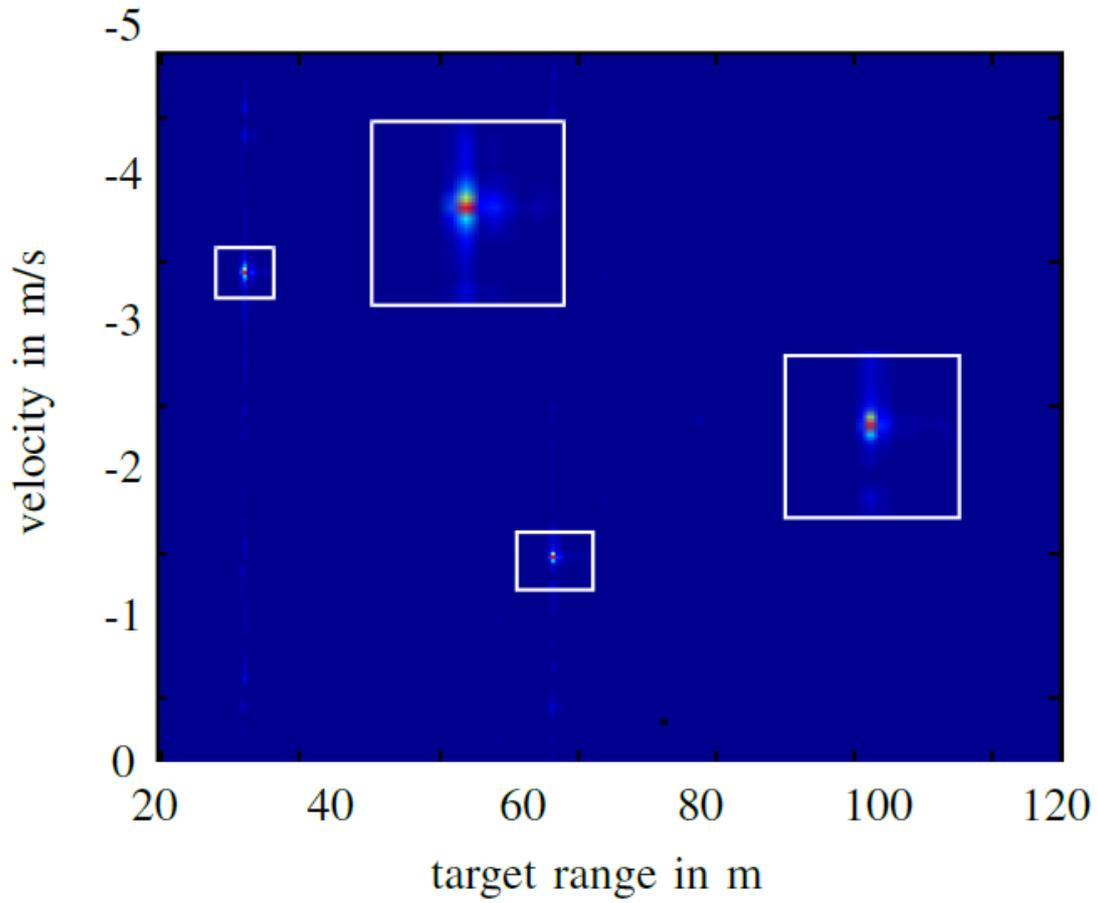


Abbildung 13: 2D-FFT

3.6 PLL

Zur Generation und Regelung schneller Chirps wurde eine PLL (Phase Locked Loop) von Infineon Technologies eingesetzt. Dieser programmierbare Baustein, der in Abbildung 14 dargestellt ist, erlaubt die Generation von Frequenzrampen mit unterschiedlicher Steigung und Dauer. Die Implementierung dieser PLL in unser MIMO-Radar war ein essentieller Schritt, um neben der Winkeltrennfähigkeit die erforderliche Abstands- und Geschwindigkeitstrennfähigkeit realisieren zu können.

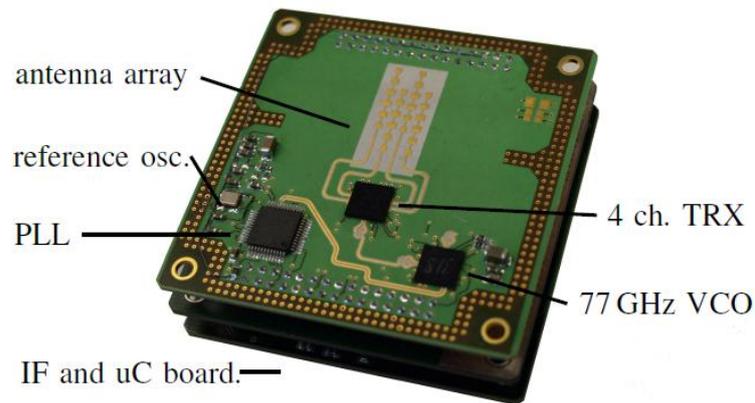


Abbildung 14: Radar-Leiterplatte mit PLL

3.7 MIMO-Prinzip

Das Prinzip von MIMO-Radaren mit dielektrischer Linse ist in Abbildung 15 dargestellt. Der rote Radarstrahl stellt die Situation dar, bei der Sender und Empfänger identisch sind. Dies gilt analog für den grünen Strahl, jedoch zeigen die Radarstrahlen in eine andere Raumrichtung. Sendet Rot und empfängt Grün, so ergibt sich in der Zweiwegecharakteristik ein Strahl, welcher zwischen die beiden Strahlen zeigt. Somit kann durch sendeseitige Konfiguration ein zusätzlicher Radarstrahl generiert werden, welcher zu einer detaillierteren Abtastung des Winkelraumes führt verbunden mit verschiedenen Vorteilen, was die Funktionalität dieser Radare anbelangt. Diese Konfigurierbarkeit / Schaltbarkeit der Sendecharakteristik wird als MIMO bezeichnet (Multiple Input – Multiple Output), während die konventionelle Konfiguration ohne sendeseitige Konfigurierbarkeit als MISO (Multiple Input – Single Output) bezeichnet wird. MIMO-Radare sind zentraler Bestandteil der Entwicklungen in RADAMES.

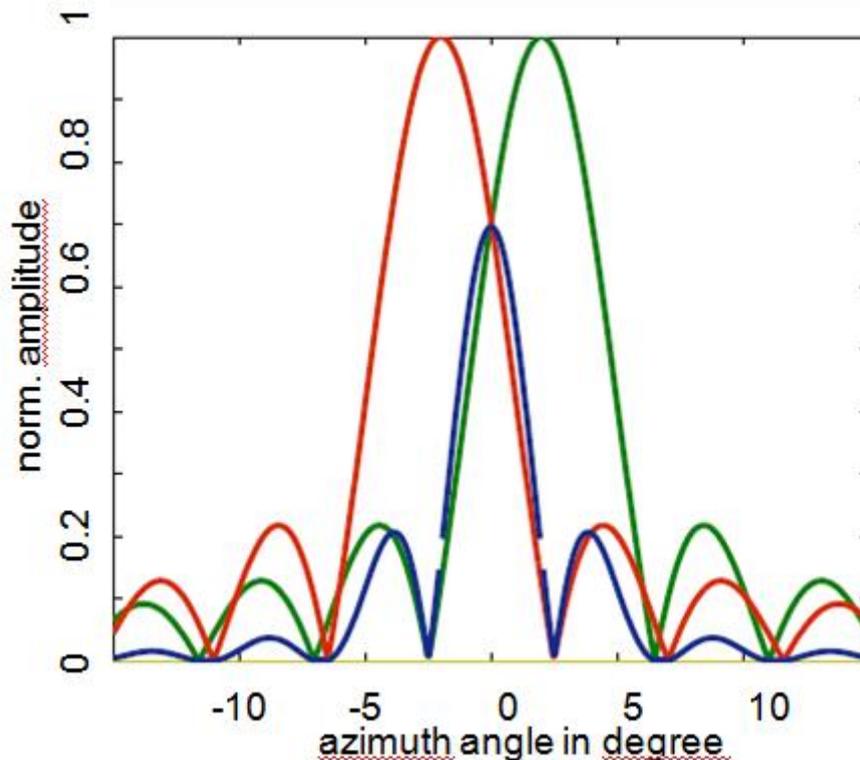


Abbildung 15: MIMO-Prinzip

4 MIMO-Radardemonstrator

In diesem Abschnitt wird der in RADAMES dargestellte MIMO-Radardemonstrator vorgestellt, charakterisiert und diskutiert. Insbesondere wird auf die Vorteile des MIMO-Konzeptes (Multiple Input – Multiple Output) gegenüber der konventionellen MISO-Architektur (Multiple Input – Single Output) mit Bezug auf die Anforderungen in komplexen urbanen Verkehrsszenarien eingegangen werden. Oder in anderen Worten: Die Vorteile einer sendeseitig konfigurierbaren Architektur sollen aufgezeigt und diskutiert werden.

4.1 Radararchitektur

Abbildung 16 zeigt die Architektur unseres 8-Kanal-MIMO-Radardemonstrators. Die 8 Kanäle beruhen auf 8 Antennenelementen (Patch-Antennen), welche im Brennpunkt einer dielektrischen Linse angeordnet sind. Durch die laterale Verschiebung der einzelnen Antennenelemente gegenüber der optischen Achse der Linse zeigen die Radarstrahlen in unterschiedliche Richtungen. Die Architektur des Radars ist nun so ausgelegt, dass die einzelnen Kanäle sowohl senden als auch empfangen können, wobei sendeseitig die einzelnen Kanäle schaltbar ausgeführt wurden, wodurch eine MIMO-Konfiguration entsteht. Im Basisband wird das Signal zunächst gefiltert, dann verstärkt und dann A/D-gewandelt, wobei diese Wandlung über eine schnelle externe Karte ausgeführt wird. Weiterhin zu erwähnen ist die PLL zur Modulation und Generierung der Frequenz-Rampen. Essentiell für die Chirp-Sequence-Modulation ist eine akkurate Synchronisation zwischen Chirp-Generation und Abtastung, was über eine gemeinsame Takterzeugung realisiert wurde. Zu erwähnen sind diverse SPI-Schnittstellen, mit welchem die einzelnen Komponenten angesprochen werden und die externe Kommunikation über einen μC ermöglichen.

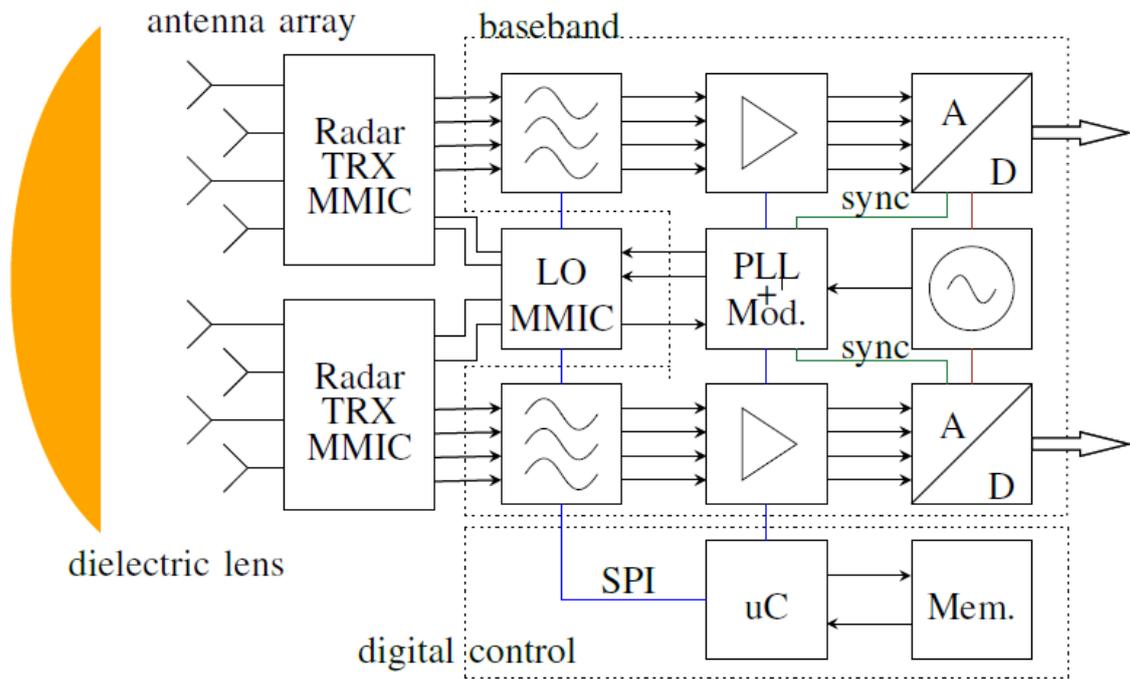


Abbildung 16: Architektur 8-Kanal-MIMO-Radar

Abbildung 17 zeigt die HF-Leiterplatte des Radardemonstrators mit den dargelegten Bauelementen und den angesprochenen Antennen. Die hierfür notwendige komplexe, mehrlagige Leiterplatte wurde gemeinsam mit den Projektpartnern Robert Bosch und Elekonta Marek entwickelt und dargestellt.

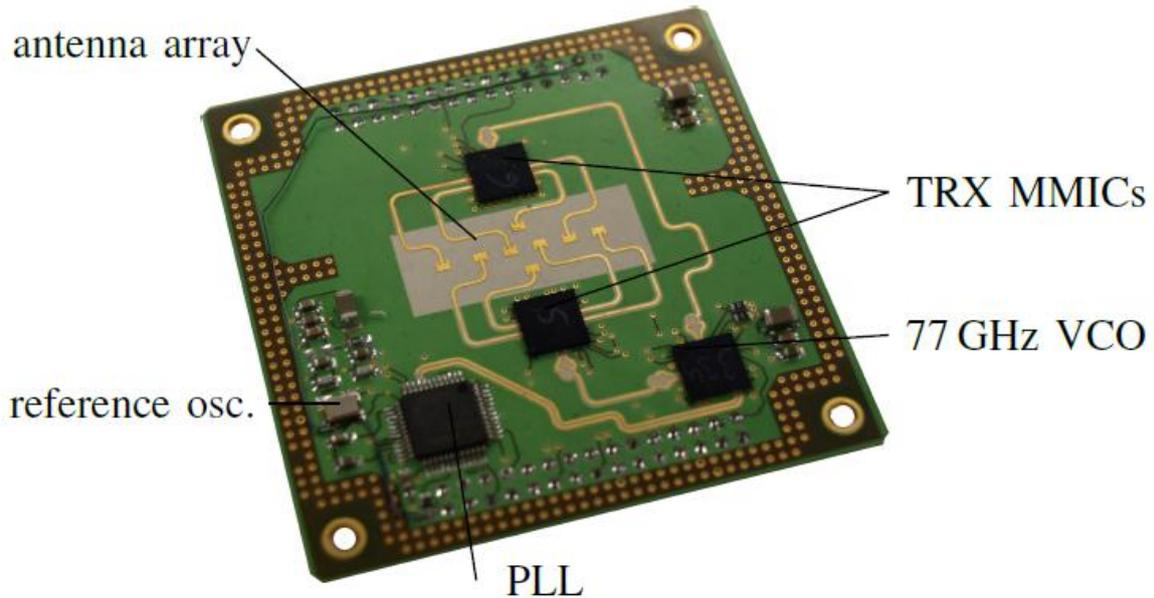


Abbildung 17: HF-Leiterplatte 8-Kanal-MIMO-Radar

Abbildung 18 veranschaulicht die verwendete Antennenkonfiguration für das MIMO-Radar. Mit den 6 in einer Linie angeordneten Antennen erfolgt die horizontale Ausleuchtung, währenddessen die beiden gegenüber dieser Linie versetzten Antennen zur Bestimmung von Elevationswinkeln der Objekte dienen. Durch diese Anordnung der Antennen in der Brennebene einer dielektrischen Linse zeigen die Radarstrahlen in verschiedene Raumrichtungen, wodurch sozusagen eine dreidimensionale räumliche Abtastung in Kombination mit der Relativgeschwindigkeit erfolgt.

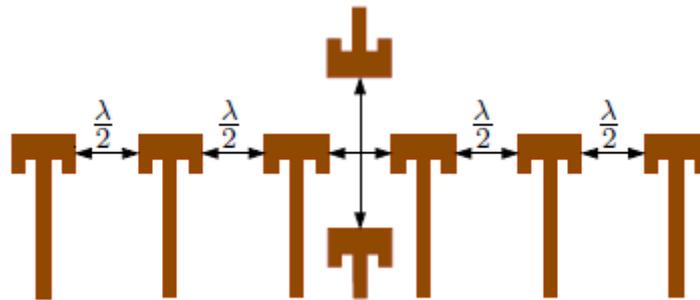


Abbildung 18: Antennenkonfiguration MIMO-Radar

4.2 Antennendiagramme

Im Folgenden soll die Funktion unseres MIMO-Radars anhand von Antennendiagrammen erläutert und bewertet werden. Unter Antennendiagrammen versteht man letztendlich die Empfindlichkeit eines Kanals in Abhängigkeit des Ablagewinkels. Im MISO-Fall (Multiple Input – Single Output) senden alle Kanäle, sodass das Objekt breit ausgeleuchtet wird. Das Antennendiagramm, welches in Abbildung 19 dargestellt ist, gibt somit die Empfangscharakteristik der einzelnen Kanäle bei breiter Ausleuchtung wieder. Gut zu erkennen sind vier in etwa gleich starke Kanäle, welche von zwei weniger starken Kanälen flankiert sind. Dies hängt damit zusammen, dass die korrespondierenden Antennenelemente im Außenbereich teilweise am aktiven Teil der dielektrischen Linse vorbeistrahlen. Weiterhin sind in der optischen Achse die zwei Strahlen für die Elevationswinkelschätzung ebenfalls abgeschwächt zu erkennen, was mit dem gewählten Schnitt beim Elevationswinkel von 0° zusammenhängt. Zusätzlich sind diverse Nebenkeulen erkennbar, welche gegenüber den Hauptstrahlen um mehr als 15 dB abgesenkt sind, was in Einklang mit der Aperturgröße der dielektrischen Linse steht. Diese Antennendiagramme werden durch Anbringen des Radars auf einen Drehteller und einem festen Radarziel gemessen. Diese Antennendiagramme werden abgespeichert und zur Auswertung mit Feldmessungen zur Schätzung des Ablagewinkels korreliert.

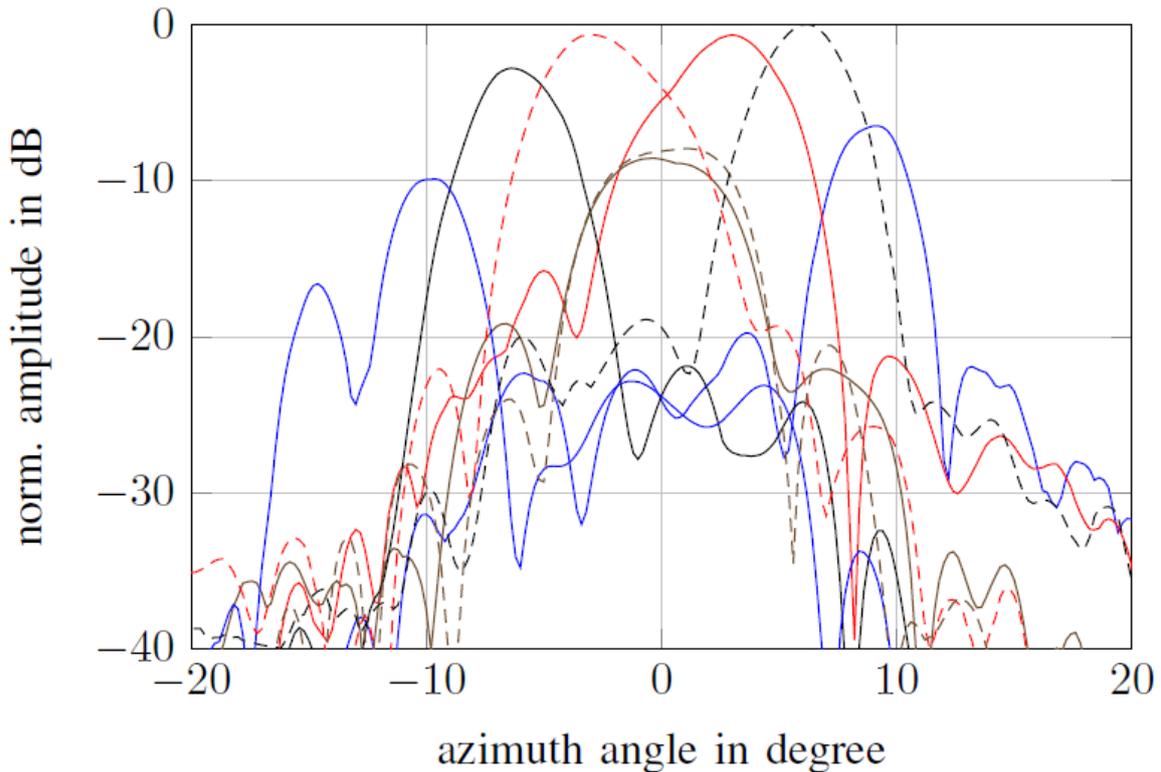


Abbildung 19: Antennendiagramm MISO-Konfiguration

In Abbildung 20 ist das entsprechende Antennendiagramm in der MIMO-Konfiguration (Multiple Input – Multiple Output) zu sehen. MIMO bedeutet hierbei die Konfigurierbarkeit der Sendecharakteristik. Dabei sendet jeweils nur ein Kanal, wohingegen alle 8 Kanäle empfangen. Dies bedeutet, dass für jeden Sendekanal die Empfangscharakteristik der 8 Empfangskanäle aufgezeichnet wird. Da die einzelnen Sendekanäle in unterschiedliche Richtungen zeigen, gibt es 8×8 Empfangscharakteristiken. Somit wird aus einem 8-kanaligen MISO-Radar ein 64-kanaliges MIMO-Radar. Allerdings können diese 64 Kanäle nicht vollständig ausgenutzt werden, da in der Regel nur die dem Sender unmittelbar benachbarten Empfangskanäle genügend Leistung empfangen. So sind in Abbildung 20 16 Kanäle gegenüber den 8 Kanälen in Abbildung 19 klar zu erkennen. Es entstehen somit zwischen den Strahlen in der MISO-Konfiguration zusätzliche Strahlen in der MIMO-Konfiguration, was einer verbesserten Abtastung des Winkelraumes entspricht. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Strahlen in der MIMO-Konfiguration schmaler erscheinen. Dies hängt mit der schmaleren Ausleuchtung eines Objektes zusammen, da ja nur ein Strahl in der MIMO-Konfiguration verglichen mit 8 Strahlen in der MISO-Konfiguration sendet. Diese reduzierte Strahlbreite ist auch der Ansatz für eine verbesserte Winkelschätzung und auch Winkeltrennfähigkeit, worauf im folgenden Abschnitt eingegangen werden wird.

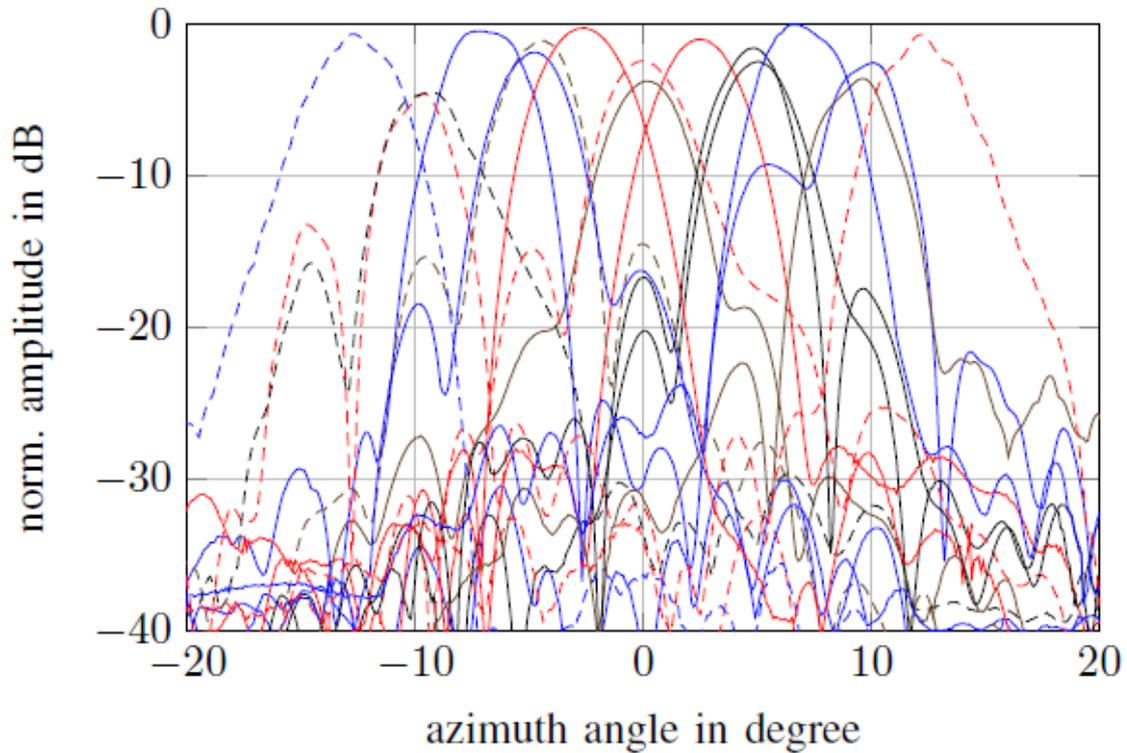


Abbildung 20: Antennendiagramm MIMO-Konfiguration

4.3 Verifikation Radardemonstrator

Im Folgenden soll durch Vergleich von MISO- und MIMO-Konfiguration der Vorteil einer konfigurierbaren Sendecharakteristik herausgearbeitet und diskutiert werden. Die Schätzung von Objektlagewinkeln beruht bei den verwendeten Korrelationsverfahren auf einer genauen Abtastung des Winkelraumes mit den verschiedenen Radarstrahlen. Von daher ist plausibel, dass durch die Erhöhung der Strahlen bei gleichzeitiger Reduktion der Strahlbreite eine genauere Abtastung des Winkelraumes möglich ist. Quantitativ lässt sich diese Verbesserung über die sogenannte Cramer-Rao-Grenze (CRLB – Cramer Rao Lower Bound) beschreiben, welche eine untere Genauigkeit bei der Winkelschätzung angibt. Abbildung 21 gibt die Cramer-Rao-Grenze im Vergleich zwischen MISO- und MIMO-Konfiguration wieder. Zunächst fällt auf, dass in der MIMO-Konfiguration eine genaue Winkelschätzung über einen größeren Winkelbereich möglich ist. Dies hängt mit der Bereitstellung eines zusätzlichen Strahls im Außenbereich zusammen. Für die Winkelschätzung sind mindestens zwei Strahlen mit ausreichend Signalleistung notwendig. Dies plausibilisiert das Ergebnis der Cramer-Rao-Grenze, welche neben einem erweiterten Detektionsbereich auch eine insgesamt erhöhte Genauigkeit bei der Winkelschätzung vorhersagt. Diese insgesamt erhöhte Genauigkeit hängt mit den zusätzlichen Radarstrahlen zusammen, welche in der MIMO-Konfiguration zur Verfügung stehen.

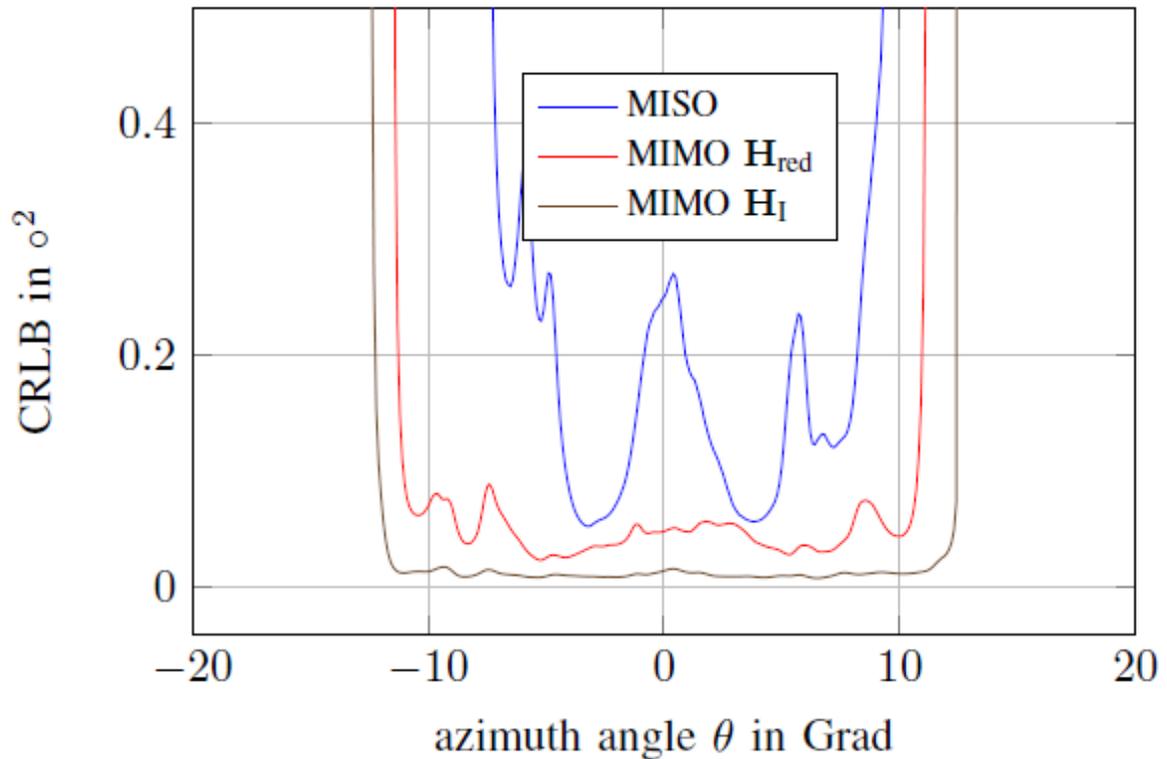


Abbildung 21: Cramer-Rao-Grenze (CRLB)

Ein weiterer Vorteil der detaillierteren Abtastung des Winkelraumes liegt in der Reduktion von Mehrdeutigkeiten. Letztendlich lässt sich dies wiederum auf das Abtasttheorem – diesmal für eine räumliche Abtastung im Winkel – zurückführen. Mehrdeutigkeiten lassen sich durch Autokorrelationsdiagramme aufspüren. Hierbei wird die Selbstähnlichkeit des Antennendiagrammes bei Translation um beliebige Winkel quantifiziert. Abbildung 22 zeigt die Kreuzkorrelationsdiagramme für ein Ziel bei einem Elevationswinkel von 10° und einem Azimuthwinkel von 3° . In der MISO-Konfiguration (rechts) sind neben einem Maximum an der Position des Objektes Nebenmaxima zu erkennen, welche insbesondere bei reduzierter Signalstärke zu Mehrdeutigkeiten und Fehlinterpretationen führen können.

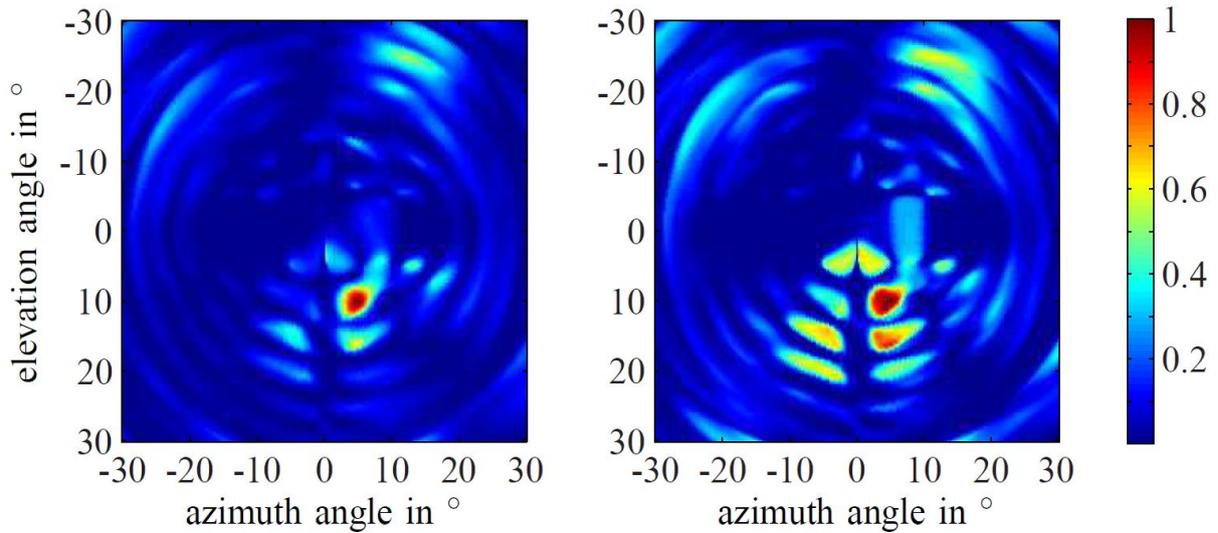


Abbildung 22: Kreuzkorrelationsdiagramme MIMO-MISO

Abschließend soll der Vorteil der MIMO-Konfiguration mit Bezug auf die Winkeltrennfähigkeit zweier Objekte dargelegt und diskutiert werden. Um zwei Objekte detektieren zu können, müssen diese Objekte in mindestens drei Radarstrahlen mit ausreichender Signalstärke detektiert werden. Von daher ist in der MIMO-Konfiguration aus den dargelegten Argumenten eine verbesserte Winkeltrennfähigkeit zu erwarten. Abbildung 23 zeigt die Messkammer zur Bestimmung der Winkeltrennfähigkeit. Dabei werden zwei Radarziele verwendet, welche einen gewissen Abstand zueinander (im Winkel) besitzen. Durch Detektion dieser beiden Ziele in der MISO- und MIMO-Konfiguration lassen sich Aussagen über die Winkeltrennfähigkeit der Radare treffen.

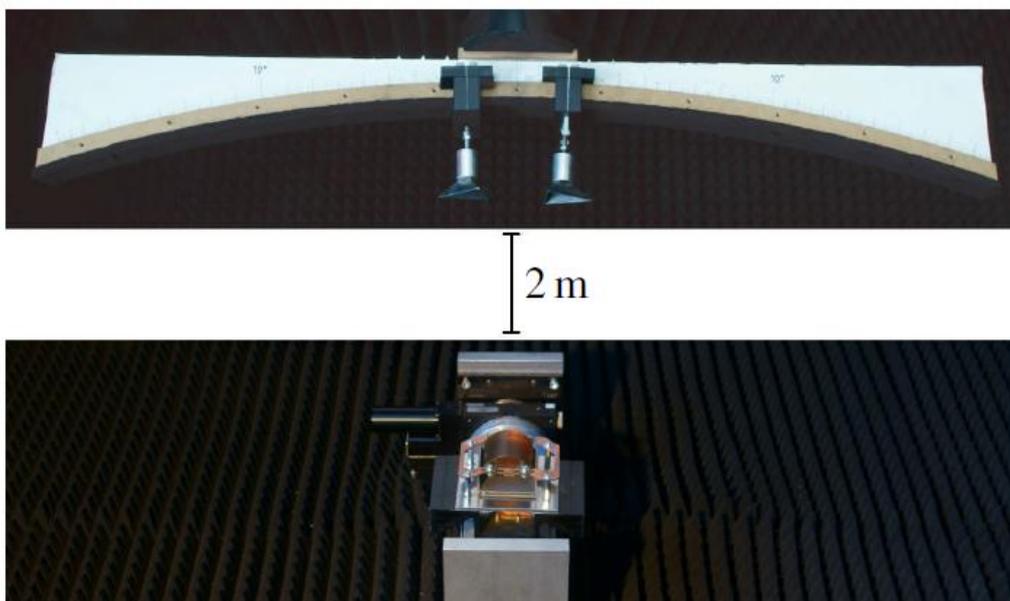


Abbildung 23: Radar-Messplatz zur Winkeltrennfähigkeit

Abbildung 24 zeigt Ergebnisse in der MISO- (links) und MIMO-Konfiguration (rechts). Während in der MIMO-Konfiguration zwei Ziele unterscheidbar sind, ergibt die MISO-Konfiguration ein breites Maximum, woraus die exakte Position der beiden Ziele nicht zu ermitteln ist. Die Positionen der beiden Objekte liegen bei 0° und -2° .

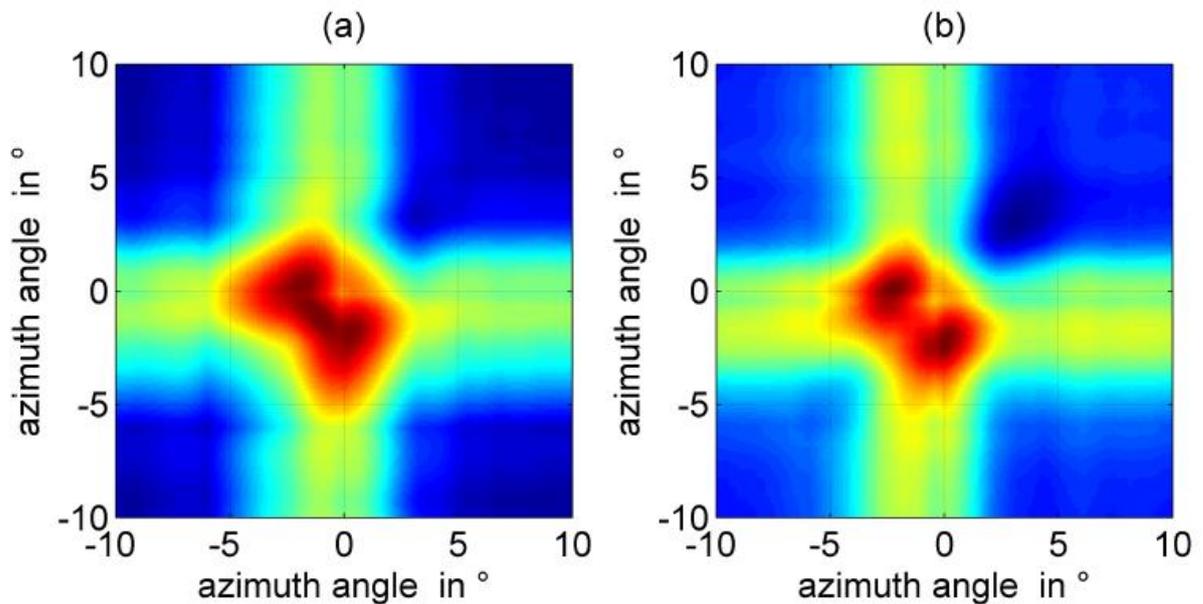


Abbildung 24: Winkeltrennfähigkeit MISO - MIMO

4.4 Feldmessungen

Zur weiteren Verifikation des MIMO-Konzeptes wurden Feldmessungen mit Aluminiumrohren durchgeführt. Hierbei wurden mehrere Rohre in verschiedenen Abständen und Winkeln vermessen und detektiert. Abbildung 25 zeigt die Überlagerung eines Bildes des Objektszenarios mit den Detektionen durch das MIMO-Radar. Deutlich zu erkennen ist die gute Übereinstimmung zwischen dem Szenario und den Detektionen. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass unser MIMO-Radar in der Lage ist, derartig komplexe Mehrzielszenarien zu beherrschen. Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigen Szenarien mit zwei und drei Objekten in der MISO- und MIMO-Konfiguration, woraus klar zu erkennen ist, dass die MIMO-Konfiguration zu einer Trennung der Objekte führt, was in der MISO-Konfiguration nicht möglich ist. Somit konnte auch in Feldversuche nachgewiesen werden, dass MIMO-Radare bei der Beherrschung komplexer urbaner Szenarien überlegen sind. Feldmessungen mit realen Fahrzeugen können nicht zur Konzeptverifikation herangezogen werden, da gerade an Fahrzeugen mehrere Streuzentren auftreten können, wodurch eine Beurteilung der Winkeltrennfähigkeit nahezu unmöglich wird.

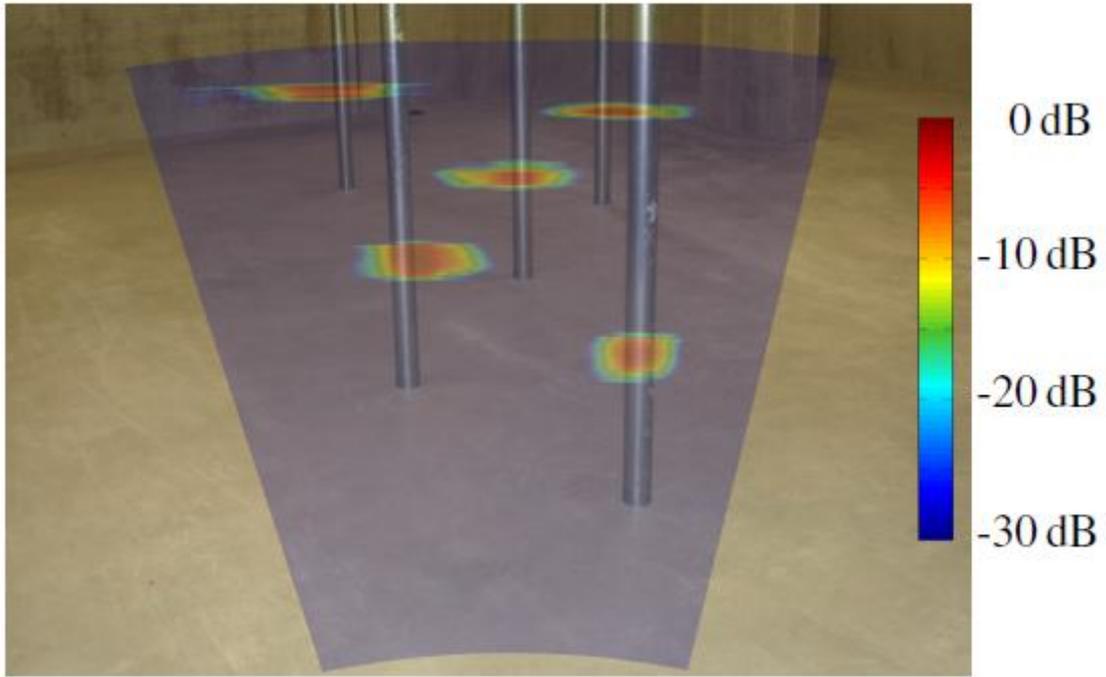


Abbildung 25: Messobjekte und Radardetektionen

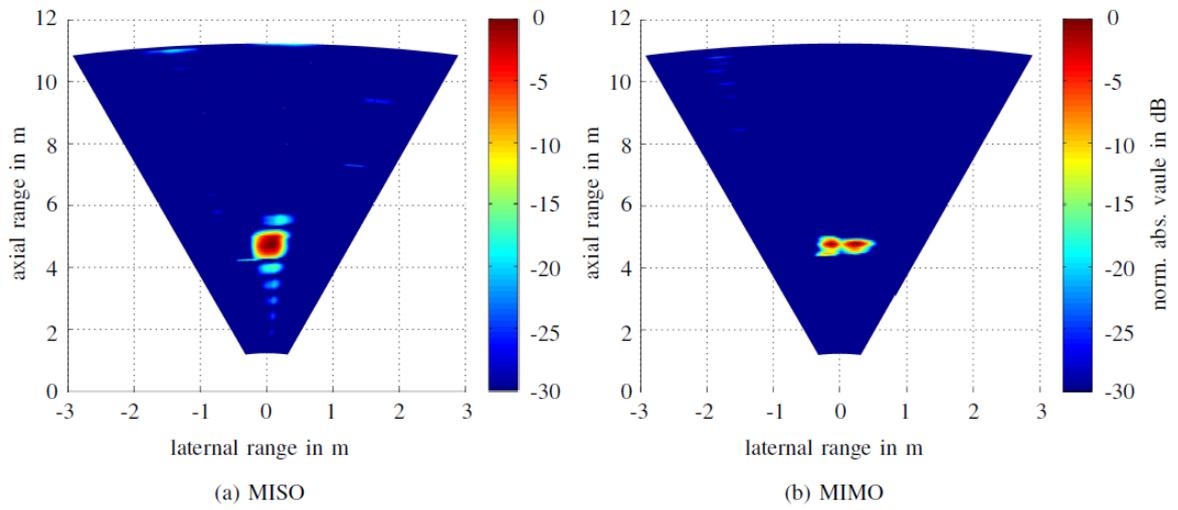


Abbildung 26: Winkeltrennfähigkeit MISO - MIMO (2 Objekte)

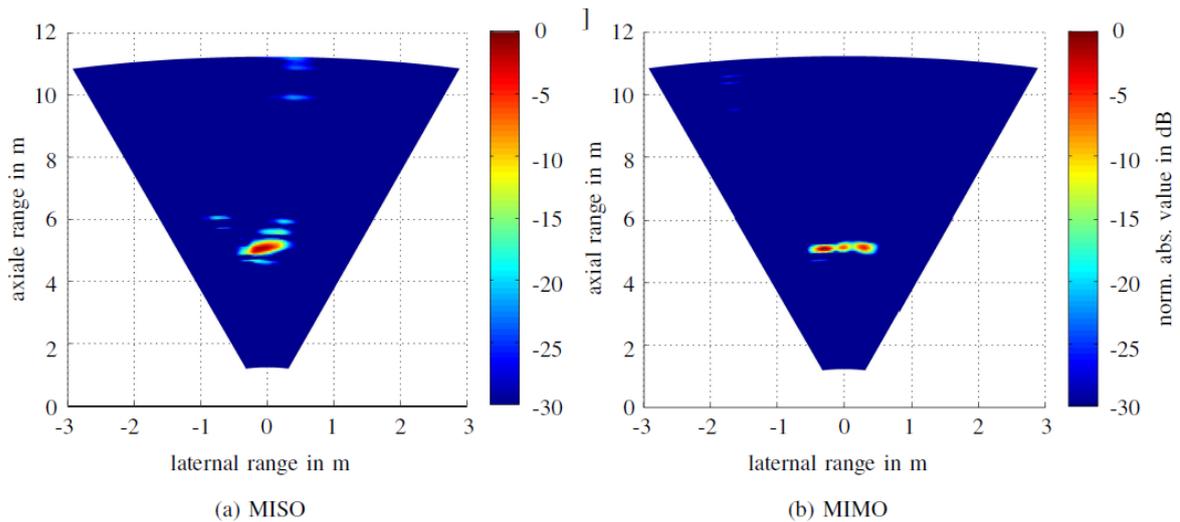


Abbildung 27: Winkeltrennfähigkeit MISO - MIMO (3 Objekte)

4.5 Zielsimulator

Neben der Winkeltrennfähigkeit spielen Orts- und Geschwindigkeitstrennfähigkeit in urbanen Szenarien die entscheidende Rolle. Hierfür wurde in RADAMES die Chirp-Sequence-Modulation in MIMO-Radare eingeführt. Mit diesem Modulationsverfahren ist es möglich, Abstand und Geschwindigkeit separat und eindeutig ohne zusätzliches „matching“ verschiedener FMCW-Rampen zu bestimmen. Die Signalverarbeitung basiert hierbei auf einer 2D-FFT, worauf im folgenden Abschnitt eingegangen wird. Herausfordernd hierbei ist die Verifikation solcher Systeme, da das statische Aufstellen von Objekten für die Bestimmung von Relativgeschwindigkeiten sicher nicht genügt. Ein Test im realen Straßenverkehr wäre im Prinzip natürlich möglich; allerdings sind solch reale Szenarien keine definierten Situationen, was für eine Konzeptverifikation unabdingbar ist.

Deshalb wurde in Kooperation mit dem Projektpartner Bosch ein Zielsimulator entwickelt, welcher sowohl Abstand als auch Relativgeschwindigkeiten zweier Ziele darstellen kann. Die Architektur dieses Zielsimulators ist in Abbildung 28 dargestellt. Das vom Radarsensor empfangene 77 GHz-Signal wird zunächst über einen subharmonischen Mischer in den 2-3 GHz-Bereich heruntergemischt (RX horn). Danach wird das Signal in zwei Kanäle aufgeteilt, welche die beiden Ziele im Simulator ergeben und darstellen. Über zwei Einseitenbandmischer (IQ-Modulator), welche über zwei DDS angesteuert werden, kann ein Doppler-Signal, welches die Relativgeschwindigkeit widerspiegelt, aufmoduliert werden. Anschließend gehen die beiden Signale auf Verzögerungsleitungen, welche in einem Kanal schaltbar ausgeführt wurden. Diese Verzögerungsleitungen beinhalten optische Glasfaserstrecken, sodass Abstände im Bereich von 40 und 80 m dargestellt werden können. Anschließend werden die beiden Kanäle wieder zusammengeführt und auf 77 GHz hochgemischt. Dieses manipulierte / modulierte Signal wird dann an den Radarsensor zurückgesendet. Nicht unerwähnt bleiben sollen diverse Dämpfungsglieder und Verstärker, die zur Pegeleinstellung benötigt werden. Abbildung 29 zeigt den Zielsimulator sowie den „HF-Kopf“ mit den beiden Hörnern und Mischer.

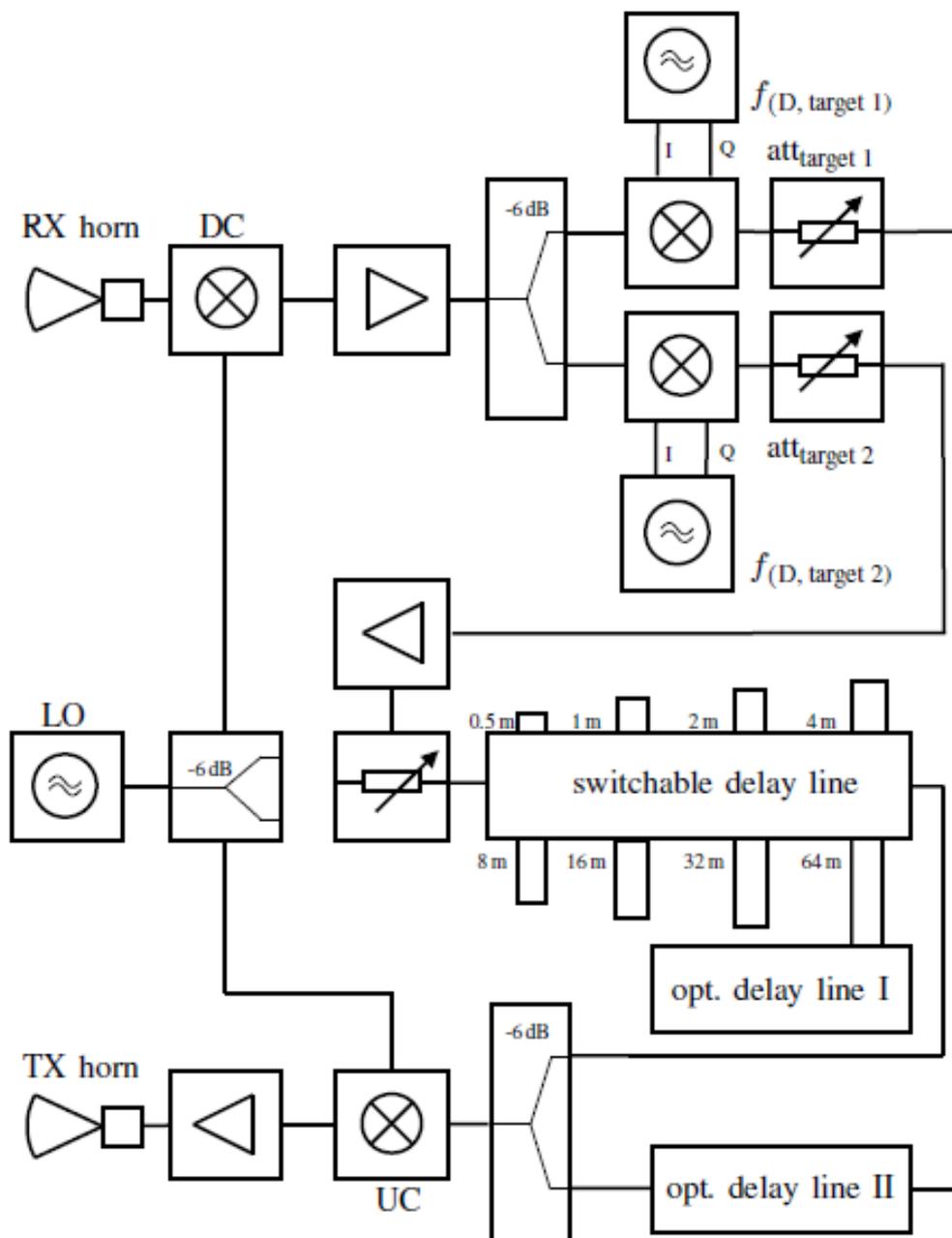


Abbildung 28: Architektur Zielsimulator

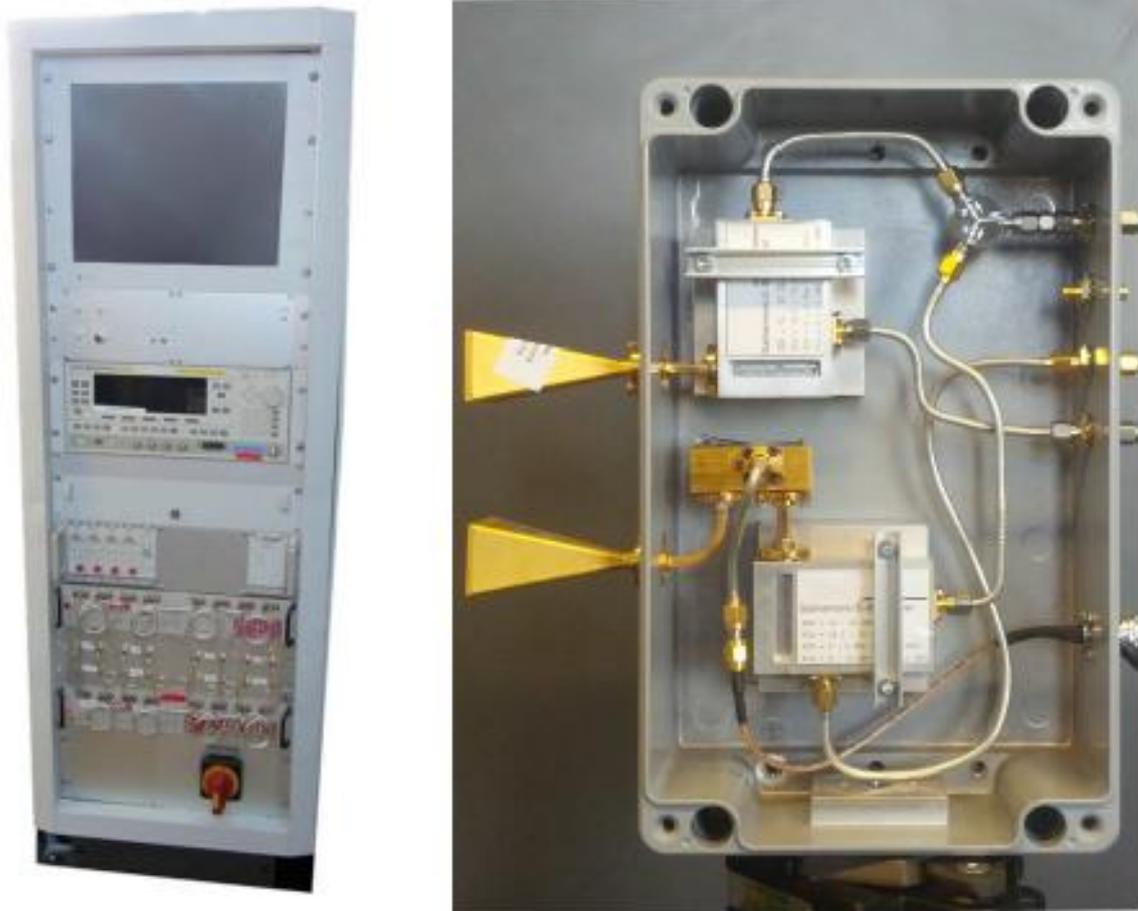


Abbildung 29: Zielsimulator und HF-Kopf

4.6 Verifikation Chirp-Sequence-Modulation

Mit Hilfe des entwickelten Zielsimulators wurde die implementierte Chirp-Sequence-Modulation verifiziert. Hierbei werden die aus den einzelnen Chirps gewonnenen Zeitsignale in die Zeilen einer Matrix geschrieben, welche in einem weiteren Schritt zweidimensional fouriertransformiert wird (2D-FFT). Im Ergebnis erscheint nach entsprechender Umskalierung auf der horizontalen Achse der Abstand und auf der vertikalen Achse die Relativgeschwindigkeit eines oder mehrerer Objekte. Abbildung 30 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Messung mit zwei bewegten Objekten (erzeugt im Zielsimulator). Diese beiden Objekte besitzen sowohl unterschiedliche Abstände als auch differierende Relativgeschwindigkeiten. Mit dem entwickelten Zielsimulator ist auch eine Annäherung der beiden Objekte darstellbar, womit das Thema Orts- und Geschwindigkeitstrennfähigkeit mehrerer Objekte adressiert werden kann. Ohne auf Details eingehen zu wollen, sei auf eine Problematik dieses Modulationsverfahrens eingegangen. Zur eindeutigen Bestimmung der Relativgeschwindigkeiten müssen im relevanten Geschwindigkeitsbereich sehr kurze Chirps (ca. $10 \mu\text{s}$) eingesetzt werden (Abtasttheorem). Dies ist technisch möglich, wobei als Konsequenz im Abstandsbereich Abstraten von mehreren hundert MSamples/s für jeden Kanal notwendig werden (Abtasttheorem), was bei der heute im Automobil einsetzbaren und auch bezahlbaren Elektronik nicht darstellbar ist. Deshalb müssen Verfahren der Signalverarbeitung eingesetzt werden, welche das Problem der Unterabtastung eindeutig lösen können. Ein Verfahren, welches im Rahmen von RADAMES auf MIMO-Radare

appliziert wurde, ist „compressed sensing“. Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden bei der europäischen Mikrowellenkonferenz 2013 präsentiert und in einer Zeitschrift publiziert. Auf die mathematischen Hintergründe dieser sehr komplexen Verfahren soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

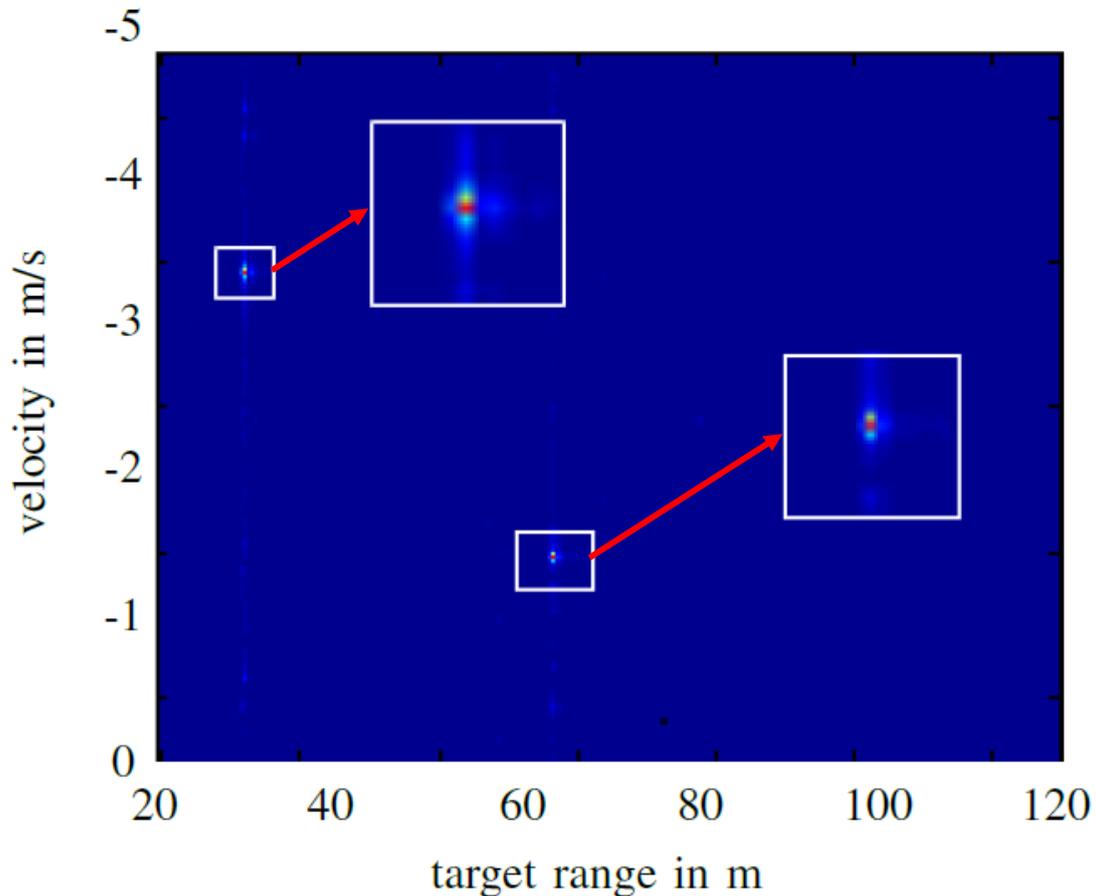


Abbildung 30: Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung mit zwei bewegten Objekten

5 Fazit aus RADAMES

In Summe kann ein äußerst positives Fazit gezogen werden. Die technischen Ziele wurden erreicht und fanden Einzug in die Entwicklungen der Projektpartner. Der Vorteil des MIMO-Konzeptes konnte klar dargestellt werden und auch zu den beteiligten Industriepartnern transferiert werden. Über Konferenzvorträge und Veröffentlichungen zu den Ergebnissen aus RADAMES konnte die Reputation des Projektteams auch international deutlich gesteigert werden. Mit Dr.-Ing. Marcel Mayer, der das Projekt in der Anfangsphase bearbeitete wurde ein „Kopf“ zum Projektpartner Bosch transferiert, wodurch die Zusammenarbeit nochmals deutlich intensiviert werden konnte. Eine zweite Promotion (M.Eng. Steffen Lutz) befindet sich in der Endphase und wird von universitärer Seite von Prof. Weigel, der ebenfalls als Projektpartner mitwirkt, betreut.

6 Verwertung der Ergebnisse

Ergebnisse aus RADAMES wurden in verschiedenen Bereichen verwertet:

- **Technische Ergebnisse:** Der Vorteil des MIMO-Konzeptes wurde klar herausgearbeitet. Diese Ergebnisse wurden insbesondere mit dem Projektpartner Bosch diskutiert, was auch einen Teil dazu beigetragen hat, dass Bosch MIMO-Prinzipien zur Schätzung des Elevationswinkels in die aktuelle Entwicklung automotiver Radarsensoren implementiert hat. Weiterhin wurde gemeinsam mit Bosch der beschriebene Zielsimulator konzipiert und umgesetzt. Dieser Zielsimulator wurde an der Hochschule Ulm entwickelt und zum Projektpartner Bosch transferiert.
- **Publikationen und Vorträge:** Die Ergebnisse aus RADAMES wurden bei verschiedenen nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt und veröffentlicht. Unter den Veröffentlichungen befindet sich ebenfalls eine Publikation in einer internationalen Zeitschrift. Eine Auflistung dieser Veröffentlichungen befindet sich im Abschnitt 8.
- **Abschlussarbeiten und Projektarbeiten:** Im Rahmen von RADAMES wurden mehrere Abschlussarbeiten (Diplom, Master, Bachelor) durchgeführt. Weiterhin fanden diverse Projektarbeiten (Master, Bachelor) statt. Im fortgeschriebenen Verwertungsplan ist die Anzahl dieser Arbeiten angegeben.
- **Promotionen:** Dr.-Ing. Marcel Mayer, der RADAMES zu Beginn des Projektes bearbeitet hat, promovierte 2011 zum Dr.-Ing. an der Universität Erlangen-Nürnberg, die sich ebenfalls als Projektpartner an RADAMES beteiligt. M.Eng. Steffen Lutz, der RADAMES größtenteils bearbeitete, ist im finalen Stadium seiner Dissertation. Die Einreichung seiner Dissertation ist für das 1.Quartal 2015 vorgesehen.
- **Anschlussprojekte:** Während der Projektlaufzeit von RADAMES wurden verschiedene Projektideen entwickelt, welche teilweise in Projektanträge mündeten. Eine Projektidee betrifft den Transfer von Fahrerassistenzsystemen auf Fahrräder. So kann ein nach hinten gerichtetes Radar den Rückraum überwachen, um Unfälle, welche beim Abbiegen durch überholende Fahrzeuge entstehen können, zumindest zu reduzieren. Eine eingereichte Skizze wurde leider nicht genehmigt; allerdings gibt es Gespräche mit dem Projektpartner Bosch über diesen Transfer. Weiterhin wurde ein Horizon2020-Antrag zu Fahrerassistenzsystemen mit Partnern entlang der Donau eingereicht, der allerdings noch nicht beschieden wurde. Zudem wurden industrielle Anwendungen von Mikrowellensensorik erarbeitet (Pegelstand, Strömungssensorik), die zu einem ZAFH-Antrag mit verschiedenen auch industriellen Partnern führte. Dieser Antrag wurde ebenfalls noch nicht entschieden. Im Rahmen eines Investprogrammes des Landes konnte ein 60-90 GHz-Netzwerkanalysator beschafft werden, womit Projekte zur Mikrowellensensorik bearbeitet werden können. Weiterhin konnte eine Mittelbaustelle des Landes gewonnen werden, welche im Rahmen einer kooperativen Promotion für diese Themen eingesetzt wird.
- **Internationale Reputation der Arbeitsgruppe:** Basierend auf den Arbeitsergebnissen aus RADAMES konnte die internationale Reputation der Arbeitsgruppe gesteigert werden, was sich u.a. in diversen Vorträgen auf internationalen Konferenzen oder in Einladungen als Gutachter für die europäische Mikrowellenkonferenz äußert.

7 Preise

2012 wurde Prof. Walter der Wissenschaftspreis der Stadt Ulm für Arbeiten zur Radarsensorik verliehen.

2013 wurde M.Eng. Steffen Lutz (und Prof. Thomas Walter) der 3. EEEfCOM-Preis in Hamburg verliehen.

8 Aus RADAMES entstandene Publikationen und Vorträge

Reviewed Journal Publications

Lutz, S.; Walter, T.; Weigel, R.: "Lens Based 77GHz MIMO Radar for Angular Estimation in Multi Target Environments", in International Journal of Microwave and Wireless Technologies/ Volume 6 / Special Issue 3-4 / June 2014 pp 397-404

Baur, K.; Mayer, M.; Lutz, S.; Walter, T.: "Angular measurements in azimuth and elevation with 77 GHz radar sensors", in International Journal of Microwave and Wireless Technologies / Volume 5 / Special Issue 01 / February 2013 pp 35-42

Reviewed Conference Publications

Lutz, S.; Erhart, C.; Walter, T.; Weigel, R.: "8 Channel MIMO Long Range Radar Concept for Angular Estimation in Multi target scenarios ", in IEEE MTT-S Conference on Microwaves for Intelligent Mobility 2015, manuscript in preparation

Erhart, C.; Lutz, S.; Walter, T.; Weigel, R.: "A highly modular 77GHZ SiGe Radar Concept for Industrial Measurement and Positioning", in German Microwave Conference 2015, submitted

Lutz, S.; Ellenrieder, D.; Walter, T.; Weigel, R.: "On fast Chirp Modulations and Compressed Sensing for Automotive Radar Applications", in International Radar Symposium 2014 Lutz, S.; Walter, T.; Weigel, R.: "Target Simulator Concept for 77GHz Automotive Radar Applications", in European Radar Conference 2014

Lutz, S.; Walter, T.: "Lens Based 77GHz TDM MIMO Radar Sensor for Angular Estimation in Multitarget Environments", in 2013 European Radar Conference (EURAD) Oct 2013

Schoenberger, F.; Lutz, S.; Ott, T.; Walter, T.: "Spectral Luminescence Imaging for CIGS Thin Film Modules", in 28th EUPVSEC Paris September 2013

Lutz, S.; Baur, K.; Schmidt, A.; Walter, T.: "Lens based 24 GHz SiGe IQ radarsensor for a multitude of applications ", in 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2013, vol., no., pp.1514,1518, 8-12 April 2013

Baur, K.; Mayer, M.; Lutz, S.; Walter, T.: "77 GHz automotive radar sensors: Antenna concept for angular measurements in azimuth and elevation", in Radio and Wireless Symposium (RWS), 2013 IEEE, vol., no., pp.100,102, 20-23 Jan. 2013 Lutz, S.; Baur, Klaus; Walter, T.: "77 GHz lens-based multistatic MIMO radar with colocated antennas for automotive applications", in Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International, vol., no., pp.1,3, 17-22 June 2012

Baur, K.; Mayer, M.; Lutz, S.; Walter, T.: "Lens based beamforming principles for 77 GHz automotive radar sensors", in 2011 European Radar Conference (EuRAD), pp.273,276, 12-14 Oct. 2011

Conference Presentations

Lutz, S.; Walter, T.: "77 GHz MIMO Radar for Automotive Applications", in IEEE COM 2013 Ulm, Germany, July 2013.

Lutz, S.; Hennies, M.; Landeck, E.; Walter, T.: "Beruehrungslose Messung von Pegelstand und Fliessgeschwindigkeit fuer Hydrologie und Hochwasserschutz", in IEEE COM 2013 Ulm, Germany, July 2013.

Lutz, S.;Walter T.: "77 GHz MIMO Radar for Automotive Applications", in RADCOM 2013Hamburg, Germany, April 2013.

Lutz, S.; Baur, K.; Walter T.: "Zieltrennungs und Winkelschaetzverfahren fuer 77 GHz Automobilradarsensoren, in EEEfCOM 2012Ulm, Germany, July 2012.

Baur, K.; Mayer, M.; Lutz, S.; Walter T.: "77 GHz Radarsensorik fuer Anwendungen in Verkehr, Industrie und Medizintechnik", in EEEfCOM 2011 Ulm, Germany, July 2011.

9 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Radarbasierte Fahrerassistenzsysteme | 5 |
| Abbildung 2: Konzept Rundumsicht für Fahrerassistenzsysteme | 5 |
| Abbildung 3: Elektronisch schwenkbarer Radarstrahl | 6 |
| Abbildung 4: Konfigurierbares Ortungsfeld von MIMO-Radaren | 7 |
| Abbildung 5: SiGe-Roadmap für Höchstfrequenzanwendungen | 9 |
| Abbildung 6: Herstellung von eWLB-Packages (Quelle: Infineon Technologies) | 10 |
| Abbildung 7: Leiterplatte mit bestückten SiGe-MMICs und Antennenelementen | 10 |
| Abbildung 8: Nahfeldsimulation einer dielektrischen Linse..... | 11 |
| Abbildung 9: Kreuzkorrelationsdiagramme zur Bestimmung von Mehrdeutigkeiten | 12 |
| Abbildung 10: MUSIC-Verfahren bei 8 Objekten | 13 |
| Abbildung 11: FMCW-Modulation | 13 |
| Abbildung 12: Chirp-Sequence-Modulation..... | 14 |
| Abbildung 13: 2D-FFT | 15 |
| Abbildung 14: Radar-Leiterplatte mit PLL | 16 |
| Abbildung 15: MIMO-Prinzip..... | 17 |
| Abbildung 16: Architektur 8-Kanal-MIMO-Radar..... | 18 |
| Abbildung 17: HF-Leiterplatte 8-Kanal-MIMO-Radar..... | 18 |
| Abbildung 18: Antennenkonfiguration MIMO-Radar..... | 19 |
| Abbildung 19: Antennendiagramm MISO-Konfiguration | 20 |
| Abbildung 20: Antennendiagramm MIMO-Konfiguration | 21 |
| Abbildung 21: Cramer-Rao-Grenze (CRLB)..... | 22 |
| Abbildung 22: Kreuzkorrelationsdiagramme MIMO-MISO | 23 |
| Abbildung 23: Radar-Messplatz zur Winkeltrennfähigkeit | 23 |
| Abbildung 24: Winkeltrennfähigkeit MISO - MIMO | 24 |
| Abbildung 25: Messobjekte und Radardetektionen | 25 |
| Abbildung 26: Winkeltrennfähigkeit MISO - MIMO (2 Objekte) | 25 |
| Abbildung 27: Winkeltrennfähigkeit MISO - MIMO (3 Objekte) | 26 |
| Abbildung 28: Architektur Zielsimulator | 27 |
| Abbildung 29: Zielsimulator und HF-Kopf | 28 |
| Abbildung 30: Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung mit zwei bewegten Objekten | 29 |

Berichtsblatt

| | |
|--|---|
| 1. ISBN oder ISSN | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht |
| 3. Titel Abschlussbericht RADAMES | |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Walter, Thomas Lutz, Steffen | 5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.6.2014 |
| | 6. Veröffentlichungsdatum 15.12.2014 |
| | 7. Form der Publikation Abschlussbericht |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hochschule Ulm Albert-Einstein-Allee 55 89081 Ulm | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution |
| | 10. Förderkennzeichen 17018X 10 |
| | 11. Seitenzahl 33 |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn | 13. Literaturangaben 10 |
| | 14. Tabellen 0 |
| | 15. Abbildungen 30 |
| 16. Zusätzliche Angaben | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) | |
| 18. Kurzfassung <p>Radarbasierte Fahrerassistenzsysteme sind Schlüsselkomponenten moderner Fahrzeugsysteme. Für deren Einsatz in komplexen, urbanen Verkehrsszenarien werden hohe Anforderungen gestellt, welche im Projekt RADAMES adressiert wurden. Gemeinsam mit den Projektpartnern Robert Bosch GmbH, Elekonta Marek sowie der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelte die Hochschule Ulm MIMO-Radare bei 77 GHz für den Einsatz im Automobilbereich. Insbesondere wurden in RADAMES die Vorteile des MIMO-Konzeptes (Multiple Input – Multiple Output) bezüglich der Mehrzielfähigkeit und Winkeltrennfähigkeit herausgearbeitet und verifiziert. Basierend auf hochintegrierten SiGe-MMICs wurden in RADAMES kompakte MIMO-Radare entwickelt, die Simulationsumgebung erweitert, die Signalverarbeitung adaptiert sowie das Gesamtkonzept verifiziert. Gemeinsam mit dem Projektpartner Bosch wurde ein Zielsimulator entwickelt, womit MIMO-Radare mit einer sogenannten „Chirp-Sequence-Modulation“ zur eindeutigen Trennung von Abstand und Geschwindigkeit getestet werden können. Im Bereich Simulation wurden insbesondere Verfahren weiterentwickelt, mit denen die Funktionalität der Konzepte vor der Darstellung der Hardware-Komponenten verifiziert werden konnte. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass Radarsensoren mit konfigurierbarer Strahlformung (MIMO-Konzept) deutliche Funktionalitätsvorteile gegenüber nicht konfigurierbaren Sensoren besitzen, gerade was die Einsetzbarkeit in komplexen Verkehrsszenarien anbelangt. Neben dem Einsatz in Fahrerassistenzsystemen können derartige Mikrowellensensoren ebenso für industrielle Anwendungen wie Füllstand- oder Strömungssensorik eingesetzt werden.</p> | |
| 19. Schlagwörter Fahrerassistenzsysteme, Radarsensorik, MIMO-Radare, Chirp-Sequence-Modulation | |
| 20. Verlag | 21. Preis |

Document Control Sheet

| | | |
|--|-----------------------------------|--|
| 1. ISBN or ISSN | 2. Type of Report Final report | |
| 3a. Report Title Abschlussbericht RADAMES | | |
| 3b. Title of Publication | | |
| 4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Walter, Thomas Lutz, Steffen | | 5. End of Project 30th June, 2014 |
| 4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) | | 6. Publication Date 15th December, 2014 |
| | | 7. Form of Publication Final Report |
| 8. Performing Organization(s) (Name, Address) Hochschule Ulm (University of Applied Sciences Ulm) Albert-Einstein-Allee 55 89081 Ulm | | 9. Originator's Report No. |
| | | 10. Reference No. |
| | | 11a. No. of Pages Report 33 |
| | | 11b. No. of Pages Publication |
| | | 12. No. of References 10 |
| 13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn | | 14. No. of Tables 0 |
| | | 15. No. of Figures 30 |
| | | 16. Supplementary Notes |
| 17. Presented at (Title, Place, Date) | | |
| 18. Abstract Radar based driver assistance systems are key components of modern driving systems. The application of such systems in complex urban traffic scenarios imposes special demands which were addressed in the project RADAMES. In cooperation with the partners Robert Bosch GmbH, Elekonta Marek and the University Erlangen-Nürnberg the University of Applied Sciences Ulm developed so called MIMO-radars with an operational frequency of 77 GHz for automotive applications. In RADAMES the advantages of a MIMO-concept (Multiple Input – Multiple Output) with respect to multi-target scenarios and angular separability were pointed out and verified. Based on highly functional and integrated SiGe-MMICs compact MIMO-radar sensors were developed, the simulation environment was extended, signal processing was adapted and the global concept was demonstrated and verified. Together with Bosch a target simulator was developed in order to test MIMO-radars being modulated with a so called "chirp sequence modulation" allowing the unambiguous separation of distance and speed. Regarding simulation special methods were developed being able to predict the performance of these radar concepts. In general it could be shown that radars with a configurable beam forming (MIMO-concept) outperform sensors without this feature especially with respect to the application in complex, urban traffic scenarios. Furthermore concepts were pointed out allowing the application of such microwave sensors for industrial purposes such as flow velocity of liquids or level sensing. | | |
| 19. Keywords Driver assistance systems, radar sensors, MIMO-radars, chirp sequence modulation | | |
| 20. Publisher | | 21. Price |