



Vektoriellles Harmonic Radar und mehr Anwendungen der vektoriellen Mixed-Frequency- Messtechnik

Prof. Dr.-Ing. Holger Heuermann und Dr. Thomas Harzheim

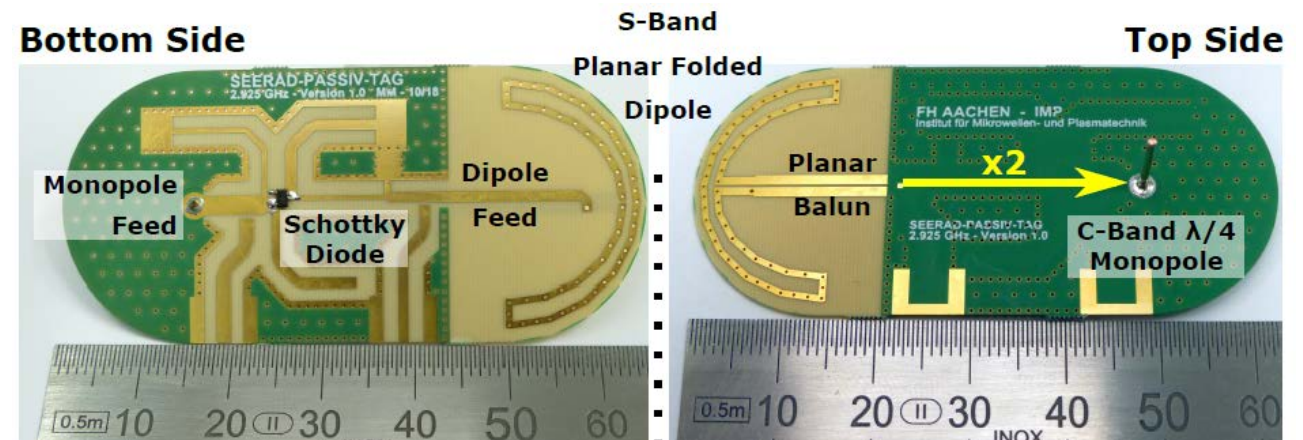
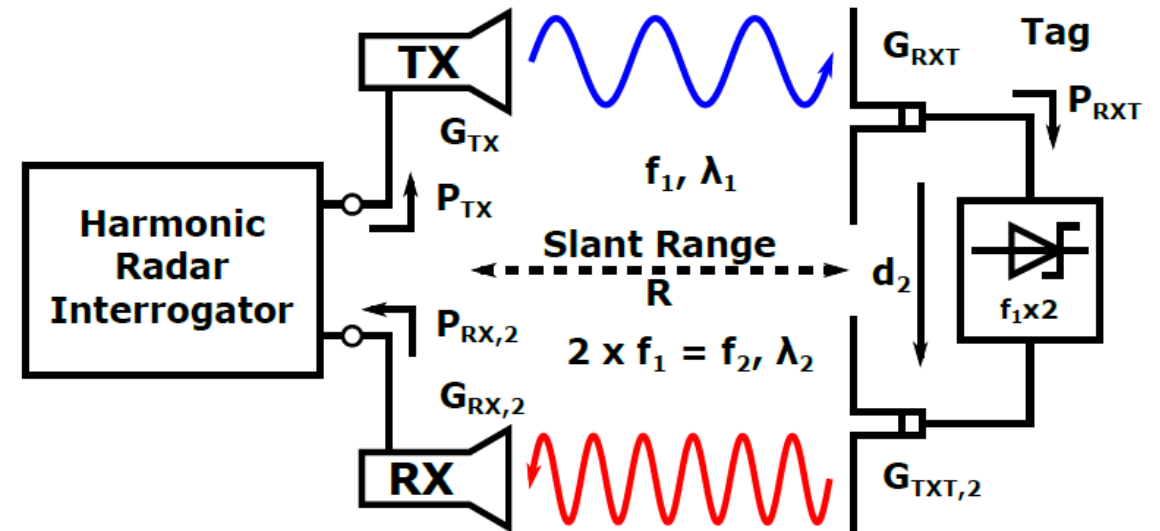
Institut für Mikrowellen- und Plasmatechnik (IMP), FH Aachen

Gliederung des Vortrags

- Harmonic Radar – Grundlagen, Modellierung und Systemarten
- Mixed-Frequency S-Parameter & SFMCW Harmonic Radar
- Vorstellung SFMCW-Forschungssystem des IMP
- SFMCW Radar System SEERAD (BMBF Verbundprojekt FHR, IMP, RAN)
- 7 Ideen und Applikationen für die weitere Harmonic Radar Forschung

Harmonic Radar (HR) – Definition und Einordnung (I)

- Kooperative Sekundärradartechnik
- Interrogator beleuchtet Ziel bei Radargrundfrequenz $f_{TX} = f_1$, Ziel antwortet bei $f_{RX} = n \cdot f_1$ (i.d.R. $n=2$)
- Extrem simpler „Transponder“/ „Tag“:
Antenne(n) + nichtlineare Übertragungsfunktion
- Einfluss von Clutter bei der Grundfrequenz minimiert ($f_{RX} \neq f_{TX}$)



Harmonic Radar – Stand der F&E (I)

- Erste Publikation bereits 1976, aber wenig Fortschritt bis 2000er Jahre beobachtbar [1]
- Ausnahmen:
 - RECCO Rescue System, CW Detektion, kein Ranging, nur RSSI
 - Diverse HR-Forschungsprojekte zur Insektenbeobachtung
- Ursache: Hohe Anforderungen an das Systemkonzept des Interrogators
 - Hohe EIRP Leistungen notwendig,
 - Hohe Empfängerempfindlichkeit erforderlich, bei gleichzeitiger
 - Linearität aller aktiven und passiven Komponenten über den gesamten Systemdynamikumfang des Radars



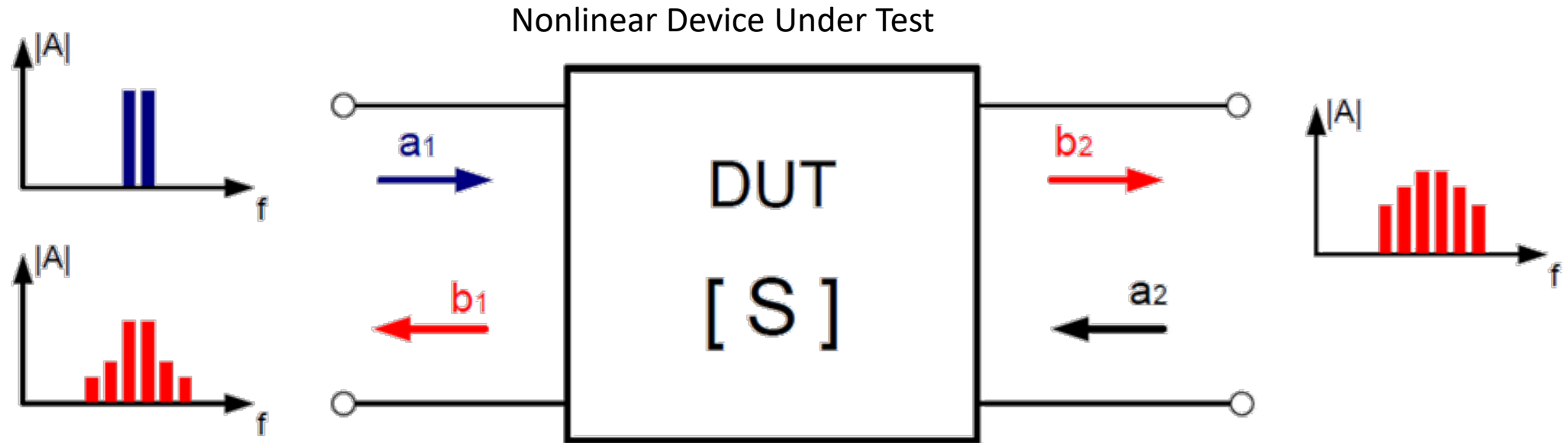
RECCO Interrogator, $P_{TX} = 1.7 \text{ W CW @ 917 MHz}$
5 El. Yagi 917 MHz, 4 Element Patch Array 1834 MHz



RECCO Harmonic Tag,
917 MHz / 1834 MHz

[1] Mazzaro et al: „Nonlinear Radar for Finding RF Electronics: System Design and Recent Advancements“, *IEEE TMTT* Vol. 65, No. 5, May 2017

Einführung in die Mixed-Frequency Parameter



Mixed-Frequency (MF-) S-Parameter:

$$S_{21}^{II,I} = \frac{b_{II}^{II}}{a_{I}^{I}}$$

I: Frequency of the incident wave at the input

II: Frequency at the output

Vektorielles Harmonic SFMCW Ranging

Entfernungsinformation zum Ziel

Zeitbereich -> Laufzeit, Frequenzbereich -> Phase,
 Magnitude / Betrag für Modell vernachlässigbar

Phasenprogression i. Vorwärtsrichtung

- Stimulus A: $y(A) = e^{-j(2\pi f^I \cdot t + \varphi_0)}$
- A zu B: $y(B) = e^{-j(\omega t + \varphi_0)} \cdot e^{-j2\pi f^I \nu_p^{-1} \cdot l_x}$
- B zu C: $y(C) = a_2 \cdot [y(B)]^2$
 $\Leftrightarrow y(C) = a_2 \cdot e^{-2j(2\pi f^I \nu_p^{-1} \cdot l_x + \omega t + \varphi_0)}$

Argument der gemessenen
 Mixed-Frequency Parameter
 an einer Stützstelle d. Sweeps

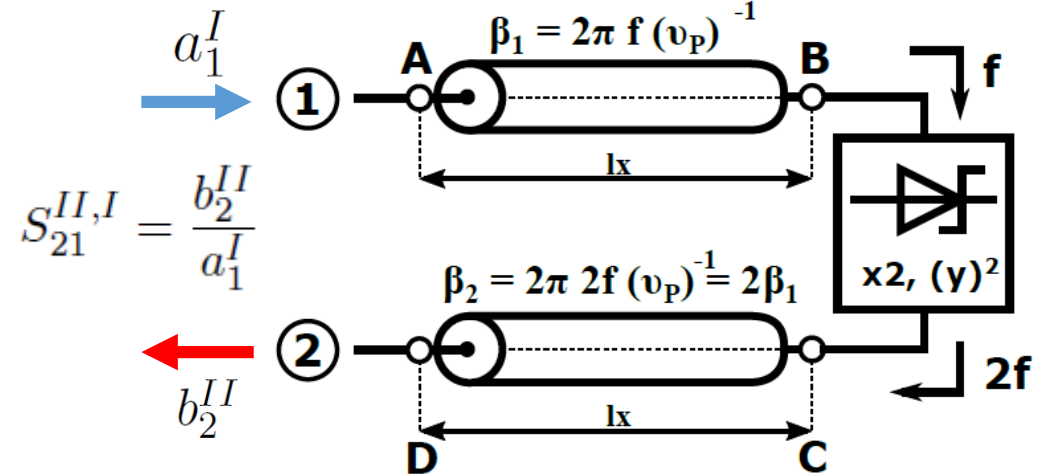
- C zu D (doppelte scheinbare Länge da 2f):

$$y(D) = e^{-2j(2\pi f^I \nu_p^{-1} \cdot l_x + \omega t + \varphi_0)} \cdot e^{-j4\pi f^I \nu_p^{-1} \cdot l_x}$$

$$y(D) = e^{-2j(\omega t + \varphi_0)} \cdot e^{-j8\pi f^I \nu_p^{-1} \cdot l_x}$$

Durch Referenzierung
 an bekannter Position l_{Ref}

Harmonic Radar (n=2) Modell



$$\angle(S_{21}^{II,I}) = -2 \cdot \varphi_0 - \frac{8\pi f^I}{\nu_p} \cdot l_x$$

φ_0 : Initialer, beliebiger, Phasenoffset in Stützstelle

$$\angle\left(\frac{S_{21,M}^{II,I}}{S_{21,\text{Ref}}^{II,I}}\right) = \frac{-8\pi f^I}{\nu_p} \cdot (l_x - l_{\text{Ref}})$$

Harmonic Step-FMCW Auflösungs-fähigkeit, Eineindeutigkeitsbereich & Auswertung

- Ähnliche Einschränkungen wie FMCW durch Abtastung im Frequenzbereich
- Chirp- / Sweep-Bandbreite bestimmt die Auflösungs-fähigkeit von Zielen
- Diskrete Frequenzschrittweite bestimmt die maximale eineindeutige Zielentfernung

$$\frac{-8\pi}{\nu_p} \cdot l_x \cdot \underbrace{(f_2^I - f_1^I)}_{\Delta f: \text{step-size}} \leq 2\pi$$

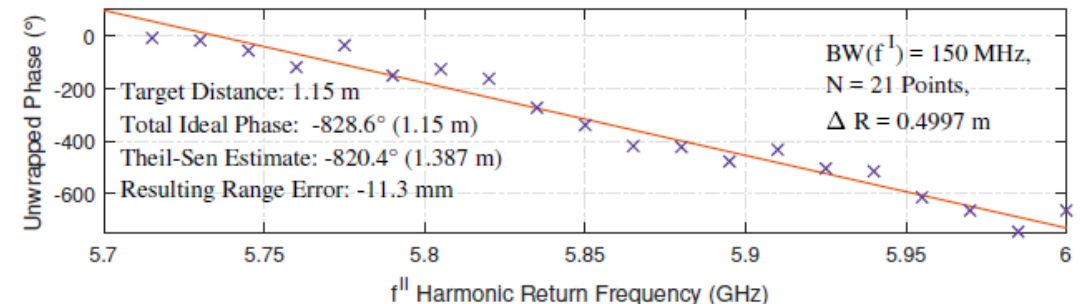
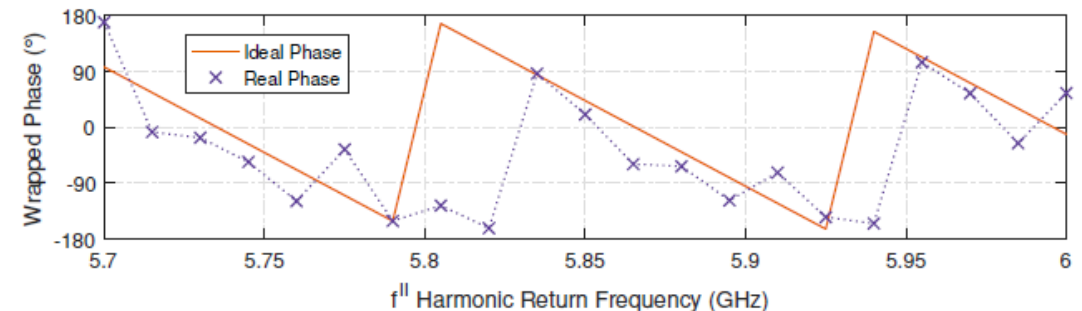
➤ max. 2π Phasengang zwischen zwei Abtastpunkten!

- Bestimmung der Einzelzielentfernung direkt über Phasensteigung möglich -> Hohes S/N notwendig
- **Robuster:** Transformation in den Zeitbereich (IDFT), Gewichtung der Stützstellenwerte mit Fensterfunktion erforderlich

Auflösungs-fähigkeit (n=2): $\Delta R = \frac{\nu_p}{4 \cdot BW}$

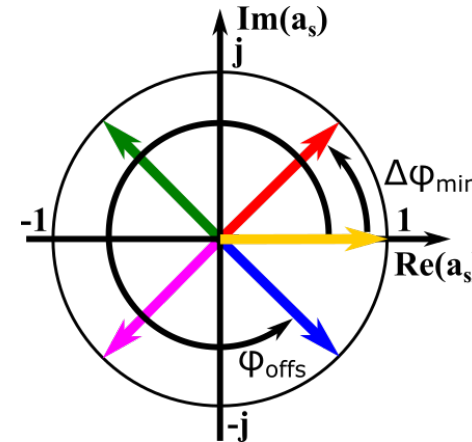
Maximale eineindeutige Zielentfernung (n=2): $l_{x,\max} = \frac{\nu_p}{4 \cdot \Delta f}$

BW: Bandbreite (Hz) bei Grundfrequenz,
 Δf : Frequenzschrittweite (Hz) bei Grundfrequenz



Aufbau des vektoriellen SFMCW HR-Interrogators

- Messproblem: $S_{21}^{II,I} = \frac{b_2^{II}}{a_1^I}$
- Auf den ersten Blick trivial, aber ... Fractional-N-Synthesizer sind i.A. nicht phasenreproduzierbar!



MOD : Fractional-N
 Modulus Value

$$\Delta\varphi_{min} = \frac{2\pi}{MOD}$$

$$\varphi_{offs} = n \Delta\varphi_{min}, \quad n \in \mathbb{N}_0$$
 n : random variable

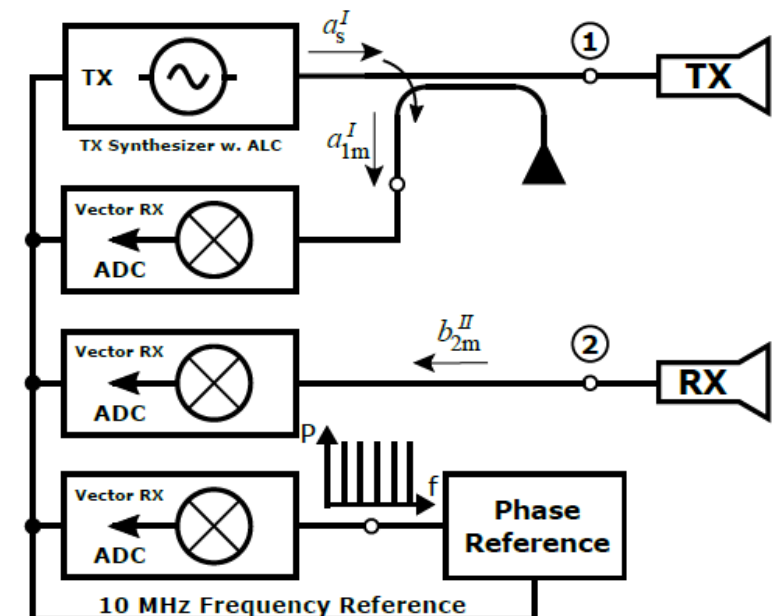
- In der linearen Netzwerkanalyse kein Problem, da bezogene Wellengrößen gleicher Frequenz

$$S_{21m} = \frac{b_{2m}}{a_{1m}} = \frac{|b_{2m}| e^{j\angle b_{2m}} e^{j\varphi_{offs}}}{|a_{1m}| e^{j\angle a_{1m}} e^{j\varphi_{offs}}} = \frac{|b_{2m}| e^{j\angle b_{2m}}}{|a_{1m}| e^{j\angle a_{1m}}}$$

Lösung in der klassischen nichtlinearen Netzwerkanalyse:
 Zusätzlicher RX & Phasenreferenzstandard / Kammgenerator...

➤ Agilent PNA-X ... komplex, empfindlich & teuer!

Classical Non-Linear VNA Approach



Aufbau des vektoriiellen SFMCW HR-Interrogators

Im IMP entwickelte Lösung:

- Neuartiges vollkohärentes und phasenreproduzierbares nichtlineares VNA-System
- Reproduzierbarkeit erlaubt nichtlineare Normalisierung mit einem Transferstandard

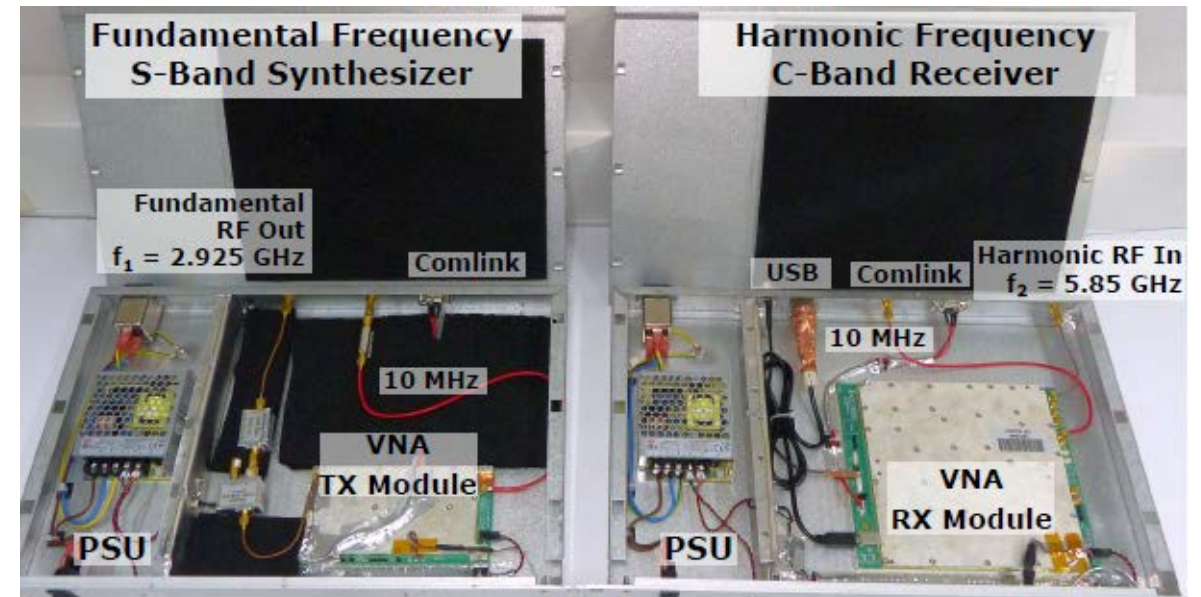
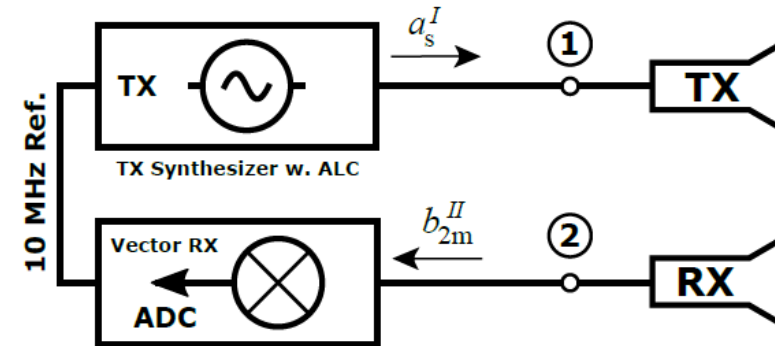
$$\frac{S_{21,M}^{II,I}}{S_{21,Ref}^{II,I}} = \frac{b_{2,M}^{II}}{b_{2,Ref}^{II}} \frac{a_{1,Ref}^I}{a_{1,M}^I} = \frac{b_{2,M}^{II}}{b_{2,Ref}^{II}}, \text{ mit } a_S^I \equiv a_1^I \text{ reproduzierbar}$$



Demonstration im Anschluss an den Vortrag

Koaxialer NL-Referenzstandard

LTI Repeatable Synth. VNA Approach



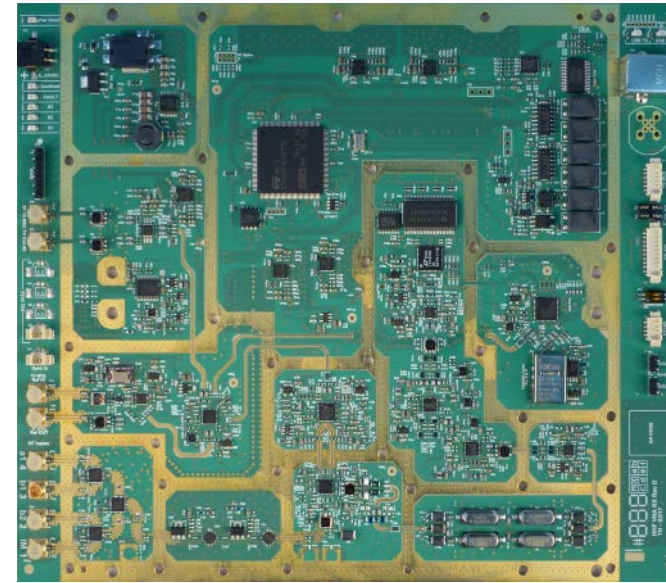
Kohärente Sende- und Empfangsmodule für SFMCW

- RF-Frequenzbereich 275 MHz – 6.8 GHz
- Kohärente Signalerzeugung für Stimulus, RX-LO & I/Q Sampling, ZF 8 MHz, 2.2 kHz BW
- I/Q Sampling mit 8 Msps und 16 bit Auflösung
- Systemjitter $t_j(\text{RMS}) \approx 981$ fs über alles
- Ausgangsleistung -55 ... +5 dBm mit interner und externer ALC Schleife über PA
- Niedrigster gemessener eingangsbezogener Noisefloor $N_0 = -172,9$ dBm bei max. Signalverarbeitungsgewinn

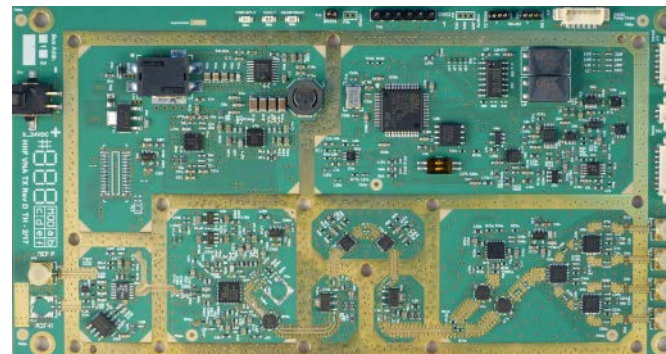
➔ **Basishardware für unsere SFMCW Forschung**

Weitere Hintergründe & andere Anwendungen:

T. Harzheim: "Mixed Frequency Single Receiver Architectures and Calibration Procedures for Linear and Non-Linear Vector Network Analysis", PhD Thesis University of Luxembourg, 02.2019



Vektorempfänger



Stimulus-Synthesizer

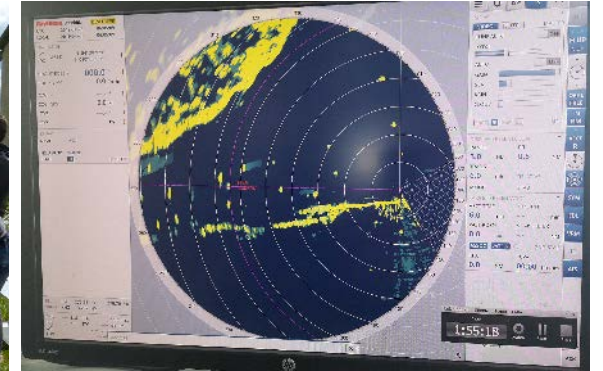
Infos & Datenblätter:
Webseite Spin-Off
www.hhft.de

Vektorielles SFMCW Harmonic Radar SEERAD

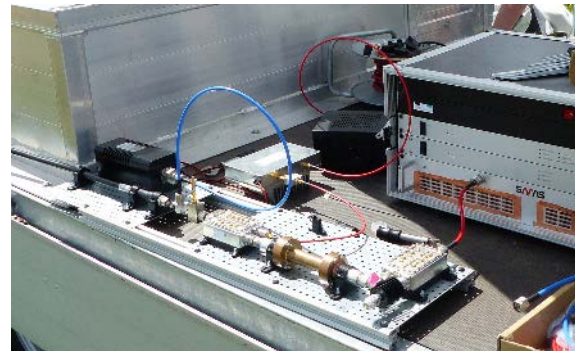
- BMBF SiFo Verbundprojekt Fraunhofer FHR, FH Aachen IMP und Raytheon-Anschütz GmbH
- Ziel: Entwicklung eines Demonstrators für ein HR basiertes Seenotrettungssystem mit Integration in das Schiffsnavigations- und Brückensystem
- Beleuchtung: Maritimes S-Band, $f_c = 2,9$ GHz, $P_{EIRP} \approx 76$ dBm, $P_{CW} = 50$ dBm (Fußpunkt), -3 dB Keulenbreiten: H $1,9^\circ$, V 27° , H-Pol.
- Empfang Tag-Antwort: 5,8 GHz SRD Band, $f_c = 5,8$ GHz, Antennengewinn $G = 27$ dBi, V-Pol., Systemnoise floor $N_0 \approx -150$ dBm bei 2 rpm



Integrierte S-/C-Band
Balkenantenne (FHR)



Integration in X-Band Navigations-
Radarsystem (Raytheon-Anschütz)



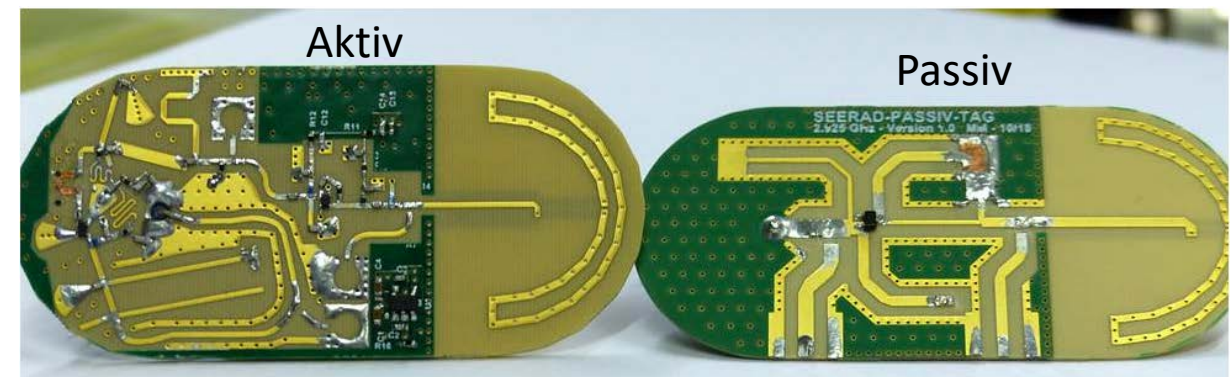
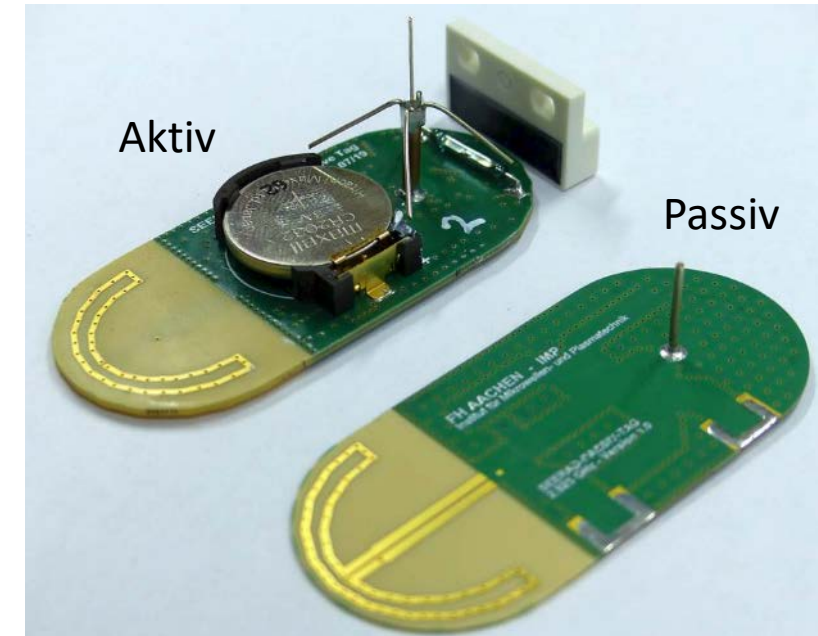
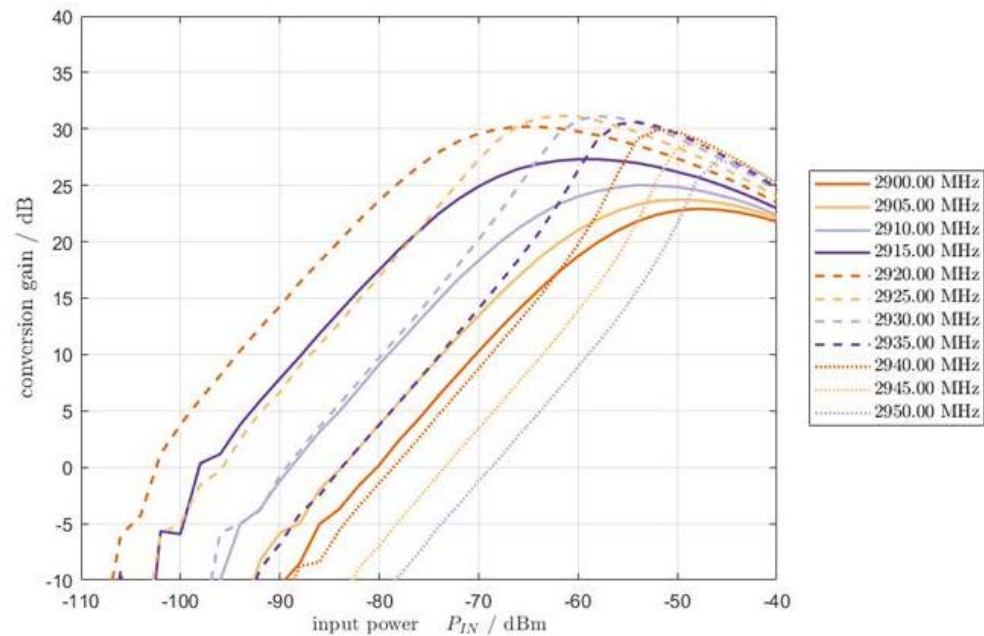
SFMCW Interrogator (IMP)



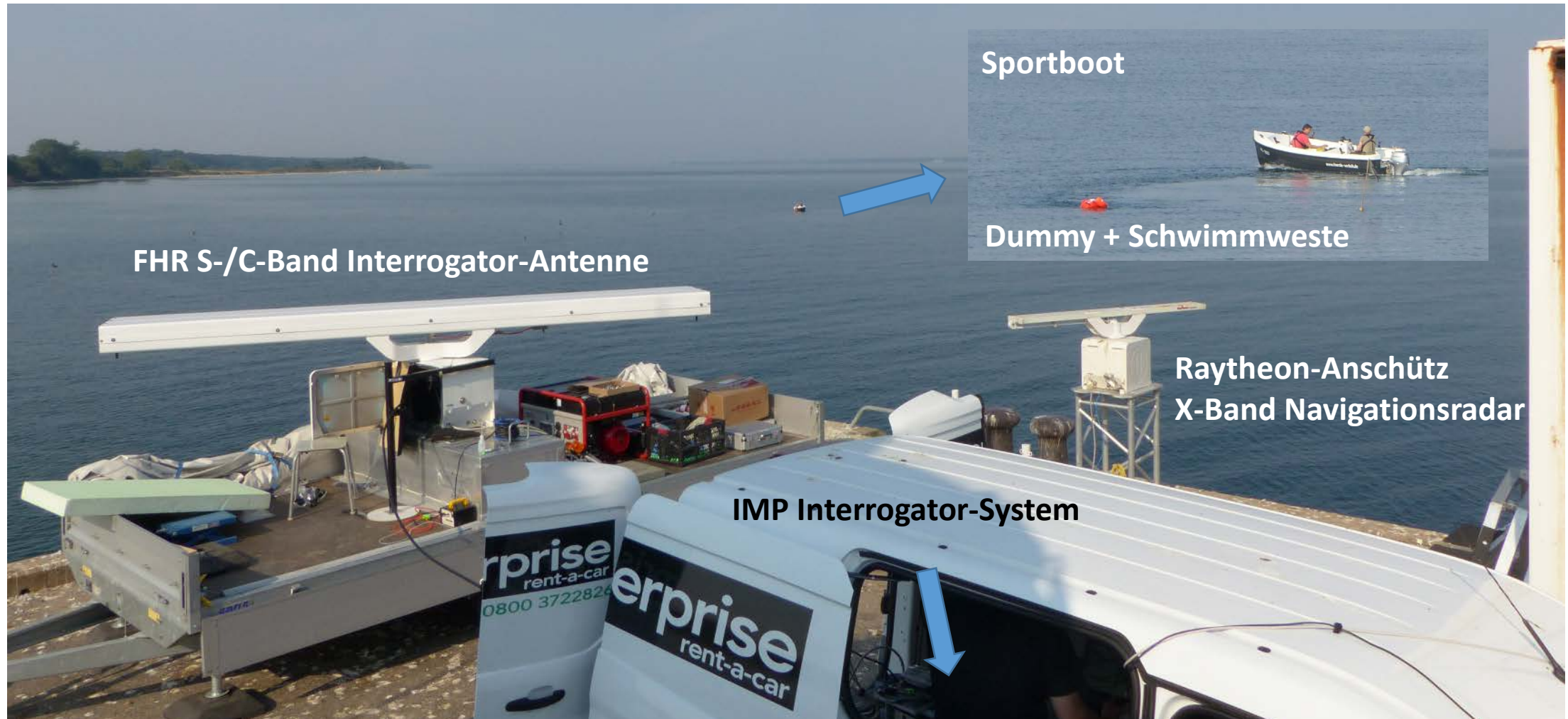
HR-Tags (FHR Ant., IMP Elektr.)

SEERAD-Tags Kurzübersicht

- Detektion & Ranging von passiven HR-Tags bis zu einer Entfernung von 1 km
- Entwicklung & Verifikation von aktiven HR-Tags bis zu einer Entfernung von 6 km
- Laufzeit 40 – 50 h mit CR2032 Knopfzelle

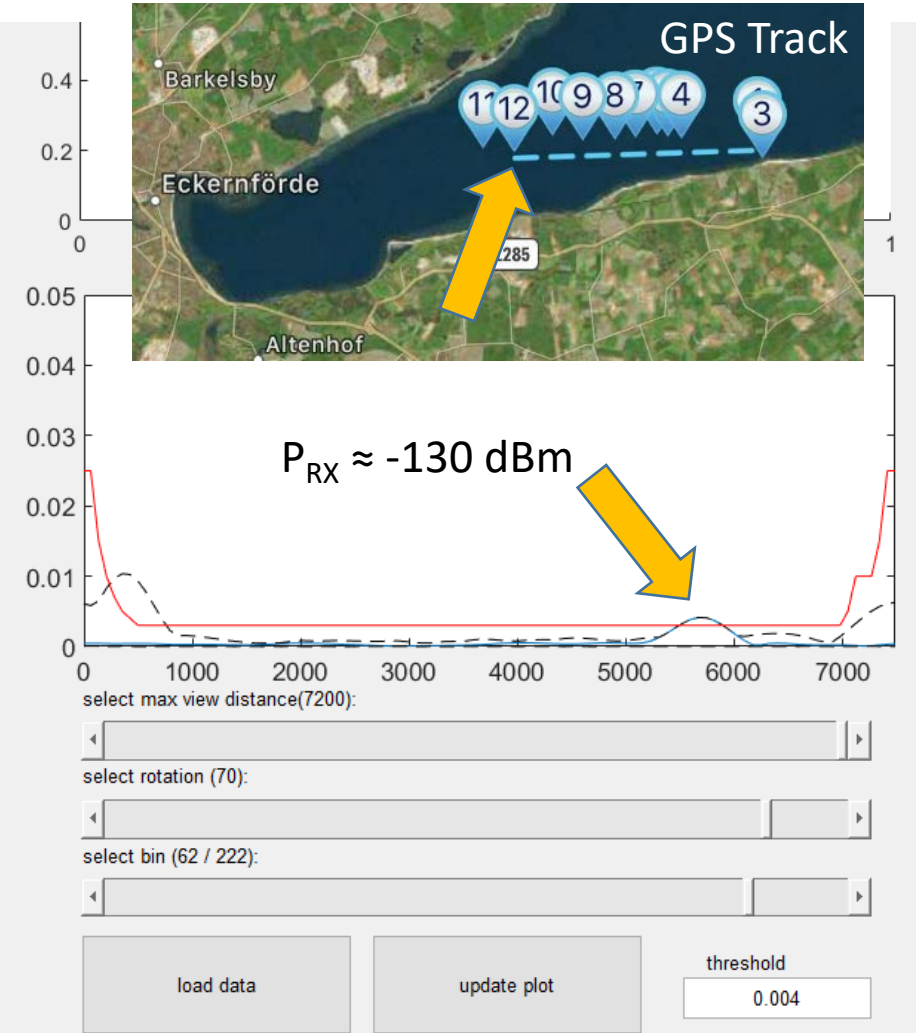
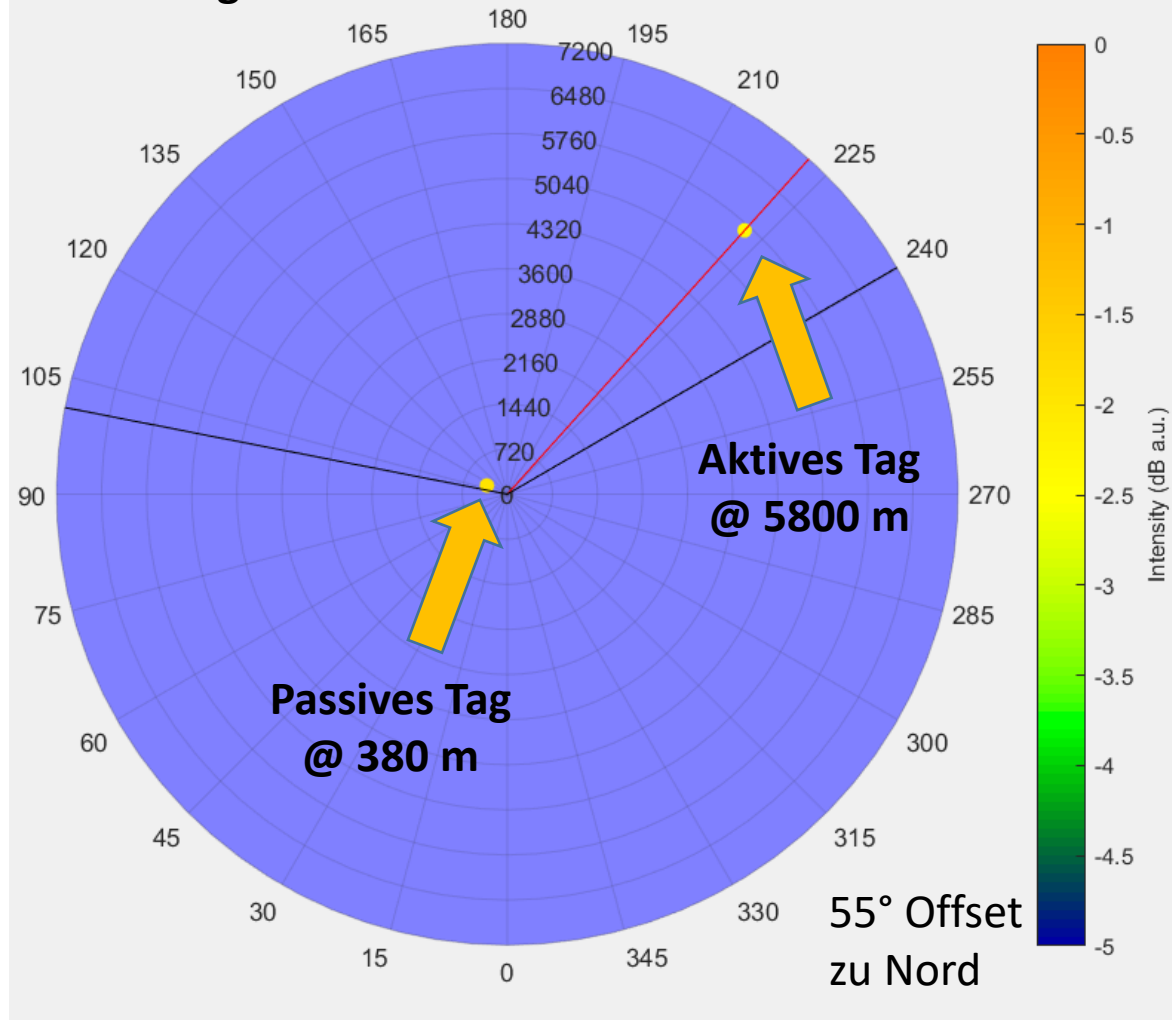


SEERAD Messungen Eckernförder Bucht - I



SEERAD Messungen Eckernförder Bucht - II

HR-Interrogator PPI



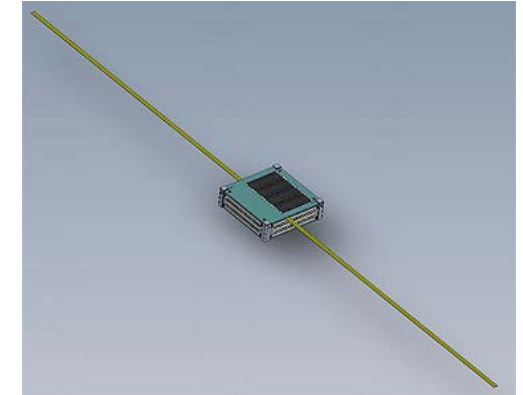
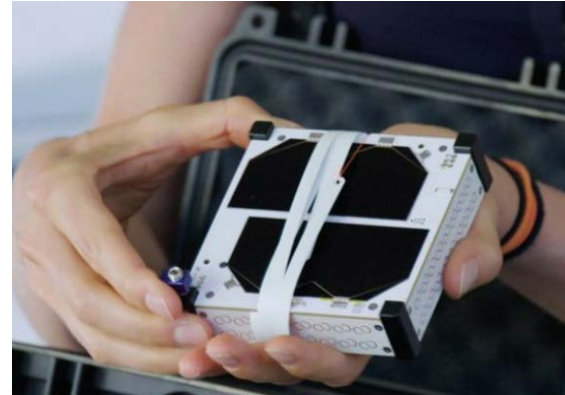
SEERAD Messungen Eckernförder Bucht - III

Raytheon-Anschütz
X-Band Radar PPI

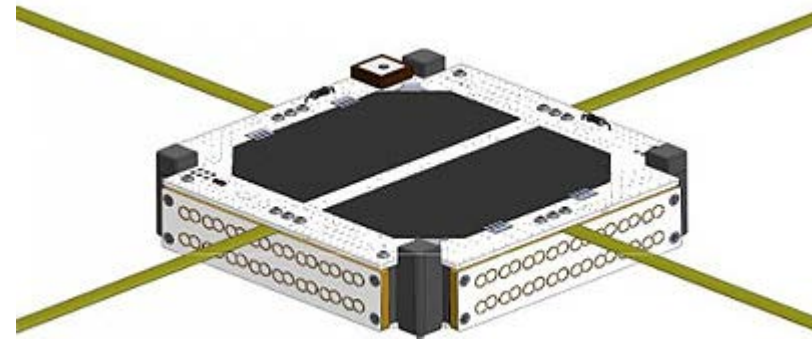


Forschungsideen I – Picosatelliten Tracking

- Musterfall: FCC vs. Swarm Technologies
- 0.25U „SpaceBEE“ Cubesats
- Start & Betrieb von FCC untersagt
- FCC Begründung:
RCS zu gering zur sicheren Bestimmung der
Orbitalparameter & Collision Avoidance
- Zusätzliches Problem:
Anhand der RCS kaum von „Weltraumschrott“
zu unterscheiden
- Keine positive passive ID möglich
- Passive / autonome aktive HR-Tags können ID
ermöglichen, unabhängig vom
Betriebszustand des Trägersatelliten
- Passive HR-Tags gut integrierbar

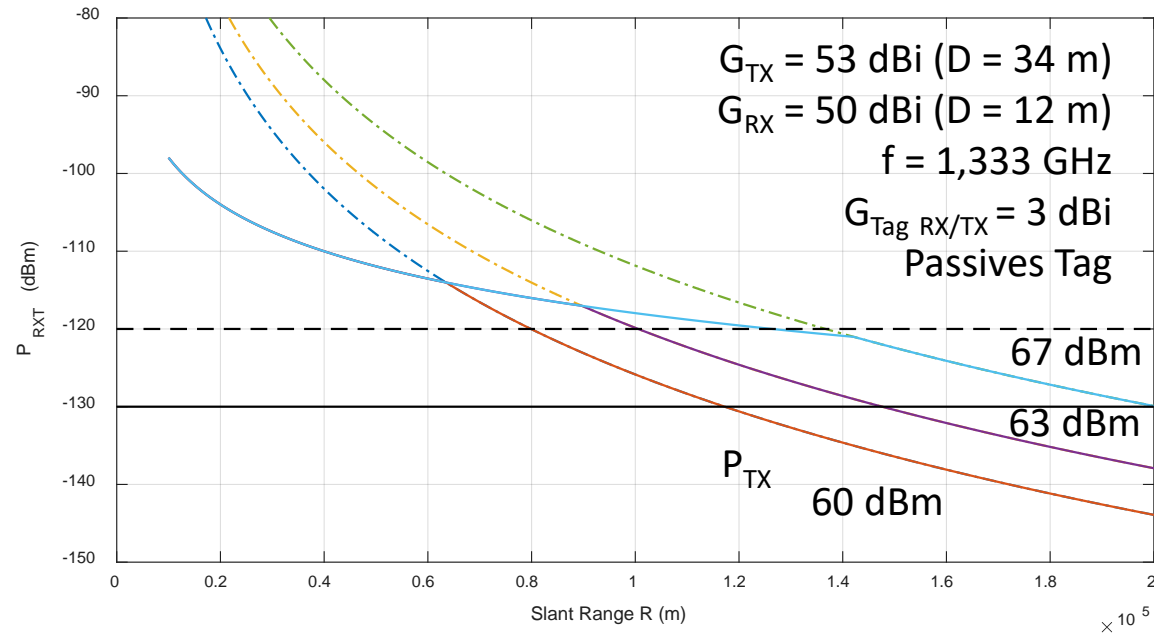


Quelle: Swarm Technologies (www.swarm.space)

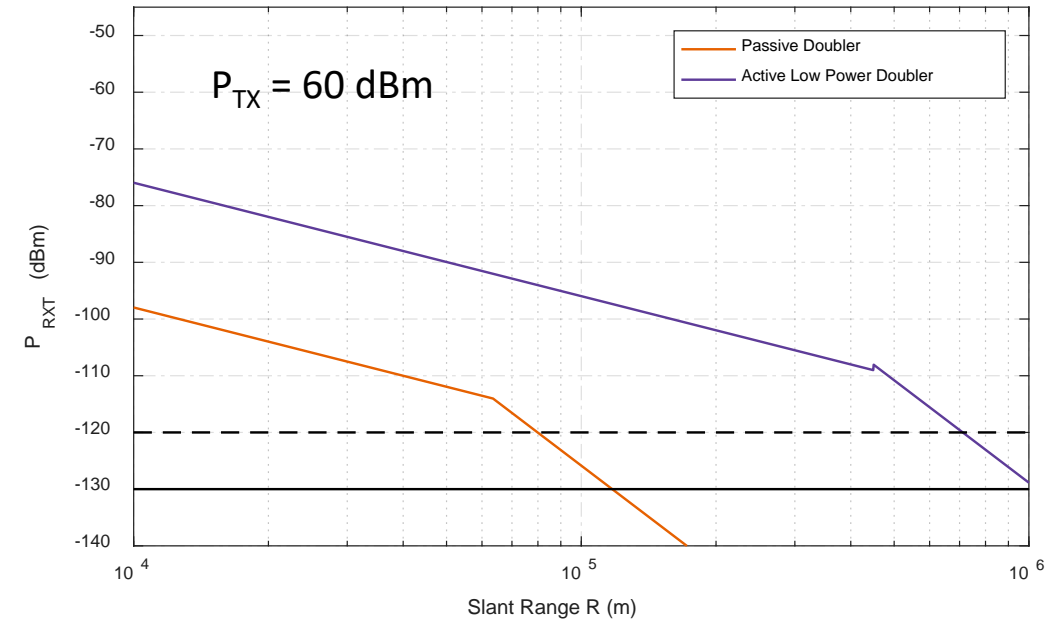


0.25U Cubesat: 100 x 100 x 25 mm³

Forschungsideen I – Picosatelliten Tracking



LEO ist mit passiven Tags erreichbar!



MEO ist mit einfachsten aktiven Tags (1 Transistor, $P_{Diss} = 2 \text{ mW}$) erreichbar!

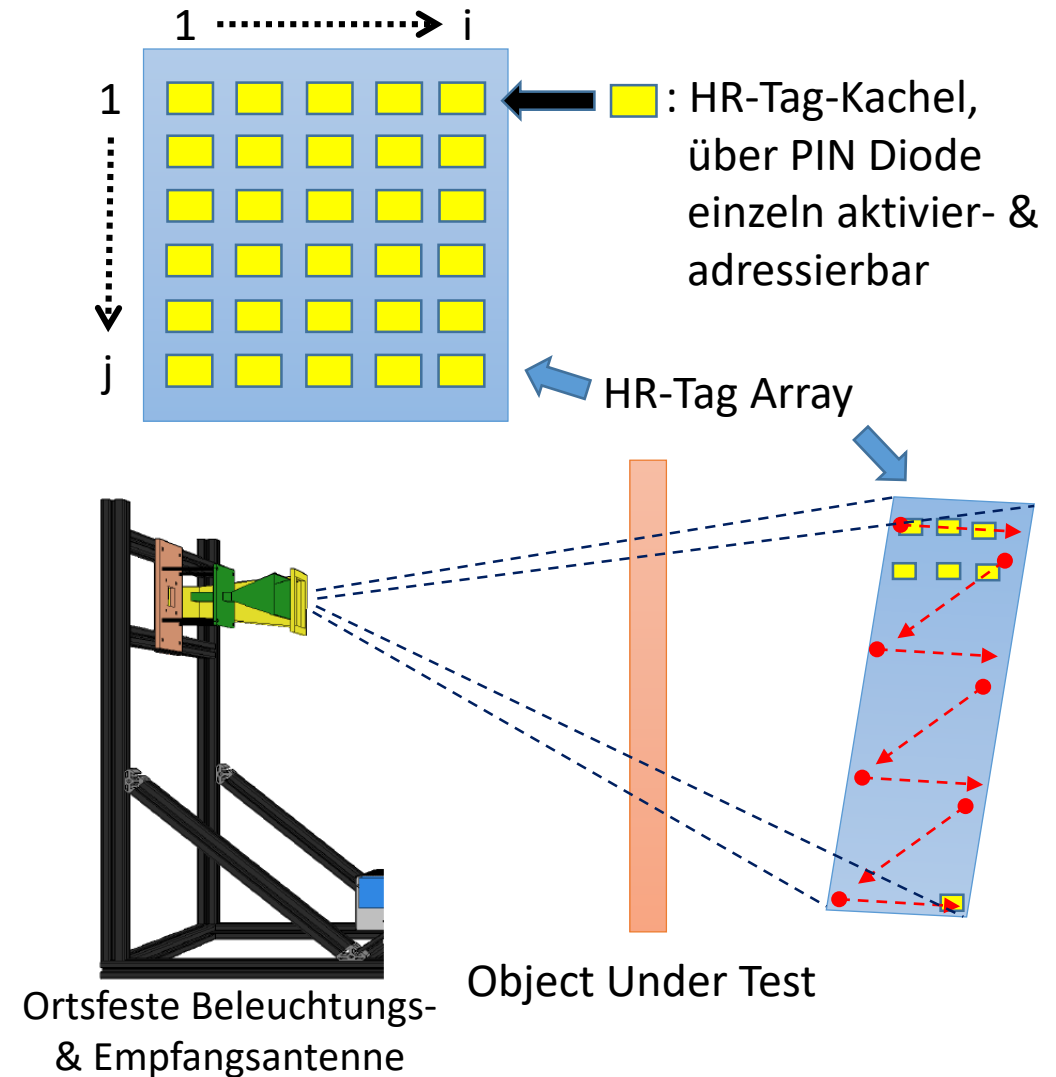
Forschungsideen II - Autonomes Fahren

- Unterstützung der Fahrassistenz und autonomen Fahrsysteme
- Markierung von Warnbaken / Leitpfosten mit passiven Harmonic Radar Tags (24 / 48 GHz)
- Augmentierung der Kamera-, LIDAR & FMCW / MIMO-SAR Sensordaten mit zusätzlichen Informationen
- Insbesondere für Objekte aus Verbundwerkstoffen mit niedriger RCS
 - Erhöhte Gesamtsicherheit und Vertrauen in die ermittelte Fahrtrasse, auch unter widrigen Umweltbedingungen die zum (Teil-)Ausfall optischer Systeme führen



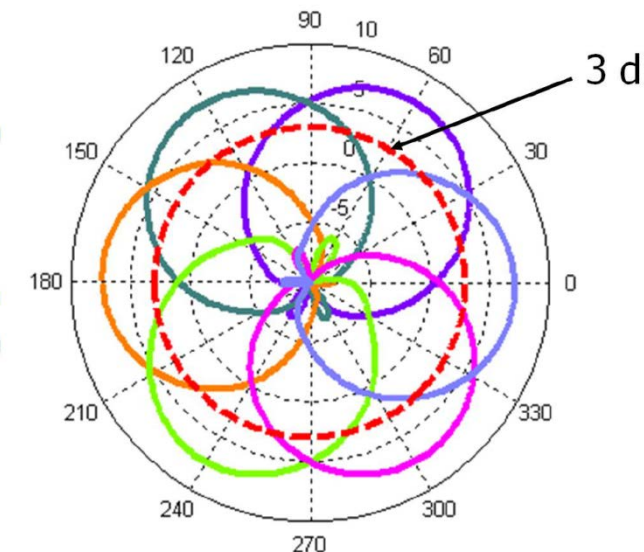
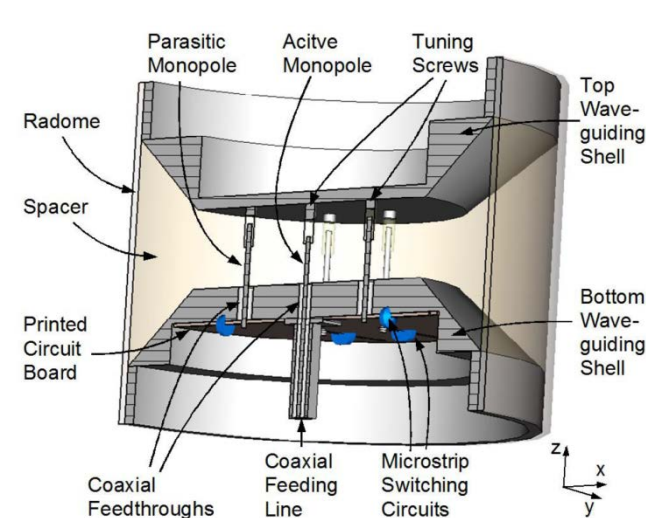
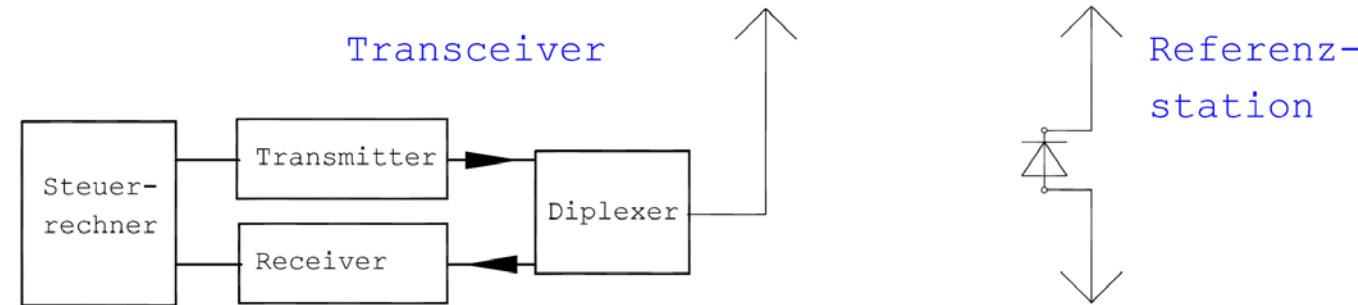
Forschungsideen III – Materialprüfung / Scanner

- (Planares) Array von HR-Tags
- Feste Szenenbeleuchtung mit fixen Sende- & Empfangsantennen
- Keine beweglichen mechanischen Teile
- PIN-Diodenschalter im Beleuchtungssignalzweig der Verdoppler erlauben sequenzielle Adressierung der einzelnen Tags
- Einzelselektion des gewünschten Ausbreitungspfad
- Je nach Lokalebene entweder Ortsauflösung im Object Under Test oder Harmonic-SAR zur genaueren Formaflösung wie auch 3D-Darstellung denkbar
- **Ein Demonstrator ist bereits aufgebaut!**



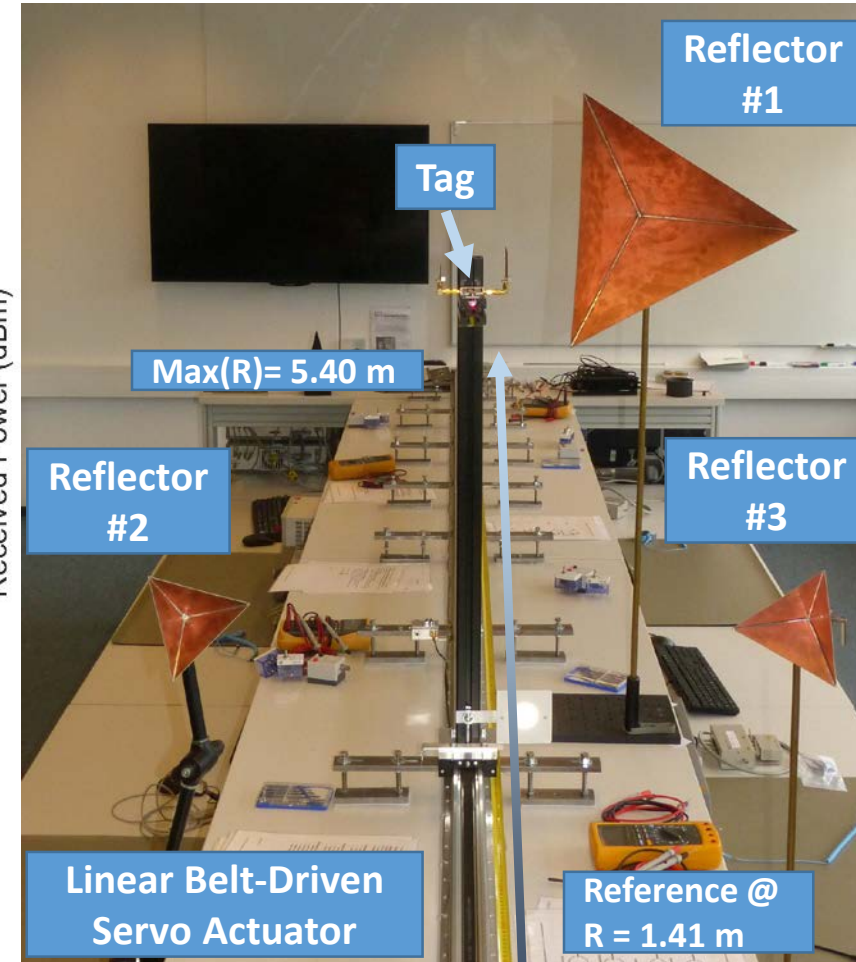
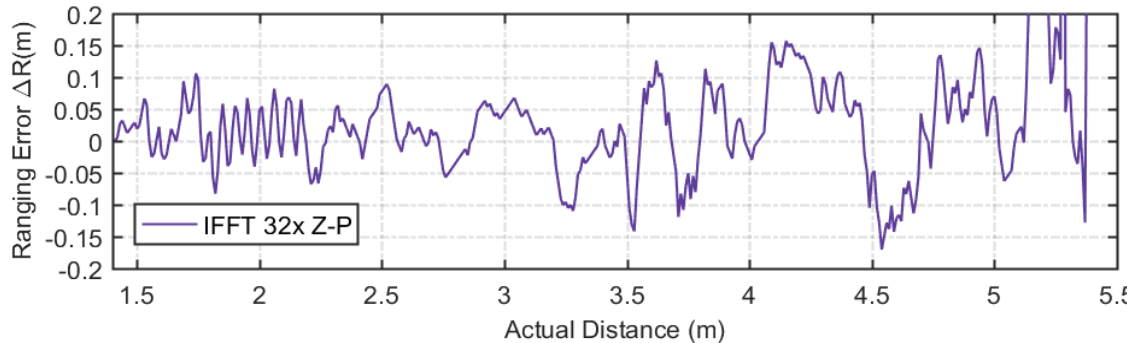
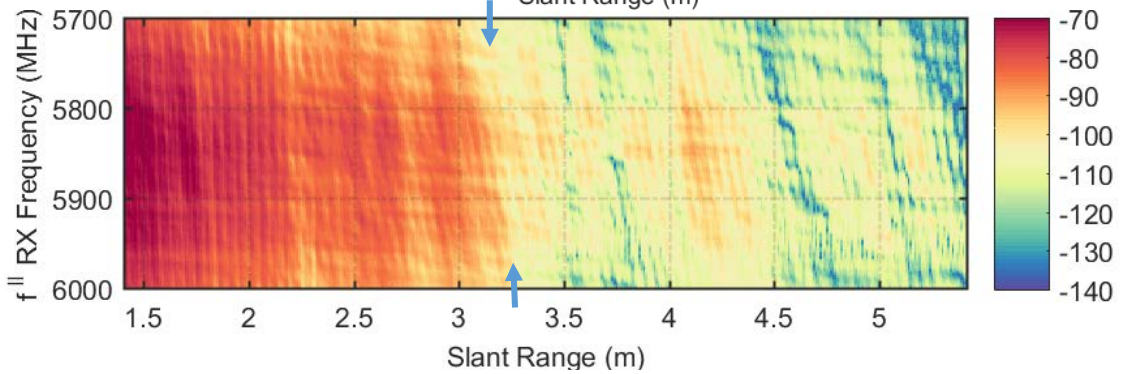
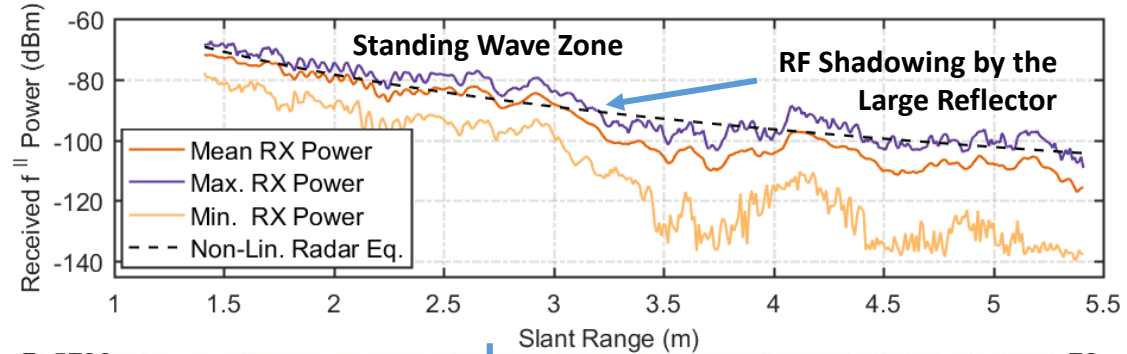
Forschungsideen IV – Indoor-Lokalisierung

- Motivation: Viel weniger Probleme mit Mehrwegeausbreitung
- Aufbau: Roboter trägt Radar mit elektr. schwenkbarer Antenne und die Tags (Satelliten) sind fest an den Wänden befestigt u. vermessen
- Bereits durchgeführt: Forschungsanträge sind vorhanden
 - Erlaubt eine Ortung mit sehr hoher Genauigkeit (bandbreitenabhängig) auch unter Rauch o. ä. Problemumgebungen
 - Nachteilig ist die aktuell teure Hardware



Potentielle MiMo-Antenne vom FHR und deren Richtdiagramme

Forschungsideen IV – Indoor-Lokalisierung



Antenna Boresight
View of the Harmonic
Radar Verification Setup

Multi-Clutter
Scenario

Trihedral Reflectors

Reflector #1:
RCS (3 GHz) = 13.67 m²
Slant Range R = 2.5 m

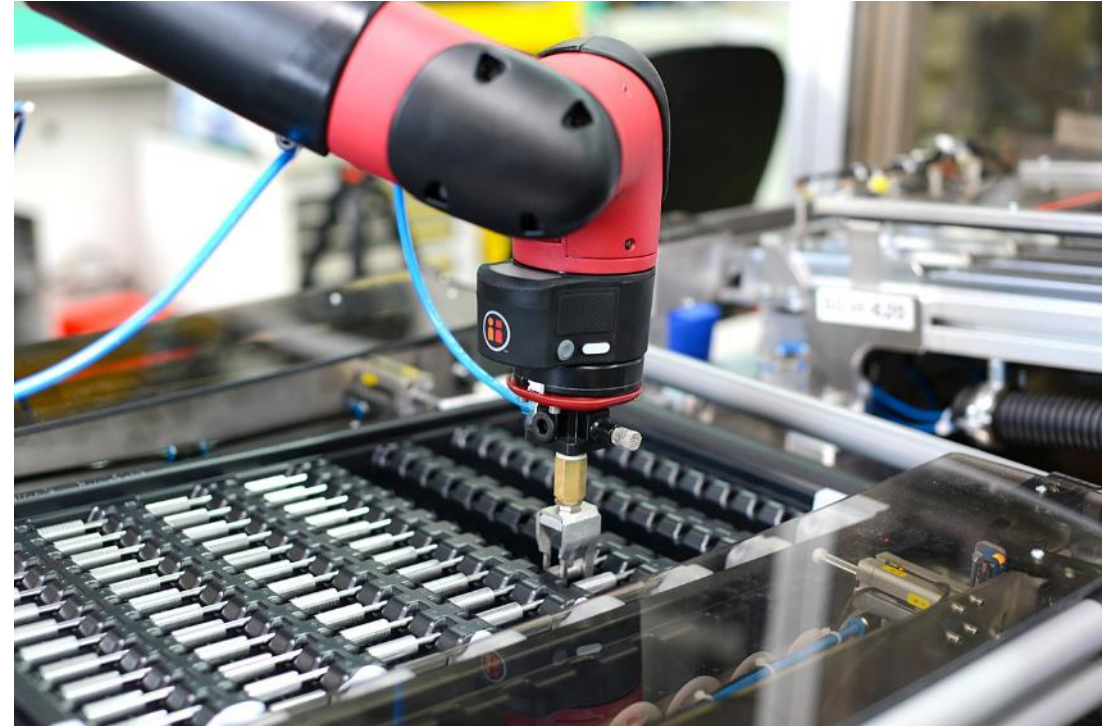
Reflector #2:
RCS (3GHz) = 0.16 m²
Slant Range R = 1.8 m

Reflector #3:
RCS (3GHz) = 0.16 m²
Slant Range R = 1.6 m

Direction of Linear Movement

Forschungsideen V – HR-Tags mit Backscatter ID

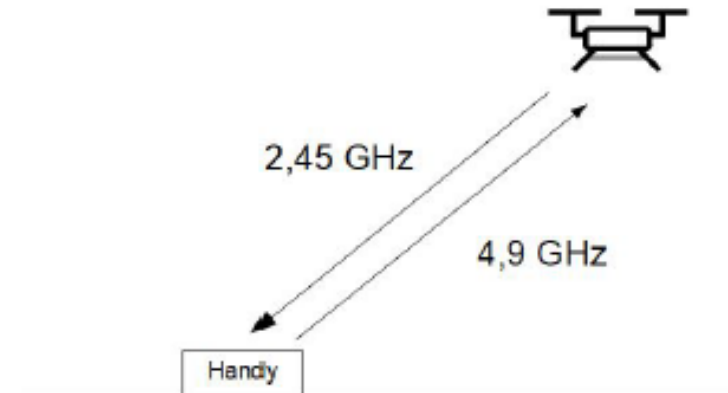
- Kombination von RFID & präziser und robuster Lokalisierung
- AM-Backscatter des Tags kann zur Datenübertragung genutzt und vom Interrogator ausgewertet werden
- Sowohl Modulation des harmonischen Signals, als auch Kombination von klassischem RFID & Harmonic-Ranging-Zusatzfunktion denkbar
- Werkzeug- und Werkstückidentifikation & Lokalisierung für die automatisierte Fertigung und Robotik – „Industrie 4.0“-Komplex
- Insbesondere mit anstehender Freigabe von RFID im 5,8 GHz SRD-Band interessant



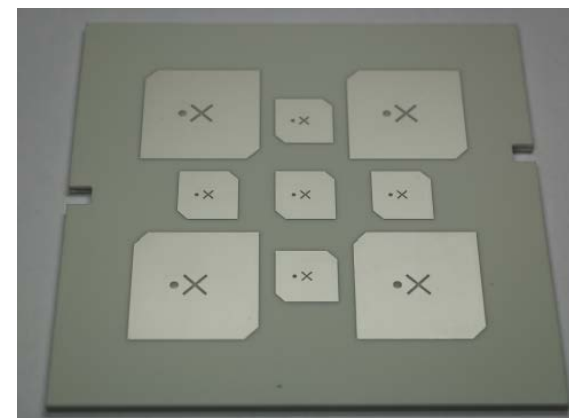
Wikimedia Commons ©Benutzer Rethink Robotics

Forschungsideen VI – 2,45 GHz-Elektroniklokalisierung

- Motivation: Bergnotrettung – Personen- / Smartphoneortung per Drohne
(F+E-Projektantragsstellung läuft)
- Andere Anwendungen wie Handy-Suche in JVA's sind noch möglich
- 2,45GHz: wenig verbaute Filterbauelemente
- ...kombiniert mit den immer vorhandenen Shunt-Dioden des CMOS-Fertigungsprozesses...
- erlaubt eine Ortung auch stromloser 2,45 GHz RX/TX Elektronik auf kurze (< 30 m) Reichweiten



Quelle: Masterthesis Felix Bündgen FHR / IMP



2.45 / 4.9 GHz
Dual-Band Patch Array
zirkular polarisiert
9 / 14 dBi Gain
Masterthesis
Felix Bündgen FHR / IMP

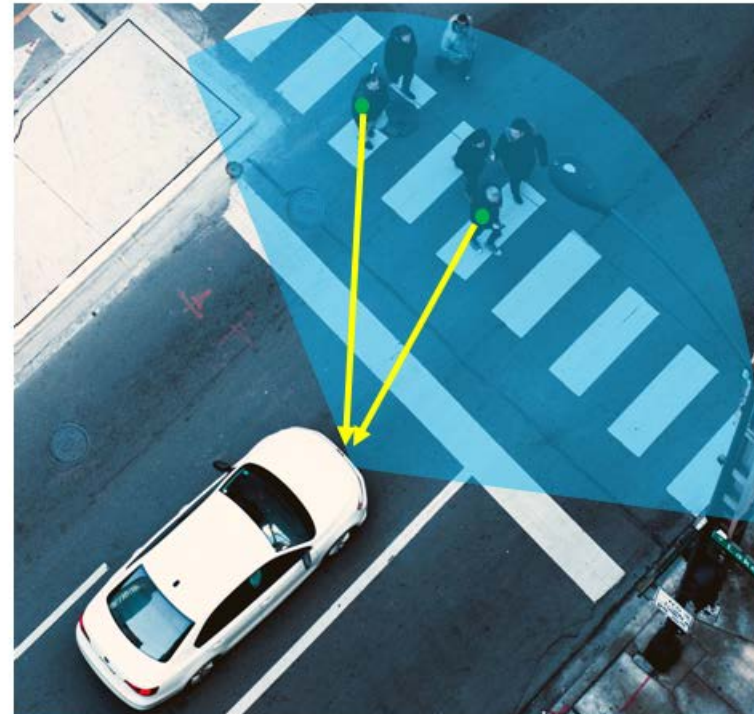
Forschungsideen VII – Katzenauge 2.0

Harmonic Radar im Automobil/ beim Autonomem Fahren mit dem **Katzenauge 2.0**



Ziel: „Schwache“ und schlecht sichtbare Verkehrsteilnehmer sicher (auch für Autonome Fahrzeuge) zu erkennen.

Ansprüche: - Das System funktioniert auch bei Nebel, starken Schneefall und Platzregen.
- Die Katzenaugen 2.0 kosten nicht mehr als jetzigen Katzenaugen.



Zugehöriger Patentschutz der TX-RX-MF-HR-Technologie

☆ WO2013143681A1 VEKTORIELLER NETZWERKANALYSATOR

[Bibliografische Daten](#) [Beschreibung](#) [Patentansprüche](#) [Zeichnungen](#) [Originaldokument](#) [Anführungen](#)

Einfache Familie [INPADOC-Familie](#) [Neueste Rechtsstandsereignisse](#)

Erfinder: Ch. Entfellner und H. Heuermann

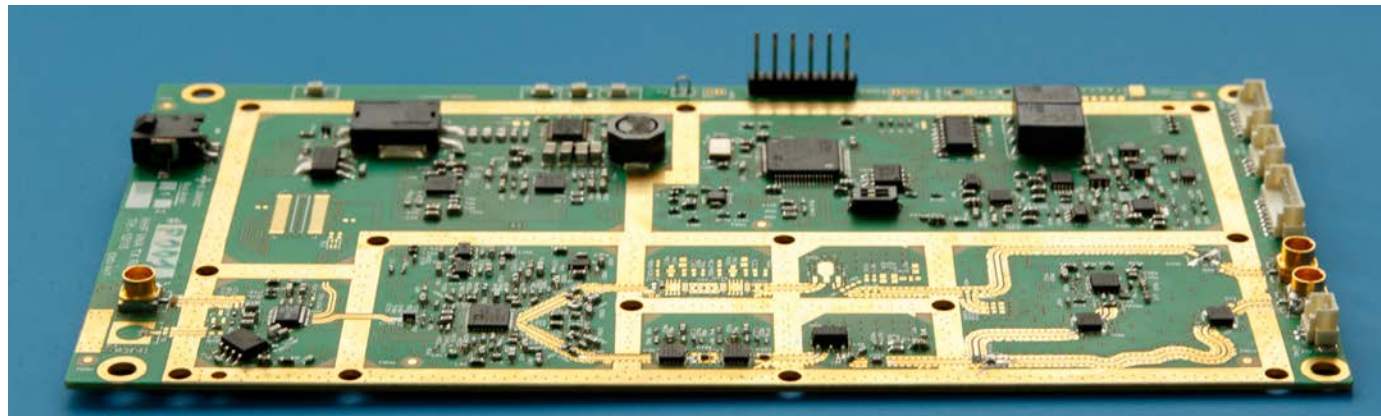
Anmelder: Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & CO KG

Veröffentlichung	Anmeldenummer	Titel
CA2864298A1	CA2864298A	VECTORIAL NETWORK ANALYSER
CA2864298C	CA2864298A	VECTORIAL NETWORK ANALYSER
CN104204840A	CN201380017176A	Vectorial network analyser
CN104204840B	CN201380017176A	Vectorial network analyser
DE102012006195A1	DE102012006195A	Vektorieller Netzwerkanalysator
EP2831612A1	EP13712149A	VEKTORIELLER NETZWERKANALYSATOR
WO2013143681A1	EP2013000899W	VEKTORIELLER NETZWERKANALYSATOR
JP2015511713A	JP2015502134A	ベクトルネットワークアナライザ
JP6474720B2	JP2015502134A	試験対象電子機器の散乱パラメータを決定するための方法
JP2019053075A	JP2018206489A	VECTOR NETWORK ANALYZER

Veröffentlichung	Anmeldenummer	Titel
JP2019053075A	JP2018206489A	VECTOR NETWORK ANALYZER
JP6556930B2	JP2018206489A	VECTOR NETWORK ANALYZER
KR20140146057A	KR20147024193A	VECTORIAL NETWORK ANALYSER
KR101904035B1	KR20147024193A	VECTORIAL NETWORK ANALYSER
TW201403082A	TW102110925A	Vector network analyzer and method thereof for
TW1591351B	TW102110925A	Vector network analyzer and method thereof for
US2015071097A1	US201314386649A	VECTORIAL NETWORK ANALYSER
US9801082B2	US201314386649A	Vectorial network analyser
US2017111809A1	US201615391120A	VECTORIAL NETWORK ANALYZER
US9942784B2	US201615391120A	Vectorial network analyzer

Zusammenfassung des Vortrags

- Harmonic Radar – Grundlagen, Modellierung und Systemarten
- Mixed-Frequency S-Parameter & SFMCW Harmonic Radar
- Vorstellung SFMCW-Forschungssystem des IMP
- SFMCW Radar System SEERAD (BMBF Verbundprojekt FHR, IMP, RAN)
- 7 Ideen und Applikationen für die weitere Harmonic Radar Forschung



Jetzt: SFMCW Harmonic Radar Demonstration und Diskussion

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!