

Mixed-Frequency S-Parameter für eine Vielzahl von Anwendungen

Programm 323. PTB-Seminar
Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren
im Nieder- und Hochfrequenzbereich 2023

Prof. Dr.-Ing. Holger Heuermann

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

Gliederung des Vortrags

- Vorwort
- Grundlagen der Mixed-Frequency-S-Parameter
- Harmonic Radar – Grundlagen
- Mixed-Frequency S-Parameter & SFMCW Harmonic Radar (MF-VNA)
- Vorstellung SFMCW-Forschungssystem des IMP
- SFMCW Radar System SEERAD (BMBF Verbundprojekt FHR, IMP, RAN)
- 8 Ideen und Applikationen für die weitere Mixed-Frequency und Harmonic Radar Welt

Vorwort

Wer löst eine einfache Netzwerkschaltung mit den Maxwellschen Gleichungen, wenn er auch das ohmsche Gesetz mit den Knoten- und Maschenregeln anwenden kann?

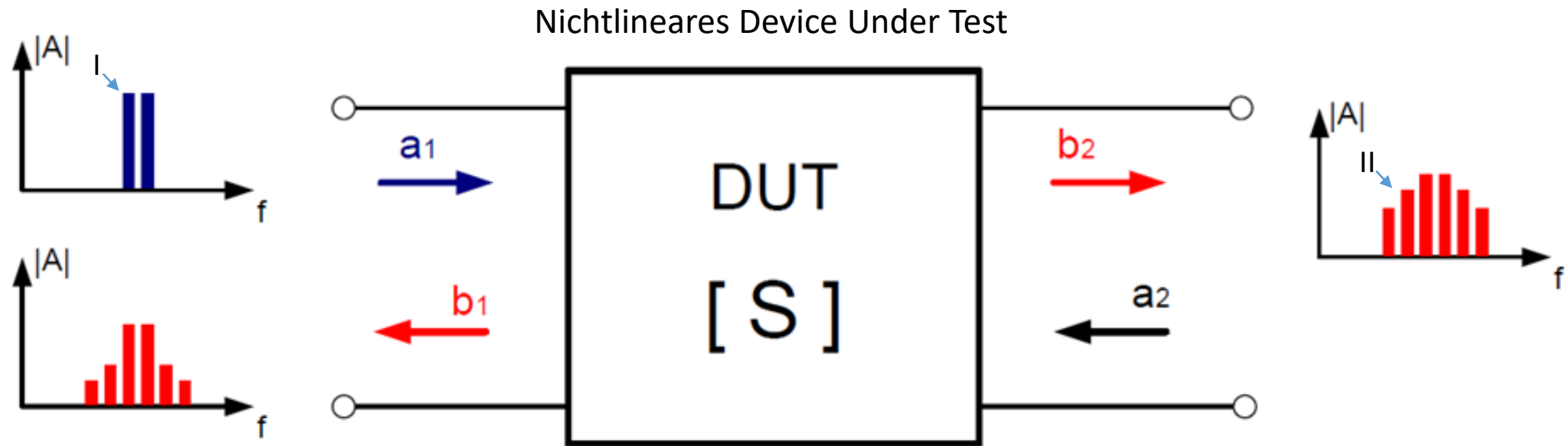
Inhalt dieses Vortrages:

Warum sollte man die X-Parameter verwenden, wenn man doch die MF-S-Parameter verwenden kann!!

$$b_1^1 = S_{11}^{11} (|a_1^2|, |a_1^3|, \omega) a_1^1 + S_{11}^{12} (|a_1^2|, |a_1^3|, \omega) a_1^2 + S_{11}^{13} (|a_1^2|, |a_1^3|, \omega) a_1^3.$$

$$b_{ik} = X_{ik}^F (|a_{11}|) P^k + \sum_{(j,l) \neq (1,1)} [X_{ik,jl}^S (|a_{11}|) P^{k-l} a_{jl} + X_{ik,jl}^T (|a_{11}|) P^{k+l} a_{jl}^*]$$

Einführung in die Mixed-Frequency S-Parameter



Mixed-Frequency (MF-) S-Parameter:

$$S_{21}^{II,I} = \frac{b_2^{II}}{a_1^I}$$

I: Frequenz der einfallenden Welle am Eingang

II: Frequenz am Ausgang

Einführung in die MF-S-Parameter

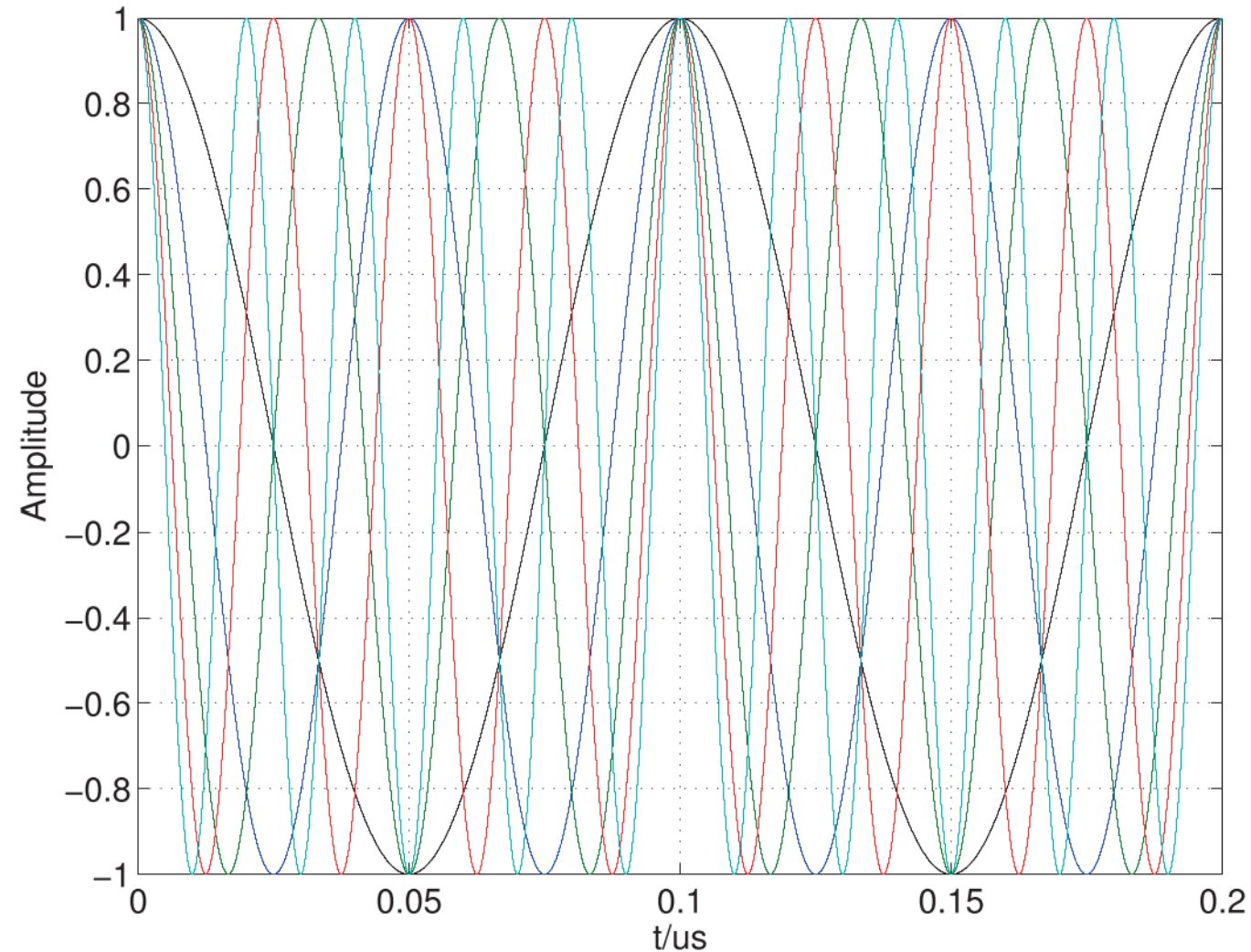


Bild 3.19 10 MHz-Quarzsignal und dessen Oberwellen

Einführung in die MF-S-Parameter

Wann sind MF-S-Parameter anwendbar?

- Wenn es keine Sättigungs- und/oder Memory-Effekte gibt.
- Z.B. Mischer, IM, Oberwellengeneration, **Harmonic Radar**, ...

Bei welchen Komponenten muss man die X-Parameter verwenden?

- Leistungsverstärker, Oszillatoren

Ausführliche Darstellung der MF- und X-Parameter:

- Buch: Mikrowellentechnik, Kapitel 3, Autor: Heuermann,
Verlag: Springer Vieweg



Einführung in die MF-S-Parameter

Beispiel im
Bereich der
Vektor-PIM-
Messtechnik

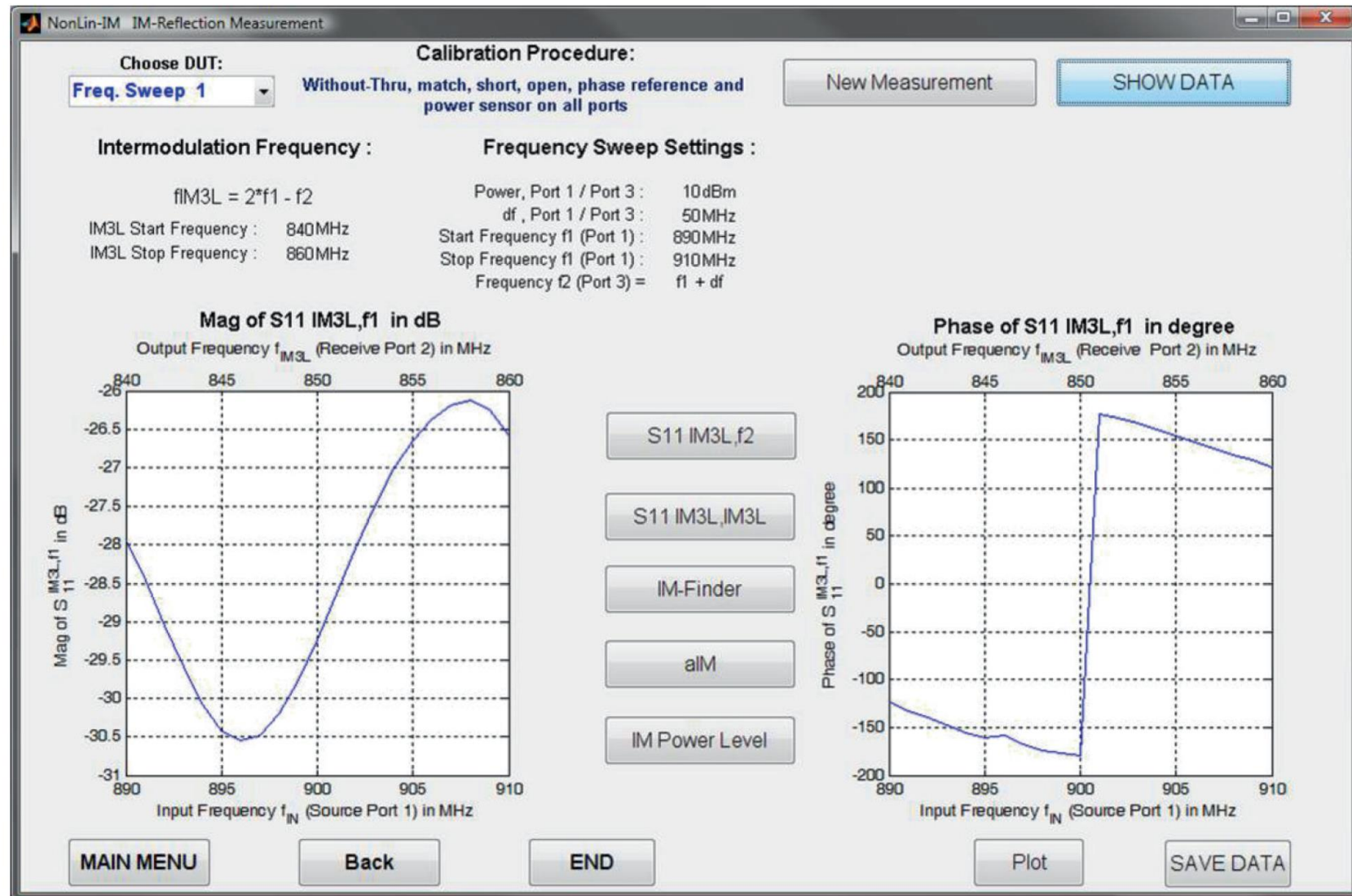
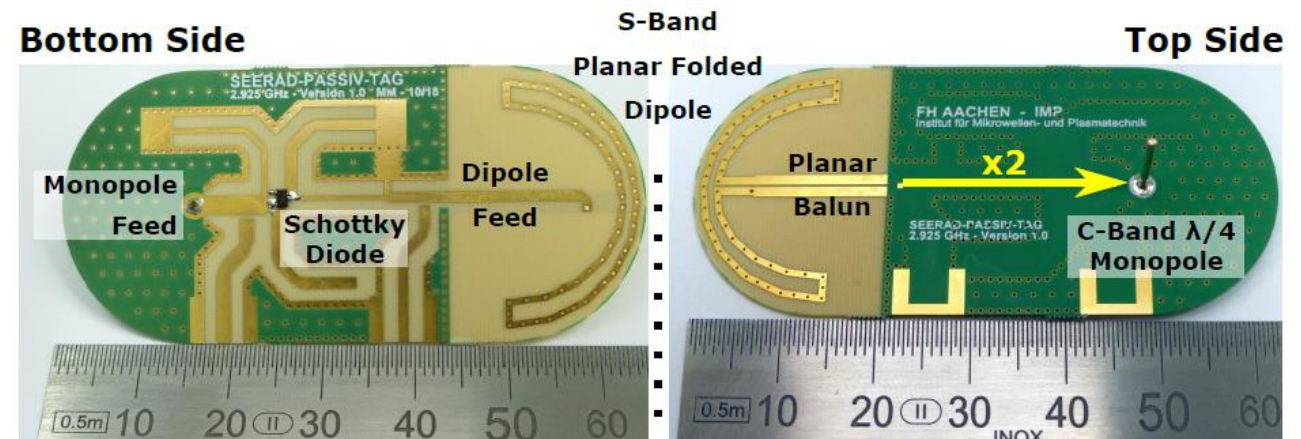
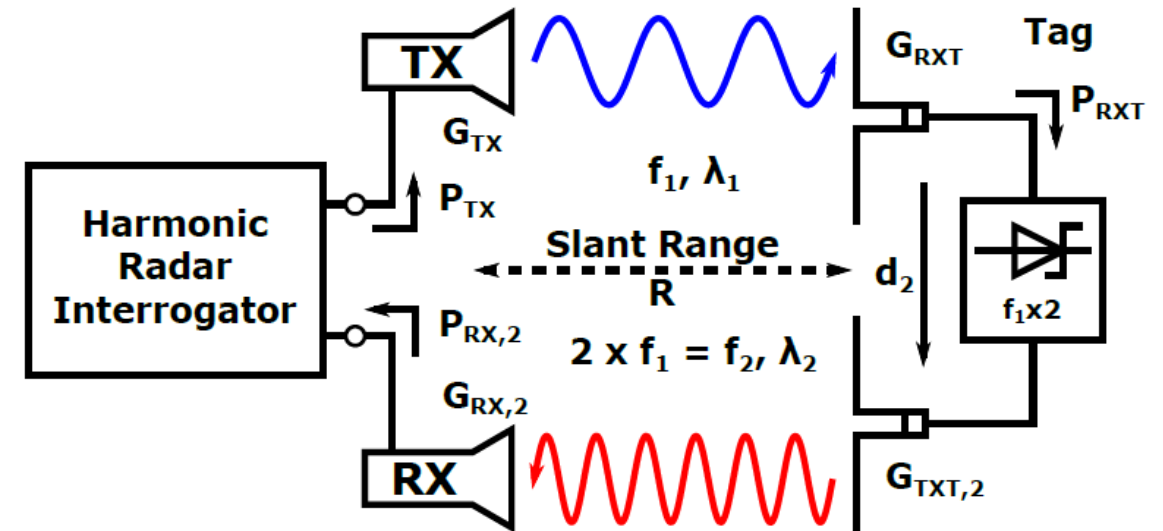


Bild 3.28 Messresultat einer vektoriellen IM-Reflexionsmessung

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

- MF-S11-Messung
- 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

- Erste Publikation bereits 1976, aber wenig Fortschritt bis 2000er Jahre beobachtbar [1]
- Ausnahmen:
 - RECCO Rescue System, CW Detektion, kein Ranging, nur RSSI / skalare Messung
 - 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

Vektorielles Harmonic SFMCW Ranging bzw. MF S11 VNA-Messung

Entfernungsinformation zum Ziel

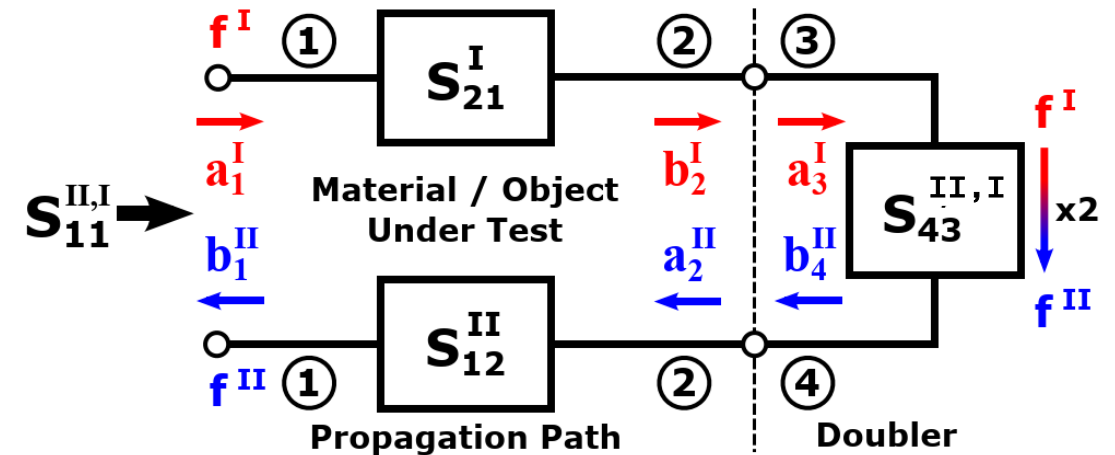
Harmonic Radar (HR) mit einem Stepped Frequency Continuous Wave – Signal entspricht einer VNA-Messung

Herleitung der HR-Übertragungsfunktion

Komplett in:

[2] Heuermann, H., Harzheim, Th., Cronenbroeck, Th., First SIMO Harmonic Radar Based on the SFCW Concept and the HR Transfer Function, Remote Sensing 13(24), DOI: 10.3390/rs13245088, December 2021

HR Modell



Referenzierung:

$$S_{11,Ref}^{II,I} = S_{21,Ref}^I \cdot S_{43}^{II,I}|_{P_{Ref}} \cdot S_{12,Ref}^{II}$$

Messung des Materials oder Devices:

$$S_{11,MUTz}^{II,I} = S_{21,Ref}^I \cdot S_{21,MUTz}^I \cdot S_{43}^{II,I}|_{P_{MUTz}} \cdot S_{12,Ref}^{II} \cdot S_{12,MUTz}^{II}$$

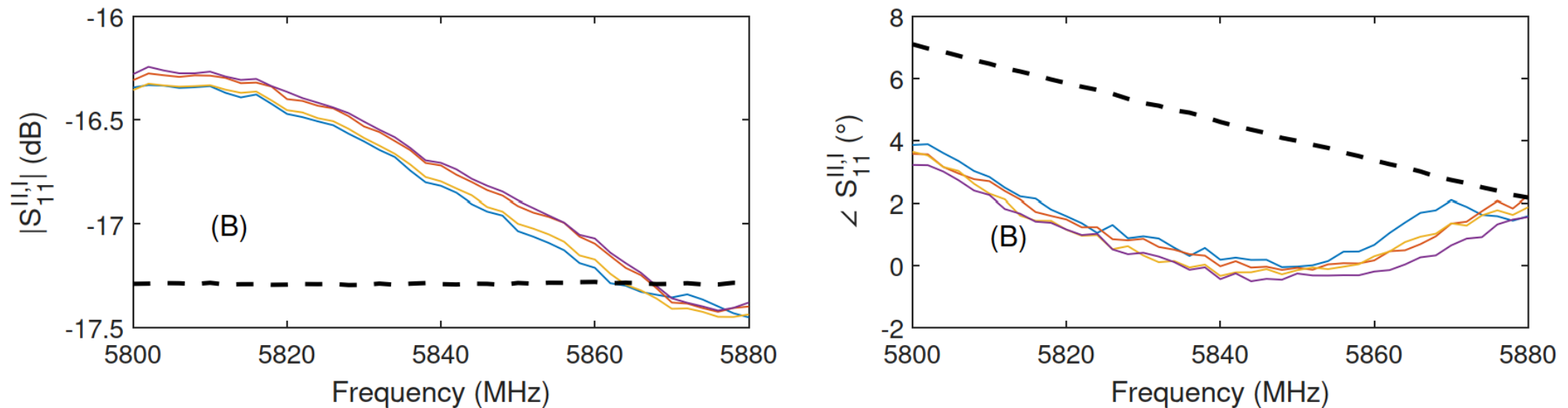
Berechnung des Materials oder Devices:

$$S_{11,Norm.}^{II,I} = \frac{S_{11,MUTz}^{II,I}}{S_{11,Ref}^{II,I}}$$

$$S_{11,Norm.}^{II,I} = (S_{21,MUTz}^I)^2 \cdot S_{12,MUTz}^{II}$$

Vektorieller Harmonic SFMCW Ranging bzw. MF S11 VNA-Messung

Verifikation über der Vermessung eines 6dB-Dämpfungsgliedes im Vergleich zu den Standard-S-Parametermessungen



Die Messfehler sind in einer typischen Größenordnung einer normalisierten Messung aufgrund der nicht durchgeführten Korrektur des Reflexionsverhaltens.

Vektoriellles Harmonic SFMCW Ranging bzw. MF S21 VNA-Messung

Entfernungsinformation zum Ziel

Zeitbereich -> Laufzeit, Frequenzbereich -> Phase,

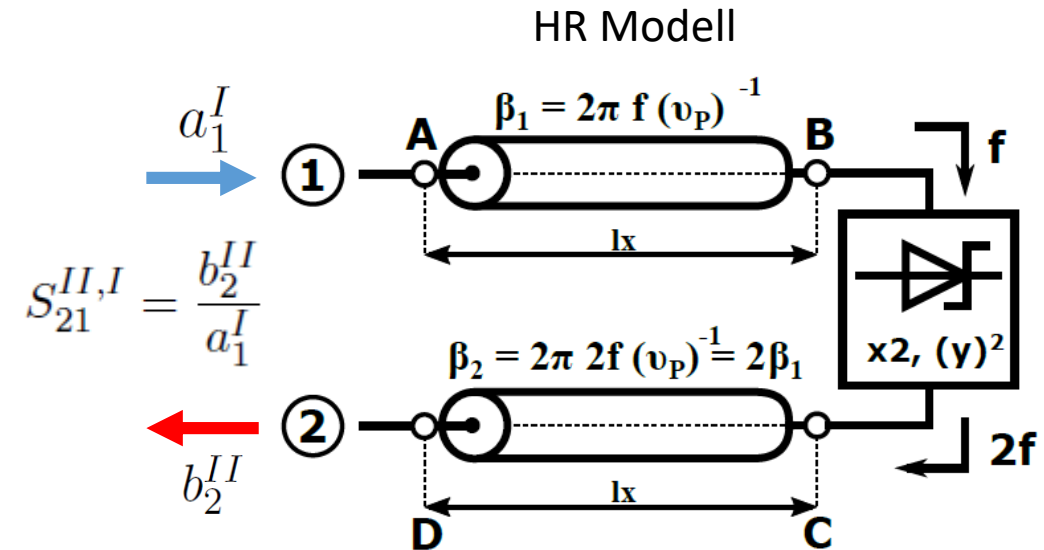
Magnitude / Betrag für Modell vernachlässigbar

Auswertung der Phasenwerte genügt bereits:

Argument der gemessenen Mixed-Frequency
Parameter an einer Stützstelle des Sweeps

φ_0 : Initialer, beliebiger, Phasenoffset in Stützstelle

Durch Referenzierung
an bekannter Position l_{Ref}

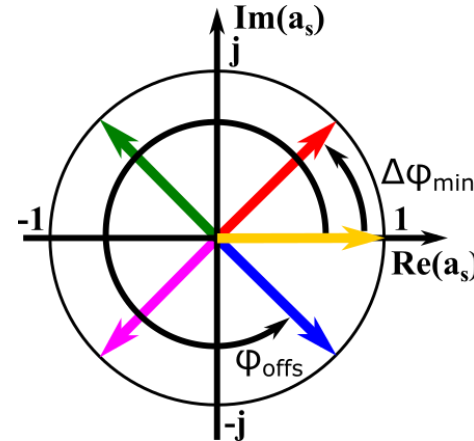


$$\angle(S_{21}^{II,I}) = -2 \cdot \varphi_0 - \frac{8\pi f^I}{\nu_p} \cdot l_x$$

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

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

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

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

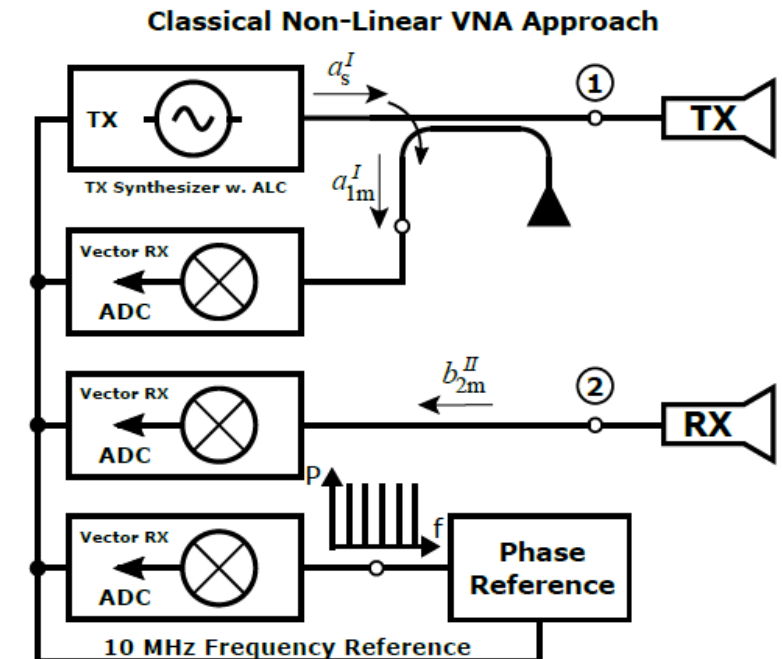
n : random variable

- 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!



Aufbau des vektoriellen SFMCW HR-Interrogators

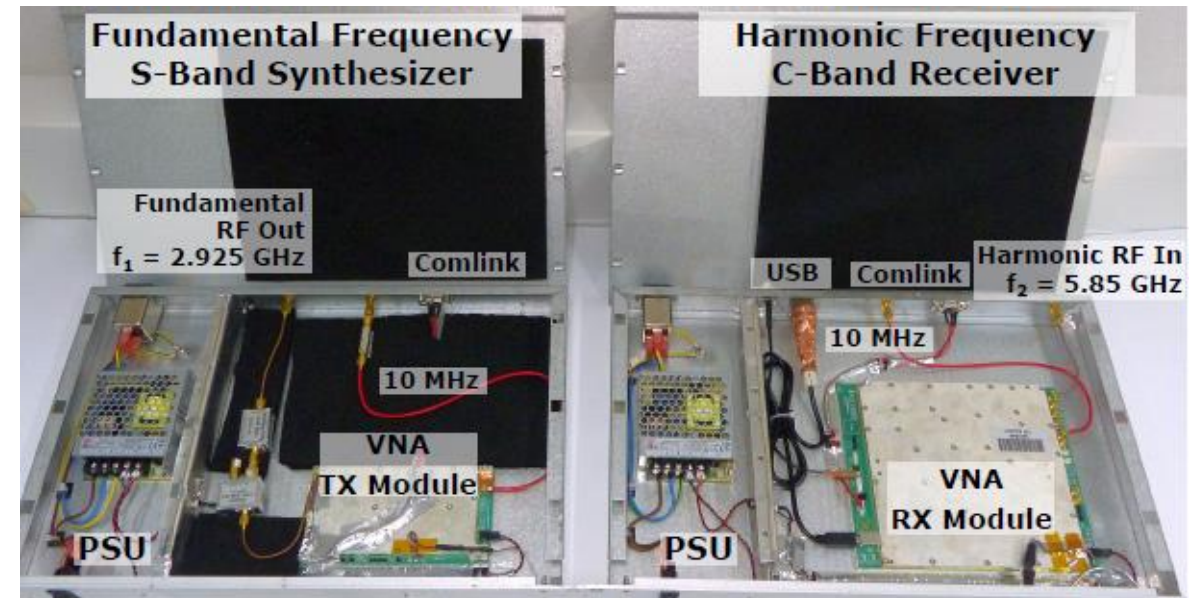
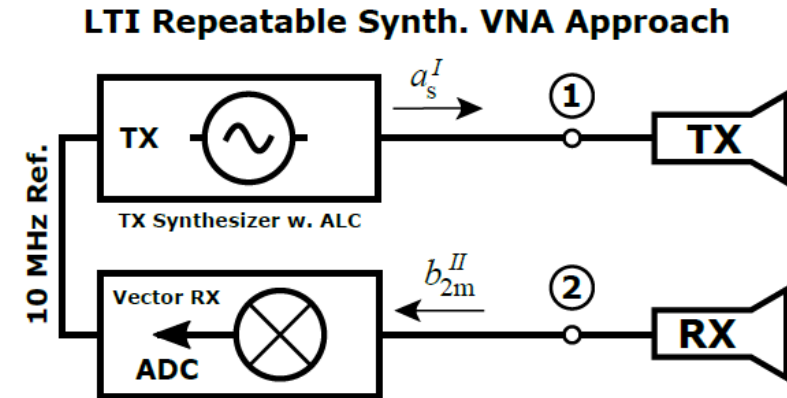
Im IMP entwickelte Lösung:

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

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



Koaxialer NL-Referenzstandard



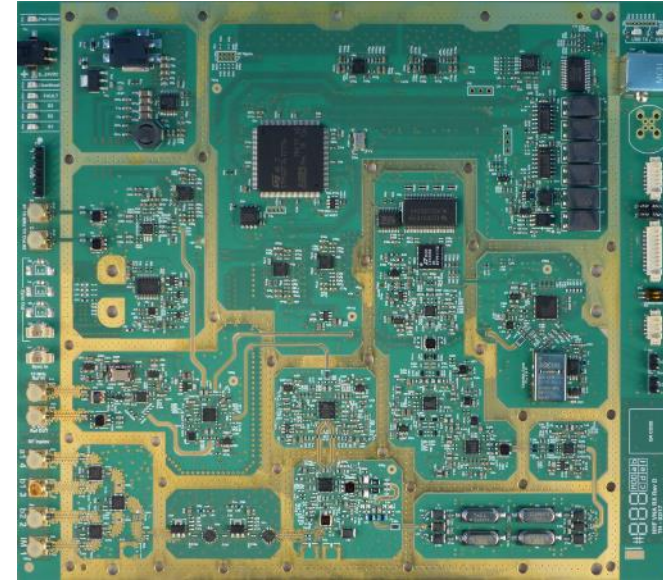
Kohärente Sende- und Empfangsmodule für SFMCW

- 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 $t_{j(RMS)} \approx 981$ fs über alles
- Ausgangsleistung -55 ... +5 dBm mit interner und externer ALC-Schleife über externen PA
- Niedrigster gemessener eingangsbezogener Noise floor $N_0 = -172.9$ dBm bei max. Signalverarbeitungsgewinn

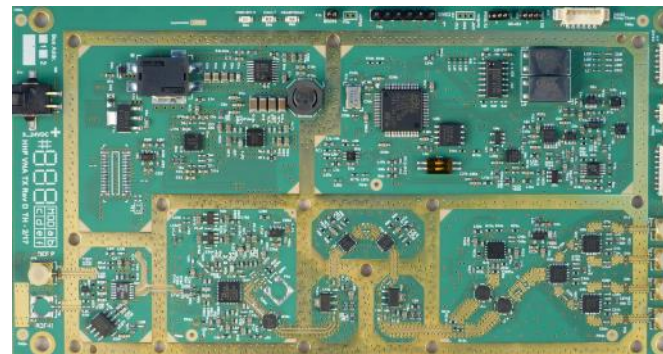
➡ **Basishardware für unsere SFMCW Forschung**

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

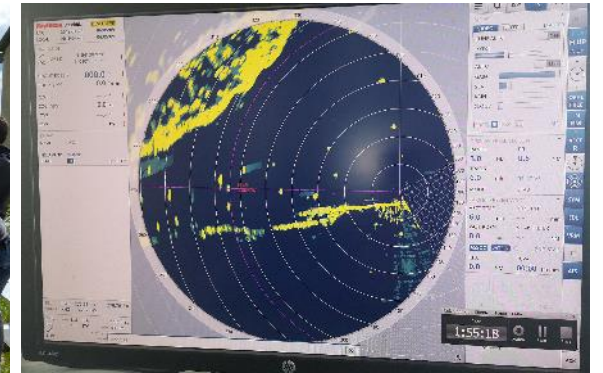
Infos & Datenblätter:
Webseite Spin-Off
www.hhft.de

Vektorielles SFMCW Harmonic Radar SEERAD

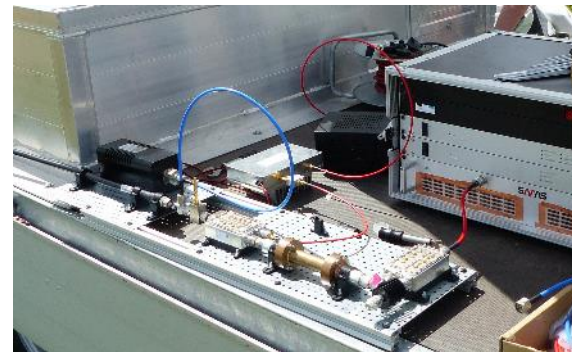
- BMBF SiFo Verbundprojekt Frauenhofer FHR, FH Aachen IMP und Raytheon-Anschütz GmbH
- Ziel: Entwicklung eines Demonstrators für ein HR basiertes Seenotrettungssystem mit Integration in das Schiffsnavigrations- und Brückensystem
- Beleuchtung: Maritimes S-Band, $f_c = 2,9$ GHz, $P_{EIRP} \approx 76$ 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)



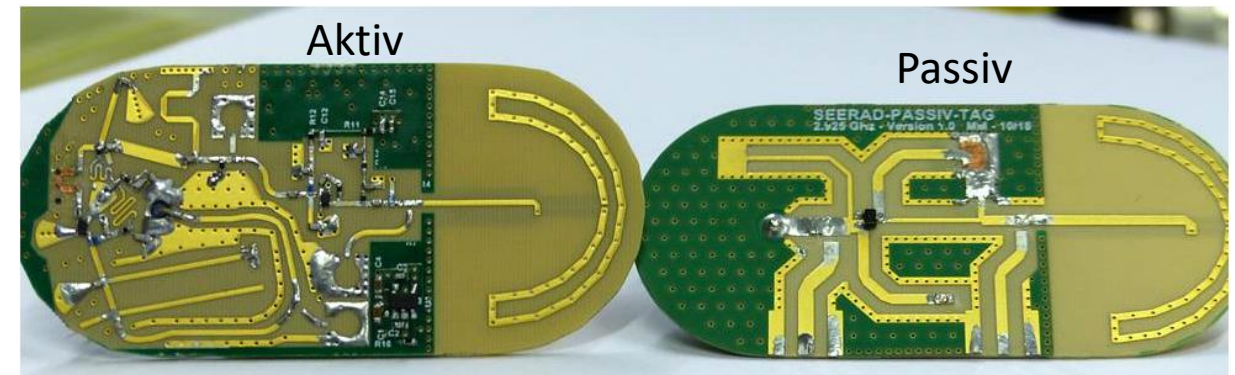
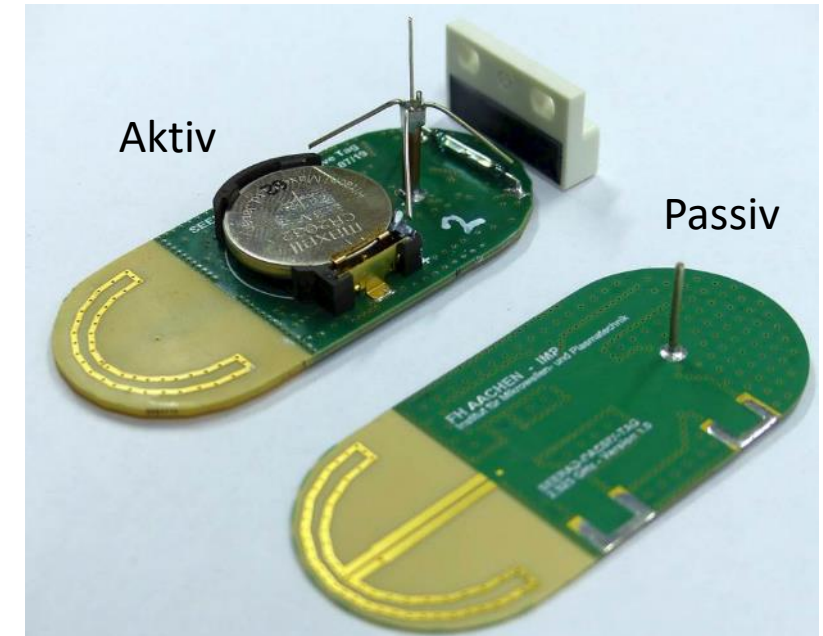
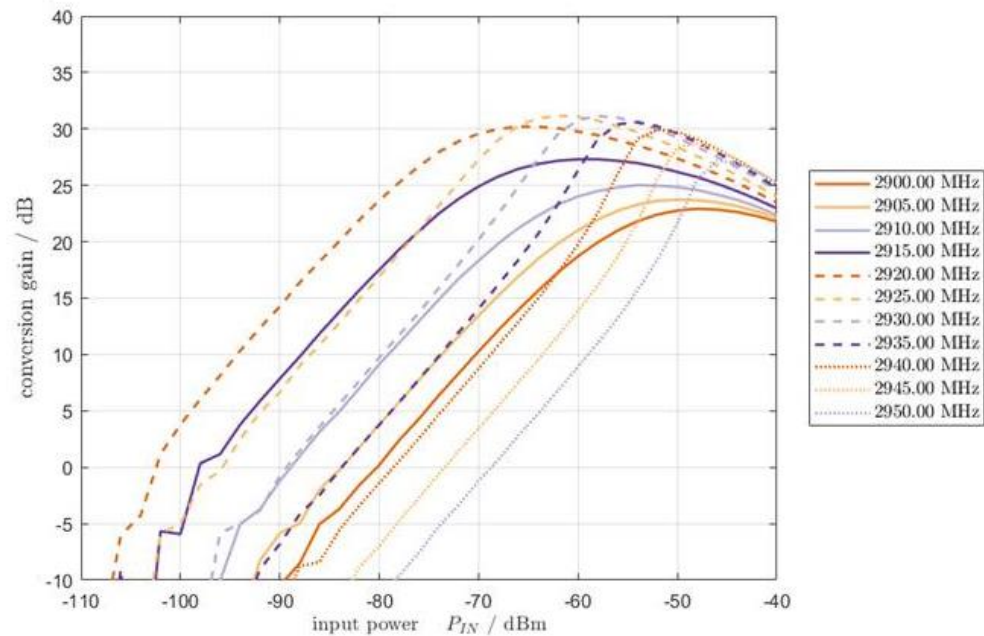
SFMCW Interrogator (IMP)



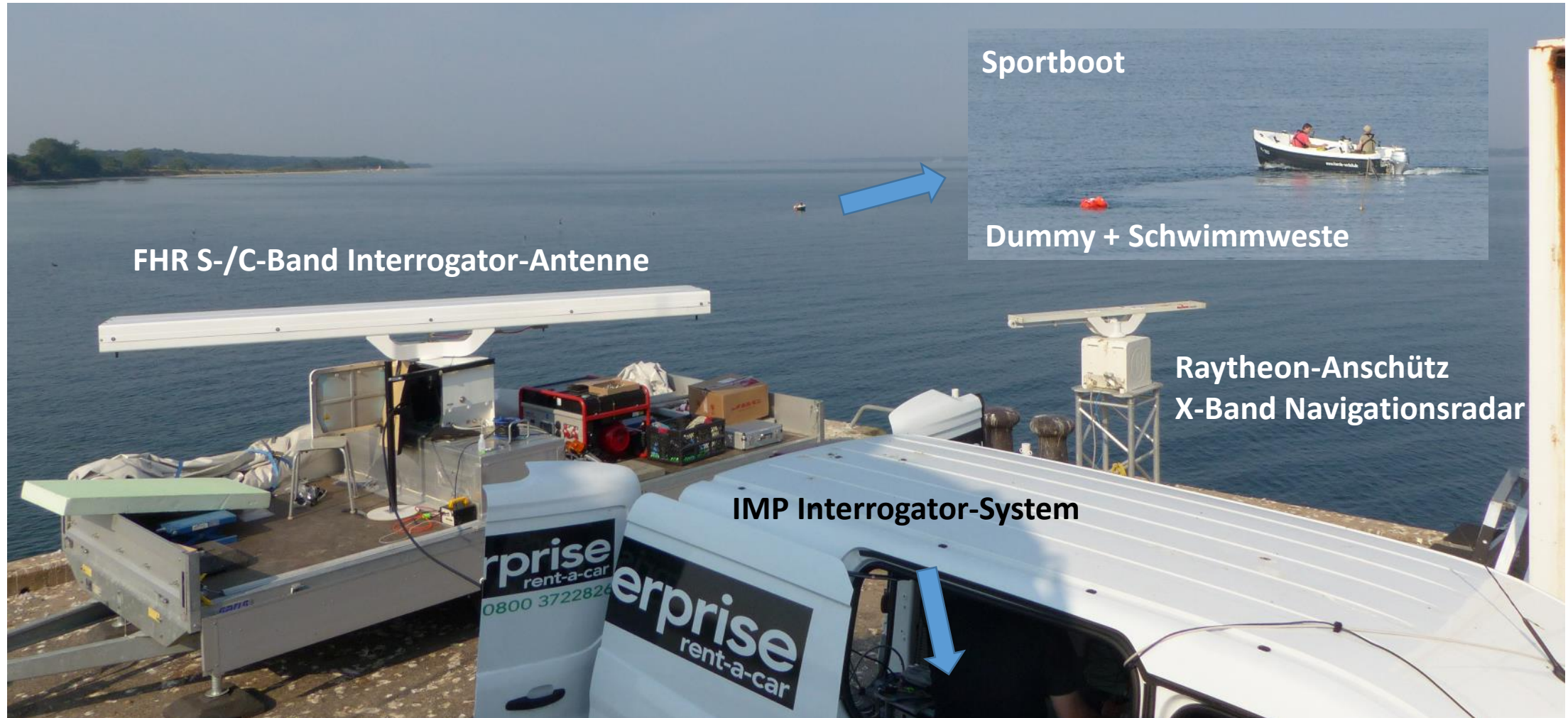
HR-Tags (FHR Ant., IMP Elektr.)

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

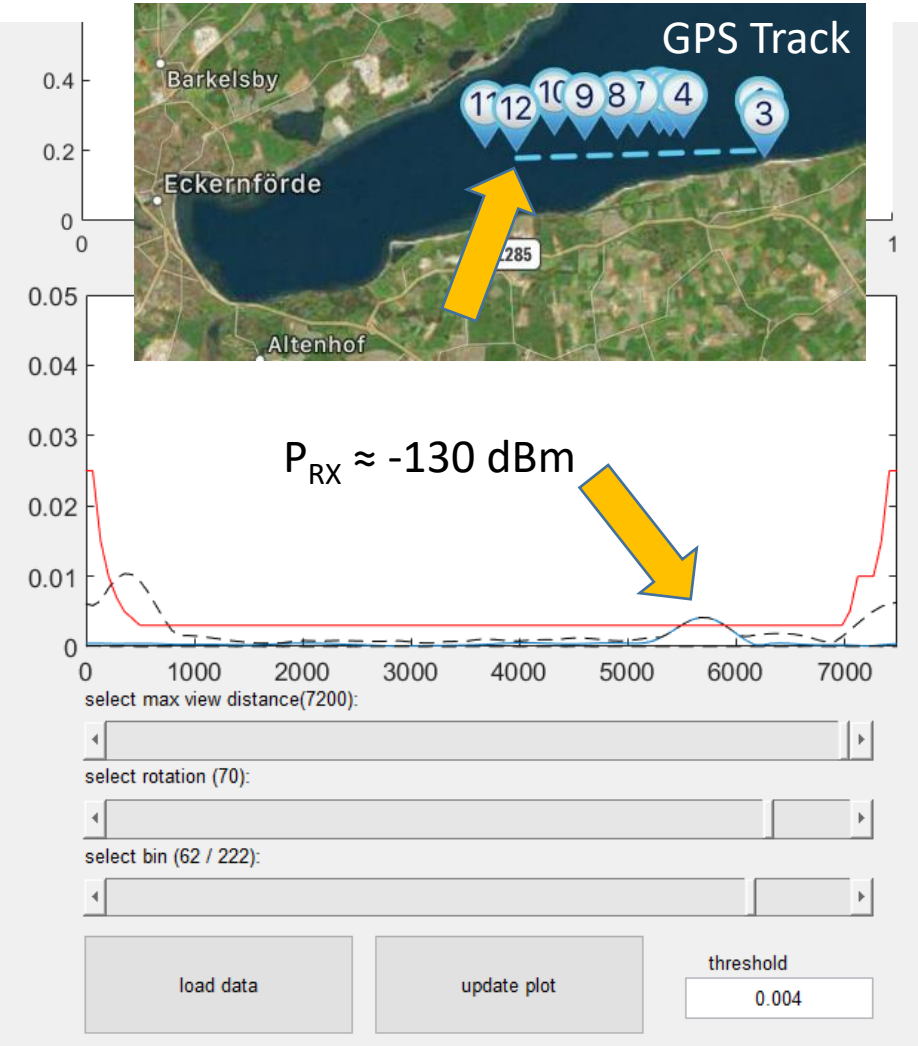
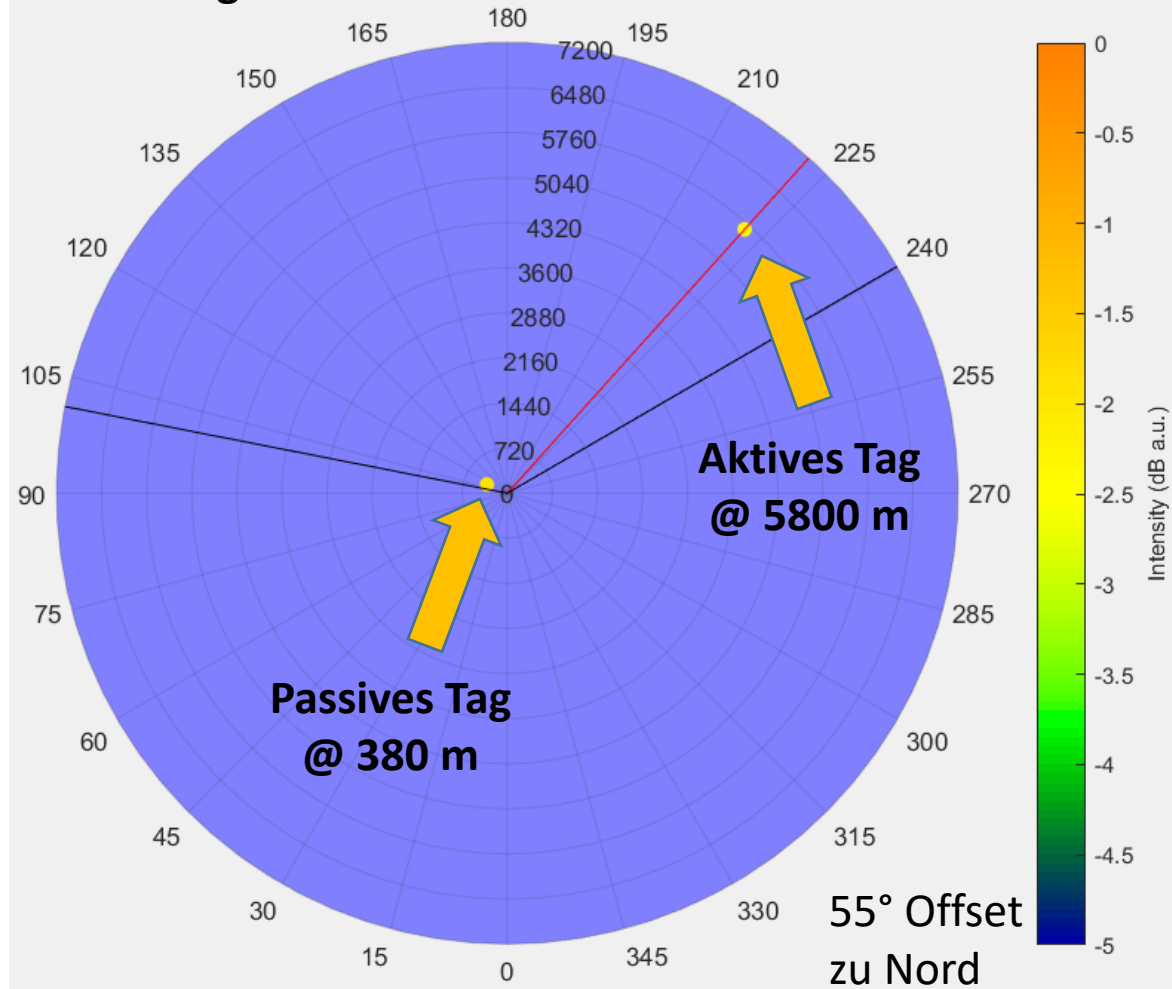


SEERAD Messungen Eckernförder Bucht - I



SEERAD Messungen Eckernförder Bucht - II

HR-Interrogator PPI



SEERAD Messungen Eckernförder Bucht - III

Raytheon-Anschütz X-Band Radar PPI

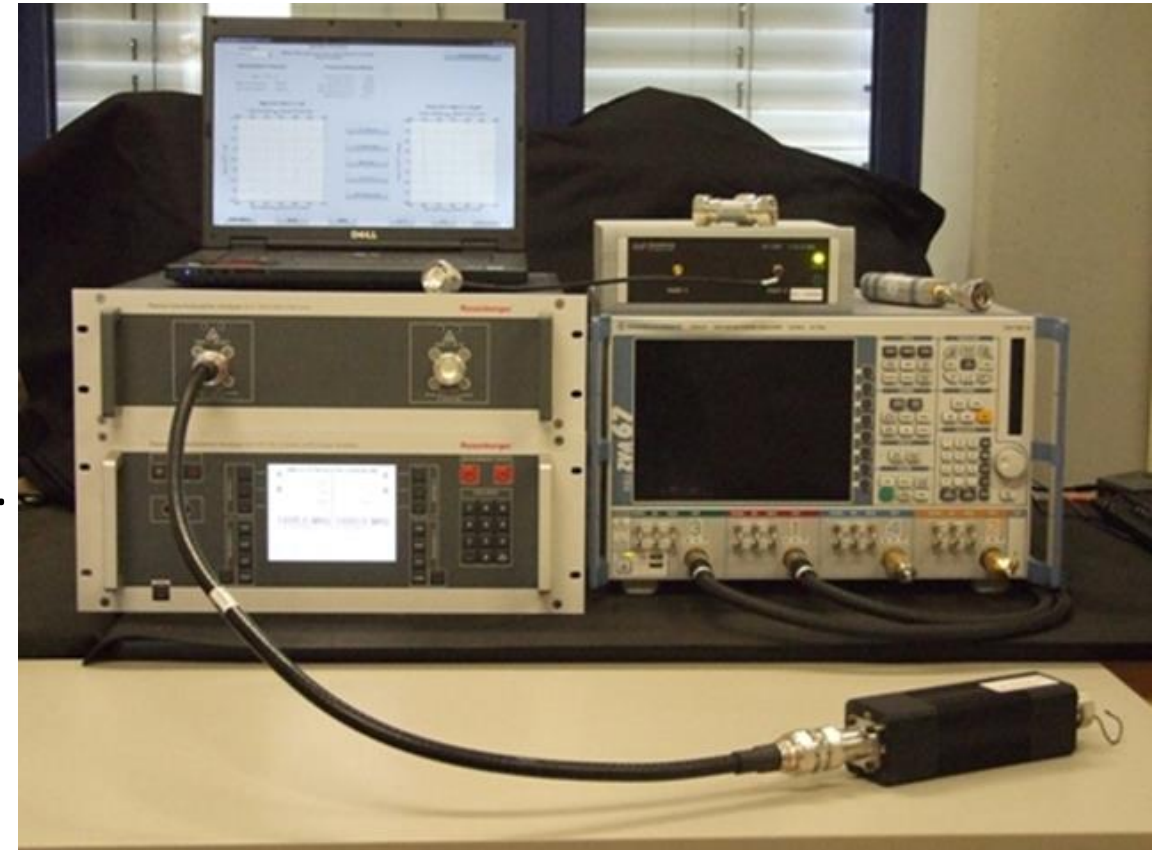


Weitere Anwendungsfelder

- Das Harmonic Radar (HR) ist eine Basistechnologie, die in einer großen Anzahl von Feldern eingesetzt werden kann
- Wenn ein HR-Halbleiter-Chip-Satz entsteht, dann ist dieses so preiswert wie jedes andere Mikrowellenradar
 - Auch die Dual-Funktionalität Standard-Radar und HR ist möglich
- Systeme wie Katzenauge2.0, das direkt mit der Anwendung HR und Standard-Radar verknüpft werden kann, muss wie der Sicherheitsgurt oder der Airback aus den politischen Institutionen initiiert werden

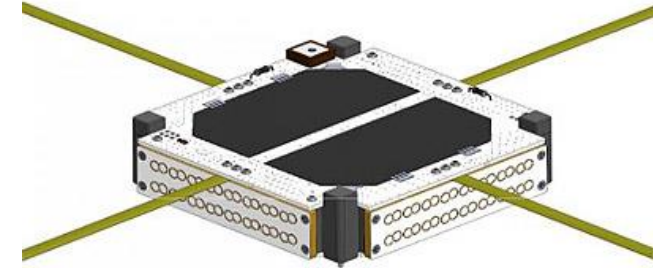
Anwendung I – Standard-VNA mit MF-Fähigkeit

- Rückstieg auf einfachere Integer-Teiler in den Regelschleifen
- Ggf. Bereitstellung eines Referenzsignales, dass sich fein in der Frequenz einstellen lässt.
- Ohne Mehrkosten wären diese VNAs herstellbar.
- Werkseitige Grundkalibrierung erspart dem Anwender den Einsatz von komplexeren Kalibrierkits mit Phasenreferenzstandards.
- Ein derartiger VNA kann auch (über eine FFT) als Sampling-Oszilloskope verwendet werden.



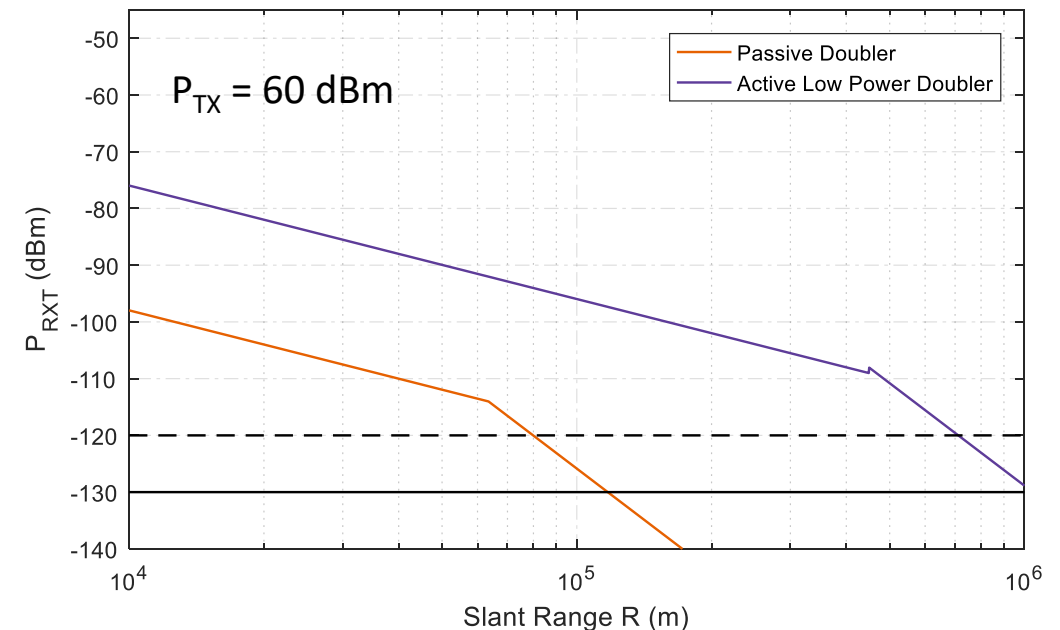
Anwendung II – Picosatelliten Tracking

- 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



0.25U Cubesat: 100 x 100 x 25 mm³

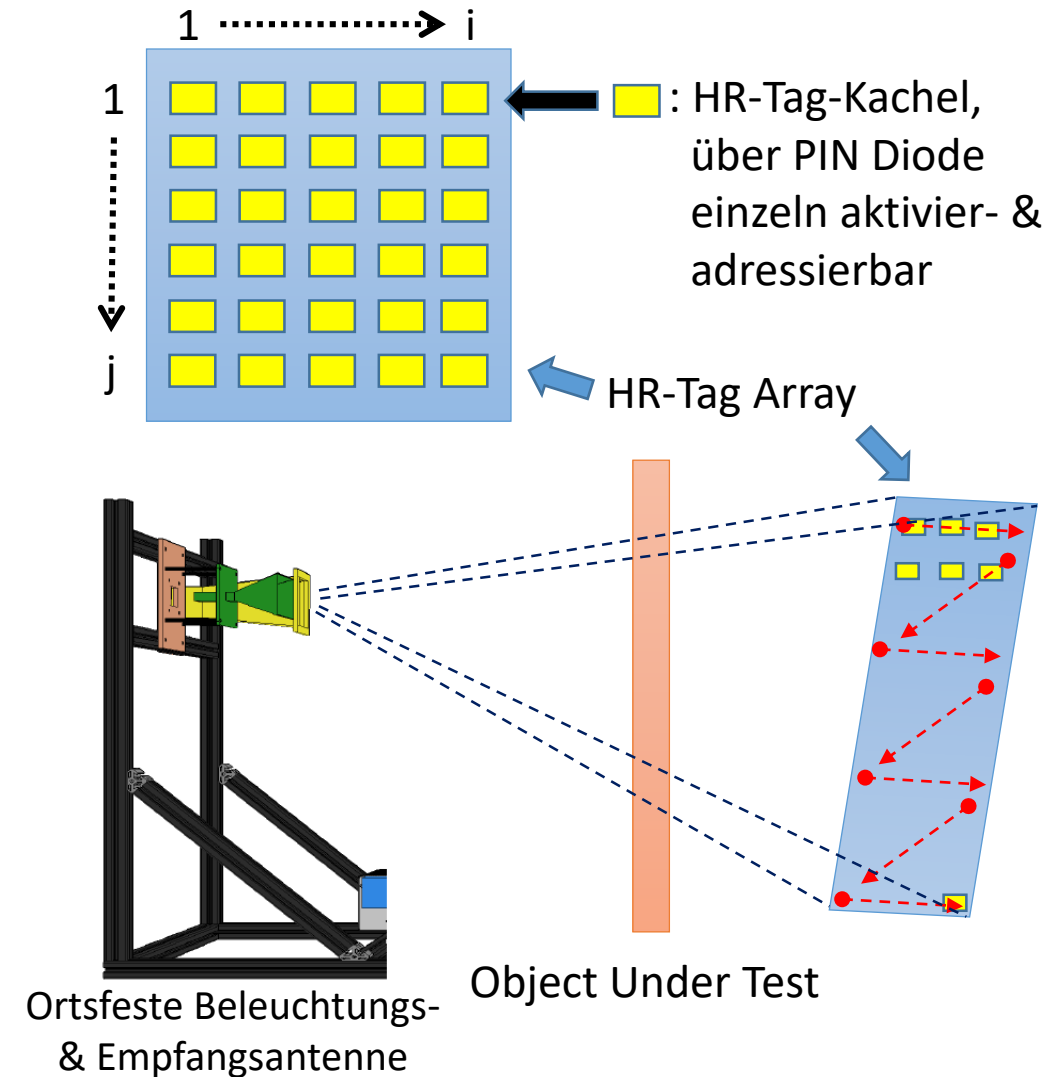
Quelle: Swarm Technologies (www.swarm.space)



LEO: passives und MEO aktives Tag (1 Transistor, $P_{Diss} = 2$ mW) erreichbar!

Anwendung 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 Ausbreitungspfads
- 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!
- Ein Projekt für die KI-Datengeneration läuft



Anwendung IV – HR-Tags mit Backscatter ID

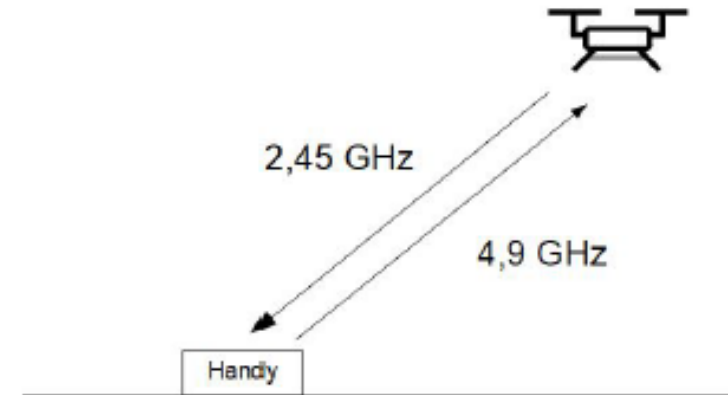
- Kombination von RFID & präziser und robuster Lokalisierung
- AM-Backscatter des Tags kann zur Datenübertragung genutzt und vom Interrogator ausgewertet werden
- Sowohl Modulation des harmonischen Signals, als auch Kombination von klassischem RFID & Harmonic-Ranging-Zusatzfunktion denkbar
- Werkzeug- 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



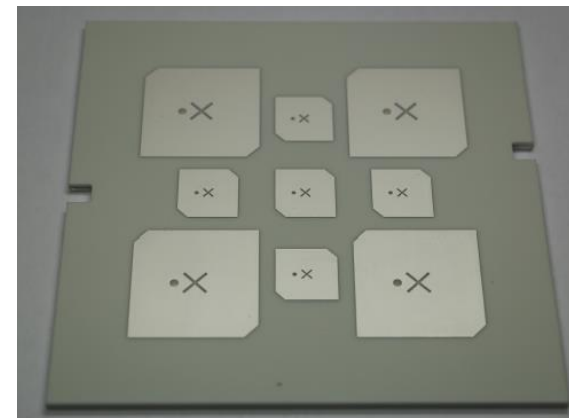
Wikimedia Commons ©Benutzer Rethink Robotics

Anwendung V – 2,45 GHz-Elektroniklokalisierung

- Motivation: Bergnotrettung – Personen- / Smartphoneortung per Drohne
(F+E-Projektantragsstellung liegt vor)
- 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

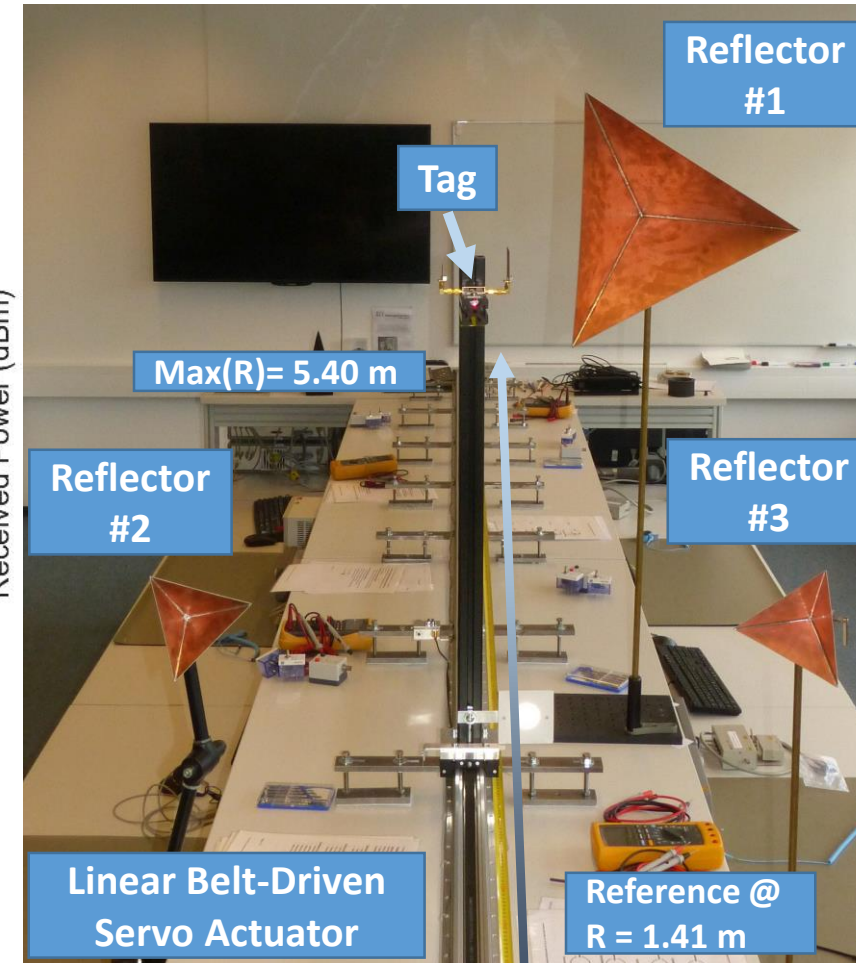
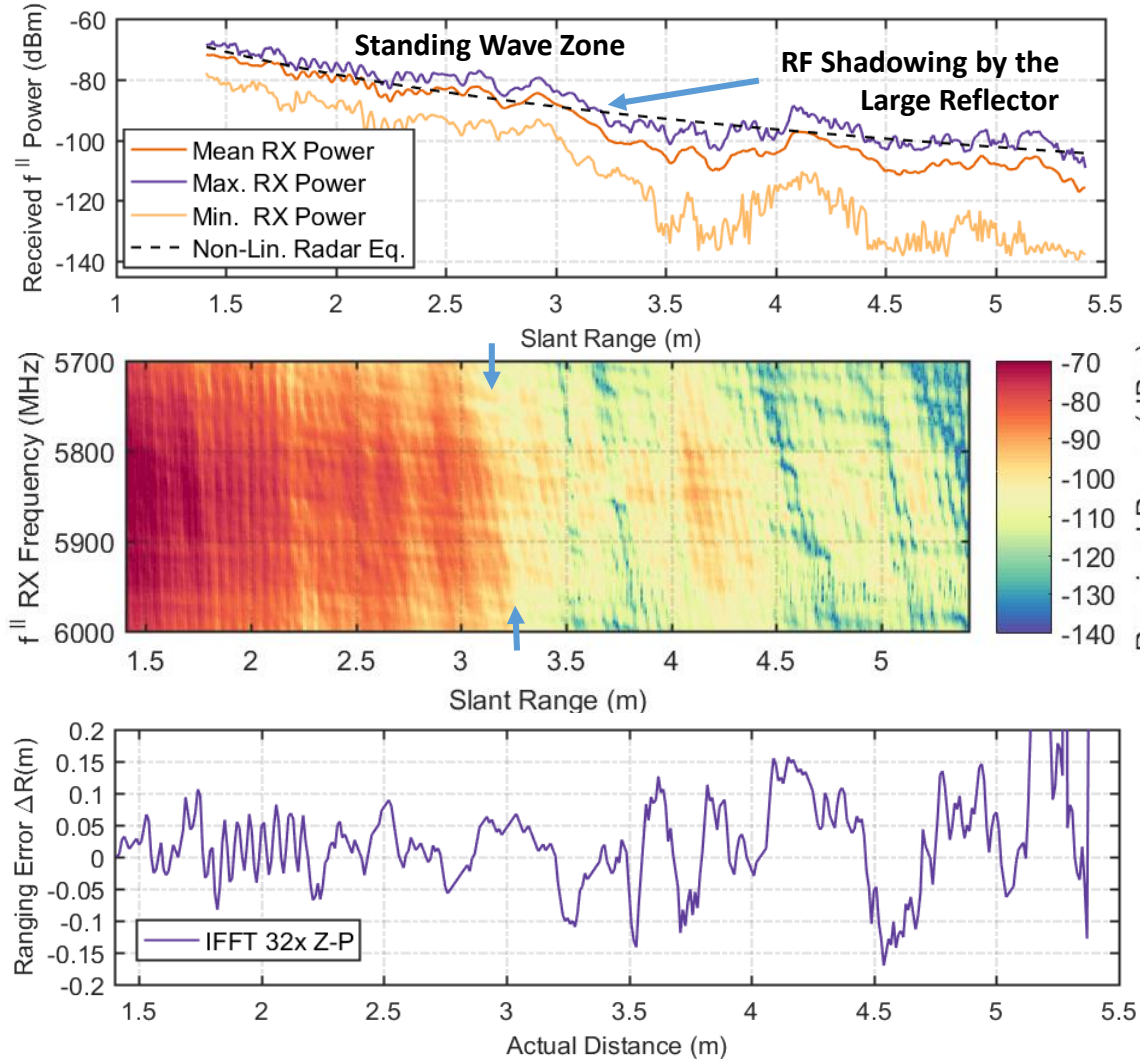


Quelle: Masterthesis Felix Bündgen FHR / IMP



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

Anwendung VI – Out- u. 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

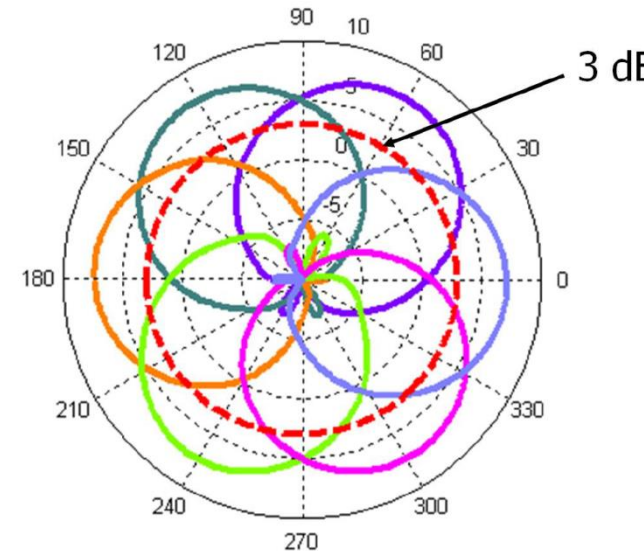
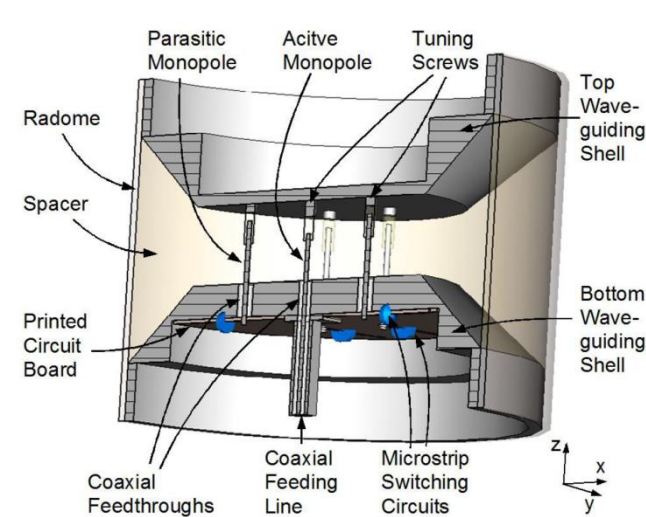
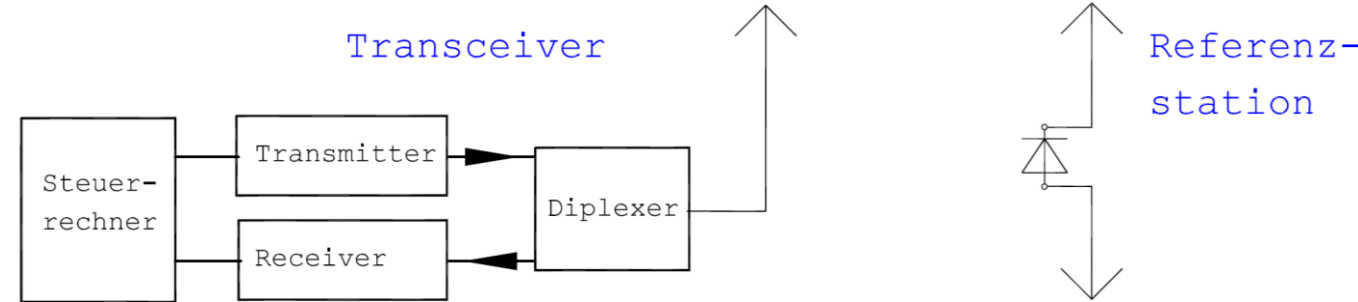
Reflector #2:
RCS (3GHz) = 0.16 m²
Slant Range R = 1.8 m

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

Direction of Linear Movement

Anwendung VI – Out- u. 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

Anwendung VII - Autonomes Fahren

- Unterstützung der Fahrassistenz und autonomen Fahrsysteme
- Markierung von Warnbaken / Leitpfosten mit passiven Harmonic Radar Tags (24 / 48 GHz)
- Erweiterung der Kamera-, LIDAR & FMCW / MIMO-SAR Sensordaten mit zusätzlichen Informationen (genaue Entfernung, Sichtbarkeit!)
- 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 VIII – Katzenauge 2.0

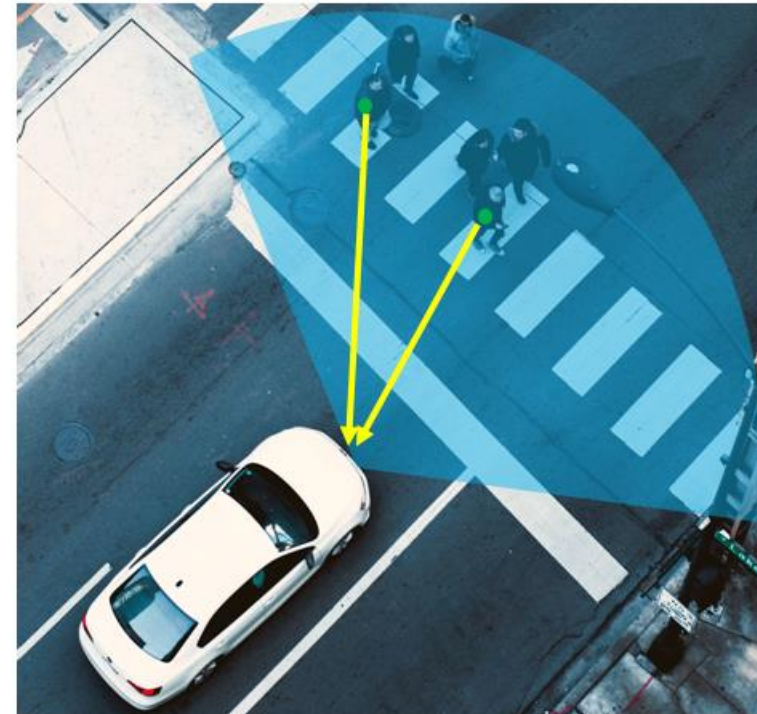
Harmonic Radar im Automobil/ beim Autonomem Fahren mit dem **Katzenauge 2.0**



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

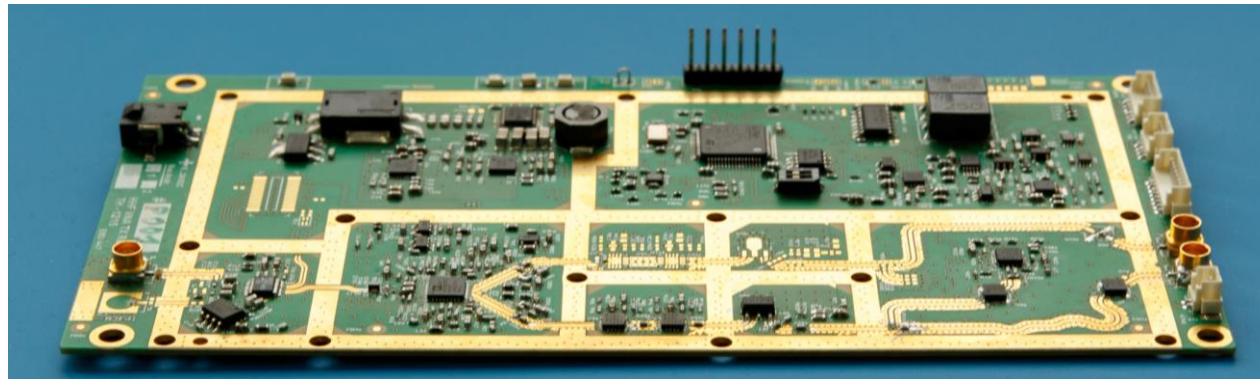
Zusatzinformationen: Richtung und Entfernung!

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



Zusammenfassung des Vortrags

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





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dank an Dr.-Ing. Thomas Harzheim