Herausforderungen und Möglichkeiten der MMW-Messtechnik

Dr.-Ing.Christoph Baer

Lehrstuhl für Elektronische Schaltungstechnik

Ruhr-Universität Bochum

Millimeterwellen- Stand der Forschung

ETH Zürich, 18.06.2019

Übersicht

- Vorstellung
- Motivation – Notwendigkeit hoher Frequenzen für 5G
- Etablierte Messtechnische Nutzung
    - Industrielle und zivile Radartechnik
    - Plasmatechnik
    - Medizintechnik
    - Industrielle Messtechnik
    - mmW-Messtechnik
- Zusammenfassung

Übersicht

- **Vorstellung**
- Motivation – Notwendigkeit hoher Frequenzen für 5G
- Etablierte Messtechnische Nutzung
  - Industrielle und zivile Radartechnik
  - Plasmatechnik
  - Medizintechnik
  - Industrielle Messtechnik
  - mmW-Messtechnik
- Zusammenfassung

Vorstellung

Dr.-Ing. Christoph Baer
Lehrstuhl für Elektronische Schaltungstechnik
Ruhr-Universität Bochum
Christoph.Baer@est.rub.de

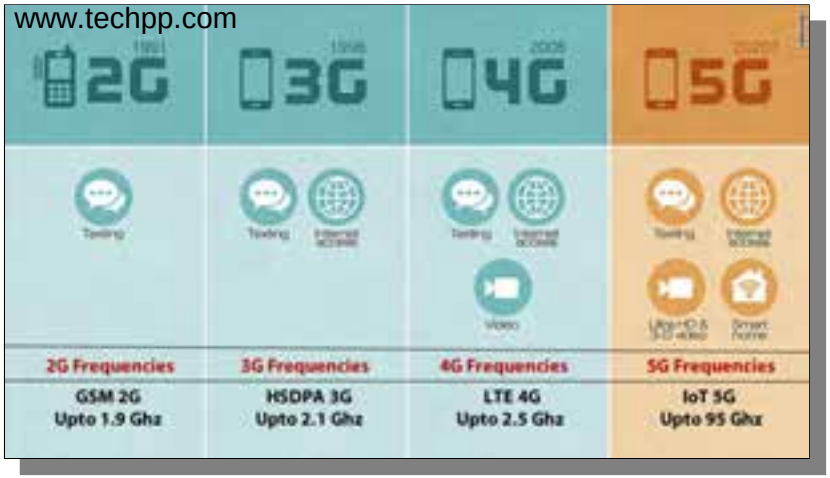
- Abitur 2004
- 2004-2009 Studium Elektrotechnik und Informationstechnik Vertiefung: Hochfrequenztechnik
- 10/09 - 04/16 Wiss. Mitarbeiter EST
- 06/11 – 06/15 Entwicklungsingenieur Radartechnik mit der Krohne Messtechnik GmbH
- Promotion 2015
- Seit 04/16 Akademischer Rat am EST
- Forschung: RADAR-Sensorik, mmW-Messtechnik, Sensortechnologie für humanitäre Zwecke
- Lehre: Elektronische Schaltungstechnik, RADAR-Technik, Messverfahren und Sensoren,
  div. praktische Fächer und Seminare
- Associate Editor: IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement
  IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology
- Vorsitzender der IEEE SIGHT (Special Interest Group on Humanitarian Technology) Germany Section

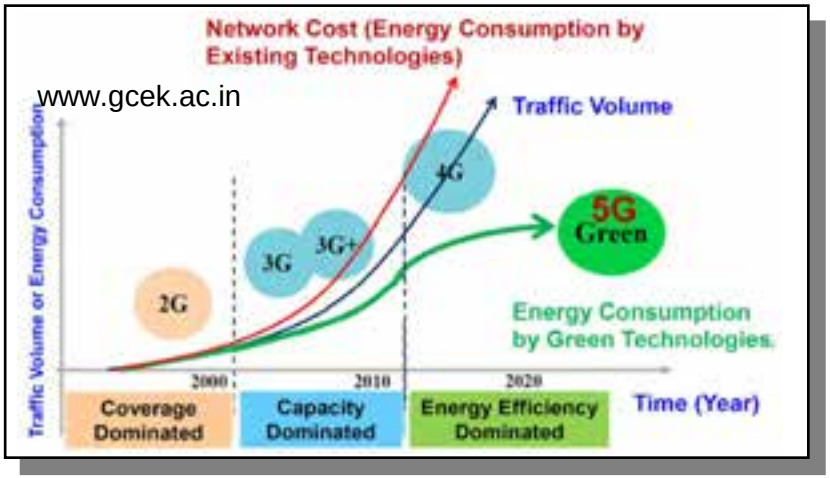
Übersicht

- Vorstellung
- **Motivation – Notwendigkeit hoher Frequenzen für 5G**
- Etablierte Messtechnische Nutzung
  - Industrielle und zivile Radartechnik
  - Plasmatechnik
  - Medizintechnik
  - Industrielle Messtechnik
  - mmW-Messtechnik
- Zusammenfassung

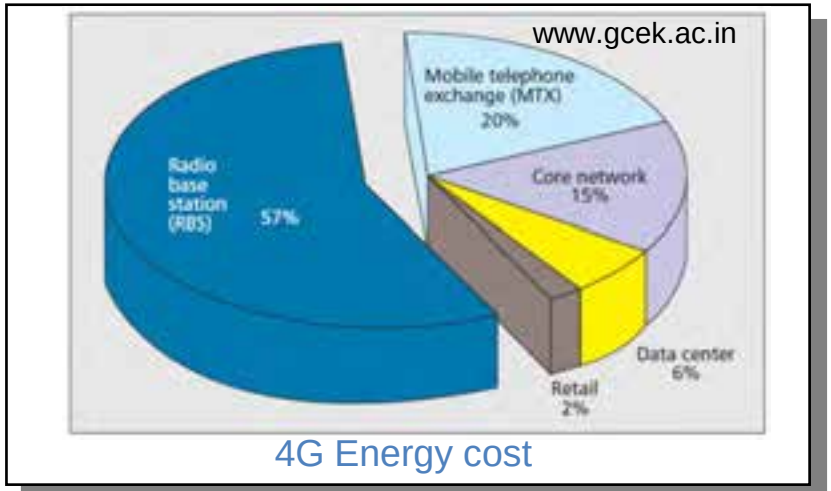
Motivation

Mobilfunkstandard 5G – Energieeffizienz und Kosten





- Steigender Datentransfer
- Steigende Energiekosten
- Hauptenergiekonsument ist die Datenumsetzung in der Basisstation
- Forderung nach neuer Technologie für effizienteren Mobilfunkstandard

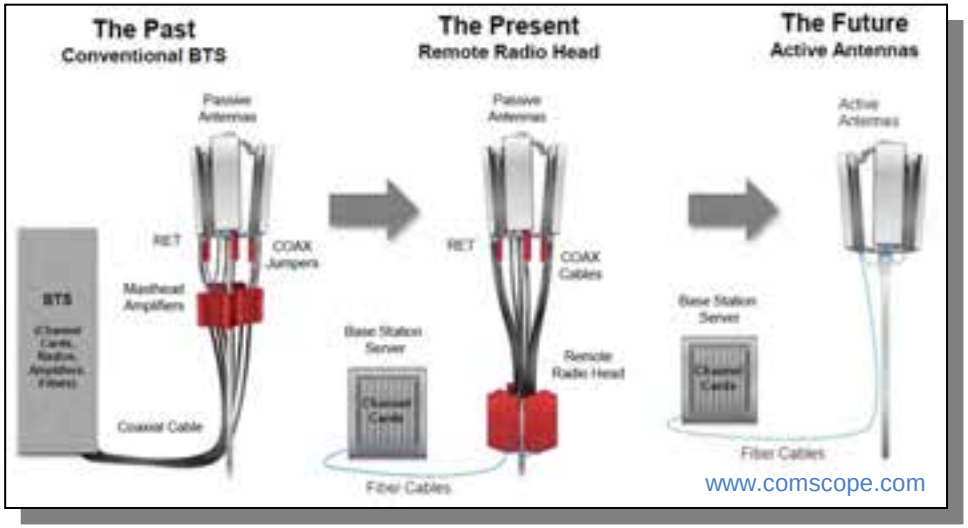


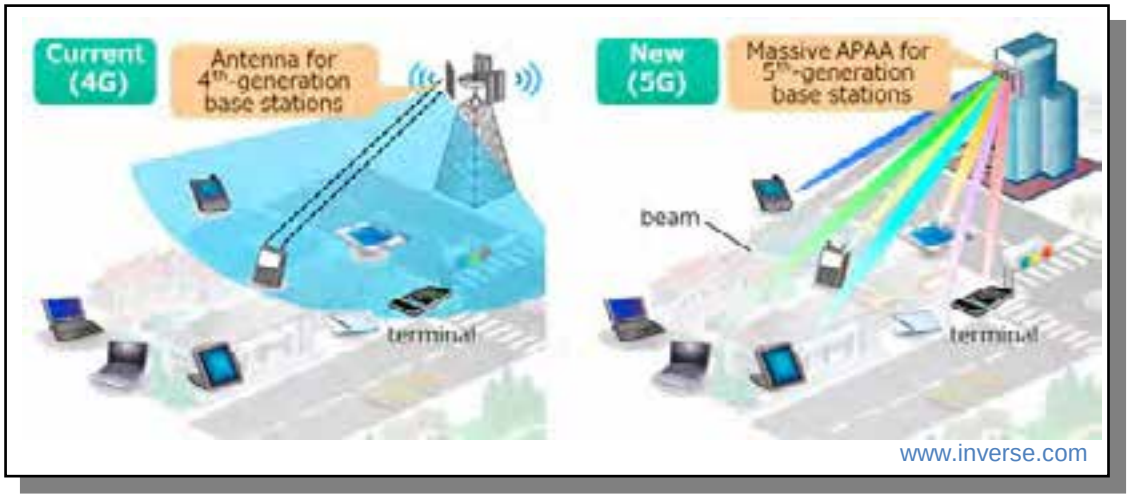
4G Energy cost

Motivation

Mobilfunkstandard 5G – Effiziente Sendertechnologie

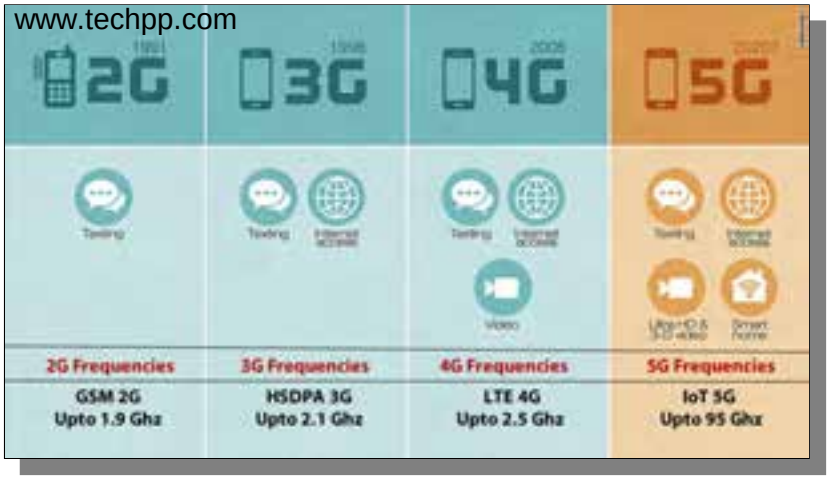
- Direkte Glasfaserverbindung zum Frontend
- Bessere Effizienz Basisstation
- „Active Phase Array Antenna„ Beamsteering möglich
- Verringerte Emission und Störemission von Mikrowellen





Motivation

Mobilfunkstandard 5G – Notwendigkeit hoher Frequenzen



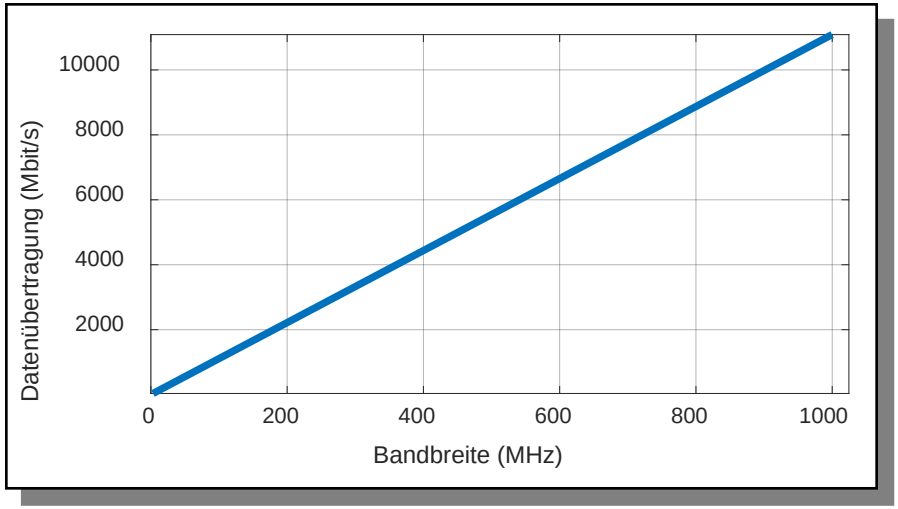
Ideale Datenübertragungsrate nach Shannon-Hartley:

$$C_N = 2 \cdot B \cdot \ln(L)$$

B= Bandbreite, L= Symbole

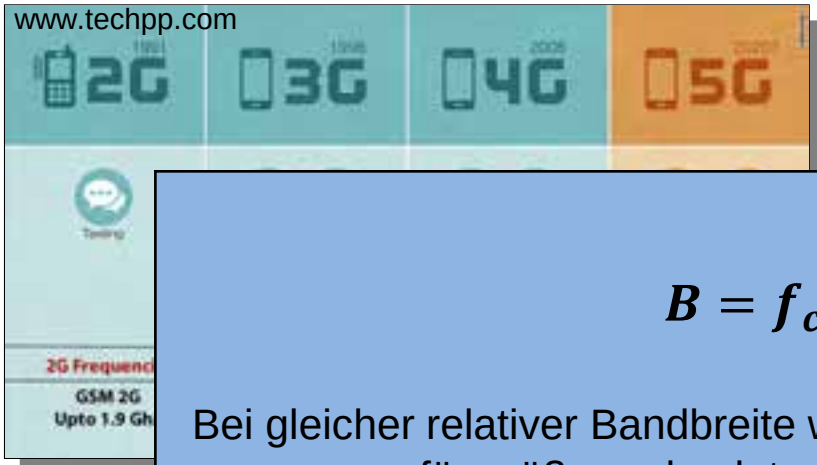
Downloadzeiten Spielfilm (4k, ~ 250GB):

LTE (B= 18 MHz, 256 QAM): 1.8 Std
5G (B= 1 GHz, 256 QAM): 3.5 min



Motivation

Mobilfunkstandard 5G – Notwendigkeit hoher Frequenzen



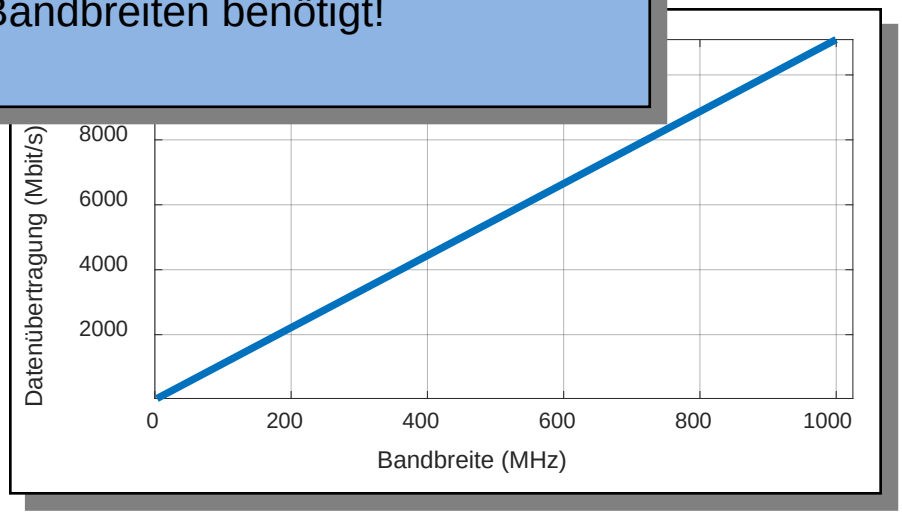
Ideale Datenübertragungsrate nach Shannon-Hartley:

$$B = f_c \cdot B_{rel}$$

Bei gleicher relativer Bandbreite werden höhere Mittenfrequenzen für größere absolute Bandbreiten benötigt!

Downlo

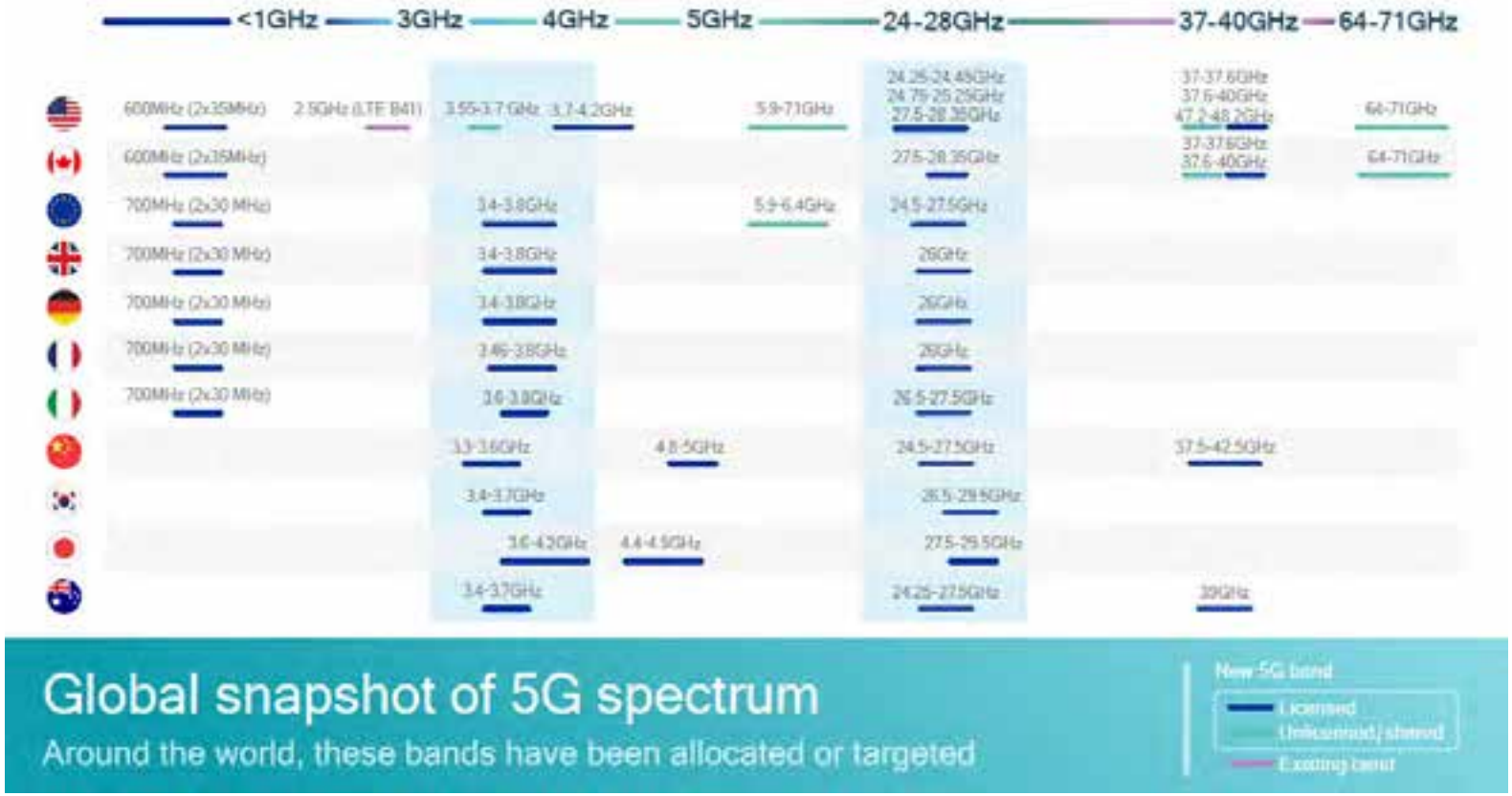
LTE (B= 18 MHz, 256 QAM): 1.8 Std
5G (B= 1 GHz, 256 QAM): 3.5 min



Motivation

Mobilfunkstandard 5G - Notwendigkeit

www.everythingrf.com



Übersicht

- Vorstellung
- Motivation – Notwendigkeit hoher Frequenzen für 5G
- **Etablierte, messtechnische Nutzung**
  - Industrielle und zivile Radartechnik
  - Plasmatechnik
  - Medizintechnik
  - mmW-Messtechnik
- Zusammenfassung

Radartechnik

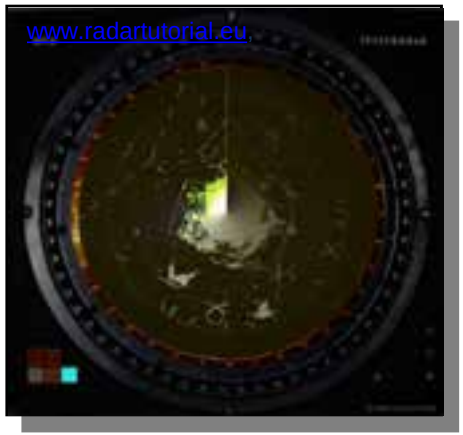
Grundsätzliches Verfahren

- Aussendung von elektromagnetischen Wellen
- Reflektion der Wellen an Objekten
- Empfang der Welle nach Laufzeit T
- Berechnung der Entfernung durch bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$T = \frac{2R}{c} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{c \cdot T}{2}$$

$$c \approx 299\,792\,458\,{}^{m}/_{s}$$

- Grobe Richtungsschätzung durch Antennenposition
- Zusätzliche Signalauswertung



Quelle: www.radartutorial.eu

Radartechnik

Tank Level Probing Radar – Berührungslose Füllstandsmessung

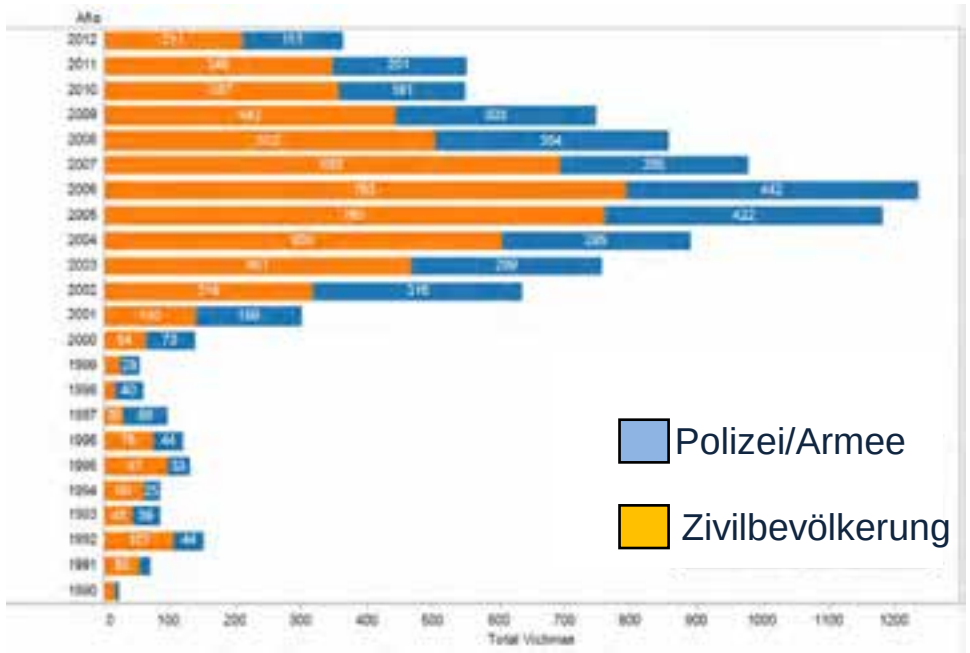
Korrosive Medien

Schweröl

Staubanwendung (Atex)

Radartechnik

Zivile Radaranwendungen- Humanitäre Landminensuche in Kolumbien



Quelle:www.accioncontraminas.gov.co/

Improvised Explosive Devices (IED)

Esponja

Jeringa

Quelle: Universidad Militaria de Nueva Granada, Bogotá

Individuelle Herstellung
“Unendlich” viele versch. Typen

- Mehr als 9000 kolumbianische Opfer zwischen 2000 und 2012
- Geschätzte Anzahl von verbleibenden Minen > 300 000

Radartechnik

Zivile Radaranwendungen- Humanitäre Landminensuche in Kolumbien

Metalldetektoren

- Günstig
- Sehr geringe Detektionsrate durch hohe Falschalarmrate
- Detektionsrate 1:2000

Bodenradar

- Sonifizierung der GPR Rohdaten
- Keine weitere Signalverarbeitung
- Keine Positionierung notwendig
- Aufwendige und langjähriges Training notwendig
- Schlechte Detektionsraten

Radartechnik

Mischmaterialien– Nachbildung kritischer Substanzen

Improvised Explosive Devices (IED)

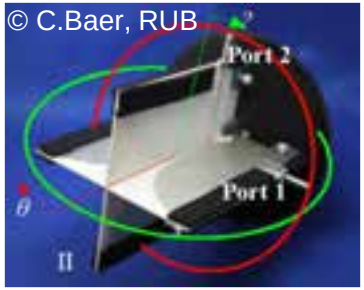
Esponja | Jeringa | Tipo-M

Source: Universidad Militaria de Nueva Granada, Bogotá

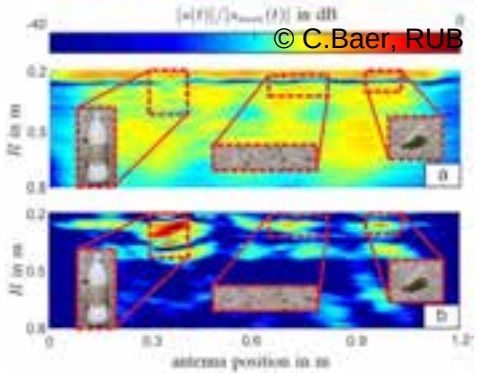
Custom made
“unlimited” different types

- Frequenzbereich: 0.5 – 5 GHz
- Leistung< 100µW

Technology and Research



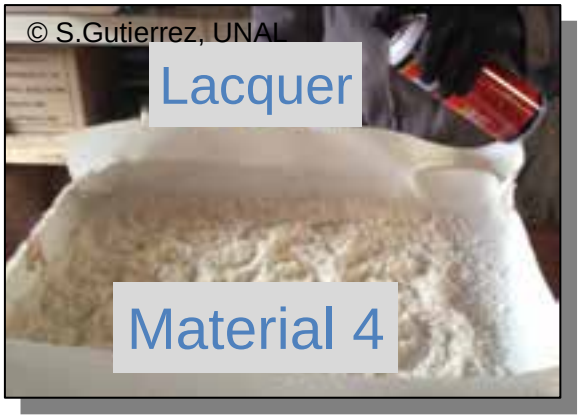
© J. Sachs, TU Ilemanu



- State of the Art Radar Technology
- Subsurface Radar imaging
- Object classification

Radartechnik

Mischmaterialien– Nachbildung kritischer Substanzen



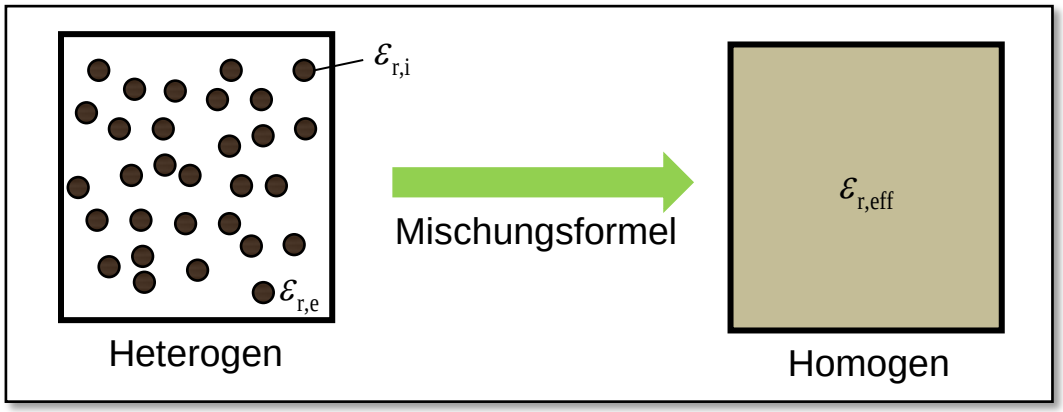
Radartechnik

Mischmaterialien– Nachbildung kritischer Substanzen

Eigenschaften von dielektrischen Mischmaterialien:

- Quasi-homogenes Material mit einer effektiven Permittivität $\varepsilon_{\mathrm{r,eff}}$
- $\varepsilon_{\mathrm{r,eff}}$ hängt von den Einzelpermittivitäten und dem Volumenanteil ab
- Mischungsformeln ermöglichen eine homogenisierte Beschreibung
- Formel nach Maxwell-Garnett

$$\varepsilon_{\mathrm{r,eff}} = \varepsilon_{\mathrm{r,e}} + 3 \cdot \zeta \cdot \varepsilon_{\mathrm{r,e}} \cdot \frac{\left(\varepsilon_{\mathrm{r,i}} - \varepsilon_{\mathrm{r,e}}\right)}{\varepsilon_{\mathrm{r,i}} + 2 \cdot \varepsilon_{\mathrm{r,e}} - \zeta \cdot \left(\varepsilon_{\mathrm{r,i}} - \varepsilon_{\mathrm{r,e}}\right)}$$



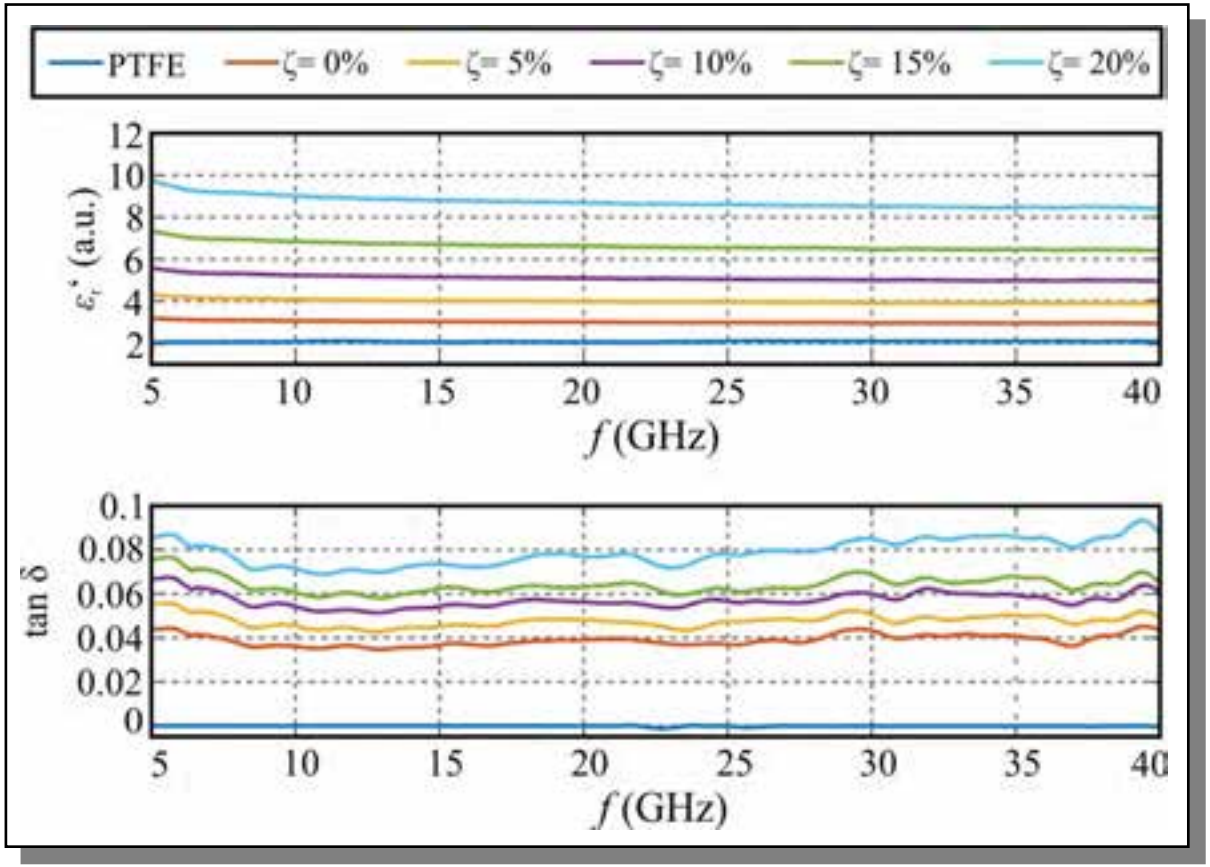
Radartechnik

Mischmaterialien– Nachbildung kritischer Substanzen

- Synthetisieren von ungefährlichen Ersatzstoffen mit voreingestelltem ε_r
- Verwendung von dielektrischen Mischungsformeln
- Komplexe Mischprozedur (~3h)
- Herstellung von Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften
- Mischpermittivität hängt vom Volumenanteil ab
- Realisierbares ε_r zwischen 2 und 12
- Durch Gießprozess viele Formen möglich

Radartechnik

Mischmaterialien– Nachbildung kritischer Substanzen



- **Herstellung breitbandiger Materialen möglich**
- **Ungefährliche Materialen als Sprengstoffersatz**

Übersicht

- Vorstellung
- Motivation – Notwendigkeit hoher Frequenzen für 5G
- **Etablierte, messtechnische Nutzung**
  - Industrielle und zivile Radartechnik
  - Plasmatechnik
  - Medizintechnik
  - mmW-Messtechnik
- Zusammenfassung

Mikrowellen in der Plasmatechnik

Kapsel-check.de

solaranlagen-portal.de

Beschichtung

Multifunktionale Schichten

Oberflächen-veredelung

news.com.au

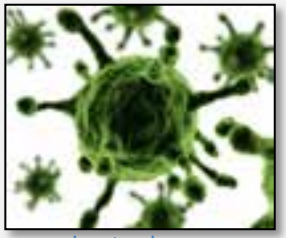
Leufen Medical GmbH

dlr.de

Reinigung/ Sterilisation

Raumfahrt

Medizin



phyrtual.org

innovationsreport.de

welt.de

news.com.au

Plasmagestützte Oberflächenbehandlung

Anwendung: Prozessüberwachung

Prozessunterschiede:
- Reaktorgröße
- Anregungsart
  - DC
  - RF
  - Gepulst
- Gasgemische
- Drücke
- Beschichtungs-material

Homogenität und Stabilität

Plasmaprozess

phyrtual.org

cavonic.com

rub.de

Fraunhofer IGB

Anforderungen:
- Robust
- Stabil
- Ökonomisch
- Einfache Nutzung
- Unempfindlich gegenüber Prozess
- Kontaminationsfrei
- Ortsaufgelöste Messungen

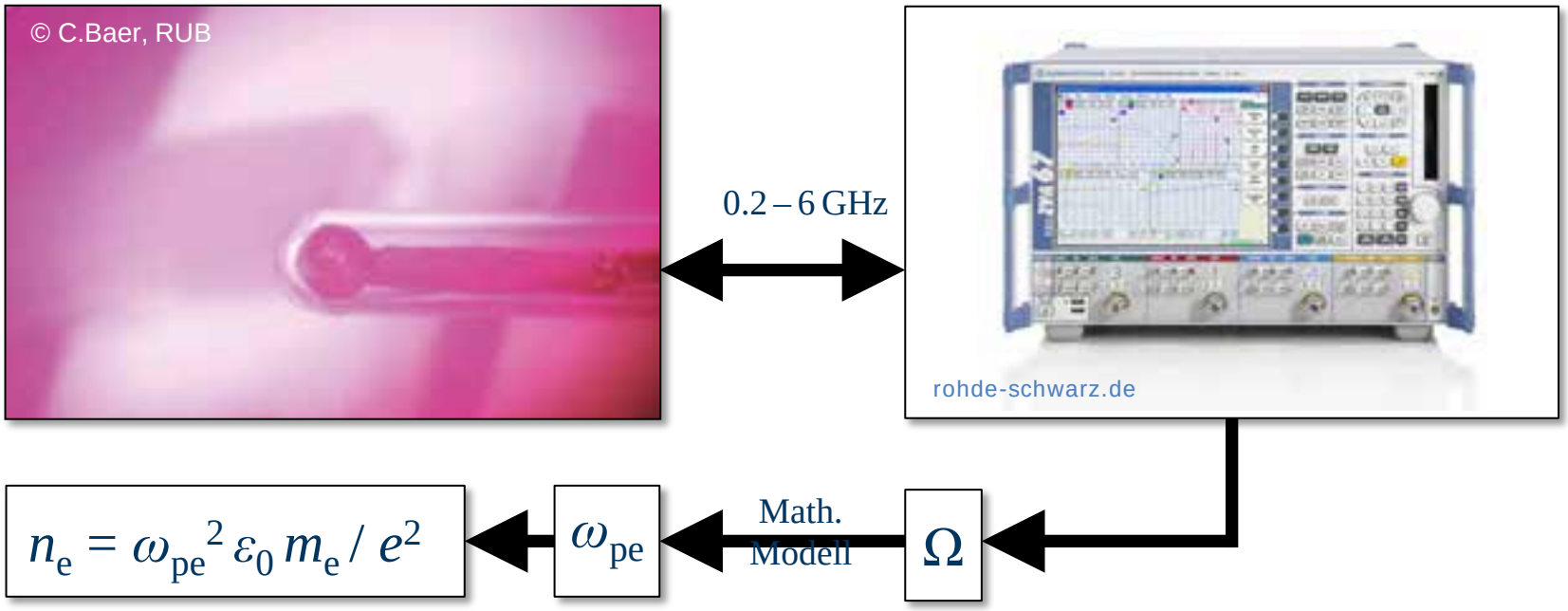
Regelung und Steuerung

Neue Sondenkonzepte

Existierende Mess- konzepte nur limitiert oder für ausgewählte Prozesse geeignet

Aktive Plasmaresonanzspektroskopie: Prinzip

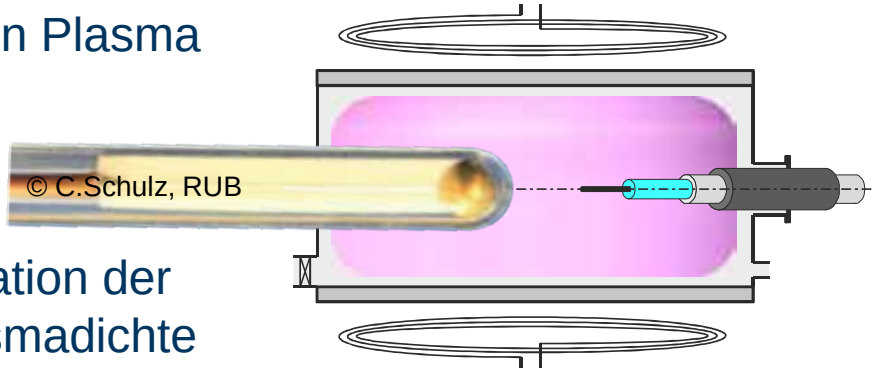
- Plasmen haben die natürliche Fähigkeit auf oder in der Nähe ihrer Plasmaelektronenfrequenz ω_{pe} in Resonanz zu geraten

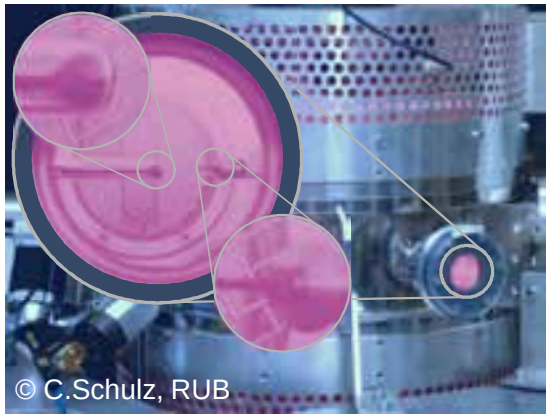


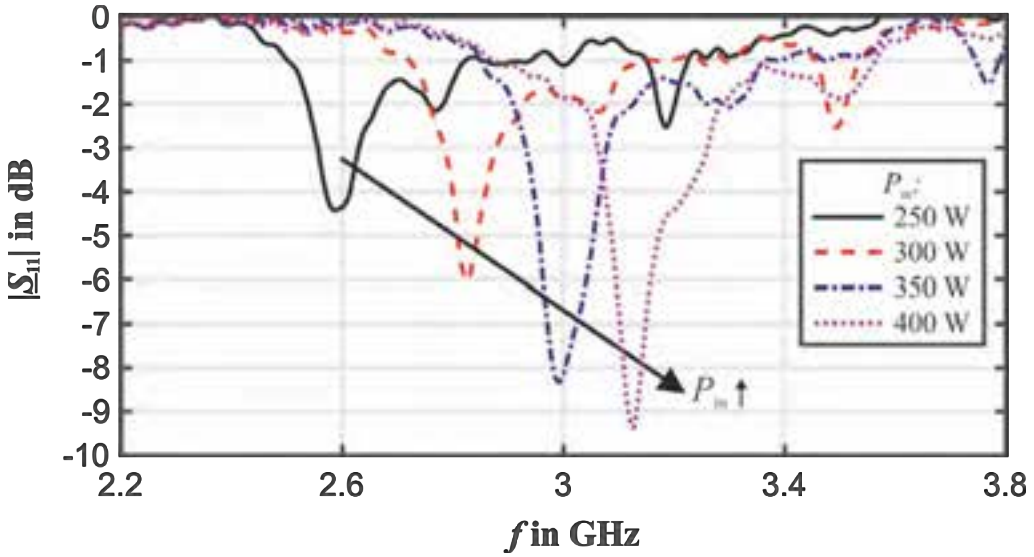
- Herausforderung: Modell zur Beschreibung der Wechselwirkung
- Häufig verwendet: Drude-Modell

Messungen im DICP: Resonanzverhalten

- Argon Plasma
- Variation der Plasmadichte (über Leistungs-variation)
- Eindeutiges Resonanzverhalten
- Gute Überein-stimmung zu den Simulationen







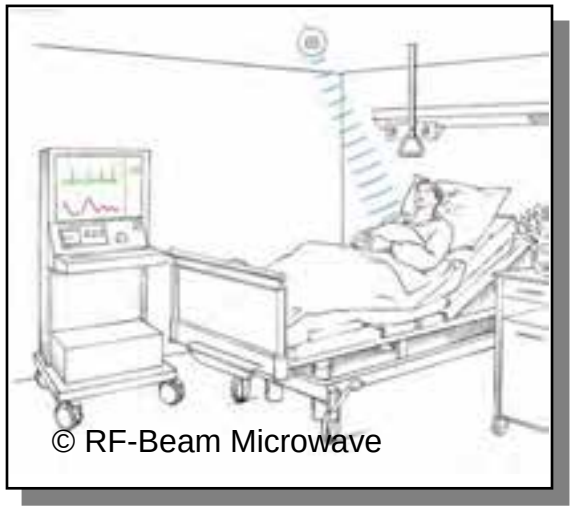
Übersicht

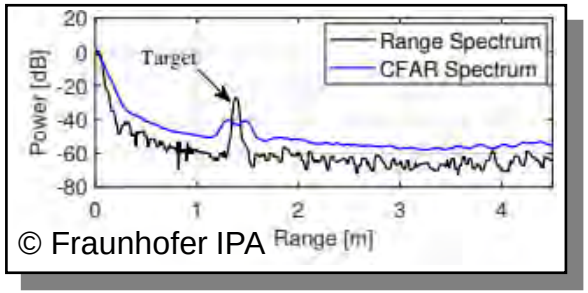
- Vorstellung
- Motivation – Notwendigkeit hoher Frequenzen für 5G
- **Etablierte, messtechnische Nutzung**
  - Industrielle und zivile Radartechnik
  - Plasmatechnik
  - Medizintechnik
  - mmW-Messtechnik
- Zusammenfassung

Medizintechnische Anwendung

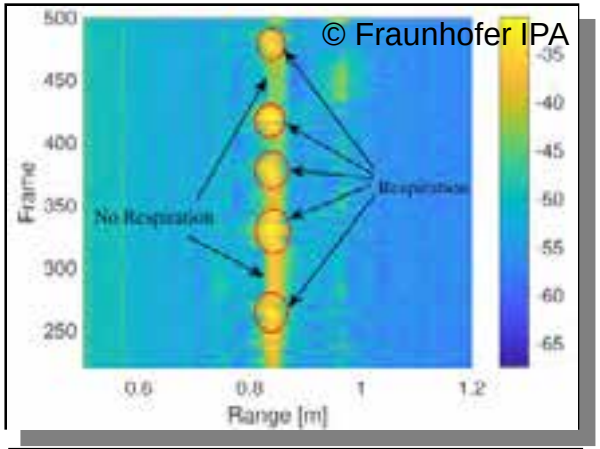
Berührungslose Vitalzeichenüberwachung

- Gleichzeitige Messung von Ort und Geschwindigkeit
- Radargeräte sing mehrzielfähig -> Ortsaufgelöste Geschwindigkeitsmessung
- Berührungslose Messung von Atmung und Herzschlag
- Minimale Interaktion mit dem Patienten

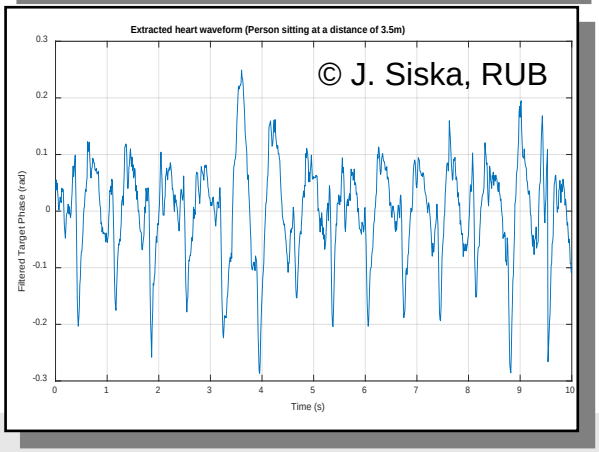

© RF-Beam Microwave



© Fraunhofer IPA



© Fraunhofer IPA

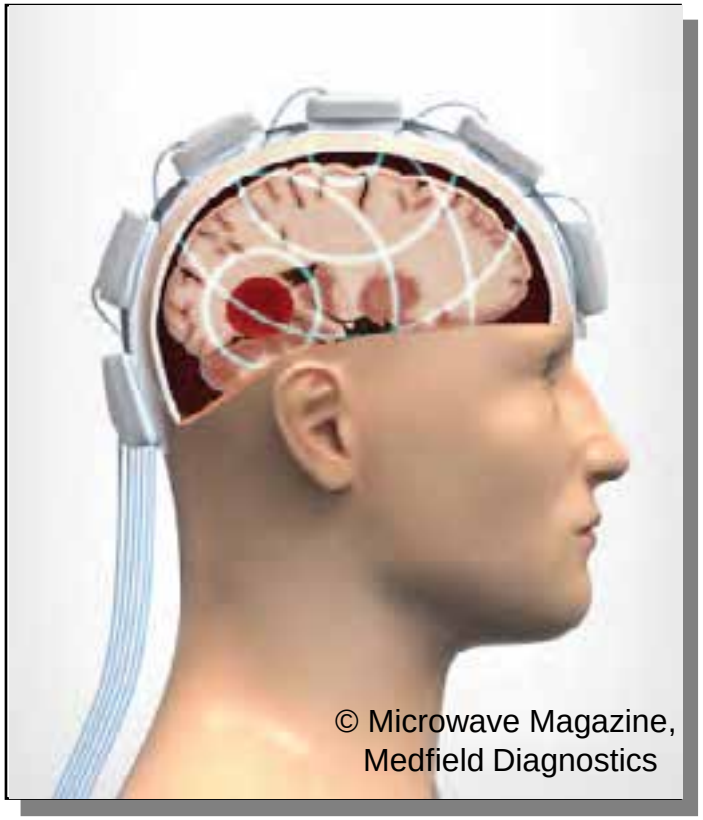


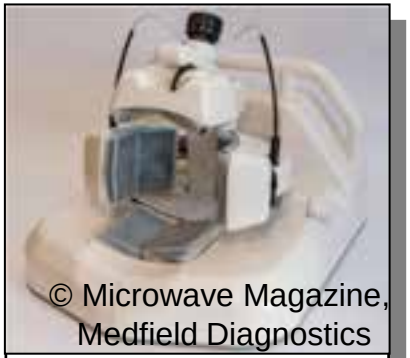
© J. Siska, RUB

Medizintechnische Anwendung

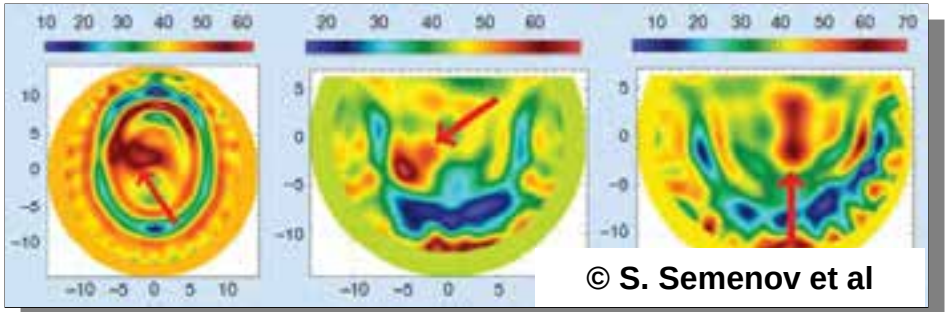
Mikrowellentomographie – Schlaganfall- und Krebsdiagnose

- MW-Tomographie zur Schnittbilddarstellung von Permittivitätsverteilungen
- Kompaktes Sensordesign ermöglicht schnelle Diagnose
- Frequenzbereich: < 6 GHz, Leistung: <1mW





Strokefinder MD100
Medfield Diagnostics AB

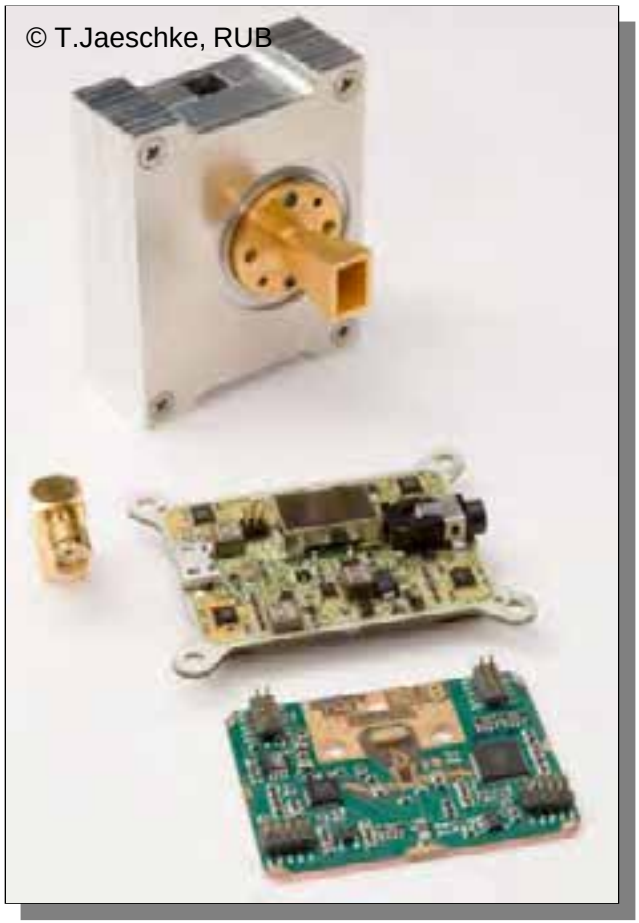


Übersicht

- Vorstellung
- Motivation – Notwendigkeit hoher Frequenzen für 5G
- **Etablierte, messtechnische Nutzung**
  - Industrielle und zivile Radartechnik
  - Plasmatechnik
  - Medizintechnik
  - mmW-Messtechnik
- Zusammenfassung

mmW Messtechnik

Integrierte Radargeräte – Hohe Frequenzen, extreme Bandbreiten



Eigenschaften

- FMCW-Betrieb
- Frequenzbereiche: 68..93 GHz,180..240 GHz
- Messzeit < 800 µs
- Leistung: < 100µW
- Auflösung: bis zu 2,5 mm
- Genauigkeit: <70 nm

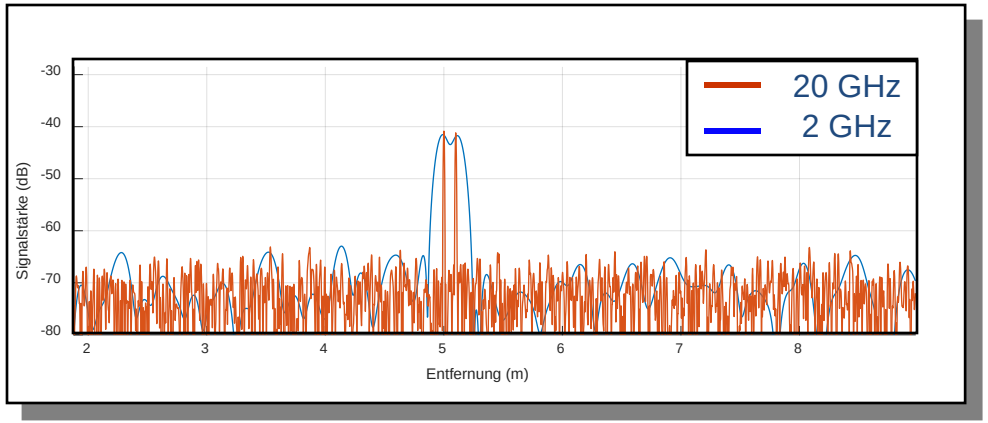
mmW Messtechnik

Integrierte Radargeräte – Hohe Frequenzen, extreme Bandbreiten

Absolute Bandbreite hat Einfluss auf:

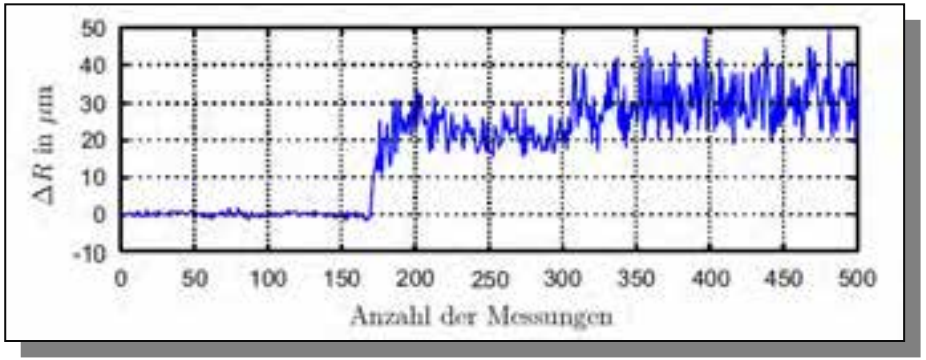
1) Auflösung

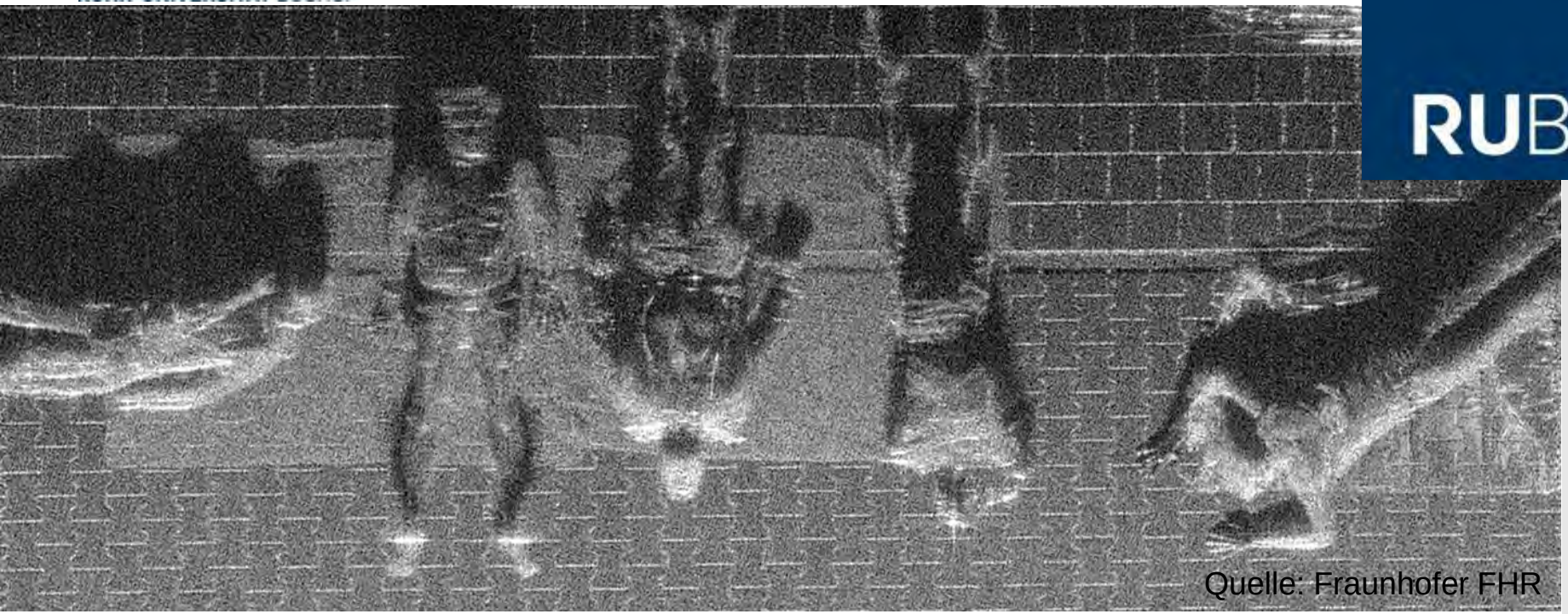
$$\Delta R_r = \frac{c \cdot k}{2 \cdot B}$$



2) Messgenauigkeit

$$\sigma_{cr} = \frac{c}{4\,\pi \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{1}{SNR} \cdot \left(1 + \frac{1}{SNR}\right)}$$



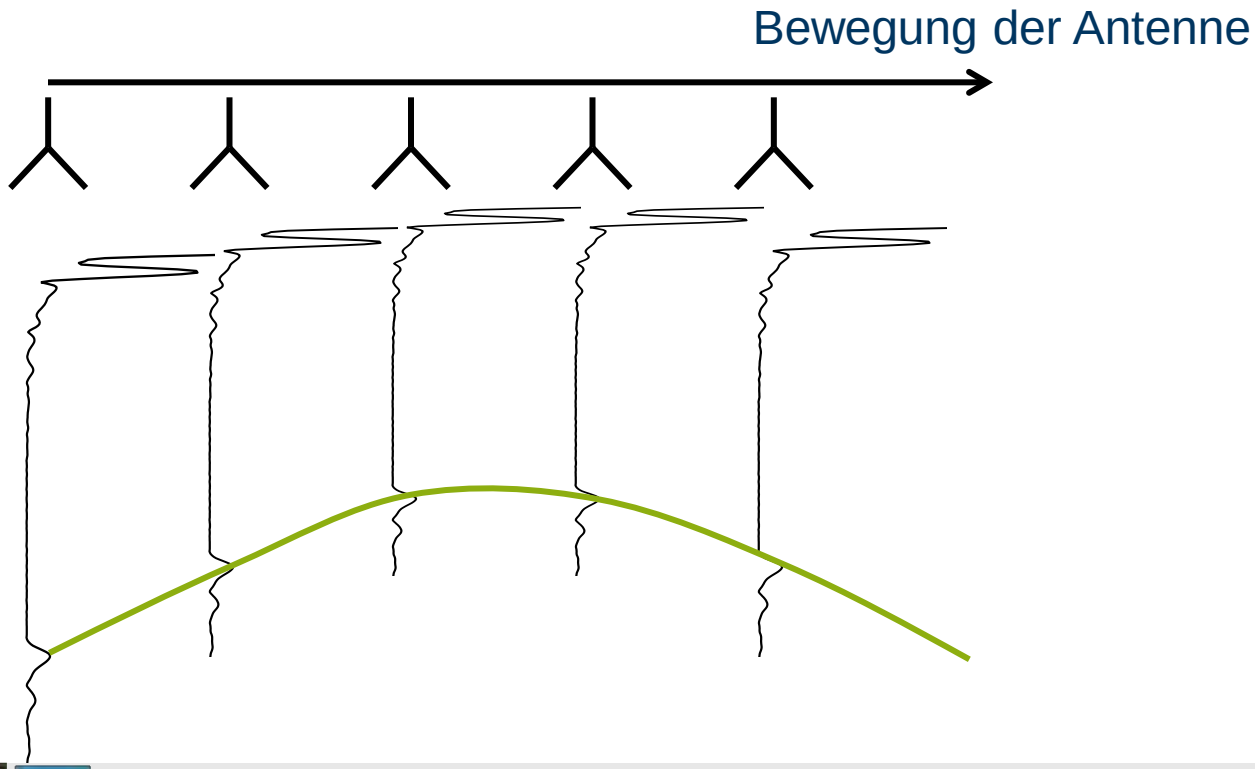


Radar Bildgebung

Moderne Radaranwendungen

Bildgebung

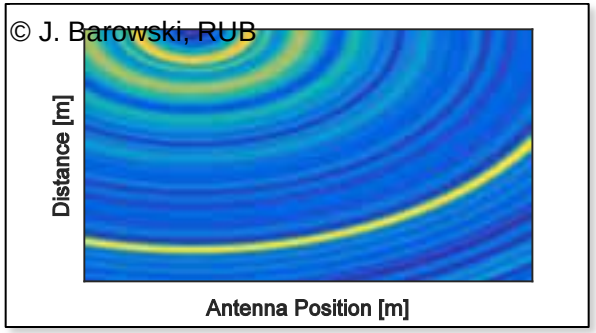
- Konstruktive Interferenz am Radarziel
- Destruktive Interferenz an allen anderen Orten

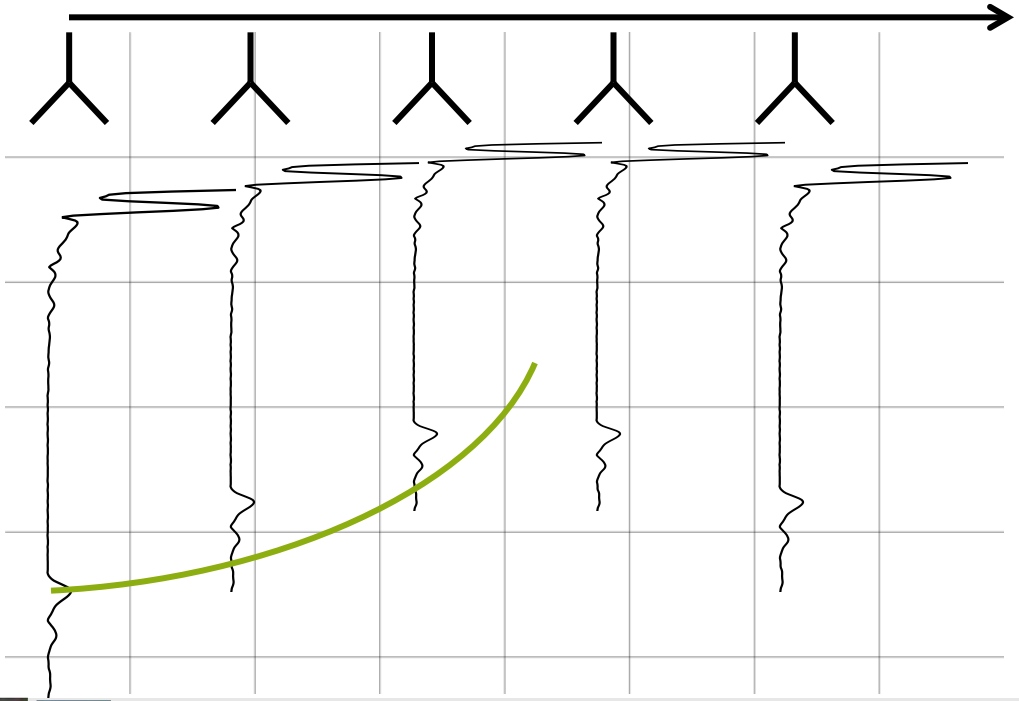


Moderne Radaranwendungen

Bildgebung

- Konstruktive Interferenz am Radarziel
- Destruktive Interferenz an allen anderen Orten

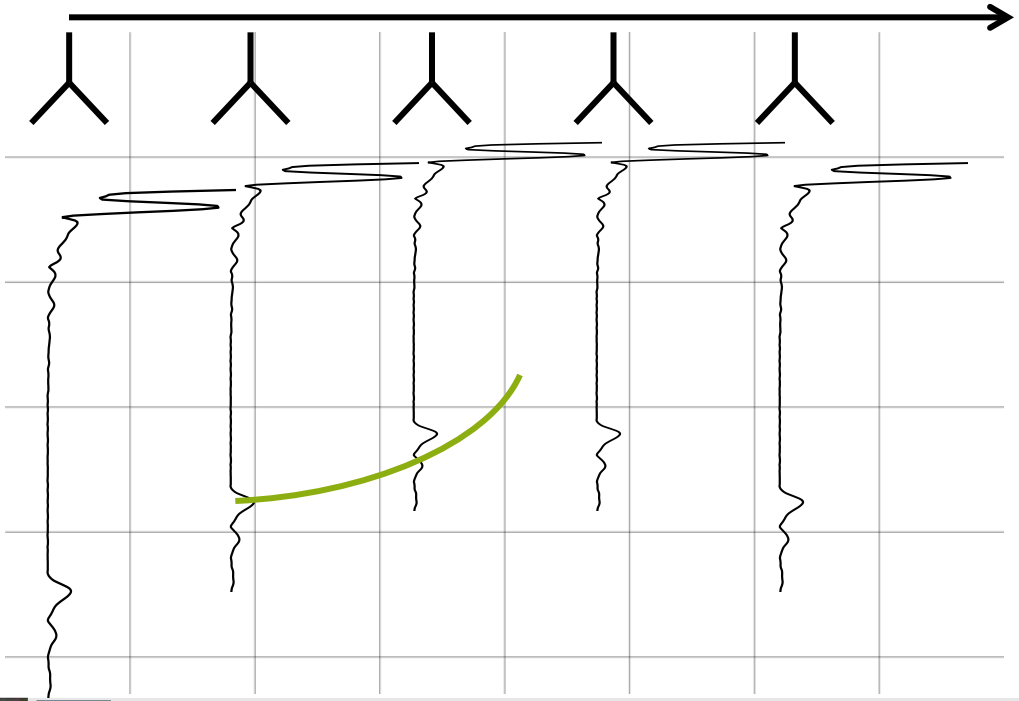


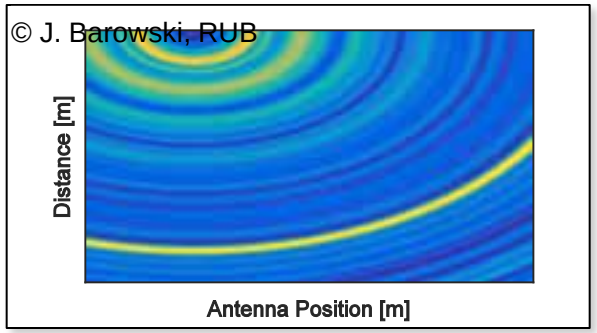


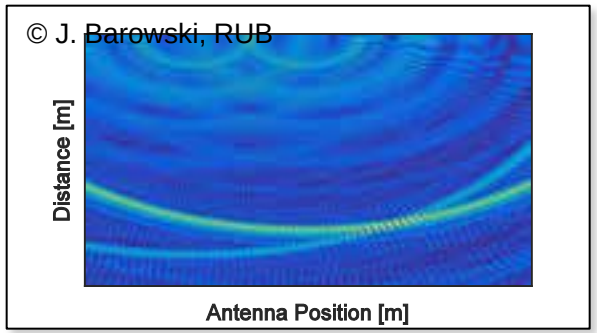
Moderne Radaranwendungen

Bildgebung

- Konstruktive Interferenz am Radarziel
- Destruktive Interferenz an allen anderen Orten



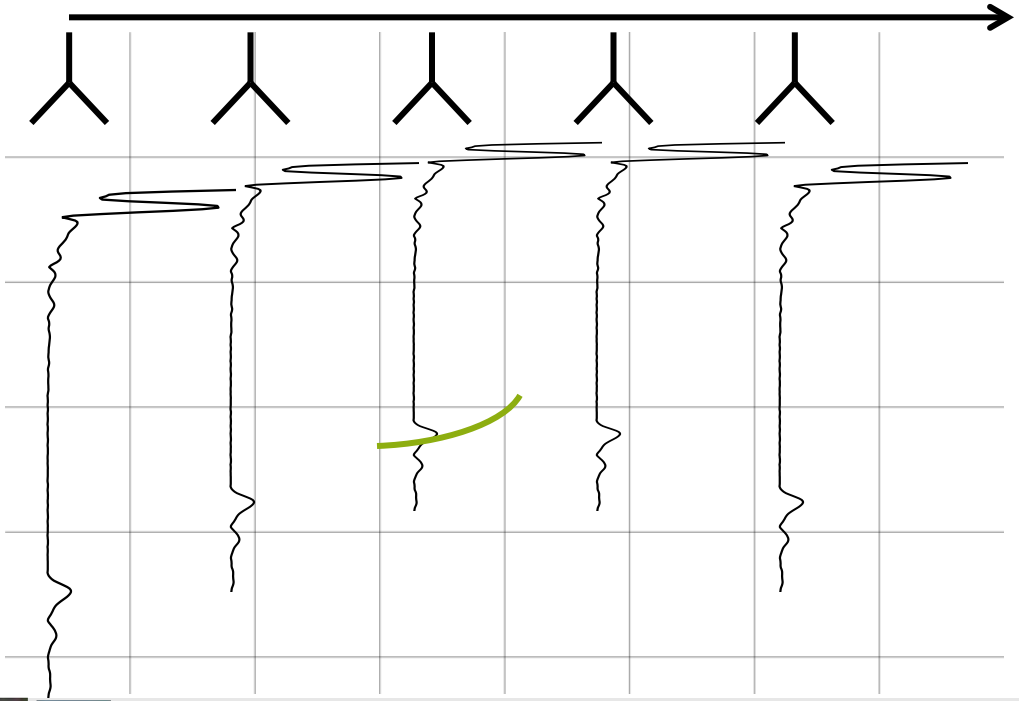


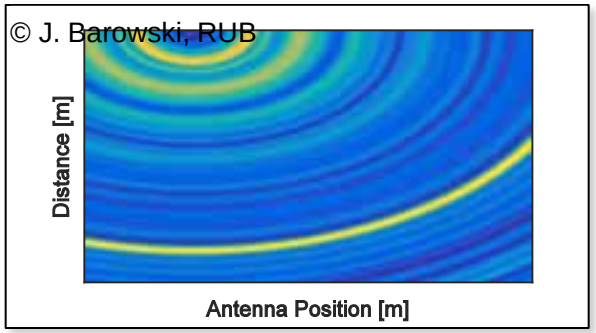


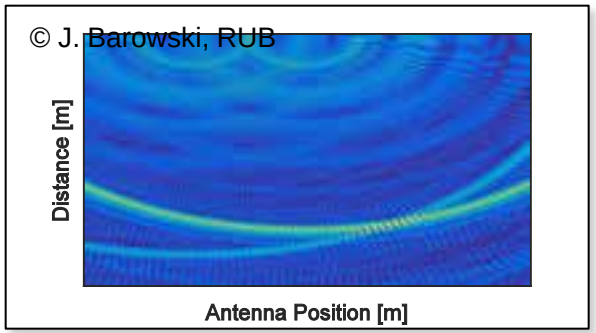
Moderne Radaranwendungen

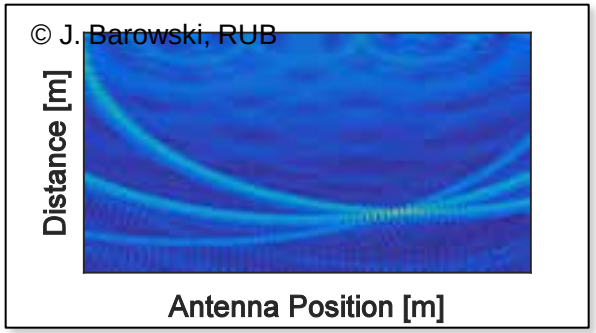
Bildgebung

- Konstruktive Interferenz am Radarziel
- Destruktive Interferenz an allen anderen Orten





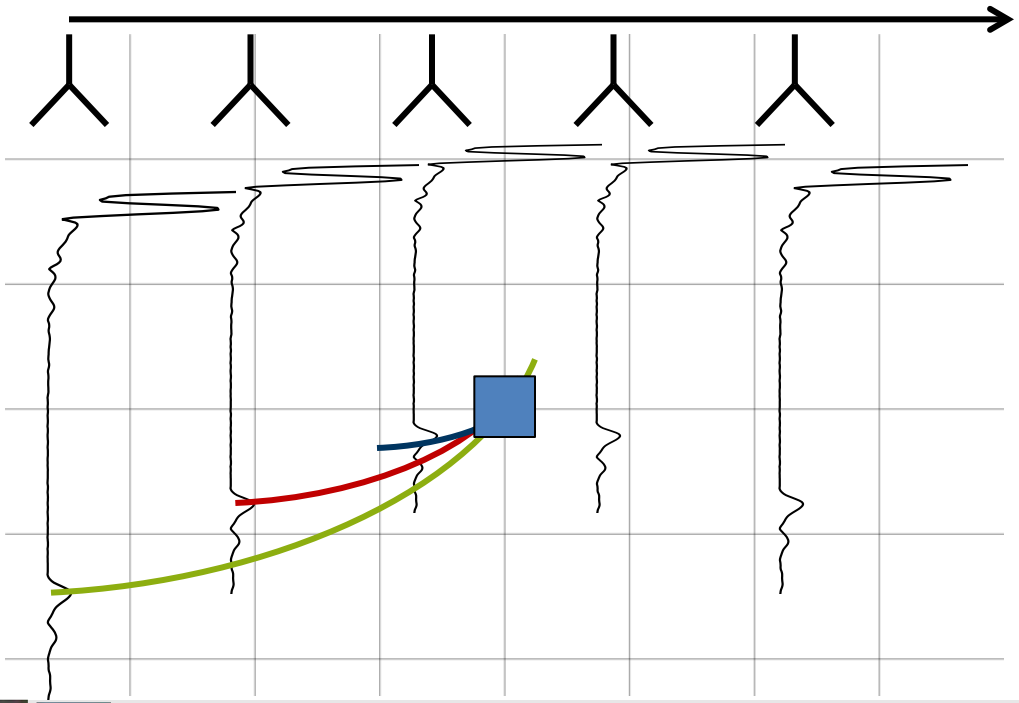


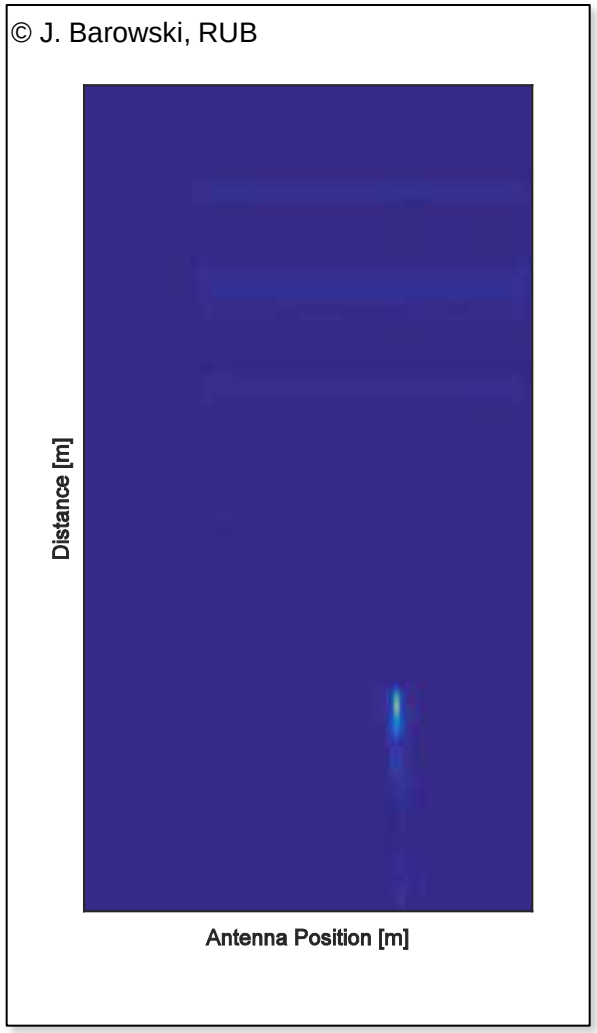


Moderne Radaranwendungen

Bildgebung

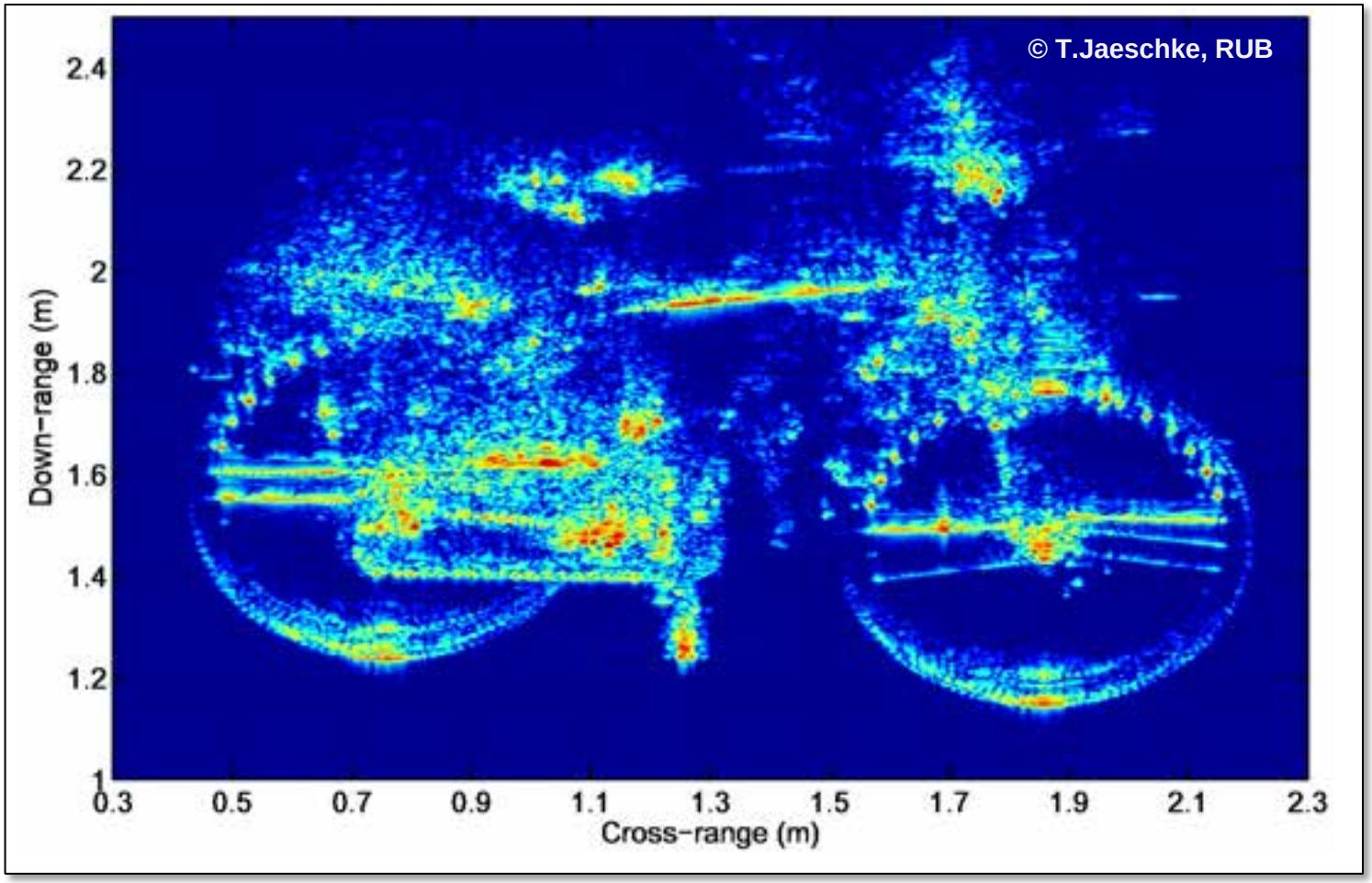
- Konstruktive Interferenz am Radarziel
- Destruktive Interferenz an allen anderen Orten





Moderne Radaranwendungen

Bildgebung

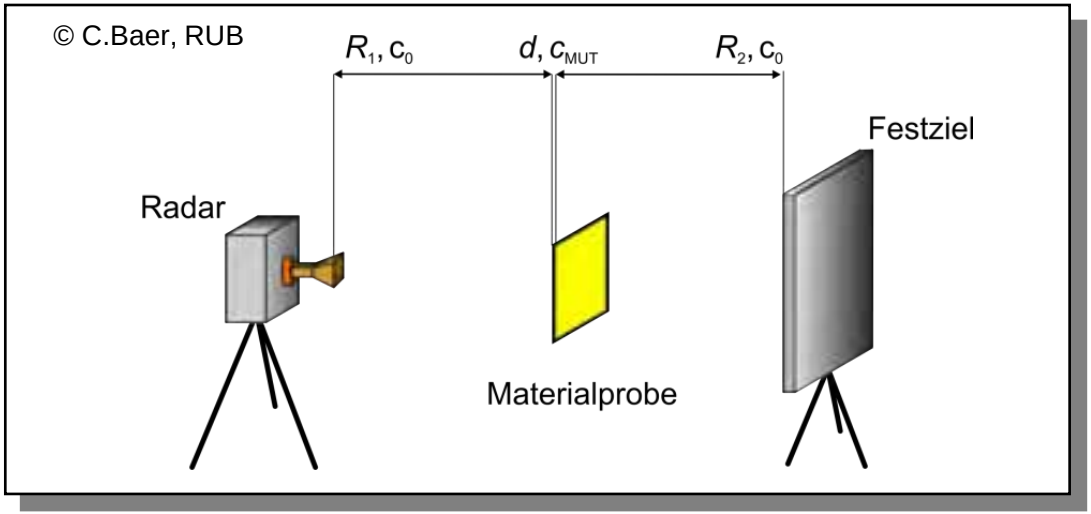


Timo Jaeschke et al, „ A SiGe-Chip based 80 GHz FMCW-radar system with 25 GHz bandwidth for high resolution imaging“, 14th International Radar Symposium 2013

mmW Messtechnik

Radarfestzielmessung

- Statischer Radaraufbau ermöglicht Präzision im Nanometerbereich
- Durch Auswertung der virtuellen Distanz sind Aussagen über Materialien und physikalische Größen möglich
- Charakteristische Permittivität des Materials verlangsamt Ausbreitung
- Messung der Entfernungshistorie



mmW-Radar Festzielmessung

Höchste Präzision – Mischmaterialmessung

Untersuchung des Einflusses auf die Laufzeit der Mikrowelle

- Abstandsmessung mit Auflösung im nm-Bereich

mmW-Radar Festzielmessung

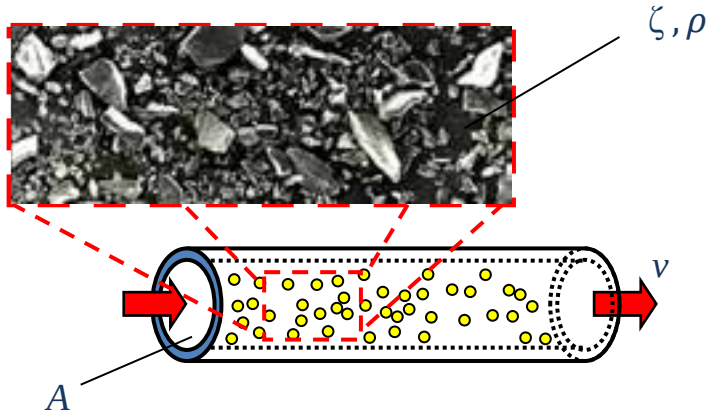
Höchste Präzision – Mischmaterialmessung

Anwendung

Pneumatischer Transport von Schüttgütern:

- Lebensmittel (Getreide, Mehl, Reis, etc.)
- Kohlenstaub
- Baumaterialien (Sand, Kreide, etc.)

Messgröße



Massendurchfluß

$$\dot{m} = v \cdot A \cdot \zeta \cdot \rho$$

Notwendige Parameter:

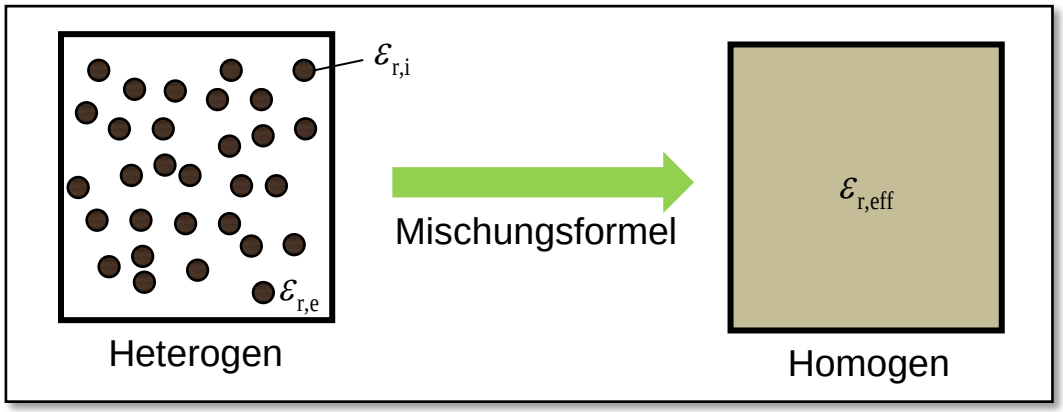
- Volumenanteil des Schüttguts
- Fließgeschwindigkeit

mmW-Radar Festzielmessung

Eigenschaften von dielektrischen Mischmaterialien:

- Quasi-homogenes Material mit einer effektiven Permittivität $\varepsilon_{\mathrm{r,eff}}$
- $\varepsilon_{\mathrm{r,eff}}$ hängt von den Einzelpermittivitäten und dem Volumenanteil ab
- Mischungsformeln ermöglichen eine homogenisierte Beschreibung
- Formel nach Maxwell-Garnett

$$\varepsilon_{\mathrm{r,eff}} = \varepsilon_{\mathrm{r,e}} + 3 \cdot \zeta \cdot \varepsilon_{\mathrm{r,e}} \cdot \frac{\left(\varepsilon_{\mathrm{r,i}} - \varepsilon_{\mathrm{r,e}}\right)}{\varepsilon_{\mathrm{r,i}} + 2 \cdot \varepsilon_{\mathrm{r,e}} - \zeta \cdot \left(\varepsilon_{\mathrm{r,i}} - \varepsilon_{\mathrm{r,e}}\right)}$$

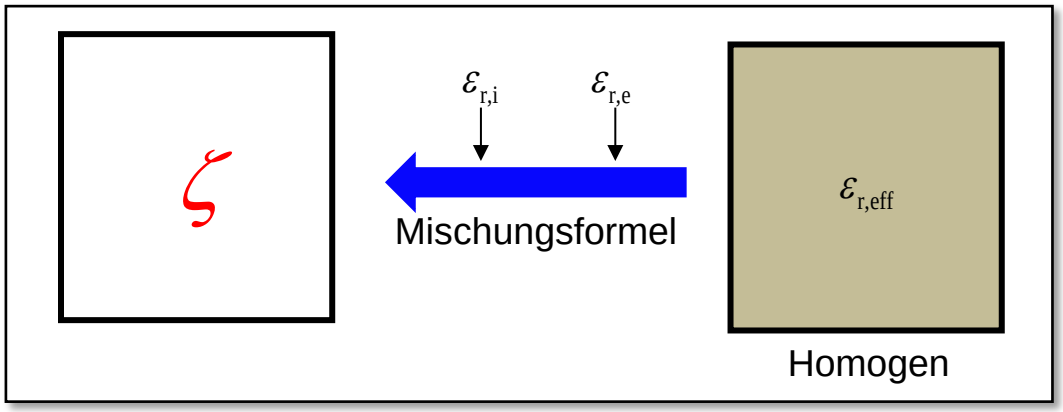


mmW-Radar Festzielmessung

Eigenschaften von dielektrischen Mischmaterialien:

- Quasi-homogenes Material mit einer effektiven Permittivität $\varepsilon_{r,eff}$
- $\varepsilon_{r,eff}$ hängt von den Einzelpermittivitäten und dem Volumenanteil ab
- Mischungsformeln ermöglichen eine homogenisierte Beschreibung
- Formel nach Maxwell-Garnett

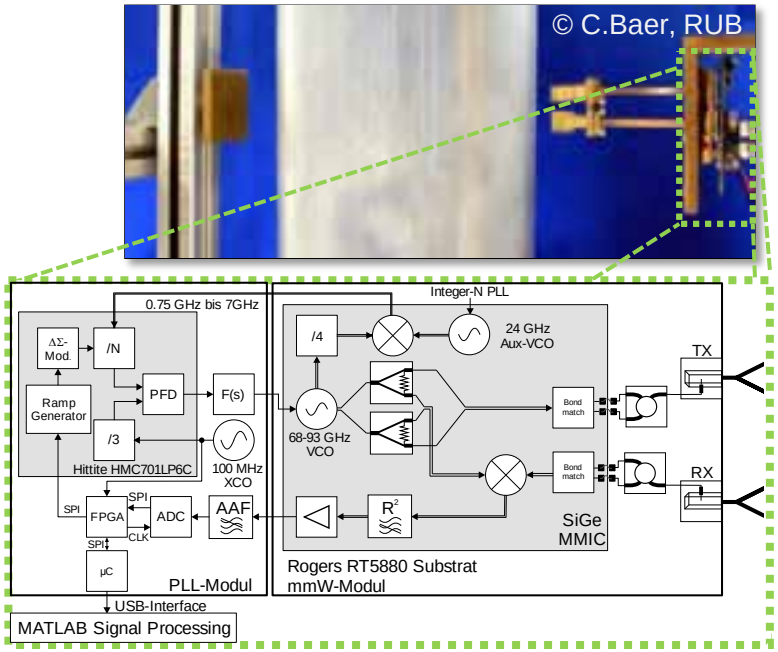
$$\varepsilon_{r,eff} = \varepsilon_{r,e} + 3 \cdot \zeta \cdot \varepsilon_{r,e} \cdot \frac{\left(\varepsilon_{r,i} - \varepsilon_{r,e}\right)}{\varepsilon_{r,i} + 2 \cdot \varepsilon_{r,e} - \zeta \cdot \left(\varepsilon_{r,i} - \varepsilon_{r,e}\right)}$$



mmW-Radar Festzielmessung

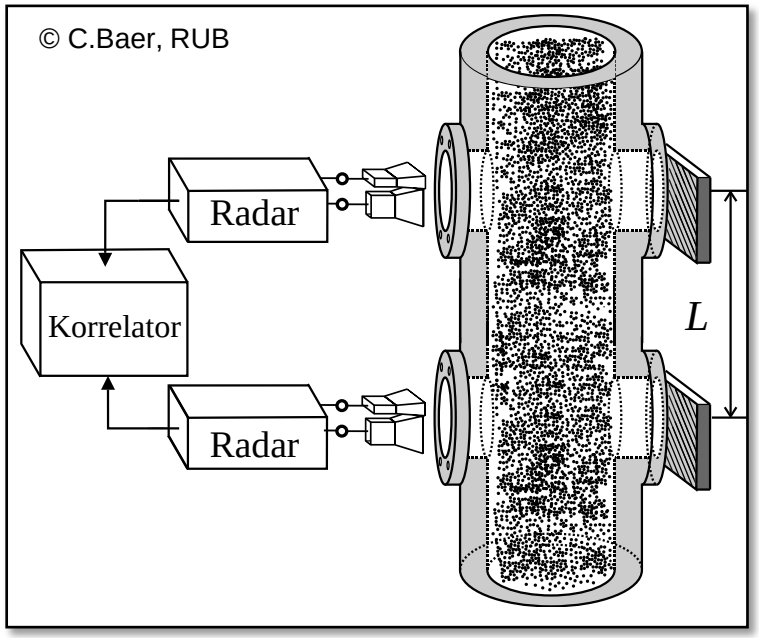
Höchste Präzision – Mischmaterialmessung

Volumenanteil



- Festzielmessung zur Bestimmung der effektiven Permittivität
- Volumenanteilsbestimmung durch spezielle Materialmodelle

Geschwindigkeit

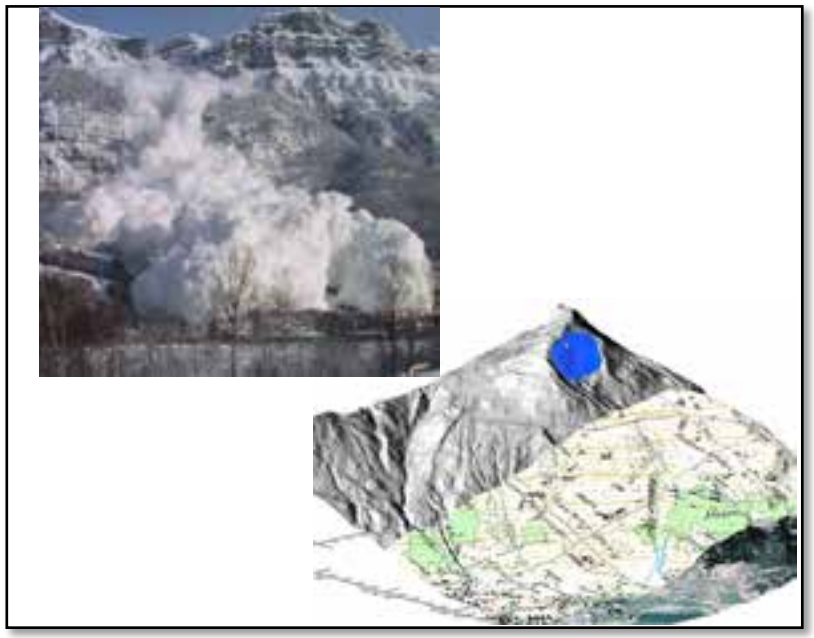


- Keine Dopplermessung möglich
- Tubulenter Fluss ermöglicht korrelationsbasierte Messung

Moderne Radaranwendungen

Lawinenforschung

Lawinenmodellierung und Simulation



- Modellierung und Simulation von Lawinen für Verständnis und Voraussage
- Internationale Projektpartner

SLF
Davos, CH

Institut für
Naturgefahren
Innsbruck, A

Parameter Extraktion

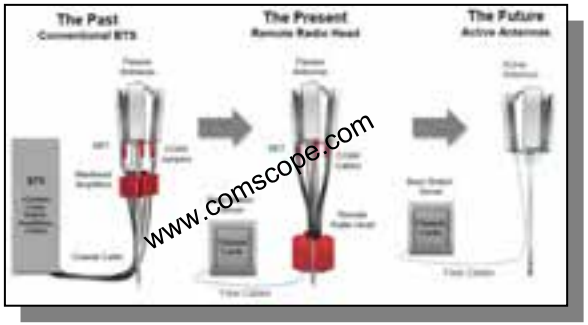
- Fehlender Parameter: Schneestaubdichte
- Radarbasiertes Setup
- Testmast in Vallée de la Sionne, 23 m Höhe, 2 Radarsensoren in 7 u. 8m
- Extreme Anforderungen durch in-situ Messung der Lawine

Übersicht

- Vorstellung
- Motivation – Notwendigkeit hoher Frequenzen für 5G
- Etablierte, messtechnische Nutzung
    - Industrielle und zivile Radartechnik
    - Plasmatechnik
    - Medizintechnik
    - mmW-Messtechnik
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

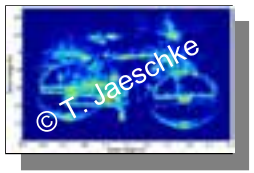
Notwendigkeit von 5G

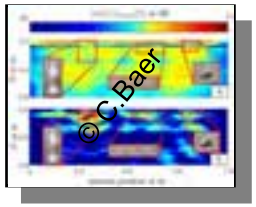


- Datenverbrauch wird exponentiell steigen
- Für bezahlbares mobiles Internet bedarf es
    - Energissparende Lösungen
    - Höhere Bandreiten -> Höhere Frequenzen

Mikro- und Millimeterwellen in der Messtechnik

- Universelles Mittel für berührungslose Messverfahren in
    - Industrie
    - Medizin
    - Humanitärer Hilfe
    - Grundlagenforschung





RUB

Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!