



we are the wave –  
excellence in high frequency

# Neue Generation von berührungs- losen Feuchtesensoren

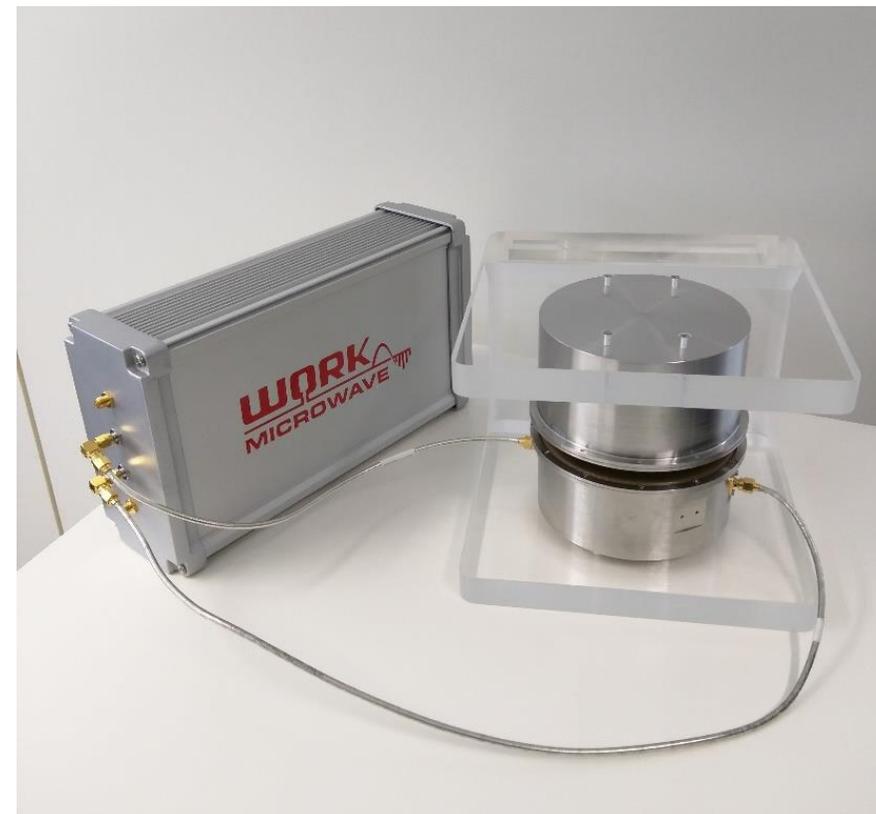
Dr.-Ing. Wolfgang Akstaller

Copyright © 2019 by WORK Microwave GmbH

No part of this publication may be reproduced, stored  
in a retrieval system, or transmitted in any form or by  
any means — electronic, mechanical, photocopying,  
recording, or otherwise — without the permission of  
WORK Microwave GmbH.

# Überblick

- Motivation
- Neue Generation des Feuchtesensors
- Blockschaltbild HF-Signalpfad
- Vorteile des neuen Konzepts
- Mikrowellenresonanzmethode
- Detektion der Resonanzfrequenz
- Messsystem für breite Warenbahnen
- Mikrowellentransmissionsmethode
- Zusammenfassung und Ausblick



# Motivation

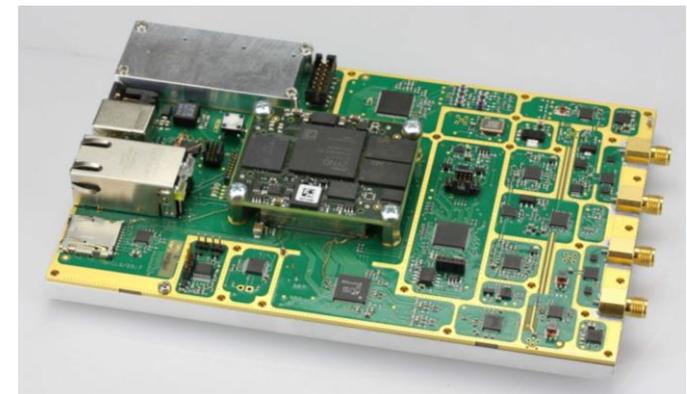
- Neu- und Weiterentwicklung eines berührungslosen Feuchtesensors
- Kunde aus der Papierindustrie
- Ersatz des Messsystems von Lorentzen & Wettre
- Messkonzept
  - Wasser mit relativ hoher Permittivität
  - Einbringen der feuchten Ware in einen Sensor
  - Verstimmung eines Hohlraumresonators
  - Rückschluss auf den absoluten Wassergehalt des Probenvolumens

# Motivation

- Ansatz Resonanzfrequenzbestimmung Lorentzen & Wettre
  - Durchstimmbare Hochfrequenzquelle
  - Detektorschaltung zur Messung der absoluten Amplitude
  - Analoge Auswertung des differenzierten Signalverlaufs
  - Resonanzfrequenz liegt am Nulldurchgang
- Hoher Aufwand in der analogen Schaltungstechnik, damals State-of-the-Art
- Spezielles Design des Resonators notwendig

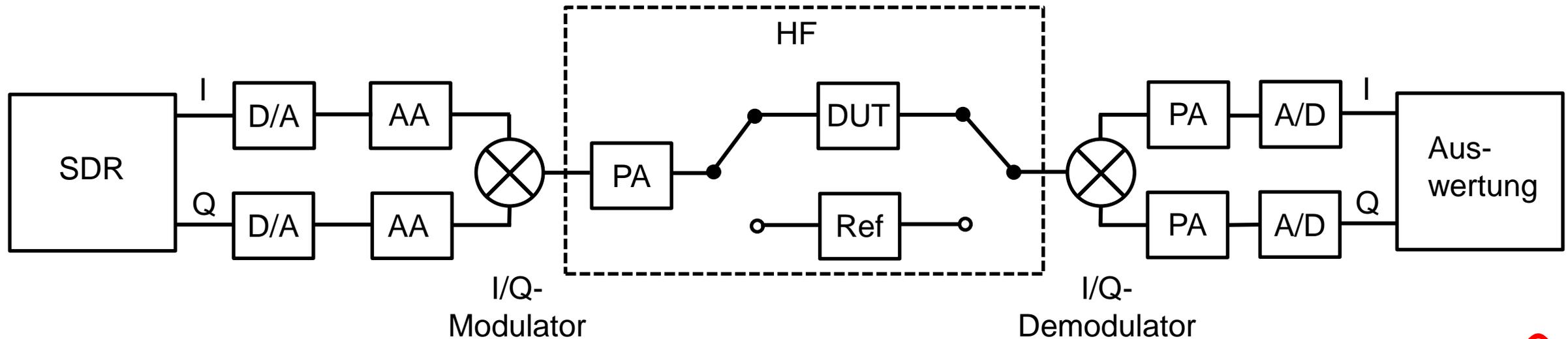
# Neue Generation des Feuchtesensors

- Einsatz von moderner Messelektronik statt einfacher Detektoren
  - FPGA-basierte digitale Frequenzerzeugung → Direct Digital Synthesis (DDS)
  - Variabler Frequenzbereich
  - Normierung auf Referenzleitung → Vektorieller Netzwerkanalysator
  - Variable Signalverstärkung
- System-on-Chip für Digitalteil → Datenverarbeitung direkt auf Sensorelektronik
- Komplette softwarekonfigurierbar
- Automatisierte Steuerung durch Messprogramm
- Viele Freiheitsgrade für verbesserte Auswertung



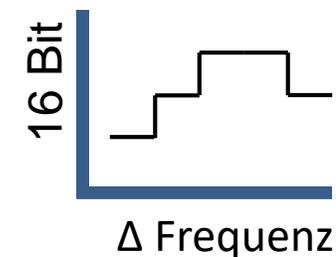
# Blockschaltbild HF-Signalfad

- Erzeugung von Sinus und Cosinus im FPGA → Software Defined Radio (SDR)
- Digital-Analog-Umsetzer und Anti-Aliasing Filter (Tiefpass)
- Ausgabe auf I/Q-Modulator → Hochfrequenz Signal
- Mess- und Referenzpfad
- I/Q-Demodulator, Verstärker, Analog-Digital-Umsetzer und Auswertung



# Vorteile des neuen Konzepts

- Extrem hohe Genauigkeit:
  - Extrem hohe Frequenzauflösung durch DDS mit 512 Punkten
  - Hohe Messdynamik durch 16 Bit Amplitudenauflösung
- Sehr hohe Messgeschwindigkeit:
  - Bis zu 500 Sweeps pro Sekunde über 50 MHz Bandbreite
- Fehlerkorrektur und –toleranz:
  - Direkte Auswertung ermöglicht effiziente Messfehlerkorrektur
  - Gute Fehlererkennung durch kompletten Frequenzsweep über Resonanzbereich

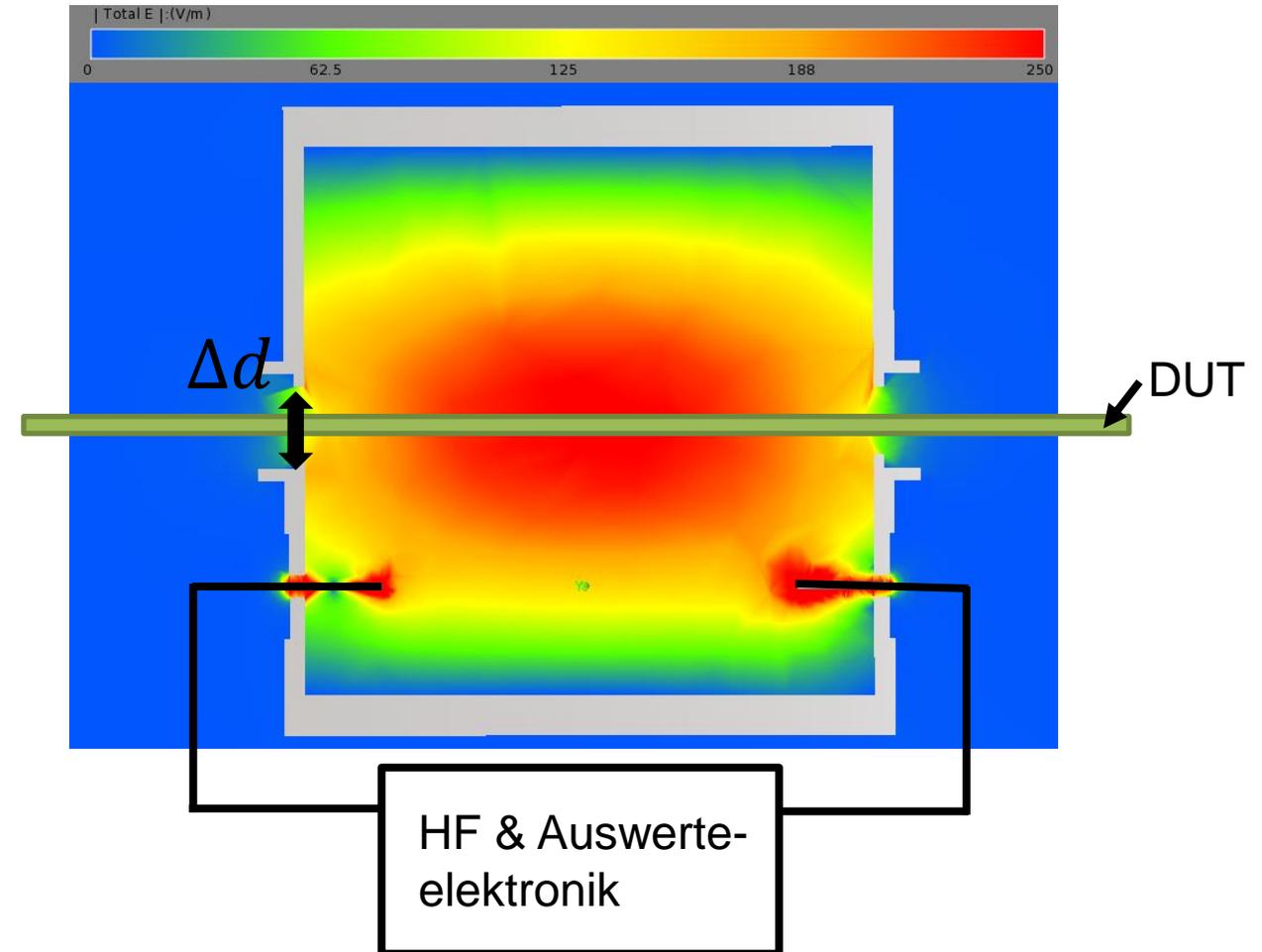


DDS: Direct  
Digital Synthesis



# Mikrowellenresonanzmethode

- Geteilter Hohlraumresonator
- Aktiver und passiver Teil liegen sich gegenüber
- Messobjekt beeinflusst das elektrische Verhalten
  - Verstimmung der Resonanzfrequenz
  - Dämpfung
- Luftspalt  $\Delta d = 13 \text{ mm}$
- Geeignet für Materialbahnen



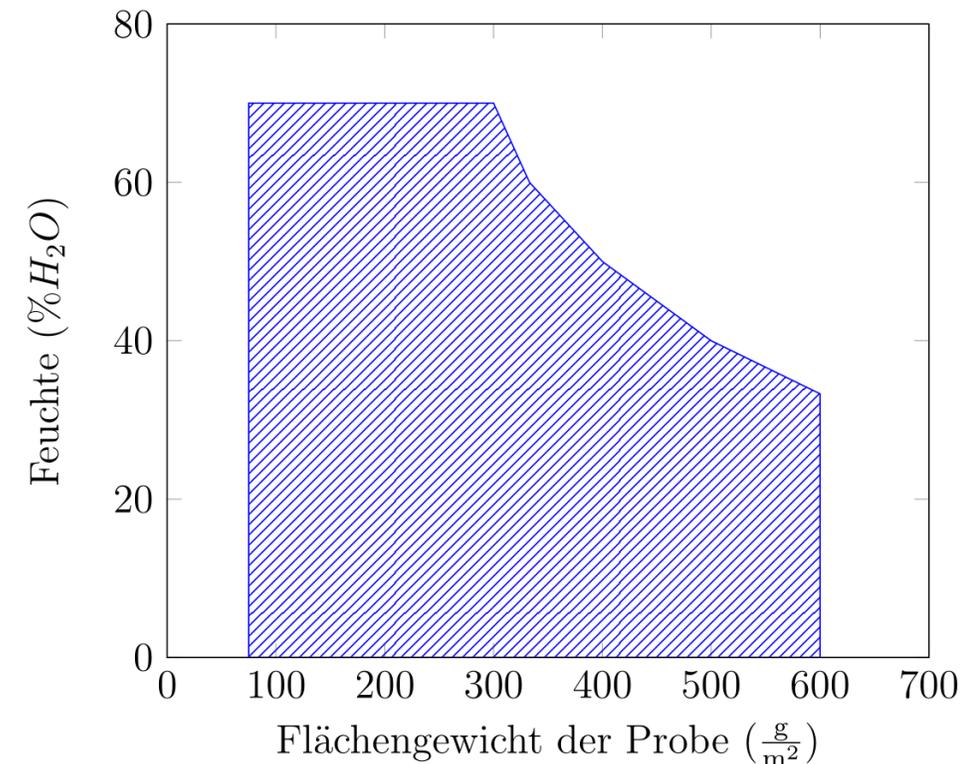
# Mikrowellenresonanzmethode

## Vorläufige Spezifikation

- Untere Grenze des Flächengewichts  $75 \text{ g/m}^2$
- Obere Grenze des Flächengewichts  $600 \text{ g/m}^2$
- Messung der Feuchte bis zu 70 %
- Messbereich des Wassergehalts bis  $200 \text{ g/m}^2$
- Auflösung der Feuchte 0,1 %

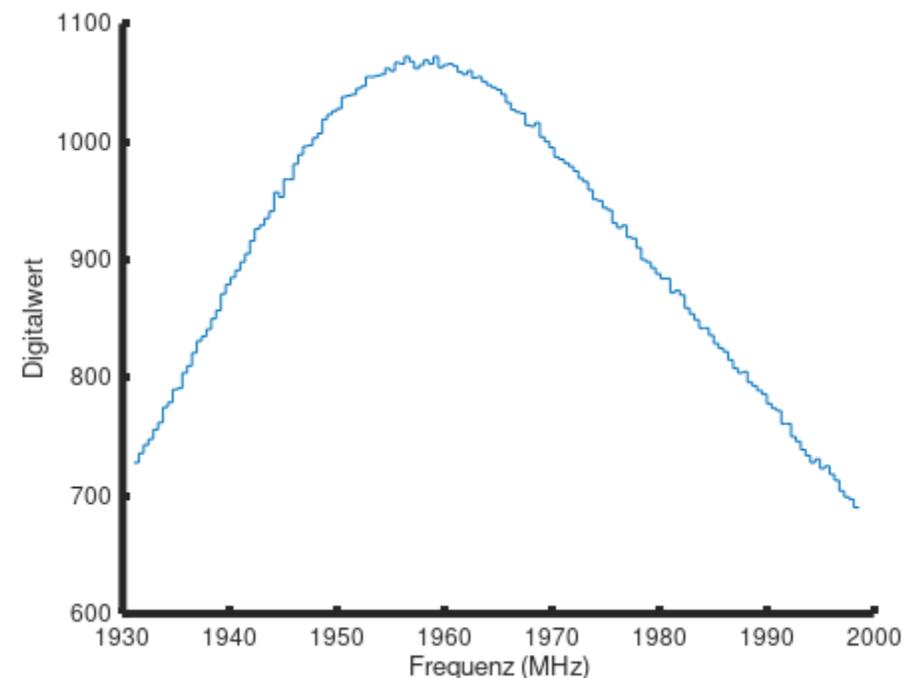
Labormessung einer Probe mit Feuchte  $< 10 \%$  und leichtem Material

- Erzielbare Auflösung des Wassergehalts bis zu  $15 \text{ mg/m}^2$  bei Material mit  $75 \text{ g/m}^2$
- Entspricht einer Auflösung der Feuchte von 0,02 %



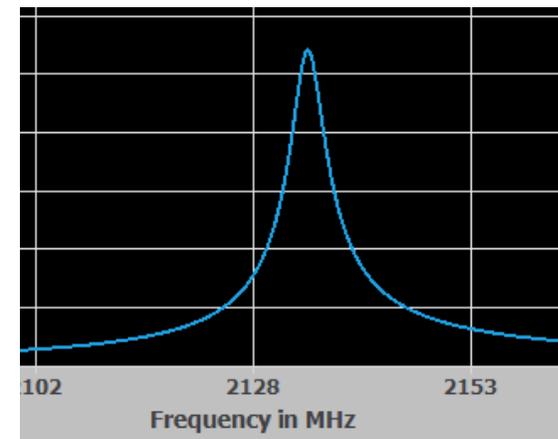
# Detektion der Resonanzfrequenz

- Sweep über eine Resonanz bei hoher Belastung
- Amplitudenrauschen
- Diskrete Frequenzpunkte
- Einfache Auswertung des Maximums kann zu einer Abweichung führen
- Besonders kritisch bei geringer Amplitude bzw. starkem Rauschen
- Mögliche Ansätze zur Verbesserung:
  - Mittelwertbildung aus mehreren Messungen
  - Näherung an bekannte Funktion durch Ansatz kleinster Fehlerquadrate



# Detektion der Resonanzfrequenz

- Auswertung der Übertragungsfunktion des Resonators
- Quadratische Näherung der Amplitudenform um das Maximum
- Ergibt in der Regel ein überbestimmtes Gleichungssystem (3 Variablen, n Messpunkte) → keine direkte Lösung
- Lösung durch Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate
- Resultat:
  - Approximation der Kurvengleichung
  - Resonanzfrequenz
  - Amplitude
  - Kurvenform, Güte

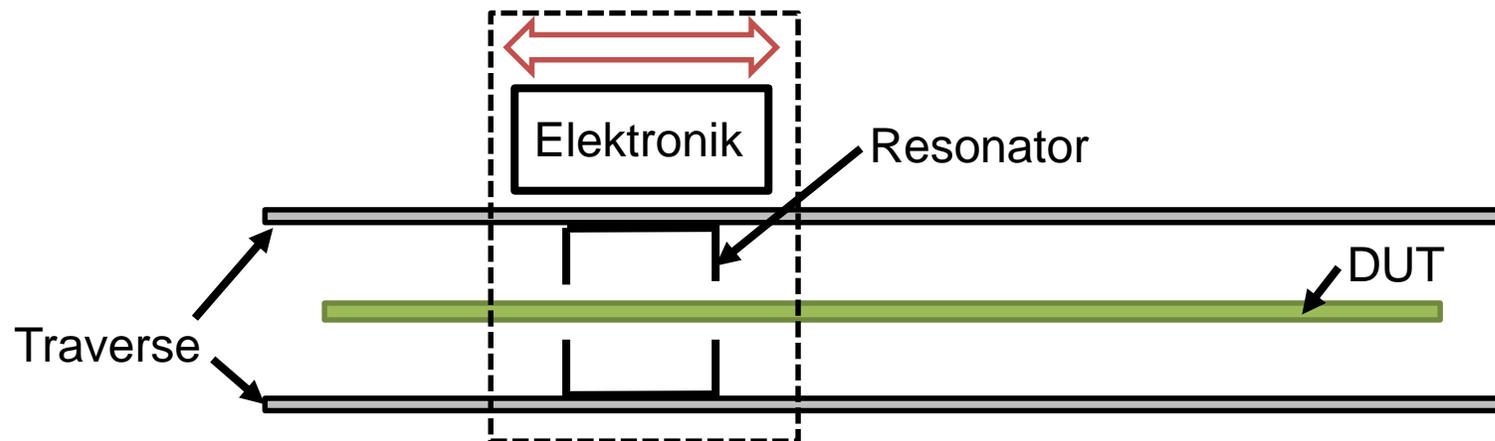


➔ Ermöglicht durch digitalen Ansatz!



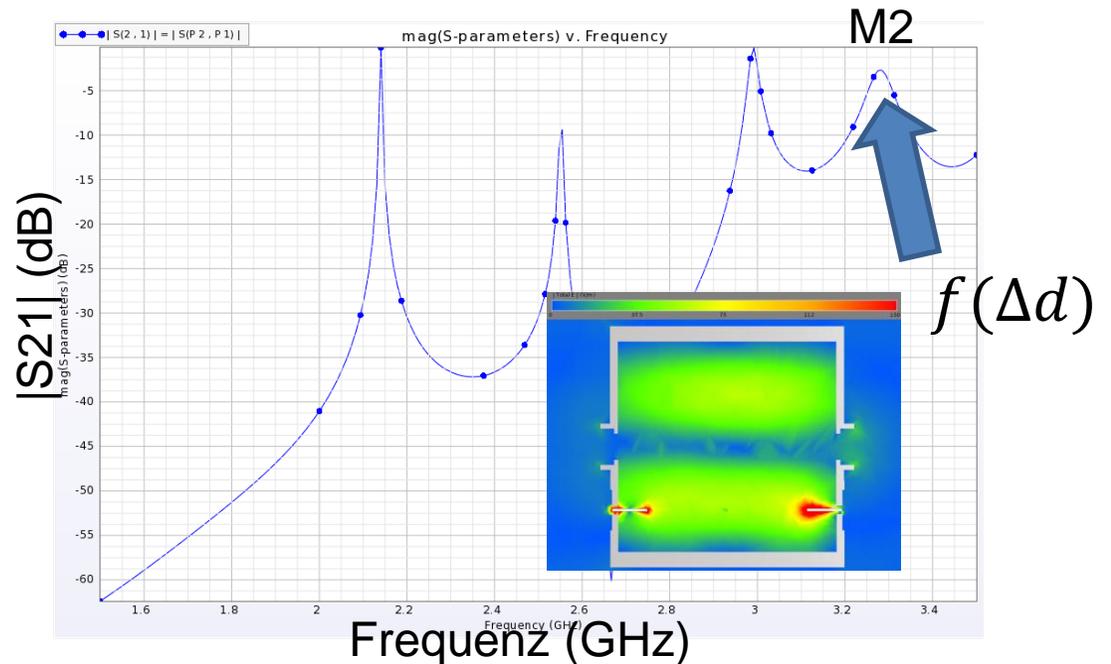
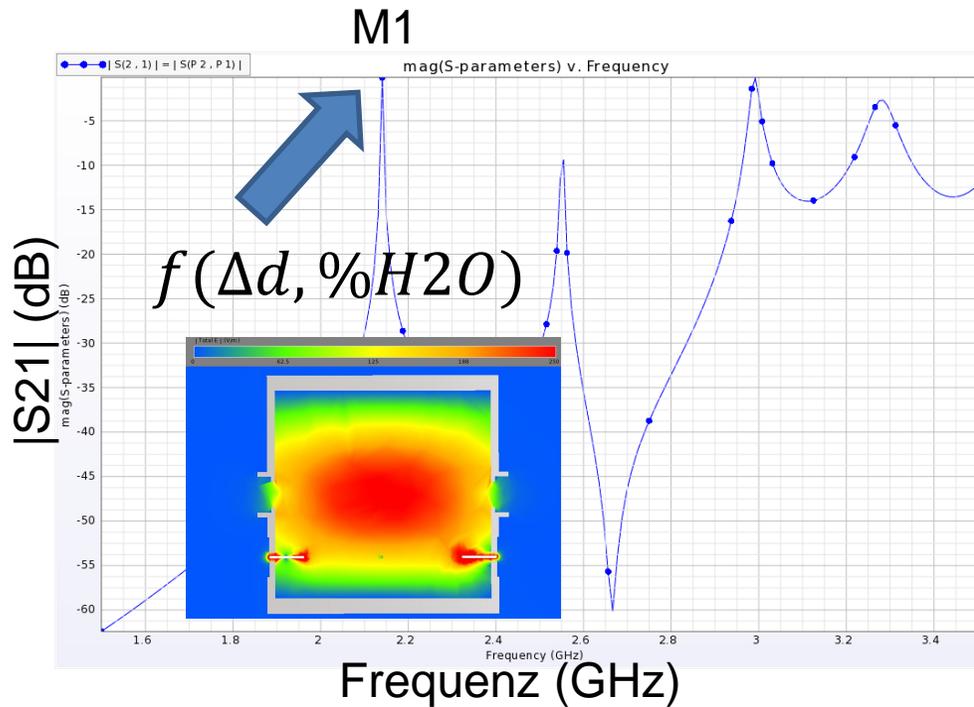
# Messsystem für breite Warenbahnen

- Oftmals mehrere Meter breite Warenbahnen
- Messbreite des Sensors circa 10 cm
- Zur Messung über die gesamte Breite: Verfahren des Sensors an einer Traversen
  - Gleichlauf beider Hälften muss gewährleistet sein
  - Abstandsänderung wirkt sich auf Resonanzfrequenz aus
  - Kompensation der Messfrequenzverschiebung durch eine Referenzfrequenz möglich



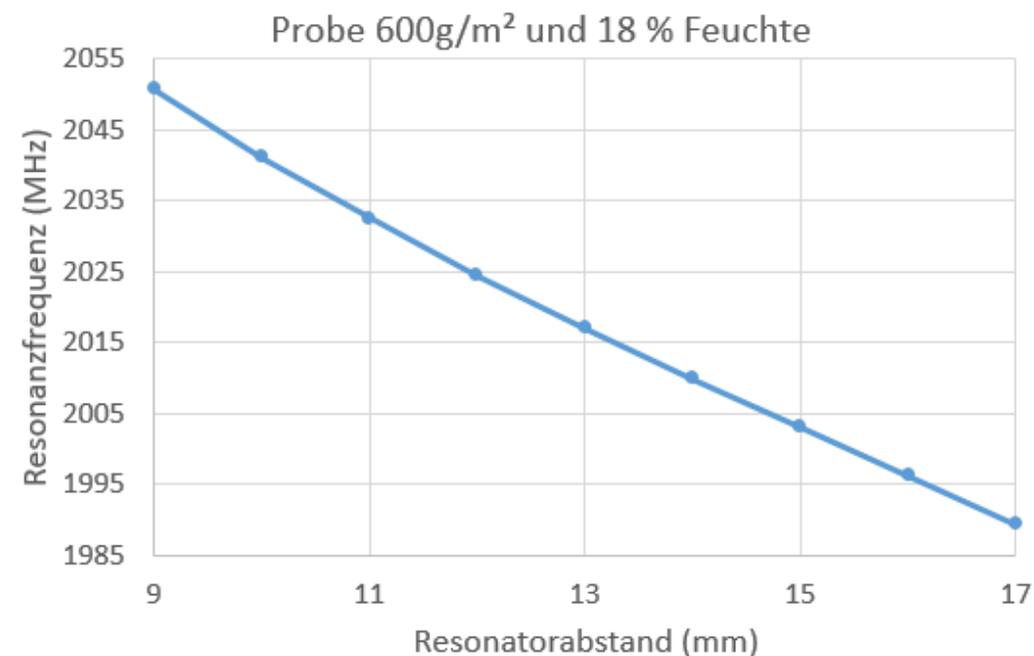
# Messsystem für breite Warenbahnen

- Abhängigkeit der Frequenz  $f$  der Grundmode (M1) vom Abstand  $\Delta d$  der beiden Resonatorhälften und vom Wassergehalt der Probe
- Höhere Mode (M2) hauptsächlich vom Abstand beider Resonatorhälften abhängig  $\rightarrow$  Referenz



# Messsystem für breite Warenbahnen

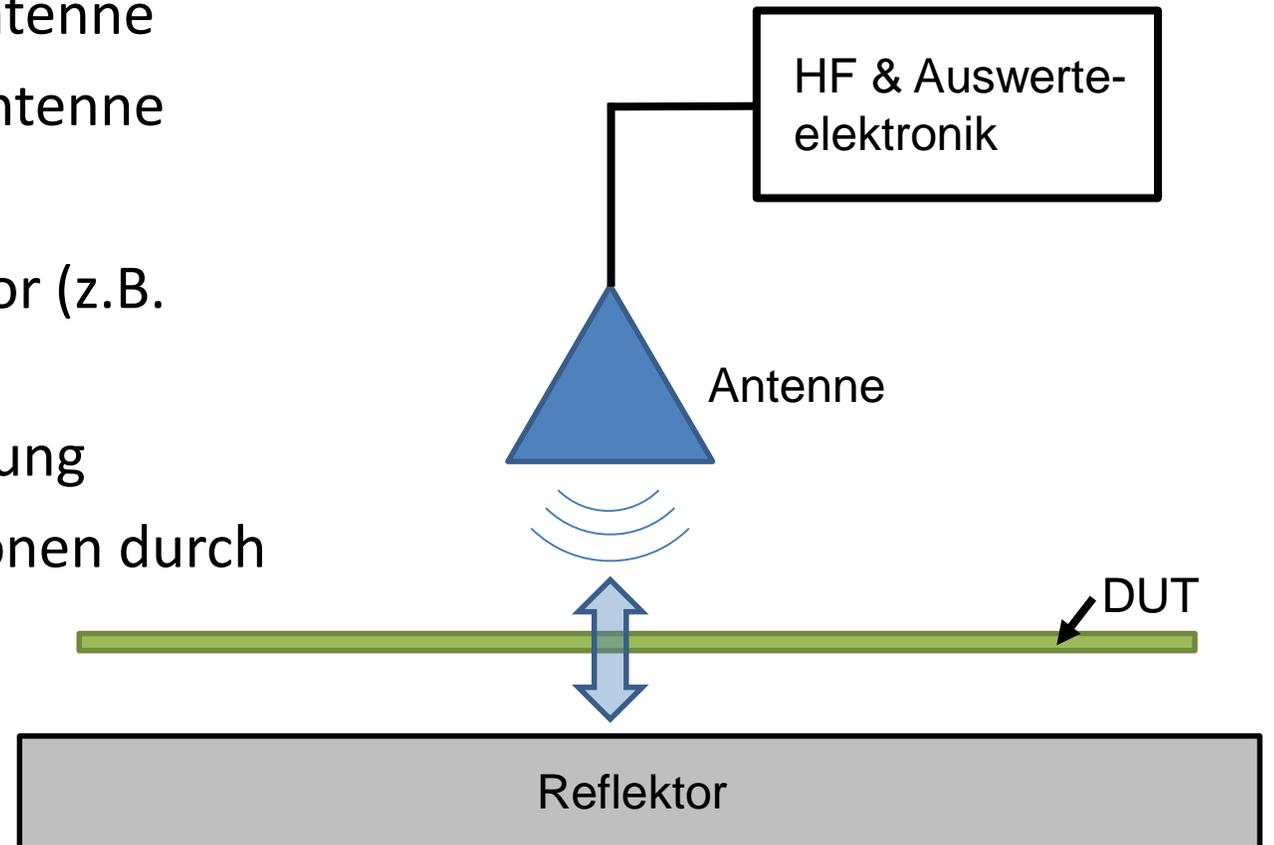
- Charakterisierung des Resonanzverhaltens bei Variation des Abstands
- Betrachtung der Grundmode und einer Oberschwingung zur Referenz
- Bestimmung des Verhaltens bei verschiedenen Feuchten der Probe
- Verwendung des charakterisierten Verhaltens zur Kompensation von Abstandsabweichung



➔ Ermöglicht durch digitalen Ansatz!

# Mikrowellentransmissionsmethode

- Erzeugung eines Frequenzsweeps
- Aussendung des Signals über eine Antenne
- Gleichzeitige Sende- und Empfangsantenne
- Signal durchdringt die Probe
- Rückstreuung des Signals am Reflektor (z.B. Metallplatte)
- Empfang über Antenne und Auswertung
- Ausblenden unerwünschter Reflektionen durch Time-Gate Verfahren



# Mikrowellentransmissionsmethode

- Technischer Ansatz des Mikrowellenresonanzsystems durch Extender erweiterbar
- Einseitige Befestigung der Antenne
- Auf Gegenseite ist ein einfacher Reflektor ausreichend (Metallplatte, metallische Wand, etc.)
- Resistent gegenüber Abstandsänderungen zur Probe
- Hoher Messabstand möglich
- Auswertung der Materialoberfläche möglich
- Auswertung der Materialbeschaffenheit (Feuchte) über gemessene Amplitude und Phase möglich

# Zusammenfassung und Ausblick

- Neu- bzw. Weiterentwicklung eines berührungslosen Feuchtesensorsystems
- FPGA-basierter Ansatz erlaubt schnelle und präzise Auswertung
- Mikrowellenresonanzmethode mit geteiltem Resonator  
→ Erhältlich ab Anfang 2020
- Mikrowellentransmissionsmethode mit Antenne und Reflektor  
→ In Entwicklung

