

# WERAN: Messung der Wechselwirkung von Windkraftanlagen mit terrestrischer Navigation/Radar

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

FKZ: 0325644A-D

**T. Schrader, J. Bredemeyer, M. Mihalachi, D. Ulm, T. Kleine-Ostmann**

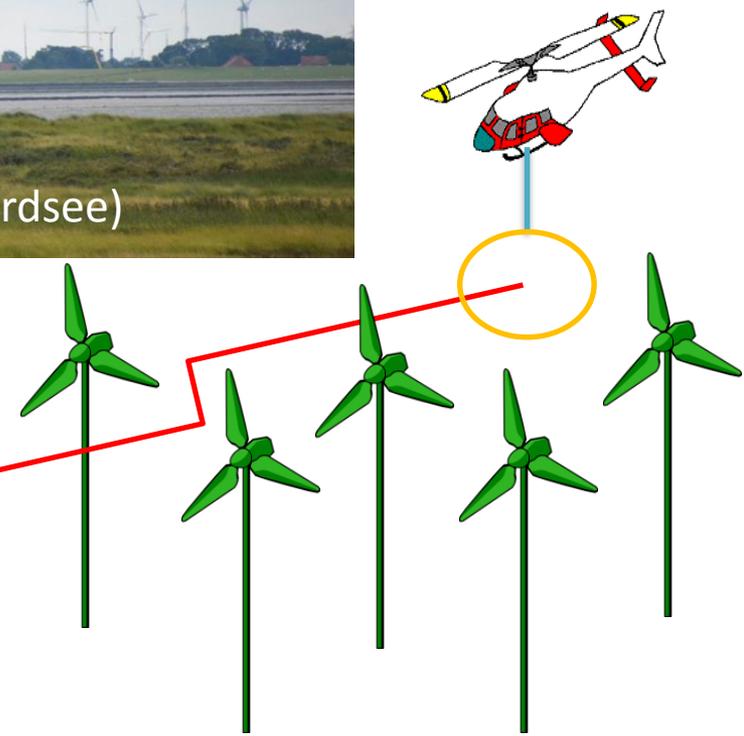
303. PTB-Seminar, 2017



# Gliederung

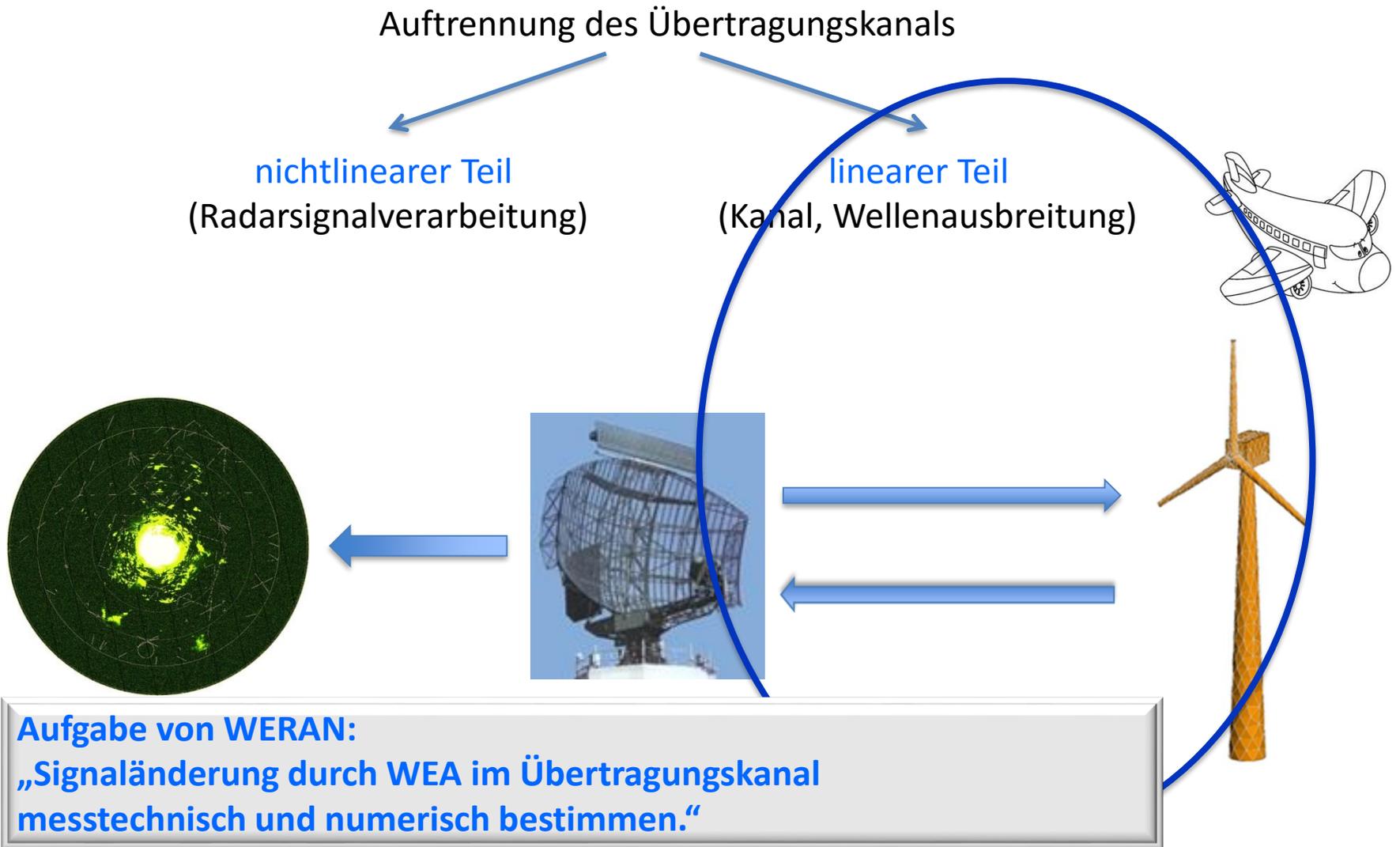
- EMV Problem und Hintergrund
- Instrumentierung von WERAN / *Unmanned aerial systems (UAS)*
- Kalibrierung und Numerische Simulation des Antennenfaktors
- Messunsicherheit
- Messergebnisse
- Ausblick

# EMV Problem und Hintergrund



**Vor-Ort-Messungen in der realen Welt notwendig**

# Wissenschaftlicher Ansatz von WERAN



# In WERAN zu untersuchende Anlagen

Ungerichtetes Funkfeuer (NDB) und seine Peilung (ADF)

500 kHz

2016 Gerichtetes Funkfeuer der zivilen Flugsicherung (CVOR, DVOR)

112 MHz

Flughafenüberwachungsradar (ASR)

2,7 GHz

2017

Luftverteidigungsradar (LVR)

einige GHz

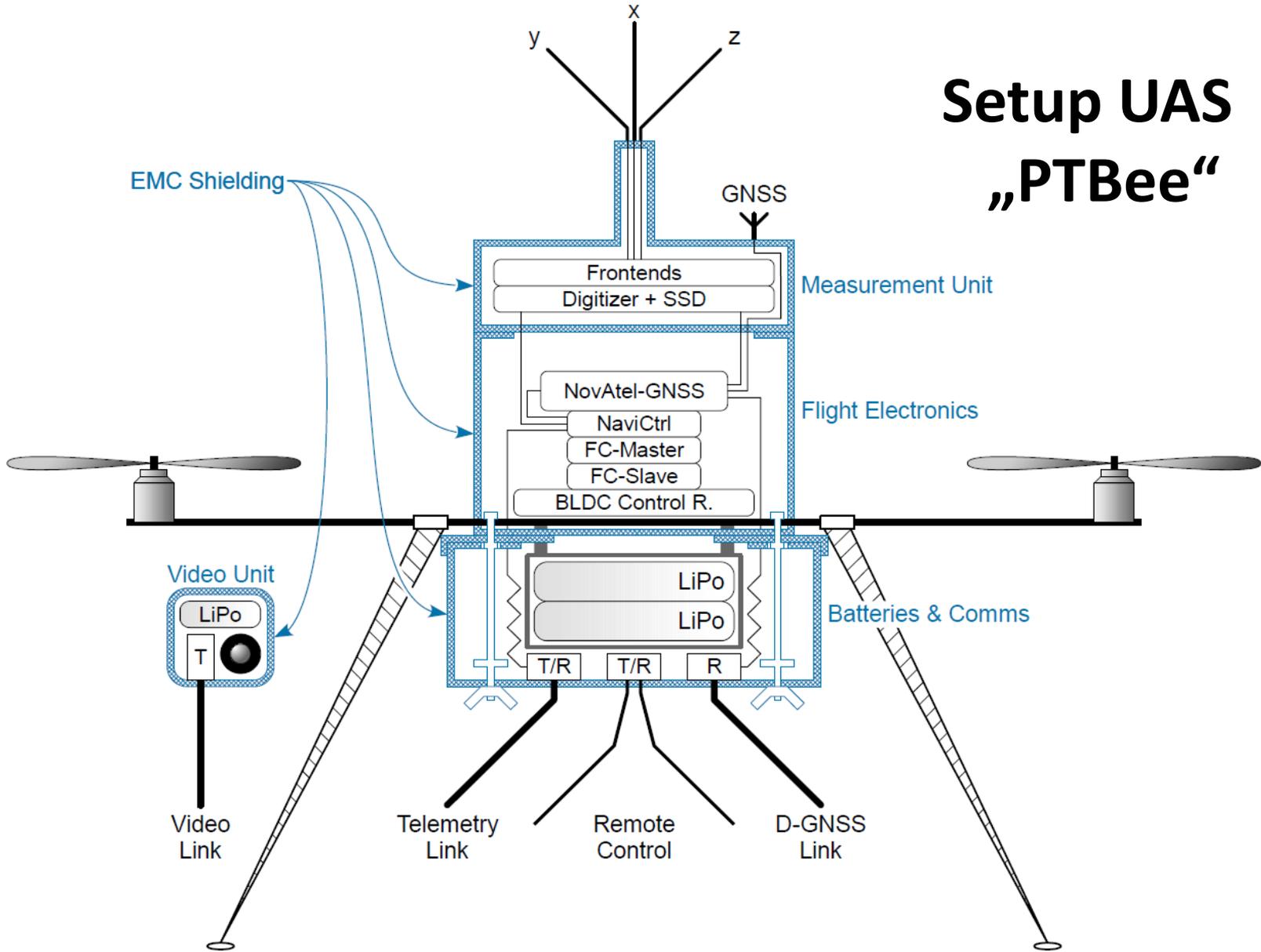
DWD Wetterradar (C-Band-Niederschlagsradar)

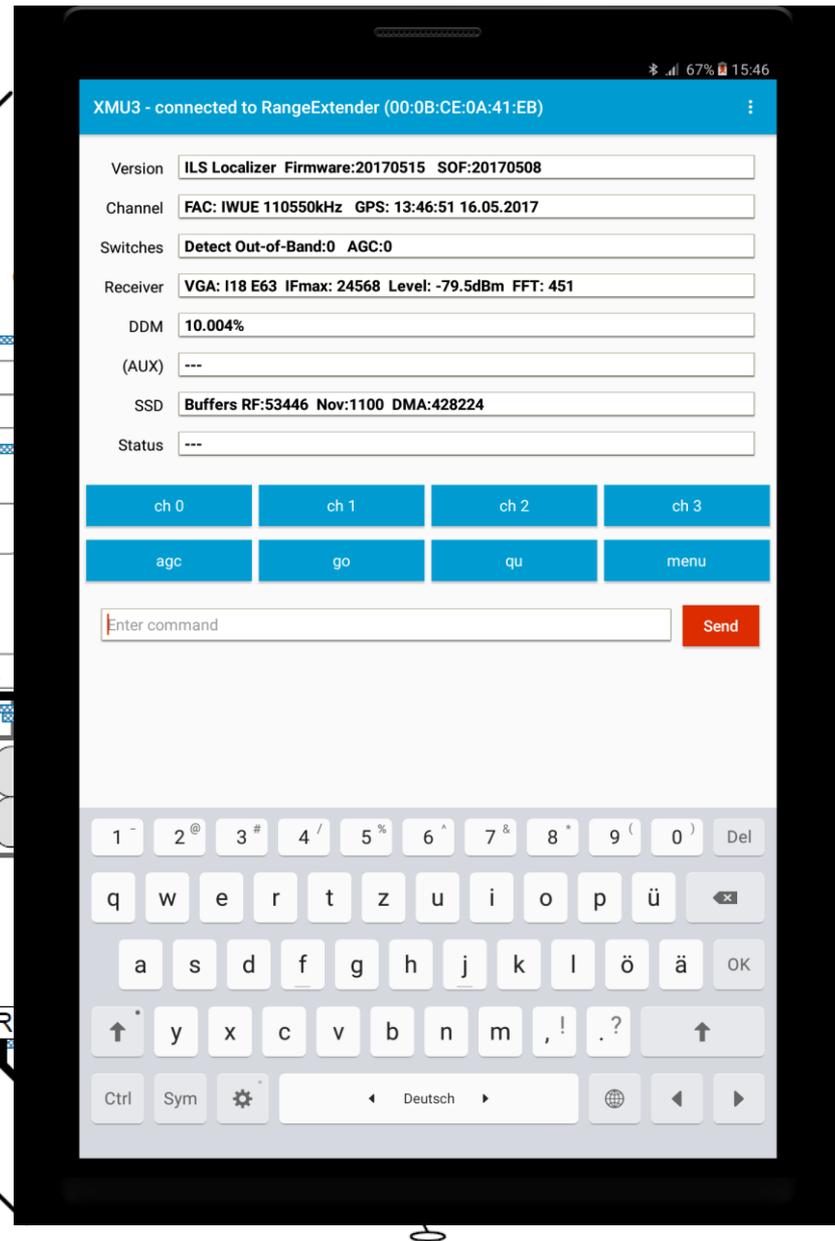
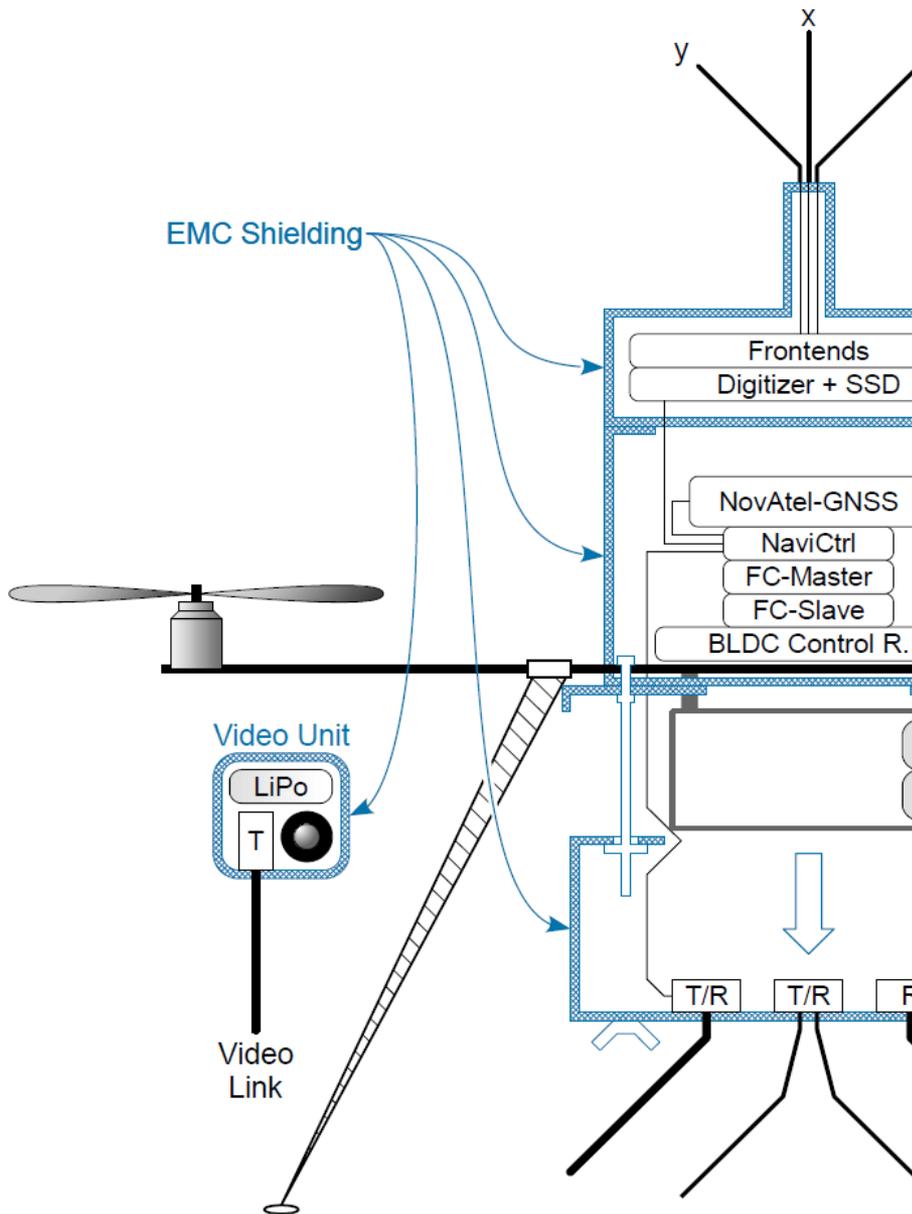
5,6 GHz

DWD UHF-Windprofiler

482 MHz

# Setup UAS „PTBee“

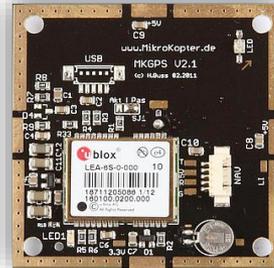




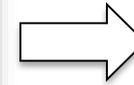
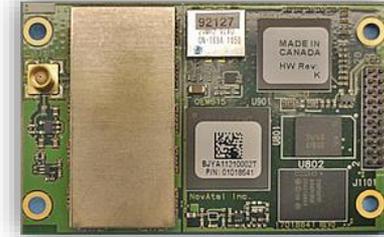
# UAS: GNSS Receiver



ublox LEA-6S



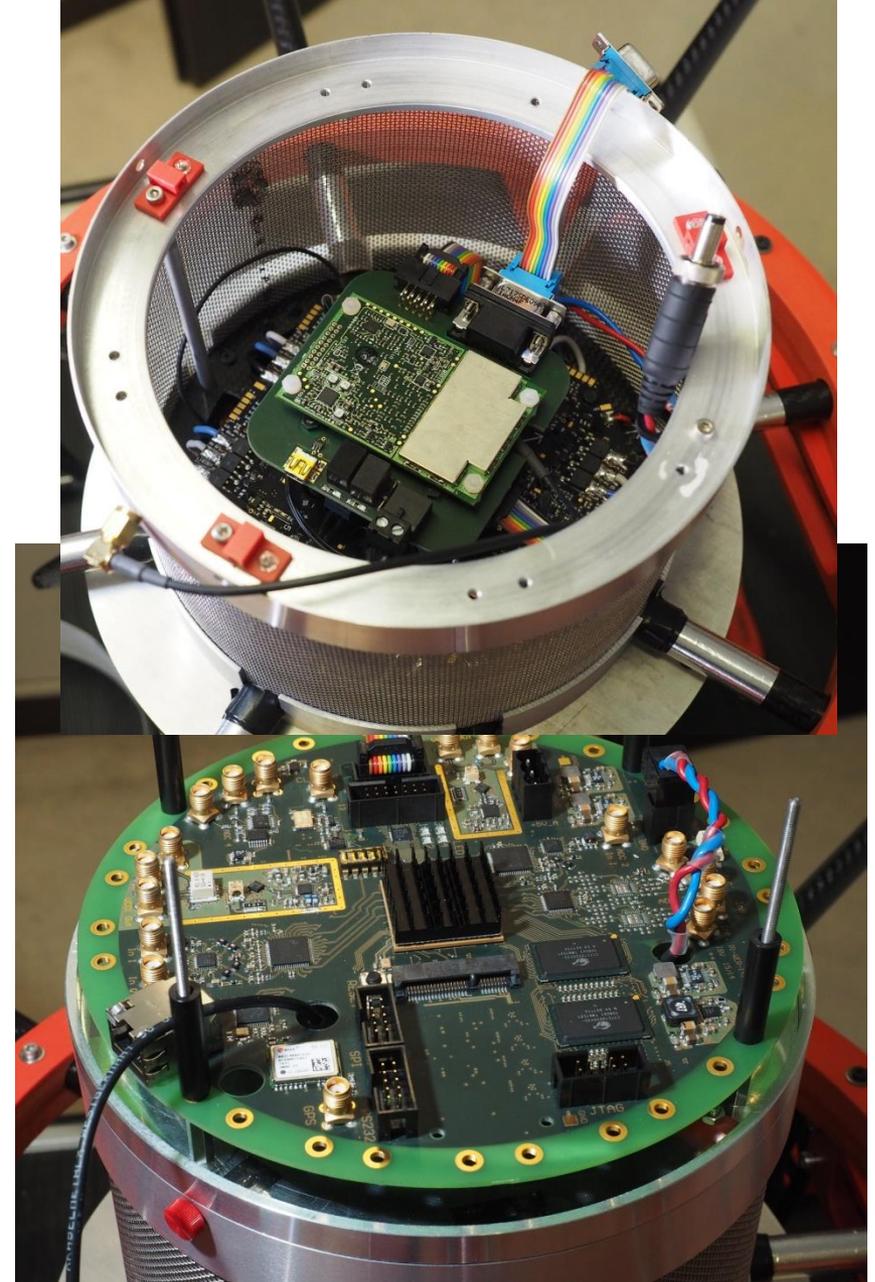
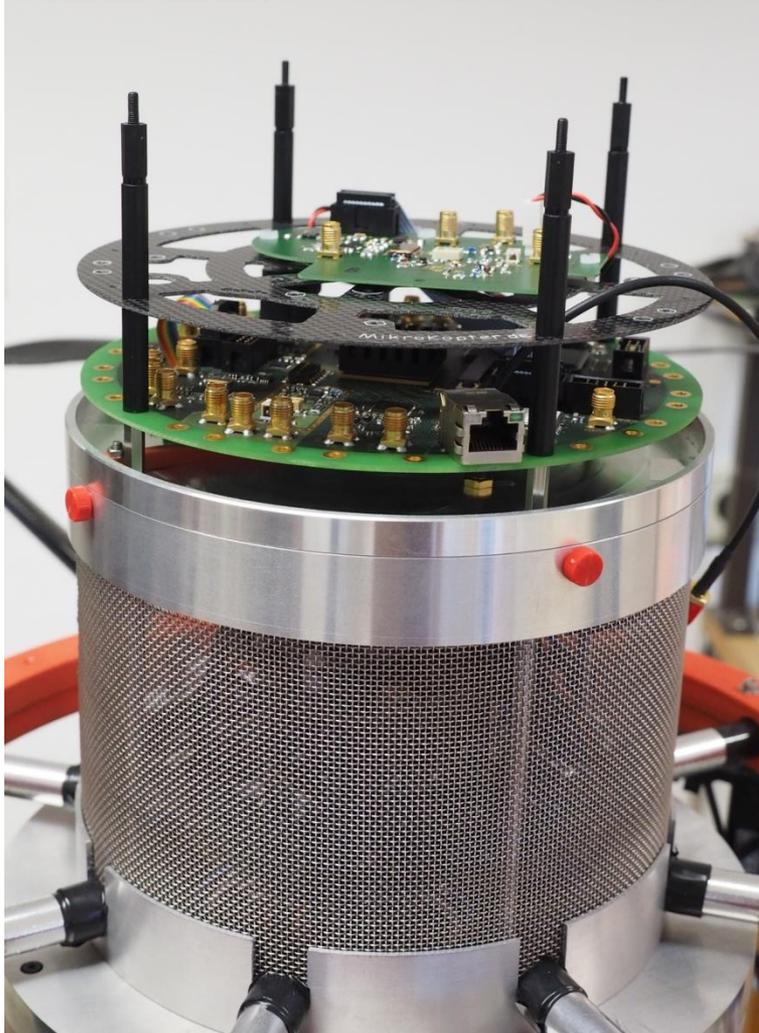
NovAtel OEM615



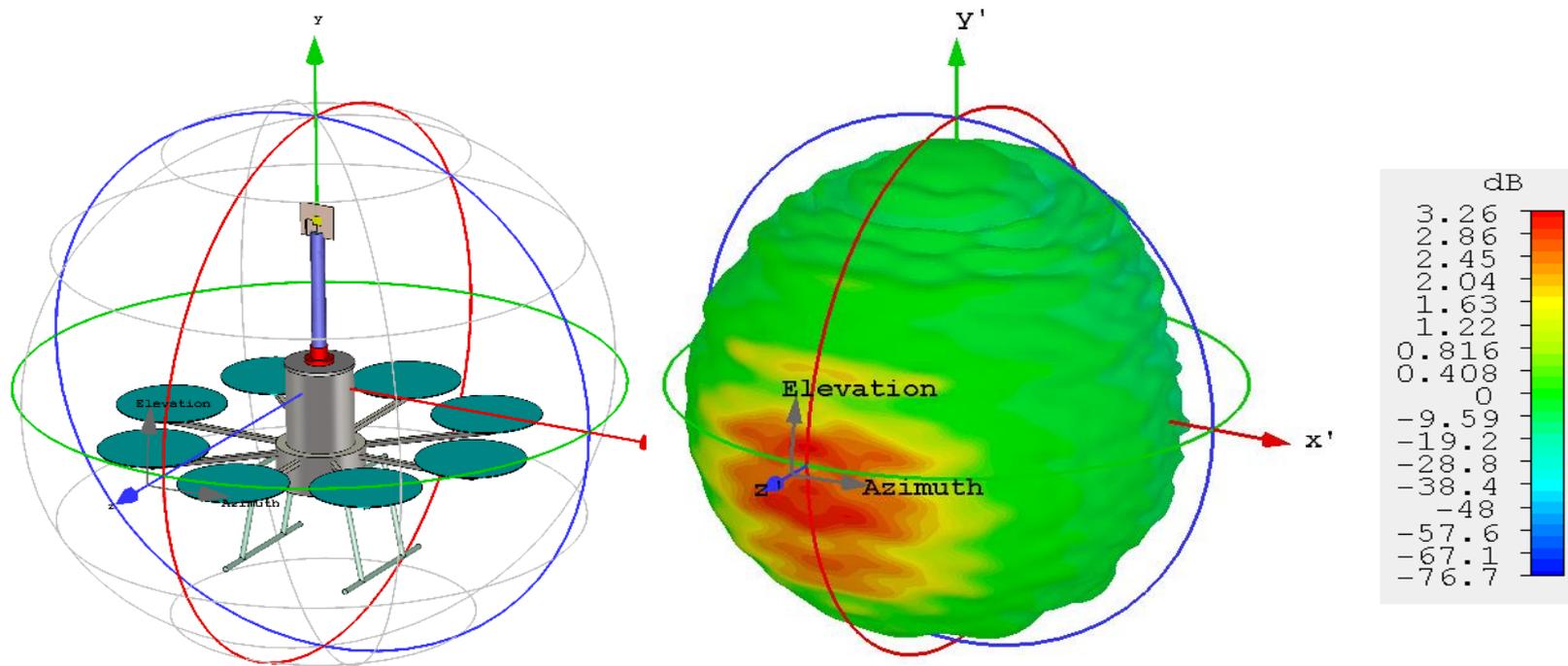
	Type	Passive	Active
Antenna	Form	Patch	Helix
	Constellations	GPS	GPS, GLONASS
	Tracking	L1	L1, L2
	Horizontal Accuracy (Datasheet)	L1	2.5 m CEP
Max. Refresh Rate	L1+L2	-	1.2 m RMS
	SBAS	2.0 m CEP	0.6 m RMS
	PR-DGNSS	-	0.4 m RMS
	RTK (RT-2®)	-	1 cm + 1 ppm RMS
Max. Refresh Rate		5 Hz	20 Hz

$$\text{RMS} = 1.2 \times \text{CEP}$$

# Foto der Messelektronik

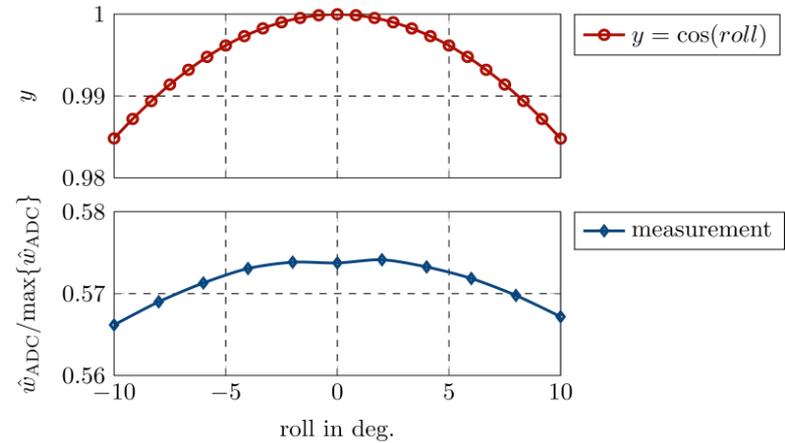
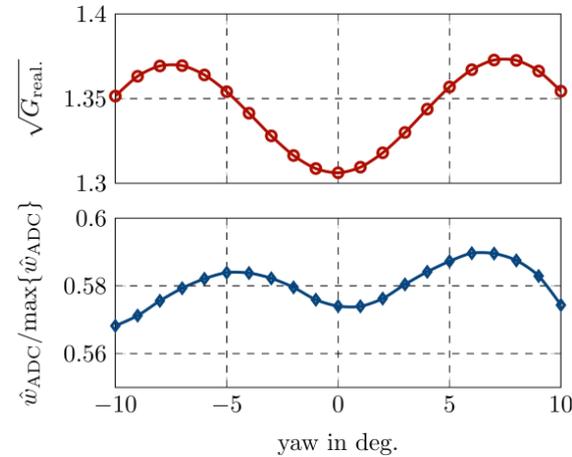
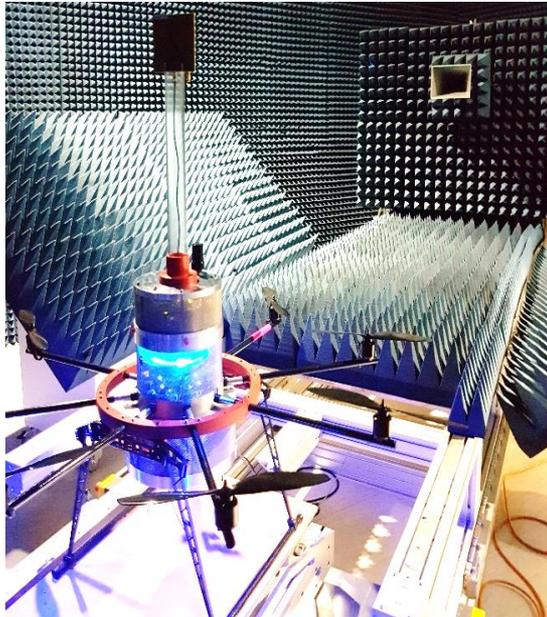


# Simulation des Antennengewinns



Kalibrierung nur mit der auf dem UAS installierten Antenne, sonst falsche Ergebnisse!

# Simulation & Messung des Antennengewinns



# Messunsicherheit für elektrische Feldstärke bei 2,7 GHz

$$u(|E_y(\vec{r}^+)|) = \frac{9,73}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{b^2 \cdot G_{\text{real},y}(-\vec{k})} \cdot u_c^2(\hat{W}_{\text{ADC}}) + \frac{\hat{W}_{\text{ADC}}^2}{b^4 \cdot G_{\text{real},y}(-\vec{k})} \cdot u_c^2(b) + \frac{\hat{W}_{\text{ADC}}^2}{4 \cdot b^2 \cdot G_{\text{real},y}(-\vec{k})^3} \cdot u_c^2(G_{\text{real},y}(-\vec{k}))}$$

AD Konversion – 16 bit

Kalibrierung der gesamten HF Elektronik incl. VGA  
(inkl. **Temp Drift der Elektronik**, Absolutwert, TCXO, ...)

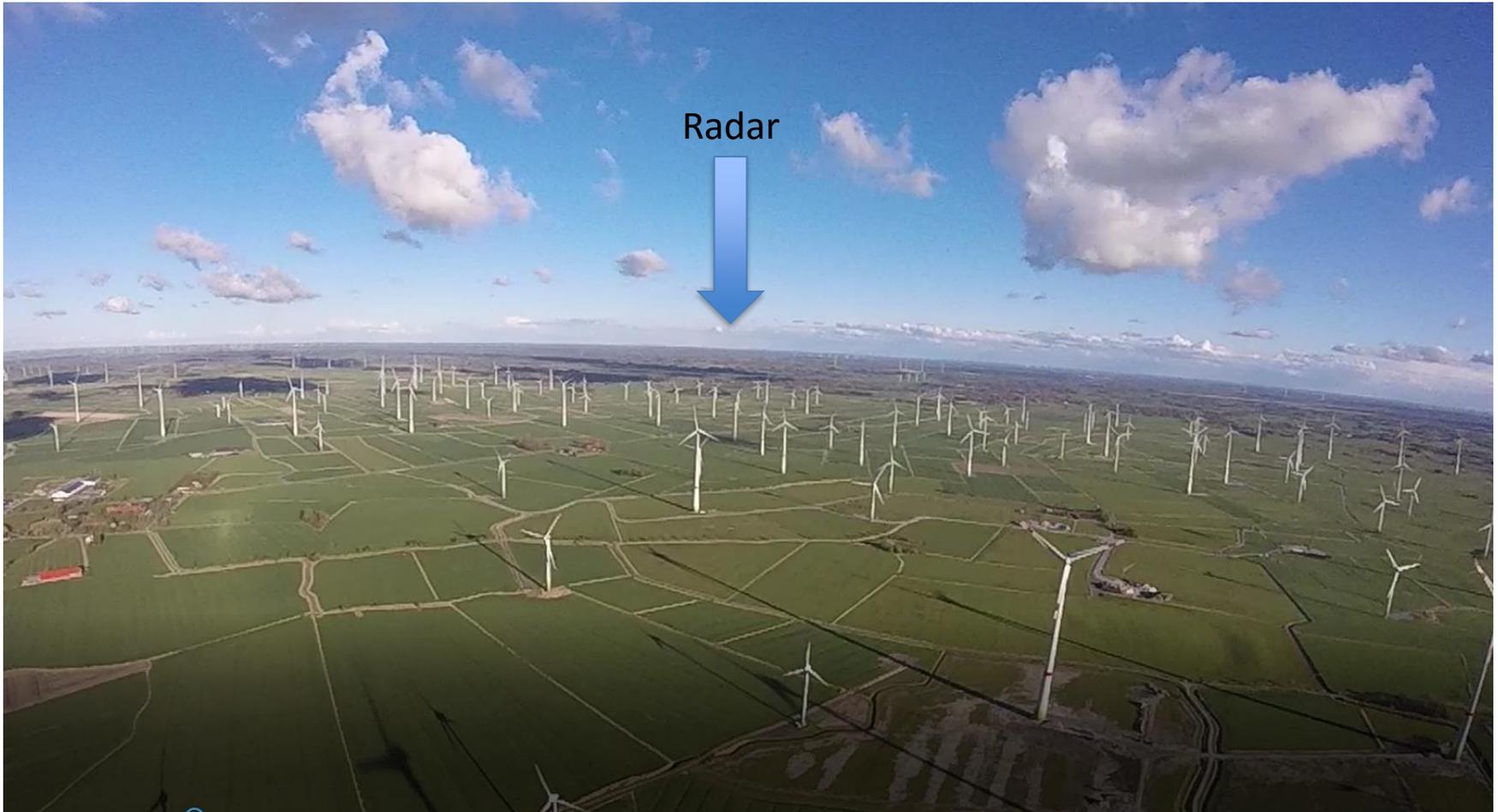
Realisierter Antennengewinn (Absolutwert, yaw, roll, pitch Variation,  
Einfluss der Propeller)

$$u_{\text{Relativ}}(|E_y(\vec{r}^+)|) = \frac{u_c(|E_y(\vec{r}^+)|)}{|E_y(\vec{r}^+)|} = 20\%, \text{ dominiert durch Temperaturdrift, 8,5\% sonst}$$

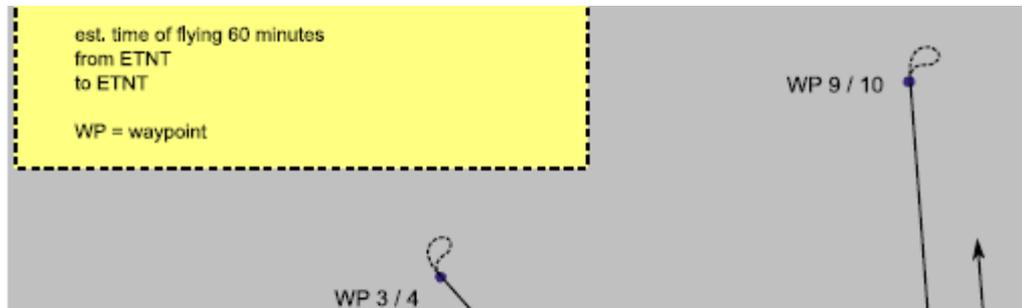
# Best-Case Szenario WEA-Einfluss auf Radare



# Worst-Case Szenario WEA-Einfluss auf Radare



# Radarflugvermessung steep GmbH / Messung mit PTB-Oktokopter



Planung:  
C. Brenner  
Steep GmbH

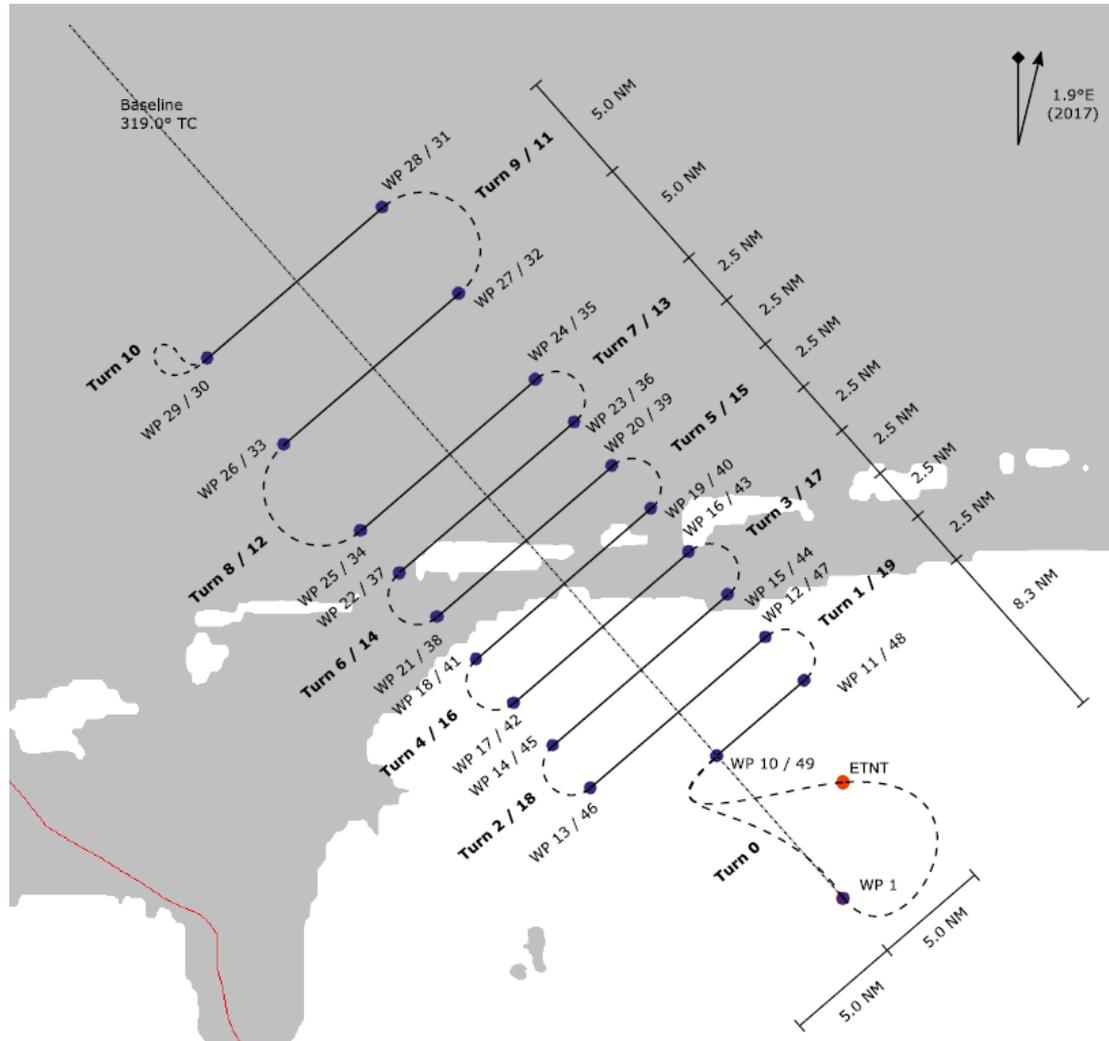
→ Radar-Entdeckungswahrscheinlichkeit für Flugziel Learjet (Wirkung)



→ Vergleich mit gemessenen Primärradarsignalen mit / ohne Windpark (Ursache)



# Radarflugvermessung steep GmbH / Messung mit PTB-Oktokopter



Planung:  
C. Brenner  
Steep GmbH

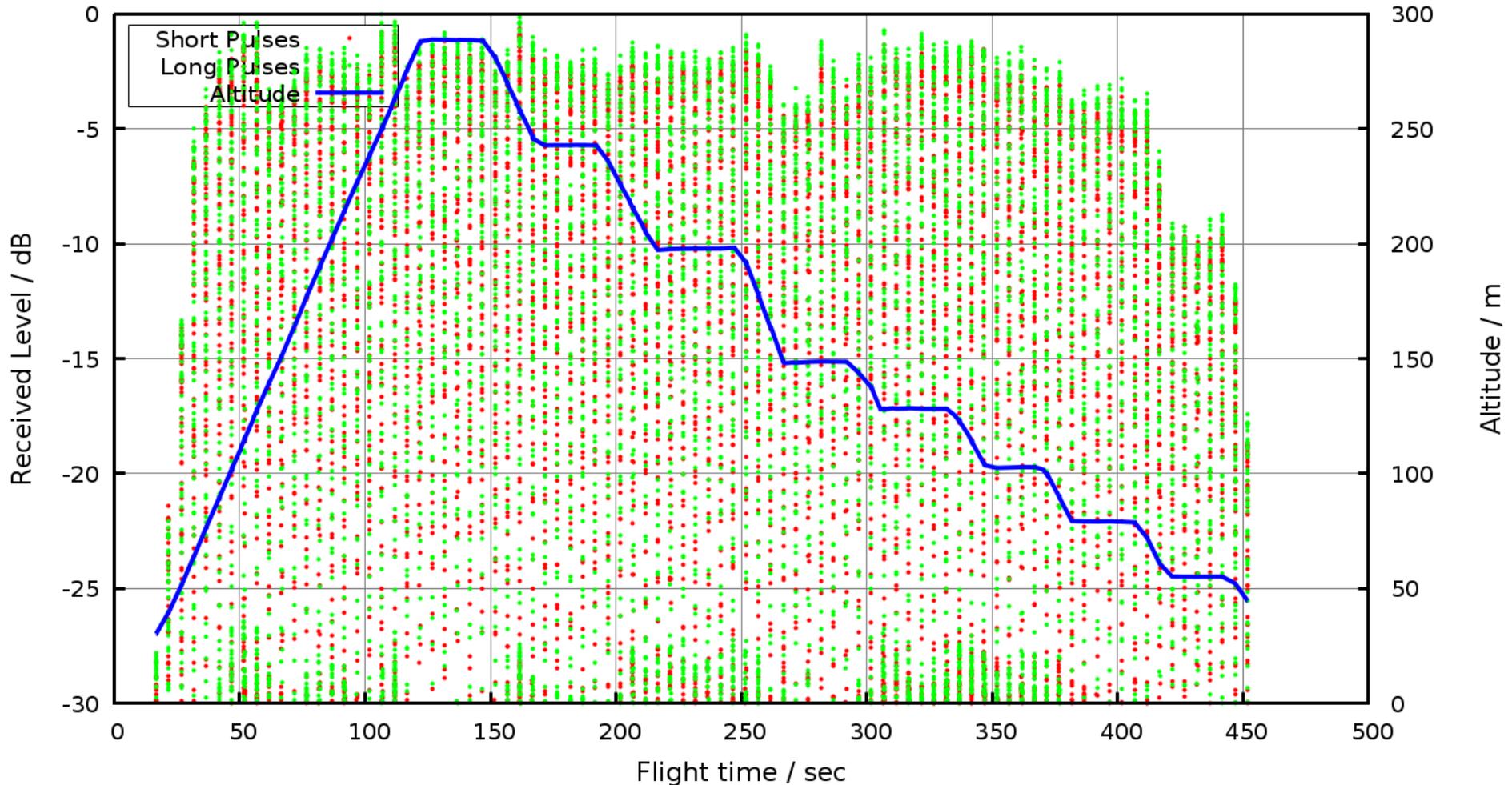
# Radarflugvermessung steep GmbH / Messung mit PTB-Oktokopter



ASR transmits alternately short pulses and long Near-LFM pulses (chirps)

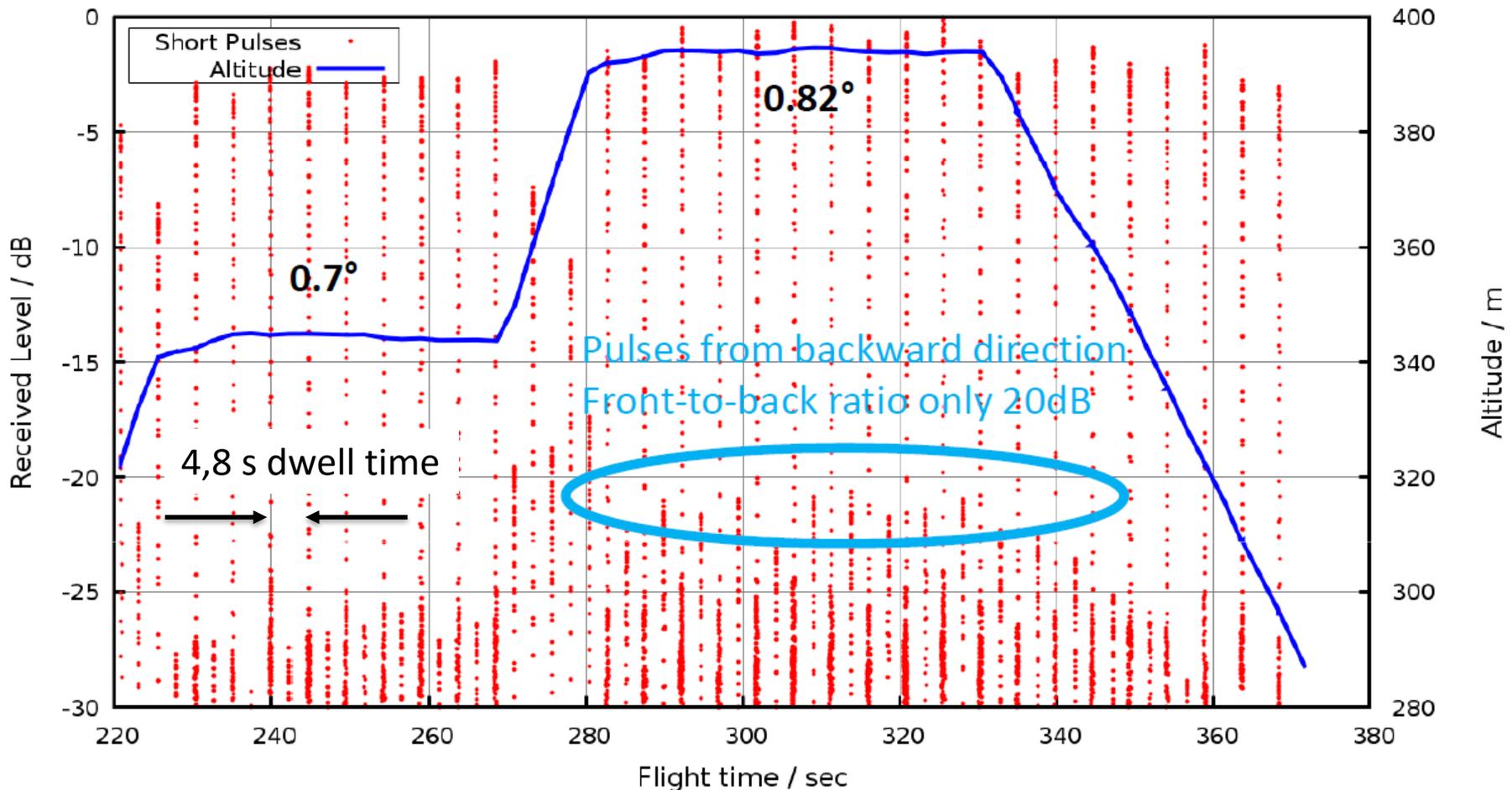
# Alle Sweeps während eines Flugs

Pulses on ASR channel 2708MHz



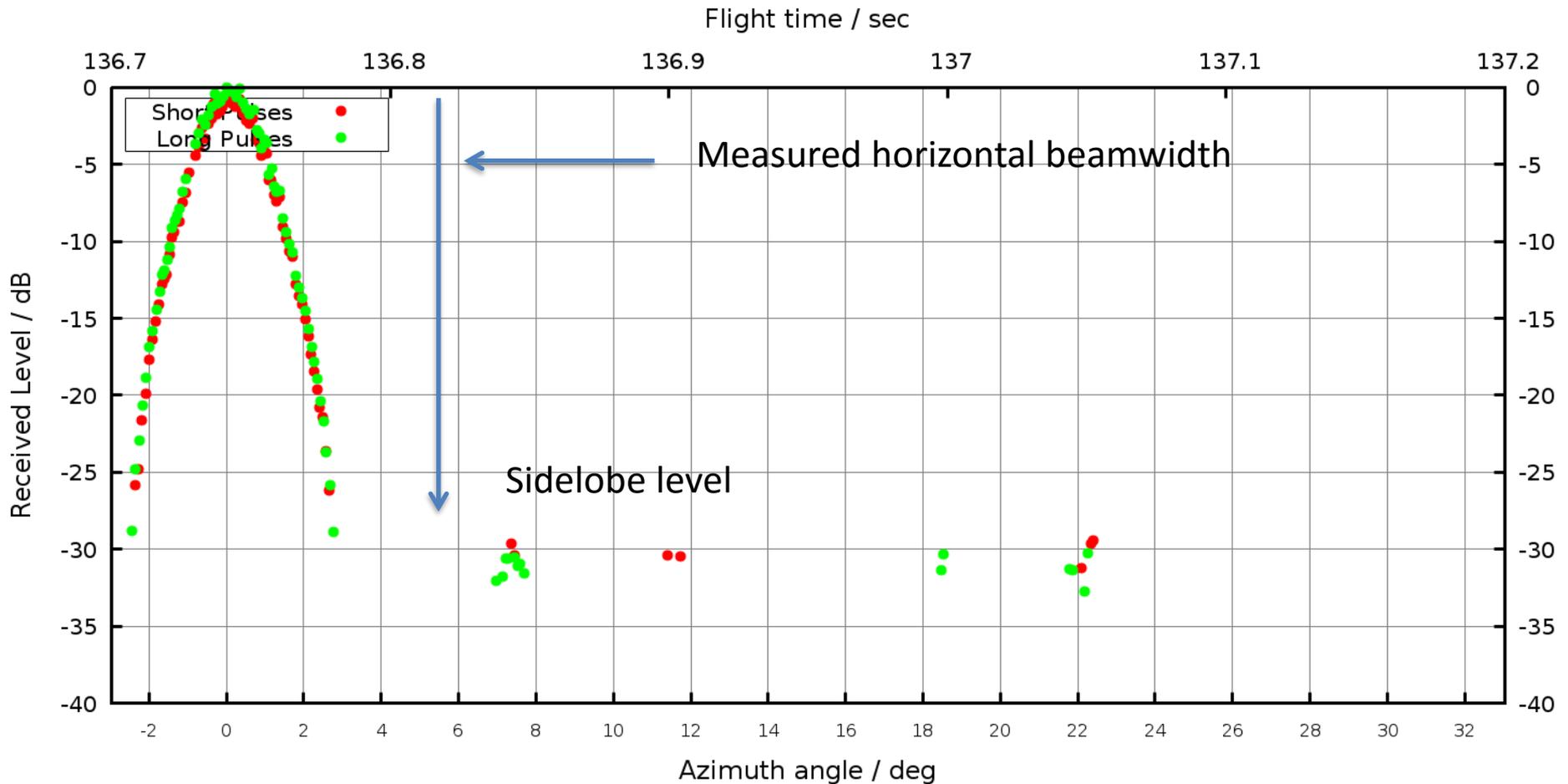
# Anflugradar Flughafen: Antennengewinn Vor-/Rückverhältnis

Pulses on ASR channel 2876MHz



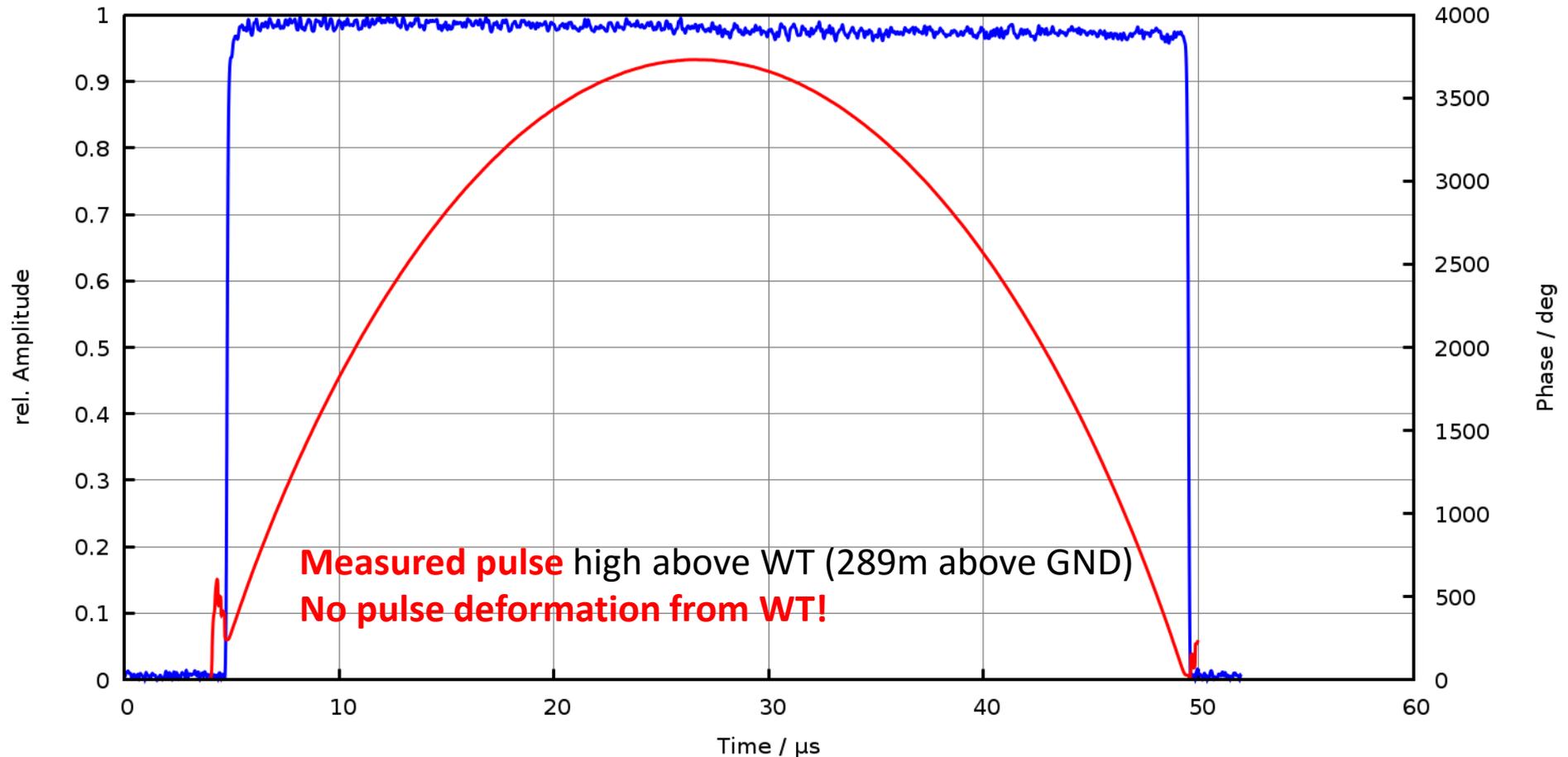
# Ein Radarumlauf: Haupt- und Nebenkeulen

Sweep Pulses on ASR channel 2708MHz Alt 288.8m



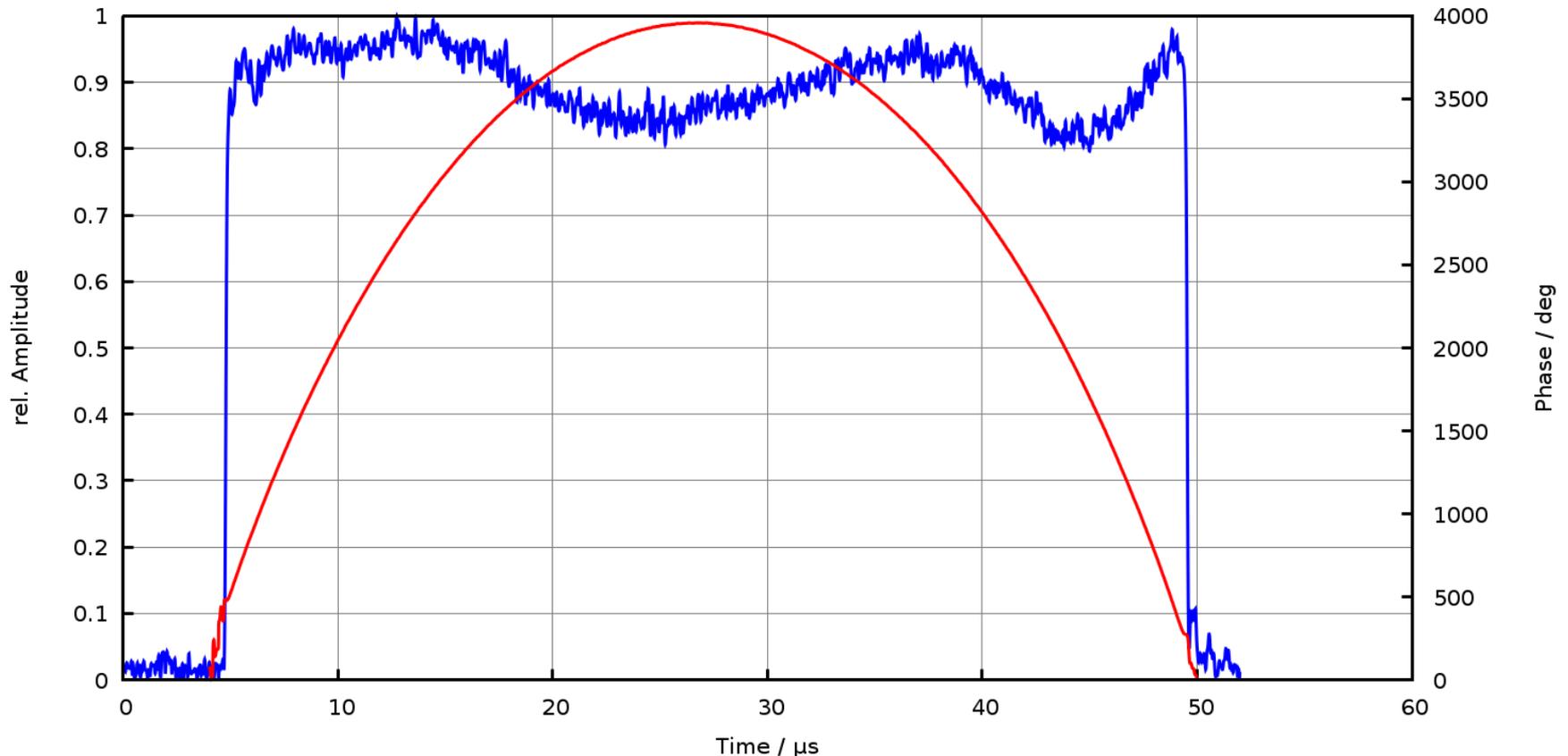
# Einfluss der Mehrwegeausbreitung auf LFM Puls

Pulse on ASR channel 2708MHz Mag: 5976 136.746s



# Einfluss der Mehrwegeausbreitung auf LFM Puls

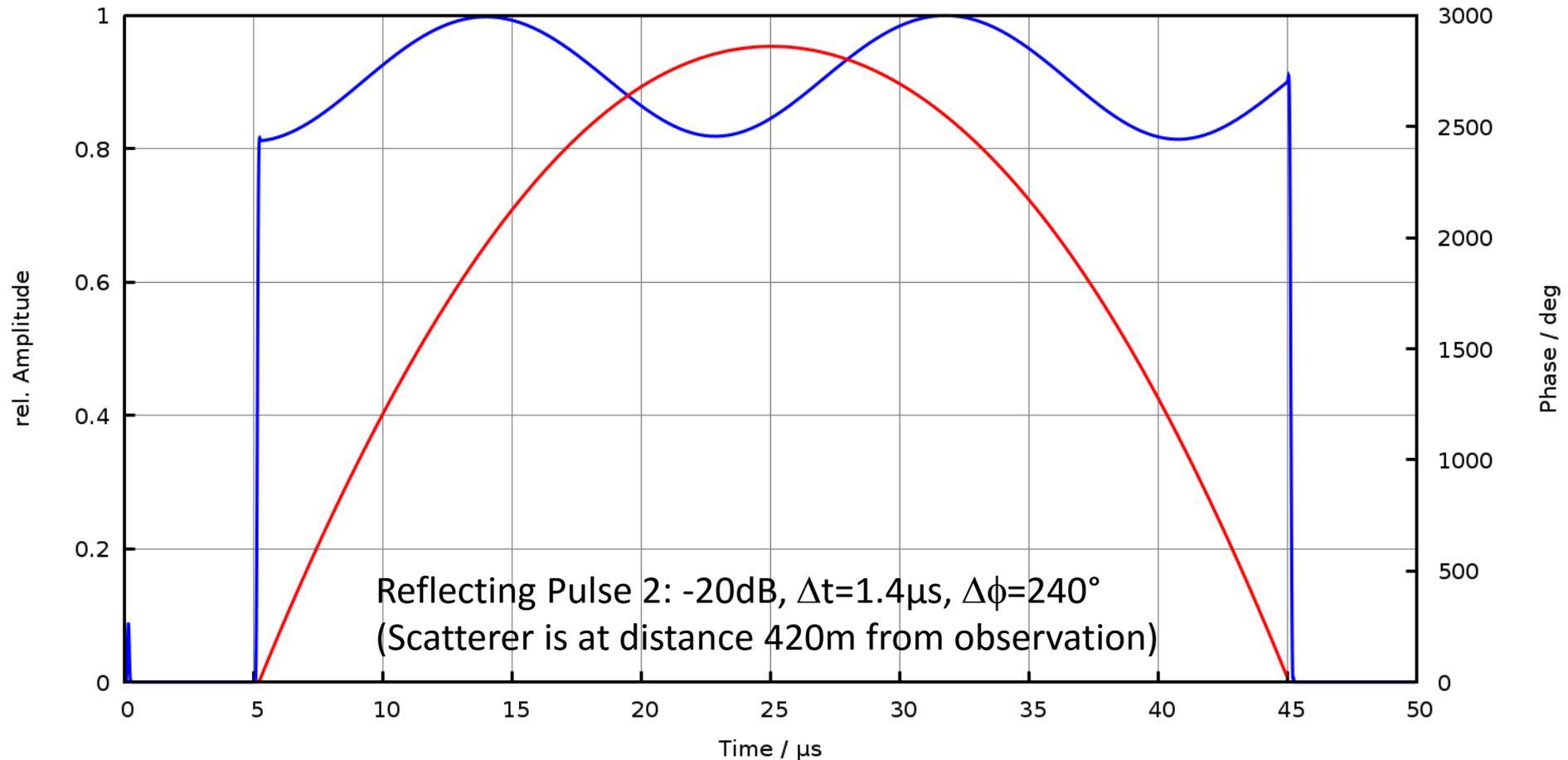
Pulse on ASR channel 2708MHz Mag: 1451 139.975s



**Measured Pulse** near WT; ASR-S has Near-LFM wave form; Chirp: 2MHz within 45 $\mu\text{s}$   
Direct Pulse seen on falling edge of beam main lobe, maximum points to WT

# Theorie: Einfluss der Mehrwegeausbreitung

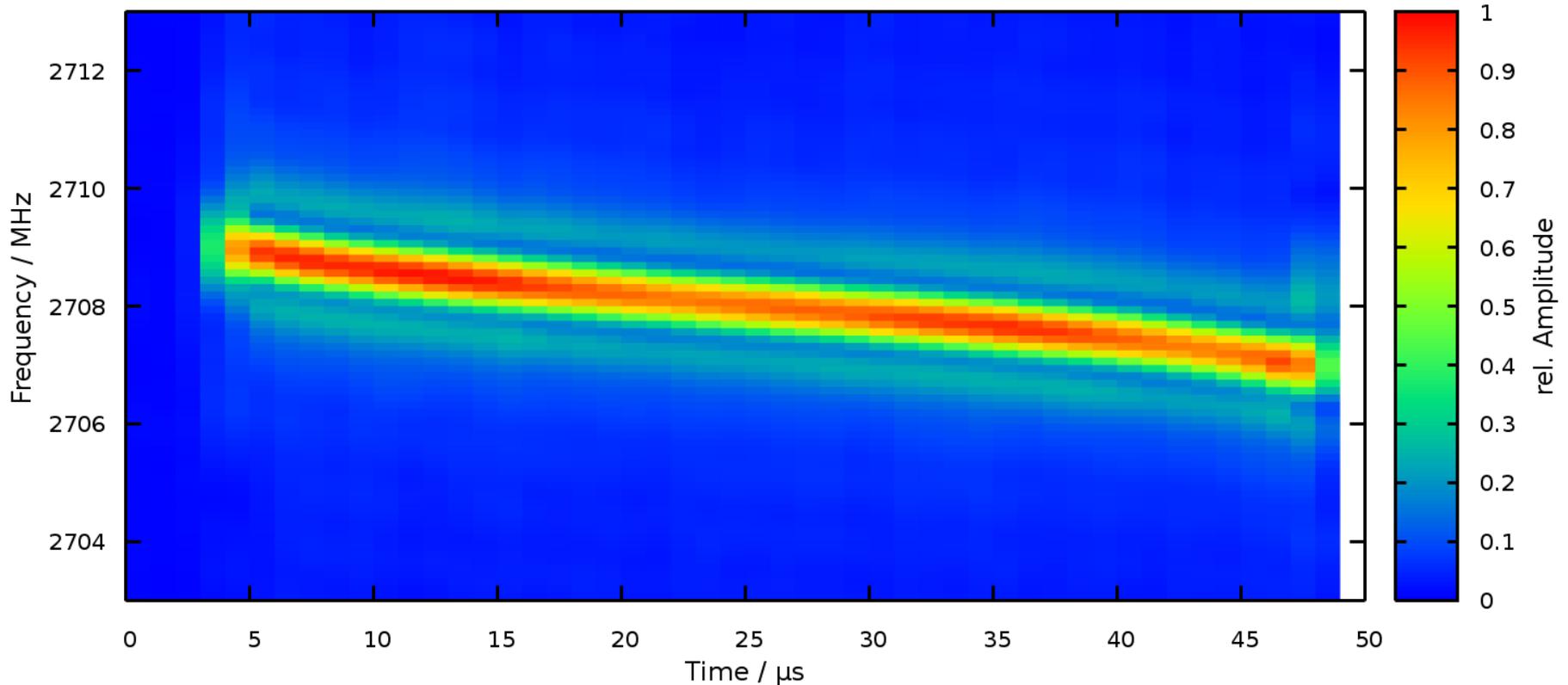
Pulse Video and Phase



**Synthetic LFM pulse**; Chirp: 2MHz within 45 $\mu\text{s}$

# Einfluss der Mehrwegeausbreitung auf LFM Puls

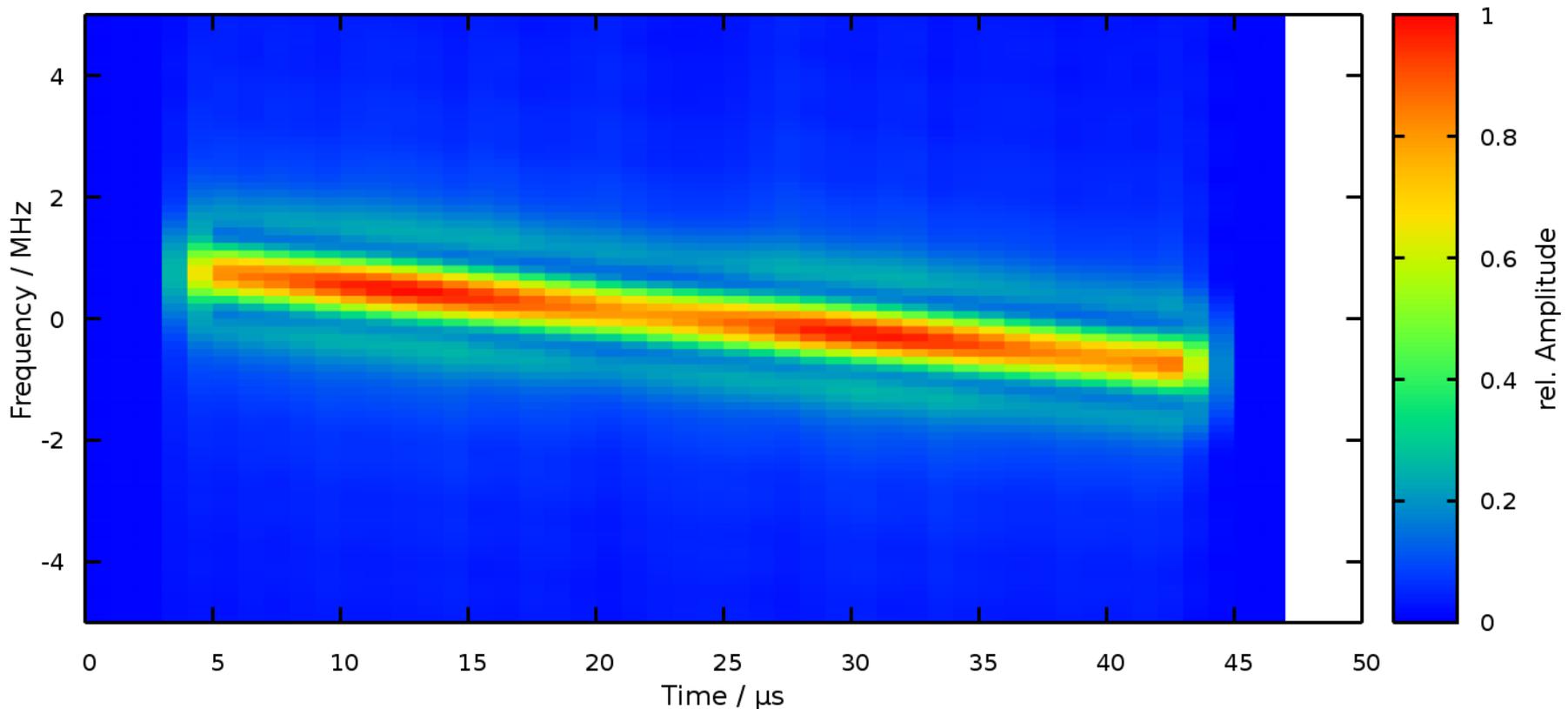
Pulse Spectrogram on ASR channel 2708MHz



**Measured Pulse** near WT; ASR-S has Near-LFM wave form; Chirp: 2MHz within 45μs

# Theorie: Einfluss der Mehrwegeausbreitung

Pulse Spectrogram



**Calculated LFM pulse**; Chirp: 2MHz within 45μs Reflecting Pulse 2: -20dB,  $\Delta t=1.4\mu s$ ,  $\Delta\phi=240^\circ$

# Zusammenfassung

- Reflexionen von Radarsignalen an WEA können **in-situ gemessen** und dargestellt werden
- Basisband Video von **FM-modulierten Radarpulsen ist wiederholbar gestört**
- **Messergebnisse lassen sich durch Überlappung von LFM Pulsen erklären**
- Weitere Analyse der Pulscompression und Einfluss von WEA auf **Radarauswertung über Radarhersteller**

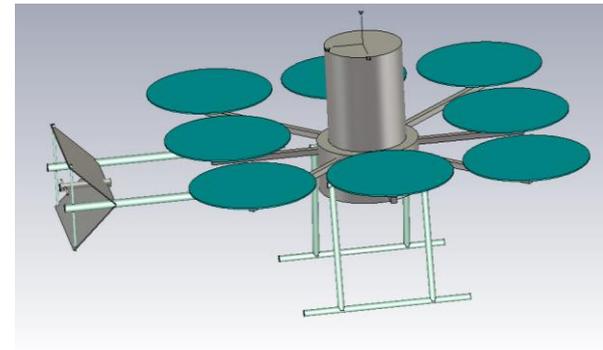


**Hochaufgelöste Messungen von Radarsignalen im Raum:  
an realen Signalen, realen Anlagen, in realen Umgebungen**

# Ausblick



Messungen am Windprofiler  
482 MHz



Quelle: Rohde&Schwarz

Radar (Dopplerverschiebung):  
Höhenwind zwischen 500 m und 16 km

Radio acoustic sounding (Schall  $\rightarrow$  Dichteflukt.):  
Temperaturverteilung bis 4 km Höhe

# Dank an die Projektpartner von WERAN

Partner	Ansprechpartner	Adresse
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Fachbereich 2.2: Hochfrequenz und Felder	Dr. Thorsten Schrader (Verbundkoordinator)	Bundesallee 100 38116 Braunschweig
Leibniz Universität Hannover Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik	Prof. Dr. Heyno Garbe	Appelstraße 9a 30167 Hannover
FCS Flight Calibration Services GmbH	Dr. Jochen Bredemeyer	Hermann-Blenk-Str. 32A 38108 Braunschweig
steep GmbH	Christoph Stupperich	Justus-von-Liebig-Str. 18 53121 Bonn

Nicht geförderte Partner:  
Deutsche Flugsicherung  
Deutscher Wetterdienst

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

FKZ: 0325644A-D