

Nahbereichs-Radartechnik für Automatisierung und Gestenerkennung

Vorstellung der Forschungsarbeit

Johannes Fink | 9. November 2016

Communications Engineering Lab
Univ.-Prof. i. R. Dr.rer.nat. Friedrich K. Jondral



Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Forschungsziele
- 3 Nahbereichs-Radar für kommerzielle Sensorik-Anwendungen
 - Anforderungen
 - Wellenform Auswahl
 - Entwurf Transceiver-Architektur
 - Auslegung digitale Radarsignalverarbeitung
- 4 Demonstrator
- 5 Anwendungsbeispiele
 - Gestenklassifikation
 - Automatisierungstechnik: Through-the-box detection
- 6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Moderne Radartechnologie ermöglicht neuartige Anwendungen

Entwicklungen in der Halbleiterindustrie: GaAs / SiGe-Technik erlauben:

- Radar im Miniaturformat: Radar-on-Chip / Radar-in-Package
- Bandbreiten im GHz-Bereich
- Frequenzen im Millimeterwellenbereich
- geringe Kosten

Charakterisierung neuartiger Anwendungsfelder

- Hohe Bandbreiten und Trägerfrequenzen \Rightarrow sehr hohe Orts- und Dopplerauflösung trotz geringer Antennenabmessungen
- Unlizenziertes Einsatz unterliegt regulatorischen Randbedingungen, insbesondere limitierter Sendeleistung \Rightarrow geringe Reichweite

\Rightarrow *Nahbereichs-Sensorik-Anwendungen* ($R_{\max} < 30 \text{ m}$; $\Delta R < 0,1 \text{ m}$).

Weshalb Nahbereichs-Radartechnik?

Moderne Radartechnologie ermöglicht neuartige Anwendungen

Entwicklungen in der Halbleiterindustrie: GaAs / SiGe-Technik erlauben:

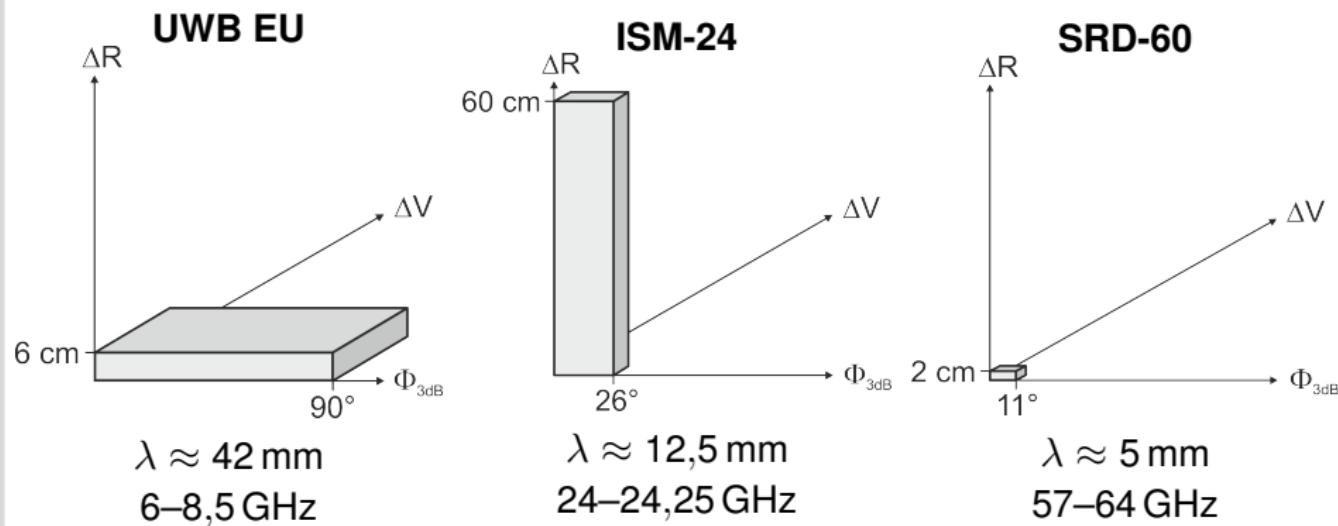
- Radar im Miniaturformat: Radar-on-Chip / Radar-in-Package
- Bandbreiten im GHz-Bereich
- Frequenzen im Millimeterwellenbereich
- geringe Kosten

Charakterisierung neuartiger Anwendungsfelder

- Hohe Bandbreiten und Trägerfrequenzen ⇒ sehr hohe Orts- und Dopplerauflösung trotz geringer Antennenabmessungen
- Unlizenziertes Einsatz unterliegt regulatorischen Randbedingungen, insbesondere limitierter Sendeleistung ⇒ geringe Reichweite

⇒ *Nahbereichs-Sensorik-Anwendungen* ($R_{\max} < 30 \text{ m}$; $\Delta R < 0,1 \text{ m}$).

Regulatorische Rahmenbedingungen



Annahme: Antennenfläche: 9 cm^2

Radar in der Automatisierungstechnik

- Berührungslose Detektion von Gütern
- Estimation und Tracking der Objektparameter
- Umgebung: Staub, extreme Temperatur, Erschütterungen, Dunkelheit
- Ausnutzung der besonderen Eigenschaften der Frequenzbänder in Transmission- und Reflexion (im Vergleich zu optischen Sensoren)
- Selbstkalibrierend und wartungsarm

Radar zur Gestenklassifikation (Hand / Kopf / Körper)

- Neuartiges berührungsloses Human-Machine-Interface
- Privatsphäre während (im Gegensatz zu Kameras)
- Funktion unabhängig von Beleuchtung, durch Abdeckungen hindurch

- ① Untersuchung und Bewertung von Einsatzmöglichkeiten und Randbedingungen der Nahbereichs-Radartechnologie
 - in Automatisierungstechnik
 - zur Klassifikation menschlicher Gesten
- ② Identifikation vorteilhafter Auslegungen von Wellenform, Hard- und Software eines Nahbereichsradios
- ③ Entwicklung und Vergleich von Architekturen, Verfahren und Algorithmen zum Einsatz von Nahbereichsradar in Anwendungen der Automatisierungstechnik sowie zur Gestenklassifikation
- ④ Demonstration der praktischen Funktionstüchtigkeit der Entwicklungen anhand von Demonstratoren

Nahbereichs-Radar für kommerzielle Sensorik-Anwendungen

Relevante Anforderungen

■ Low-cost

- Hardware tauglich für Massenproduktion
- Algorithmik mit möglichst geringer Rechenkomplexität
- möglichst geringe Abtastrate f_S

■ Robustheit \Leftrightarrow keine bewegten Teile

■ Kompaktheit \Leftrightarrow zur Integration in Anlagen und Produkten

■ Objektdetektion in dichtem Clutter (charakteristisch für die Nahbereichs-Umgebung aufgrund kleiner geometrischer Abmessungen):

- Mehrzielfähigkeit \Leftrightarrow Auflösung von Zielen in Range und Doppler
- Hohe Entfernungsauflösung

■ Echtzeitfähigkeit \Leftrightarrow Hohe Messrate

Wellenform Auswahl

Auswirkungen auf Radarsystem:

- Bestimmt Auflösungseigenschaften $\Delta R, \Delta v$
- Bestimmt Hardwareaufwand via f_S
- Fordert spezifische Signalverarbeitung zur Detektion und Estimation
- Beeinflusst dadurch Kosten des Gesamtsystems

Umfangreicher Vergleich der Wellenformen

- Ultrabreitband-Impulsradar
- Linear Chirp Sequence FMCW [FJ15a; FJ15b]
- OFDM [FJ15a; FJ15b]

führt als Konsequenz der geforderten Performance zur Wahl von

Linear Chirp-Sequence Frequency Modulated Continuous Wave

- Vermeidung von Dopplermehrdeutigkeiten \Rightarrow steile lineare Frequenzrampen (mehrere THz s^{-1}) \Rightarrow hohe Anforderungen an Frequenzerzeugung!

Wellenform Auswahl

Auswirkungen auf Radarsystem:

- Bestimmt Auflösungseigenschaften $\Delta R, \Delta v$
- Bestimmt Hardwareaufwand via f_S
- Fordert spezifische Signalverarbeitung zur Detektion und Estimation
- Beeinflusst dadurch Kosten des Gesamtsystems

Umfangreicher Vergleich der Wellenformen

- Ultrabreitband-Impulsradar
- Linear Chirp Sequence FMCW [FJ15a; FJ15b]
- OFDM [FJ15a; FJ15b]

führt als Konsequenz der geforderten Performance zur Wahl von

Linear Chirp-Sequence Frequency Modulated Continuous Wave

- Vermeidung von Dopplermehrdeutigkeiten \Rightarrow steile lineare Frequenzrampen (mehrere THz s^{-1}) \Rightarrow hohe Anforderungen an Frequenzerzeugung!

Wellenform Auswahl

Auswirkungen auf Radarsystem:

- Bestimmt Auflösungseigenschaften $\Delta R, \Delta v$
- Bestimmt Hardwareaufwand via f_S
- Fordert spezifische Signalverarbeitung zur Detektion und Estimation
- Beeinflusst dadurch Kosten des Gesamtsystems

Umfangreicher Vergleich der Wellenformen

- Ultrabreitband-Impulsradar
- Linear Chirp Sequence FMCW [FJ15a; FJ15b]
- OFDM [FJ15a; FJ15b]

führt als Konsequenz der geforderten Performance zur Wahl von

Linear Chirp-Sequence Frequency Modulated Continuous Wave

- Vermeidung von Dopplermehrdeutigkeiten \Rightarrow steile lineare Frequenzrampen (mehrere THz s^{-1}) \Rightarrow hohe Anforderungen an Frequenzerzeugung!

Linear Chirp-Sequence FMCW

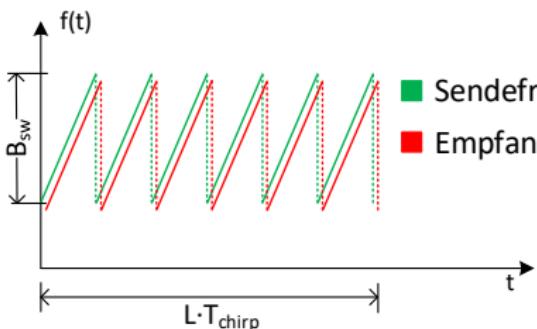
- Sendesignal: $s_T(t) = \cos(\phi_T(t)) = \cos(2\pi \int f_T(t) dt)$

- Komplexes Basisbandsignal (Stretch Processor):

$$s_B(t) = I(t) + jQ(t) = \exp(j(\phi_T(t - \tau) - \phi_T(t)))$$

- Frequenzgang Up-Chirp Sequenz:

$$f_T(t) = f_0 + \frac{B_{sw}}{T_{up}} \sum_{l=0}^{L-1} (t - lT_{chirp}) \text{rect}_{T_{up}}(t - lT_{chirp})$$



■ Sendefrequenz

■ Empfangsfrequenz

$$s_B(k, l) = \exp(j2\pi[f_B \frac{k}{l_s} + f_D \cdot l \cdot T_{chirp} + \phi_0])$$

■ f_B : Beatfrequenz

■ f_D : Dopplerfrequenz

Linear Chirp-Sequence FMCW

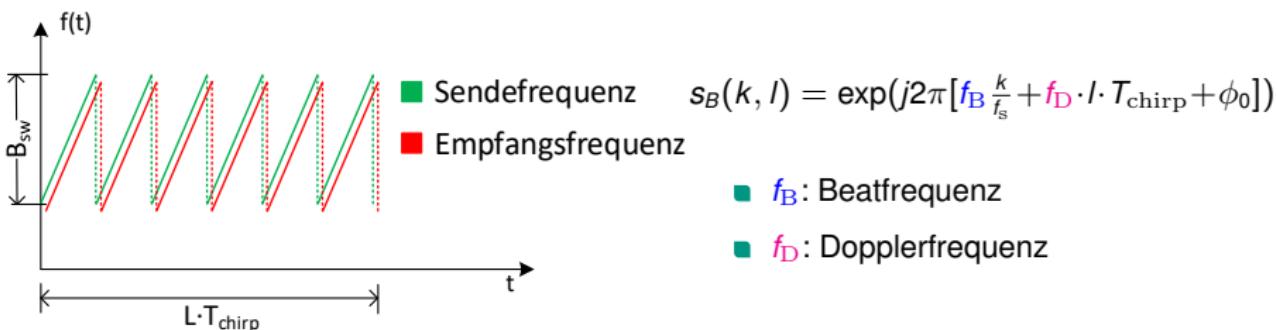
- Sendesignal: $s_T(t) = \cos(\phi_T(t)) = \cos(2\pi \int f_T(t) dt)$

- Komplexes Basisbandsignal (Stretch Processor):

$$s_B(t) = I(t) + jQ(t) = \exp(j(\phi_T(t - \tau) - \phi_T(t)))$$

- Frequenzgang Up-Chirp Sequenz:

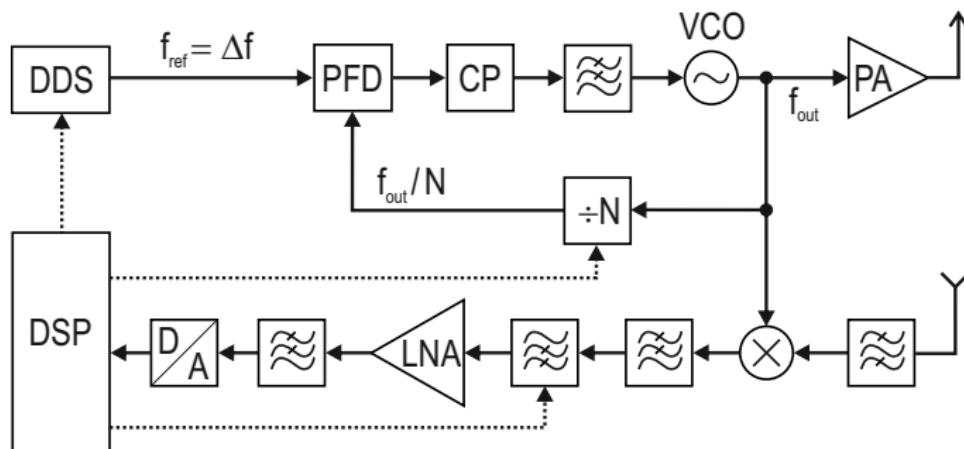
$$f_T(t) = f_0 + \frac{B_{sw}}{T_{up}} \sum_{l=0}^{L-1} (t - lT_{chirp}) \text{rect}_{T_{up}}(t - lT_{chirp})$$



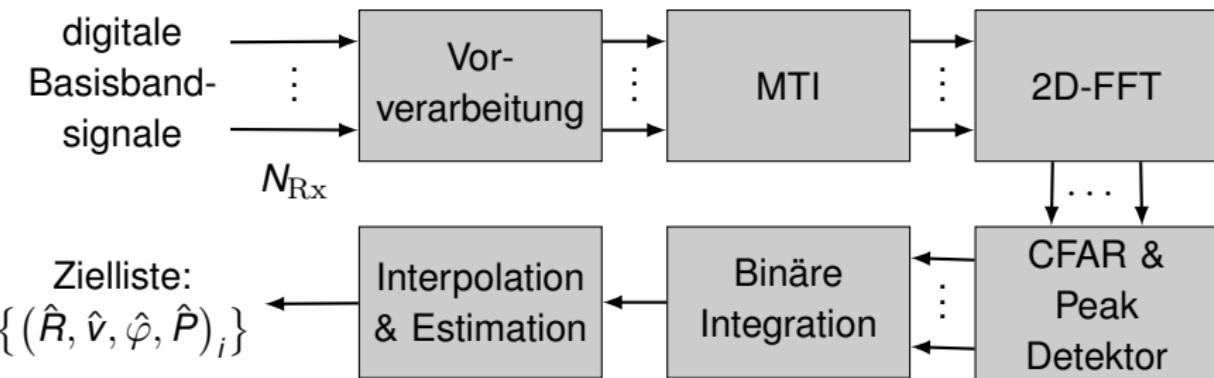
Entwurf Transceiver-Architektur

Anforderungen und Designentscheidungen:

- Steile lineare Frequenzrampen \Leftrightarrow Integer-N-Synthesizer
- Low-cost \Leftrightarrow Stretch Processor einkanalig
- Hoher Dynamikbereich \Leftrightarrow Analoger Hochpass,
getrennte Tx- und Rx-Antennen



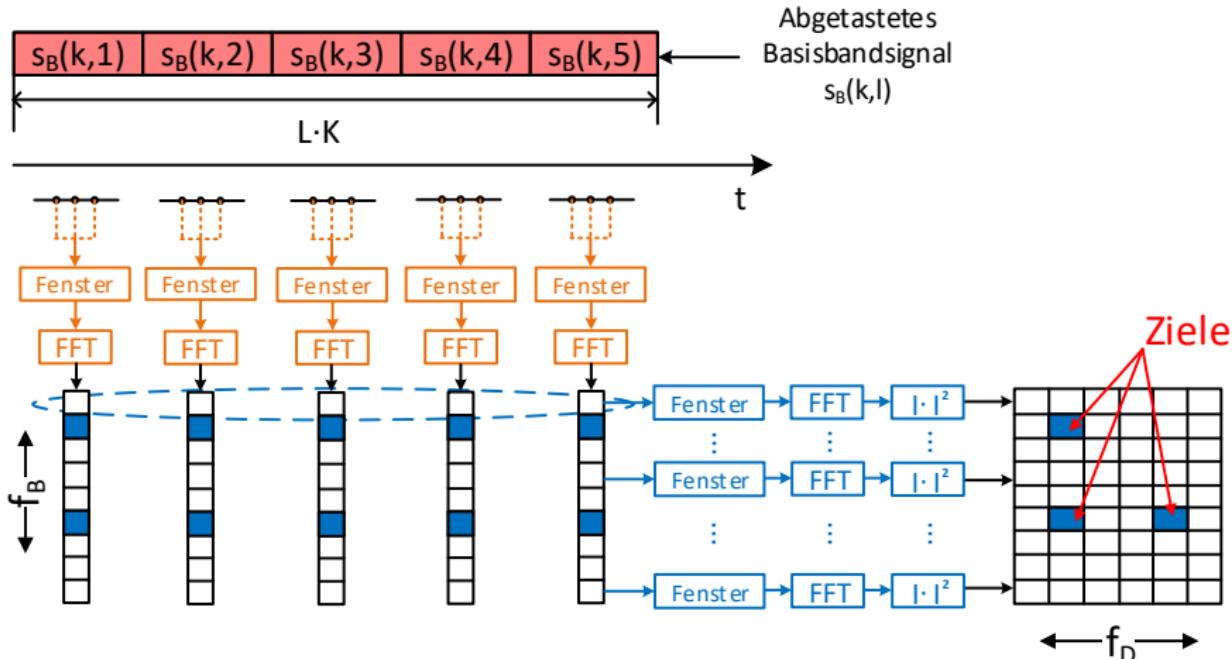
Auslegung digitale Radarsignalverarbeitung



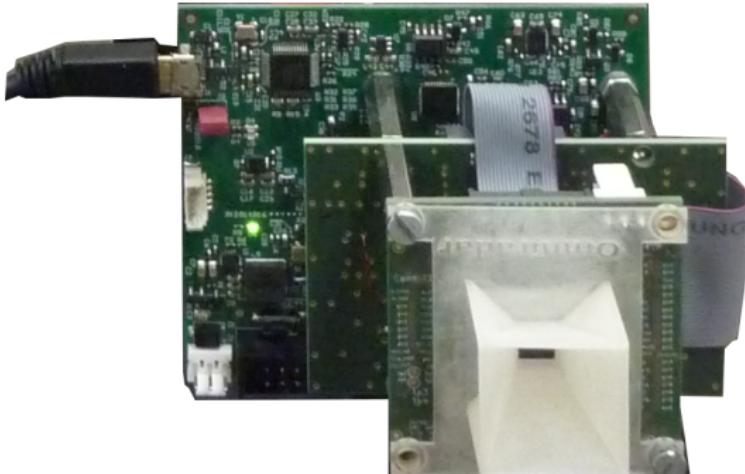
Blöcke modular

- Verschiedene Algorithmen je Block
- Auswahl und Parametrisierung je nach Anwendung

Verarbeitung LCS-FMCW

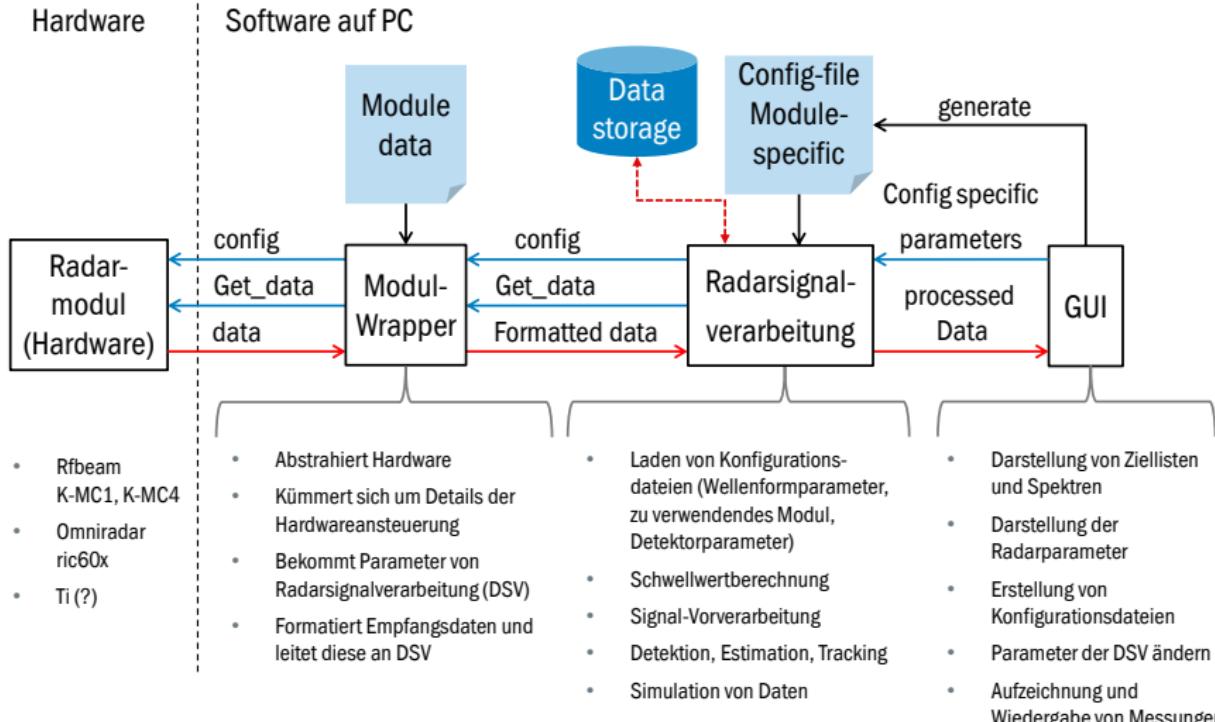


Demonstrator



- SiGe FMCW Radar-on-Chip 57–64 GHz mit 1 Tx, 2 Rx, VCO
- Stabile Rampenerzeugung implementiert via Integer-N-Synthesizer
- Analoger Hochpass zur Verbesserung des Dynamikbereichs

Entwickelte Toolbox zur Radar-Messdatenverarbeitung



Anwendungsbeispiele

Gestenklassifikation

Aufgabe:

Automatische Klassifikation menschlicher Hand- und Körpergesten anhand hochauflösender Radarmessungen.

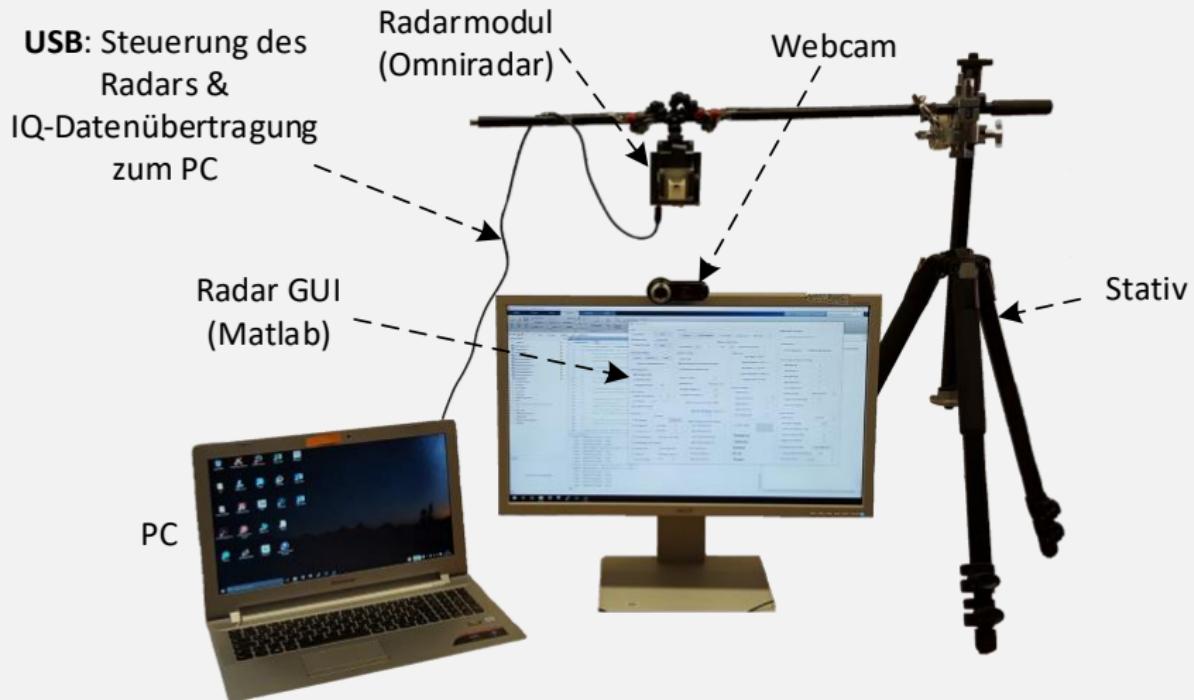
Zu klassifizierende Gesten:

| Geste | Index |
|---------------------------|-------|
| Stuhlbewegung nach hinten | 1 |
| Stuhlbewegung nach vorne | 2 |
| Ziehen | 3 |
| Drücken | 4 |
| Winken | 5 |

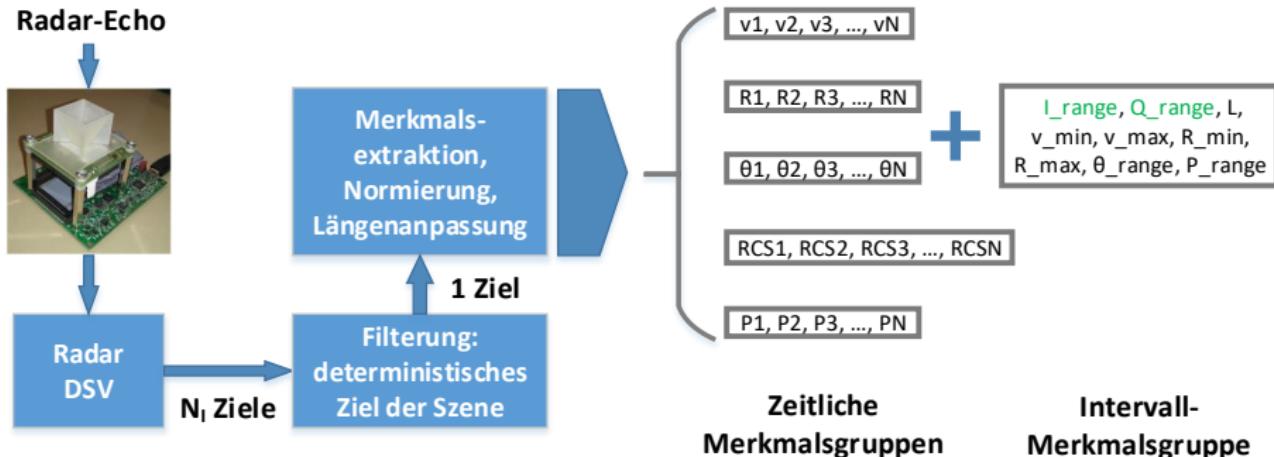
LCS-FMCW Wellenform:

| Parameter | Wert |
|-------------------------|-----------------------------|
| # Chirps | 64 |
| T_{up} | 1 ms |
| B | 7 GHz |
| f_0 | 57 GHz |
| ΔR | 2,14 cm |
| Δv_r | $0,04 \text{ m s}^{-1}$ |
| $v_{r,\text{max.u.a.}}$ | $\pm 1,21 \text{ m s}^{-1}$ |
| $R_{\text{max.u.a.}}$ | 2,14 m |

Messaufbau



DSV-Blockdiagramm und Merkmale



- Vorverarbeitung: MTI-Filter
- Fenster: Chebyshev ($\beta = 100$ dB)
- Detektor: OSCA-CFAR, Peak-Det. & binäre 2/2 Integration
- Estimator: Jacobsen et al. [JK07] auf Fenster angepasst

Ergebnisse:

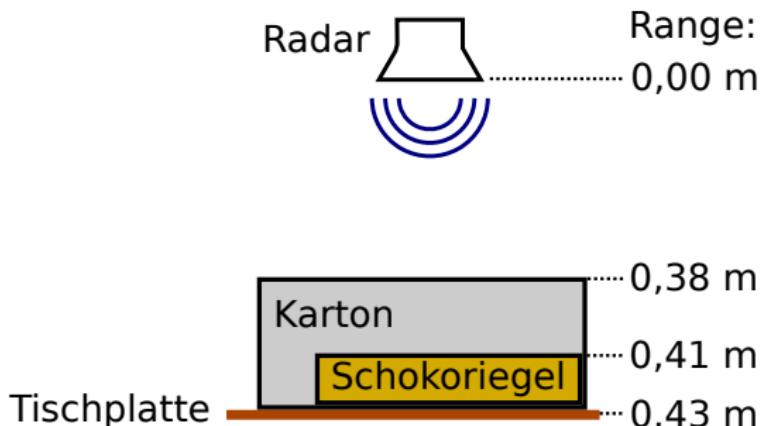
9-Nächster-Nachbar-Klassifikator

- 28 Merkmale iterativ via Battacharyya-Abstand ausgewählt gemäß des Merkmals, das relativ zu den schon vorhandenen am Besten ist:
 $v_{\text{opt}} = [v_{12}, v_{14}, v_{17}, v_{19}, R_1, R_2, R_4, R_6, R_7, R_{19}, R_{21}, R_{23}, R_{25}, R_{28}, R_{29}, R_{30}, R_{31}, R_{32}, R_{34}, R_{35}, R_{36}, R_{37}, I_{\text{range}}, Q_{\text{range}}, v_{\min}, v_{\max}, R_{\min}, R_{\max}]$
- Min. 7/9 N.N. selber Klasse gefordert; sonst Rückweisung
- 40 Trainings- und 20 Testmessungen je Geste, 2 Personen:

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 (Reject) | |
|---|------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|---|
| 1 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | % |
| 2 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | % |
| 3 | 0 | 0 | 86,67 | 0 | 13,33 | 0 | % |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 93,33 | 0 | 6,67 | % |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | % |
| 0 | 0 | 6,25 | 18,75 | 0 | 0 | 75 | % |

Mittlere gesamte Erfolgsquote: **96 %**

Automatisierungstechnik: Through-the-box detection

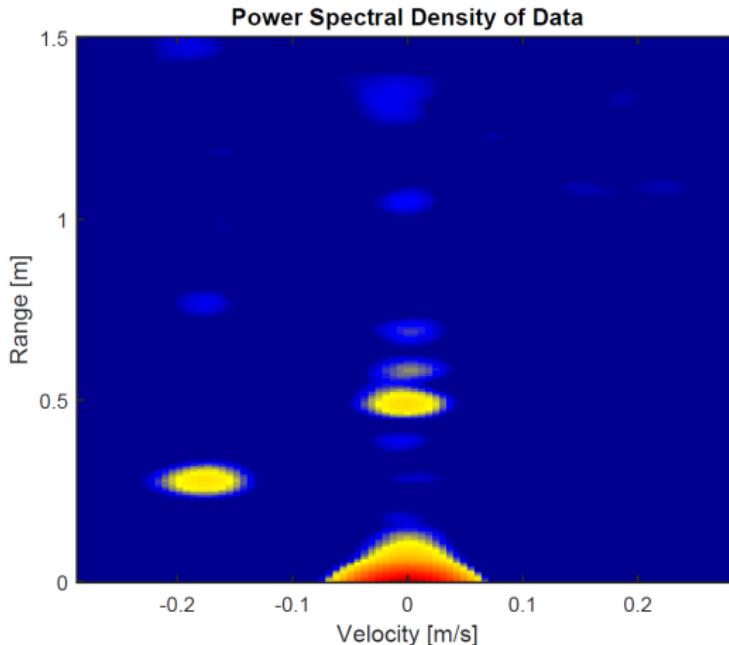


- Detektion von Schokoriegeln in einem Karton
 - Grenzbereich der Auflösung des Radars ($\Delta R_{\text{theo}} = 2,14 \text{ cm}$)
- Demo: aufgezeichnete Messung wird in RadarGUI abgespielt.

Zusammenfassung der Ergebnisse

- Entwurf zum Aufbau eines low-cost Nahbereichsrads für kommerzielle Einsatzzwecke erarbeitet:
 - Wellenform
 - Transceiver-Architektur
 - Signalverarbeitungskette
- Dem Entwurf folgend wurde ein Demonstrator aufgebaut
 - HF-Front-End, DDS, BB-Filterung mit COTS-Komponenten
 - Toolbox zur Radarsignalverarbeitung in MATLAB implementiert
 - GUI zur Applikationsanalyse
- Mit dem Demonstrator wurde gezeigt, dass rein Radar-basierte Klassifikation menschlicher Hand- und Körpergesten mit hohen Klassifikationsraten möglich ist
- Des weiteren wurde die Lösbarkeit von Anwendungen in der Automatisierungstechnik demonstriert

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!





Johannes Fink und Friedrich K Jondral. "Short Paper: A Numerical Comparison of Chirp Sequence versus OFDM Radar Waveforms". In: *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2015 IEEE*. IEEE. 2015.



Johannes Fink und Friedrich K Jondral. "Comparison of OFDM Radar and Chirp Sequence Radar". In: *Radar Symposium (IRS), 2015 16th International*. Bd. 1. IEEE. 2015, S. 315–320.



E. Jacobsen und P. Kootsookos. "Fast, Accurate Frequency Estimators [DSP Tips Tricks]". In: *Signal Processing Magazine, IEEE* 24.3 (Mai 2007), S. 123–125. ISSN: 1053-5888.