

Workshop: Schallfeldbasierte Messverfahren -
vom Transducer bis zur praktischen Anwendung

Simultane Bestimmung der Plattendicke und Schallgeschwindigkeit mit codierten Ultraschallsignalen

M. Sc. Daniel A. Kiefer

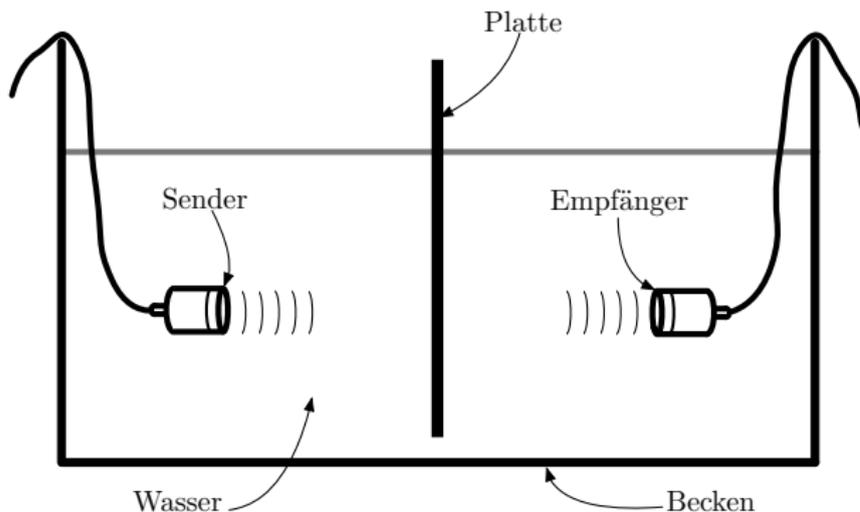
M. Sc. Michael Fink

Dr. techn. Stefan J. Rupitsch

Lehrstuhl für Sensorik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Drübeck, 11. Juli 2017

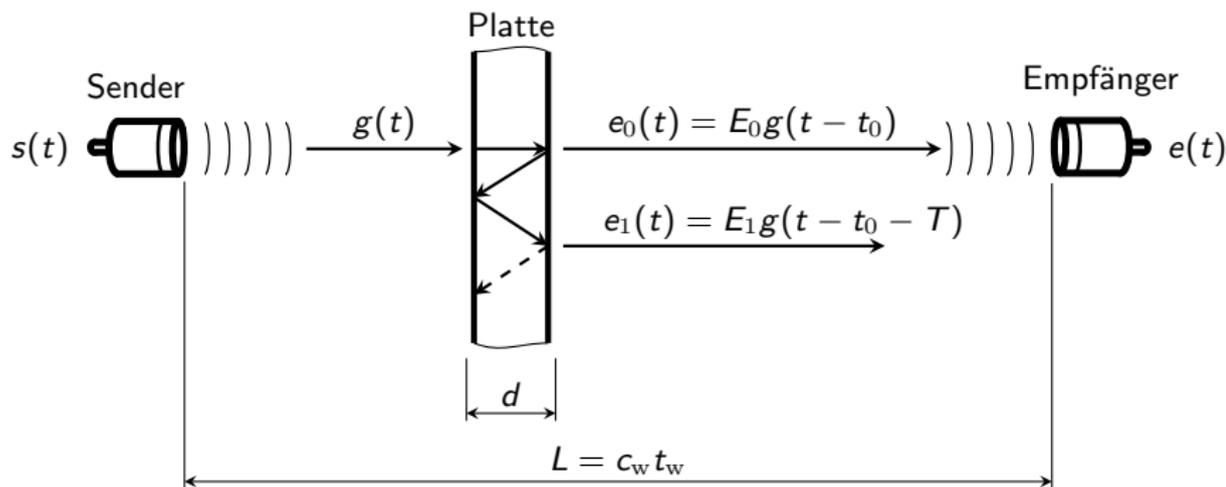
Motivation



Aufgabe: Dicke d und Schallgeschwindigkeit c der Platte *simultan* bestimmen

Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Ansteuersignale
- 3 Pulscompressionsverfahren
- 4 Messergebnisse
- 5 Zusammenfassung



Dicke und Schallgeschwindigkeit

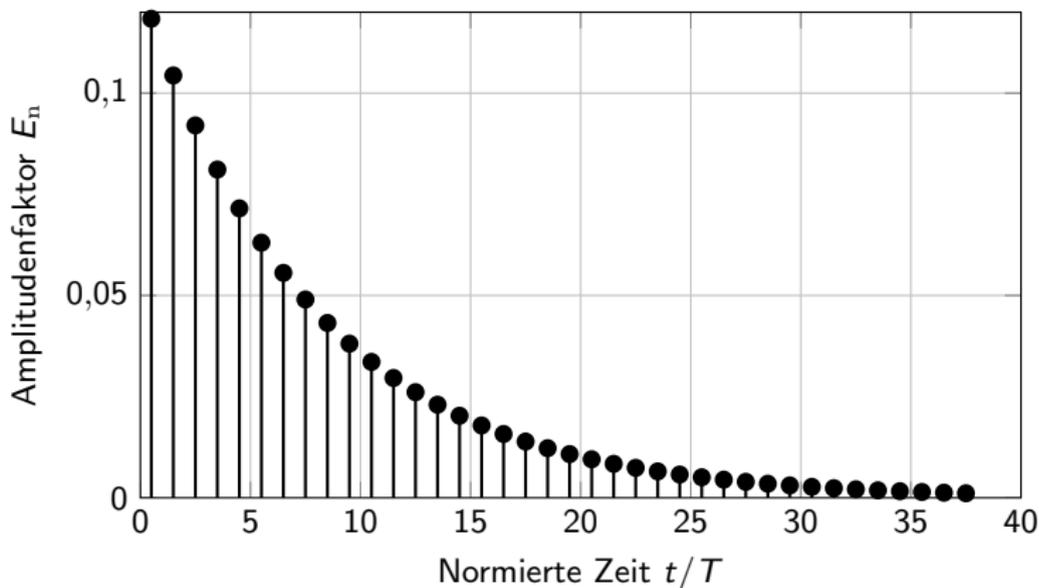
$$d = c_w \left(t_w - t_0 + \frac{T}{2} \right)$$

$$c = c_w \left(1 + 2 \frac{t_w - t_0}{T} \right)$$

- Referenzmessung: c_w und $t_w = L/c_w$
- bestimme: t_0 und $T = 2d/c$

Modell im Zeitbereich

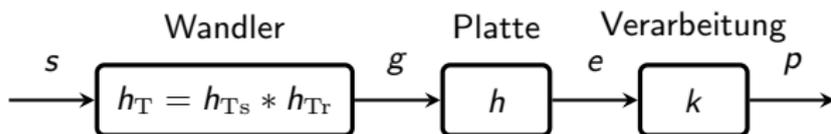
Impulsantwort $h(t)$ einer Stahlplatte in Wasser



- t_0 : Ankunftszeit des direkt transmittierten Schalls

- T : Verzögerung zwischen den Mehrfachreflexionen

Verbesserung der axialen Auflösung



h_{T_S} : Impulsantwort des Senders

h_{T_R} : Impulsantwort des Empfängers

h_T : kombinierte Impulsantwort der Wandler

h : Impulsantwort der Platte

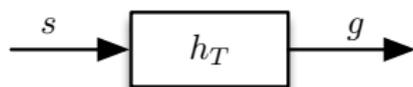
k : Filter zur Signalverarbeitung

Wahl von:

Ansteuersignal $s(t)$

Signalverarbeitung $k(t)$

Anforderungen an das Interrogationssignal $g(t)$



- ① hohe *Bandbreite* da die axiale Auflösung $\Delta t \approx \frac{1}{B_g}$
- ② hohe *Energie* für gutes SNR
 - ▶ Amplitude
 - ▶ Zeitdauer $D \times$ Bandbreite B

Ansteuersignale $s(t)$

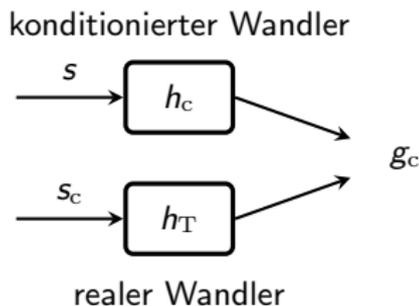
Pulse

- B groß
- D gering
 - axiale Auflösung gut
 - SNR niedrig

codierte Ansteuersignale

- hohes *Zeit-Bandbreite-Produkt* DB
 - SNR hoch
 - axiale Auflösung gut
- frequenz- / phasenmoduliert
- D groß: Pulscompression nötig

Konditionierung von Ansteuersignalen



$$g_c(t) = s_c(t) * h_T(t) = s(t) * h_c(t)$$



$$G_c(f) = S_c(f)H_T(f) = S(f)H_c(f)$$

$$\Rightarrow S_c(f) = \frac{S(f)H_c(f)}{H_T(f)}$$

Wiener-Filter zur Entfaltung (nur Amplitude):

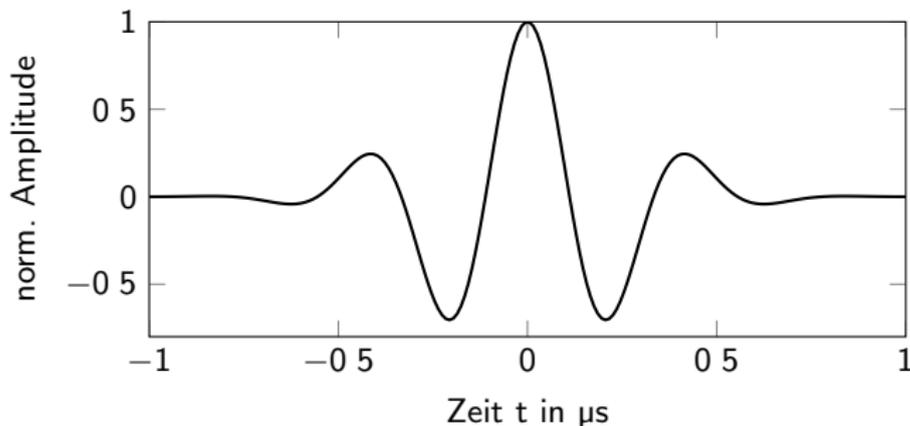
$$S_c(f) \approx S(f) \frac{|H_c(f)H_T^*(f)|}{|H_T(f)|^2 + \beta|H_T(f)|^{-2}}$$

- Modell für "konditionierten Wandler" $h_c(t) \circ \bullet H_c(f)$ benötigt

Konditionierung von Ansteuersignalen

- Gauß-Puls als Modell für den “konditionierten Wandler”

$$h_c(t) = e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}} \cos(2\pi f_c t)$$



- Vorteil: Bandbreite kann beliebig vorgegeben werden

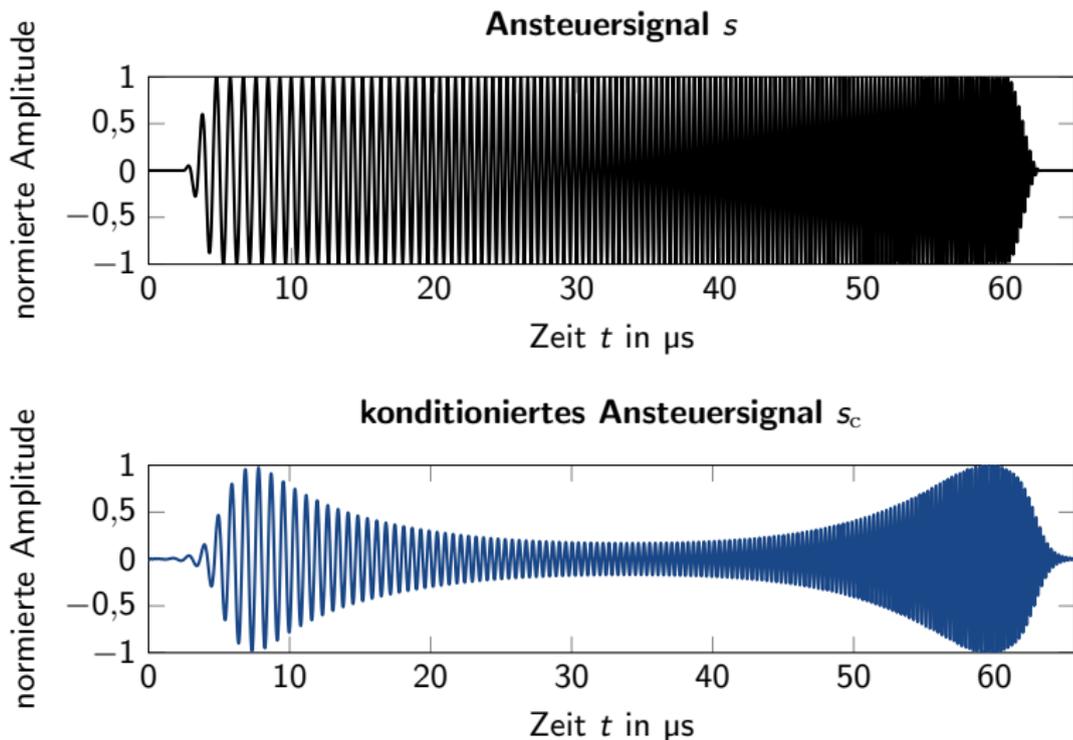


Abbildung: Chirpsignal mit $f_M = 2,4 \text{ MHz}$, $B = 3,0 \text{ MHz}$,
 $D = 60 \mu\text{s}$ und Tukey-Fenster

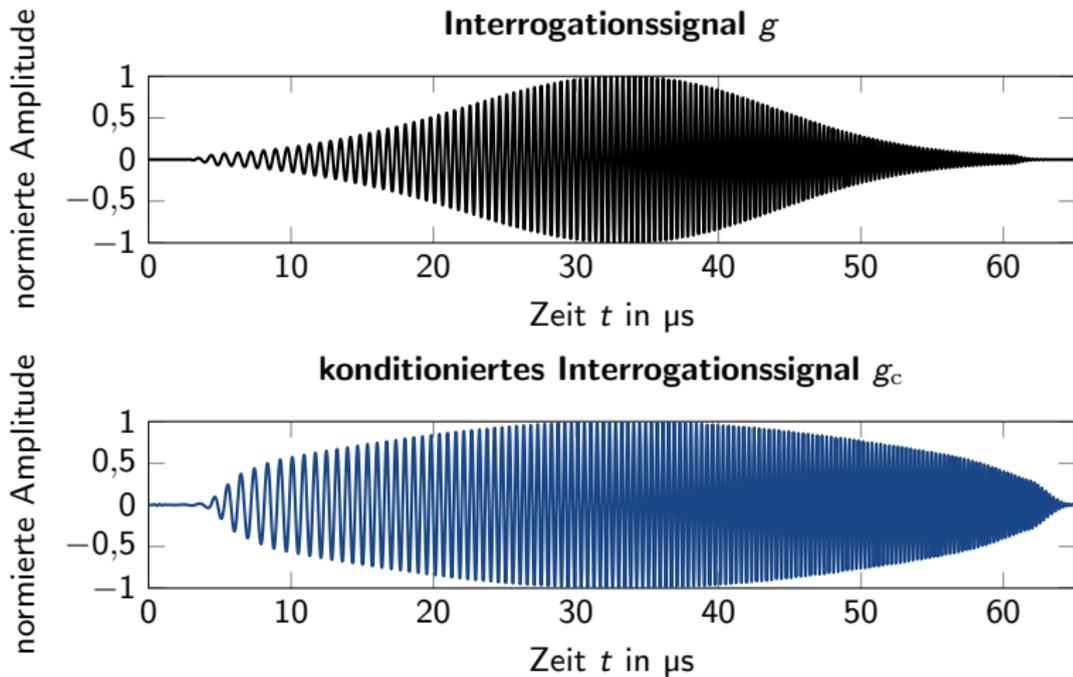


Abbildung: zu $s(t)$ und $s_c(t)$ zugehörige Interrogationssignale

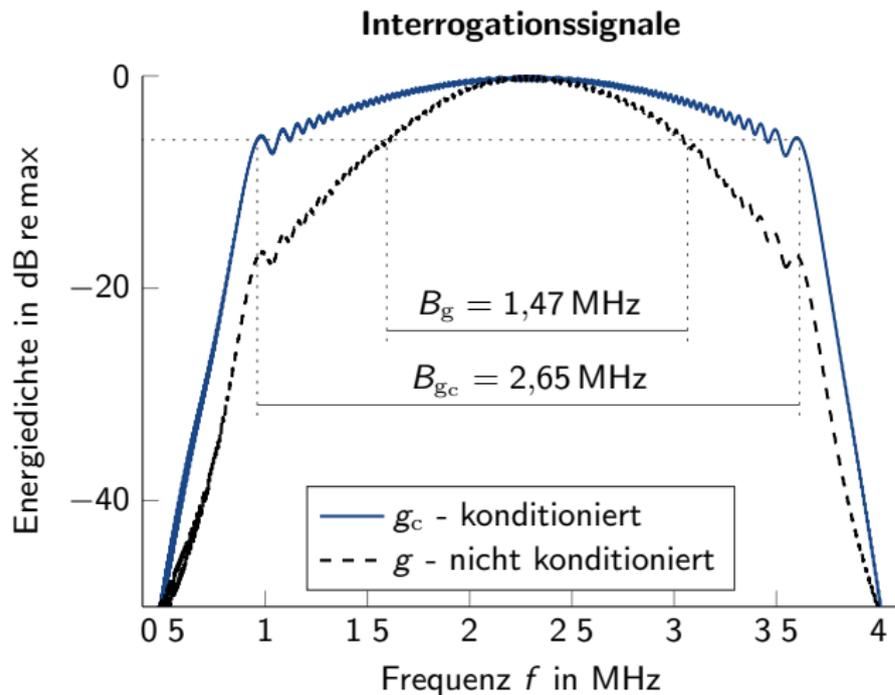


Abbildung: Energiedichtespektren der Interrogationssignale g und g_c

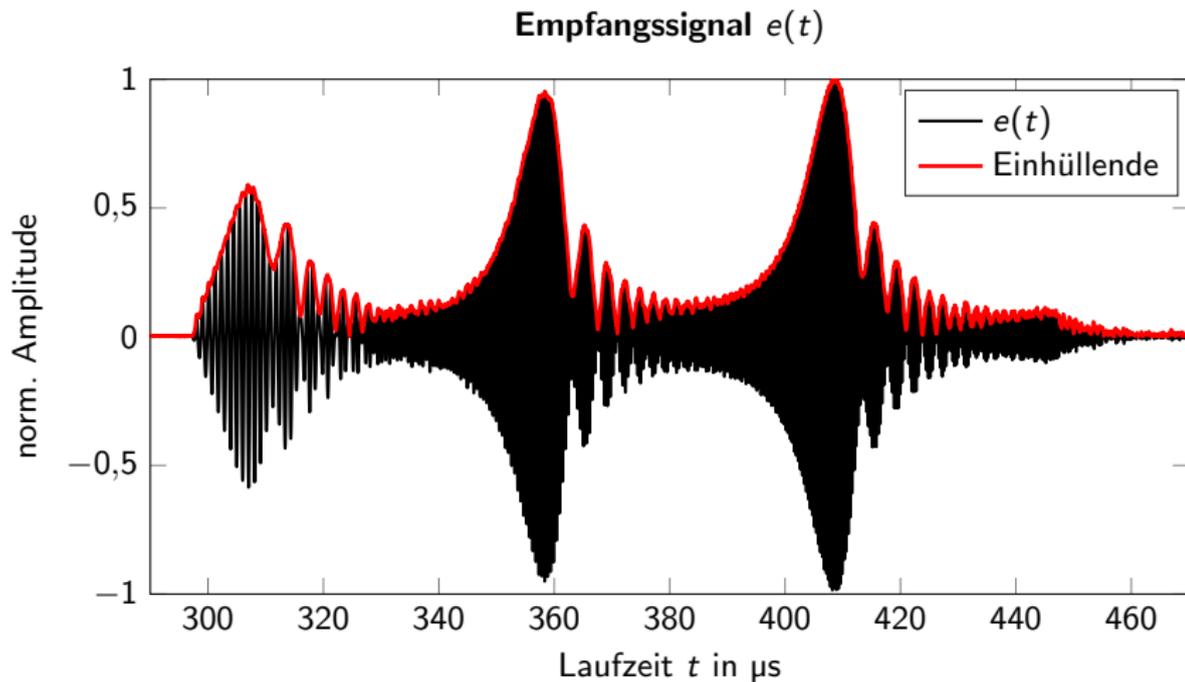
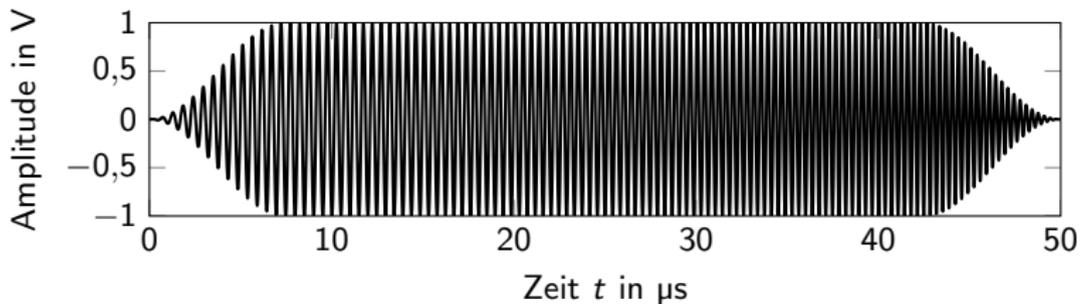


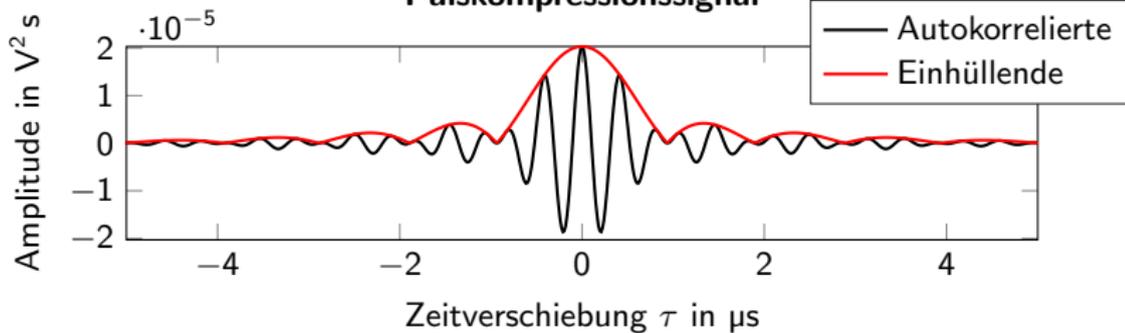
Abbildung: Gemessenes Empfangssignal bei Transmission des konditionierten Chirps durch eine Stahlplatte in Wasser.

Pulskompression

*„Not with a Bang, but a Chirp“
- B. M. Oliver (Bell Lab. Mem. 1951)*

Sendesignal $s(t)$ 

Pulskompressionssignal



- Auflösung

- Nebenkeulenpegel (SLL)

Pulskompressionsfilter

- Korrelationsfilter (signalangepasstes oder konjugiertes Filter)

$$K(f) = S^*(f)$$

- Korrelationsfilter mit Fensterung

$$K(f) = w(f)S^*(f), \text{ mit reeller Fensterfunktion } w(f)$$

- Wiener-Filter mit Fensterung

$$K(f) = \frac{w(f)G^*(f)}{|G(f)|^2 + 1/\text{SNR}(f)}$$

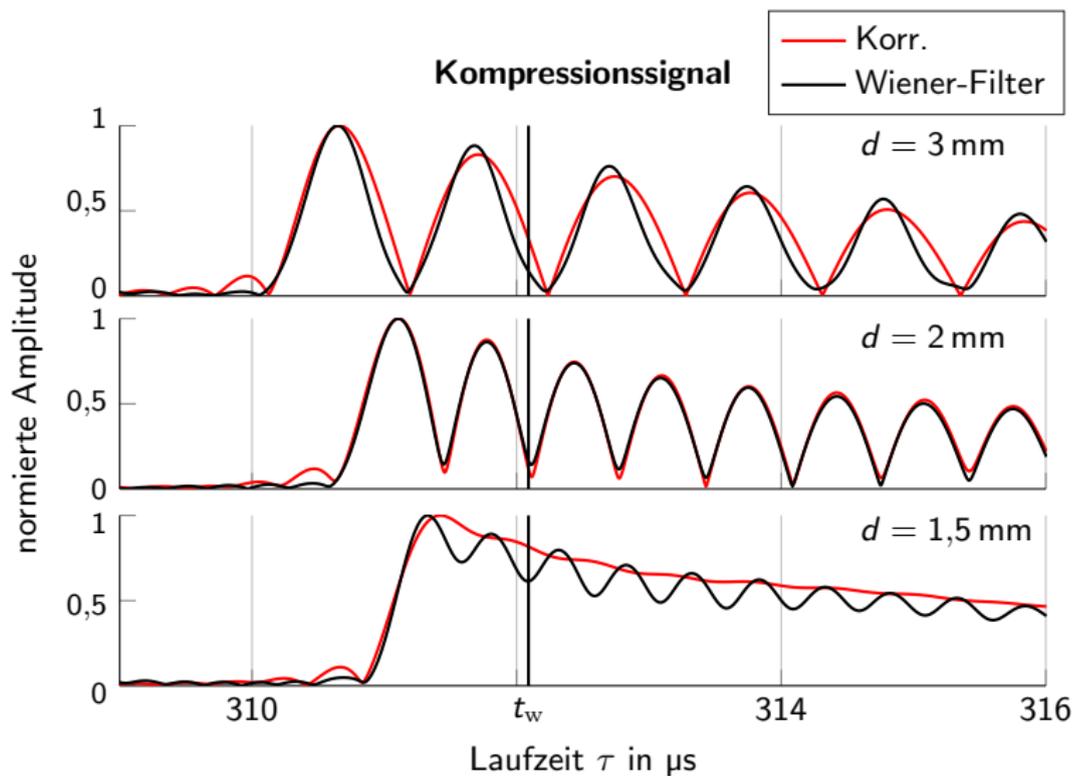
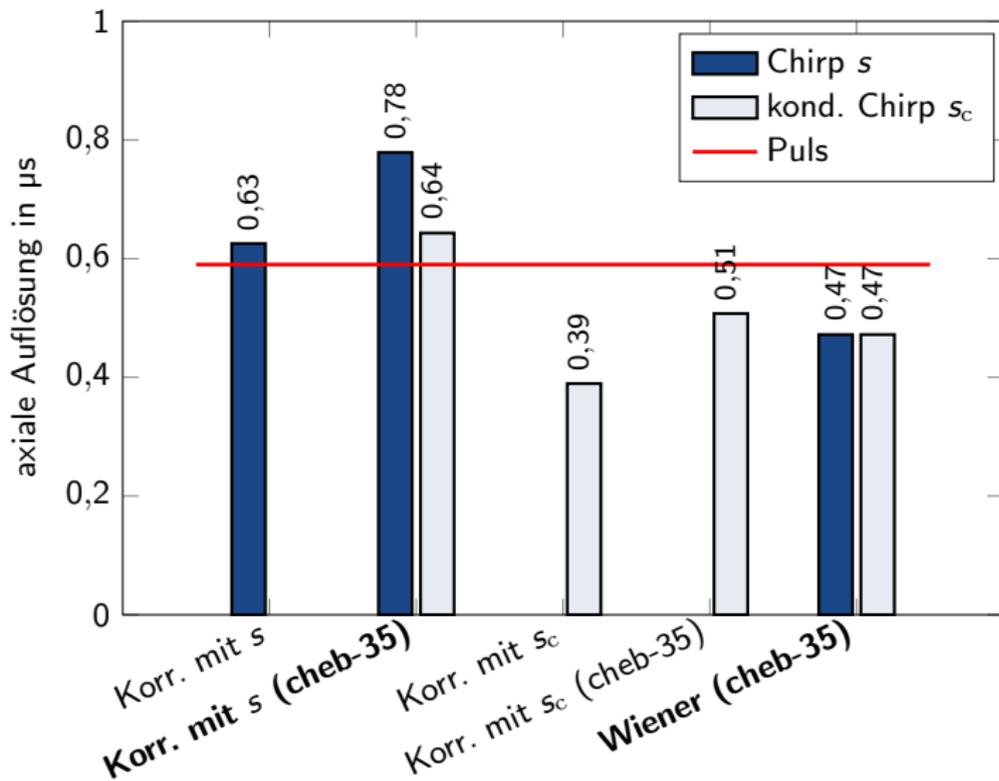
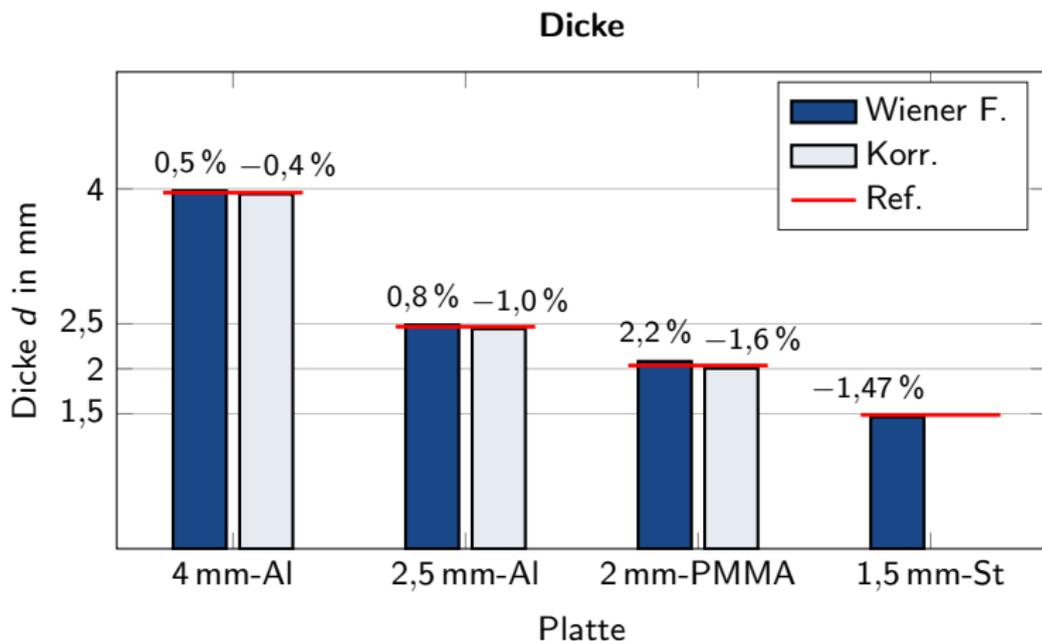


Abbildung: Empfangssignale nach der Pulskompression für drei verschiedene Stahlplatten

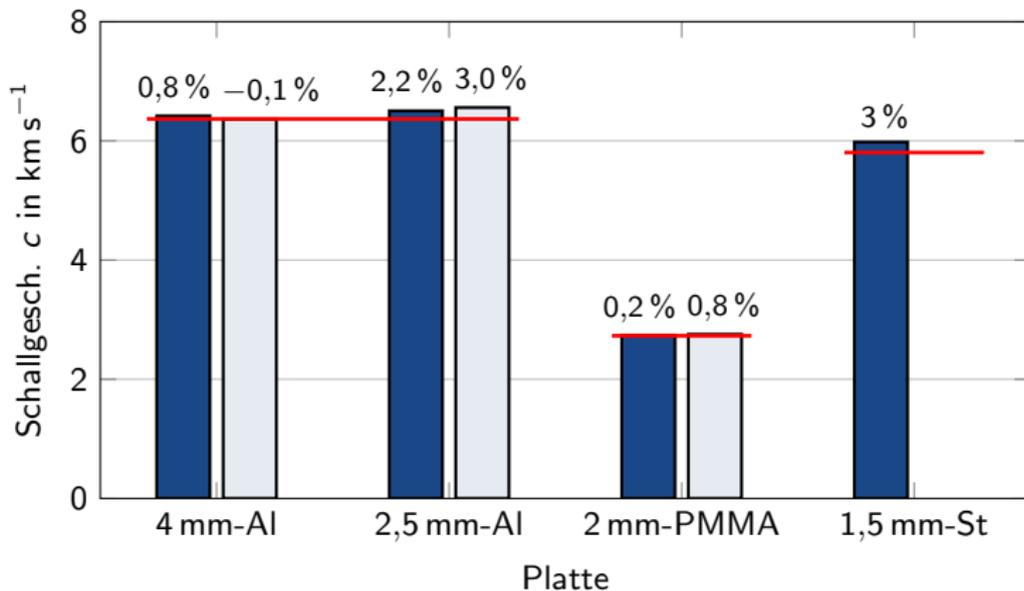
Vergleich der axialen Auflösung



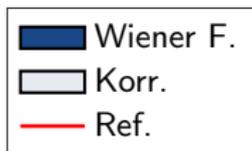


Relative Abweichung zur Referenz (Mikrometerschraube, Messungengenauigkeit ca. 0,02 mm) gegeben in Prozent.

Schallgeschwindigkeit



Relative Abweichung zur Referenz gegeben in Prozent.
 Referenz: 10 MHz-Kontaktwandler und
 Mikrometerschraube



Zusammenfassung

- Codierte Ansteuersignale
 - ▶ erhöhtes Signal-Rausch-Verhältnis
- Konditionierung
 - ▶ erhöht axiale Auflösung
 - ▶ Kompromiss: Signal-Rausch-Verhältnis \leftrightarrow axiale Auflösung
- Pulskompression
 - ▶ Wiederherstellen der axialen Auflösung eines zeitlich langen Sendesignals
 - ▶ Kompromiss: axiale Auflösung \leftrightarrow Nebenkeulenpegel

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

