

Promotionsvortrag

# Elastodynamische quasi-geführte Wellen für die laufzeitbasierte Ultraschall-Durchflussmessung

Daniel A. Kiefer

Lehrstuhl für Sensorik  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

28.03.2022 – Erlangen



Friedrich-Alexander-Universität  
Technische Fakultät

**DIEHL**  
Metering

# Durchfluss: Volumen pro Zeit



Wasserversorgung



Lebensmittelindustrie



Pipeline



Prozessüberwachung



# Durchfluss: Volumen pro Zeit



Wasserversorgung



Lebensmittelindustrie

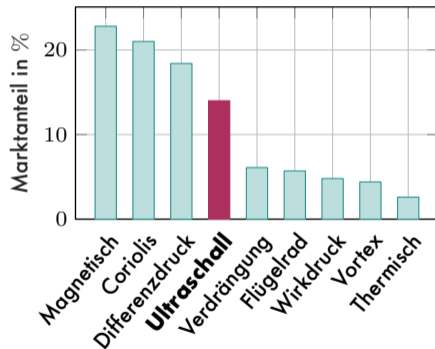


Pipeline



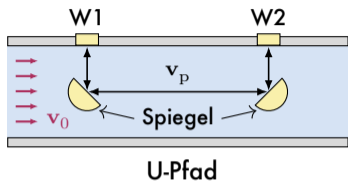
Prozessüberwachung

Anteile unterschiedlicher Messprinzipien  
Welt-Jahresumsatz:  $\approx 9$  Mrd. USD<sup>1</sup>



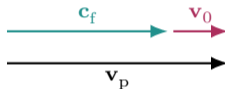
<sup>1</sup> Jahresumsatz: Projektion für 2022. Marktanteile: Schätzung im Jahr 2015 entsprechend M. A. Linnert. „Energieeffiziente Felderzeugung für die magnetisch-induktive Durchflussmessung“. Dissertation. Erlangen: FAU Erlangen-Nürnberg, März 2020.

# Funktionsprinzip der Ultraschall-Durchflussmessung

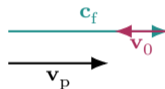


- Schallgeschwindigkeit  $c_f$  und Fließgeschwindigkeit  $v_0$  ergeben die Strahlgeschwindigkeit  $v_p$

flussabwärts:

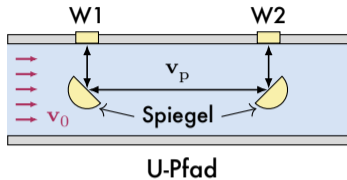


flussaufwärts:

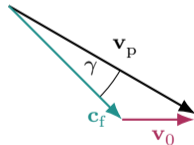
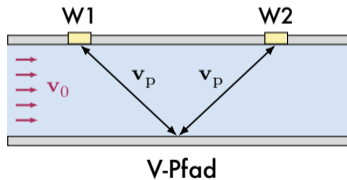
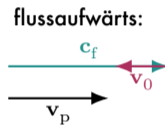
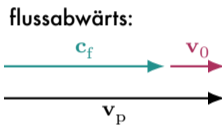


Messen der Laufzeitdifferenz  $\Delta T$  : flussaufwärts – flussabwärts

# Funktionsprinzip der Ultraschall-Durchflussmessung



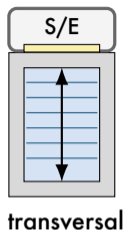
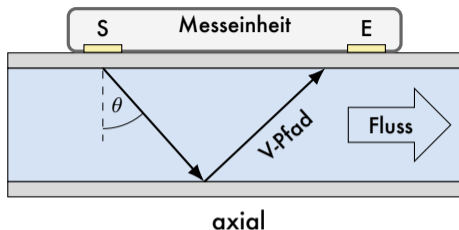
- Schallgeschwindigkeit  $c_f$  und Fließgeschwindigkeit  $v_0$  ergeben die Strahlgeschwindigkeit  $v_p$



- Änderung der
  - Ausbreitungsrichtung
  - Geschwindigkeit  $|v_p|$

Messen der Laufzeitdifferenz  $\Delta T$  : flussaufwärts – flussabwärts

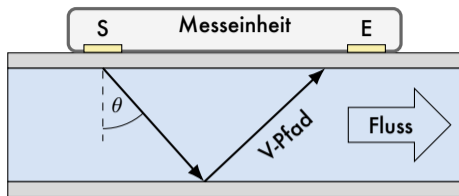
# Untersuchte Ausführung



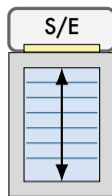
## Vorteile/Nachteile:

- + modular
- + kein Druckverlust
- + garantiert dicht
- Prozessunterbrechung

# Untersuchte Ausführung



axial



transversal

Vorteile/Nachteile:

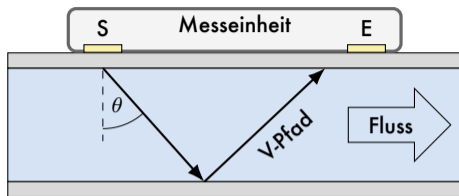
- + modular
- + kein Druckverlust
- + garantiert dicht
- Prozessunterbrechung

Herausforderung:

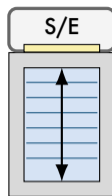
**1** Mechanik der Rohrwand

**2** Temperatur

# Untersuchte Ausführung



axial



transversal

Vorteile/Nachteile:

- + modular
- + kein Druckverlust
- + garantiert dicht
- Prozessunterbrechung

Herausforderung:

**1** Mechanik der Rohrwand

**2** Temperatur

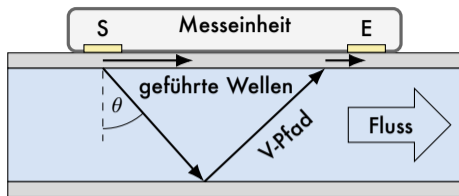
üblicher Ansatz:

ebene Wellen  
→ inakkurat

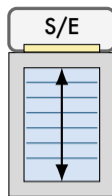
FEM<sup>1</sup>  
→ aufwändig

<sup>1</sup> Finite Elemente Methode

# Untersuchte Ausführung



axial



transversal

Vorteile/Nachteile:

- + modular
- + kein Druckverlust
- + garantiert dicht
- Prozessunterbrechung

Herausforderung:

**1** Mechanik der Rohrwand

üblicher Ansatz:

ebene Wellen  
→ inakkurat

FEM<sup>1</sup>  
→ aufwändig

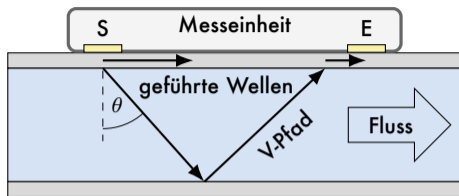
Lösungsansatz:

Entwurf anhand **natürlicher Bewegung** der Rohrwand (geführte Wellen)

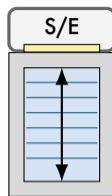
**2** Temperatur

<sup>1</sup> Finite Elemente Methode

# Untersuchte Ausführung



axial



transversal

Vorteile/Nachteile:

- + modular
- + kein Druckverlust
- + garantiert dicht
- Prozessunterbrechung

Herausforderung:

**1** Mechanik der Rohrwand

üblicher Ansatz:

ebene Wellen  
→ inakkurat

FEM<sup>1</sup>  
→ aufwändig

Lösungsansatz:

Entwurf anhand **natürlicher Bewegung** der Rohrwand (geführte Wellen)

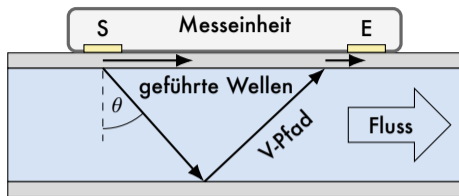
**2** Temperatur

messen und kompensieren  
→ zusätzlicher Aufwand

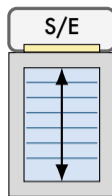
<sup>1</sup> Finite Elemente Methode



# Untersuchte Ausführung



axial



transversal

Vorteile/Nachteile:

- + modular
- + kein Druckverlust
- + garantiert dicht
- Prozessunterbrechung

Herausforderung:

**1** Mechanik der Rohrwand

üblicher Ansatz:

ebene Wellen  
→ inakkurat

FEM<sup>1</sup>  
→ aufwändig

**2** Temperatur

messen und kompensieren  
→ zusätzlicher Aufwand

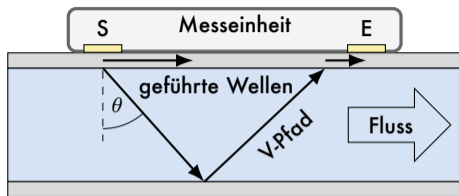
Lösungsansatz:

Entwurf anhand **natürlicher Bewegung** der Rohrwand (geführte Wellen)

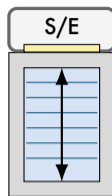
Temperatur bei Entwurf einbeziehen

<sup>1</sup> Finite Elemente Methode

# Untersuchte Ausführung



axial



transversal

Vorteile/Nachteile:

- + modular
- + kein Druckverlust
- + garantiert dicht
- Prozessunterbrechung

Herausforderung:

**1** Mechanik der Rohrwand

**2** Temperatur

üblicher Ansatz:

ebene Wellen  
→ inakkurat

FEM<sup>1</sup>  
→ aufwändig

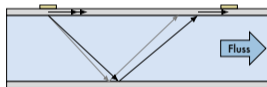
messen und kompensieren  
→ zusätzlicher Aufwand

Lösungsansatz:

Entwurf anhand **natürlicher Bewegung** der Rohrwand (geführte Wellen)

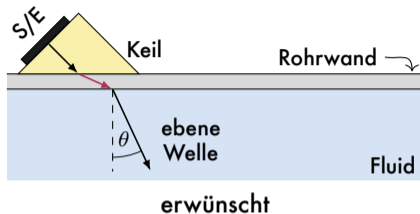
Temperatur bei Entwurf einbeziehen

⇒ Modellierung für vorgeschlagene Ausführung



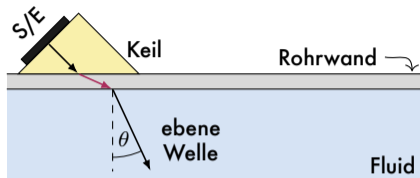
- 1 Einleitung
- 2 Mechanik der Rohrwand
- 3 Fließendes Medium und Temperatur
- 4 Validierung am Prototypen
- 5 Fazit

# Mechanik der Rohrwand

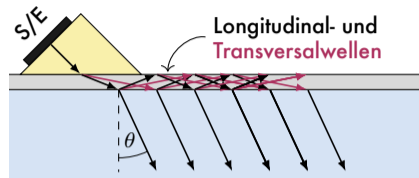


- übliches Modell
- starke Vereinfachung
  - viele Fälle nicht abbildbar (z.B. Resonanz)
- schwache Transmission

# Mechanik der Rohrwand



erwünscht



tatsächlich

- übliches Modell
- starke Vereinfachung
  - viele Fälle nicht abbildbar (z.B. Resonanz)
- schwache Transmission

- **Geführte Wellen**
- Resonanzen der Rohrwand
- starke Transmission

**Im Folgenden:**

Basis zur Modellierung

# Lambwellen: Geführte Wellen in einer freien Platte



Querschnitt durch Platte

- harmonischer, ebener Wellenansatz für die **Teilchenverschiebung**:

$$\mathbf{u}(x, y, t) = \mathbf{u}(y) e^{i(k_x x - 2\pi f t)}$$

→  $f$ : Frequenz,  $k_x$ : Wellenzahl

- Eigenwertproblem für  $\mathbf{u}(y)$ ,  $k_x$ :

## Dispersion

$$k_x = k_x(f) \quad \text{nichtlinear}$$

# Lambwellen: Geführte Wellen in einer freien Platte



Querschnitt durch Platte

- harmonischer, ebener Wellenansatz für die **Teilchenverschiebung**:

$$\mathbf{u}(x, y, t) = \mathbf{u}(y) e^{i(k_x x - 2\pi f t)}$$

→  $f$ : Frequenz,  $k_x$ : Wellenzahl

- Eigenwertproblem für  $\mathbf{u}(y)$ ,  $k_x$ :

## Dispersion

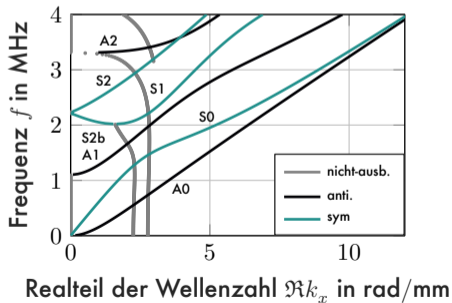
$$k_x = k_x(f) \quad \text{nichtlinear}$$

**A0**

**S0**



**A0**: anti-symmetrisch, **S0**: symmetrisch



# Wellengeschwindigkeiten

Wellenpaket:  $c_p < c_e$

Phasengeschwindigkeit  $c_p$  vs. Energiegeschwindigkeit  $c_e$



# Wellengeschwindigkeiten

Wellenpaket:  $c_p < c_e$

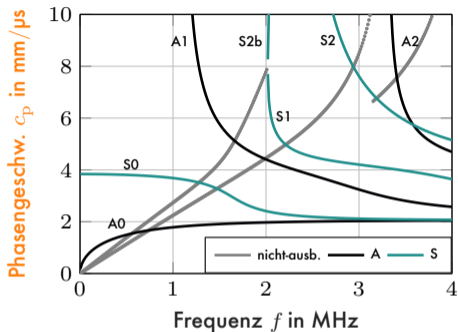
Phasengeschwindigkeit  $c_p$  vs. Energiegeschwindigkeit  $c_e$

# Wellengeschwindigkeiten

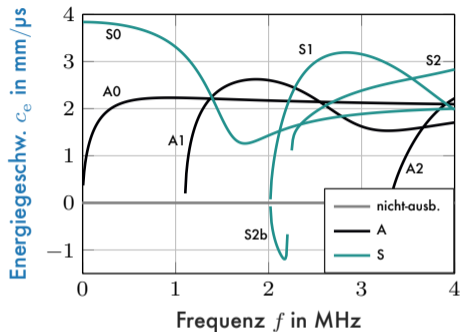
Wellenpaket:  $c_p > c_e$

Phasengeschwindigkeit  $c_p$  vs. Energieschwindigkeit  $c_e$

# Wellengeschwindigkeiten



→ Durchflussmessung

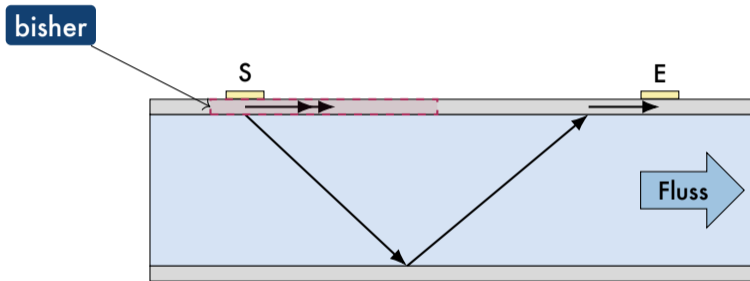


→ Temperatureinfluss

⇒

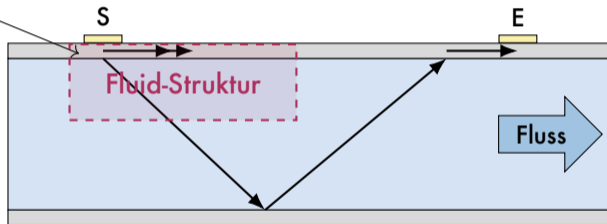
**Laufzeitmodell**  
leicht zu invertieren

# Überblick: Fluid-Struktur-Interaktion



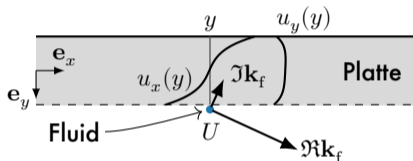
# Überblick: Fluid-Struktur-Interaktion

als nächstes



# Quasi-geführte Wellen

- Verschiebungsfeld:



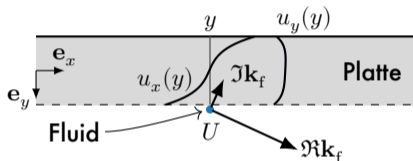
## Im Vergleich zur freien Platte:

skalare zusätzliche Unbekannte:

→ **Amplitude**  $U$

# Quasi-geführte Wellen

- Verschiebungsfeld:



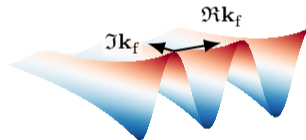
## Im Vergleich zur freien Platte:

skalare zusätzliche Unbekannte:

→ **Amplitude**  $U$

a-priori:

**inhomogene ebene Welle im Fluid**



- komplexer Wellenvektor:  $\mathbf{k}_f = \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \end{bmatrix}$

# Berechnen von quasi-geführten Wellen<sup>2</sup>

- bestimme:

- Eigenfunktionen  $[u_x(y), u_y(y), U]^T$
- Eigenwerte  $k_x$

Wurzel-EWP in  $k_x$

⇒ nichtlineares  
Eigenwertproblem (EWP)

- abhängig von  $k_y = \sqrt{\kappa_f^2 - k_x^2}$

---

<sup>2</sup>D. A. Kiefer u. a. „Calculating the full leaky Lamb wave spectrum with exact fluid interaction“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 145.6 (Juni 2019), S. 3341–3350.



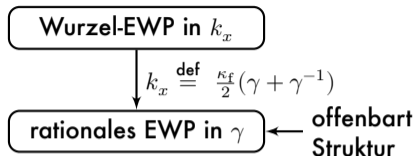
# Berechnen von quasi-geführten Wellen<sup>2</sup>

- bestimme:

- Eigenfunktionen  $[u_x(y), u_y(y), U]^T$
- Eigenwerte  $k_x$

⇒ nichtlineares  
Eigenwertproblem (EWP)

- abhängig von  $k_y = \sqrt{\kappa_f^2 - k_x^2}$



<sup>2</sup>D. A. Kiefer u. a. „Calculating the full leaky Lamb wave spectrum with exact fluid interaction“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 145.6 (Juni 2019), S. 3341–3350.

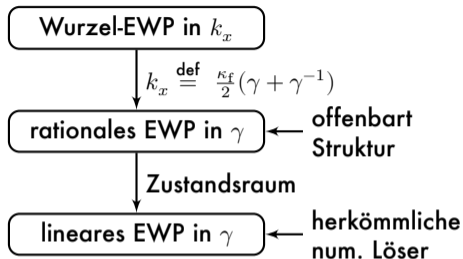
# Berechnen von quasi-geführten Wellen<sup>2</sup>

- bestimme:

- Eigenfunktionen  $[u_x(y), u_y(y), U]^T$
- Eigenwerte  $k_x$

⇒ nichtlineares  
Eigenwertproblem (EWP)

- abhängig von  $k_y = \sqrt{\kappa_f^2 - k_x^2}$



- ✓ exakte Fluid-Struktur-Interaktion
- ✓ bestimmt eindeutig  $[k_x, k_y]$
- ✓ zuverlässig und effizient

<sup>2</sup>D. A. Kiefer u. a. „Calculating the full leaky Lamb wave spectrum with exact fluid interaction“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 145.6 (Juni 2019), S. 3341–3350.

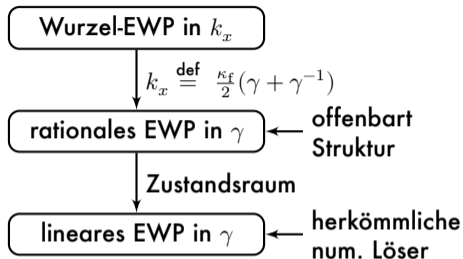
# Berechnen von quasi-geführten Wellen<sup>2</sup>

- bestimme:

- Eigenfunktionen  $[u_x(y), u_y(y), U]^T$
- Eigenwerte  $k_x$

⇒ nichtlineares  
Eigenwertproblem (EWP)

- abhängig von  $k_y = \sqrt{\kappa_f^2 - k_x^2}$



- ✓ exakte Fluid-Struktur-Interaktion
- ✓ bestimmt eindeutig  $[k_x, k_y]$
- ✓ zuverlässig und effizient

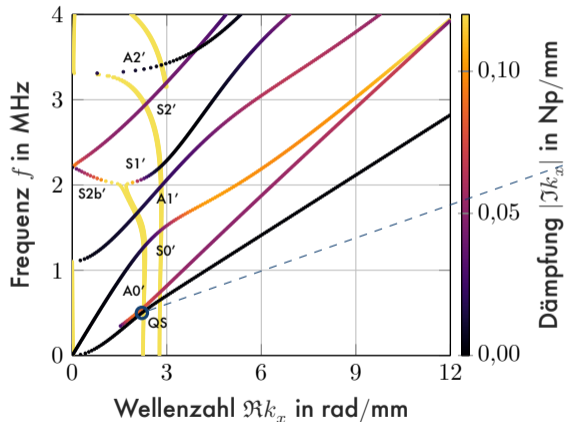
Dispersionskurven berechnen:

Char. Gl.   2 min

EWP   6 s

<sup>2</sup>D. A. Kiefer u. a. „Calculating the full leaky Lamb wave spectrum with exact fluid interaction“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 145.6 (Juni 2019), S. 3341–3350.

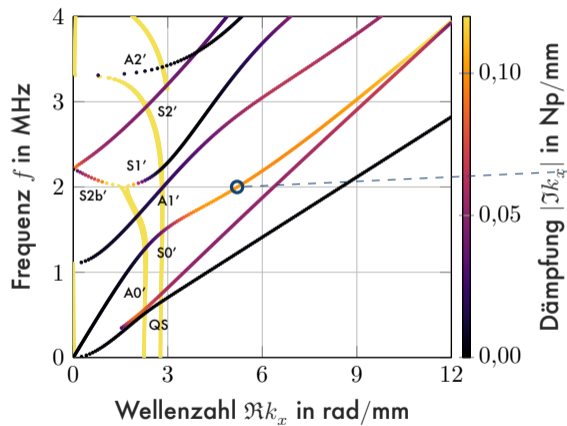
# Lösungen: quasi-geführte Wellen



QS

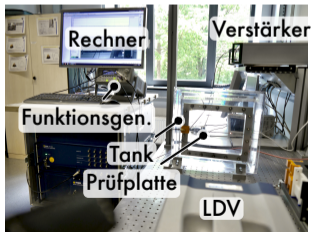
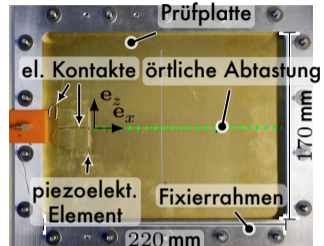
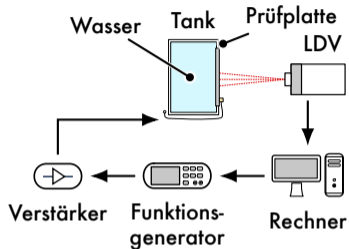
- Grenzschichtwelle
- Energietransport entlang der Platte

# Lösungen: quasi-geführte Wellen



$S_0'$

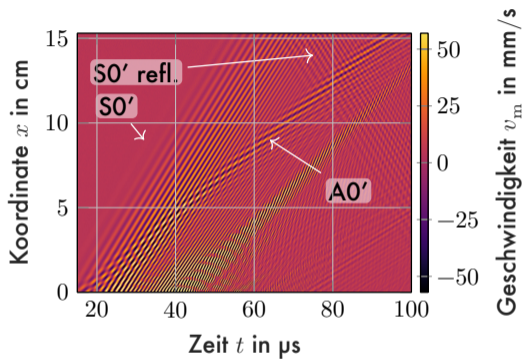
# Messung von Dispersionskurven



- aufgeklebte piezoelektrische Keramik
- Anregung: Chirp<sup>3</sup>
- Messung: Interferometer (LDV)

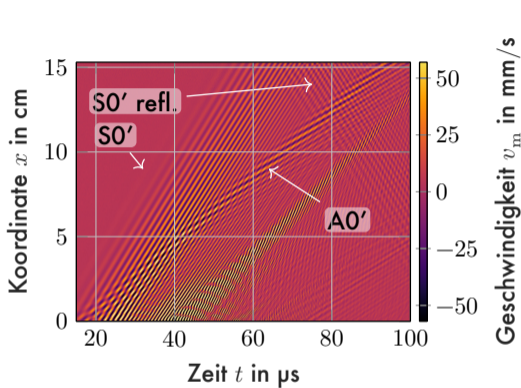
<sup>3</sup>D. A. Kiefer u. a. „Simultaneous Ultrasonic Measurement of Thickness and Speed of Sound in Elastic Plates Using Coded Excitation Signals“. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 64.11 (Nov. 2017), S. 1744–1757.

# Messergebnisse: 1,5 mm Stahlplatte und Wasser

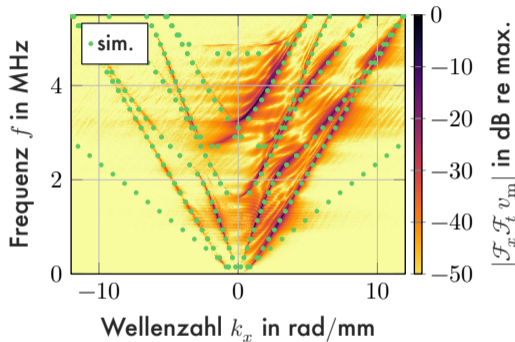


Geschwindigkeitsfeld

# Messergebnisse: 1,5 mm Stahlplatte und Wasser



Geschwindigkeitsfeld

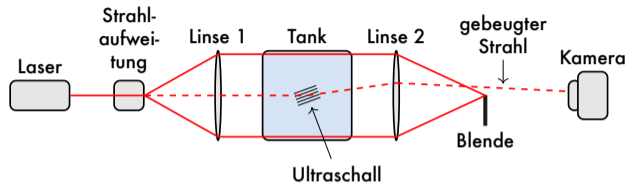


Geschwindigkeitsspektrum

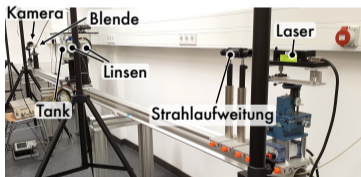
$\mathcal{F}_x \mathcal{F}_t$



# Schlierenfotografie abstrahlender Wellen<sup>4,5</sup>



Schlierenoptik: Skizze

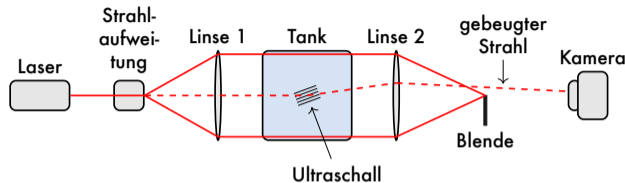


Schlierenoptik: Aufbau

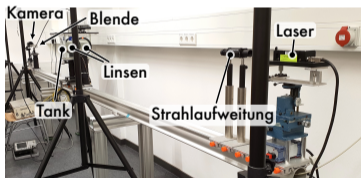
<sup>4</sup>K. Schmid. „Schlierenoptische Messungen zur Abstrahlung von Plattenwellen in ein Fluid“. Bachelorarbeit. FAU Erlangen-Nürnberg, Okt. 2018.

<sup>5</sup>S. Sivanesan. „Simulation und Einsatz räumlicher Lichtmodulatoren für Schlierenoptische Aufnahme von Ultraschall“. Masterarbeit. FAU Erlangen-Nürnberg, Aug. 2020.

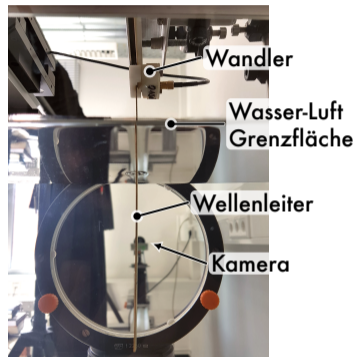
# Schlierenoptik abstrahlender Wellen<sup>4,5</sup>



Schlierenoptik: Skizze



Schlierenoptik: Aufbau

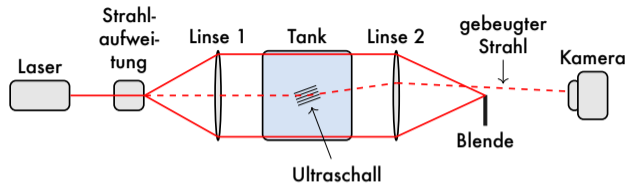


eingetauchter Wellenleiter

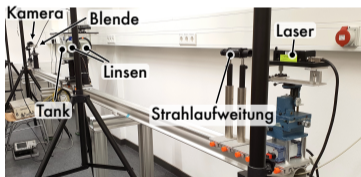
<sup>4</sup>K. Schmid. „Schlierenoptische Messungen zur Abstrahlung von Plattenwellen in ein Fluid“. Bachelorarbeit. FAU Erlangen-Nürnberg, Okt. 2018.

<sup>5</sup>S. Sivanesan. „Simulation und Einsatz räumlicher Lichtmodulatoren für Schlierenoptische Aufnahme von Ultraschall“. Masterarbeit. FAU Erlangen-Nürnberg, Aug. 2020.

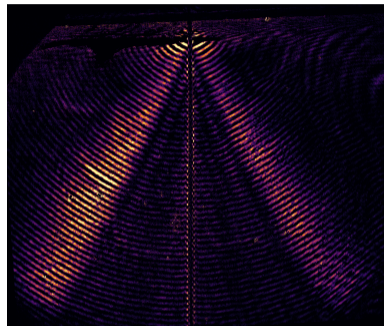
# Schlierenfotografie abstrahlender Wellen<sup>4,5</sup>



Schlierenoptik: Skizze



Schlierenoptik: Aufbau

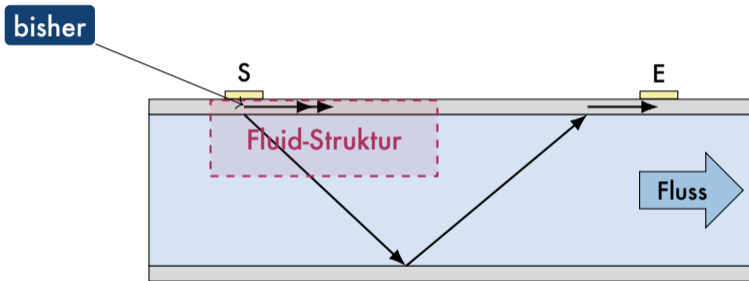


Schlierenbild: A0, 1 MHz, 1 mm Messing

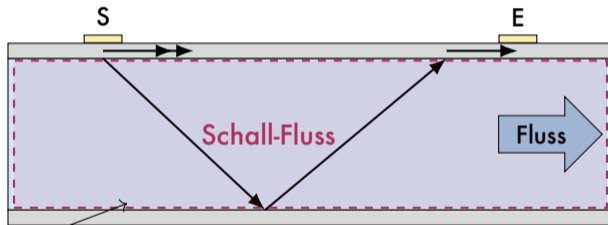
<sup>4</sup>K. Schmid. „Schlierenoptische Messungen zur Abstrahlung von Plattenwellen in ein Fluid“. Bachelorarbeit. FAU Erlangen-Nürnberg, Okt. 2018.

<sup>5</sup>S. Sivanesan. „Simulation und Einsatz räumlicher Lichtmodulatoren für Schlieren-optische Aufnahme von Ultraschall“. Masterarbeit. FAU Erlangen-Nürnberg, Aug. 2020.

# Überblick: Schall-Fluss-Interaktion

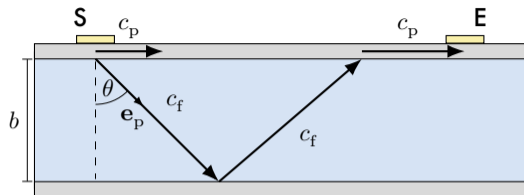


# Überblick: Schall-Fluss-Interaktion



als nächstes

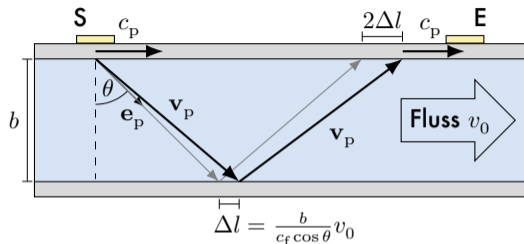
# Ultraschall-Laufzeit verschiedener Durchflussmesser



- **konstante** Laufzeit im Fluid
- **Änderung** der Pfadlänge  $\Delta l$

$$\Delta \tau = \frac{4b}{c_f \cos \theta} \frac{v_0}{c_p}$$

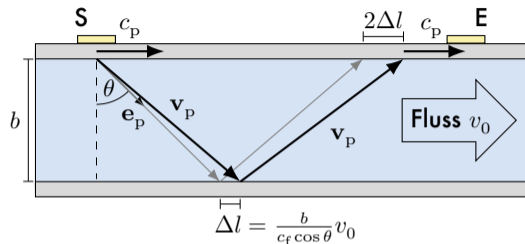
# Ultraschall-Laufzeit verschiedener Durchflussmesser



- **konstante** Laufzeit im Fluid
- **Änderung** der Pfadlänge  $\Delta l$

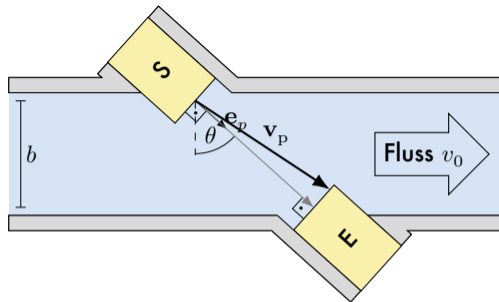
$$\Delta \tau = \frac{4b}{c_f \cos \theta} \frac{v_0}{c_p}$$

# Ultraschall-Laufzeit verschiedener Durchflussmesser



- **konstante** Laufzeit im Fluid
- **Änderung** der Pfadlänge  $\Delta l$

$$\Delta \tau = \frac{4b}{c_f \cos \theta} \frac{v_0}{c_p}$$

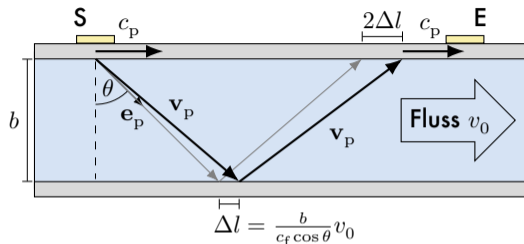


- **konstante** Pfadlänge (fast)
- **Änderung** der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_f \rightarrow v_p \cdot e_p$

$$\Delta \tau = \frac{4b}{\cos \theta} \frac{v_0 \sin \theta}{(c_f^2 - v_0^2 \sin^2 \theta)}$$



# Ultraschall-Laufzeit verschiedener Durchflussmesser

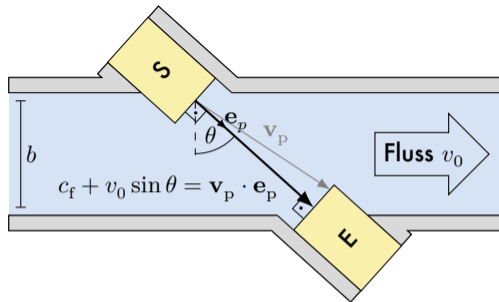


- **konstante** Laufzeit im Fluid
- **Änderung** der Pfadlänge  $\Delta l$

$$\Delta \tau = \frac{4b}{c_f \cos \theta} \frac{v_0}{c_p}$$

Abw.:  $\frac{v_0^2}{c_p^2} \approx 0,1\%$   
 $\leftrightarrow$

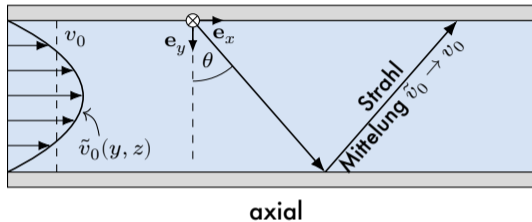
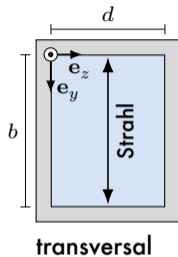
+ einfacher + genereller



- **konstante** Pfadlänge (fast)
- **Änderung** der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_f \rightarrow v_p \cdot e_p$

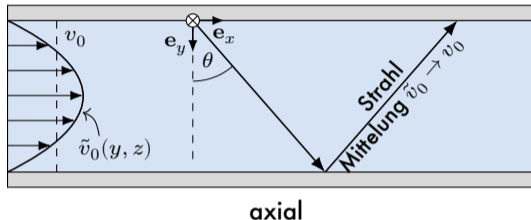
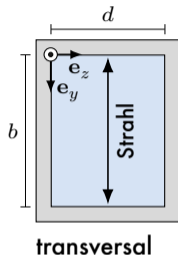
$$\Delta \tau = \frac{4b}{\cos \theta} \frac{v_0 \sin \theta}{(c_f^2 - v_0^2 \sin^2 \theta)}$$

# Bestimmen der Durchflussrate $Q$



Durchflussrate:  $Q \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^d \int_0^b \tilde{v}_0(y, z) dy dz = Kbd v_0$

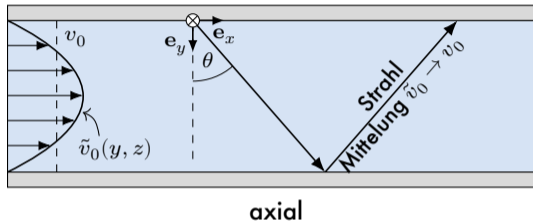
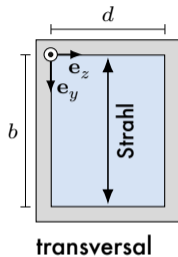
# Bestimmen der Durchflussrate $Q$



Durchflussrate:  $Q \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^d \int_0^b \tilde{v}_0(y, z) dy dz = Kbd v_0$

↑  
aus vorheriger Folie

# Bestimmen der Durchflussrate $Q$



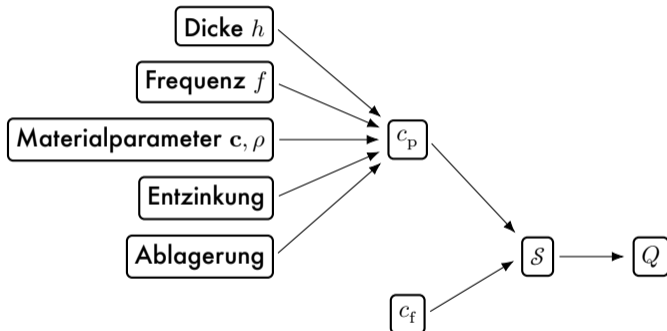
Durchflussrate:  $Q \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^d \int_0^b \tilde{v}_0(y, z) dy dz = Kbd v_0 \quad = \underbrace{\frac{1}{4} K d c_f c_p \cos \theta \Delta \tau}_{\text{Sensitivität } \mathcal{S}}$

$\uparrow$   
 aus vorheriger Folie

**Sensitivität  $\mathcal{S}$**

# Messfehler: Abhängigkeitsdiagramm

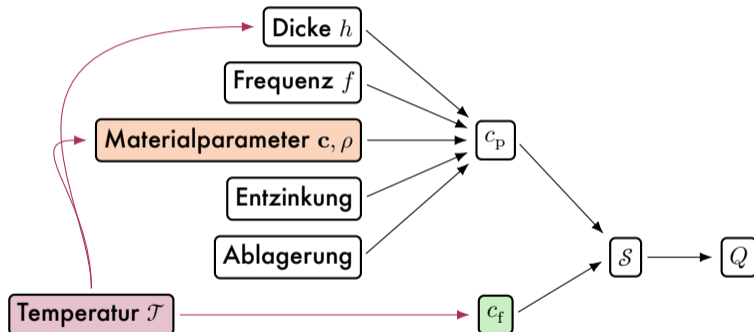
Mögliche Unsicherheiten in der Sensitivität  $S = \frac{1}{4}Kdc_f c_p \cos \theta = \frac{1}{4}Kdc_f \sqrt{c_p^2 - c_f^2}$



- Störungstheorie: analytische Ausdrücke für Einflüsse auf  $c_p$

# Messfehler: Abhängigkeitsdiagramm

Mögliche Unsicherheiten in der Sensitivität  $S = \frac{1}{4}Kdc_f c_p \cos \theta = \frac{1}{4}Kdc_f \sqrt{c_p^2 - c_f^2}$



- Störungstheorie: analytische Ausdrücke für Einflüsse auf  $c_p$

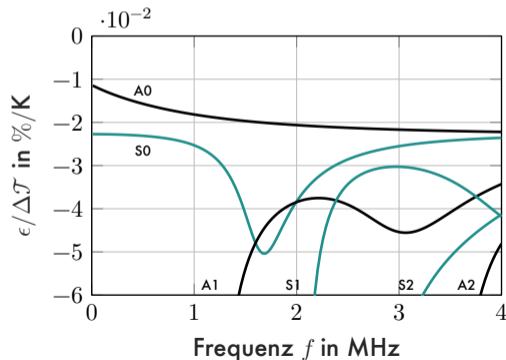
# Modellieren des Einflusses von Temperatur $\mathcal{T}$

**Rohrmaterial:**  $c_p(\mathcal{T}) = [1 + \epsilon(\mathcal{T})]c_p$

- mit  $\epsilon(\mathcal{T}) = \frac{1}{2} \frac{c_p}{c_e} \frac{E'}{E} \Delta\mathcal{T}$

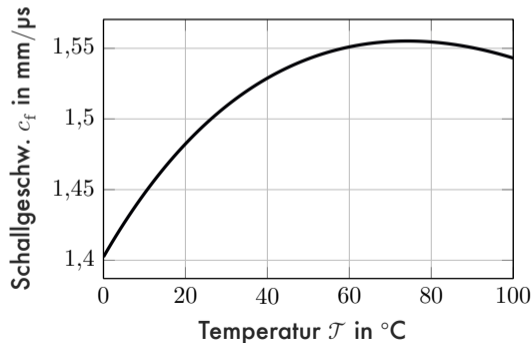
→  $\Delta\mathcal{T}$  : Temperaturänderung

→  $E$  : E-Modul,  $E'$  : Temperaturkoeff.



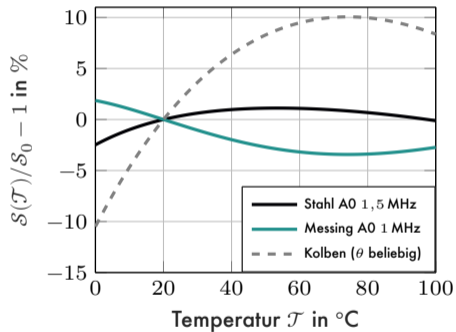
**Wasser:** Schallgeschwindigkeit  $c_f(\mathcal{T})$

- polynomieller Zusammenhang entsprechend Literatur:



# Einfluss von Temperatur $\mathcal{T}$ auf den Durchflussmesser

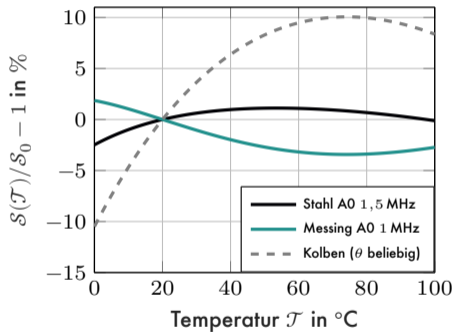
$$\mathcal{S}(\mathcal{T}) = \frac{1}{4} K d c_f(\mathcal{T}) \sqrt{c_p^2(\mathcal{T}) - c_f^2(\mathcal{T})}$$



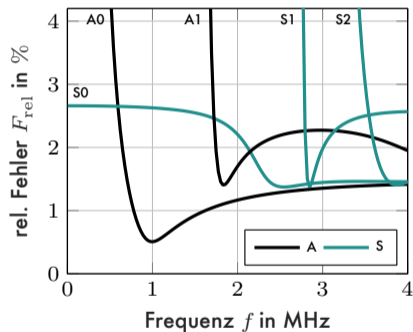


# Einfluss von Temperatur $\mathcal{T}$ auf den Durchflussmesser

$$S(\mathcal{T}) = \frac{1}{4} K d c_f(\mathcal{T}) \sqrt{c_p^2(\mathcal{T}) - c_f^2(\mathcal{T})}$$



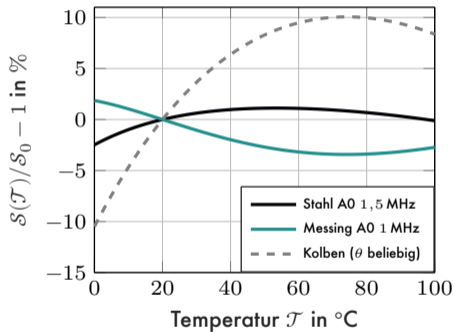
$$F_{\text{rel}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{S_0} \sqrt{\frac{1}{\mathcal{T}_2 - \mathcal{T}_1} \int_{\mathcal{T}_1}^{\mathcal{T}_2} [S(\mathcal{T}) - S_0]^2 d\mathcal{T}}$$



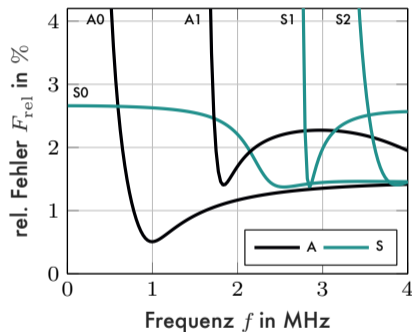
- Kolbenstrahler:  $F_{\text{rel}} = 7,8\%$

# Einfluss von Temperatur $\mathcal{T}$ auf den Durchflussmesser

$$\mathcal{S}(\mathcal{T}) = \frac{1}{4} K d c_f(\mathcal{T}) \sqrt{c_p^2(\mathcal{T}) - c_f^2(\mathcal{T})}$$



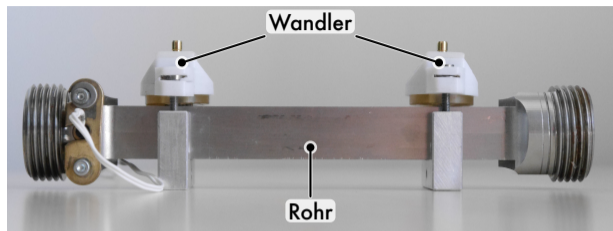
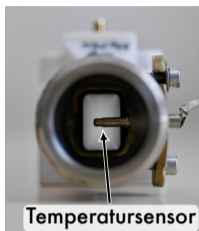
$$F_{\text{rel}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{S_0} \sqrt{\frac{1}{\mathcal{T}_2 - \mathcal{T}_1} \int_{\mathcal{T}_1}^{\mathcal{T}_2} [\mathcal{S}(\mathcal{T}) - S_0]^2 d\mathcal{T}}$$



- Kolbenstrahler:  $F_{\text{rel}} = 7,8\%$

Lambwellen: geringere Querempfindlichkeit zu Temperatur

# Prototyp des Durchflussmessgerätes



Prototyp des Durchflussmessers<sup>6</sup>

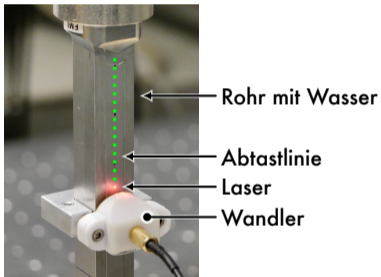
- Stahlrohr, 1,5 mm Rohrwanddicke
- piezoelektrische Lambwellen-Wandler

als nächstes:

- Validierung des Modells:
  - 1 Vibrometermessungen → Mechanik der Rohrwand
  - 2 Transmissionsmessungen → Laufzeit

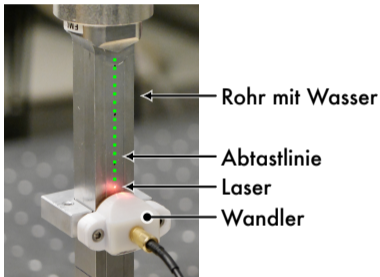
<sup>6</sup>Entworfen und gefertigt durch Diehl Metering GmbH

# 1 Vibrometermessung

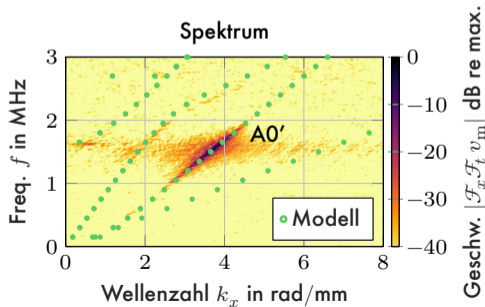
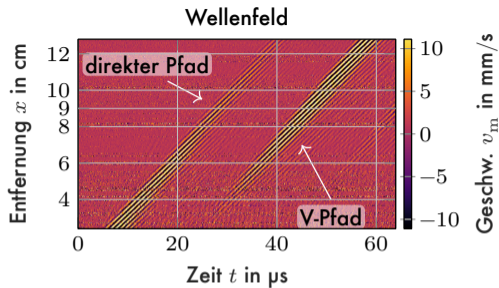


Laboraufbau

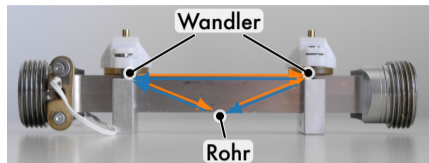
# 1 Vibrometermessung



Laboraufbau

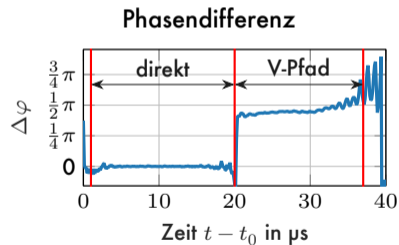
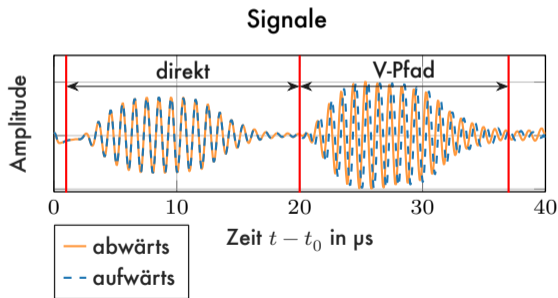
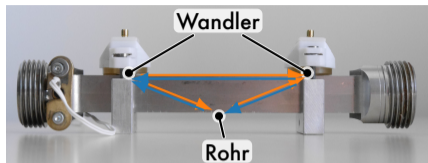


## 2 Transmissionsmessungen<sup>7</sup>



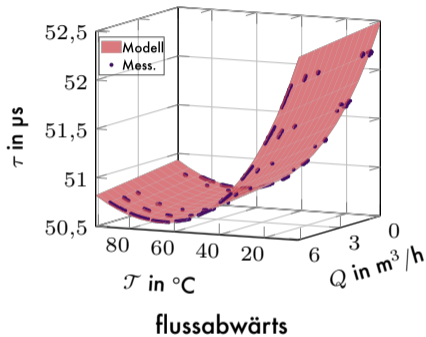
<sup>6</sup>Rohdaten erhoben durch Diehl Metering GmbH. Auswertung durch den Autor.

## 2 Transmissionsmessungen<sup>7</sup>



<sup>6</sup>Rohdaten erhoben durch Diehl Metering GmbH. Auswertung durch den Autor.

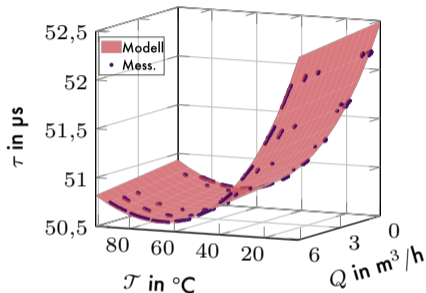
## 2 Validierung des Laufzeitmodells



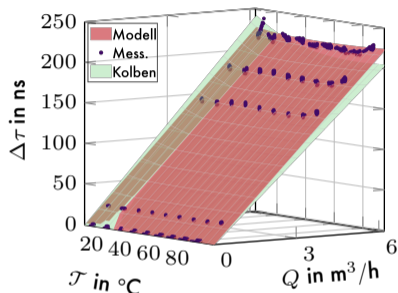
- **Modell:** Laufzeit  $\tau(Q, T)$ 
  - Temperaturkoeff.  $E'$  an Messdaten angepasst  
→  $\approx 10\%$  Abweichung vom Datenblatt



## 2 Validierung des Laufzeitmodells



flussabwärts



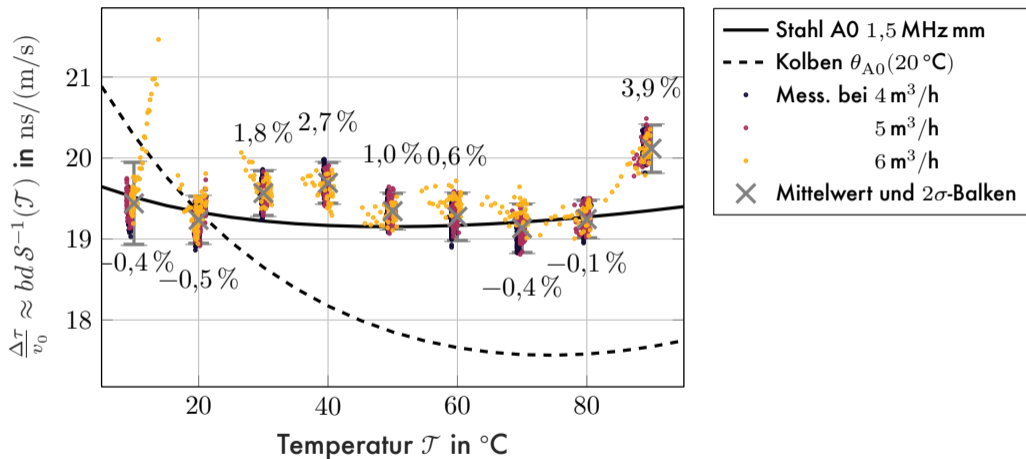
Differenz aufwärts-abwärts

- Modell: Laufzeit  $\tau(Q, \mathcal{T})$

- Modell: Laufzeitdiff.  $\Delta\tau = \mathcal{S}^{-1}(\mathcal{T})Q$

- Temperaturkoeff.  $E'$  an Messdaten angepasst  
→  $\approx 10\%$  Abweichung vom Datenblatt

# Temperaturabhängige Laufzeitdifferenz pro $v_0$



# Zusammenfassung und Ausblick

Modell quasi-geführter Wellen:

- 1 Mechanik der Rohrwand ✓
- 2 Temperatur ✓



# Zusammenfassung und Ausblick

Modell quasi-geführter Wellen:

- 1 Mechanik der Rohrwand ✓
- 2 Temperatur ✓

+ invertierbar   + Optimierung   + effizient

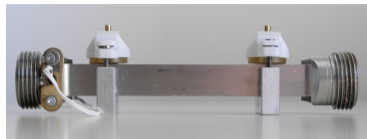


# Zusammenfassung und Ausblick

Modell quasi-geführter Wellen:

- 1 Mechanik der Rohrwand ✓
- 2 Temperatur ✓

+ invertierbar + Optimierung + effizient



- $\Delta\tau$  berechnen für 1 Betriebspunkt:

FEM || 20 s

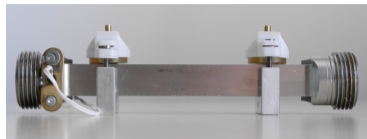
Modell || 3 ms

# Zusammenfassung und Ausblick

Modell quasi-geführter Wellen:

- 1 Mechanik der Rohrwand ✓
- 2 Temperatur ✓

+ invertierbar + Optimierung + effizient



- $\Delta\tau$  berechnen für 10 Wellen bei 200 Frequenzen:

FEM | ██████████ 11 h

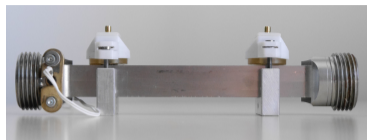
Modell || 6 s

# Zusammenfassung und Ausblick

Modell quasi-geführter Wellen:

- 1 Mechanik der Rohrwand ✓
- 2 Temperatur ✓

+ invertierbar + Optimierung + effizient



- $\Delta\tau$  berechnen für 10 Wellen bei 200 Frequenzen und 10 Temperaturen:

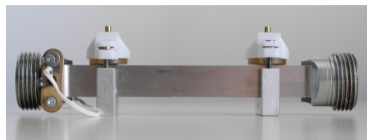
FEM	<div style="background-color: #003366; width: 100%; height: 15px;"></div>	4,5 d
Modell	1 min	

# Zusammenfassung und Ausblick

Modell quasi-geführter Wellen:

- 1 Mechanik der Rohrwand ✓
- 2 Temperatur ✓

+ invertierbar + Optimierung + effizient



- $\Delta\tau$  berechnen für 10 Wellen bei 200 Frequenzen und 10 Temperaturen:

FEM	<div style="background-color: #003366; width: 85%;"></div>	4,5 d
Modell	1 min	

Ausblick:

- Temperatur: Dynamik berücksichtigen
- Hydrodynamik

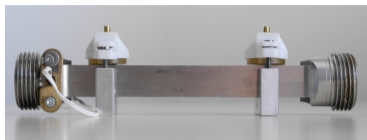


# Zusammenfassung und Ausblick

Modell quasi-geführter Wellen:

- 1 Mechanik der Rohrwand ✓
- 2 Temperatur ✓

+ invertierbar + Optimierung + effizient



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Ausblick:

- Temperatur: Dynamik berücksichtigen
- Hydrodynamik

