

Akustische Durchflussmesser



Grundprinzipien

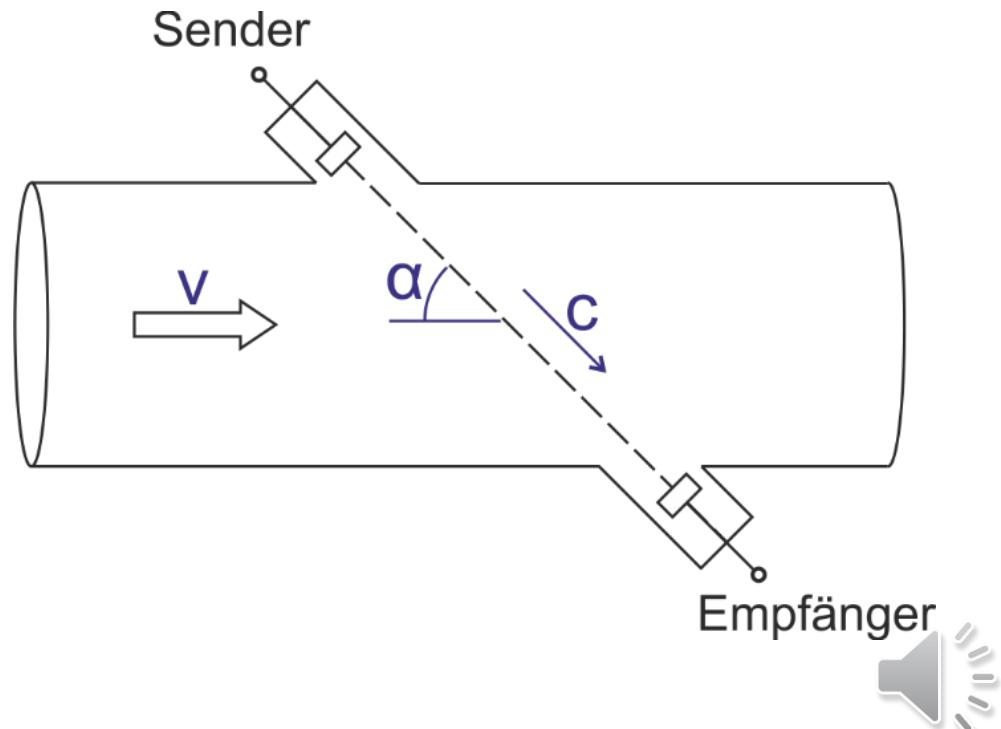
Mitführungseffekt:

Das Mitführen der Schallwelle im Fluid ändert die Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. die Ausbreitungsrichtung der Schallwelle. Für die Geschwindigkeit gilt in Strömungsrichtung

$$c = c_0 + v \cos \alpha$$

und entgegen der Strömungsrichtung

$$c = c_0 - v \cos \alpha$$

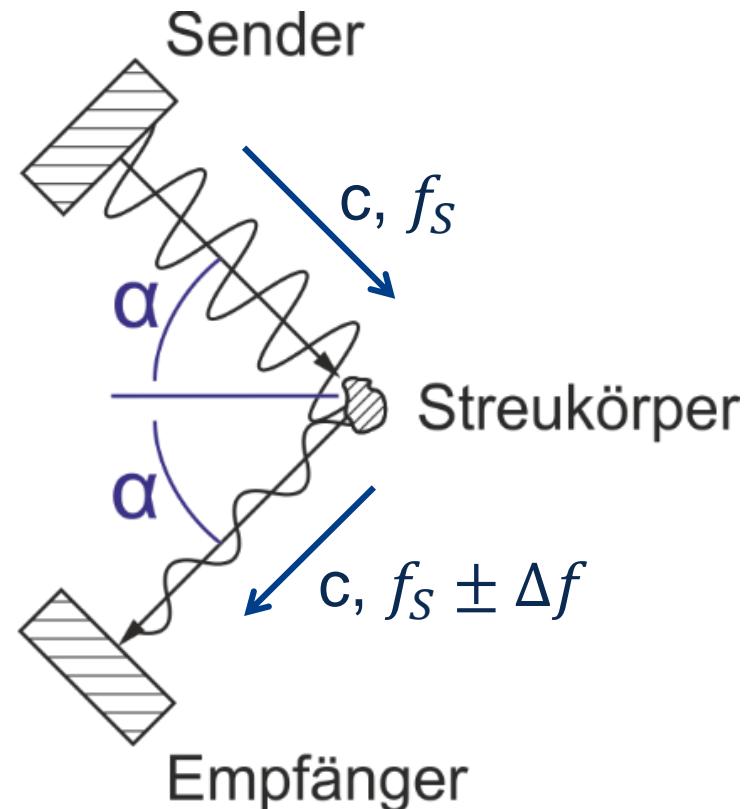


Grundprinzipien

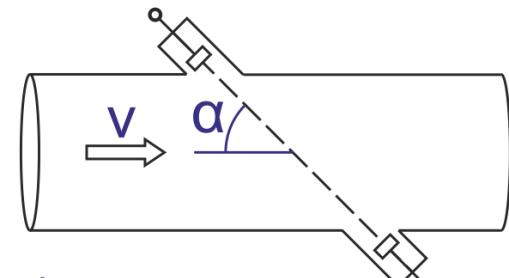
Doppler-Effekt:

Durch die Relativbewegung von Sender und Empfänger ändert sich die Schallfrequenz am Empfänger. Die Dopplerverschiebung ergibt sich zu

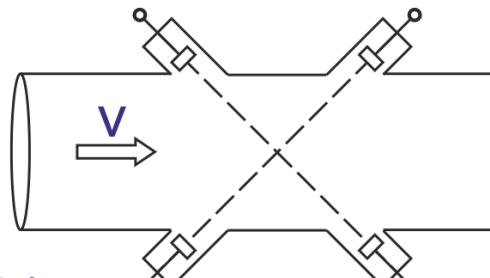
$$\Delta f = 2 \frac{v}{c} f_s \cos \alpha$$



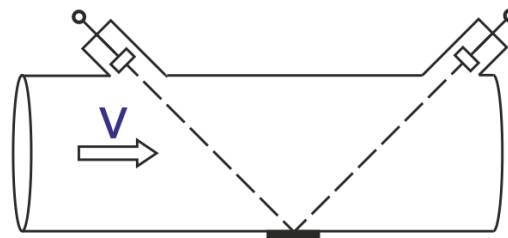
Einbauformen für Mitführungs-Durchflussmesser



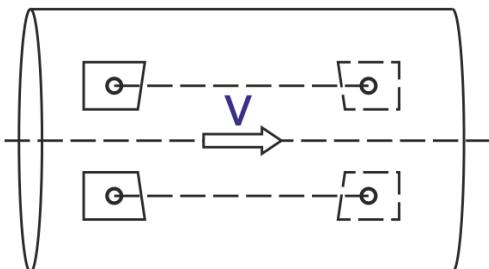
a)



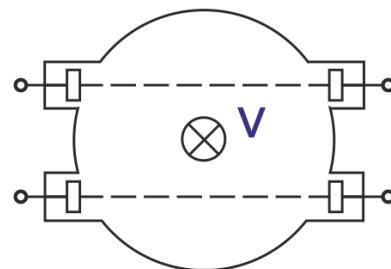
b)



c)



d)

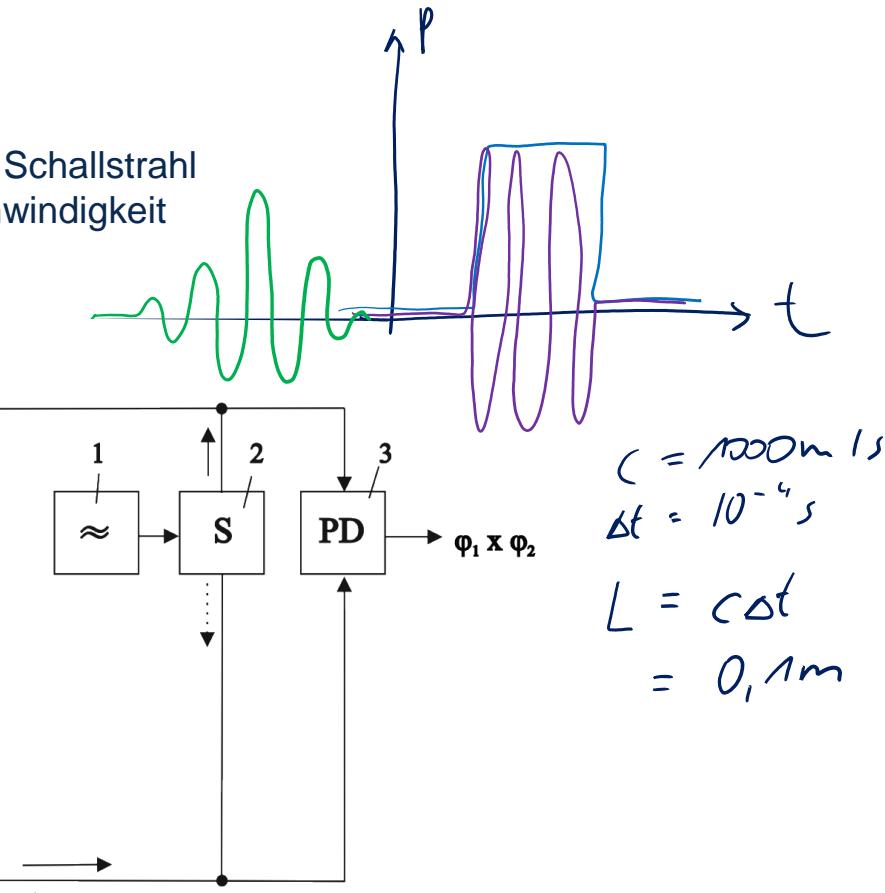
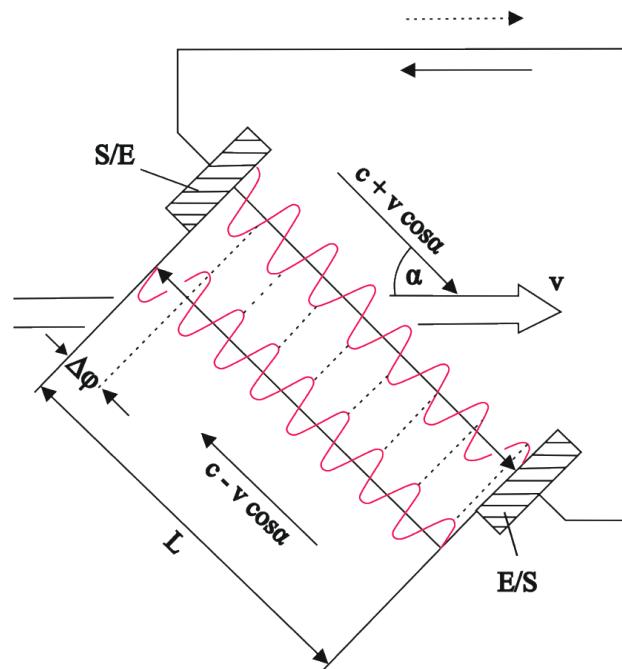


e)



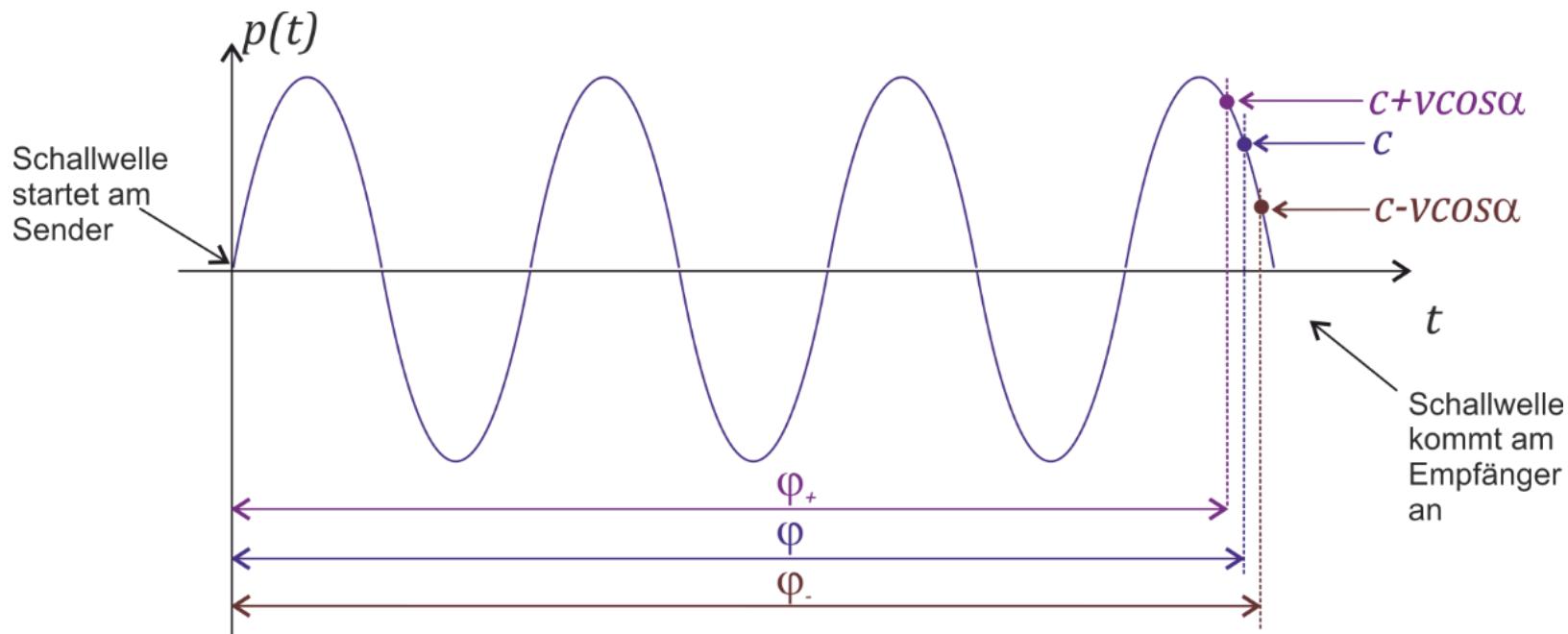
Phasendifferenzmessung

- Phasendifferenzmessung für hin- und rücklaufenden Schallstrahl
- Die Phasendifferenz ist eine Funktion der Fluidgeschwindigkeit
- Nachteil: die Schallgeschwindigkeit und deren Temperaturabhängigkeit sind zu berücksichtigen

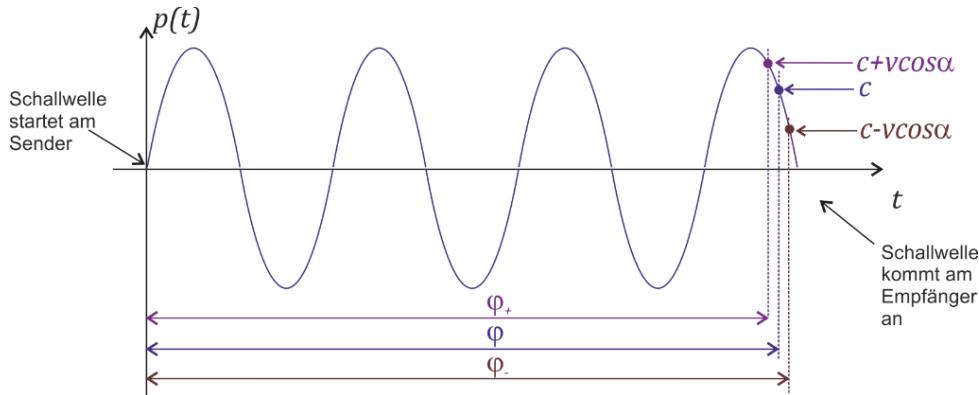


Phasendifferenzmessung

- Phasendifferenzmessung für hin- und rücklaufenden Schallstrahl
- Die Phasendifferenz ist eine Funktion der Fluidgeschwindigkeit
- Nachteil: die Schallgeschwindigkeit und deren Temperaturabhängigkeit sind zu berücksichtigen



Phasendifferenzmessung



$$p(t) = P_0 \sin(2\pi f t)$$

$$\varphi = 2\pi f t$$

$$t = \frac{L}{c} = \frac{L}{c_0 + v \cos \alpha}$$

$$\varphi_+ = \frac{2\pi f L}{c_0 + v \cos \alpha} \quad \varphi_- = \frac{2\pi f L}{c_0 - v \cos \alpha}$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \varphi_- - \varphi_+ = 2\pi f L \left(\frac{1}{c_0 - v \cos \alpha} - \frac{1}{c_0 + v \cos \alpha} \right) \\ &= 2\pi f L \left(\frac{\cancel{c_0 + v \cos \alpha} - \cancel{c_0 + v \cos \alpha}}{\cancel{c_0^2} - (\cancel{v \cos \alpha})^2} \right) \end{aligned}$$

$$\Delta\varphi \approx 2\pi f L \frac{2v \cos \alpha}{c_0^2}$$

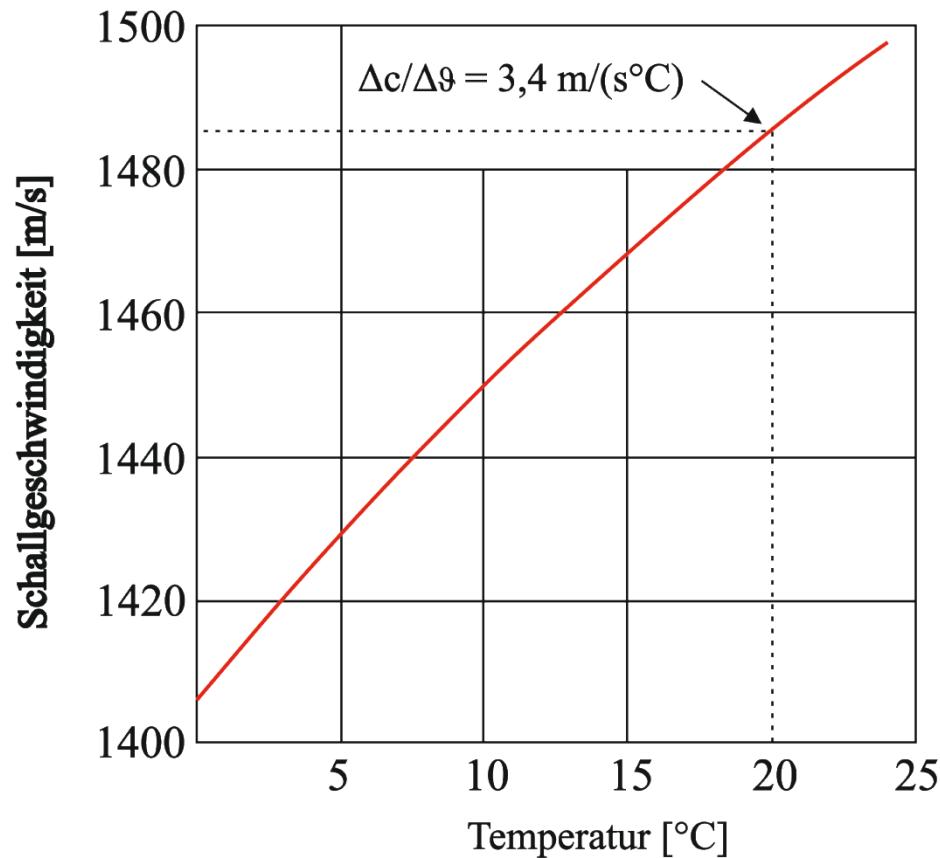
$$\boxed{\Delta\varphi = \frac{4\pi f L}{c_0^2} V}$$

$$\boxed{V = \frac{c_0^2}{4\pi f L}}$$



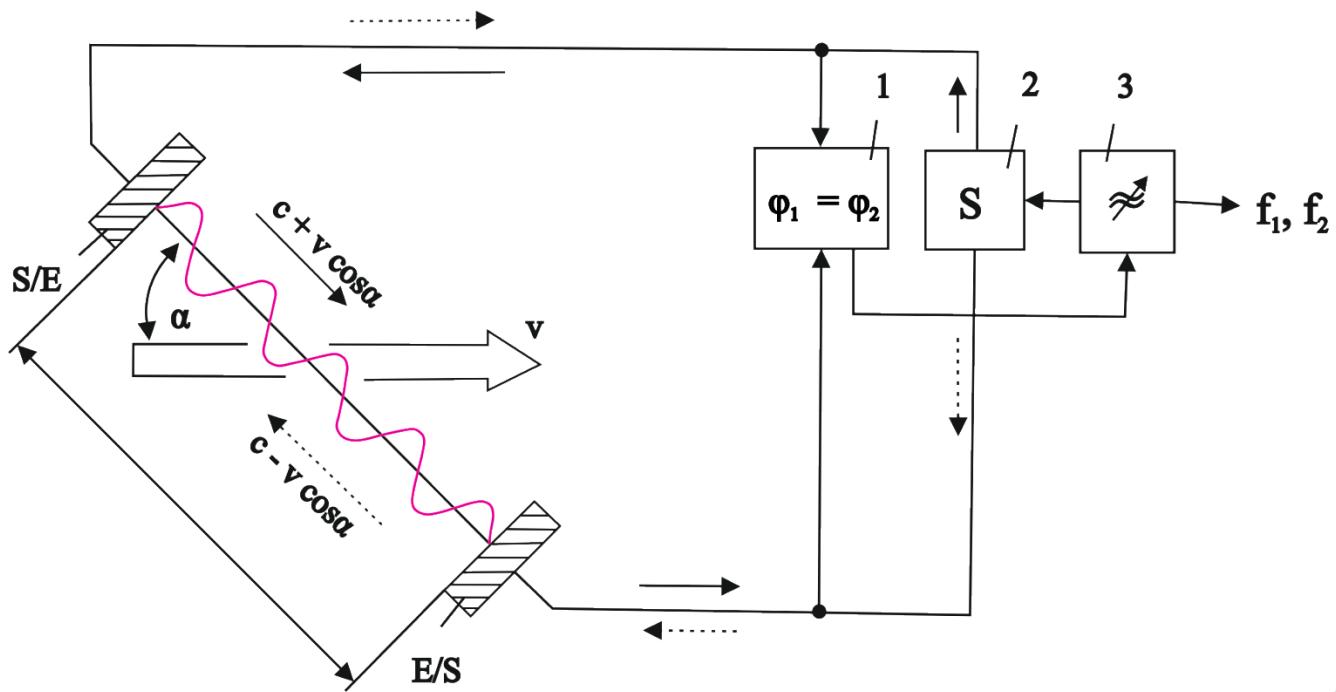
cos α, sorry

Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit



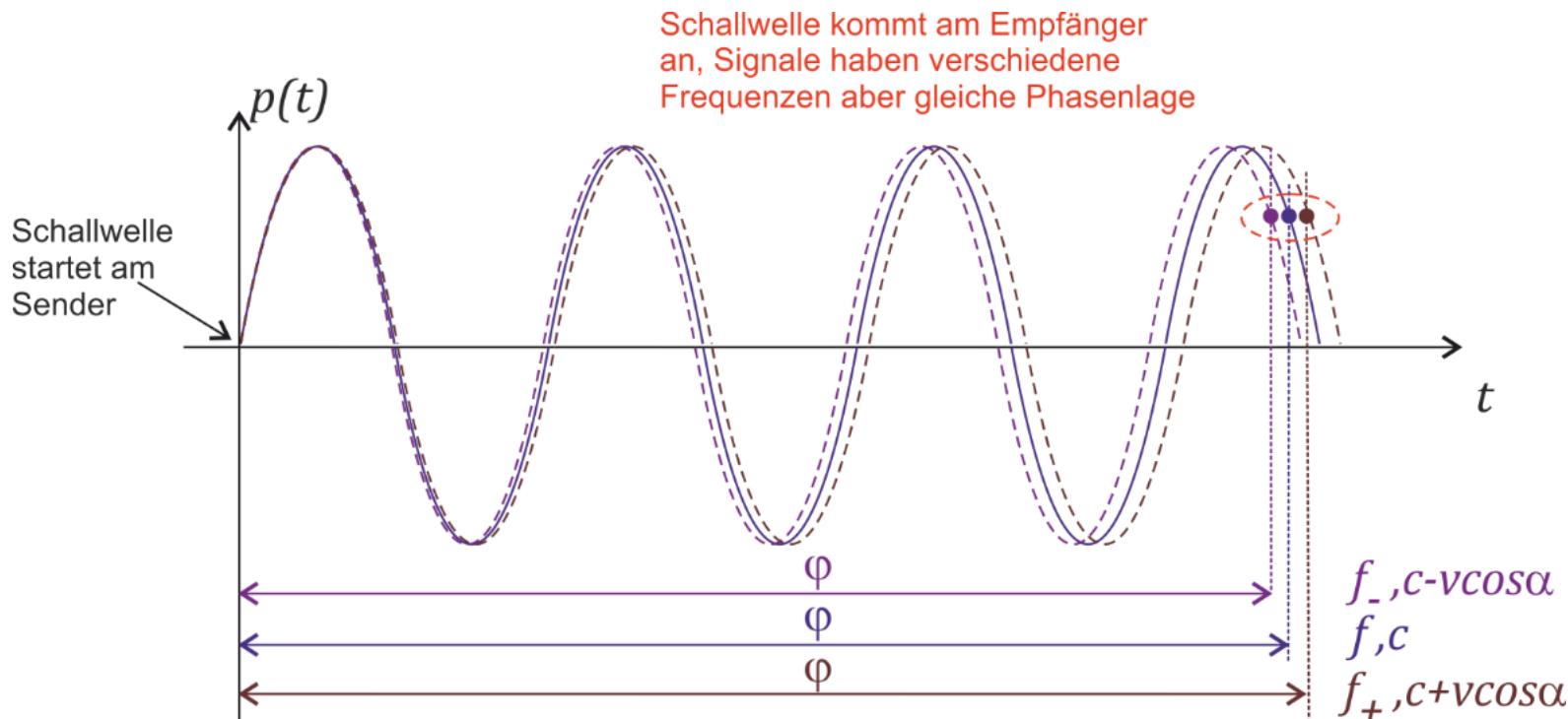
Frequenzdifferenzmessung bei konstanter Wellenlänge

- Phasenrichtige Frequenzregelung
- Frequenzbestimmung für hin- und rücklaufenden Schallstrahl
- Die Differenzfrequenz ist **alleinige** Funktion der Fluidgeschwindigkeit

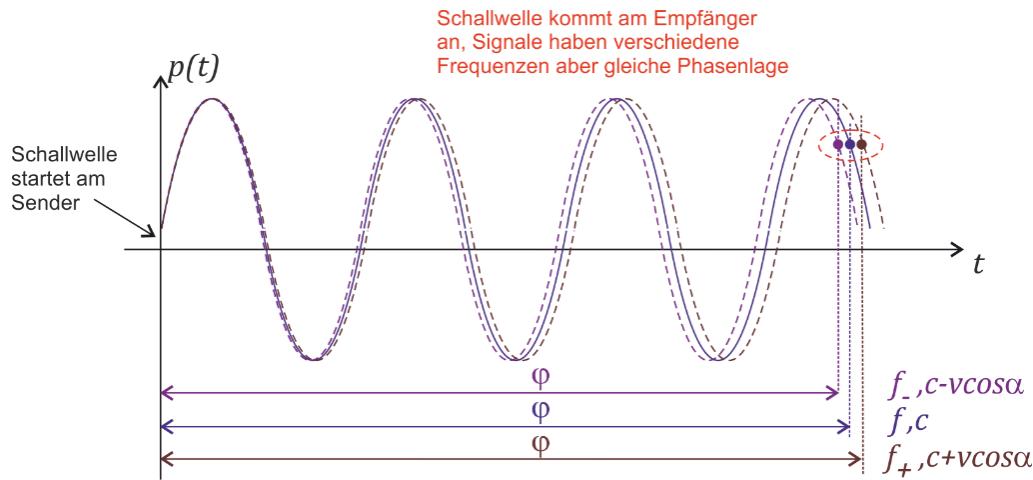


Frequenzdifferenzmessung bei konstanter Wellenlänge

- Phasenrichtige Frequenzregelung
- Frequenzbestimmung für hin- und rücklaufenden Schallstrahl
- Die Differenzfrequenz ist **alleinige** Funktion der Fluidgeschwindigkeit



Frequenzdifferenzmessung bei konstanter Wellenlänge



$$f_+ = \frac{f_0}{c_0} (c_0 + v \cos \alpha)$$

$$f_- = \frac{f_0}{c_0} (c_0 - v \cos \alpha)$$

$$\Delta f = f_+ - f_- = \frac{f_0}{c_0} \cdot 2v \cos \alpha = \frac{1}{\lambda} \cdot 2v \cos \alpha \Rightarrow$$

$$\varphi_+ = 2\pi f_+ t_r = 2\pi f_+ \frac{L}{c_0 + v \cos \alpha} = 2\pi f_+ \frac{L}{c_0}$$

$$\varphi_- = 2\pi f_- t_r = 2\pi f_- \frac{L}{c_0 - v \cos \alpha} = 2\pi f_- \frac{L}{c_0}$$

$$\varphi_+ : \frac{f_+}{c_0 + v \cos \alpha} = \frac{f_0}{c_0}$$

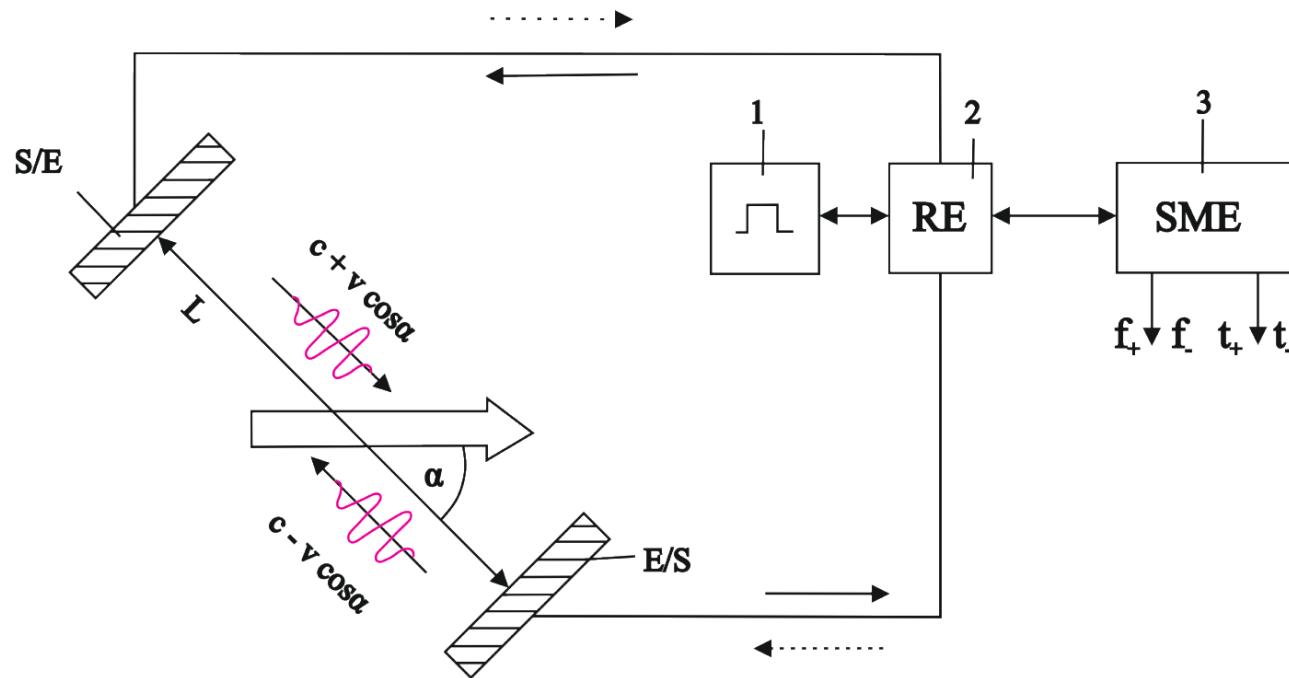
$$\varphi_- : \frac{f_-}{c_0 - v \cos \alpha} = \frac{f_0}{c_0}$$

$$V = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha} \Delta f$$



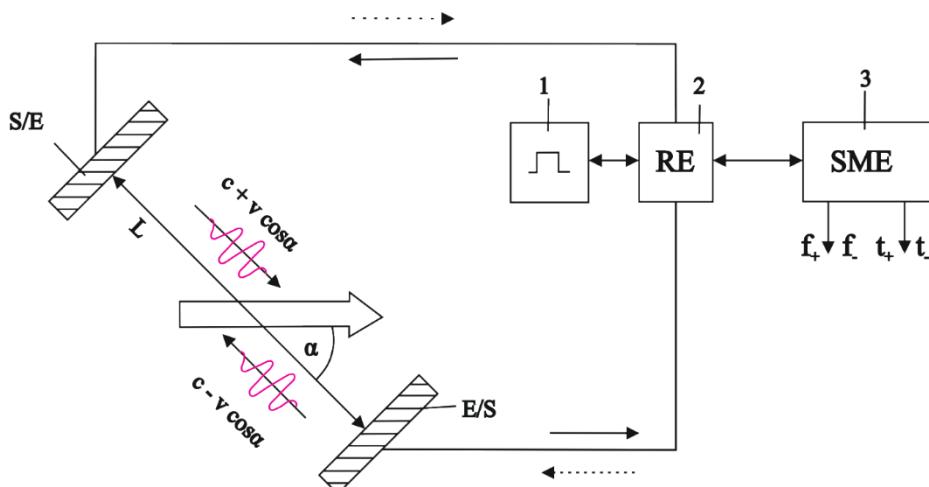
Impulslaufzeitdifferenz-Messung

- Messung der Laufzeiten für zwei Schallpulse
- Die Pulslaufzeiten sind **alleinige** Funktion der Fluidgeschwindigkeit



Impulslaufzeitdifferenz-Messung

- Messung der Laufzeiten für zwei Schallpulse
- Die Pulslaufzeiten sind **alleinige** Funktion der Fluidgeschwindigkeit



$$t_+ = \frac{L}{c_0 + v \cos \alpha} \quad t_- = \frac{L}{c_0 - v \cos \alpha}$$

$$t_- - t_+ = \frac{L}{c_0 - v \cos \alpha} - \frac{L}{c_0 + v \cos \alpha} = L \frac{c_0 + v \cos \alpha - c_0 - v \cos \alpha}{c_0^2 - (v \cos \alpha)^2} = \frac{2 L v \cos \alpha}{c_0^2}$$

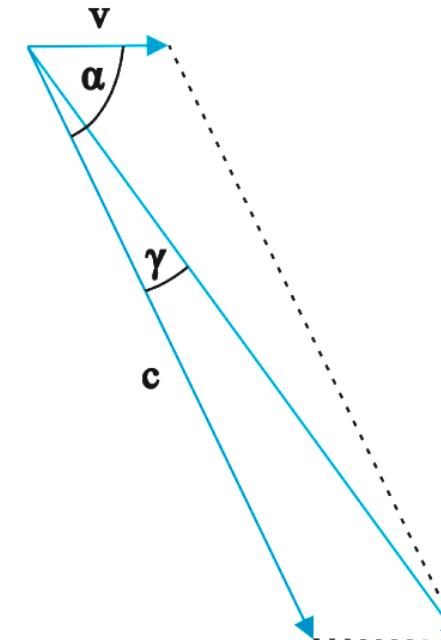
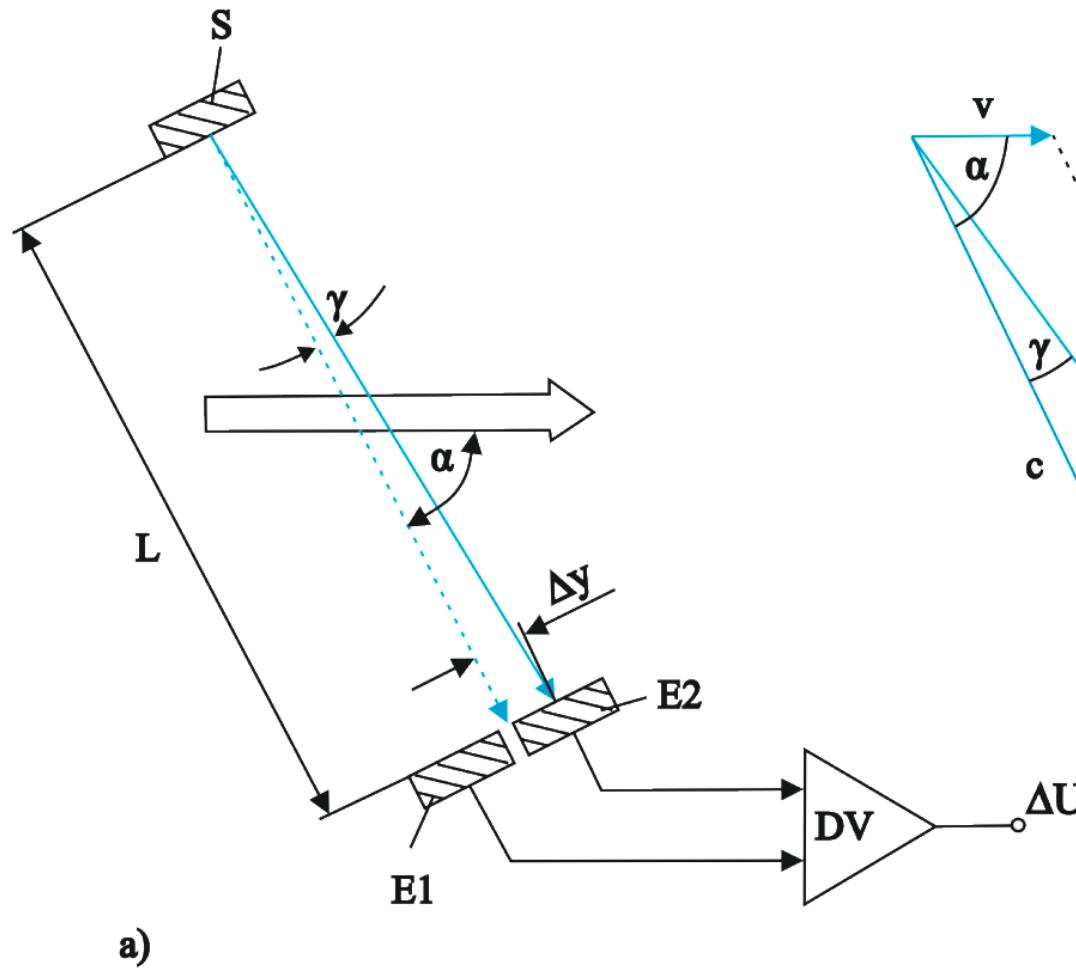
$$t_+ + t_- = \frac{L}{c_0 - v \cos \alpha} + \frac{L}{c_0 + v \cos \alpha} = L \frac{c_0 + v \cos \alpha + c_0 - v \cos \alpha}{c_0^2 - (v \cos \alpha)^2} = L \frac{2 c_0}{c_0^2} = \frac{2 L}{c_0}$$

$$\frac{t_- - t_+}{(t_+ + t_-)^2} = \frac{2 L v \cos \alpha}{4 L^2} = \frac{v \cos \alpha}{2 L}$$

V = $\frac{2 L}{\cos \alpha} \left(\frac{t_- - t_+}{(t_+ + t_-)^2} \right)$



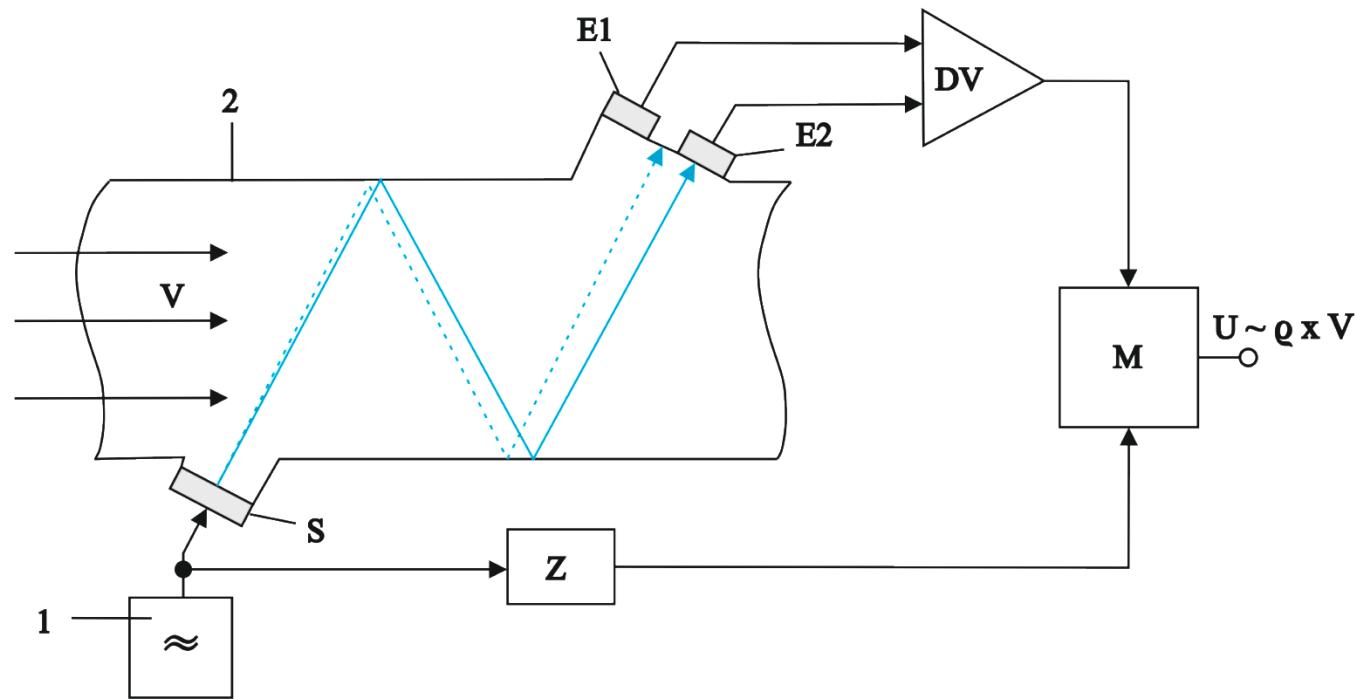
Strahlablenkverfahren



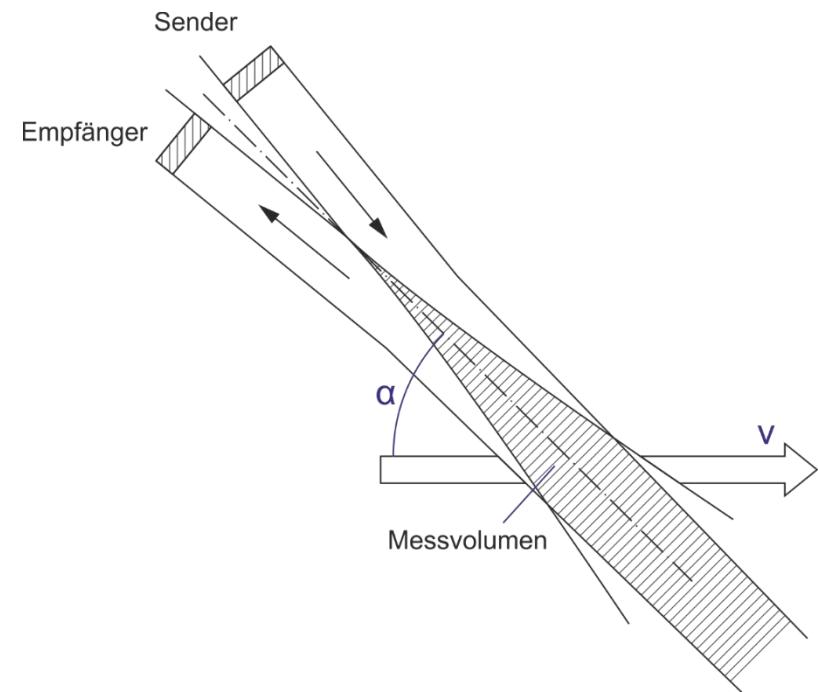
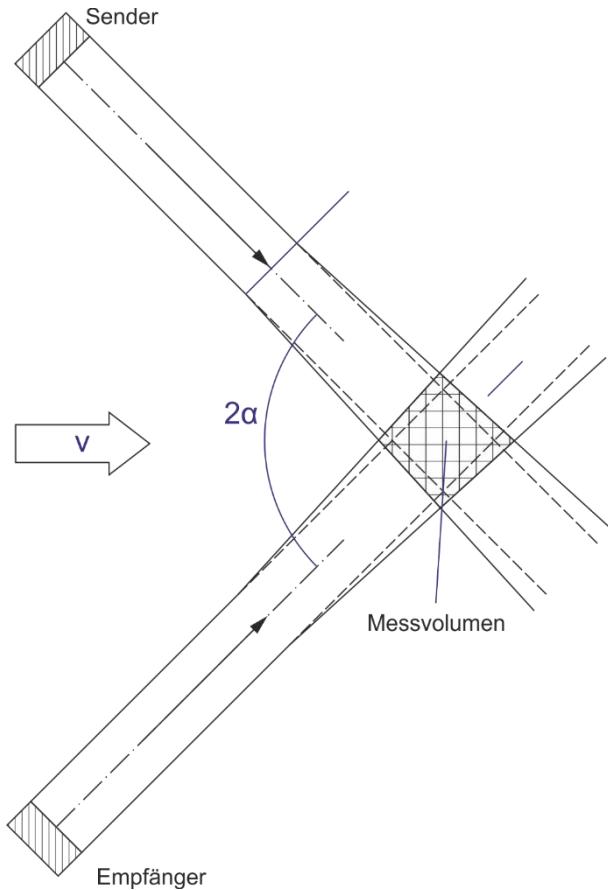
b)



Strahlablenkverfahren

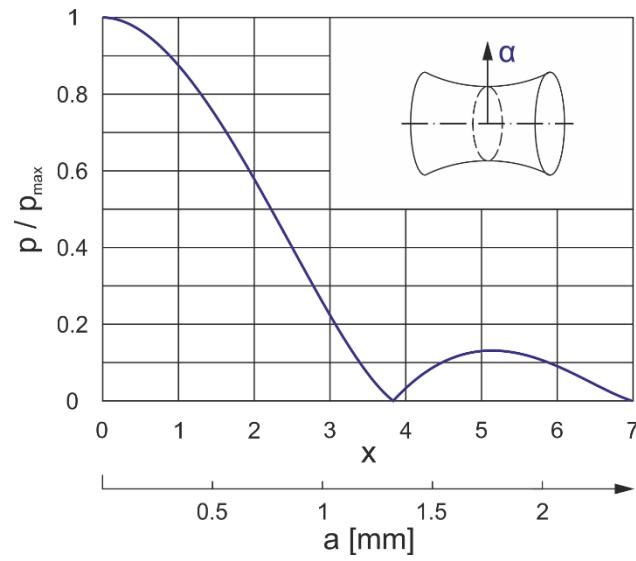
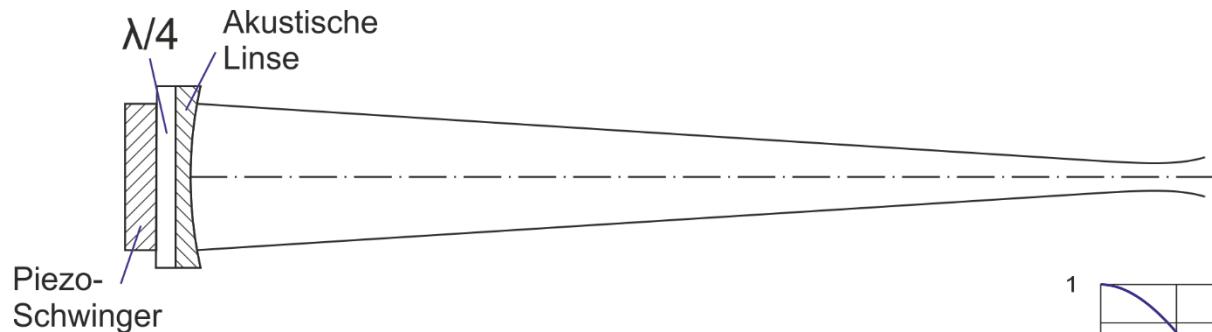


Durchflussmessung unter Nutzung des Doppler-Effekts

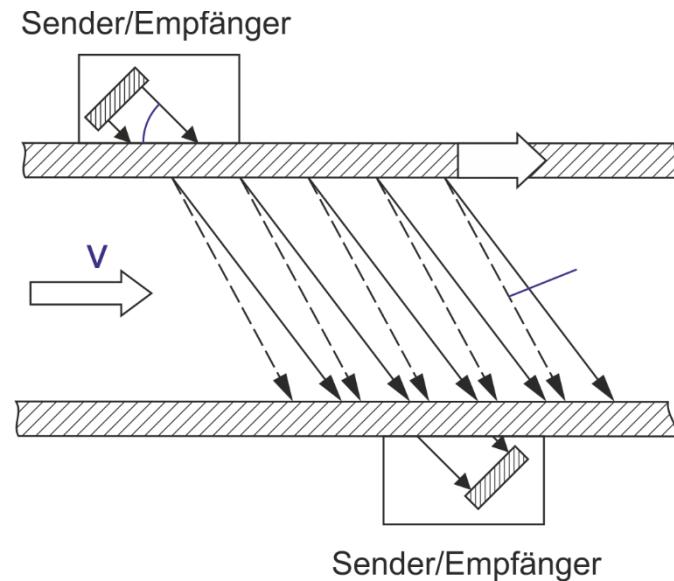
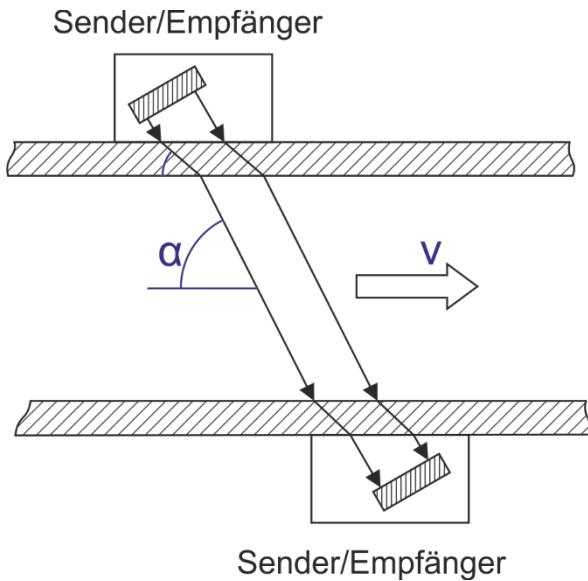


Doppler-Messung

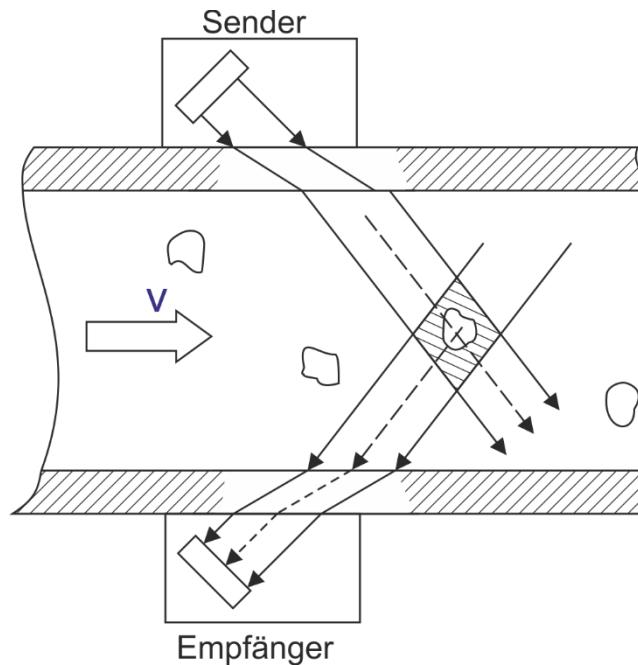
Schallfokussierung für ortsselektives Messen



Clamp-On DFM (Mitführungseffekt)



Clamp-On DFM (Doppler-Effekt)



Vorzüge

- ✓ großer Messbereich
- ✓ gute Linearität
- ✓ geringe Messzeiten
- ✓ hohe Genauigkeit (Messunsicherheit <1%)
- ✓ Weitestgehend unabhängig von Druck, Dichte, Temperatur und Viskosität des Fluides)
- ✓ verwendbar für Flüssigkeiten und Gase (allerdings effiziente Schalleinkopplung bei Gasen z.T. schwierig)
- ✓ beliebige Einbaulage

Kritische Punkte

- ✓ hoher Betriebs- und Stabilisierungsaufwand
- ✓ hohe Anforderungen an die Elektronik
(gleiche Signallaufzeiten, stabile Triggerzeitpunkte, Driftfreiheit)
- ✓ Erfordernis von schlupflosen Streuteilchen bei Dopplerverfahren

