

# Akustische Durchflussmesser



# Grundprinzipien

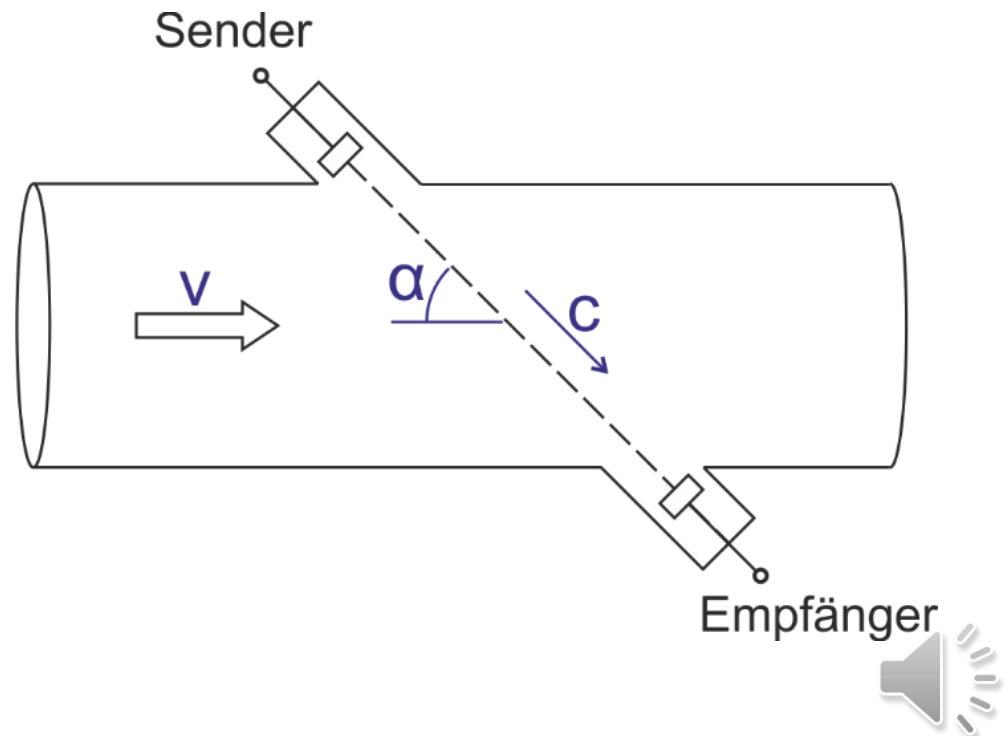
## Mitführungseffekt:

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

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

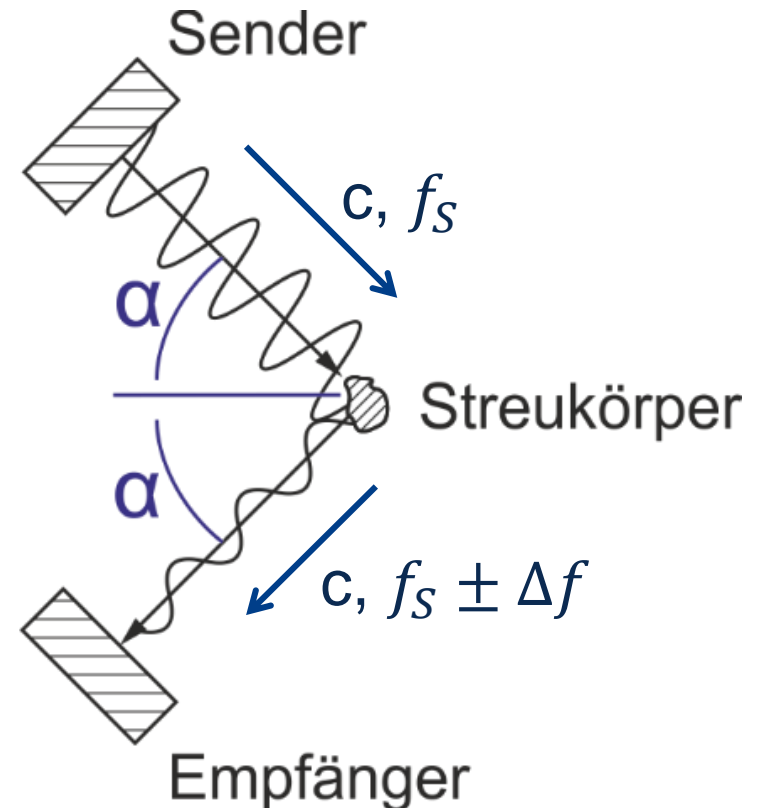


# Grundprinzipien

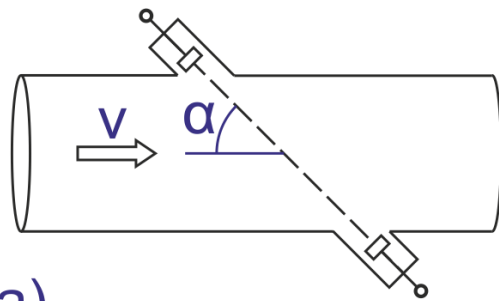
## Doppler-Effekt:

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

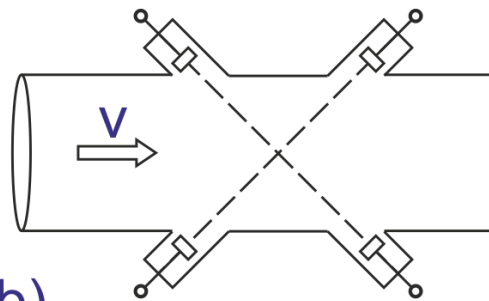
$$\Delta f = 2 \frac{v}{c} f_S \cos \alpha$$



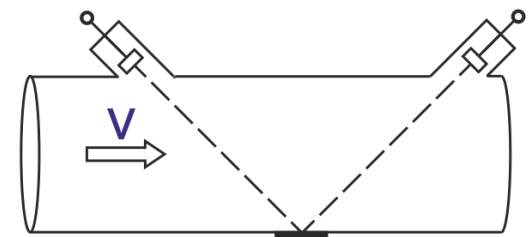
# Einbauformen für Mitführungs-Durchflussmesser



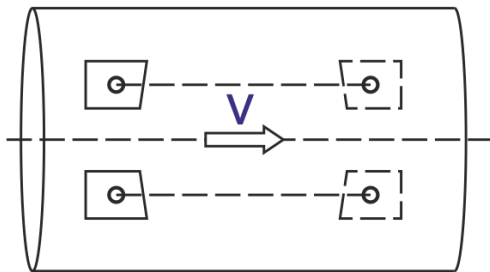
a)



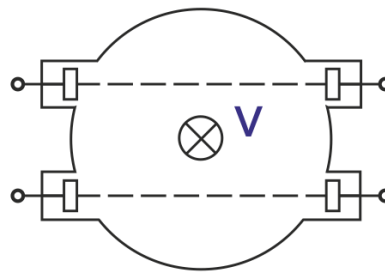
b)



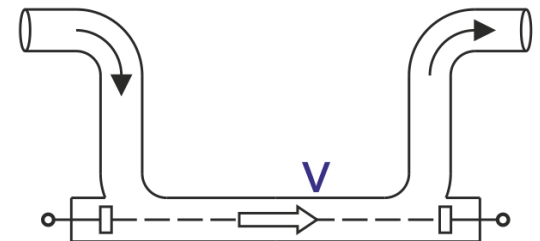
c)



d)

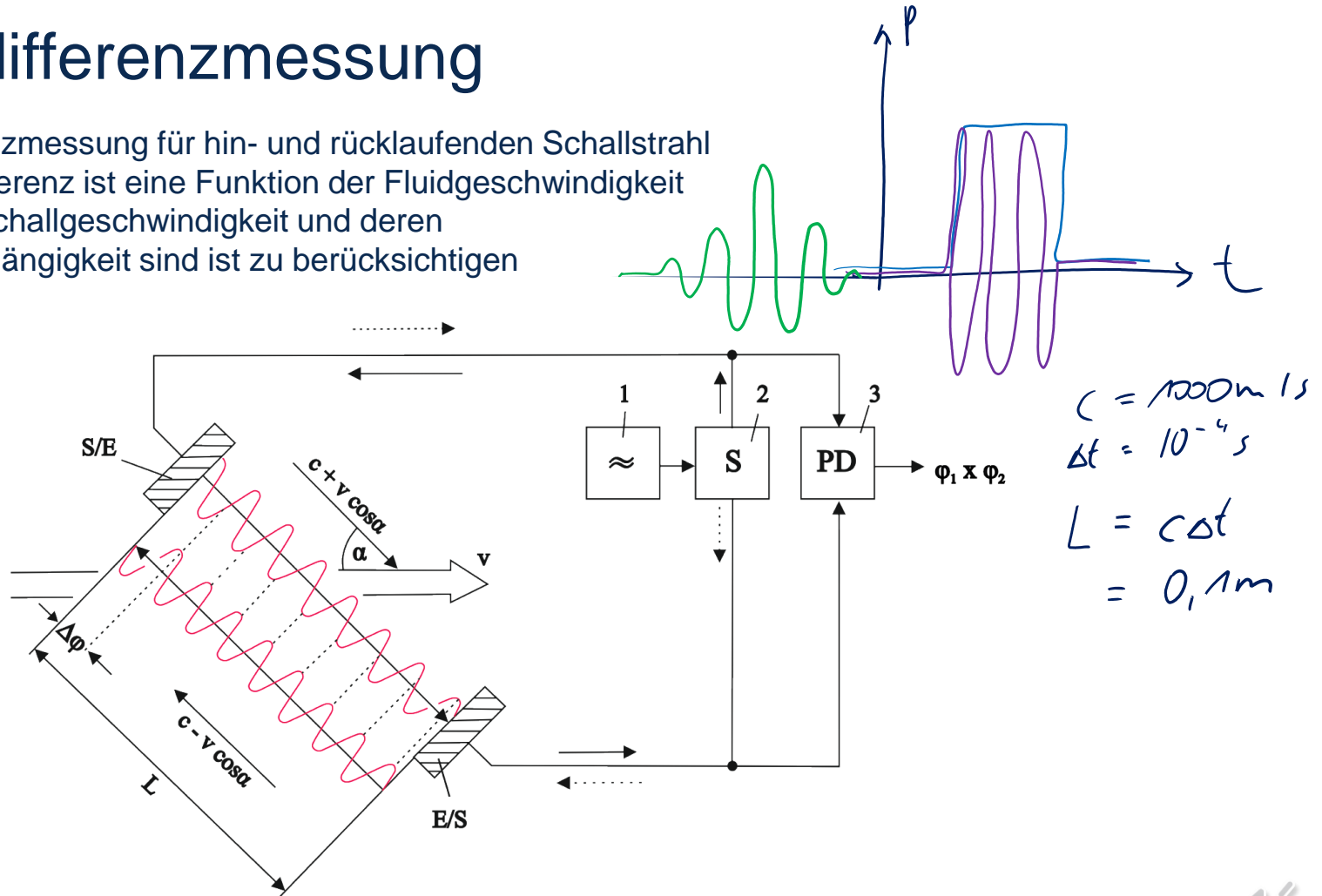


e)



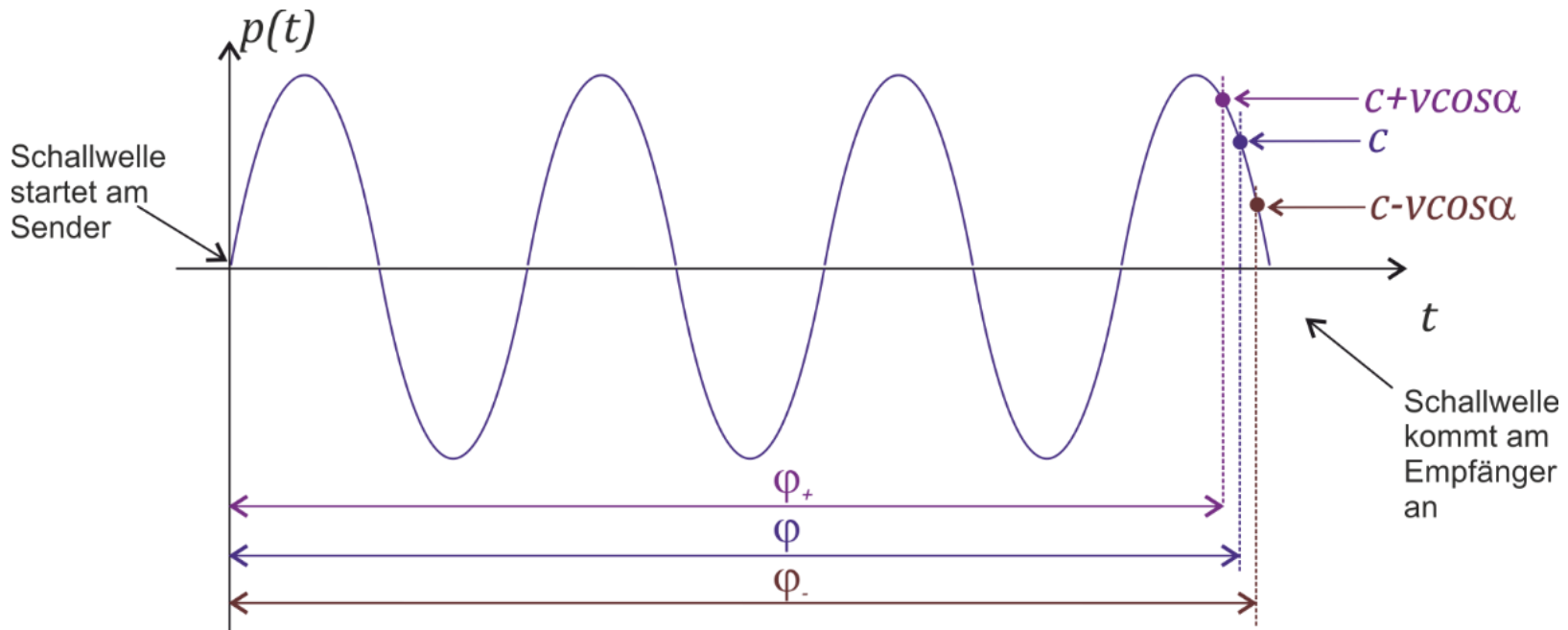
# Phasendifferenzmessung

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

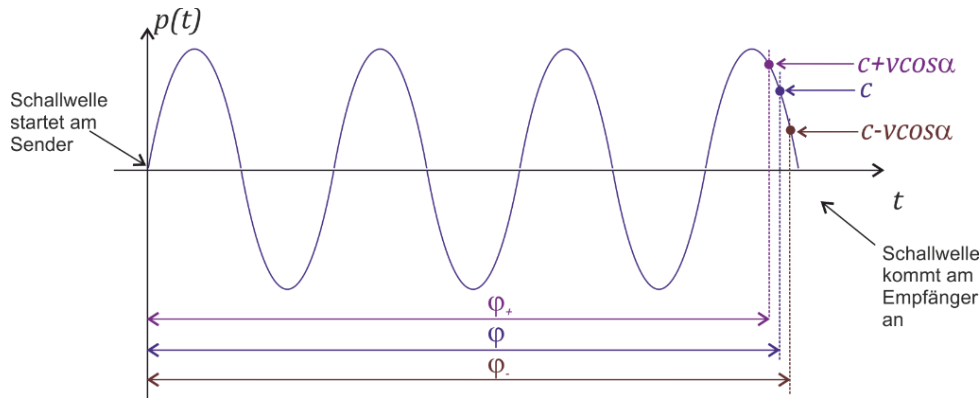


# Phasendifferenzmessung

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



# Phasendifferenzmessung



$$p(t) = p_0 \sin(2\pi f t)$$

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

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

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

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

$$= 2\pi f L \left( \frac{c_0 + v \cos \alpha - c_0 + v \cos \alpha}{c_0^2 - (v \cos \alpha)^2} \right)$$

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

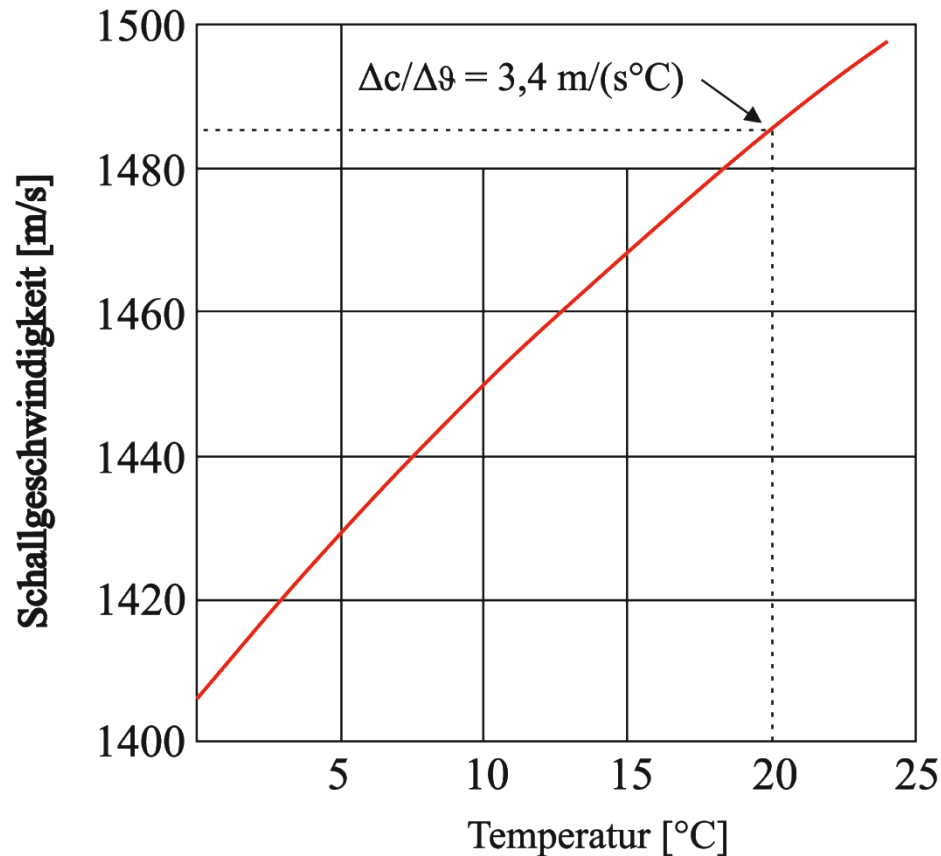
$$\Delta\varphi = \frac{4\pi f L}{c_0^2} V$$

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

cos  $\alpha$ , sorry



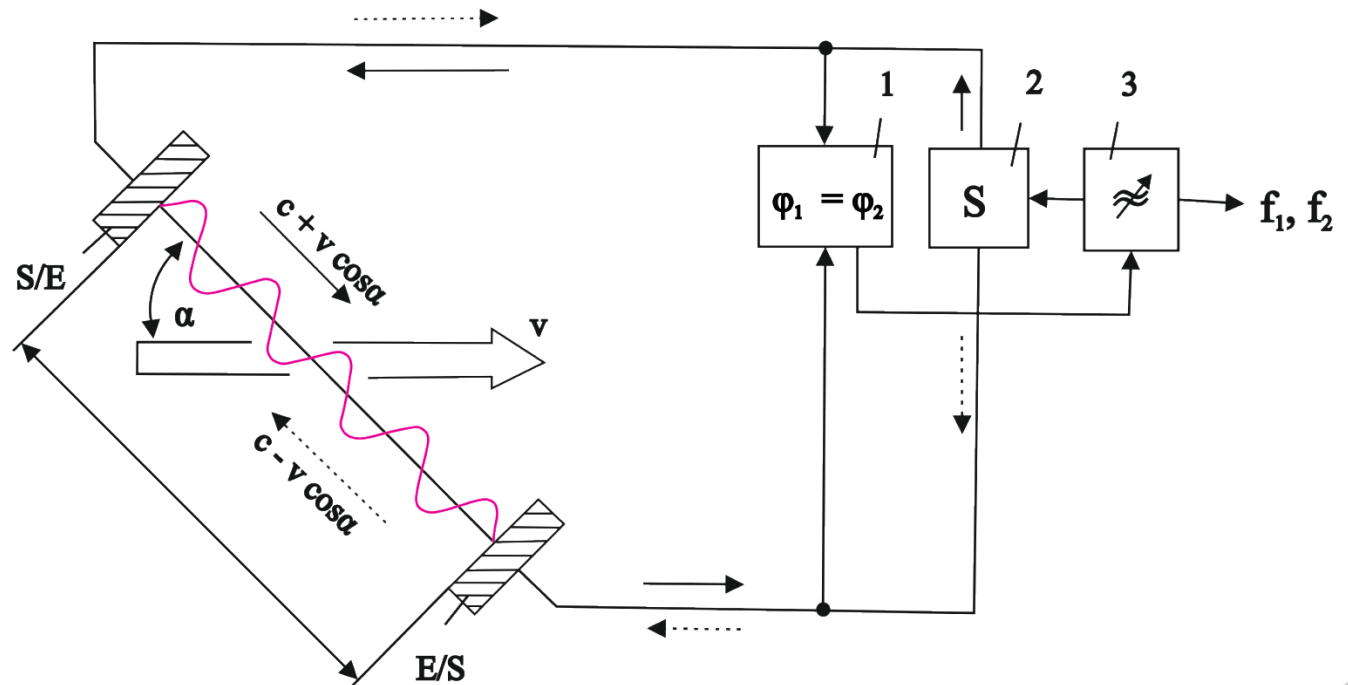
# Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit





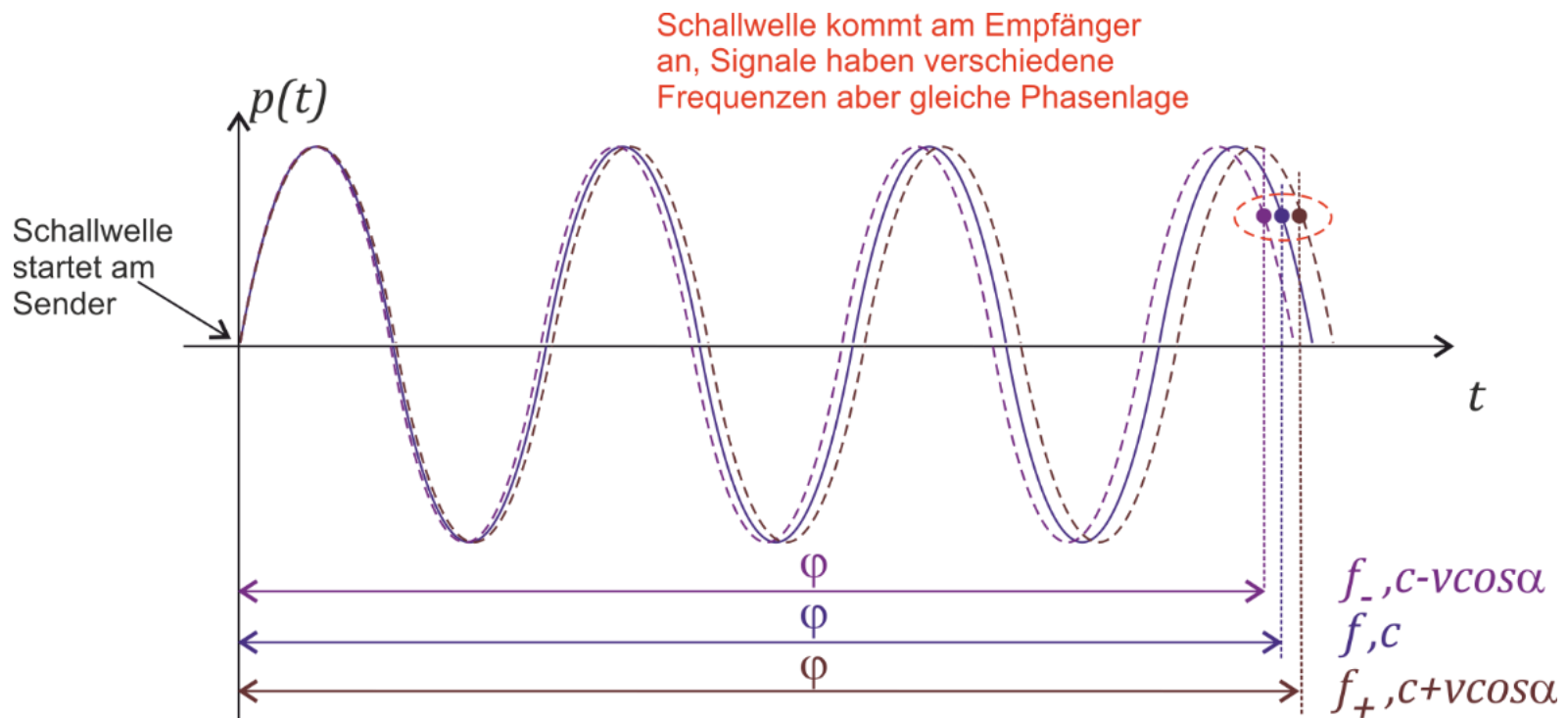
# Frequenzdifferenzmessung bei konstanter Wellenlänge

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

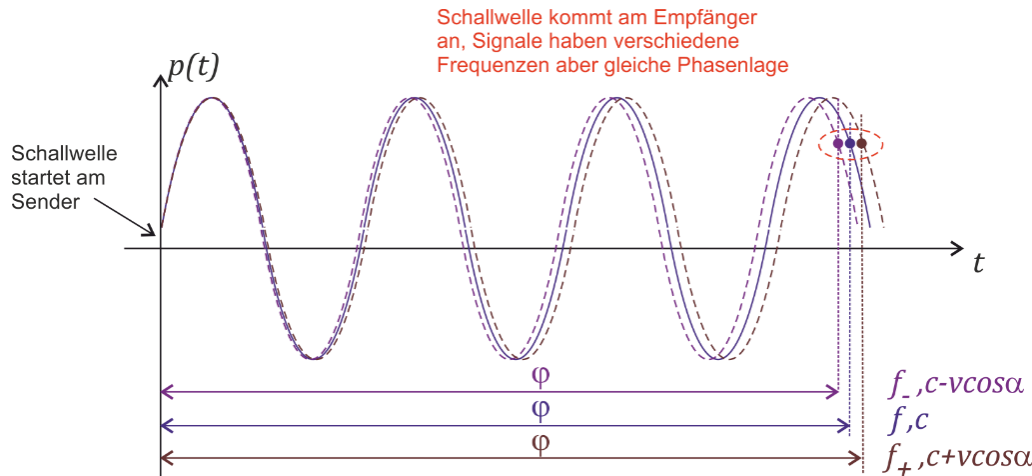


# Frequenzdifferenzmessung bei konstanter Wellenlänge

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



# Frequenzdifferenzmessung bei konstanter Wellenlänge



$$\varphi_+ = 2\pi f_+ t_+ = 2\pi f_+ \frac{L}{c_0 + v \cos \alpha} = 2\pi f_0 \frac{L}{c_0}$$

$$\varphi_- = 2\pi f_- t_- = 2\pi f_- \frac{L}{c_0 - v \cos \alpha} = 2\pi f_0 \frac{L}{c_0}$$

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

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

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

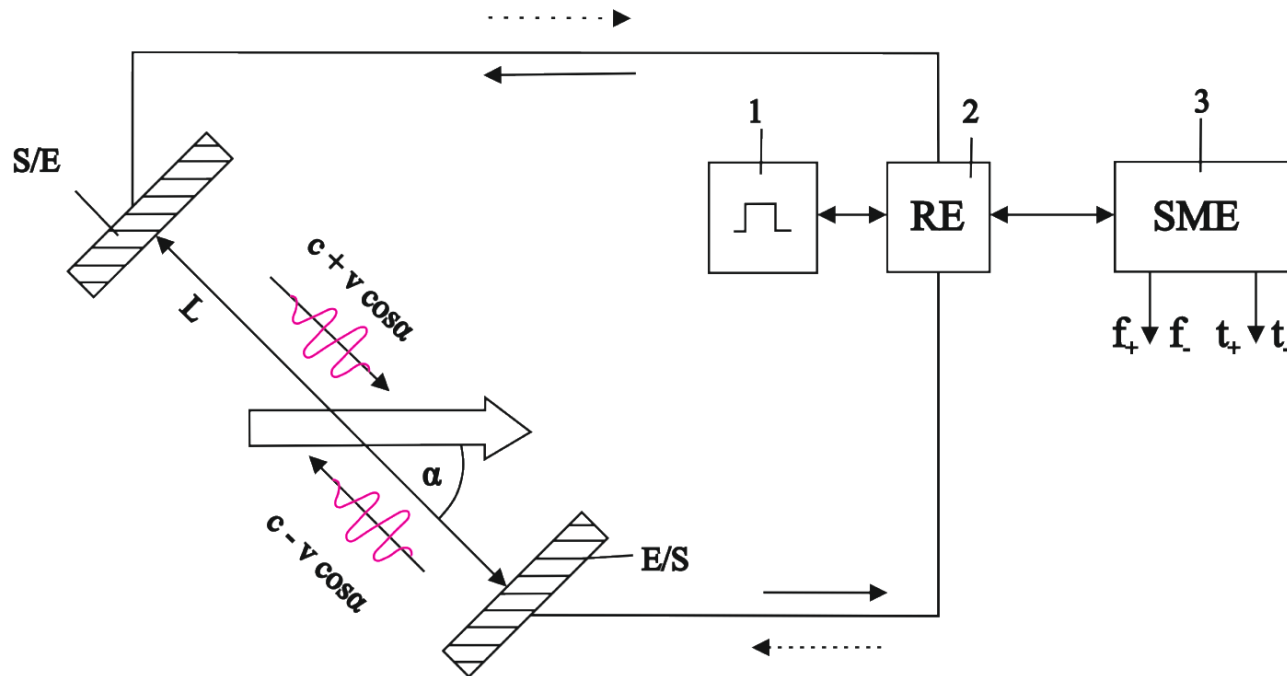
$$f_- = \frac{f_0}{c_0} (c_0 - v \cos \alpha)$$

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

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

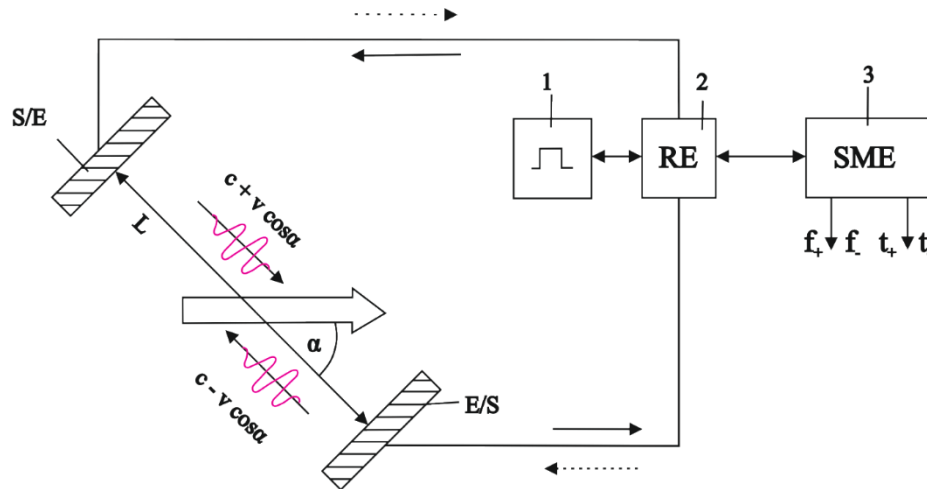
# Impulslaufzeitdifferenz-Messung

- 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



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

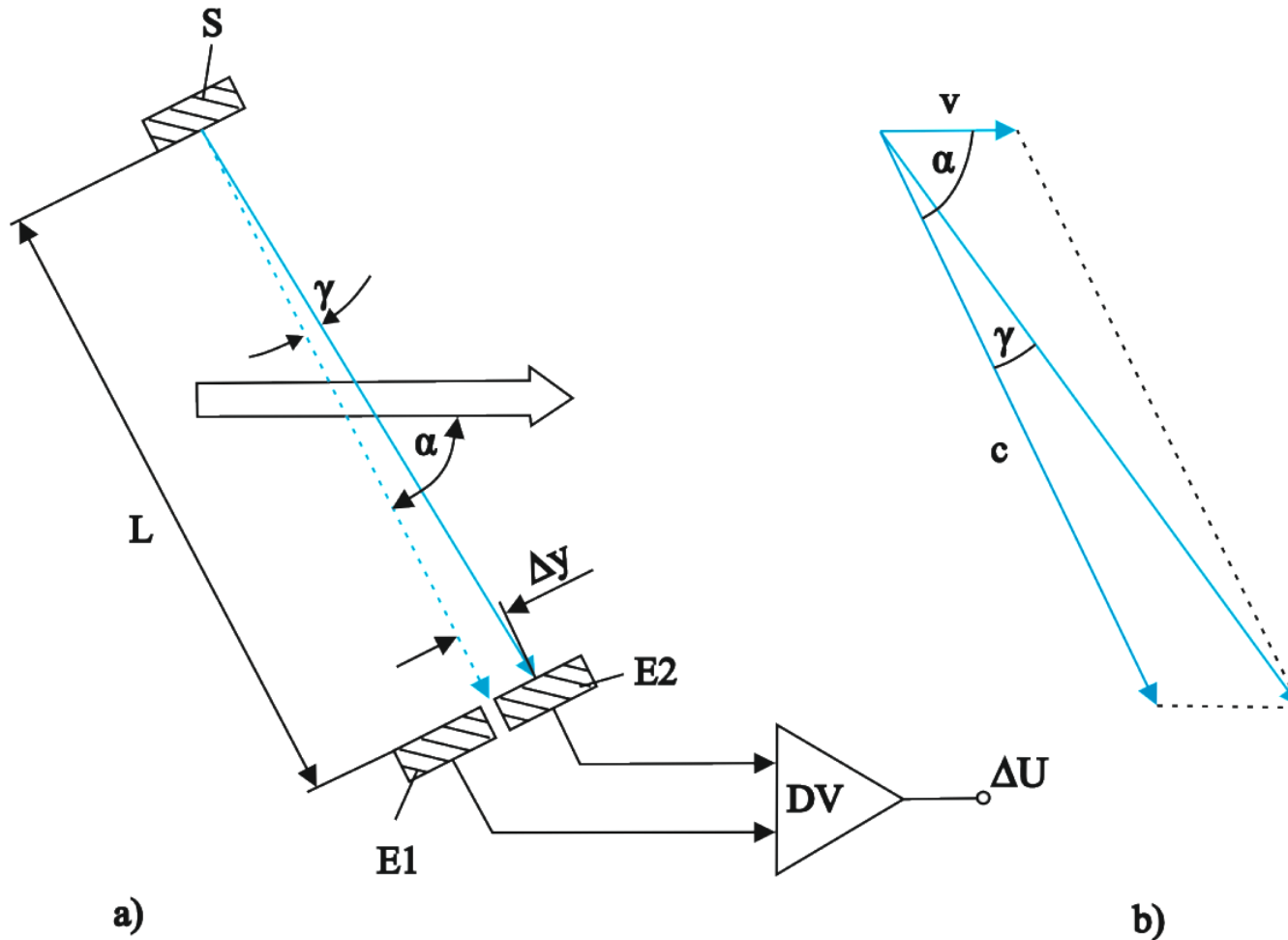
$$t_- - t_+ = \frac{L}{c_0 - v \cos \alpha} - \frac{L}{c_0 + v \cos \alpha} = L \frac{c_0 + v \cos \alpha - c_0 + v \cos \alpha}{c_0^2 - (v \cos \alpha)^2} = \frac{2L v \cos \alpha}{c_0^2}$$

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

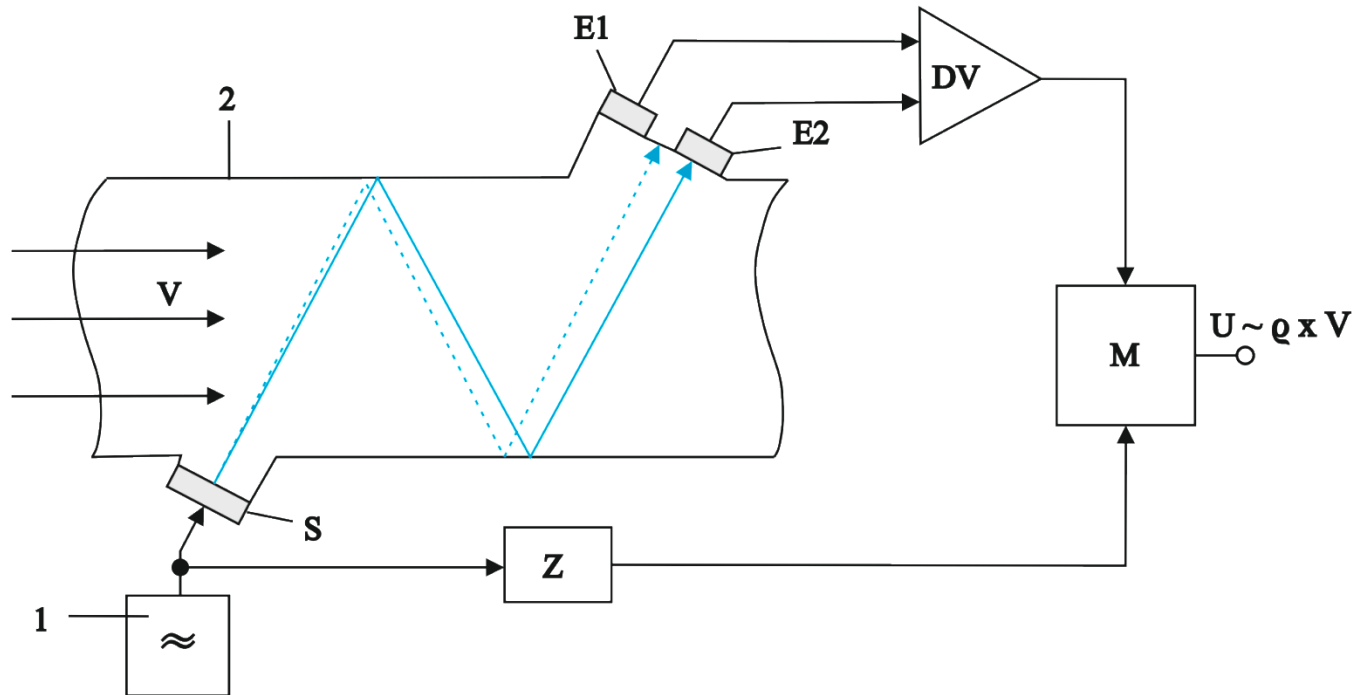
$$\frac{t_- - t_+}{(t_- + t_+)^2} = \frac{2L v \cos \alpha}{4L^2} = \frac{v \cos \alpha}{2L}$$

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

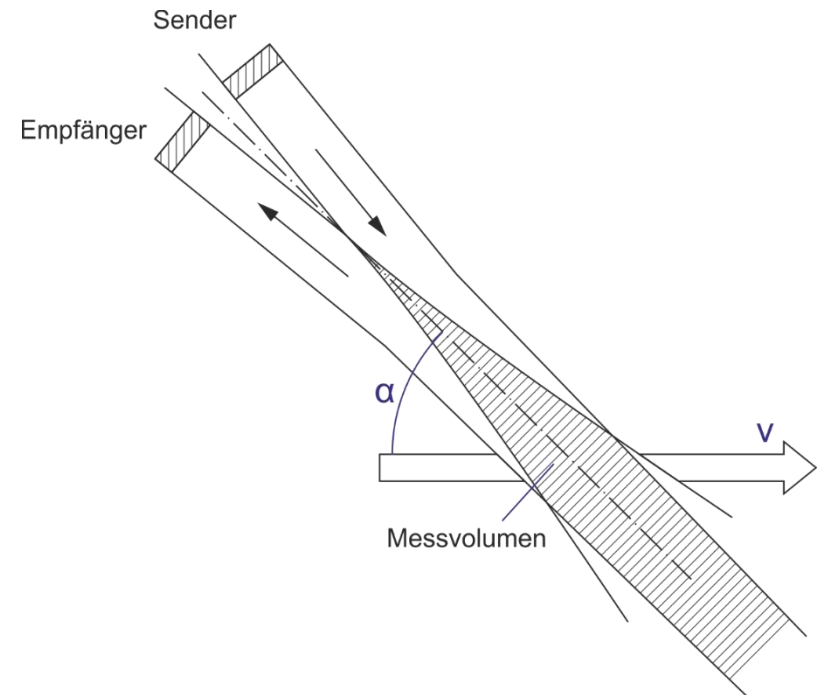
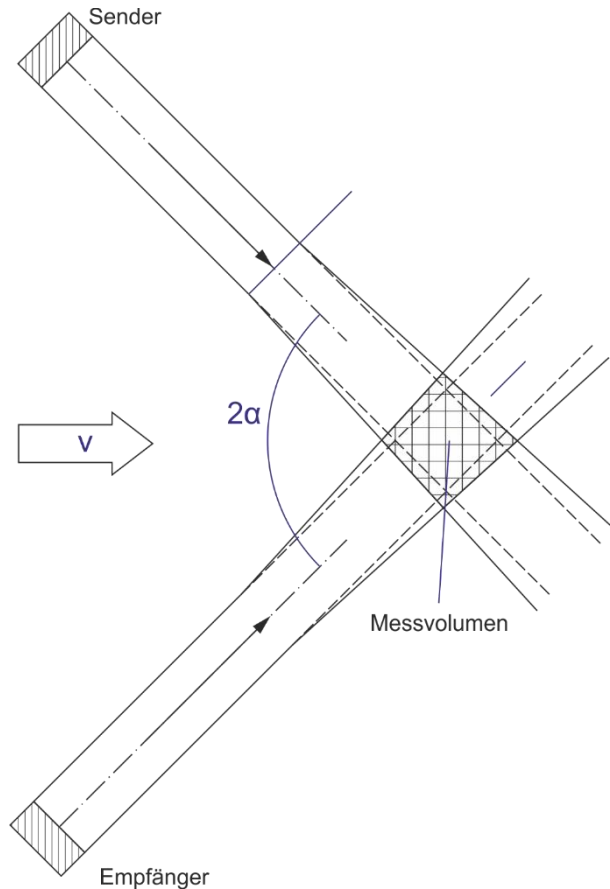
# Strahlableitenverfahren



# Strahlablesenverfahren



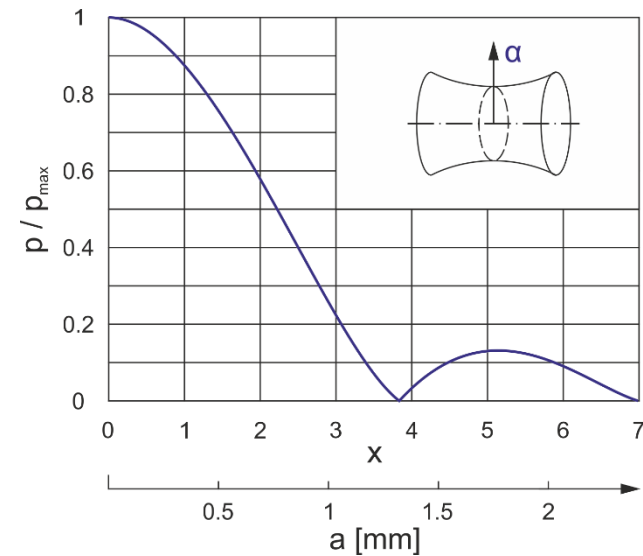
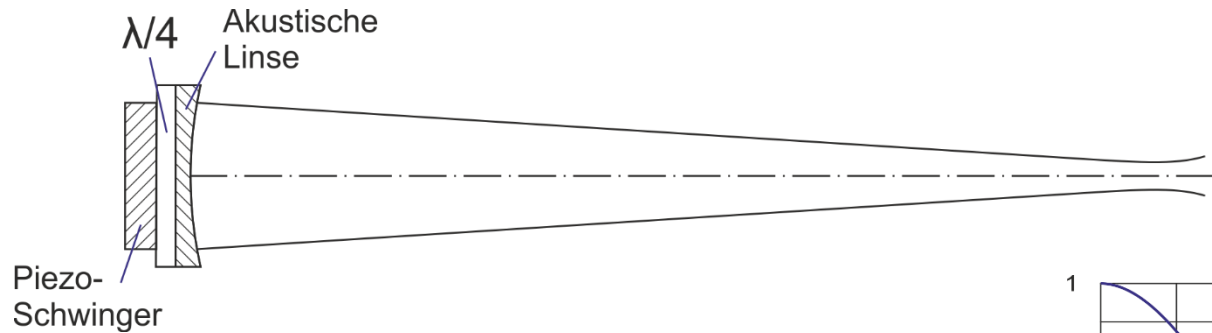
# Durchflussmessung unter Nutzung des Doppler-Effekts



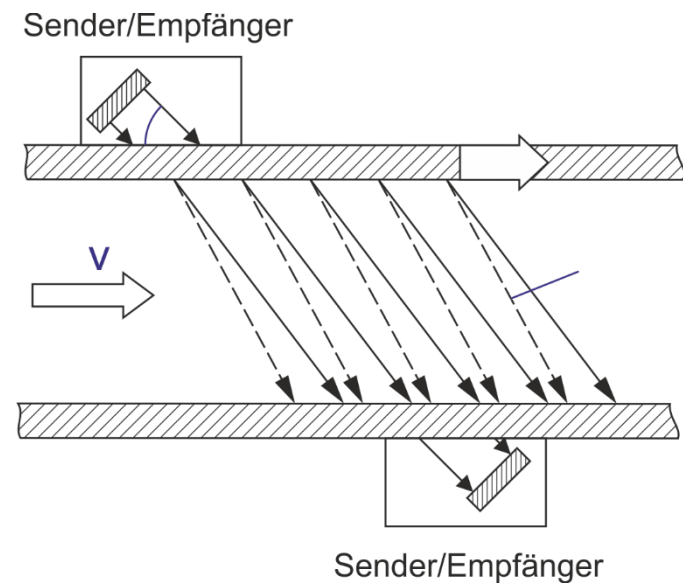
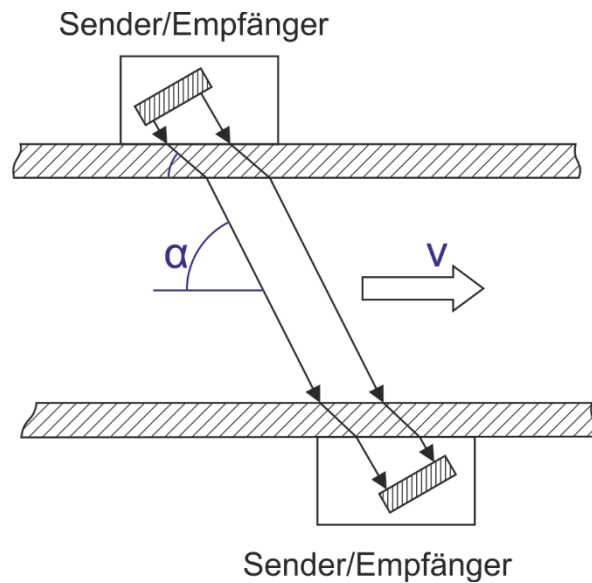


# Doppler-Messung

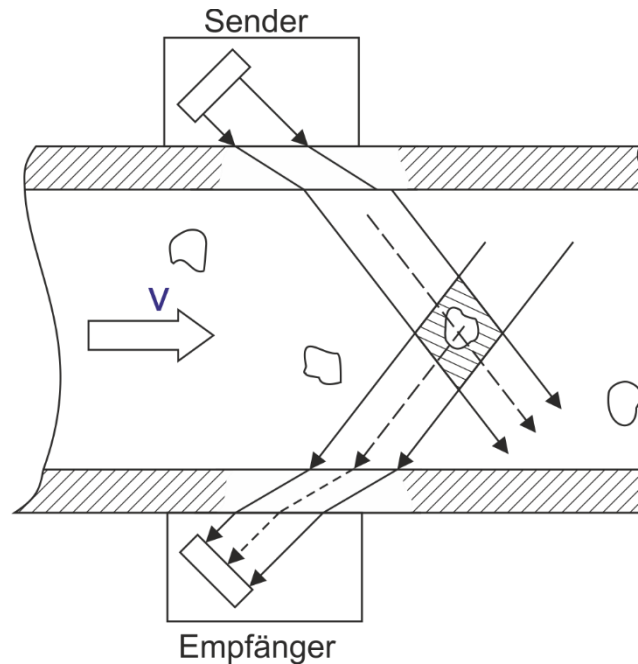
## Schallfokussierung für ortsselektives Messen



## 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

