

US3: Doppler-Sonographie

Ziel: Es sollen Strömungen auf ihre charakteristischen Eigenschaften mit dem Impuls-Echo-Verfahren untersucht werden.

Stichworte: Dopplereffekt, Doppler-Prisma, Durchflußmessung, Frequenzverschiebung, Impuls-Echo-Verfahren, laminare Strömung, Reynoldszahl, Schallgeschwindigkeit, turbulente Strömung, Ultraschall

Motivation: In der Medizin wird die Dopplersonographie eingesetzt um Blutströmungen in Gefäßen oder im Herzen sichtbar zu machen.

Theoretische Grundlagen

Menschen hören in einem Frequenzbereich von ca. 16 Hz bis ca. 20 kHz. Der Frequenzbereich oberhalb der Hörschwelle, mit Frequenzen von ca. 20 kHz bis ca 1 GHz, wird *Ultraschall* genannt. Oberhalb von 1 GHz spricht man von Hyperschall und unterhalb der Hörschwelle von Infraschall.

Unter dem *Doppler-Effekt* versteht man die Änderung der Frequenz, wenn sich ein Beobachter und eine Schallquelle relativ zueinander bewegen. *Bewegt sich die Quelle* auf den Beobachter zu, dann wird die Frequenz ν_0 zu höheren Frequenzen ν_{kl} verschoben. Entfernt sich die Quelle vom Beobachter sinkt die Frequenz ν_{gr} .

$$\nu_{kl/gr} = \frac{\nu_0}{1 \mp \frac{v}{c}} \quad (1)$$

Befindet sich die Quelle in Ruhe und der Beobachter bewegt sich auf die Quelle zu, dann wird die Frequenz ν_0 zu höheren Frequenzen ν_h verschoben. Wenn sich der Beobachter von der Quelle entfernt, dann wird die Frequenz zu niedrigeren Frequenzen ν_n verschoben.

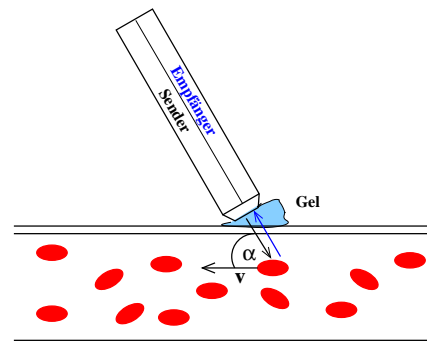
$$\nu_{h/n} = \nu_0 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right) \quad (2)$$

Im Bereich der Ultraschalltechnik nutzt man den Doppler-Effekt aus, um z.B. die Geschwindigkeit von Blutströmungen zu bestimmen. Trifft eine Ultraschallwelle auf ein bewegtes Objekt (z.B. Blutkörper), so wird die Frequenz ν_0 der Ultraschallwelle gemäß dem Doppler-Effekt verschoben. Die Frequenzverschiebung

$$\Delta\nu = \nu_0 \frac{v}{c} (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (3)$$

wird neben der Geschwindigkeit v des Objektes und der Schallgeschwindigkeit c durch die Winkel α und β bestimmt. Dabei sind α und β die Winkel zwischen der Geschwindigkeit v und der Wellennormalen der einlaufenden bzw. auslaufenden Welle. Bei dem verwendeten Impuls-Echo-Verfahren sind beide Winkel identisch $\alpha = \beta$, sodaß sich für die Frequenzverschiebung folgender Zusammenhang ergibt:

$$\Delta\nu = 2 \nu_0 \frac{v}{c} \cos \alpha \quad (4)$$



Die Erzeugung von Ultraschall kann auf verschiedene Arten geschehen. Eine Methode ist die Anwendung des reziproken *piezo-elektrischen Effekt*. Bringt man einen piezoelektrischen Kristall in ein elektrisches Wechselfeld, so kann man diesen zu Schwingungen anregen, wenn eine polare Achse des Kristalls in Richtung des elektrischen Feldes zeigt. Der Piezokristall strahlt beim Schwingen *Ultraschallwellen* ab. Stimmt die Anregungsfrequenz mit der Eigenfrequenz des Kristalls überein (Resonanz), können große Schwingungsamplituden erzeugt werden, sodaß extrem hohe Schallenergiedichten genutzt werden können. Der Piezokristall kann auch umgekehrt als Schallempfänger genutzt werden, hierbei treffen die Schallwellen auf den Kristall und regen diesen zu Schwingungen an. Quarze sind dabei die meist benutzten piezoelektrischen Kristalle, da sie gleichbleibende physikalische Eigenschaften haben. Jedoch haben sie einen relativ schwachen piezoelektrischen Effekt. Die im Experiment verwendete Ultraschallsonde beinhaltet sowohl den Ultraschallsender als auch den Empfänger.

Vorbereitung

- Berechnen Sie für einen Prismenwinkel θ von 15° , 30° und 60° den Dopplerwinkel α .

Aufgaben

- An verschiedenen Strömungsrohren soll die Fließgeschwindigkeit und das Strömungsprofil als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit und des Dopplerwinkels untersucht werden.
- Der Blutfluß in einem Armmodell soll mit der Doppler-Sonographie untersucht werden und eventuelle Gefäßverengungen festgestellt werden.

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Experimentelle Aufbau besteht im wesentlichen aus einem Ultraschall Doppler-Generator, Ultraschallsonden mit einer Frequenz von 2 MHz und einem Rechner für die Datenaufnahme und Datenanalyse. Als Untersuchungsobjekte stehen Strömungsrohre mit verschiedenen Innen- und Außendurchmessern sowie ein Armphantom zur Verfügung. Als Flüssigkeit wird ein Gemisch aus Wasser, Glycerin und Glaskugeln verwendet, deren akustische Eigenschaften an die verwendete Ultraschallfrequenz angepaßt wurde. Die Viskosität η der Dopplerphantomflüssigkeit ist so gewählt, daß sich bei einer mittlerer Strömungsgeschwindigkeit eine laminare Strömung ausbildet. Die Strömungsgeschwindigkeit kann hierbei mit einer Zentrifugalpumpe im Bereich von 0...10 l/min eingestellt werden. Neben den Strömungsrohren steht ein Armphantom zur Verfügung. Die Blutgefäße bestehen aus Silikonschläuchen, die in das Silikon des Armmodells eingebettet sind. Als Ultraschallsonde wird eine für das Armmodell speziell geformte 2 MHz Sonde verwendet, die einen Dopplerwinkel von 30° hat.



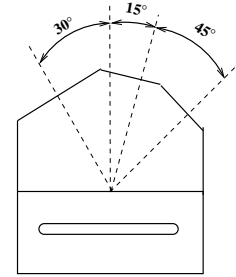
Die Ultraschallsonden sind empfindlich, deshalb vorsichtig behandeln!!!



Die vom Echoskop gemessenen Daten werden mit einem Rechner erfaßt und mit dem Programm FlowView angezeigt und ausgewertet. Die Meßsoftware ist sofort nach dem Starten des Programms aktiv. Machen Sie sich mit dem Programm vertraut.

Experimente mit Strömungsrohre

Für die Untersuchung der Strömungsgeschwindigkeiten und es Strömungsprofils stehen drei Strömungsrohre mit verschiedenen Innendurchmessern (7 mm, 10 mm und 16 mm) zur Verfügung. Für die Ankopplung der Ultraschallsonde an die Rohre werden *Doppler-Prismen* mit drei verschiedenen Einschallwinkel verwendet. Für eine bessere Ankopplung an die Rohre gibt es für jeden Rohrdurchmesser ein Doppler-Prisma. Das Doppler-Prisma (siehe Abbildung) besitzt drei speziell angeordnete Einstellflächen, die eine definierte und reproduzierbare Einstellung des Dopplerwinkels zur strömenden Flüssigkeit garantiert. Der Abstand zwischen Sonde und Flüssigkeit ist für alle drei Einstellwinkel gleich (siehe Abbildung). Die Berechnung des Dopplerwinkels α ergibt sich aus dem Brechungsgesetz und den Schallgeschwindigkeiten c_L der Doppler-Flüssigkeit und c_P des Prismenmaterials (Acryl).



$$\alpha = 90^\circ - \arcsin \left(\sin \theta \cdot \frac{c_L}{c_P} \right) \quad (5)$$

- Bestimmen Sie die Strömungsgeschwindigkeit als Funktion des Dopplerwinkels für 5 verschiedene Flussgeschwindigkeiten. Führen Sie die Messungen an einem Rohrdurchmesser durch. An dem Ultraschallgenerator muß bei den Geschwindigkeitsmessungen das **SAMPLE VOLUME** auf *LARGE* stehen. Stellen Sie an der Zentrifugalpumpe eine Geschwindigkeit (Spannung) ein und messen Sie mit der 2 MHz Sonde für alle drei Dopplerwinkel die Frequenzverschiebung $\Delta\nu$. Wiederholen Sie die Messung für weitere Geschwindigkeiten (Spannungen). Berechnen Sie aus der Dopplerverschiebung die Strömungsgeschwindigkeit der Dopplerflüssigkeit.

Tragen Sie in einem Diagramm für jeweils einen Dopplerwinkel $\Delta\nu/\cos\alpha$ als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit auf. Was ist zu beobachten?

- Bestimmen Sie das Strömungsprofil der Doppler-Flüssigkeit an einem 3/8 Zoll Schlauch mit einem Dopplerwinkel von 15° . Um die Meßtiefe variieren zu können, müssen Sie am Ultraschallgenerator das **SAMPLE VOLUME** auf *SMALL* stellen. Sie können dann mit dem Regler **DEPTH** die Meßtiefe einstellen. Die Meßtiefe ist hierbei in $[\mu s]$ angegeben. In Acryl entspricht $4 \mu s = 10 \text{ mm}$ und in der Dopplerflüssigkeit entspricht $4 \mu s = 6 \text{ mm}$. Stellen Sie die Zentrifugalpumpe auf eine maximale Pumpleistung von 70 Prozent. Messen Sie die Strömungsgeschwindigkeit und den Streuintensitätswert. Beginnen Sie bei einer Messtiefe von 30 mm, gehen Sie in 0.75 mm Schritten weiter bis Sie bei einer Messtiefe von 11 mm angelangt sind. Wiederholen Sie die Messung für eine Pumpleistung von 45 Prozent. Tragen Sie für beide Geschwindigkeiten in je einem Diagramm die Streuintensität und die Momentangeschwindigkeit als Funktion der Messtiefe auf. Interpretieren Sie das Ergebnis.

Experiment mit Armphantom

Für die Untersuchung der Durchflußgeschwindigkeit der Doppler-Flüssigkeit im Armphantom sollte die Durchflußgeschwindigkeit 40% betragen. Wählen Sie an der Pumpe den Arbeitsmodus M0 (kontinuierlich, venös). Stellen Sie auch den SOUND an, dann können Sie die Stenose hören. Verwenden Sie zur Untersuchung des Armmodells den Ultraschallkopf mit dem abgeschrägtem Kopf. Geben Sie etwas Ultraschallgel auf den Arm und bewegen Sie die Ultraschallsonde so lange, bis Sie ein maximales Signal sehen. Fahren Sie das Armmodell solange ab, bis Sie ein signifikantes Audiosignal scannen. Nehmen Sie ein Spektralbild auf. Drehen Sie die Sondenrichtung um 180 Grad und untersuchen Sie den Arm auf Veränderungen im Spektralbild (Stenose). Beschreiben Sie die Veränderung. Schalten Sie die Zentrifugalpumpe in den pulsierenden Modus. Beschreiben Sie die erhaltenen Bilder und analysieren Sie die Pulsfrequenz.

Literatur

- [1] G. Sorge *Faszination Ultraschall*, Teubner 2002
- [2] Geschke *Physikalisches Praktikum* Teubner

Technische Daten

Dopplerphantomflüssigkeit: $\rho = 1.15 \text{ g/ccm}$	Dichte
$c_L = 1800 \text{ m/s}$	Schallgeschwindigkeit
$\eta = 12 \text{ mPa s}$	Viskosität

Dopplerprisma: $c_P = 2700 \text{ m/s}$	Schallgeschwindigkeit
$l = 30.7 \text{ mm}$	Länge der Vorlaufstrecke

Strömungsrohre:	Innendurchmesser	Außendurchmesser
	7 mm	10 mm
	10 mm	15 mm
	16 mm	20 mm