

Laser-Doppler-Anemometrie mit CASSY

Versuchsziele

- Nachweis der Interferenz im Kreuzungspunkt zweier kohärenter Strahlen
- Messung der Frequenzverschiebung zweier Lichtstrahlen durch die Streuung an bewegten Teilchen
- Bestimmung der Geschwindigkeit der in einer Flüssigkeit mitbewegten Teilchen
- Vergleich der Geschwindigkeiten der Teilchen in der Mitte und am Rand eines Rohres
- Vergleich der Ergebnisse mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit

Grundlagen

Die Laser-Doppler-Anemometrie (kurz LDA) ist ein berührungsfreies, optisches Messverfahren, um die Geschwindigkeit einer Strömung (Flüssigkeit, Gase) zu bestimmen, indem die Geschwindigkeit kleiner bewegter Teilchen bestimmt wird, die in der Strömung mitgeführt werden. Bewegen sich die Teilchen durch das Messvolumen der LDA, streuen sie Licht, dessen Frequenz aufgrund des Dopplereffekts verschoben wird. Die Größe der Frequenzverschiebung wird bestimmt und in die Teilchen- und damit die Strömungsgeschwindigkeit umgerechnet.

Es gibt zwei Modelle, mit denen die Laser-Doppler-Anemometrie beschrieben werden kann:

a) Im ersten Fall wird die Dopplerverschiebung betrachtet, die das Licht bei der Streuung an den kleinen Teilchen erfährt, die sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegen. Dabei wird das Teilchen einmal als bewegter Empfänger betrachtet, der von einer stationären Quelle beleuchtet wird. Zur Dopplerverschiebung trägt dabei nur die Geschwindigkeitskomponente in Ausbreitungsrichtung des Lichtes \vec{l} bei (s. Abb. 1). Dies führt zu einem ersten Anteil an der gesamten Dopplerverschiebung:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{l}}{c \cdot l} \right) \quad \text{für } (v \ll c). \quad (I)$$

Für das gestreute Licht stellt das Teilchen dann einen bewegten Sender dar, der Photodetektor einen ruhenden Empfänger. Dies führt zu einem weiteren Faktor in der Dopplerverschiebung. Zur Dopplerverschiebung trägt hier nur die Geschwindigkeitskomponente in Ausbreitungsrichtung des gestreuten Lichtes \vec{k} bei:

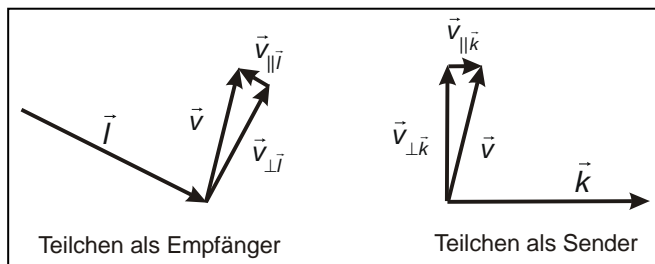


Abb. 1: Streuung von Licht an kleinen bewegten Teilchen



Abb. 2: Versuchsaufbau

$$v = v_0 \frac{1}{1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{k}}{c \cdot k}} \quad \text{für } (v \ll c). \quad (II)$$

Die Frequenz, die am Photodetektor gemessen wird und durch beide Prozesse bestimmt wird, beträgt:

$$v = v_0 \frac{1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{l}}{c \cdot l}}{1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{k}}{c \cdot k}}. \quad (III)$$

In der Anwendung ist die beobachtete Frequenzverschiebung sehr klein und schwierig zu beobachten. Daher verwendet man Methoden, um eine direkte optische Frequenzmessung zu umgehen.

Im Aufbau dieses Experiments wird der Laserstrahl in zwei Teilstrahlen gleicher Intensität aufgeteilt und anschließend im Messvolumen fokussiert überlagert. Teilchen, die diesen Bereich durchlaufen, streuen Licht aus beiden Strahlen (s. Abb. 3). Die Dopplerverschiebung ist dabei für die beiden

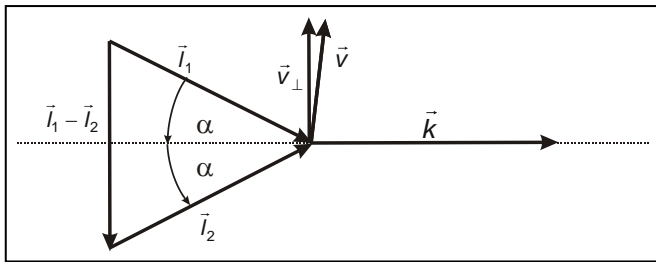


Abb. 3: Streuung an zwei sich überlagernden Lichtstrahlen

Strahlen unterschiedlich, da sie aus unterschiedlichen Richtungen einfallen, das Streulicht aber in der gleichen Richtung beobachtet wird (unterschiedliche Vektoren \vec{l} , gleicher Vektor \vec{k} , siehe Abb. 3).

Die Differenz der beiden Frequenzen, allgemein als Schwebungsfrequenz bekannt, wird in diesem Fall Dopplerfrequenz genannt und ist deutlich kleiner als die Frequenz der Lichtquelle und hat zudem eine geringere Bandbreite. Daher kann diese relativ einfach elektronisch gemessen werden.

Die Abhängigkeit der Dopplerfrequenz von der Geschwindigkeit der Teilchen ergibt sich folgendermaßen. Die Frequenz des Streulichts der beiden Teilstrahlen ergibt sich nach Gleichung (III) zu

$$v_1 = v_0 \frac{1 - \frac{\vec{v} \circ \vec{l}_1}{c \cdot l_1}}{1 - \frac{\vec{v} \circ \vec{k}}{c \cdot k}} \quad \text{und} \quad v_2 = v_0 \frac{1 - \frac{\vec{v} \circ \vec{l}_2}{c \cdot l_2}}{1 + \frac{\vec{v} \circ \vec{k}}{c \cdot k}} \quad (IV)$$

Die Differenz ist dann gegeben durch

$$v_D = v_1 - v_2 = \frac{v_0}{c \cdot |\vec{l}_1 - \vec{l}_2|} \frac{\vec{v} \circ (\vec{l}_1 - \vec{l}_2)}{1 - \frac{\vec{v} \circ \vec{k}}{c \cdot k}} \quad (V)$$

Der Vektor $\vec{l}_1 - \vec{l}_2$ steht senkrecht auf der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Strahlrichtungen (s. Abb. 3); daher kann im Experiment nur die Geschwindigkeitskomponente v_{\perp} entlang dieses Vektors bestimmt werden. In unserem Experiment wird daher das Glasrohr, durch das die Flüssigkeit fließt, entlang dieser Richtung ausgerichtet. Dann entspricht v_{\perp} direkt der Strömungsgeschwindigkeit v .

Betrachtet man nur Streuung entlang der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Strahlen und nur die Geschwindigkeitskomponente v_{\perp} , wird der Nenner $1 - \frac{\vec{v} \circ \vec{k}}{c \cdot k} = 1$. Beträgt zusätzlich der Winkel zwischen den beiden Strahlen 2α , so erhält man insgesamt:

$$v_D = v_1 - v_2 = \frac{v_0}{c} v_{\perp} \cdot 2 \sin \alpha = \frac{v_{\perp} \cdot 2 \sin \alpha}{\lambda} \quad (VI)$$

In der Messung wird v_D bestimmt, die Wellenlänge des Lasers $\lambda = \frac{v_0}{c}$ ist bekannt und der Winkel 2α zwischen den

beiden Strahlen ergibt sich aus den geometrischen Abmessungen des Aufbaus. Damit lässt sich durch die Messung der Dopplerfrequenz v_D die Geschwindigkeitskomponente v_{\perp} des Teilchens bestimmen über

$$v_{\perp} = \frac{v_D \cdot \lambda}{2 \sin \alpha} \quad (VII)$$

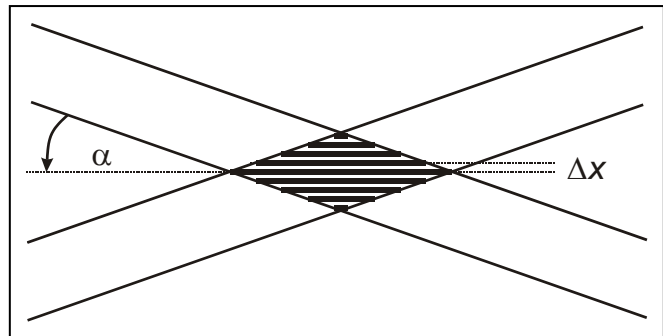


Abb. 4: Interferenzmuster im Überlagerungsbereich zweier Strahlen

b) Das Prinzip der LDA kann auch als Interferenzphänomen betrachtet werden. In dem Bereich, wo sich die beiden Laserstrahlen überschneiden, bildet sich ein Interferenzmuster aus. Fällt der Überlagerungsbereich mit den Foki der Strahlen zusammen, so sind die Wellenfronten gerade und die Bereiche konstruktiver und destruktiver Interferenz verlaufen parallel und haben den Abstand Δx (s. Abb. 4).

Dieser Abstand hängt nur von der Wellenlänge λ des verwendeten Lichts und dem Winkel 2α zwischen den beiden Strahlen ab:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha} \quad (VIII)$$

Bewegt sich ein Teilchen durch dieses Interferenzmuster hindurch, streut es in den hellen Bereichen das Licht, in den dunklen hingegen nicht. Am Detektor wird daher eine zeitliche Variation der Intensität gemessen; der zeitliche Abstand Δt und damit die Frequenz v_D dieser Variation hängt vom Abstand der Interferenzstreifen Δx und der Geschwindigkeitskomponente v_{\perp} des Teilchens senkrecht dazu ab:

$$\frac{1}{\Delta t} = v_D = \frac{v_{\perp}}{\Delta x} = \frac{v_{\perp} \cdot 2 \sin \alpha}{\lambda} \quad (IX)$$

Diese Gleichung stimmt mit Gleichung (VI) überein. Man erhält also in beiden Betrachtungsweisen das gleiche Ergebnis für die Abhängigkeit der Dopplerfrequenz von der Geschwindigkeit der bewegten Teilchen.

Zusammenfassung

In beiden Betrachtungsweisen hängt die zeitliche Variation des Signals an der Photodiode also nur von der Wellenlänge des verwendeten Lasers, vom Winkel 2α zwischen den beiden Strahlen und der Geschwindigkeitskomponente v_{\perp} des Teilchens senkrecht zur Winkelhalbierenden der beiden Strahlen ab. Misst man daher im Experiment die Frequenz v_D der Variation, so kann direkt die Geschwindigkeitskomponente v_{\perp} des Teilchens bestimmt werden.

Geräte

1 Optische Bank mit Normalprofil, 1 m	460 32
1 Optische Bank mit Normalprofil, 0,5 m	460 335
10 Optikreiter 90/50	460 374
1 He-Ne-Laserkopf, 5 mW	471 821
1 Netzgerät zu He-Ne-Laser	471 825
1 Laserträger für He-Ne-Laser, 5 mW	470 010
1 Halter für Strahlteiler	473 431
1 Strahlteiler 50%	473 432
1 Verlängerungsarm	460 380
1 Planspiegel, feinjustierbar	473 461
1 Verlängerungsstiel	460 385
1 Linse in Fassung $f = + 50$ mm	460 02
1 Linse in Fassung $f = + 100$ mm	460 03
1 Irisblende	460 26
2 Halter mit Federklemmen	460 22
1 Blende mit 3 Beugungslöchern	469 96
1 Ringblende aus Satz 4 verschiedene Blenden	461 63
1 Durchscheinender Schirm	441 53
1 Silizium-Photodetektor	558 835
1 AC/DC-Verstärker 30 W	522 61
1 Messkabel BNC / 4-mm-Stecker	575 24
1 Paar Kabel 50 cm, rot/blau	501 45
1 Experimentierkabel 10 cm rot	500 401
1 Satz 6 Kupplungen rot	501 641
1 Widerstand 100 k Ω STE 2/19	577 68
1 Scheidetrichter, 500 ml	602 404
2 Silikonschlauch, 7 mm \varnothing	604 433
1 Quetschhahn	667 175
1 Glasrohr, 200 x 8 mm \varnothing	664 146
1 Halter für Steckelemente	460 21
2 Kleiner Federstecker	590 02
1 Großer Stativfuß, V-förmig, 28 cm	300 01
1 Stativstange, 100 cm	300 44
1 Stativring mit Muffe	666 546
1 Mikro-Doppelspatel, 150 mm	604 5672
1 Becherglas aus Borosilikatglas, 150 ml	602 010
1 Messbecher aus SAN, 500 ml	604 215
1 Bandmaß, 1 m / 1 mm	311 78
1 Streupartikel	683 70
1 Sensor-CASSY	524 010USB
1 CASSY Lab	524 200
1 PC ab Windows 95/98/NT	

Sicherheitshinweis

Der He-Ne-Laser 5 mW entspricht der Klasse 3B. Laser der Klasse 3B sind potentiell gefährlich, falls ein direkter oder spiegelnd reflektierter Strahl in das ungeschützte Auge gelangt (direktes Blicken in den Strahl). Bei Beachtung der entsprechenden Hinweise in der Gebrauchsanweisung ist das Experimentieren mit dem He-Ne-Laser ungefährlich:

- Nicht in den direkten oder reflektierten Laserstrahl blicken!
- Geeignete Laserschutzbrillen tragen.
- Unbeabsichtigte spiegelnde Reflexionen vermeiden (z.B. durch Uhren, Schmuck, Werkzeug mit metallischen Oberflächen etc.)!
- Alle Laserstrahlen sollte am Ende des zweckbedingten Strahlengangs durch ein diffus streuendes Material geblockt werden.
- Vor dem Einbringen neuer optischer Komponenten in den Aufbau (Spiegel, Strahlteiler, Linsen etc.) den Laserstrahl abdecken oder Laser ausschalten!
- Diffuse Reflexe mit mindestens 15 cm Abstand zur reflektierenden Fläche betrachten!

Aufbau und Durchführung

- Das Sensor-CASSY an den Rechner anschließen und Messprogramm CASSY Lab starten.
- Beispiel laden.

Aufbau der optischen Komponenten

1. Die Optischen Bänke parallel zum Tisch und zueinander ausrichten:
 - Die Optischen Bänke direkt hintereinander aufstellen.
 - Die Höhe der kürzeren Optischen Bank an die Höhe der anderen Optischen Bank angleichen.
 - Die kürzere Optische Bank um 180° drehen und mit dem anderen Ende hinter der anderen Optischen Bank aufstellen. Wieder die Höhe an die Optische Bank anpassen.
 - Die längere Optische Bank mit dem anderen Ende hinter der kürzeren aufstellen und die **Höhe der längeren Optischen Bank** anpassen.
 - Die Optischen Bänke sollten jetzt an beiden Enden die gleiche Höhe aufweisen.
2. Den Laserstrahl parallel zur kürzeren Optischen Bank ausrichten:
 - Den He-Ne-Laser 5 mW im Laserträger befestigen und mit zwei Optikreitern an einem Ende der kürzeren Optischen Bank befestigen.
 - Den Laserstrahl parallel zur Optischen Bank ausrichten:
 - a) Die Irisblende in einem Optikreiter direkt vor dem Laser auf der Optischen Bank befestigen und auf die gewünschte Strahlhöhe des Versuchsaufbaus einstellen. Blende möglichst weit schließen. Die Schrauben des Laserträgers auf der der Blende zugewandten Seite des Lasers leicht öffnen. Mit den unteren beiden Schrauben den Laser so ausrichten, dass der Laserstrahl mittig durch die Blende trifft. Anschließend obere Schraube vorsichtig anziehen.

b) Die Irisblende möglichst weit vom Laser entfernt auf der kürzeren Optischen Bank befestigen, ohne die Höhe zu verändern. Die Schrauben des Laserträgers auf der der Blende abgewandten Seite leicht öffnen. Mit den unteren beiden Schrauben den Laser so ausrichten, dass der Laserstrahl mittig durch die Blende trifft. Anschließend obere Schraube vorsichtig anziehen.

- Punkte a und b so oft wiederholen, bis der Strahl gleichzeitig die Blende für beide Positionen mittig trifft. Anschließend Blende entfernen.

Hinweis:

Durch das Einbringen eines neuen optischen Elements in den Strahlengang können unkontrollierte Reflexe auftreten, die für den Beobachter gefährlich sein können:

- Laserstrahl vor dem neuen Element abdecken bzw. Laser ausschalten.
- Strahlengang direkt hinter dem neuen Element mit dem durchscheinenden Schirm abdecken.

Strahlengang erst nach dem Einbringen und Fixieren des neuen Elements wieder aufdecken und ggf. die Position des durchscheinenden Schirms verändern.

3. Den Planspiegel justieren, so dass der Laserstrahl senkrecht zur kürzeren Optischen Bank abgelenkt wird:

- Den Planspiegel im Verlängerungsstiel auf einem Optikreiter in einigen Zentimetern Abstand zum Ende der kürzeren Optischen Bank befestigen, so dass der Planspiegel mittig getroffen wird und der Reflex zurück in Richtung des Lasers gerichtet ist. Die vertikale Ablenkung des Spiegels mit der oberen Rändelschraube so einstellen, dass der Strahl in gleicher Höhe zurückreflektiert wird.
- Die längere Optische Bank ungefähr im rechten Winkel zur kürzeren Optischen Bank vor dem Planspiegel aufstellen. Den durchscheinenden Schirm am Ende der längeren optischen Bank befestigen.
- Den Planspiegel um 45° drehen, so dass der Strahl nach der Reflektion parallel zur längeren Optischen Bank verläuft. Dadurch wird der Planspiegel vom Laserstrahl nicht mehr mittig getroffen. Irisblende auf der Optischen Bank nahe dem Planspiegel aufstellen und möglichst weit schließen.

4. Ausrichtung des Planspiegels parallel zur Optischen Bank:

- Planspiegel so auf der Zusatzschiene verschieben, dass der reflektierte Strahl gerade durch die Blende trifft.
 - Irisblende ans andere Ende der optischen Bank verschieben. Die horizontale Ablenkung des Laserstrahls mit der seitlichen Rändelschraube des Planspiegels so einstellen, dass der reflektierte Strahl durch die Blendenöffnung trifft. Die Höhe des Strahls sollte nahezu unverändert sein, ggf. die vertikale Ablenkung des Planspiegels mit der oberen Rändelschraube so nachjustieren, dass der Strahl durch die Blende trifft.
- Punkte a und b so lange wiederholen, bis der Strahl im gesamten Bereich der optischen Schiene die gleiche Stelle der Blende trifft. Zum Schluss die Irisblende wieder direkt vor dem Planspiegel aufstellen.
 - Den Planspiegel vorsichtig um ca. 0,8 cm zum Ende der Bank hin verschieben. Der Laserstrahl verläuft nun in 0,8 cm Abstand zur optischen Achse der Optischen Bank.

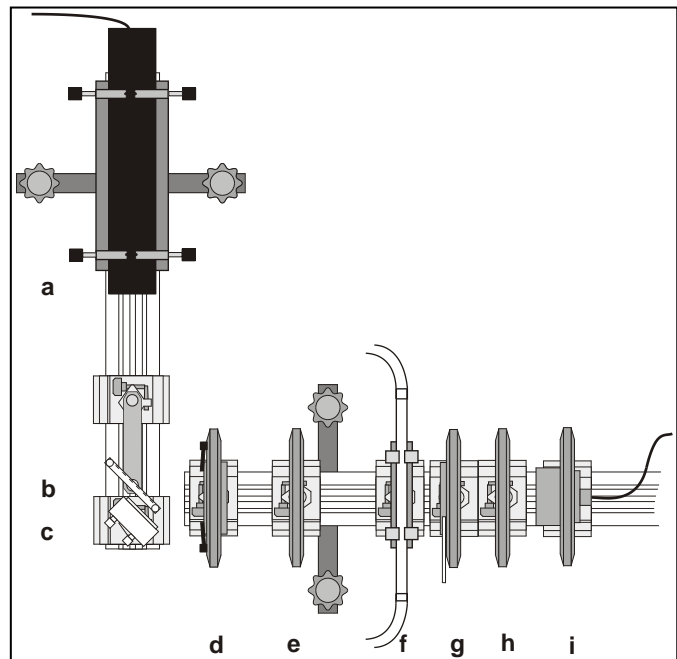


Abb. 5: Aufbau der optischen Elemente

a	He-Ne-Laserkopf, 5 mW
b	Strahlteiler 50% auf Verlängerungsarm
c	Planspiegel, feinjustierbar
d	Ringblende
e	Linse in Fassung $f = + 100$ mm
f	Glasrohr
g	Irisblende
h	Linse in Fassung $f = + 50$ mm
i	Silizium-Photodetektor

5. Ausrichten des Strahlteilers, so dass der vom Strahlteiler reflektierte Teilstrahl (kurz Strahlteilerstrahl) parallel zur Optischen Bank in ca. 1,6 cm Abstand zum vom Planspiegel reflektierten Teilstrahl (kurz Planspiegelstrahl) verläuft:

- Strahlteiler in den Verlängerungsarm einsetzen und mit einem Optikreiter so vor dem Planspiegel auf der Zusatzschiene aufstellen, dass die reflektierende Schicht dem Laser zugewandt ist, der Strahlteiler mittig getroffen wird und der reflektierte Strahl zurück in Richtung des Lasers gerichtet ist. Die Verkipfung des Strahlteilers so einstellen, dass der reflektierte Strahl auf gleicher Höhe zurückreflektiert wird. Hierzu die Imbusschrauben am Stiel vorsichtig öffnen und geeignet wieder anziehen (siehe Gebrauchsanleitung).

Achtung: Zusätzlich zum Hauptstrahl treten weitere parasitäre Strahlen auf, die von Reflexionen an der Rückseite des Strahlteilers herrühren. Bei der Justage ist daher darauf zu achten, dass immer der Hauptstrahl (größte Intensität) für die Justage verwendet wird!

- Den Strahlteiler um 45° drehen.
- Irisblende so weit öffnen, dass der Planspiegelstrahl auf der rechten Seite der Öffnung gerade nicht mehr durchgelassen wird (ca. 1,5 cm).
- Abstand des Strahlteilers zum Planspiegel so einstellen, dass der Strahlteilerstrahl auf der linken Seite der Irisblendenöffnung gerade noch abgeblockt wird. Der vom Planspiegelstrahl darf nicht vom Halter der Strahlteilers abgeblockt werden.

- Ausrichtung des Strahlteilerstrahls parallel zum Planspiegelstrahl:

a) Den Strahlteiler so auf der Zusatzschiene verschieben, dass der reflektierte Strahl auf der linken Seite der Irisblendenöffnung symmetrisch zum Planspiegelstrahl auftrifft.

a) Irisblende ans andere Ende der optischen Bank verschieben. Die vertikale Ablenkung des Strahlteilers durch vorsichtiges Drehen des Halters so einstellen, dass der Strahlteilerstrahl auf der linken Seite der Irisblendenöffnung wieder symmetrisch zum Planspiegelstrahl auftrifft. Achtung: Die Höhe des Strahls sollte nahezu unverändert sein, ggf. Verkipfung des Strahlteilers so nachjustieren, dass Planspiegelstrahl und Strahlteilerstrahl die Irisblende auf gleicher Höhe treffen.

b) Punkte a und b so lange wiederholen, bis Planspiegelstrahl und Strahlteilerstrahl im gesamten Bereich der Optischen Bank parallel im Abstand von ca. 1,5 cm verlaufen. Anschließend Irisblende entfernen.

6. Ausblenden der parasitären Strahlen:

- Ringblende in den Halter mit Federklemmen einsetzen und so am Anfang der Optischen Bank möglichst nahe zu Planspiegel und Strahlteiler aufstellen, dass nur die beiden Hauptstrahlen durchgelassen werden. Alle parasitären Reflexe sollten von der Lochblende abgedeckt sein.

7. Überlagerungsbereich von Planspiegelstrahl und Strahlteilerstrahl im Brennpunkt der Linse mit $f = + 100$ mm einstellen:

- Direkt hinter der Lochblende die Linse mit $f = + 100$ mm befestigen und senkrecht zur optischen Achse ausrichten. Die Linsenmitte sollte auf gleicher Höhe wie Planspiegelstrahl und Strahlteilerstrahl liegen. Die Rückreflexe von der Linse sollten auf gleicher Höhe und symmetrisch zur optischen Achse auf die Rückseite der Ringblende treffen.

- Bei Bedarf den durchscheinenden Schirm so weit verschieben, dass die Strahlen wieder auf den Schirm treffen.

- Blende mit 3 Beugungslöchern in den Halter mit Federklemmen einsetzen und so hinter der Linse befestigen, dass sich die Blende gerade im Abstand $f = 100$ mm hinter der Linse befindet. (Achtung: Die Blende befindet sich nicht mittig über dem Halter.)

- Den Planspiegelstrahl zwischen Strahlteiler und Planspiegel durch ein Stück Papier abdecken. Auf dem Schirm ist nur noch der Strahlteilerstrahl sichtbar.

- Die Blende so im Halter ausrichten, dass der Strahl mittig durch die kleinste Blendenöffnung trifft. Dies ist erreicht, wenn hinter der Blende auf dem Schirm ein symmetrisches Beugungsmuster der Blende erscheint.

- Planspiegelstrahl wieder aufdecken und mit Hilfe der Rändelschrauben des Planspiegels so nachjustieren, dass auch dieser Strahl mittig durch die kleinste Blendenöffnung trifft. Hierzu sollten keine großen Änderungen nötig sein.

- Blende mit 3 Beugungslöchern wieder entfernen.

Im Fokus der Linse überlagern sich nun beide Strahlen kohärent und bilden ein Interferenzmuster (s. Abb. 4). Dieses kann durch eine weitere Linse abgebildet und beobachtet werden.

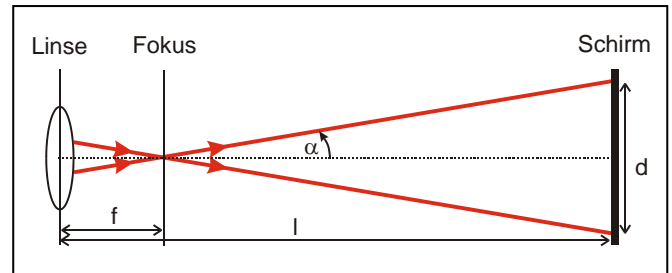


Abb. 6: Bestimmung des Winkels zwischen den Strahlen

Abbildung des Interferenzbereichs zur Überprüfung der Justage:

- Die Linse mit $f = + 50$ mm ca. 15 cm hinter der Linse mit $f = + 100$ mm aufstellen.

- Den durchscheinenden Schirm möglichst weit entfernt (falls möglich auch hinter der optischen Bank) aufstellen. Achtung: Lasersicherheit muss gewährleistet bleiben (siehe Sicherheitshinweise)!

- Die Linse so verschieben, dass die beiden Strahlen auf dem Schirm wieder überlagert werden.

- Den Schirm so weit drehen, dass die Strahlen streifend auftreffen, sich aber immer noch überlagern.

Auf dem Schirm ist nun ein Interferenzmuster zu sehen. Zur Überprüfung je einen der beiden Strahlen abdecken: Das Interferenzmuster verschwindet. Werden beide Strahlen wieder aufgedeckt, erscheint das Interferenzbild wieder.

Bestimmung des Winkels zwischen den beiden Strahlen

Bevor das Glasrohr in den Strahlengang eingebracht wird, sollte der Winkel 2α , unter dem sich die beiden Strahlen im Messvolumen treffen, bestimmt werden.

- Die Linse mit $f = + 50$ mm wieder von der optischen Bank nehmen.

- Den durchscheinenden Schirm so hinter die Linse mit $f = 100$ mm aufstellen, dass er von den beiden Strahlen in möglichst großem Abstand d getroffen wird.

- Den Abstand d von Strahlmittelpunkt zu Strahlmittelpunkt sowie den Abstand l zwischen Linse und Schirm messen.

- Der gesuchte Winkel 2α ergibt sich dann aus

$$\tan \alpha = \frac{d}{2 \cdot (l - f)} \quad (X)$$

mit $f = 100$ mm.

Aufbau des Flüssigkeitsreservoirs

- Die Stativstange auf dem großen Stativfuß befestigen.

- Den Scheidetrichter mit dem Stativring mit Muffe an der Stativstange befestigen.

- Einen Silikonschlauch an der unteren Öffnung des Scheidetrichters befestigen.

Aufbau der Durchflusszelle

- Das freie Ende des Silikonschlauchs und ein Ende des zweiten Silikonschlauchs vorsichtig über das Glasrohr streifen. Vorsicht! Das Glasrohr besteht aus Quarz und ist leicht zerbrechlich.

- Das Glasrohr mit den kleinen Federsteckern auf dem Halter für Steckelemente befestigen und mit einem Optikeiter auf der optischen Bank so hinter der Linse mit $f = 100$ mm befestigen, dass der Fokus der Linse innerhalb des Glasrohrs liegt.

- Anschließend mit einem weichen Tuch vorsichtig Staub und Fingerspuren vom Glasrohr abwischen.

- Das Glasrohr so im Strahlengang ausrichten, dass das Glasrohr senkrecht zu optischen Achse liegt und Planspiegelstrahl und Strahlteilerstrahl sie auf mittlerer Höhe treffen. Die Rückreflexe von der Glasoberfläche verlaufen dann symmetrisch und auf gleicher Höhe wie die einfallenden Strahlen.
- Den Silikonschlauch mit offenem Ende mit dem Quetschhahn verschließen. Das Schlauchende sollte während der Messung in einem geeigneten Gefäß (z.B. Messbecher aus SAN) enden.

Vorbereitung der Messflüssigkeit

Als Messflüssigkeit dient destilliertes Wasser, in dem sich eine kleine Menge Streupartikel befindet. Damit sich während einer Messung immer nur ein Streuteilchen im Messvolumen befindet, darf die Messflüssigkeit nur sehr wenige Streupartikel enthalten.

- Im Becherglas etwa 10 ml destilliertes Wasser mit einer Spatelspitze voll Streupartikel mischen.
- Den Messbecher aus SAN mit etwa 500 ml destilliertem Wasser füllen. 2 bis 3 ml der Mischung mit Streupartikeln hinzugeben und umrühren.
- Flüssigkeit in den Scheidetrichter füllen und den Scheidetrichter ans obere Ende der Stativstange schieben. Messbecher aus SAN unter das freie Schlauchende stellen.
- Den Hahn am Scheidetrichter öffnen. Den Quetschhahn so weit öffnen, dass sich der Schlauch einschließlich dem Glasrohr ganz mit Wasser füllt. Anschließend Quetschhahn an der unteren Abklärflasche wieder schließen.
- Abstand des Glasrohrs zur Linse mit $f = 100$ mm nochmals überprüfen. Position ggf. ändern, so dass der Kreuzungspunkt der beiden Strahlen in der Mitte des jetzt mit Wasser gefüllten Glasrohrs liegt.

Aufbau des Photodetektors

- Ca. 5 cm hinter der Glasrohr die Irisblende aufstellen und so weit öffnen, dass die beiden durchgehenden Strahlen gerade noch von ihr abgedeckt werden. Es trifft nur Streulicht vom Glasrohr durch die Blendenöffnung.
- Direkt hinter der Irisblende die Linse mit $f = 50$ mm aufstellen, mit der das Streulicht auf den Photodetektor fokussiert wird.
- Den Silizium-Photodetektor hinter der Linse mit $f = 50$ mm so aufstellen, dass das Streulicht aus dem Glasrohr auf den Silizium-Photodetektor abgebildet wird.

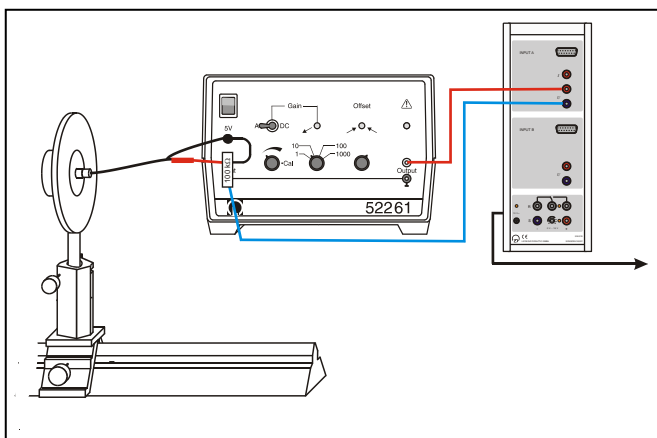


Abb. 7: Elektrischer Aufbau

- Blaues Kabel 50 cm in den linken Masseingang des AC/DC-Verstärkers stecken, rotes Kabel 10 cm in den Signaleingang und beide Eingänge mit dem $100 \text{ k}\Omega$ Widerstand verbinden (siehe Abb. 7).
- Den Ausgang des Silizium-Photodetektors an das Messkabel BNC/4-mm-Stecker anschließen.
- Den großen 4-mm-Stecker des Messkabels mit dem 5 V-Ausgang des AC/DC-Verstärkers und den kleinen 4-mm-Stecker des Messkabels über eine Kupplung mit dem roten Kabel am Signaleingang des Verstärkers verbinden.
- Den Ausgang des Verstärkers über die zwei 50 cm Kabel mit dem Eingang A des Sensor-CASSY verbinden (siehe Abb.7).
- Sensor-CASSY an den Rechner anschließen.
- Folgende Einstellungen des AC/DC-Verstärkers wählen:
 - AC/DC-Wahlschalter: Stellung AC
 - kontinuierlicher Abschwächer: Rechtsanschlag (kalibriert)
 - Verstärkungswahlschalter: x 10

Versuchsdurchführung

- CASSY Lab aufrufen und Einstellungen laden.
- Den Quetschhahn vorsichtig öffnen, so dass langsam Flüssigkeit durch das Glasrohr fließt. Die Strömung kann durch die Streuung von Licht an den Streupartikeln in dem Glasrohr beobachtet werden, die Strömungsgeschwindigkeit sollte im Bereich einiger mm/s liegen. Die Flüssigkeit tropft dann langsam aus dem freien Schlauchende. Aufgrund der schwachen Strömung ändert sich der Wasserstand im Scheidetrichter und damit die Strömungsgeschwindigkeit nur wenig; daher stehen mehrere Minuten Zeit für eine Messung zur Verfügung.
- Messung mit oder Taste F9 starten. In den Messparametern ist die „wiederholende Messung“ standardmäßig voreingestellt. Dadurch wird nach jeder Messung automatisch eine neue gestartet. In einigen Messungen sollten Kurven mit einer schnellen Modulation sichtbar sein (siehe Abb. 8). Dies ist das gesuchte Signal. Die Messung kann dann mit oder Taste F9 gestoppt werden.
- Es ist hilfreich, in den Messparametern eine Triggerschwelle knapp oberhalb des Rauschlevels einzustellen. Nur größere Modulationen wie das gesuchte Signal lösen dann den Trigger aus und eine Messung beginnt.

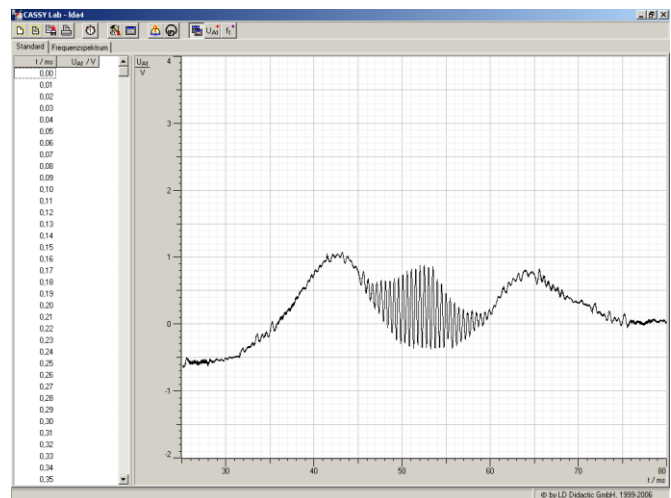


Abb. 8: Typische Messkurve

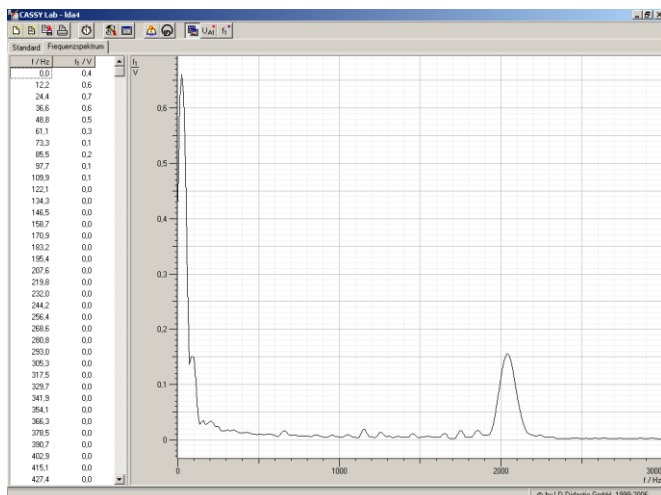



Abb. 9: Frequenzspektrum zur Messkurve aus Abb. 8

- Erscheint die Kurve am oberen Rand abgeschnitten, so ist der Messbereich des Sensors zu klein gewählt. Dann muss ein größerer Messbereich in den Einstellungen des Sensors gewählt werden. Erscheint daraufhin die Kurve immer noch abgeschnitten, so wird möglicherweise der AC/DC-Verstärker übersteuert. Dann muss eine kleinere Verstärkung gewählt werden.
- Für das Messsignal steht in der Darstellung Frequenzspektrum die Fouriertransformierte des Messsignals UA1 zur Frequenzanalyse zur Verfügung. Neben Signal bei sehr kleinen Frequenzen, das u.a. durch Streueffekte an den Glasrohrwänden, elektronisches Rauschen etc. bewirkt wird, ist ein scharfer Peak bei höheren Frequenzen sichtbar (siehe Abb. 8). Dies ist die gesuchte Dopplerfrequenz ν_D .
- Bei sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten ($< 1 \text{ mm/s}$) ist es möglich, dass der Frequenzpeak im Bereich des niederfrequenten Rauschens verschwindet; dann muss der Quetschhahn vorsichtig weiter geöffnet werden.
- Bei sehr großen Geschwindigkeiten ($> 50 \text{ mm/s}$) kann Turbulenz auftreten, durch die die Strömungsgeschwindigkeiten stark variieren und das Ergebnis wenig aussagefähig wird. Dann die Strömungsgeschwindigkeit verringern.
- Zusätzlich können die Ergebnisse verfälscht werden, falls das Intervall zwischen zwei Messpunkten zu groß gewählt wurde. Dann werden die Maxima und Minima der Kurve nicht richtig wiedergegeben (Aliasingeffekt). Dann das Intervall in den Messparametern verkleinern.

Messungen in der Rohrmitte für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten

- Bei einer guten Messung (s. Abb. 10) die Messung mit  oder Taste F9 anhalten und speichern. Im Frequenzspektrum den Peakschwerpunkt des Signalpeaks bestimmen. Anschließend weitere Messungen aufnehmen, auswerten und speichern.
- Die Messung bei anderen Strömungsgeschwindigkeiten wiederholen: Hierzu vorsichtig den Quetschhahn weiter öffnen oder schließen. Es sind nur ganz kleine Änderungen notwendig! Nach der Änderung noch etwa 2 min warten, bis sich die neue Strömungsgeschwindigkeit stabilisiert hat. Dann Messungen bei der neuen Strömungsgeschwindigkeit aufnehmen, den Peakschwerpunkt im Frequenzspektrum bestimmen und speichern.

Messungen in der Glasrohrmitte und am Glasrohrwand bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit

- Zur Beobachtung der unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten in der Glasrohrmitte und nahe der Glasrohrwand das Glasrohr auf der Optischen Bank vorsichtig so weit verschieben, dass der Kreuzungspunkt der Strahlen nun nahe der Glasrohrwand, aber noch innerhalb des Glasrohrs verläuft. Auch in dieser Position mehrere Kurven aufnehmen, auswerten und speichern.

Hinweis: Die Messungen in der Mitte und am Rand des Glasrohrs sollten bei der gleichen Strömungsgeschwindigkeit und damit im Abstand von wenigen Minuten erfolgen, da sich sonst der veränderte Wasserstand im Scheidetrichter auf die Messung auswirkt. Zur Kontrolle ist nach den Messungen am Rand eine weitere Messung in der Glasrohrmitte sinnvoll, um den Einfluss des veränderten Wasserstands auf die Messung abzuschätzen.

Messung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit anhand der Flüssigkeitszunahme in einem Messbehälter und Vergleich zur Messung mit LDA

- Quetschhahn vorsichtig öffnen, so dass langsam Flüssigkeit durch das Glasrohr in den Messbecher tropft.
- Zeit t messen, in der sich der Messbecher um eine bestimmte Flüssigkeitsmenge V füllt.
- Parallel Messkurven in der Glasrohrmitte (und am Glasrohrwand) aufnehmen und speichern.
- Für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten wiederholen.

Messbeispiel und Auswertung

Bestimmung des Winkels zwischen den beiden Strahlen

Zur Bestimmung des Winkels 2α wurden im Aufbau folgende Werte gemessen:

$$d = 24,1 \text{ cm}; l = 148 \text{ cm.}$$

Einsetzen in Gleichung (X) ergibt mit $f = 100 \text{ mm}$

$$\tan \alpha = \frac{d}{2 \cdot (l - f)} = 0,0873 \text{ bzw. } \alpha = 4,99^\circ.$$

Messungen in der Glasrohrmitte für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten

Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für eine gute Messkurve. Zum leichteren Auffinden des Signals wurde die Triggerschwelle auf $0,1 \text{ V}$ gesetzt; daher ist der Anstieg des Signals nicht ganz zu sehen. Dies beeinflusst das Frequenzspektrum (s. Abb. 11) jedoch nur wenig. Die Auswertung des Peakschwerpunkts ergibt eine mittlere Frequenz $\nu_{D1} = 319 \text{ Hz}$.

Weitere Messungen bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten ergaben folgende Werte:

$$\nu_{D2} = 1338 \text{ Hz und } \nu_{D3} = 3372 \text{ Hz}$$

Einsetzen in die Gleichung (VII) für die Geschwindigkeitskomponente $v_{\perp} = \frac{\nu_D \cdot \lambda}{2 \sin \alpha}$ ergibt für die obigen Messwerte mit

$$\lambda = 633 \text{ nm:}$$

$$\nu_{\perp 1} = 1,31 \frac{\text{mm}}{\text{s}}, \nu_{\perp 2} = 4,9 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \text{ und } \nu_{\perp 3} = 12 \frac{\text{mm}}{\text{s}}.$$

Die Ergebnisse liegen wie erwartet im Bereich einiger mm/s.

Messungen in der Glasrohrmitte und am Glasrohrrand bei gleicher mittlerer Strömungsgeschwindigkeit

Der Unterschied in den Strömungsgeschwindigkeiten in der Glasrohrmitte und am Glasrohrrand, der auf das parabelförmige Geschwindigkeitsprofil im Glasrohr zurückzuführen ist, kann in der Messung nachgewiesen werden:

Messung in der Glasrohrmitte: $v_M = 767 \text{ Hz}$

Messung am Glasrohrrand: $v_R = 376 \text{ Hz}$

Daraus ergeben sich folgende Geschwindigkeiten:

$$v_{\perp M} = 2,79 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$v_{\perp R} = 1,37 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Der Unterschied in den ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten ist deutlich zu sehen. Zusätzlich ist beim Vergleich mehrerer Messungen zu erkennen, dass die Streuung der gemessenen Werte am Rand deutlich größer als in der Rohrmitte ist. Mit der Messmethode ist daher eine lokale Messung der Strömungsgeschwindigkeiten möglich.

Messung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit anhand der Flüssigkeitszunahme in einem Messbehälter und Vergleich zur Messung mit LDA

Zum Vergleich der mittleren Strömungsgeschwindigkeit mit den lokalen Strömungsgeschwindigkeiten kann auch die Flüssigkeitsmenge, die während der Messung in einem festen Zeitintervall durch das Glasrohr fließt, in einem geeigneten Gefäß gemessen werden. Aus der Zeit t , der Flüssigkeitsmenge V und dem Durchmesser des Glasrohrs D kann die mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} bestimmt werden.

In einer Beispielmessung ergaben sich folgende Werte:

Messzeit: $t = 120 \text{ s}$, Flüssigkeitsmenge: $V = 25 \text{ ml}$, Innendurchmesser des Glasrohrs: $D = 2r = 5,6 \text{ mm}$

Damit erhält man

$$\bar{v} = \frac{V}{\pi r^2 \cdot t} = 8,5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Parallel wurde dazu eine Messkurve in der Glasrohrmitte aufgenommen. Aus dem zugehörigen Frequenzspektrum ergab sich eine Dopplerfrequenz $\nu_D = 3302 \text{ Hz}$ und damit

$$\text{eine Geschwindigkeit } v_{\perp} = 12 \frac{\text{mm}}{\text{s}}.$$

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ist kleiner als die mit der LDA ermittelte, da mit der LDA lokal die Strömungsgeschwindigkeit in der Mitte der Röhre bestimmt wurde, während durch die Messung der geflossenen Flüssigkeitsmenge über die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten in dem Glasrohr gemittelt wird.

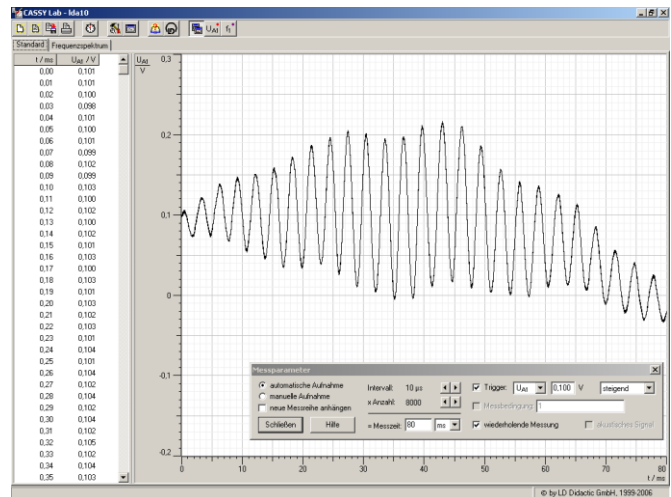


Abb. 10: Messbeispiel

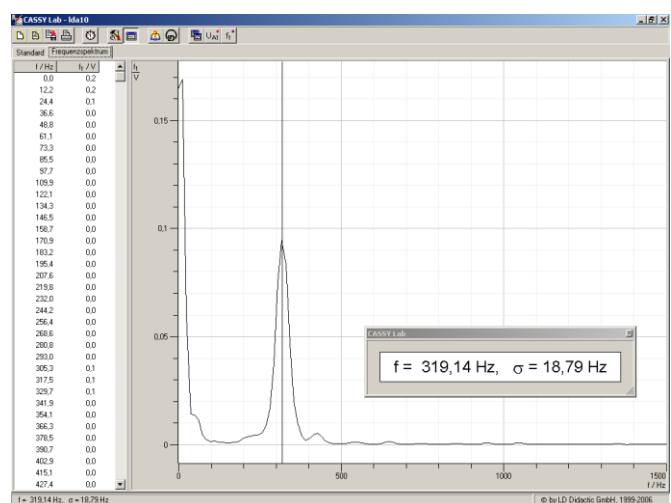


Abb. 11: Frequenzspektrum zur Messkurve aus Abb. 10