

1. KAPITEL. EINLEITUNG

1.1) Problemstellung und Motivation

Grenzschichtströmungen sind von besonderer Bedeutung sowohl für die Grundlagenforschung als auch für technologische Entwicklungen und werden deshalb mit großem Interesse und Nachdruck untersucht. Als Grenzschicht ist derjenige Teil einer Strömung definiert, der in unmittelbarer Nähe der Oberfläche des umströmten Körpers auftritt. Hier ändert sich die Geschwindigkeit i.A. von einem konstanten Wert weit entfernt von dem betrachteten Objekt, bis hin zu Null direkt auf der Oberfläche. Je nach Anwendungsfall liegt die Dicke der Grenzschicht im Bereich von Millimetern, kann aber insbesondere in der Mikrofluidik bis in den Mikrometerbereich hinab reichen.

Die rasche Entwicklung auf dem Gebiet der Computertechnologie hat es in den letzten Jahrzehnten ermöglicht, immer komplexere, turbulente Strömungsfelder mit immer höherer Präzision zu simulieren [1]. Bei der Skalierung zu kleineren Dimensionen in der Mikro- und Nanofluidik treten jedoch Effekte auf, aufgrund derer die für Makroströmungen gültigen Modelle nicht mehr angewendet werden können. Simulationen werden dann ebenfalls für problemangepasste Modelle durchgeführt, die jedoch anschließend erst durch das Experiment verifiziert bzw. optimiert werden müssen [1]. Diese Aufgabe stellt höchste Anforderungen an zukünftige Sensoren zur Charakterisierung von Strömungsfeldern bezüglich Ortsauflösung, Zeitauflösung und Meßunsicherheit der Geschwindigkeit. Für die Untersuchung allgemeiner Probleme der Strömungsmechanik und besonders breiter Grenzschichten stehen eine Vielzahl von optischen Meßverfahren zur Verfügung [2,3], alle mit spezifischen Vor-, aber auch Nachteilen. Ein etabliertes Meßverfahren ist die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) [4,5], die sich aufgrund der quasi-punktförmigen Messung durch eine hohe Ortsauflösung von ca. 50..200 μm und hohe Zeitauflösung auszeichnet und deren Prinzip bereits vier Jahre nach Erfindung des Lasers erstmals experimentell gezeigt wurde [6]. Die Auflösung kommerzieller LDA-Geräte ist für viele Anwendungsfälle ausreichend, für die Lösung vieler Problemstellungen insbesondere aus der Mikro- und Nanofluidik werden jedoch deutlich höhere Ortsauflösungen gefordert. Im folgenden sollen einige konkrete Beispiele genannt werden, bei denen hochauflösende Messungen unabdingbar sind:

€ **Flugzeugtragflächen.** Die Umströmung einer Tragfläche ist in Abb. (1.1) dargestellt. Im vorderen Teil ist die Grenzschichtströmung zunächst noch laminar, in einem bestimmten Bereich x_U tritt jedoch ein laminar-turbulenter Strömungsumschlag (Transition) auf. Da in turbulenten Grenzschichten ein deutlich höherer Reibungswiderstand auftritt, ist man bestrebt, die Grenzschicht über einen möglichst großen Bereich laminar zu halten. Durch eine Optimierung des Tragflächendesigns lassen sich so der c_w -Wert und damit der Treibstoffverbrauch und Schadstoffausstoß verringern [7]. Ähnliche Betrachtungen gelten für die Umströmung von Schiffsrümpfen und Kraftfahrzeugkarosserien.

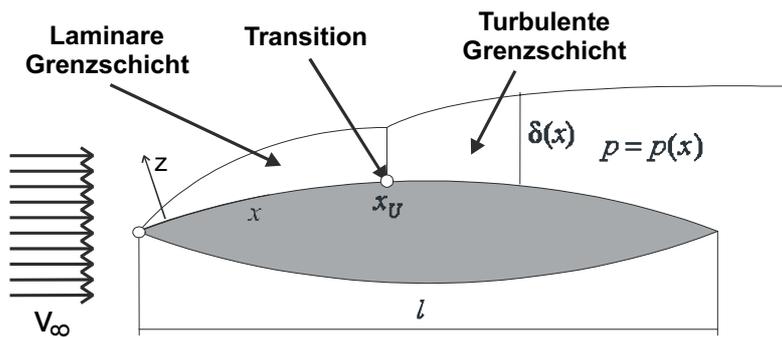


Abb. (1.1): Laminar-turbulenter Strömungsumschlag (Transition) an einer Flugzeugtragfläche. Der Reibungswiderstand kann verringert werden, indem die Strömung über einen möglichst großen Bereich laminar gehalten wird.

∄ **Flugzeugturbinen.** Der Wirkungsgrad eines Axialverdichters („Turbine“) hängt maßgeblich von der Spaltbreite zwischen den äußeren Schaufelblättern und dem Gehäuse ab, die in der Größenordnung von einem Millimeter liegt. Je kleiner der Spalt, umso besser ist der Wirkungsgrad. Der Abstand ist jedoch nicht konstant, sondern variiert aufgrund von Zentrifugalkräften und Abnutzung. Zur Optimierung des Axialverdichters ist die genaue Kenntnis der Spaltströmung notwendig.

∄ **Mikrofluidik.** Praktisch alle Elemente der Makrofluidik werden auch in der Mikrofluidik verfolgt, z.B. Mikroreaktoren, -mischer, -ventile, usw. Abb. (1.2) zeigt eine Mikrodüse, die für die Positionssteuerung von Satelliten entwickelt wurde [8]. Durch einen definierten Impulsübertrag durch den Rückstoß der Düse kann ein Satellit in Position gebracht bzw. gehalten werden. Die Abmessungen der Düse betragen ca. $35 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$. Die Strömung aus derart kleinen Strukturen kann nur schwer simuliert werden, da, wie oben bereits angedeutet, bestimmte Modellannahmen bei der Skalierung nicht mehr angewendet werden können. Beispielsweise kann die Kontinuumsannahme der für die Berechnungen zugrundeliegenden Navier-Stokes-Gleichungen nicht mehr erfüllt sein, da sich in einem Volumenelement der Simulation nur noch wenige (in einem Würfel von 10 nm Kantenlänge nur noch 30) Gasmoleküle befinden und somit Diskretisierungseffekte auftreten [3]. Eine experimentelle Verifikation mit hoher Ortsauflösung ist daher unerlässlich.

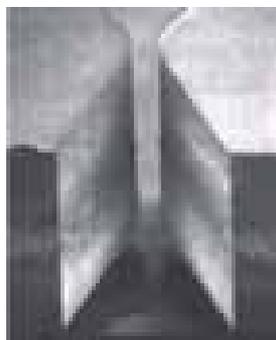


Abb. (1.2): Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer Miniatur-Düse, die für die Positionssteuerung von Satelliten entwickelt wurde. Die Abmessungen der durch anisotropes Ätzen von Si hergestellten Düse betragen ca. $35 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$. Entnommen aus [8].

∄ **Turbulenzforschung.** Turbulenz ist eines der letzten noch nicht komplett untersuchten Phänomene der klassischen Physik. Aktueller Forschungsgegenstand ist hier z.B. die Abhängigkeit der Energie-Dissipationsrate von der Reynoldszahl in turbulenten Grenzschichten [9,10]. Als Maß für die Feinstruktur der Turbulenz gilt die sog. „Kolmogorov-Länge“

[11], die anschaulich die minimale Wirbelgröße angibt. Je nach Randbedingungen kann diese bis in die Größenordnung von 10 μm hinabgehen. Geschwindigkeitssensoren müssen mindestens diese Länge auflösen können [9].

€ **Biomedizin.** Auch in der Biomedizin besteht ein vielfältiger Bedarf an Strömungsmessungen, insbesondere an Blutströmungen. Beispiele sind hier Strömungsuntersuchungen an krankhaften Adererweiterungen (Aneurysma), an Bifurkationen der feinverästelten Bronchien in der Luftröhre, an Herzklappen und implantierten Blutpumpen. Hochaufgelöste Geschwindigkeitsmessungen in Arterien können einen Beitrag zum Verständnis der Entstehung von Arteriosklerose liefern [3]. Von grundlegendem Interesse ist die Strömung von Blut als nicht-Newtonsches Fluid. Für Newtonsche Fluide besteht ein direkter linearer Zusammenhang zwischen dem Geschwindigkeitsgradienten an einer Wandung und der auf die Wand wirkenden Schubspannung (Newtonsches Gesetz der Viskosität). Im Fall von Blut gilt diese Linearität bei kleinen Reynoldszahlen nicht mehr. Es kommt zu einer Entmischung der roten Blutkörperchen, wodurch die Viskosität abhängig wird vom Geschwindigkeitsgradienten.

Allen genannten Beispielen ist gemein, daß für eine meßtechnische Erfassung des Strömungsfeldes Sensoren mit hoher Ortsauflösung im μm -Bereich, geringen Meßunsicherheiten der Geschwindigkeit, sowie teilweise hoher zeitlicher Auflösung erforderlich sind. Im folgenden Abschnitt werden typische Strömungsmeßverfahren vorgestellt sowie deren Grenzen aufgezeigt.

1.2) Stand der Technik

Experimentelle Untersuchungen an Strömungsfeldern können mit „klassischen“ Methoden durchgeführt werden wie z.B. dem Pitot-Rohr, bei welchem von dem Staudruck auf die Geschwindigkeit geschlossen wird. Bei Hitzdraht-Anemometern wird die Geschwindigkeit durch pro Zeiteinheit abtransportierte Wärmemenge bestimmt. Solche mechanischen Verfahren sind jedoch invasiv, d.h. durch ihre Anwesenheit verändern sie selbst das zu untersuchende Strömungsfeld. Hitzdraht-Anemometer leiden zudem an systematischen Fehlern, sobald in der Nähe von Körpern gemessen wird, die eine signifikante Wärmeleitung aufweisen [12].

Ultraschall-Velozimeter arbeiten berührungslos und nicht-invasiv, bieten aber nur eine geringe Ortsauflösung und eine mäßige Genauigkeit der Geschwindigkeit von ca. 0,2%-2% [3].

Aus diesen Gründen werden heutzutage laseroptische Meßverfahren bevorzugt, die ebenfalls nicht-invasiv sind, aber aufgrund der kürzeren Wellenlänge eine deutlich höhere Ortsauflösung besitzen. Da Fluide i.A. homogen sind, führt man der Strömung in definierter Weise kleine Teilchen zu („seeding“), deren Streulicht die Meßinformation liefert. Eine detaillierte Übersicht zu laseroptischen Meßmethoden findet sich in z.B. [2,3].

Als ein etabliertes Ganzfeld-Meßverfahren ist zunächst die Particle-Image-Velocimetry (PIV)-Technik zu nennen, die mit zwei intensiven Laserpulsen in einem definierten Zeitabstand das Strömungsfeld beleuchtet und als Kamerabilder aufzeichnet. Durch eine Korrelation der beiden Bilder kann auf die Geschwindigkeitsverteilung geschlossen werden. Die erreich-

bare Ortsauflösung hängt von vielen Faktoren ab, u.a. der Dichte der Seeding-Teilchen, der Größe des Auswertefensters bei der Korrelation oder dem Abbildungsmaßstab der Optik. Meinhart et al. [13] haben ein PIV-System mit einer Ortsauflösung von wenigen Mikrometern entwickelt („ μ -PIV“). Mit Seeding-Teilchen von 200 nm Durchmesser wurden Geschwindigkeitsmessungen in einer lediglich 20 μm breiten Grenzschicht durchgeführt. Die Technik ist jedoch durch das Abbesche Beugungslimit auf eine Ortsauflösung im Mikrometerbereich beschränkt, was mit der Verwendung von hochaperturigen Abbildungsobjektiven und geringen Arbeitsabständen verbunden ist. Ferner verhindert die relativ hohe Auslesezeit der verwendeten CCD-Kameras eine hohe Zeitauflösung.

Ein auf dem Doppler-Effekt basierendes, etabliertes Meßverfahren ist die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) [2,4,5], die sich durch eine hohe Orts- und Zeitauflösung auszeichnet. Hier wird die Mie-Streuung an einem System aus nahezu parallelen Interferenzstreifen genutzt, das sich im Schnittvolumen zweier sich kreuzender, kohärenter Laserstrahlen ausbildet. Die Geschwindigkeit ergibt sich aus dem Produkt des Interferenzstreifenabstandes und der aus dem Streulichtsignal ermittelten Dopplerfrequenz. Ein LDA ist ein quasi-punktförmiger Sensor, der für die Vermessung eines kompletten Geschwindigkeitsfeldes mechanisch traversiert werden muß. Die Ortsauflösung wird durch die Größe des Meßvolumens, d.h. des Schnittvolumens der Laserstrahlen, bestimmt, die üblicherweise in der Größenordnung von $0,1 \cdot 0,1 \cdot 1 \text{ mm}^3$ liegt. Diese ist ausreichend für viele Anwendungen, jedoch werden für die Vermessung von schmalen Grenzschichten insbesondere für die Mikro- und Nanofluidik und für die Turbulenzforschung deutlich höhere Ortsauflösungen gefordert. Eine Steigerung der Ortsauflösung kann üblicherweise durch folgende Methoden erreicht werden:

- ∄ Verringerung des Detektionsvolumens (Modifikation der Empfangsoptik)
- ∄ Verkleinerung des Meßvolumens (Modifikation der Sendeoptik)

Im ersten Fall werden meistens eine konfokale Abbildungen und Lochblenden vor dem Detektor verwendet [14], die den Detektionsbereich einschränken und so die Ortsauflösung verbessern. Diese Methode schneidet jedoch Teile des Signals weg, so daß z.B. weniger Signalperioden für die Frequenzmessung zur Verfügung stehen, was auf Kosten der Meßunsicherheit der Geschwindigkeit geht.

Der zweite Fall kann durch die Verwendung einer kurzbrennweitigen Linse zur Strahlfokussierung realisiert werden [15,16]. Dieses führt einerseits zu einer Vergrößerung des Schnittwinkels und zu einer Reduzierung des Strahldurchmessers, so daß insgesamt die Meßvolumengröße reduziert wird. Andererseits wird die Anzahl der Interferenzstreifen reduziert und die von der Wellenfrontkrümmung des verwendeten Gaußschen Strahls verursachte Variation des Streifenabstandes erhöht, was zu einer größeren Meßunsicherheit der Geschwindigkeit führt. Es kann in der Tat gezeigt werden, daß eine Komplementarität besteht zwischen hoher Ortsauflösung einerseits und geringem Meßfehler der Geschwindigkeit andererseits (siehe dazu Kap. 3). Grund dafür sind Beugungseffekte wie das Abbe-Limit.

Dieser Sachverhalt bildet die Motivation für die vorliegende Arbeit. Ein LDA entspricht in seinem Aufbau einem Mach-Zehnder-Interferometer (MZI), das durch Strahlteilung, Führung der beiden Teilstrahlen auf unterschiedlichen optischen Wegen und anschließender Strahlvereinigung charakterisiert ist. Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Untersuchung der Einflüsse von

Wellenfrontkrümmung sowie zeitlicher und örtlicher Kohärenz auf das Interferenzstreifensystem eines Mach-Zehnder-Interferometers. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen werden neuartige Prinzipien für Laser-Doppler-Sensoren abgeleitet, charakterisiert und eingesetzt, die sich durch eine hohe Ortsauflösung im Submikrometerbereich bei gleichzeitig geringer Meßunsicherheit der Geschwindigkeit auszeichnen.

Es wird ein Laser-Doppler-Sensor vorgestellt, der auf der Verwendung von Hochleistungs-Laserdioden und Multimode-Fasern basiert. Dazu wird die aus einer Multimode-Faser emittierte Strahlung hinsichtlich der örtlichen Kohärenz und des störenden Speckle-Musters untersucht. Es wird gezeigt, wie der Speckle-Effekt wirkungsvoll unterdrückt werden kann und wie sich mit Multimode-Strahlung ein hochauflösender und präziser Laser-Doppler-Sensor realisieren läßt.

Weiterhin werden zwei Sensoren basierend auf einer Zweiwellenlängen-Technik vorgestellt, deren Ortsauflösungen das Abbe-Limit unterschreiten. Diese Verfahren ermöglichen eine Positionsbestimmung *innerhalb* des LDV-Meßvolumens, so daß Ortsauflösungen im Submikrometerbereich erreicht werden.

Sie weisen damit einen deutlichen Fortschritt gegenüber konventionellen LDA-Sensoren auf und bieten das Potential für vielfältige Anwendungen in der Mikro- und Nanofluidik.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt:

- € In **Kapitel 2** werden kurz die Grundlagen der Laser-Doppler-Anemometrie behandelt. Die Beschreibung des Doppler-Effektes erfolgt sowohl über die Frequenzverschiebung und optischen Überlagerungsempfang als auch alternativ durch das Interferenzstreifenmodell. Das LDA wird hier noch mit idealisierten Eigenschaften behandelt und seine Analogie zum Mach-Zehnder-Interferometer aufgezeigt.
- € In **Kapitel 3** werden die Idealisierungen aufgehoben. Es wird gezeigt, wie Wellenfrontkrümmung und Kohärenz das Interferenzstreifensystem eines Mach-Zehnder-Interferometers beeinflussen.
- € **Kapitel 4** beschreibt die Entwicklung neuartiger Laser-Doppler-Sensoren mit hoher Ortsauflösung, deren Prinzipien auf den in Kap. 3 gewonnenen Erkenntnissen beruhen. Dieses Kapitel bildet den Hauptteil der vorliegenden Arbeit.
- € In **Kapitel 5** werden kurz experimentelle Methoden zur Charakterisierung des Interferenzstreifensystems behandelt.
- € **Kapitel 6** beschreibt den Einsatz neuartiger Laserquellen für die LDA-Technik. Es wird ein Überblick über die Anforderungen von Lichtquellen für die Meßtechnik gegeben. Als neue Lichtquellen werden Scheibenlaser, Faserlaser sowie Breitstreifen-Laserdioden vorgestellt.
- € **Kapitel 7** beschreibt die Anwendung der entwickelten Sensoren für hochauflösende Strömungsgeschwindigkeitsmessungen. Dazu werden zunächst die Grundgleichungen der Strömungsmechanik rekapituliert und Rohrströmungen und wandnahe Grenzschichtströmungen diskutiert. Es werden Messungen an Grenzschichtströmungen vorgestellt und deren Übereinstimmung mit der Theorie gezeigt.
- € **Kapitel 8** faßt die Ergebnisse zusammen.

2. KAPITEL. GRUNDLAGEN DER LASER-DOPPLER-TECHNIK

Dieses Kapitel behandelt die theoretischen Beschreibungen der Laser-Doppler-Technik in idealisierter Form. Es wird kurz auf die Referenz- und die Differenz-LDA Anordnung eingegangen und gezeigt, wie sich die Doppler-Frequenzverschiebung als elektrisches Schwingungssignal von zwei Lichtstrahlen erhalten läßt. Ferner wird eine alternative Beschreibung eingeführt, die auf der Entstehung der Dopplerfrequenz aus der Streuung an einem Interferenzstreifensystem basiert. Diese Beschreibung wird dann konsequent für die restliche Arbeit benutzt.

2.1) Die Laser-Doppler-Technik

2.1.1) Der Doppler-Effekt

Die in dieser Arbeit entwickelten Sensoren zur Geschwindigkeitsmessung basieren auf dem Doppler-Effekt, der von Johann Christian Doppler (1803-1853) im Jahre 1842 formuliert wurde [17]. Er beschreibt allgemein die Änderung der von einem Empfänger registrierten Schwingungsfrequenz durch eine Relativbewegung zwischen einem Sender und einem Empfänger.

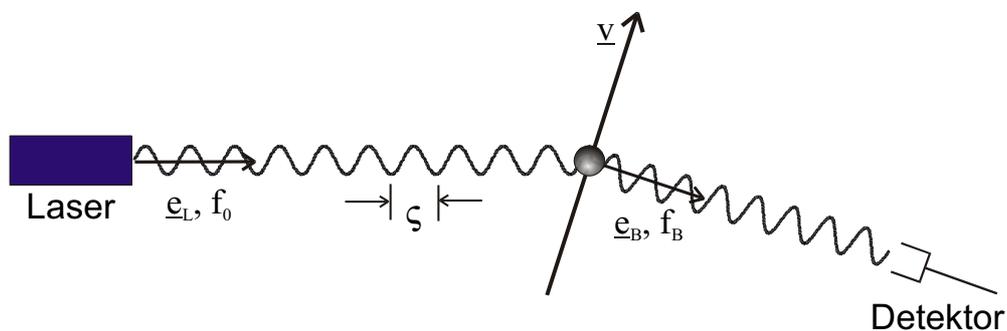


Abb. (2.1): Frequenzverschiebung des an einem bewegten Teilchen gestreuten Laserlichtes: Doppler-Effekt.

Die Bestimmung der Geschwindigkeit von Strömungen geschieht bei der Laser-Doppler-Technik indirekt durch Inhomogenitäten innerhalb der Strömung, die als Streuzentren fungieren und deren Streulicht die eigentliche Meßinformation enthält. Streupartikel („tracer particles“, „tracers“, „seeding“) werden meist künstlich in definierter Form der Strömung zugeführt, wobei allerdings sicher gestellt werden muß, daß sich die Streuteilchen schlupffrei bezüglich der Strömung bewegen. Dieses ist bei kleinen Tracerteilchen mit Durchmessern im Mikrometerbereich bei nicht zu stark turbulenten Strömungen gewährleistet. Der Doppler-Effekt tritt bei der Streuung zweifach auf: Zum einen „sieht“ das sich mit der Geschwindigkeit v bewegende Streuteilchen das dopplerverschobene Laserlicht der Frequenz f_0 , zum anderen bewegt sich das Streuzentrum ebenfalls relativ zum Beobachter. Für nicht-relativistische

Teilchenbewegungen, d.h. für Geschwindigkeiten, die geringer als die Lichtgeschwindigkeit c sind ($|v| \ll c$), ergibt sich für die Frequenz f_B des von einem Beobachter registrierten Streulichtes [4,5]:

$$f_B \approx f_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} (\underline{e}_L \cdot 4 \underline{e}_B) \right) \approx f_0 \left(1 \pm \frac{v}{\zeta} (\underline{e}_L \cdot 4 \underline{e}_B) \right) \quad (2.1)$$

Dabei kennzeichnen \underline{e}_L und \underline{e}_B Einheitsvektoren, die die Richtung des Laserstrahls und die Richtung vom Streuteilchen zum Beobachter vorgeben, sowie $\zeta = c/f_0$ die Laserwellenlänge. Eine Doppler-Frequenzverschiebung tritt offenbar immer dann auf, wenn sich die Richtung, unter der das Streulicht beobachtet wird, von der des einfallenden Laserstrahls unterscheidet. Bei typischen Anwendungen der Strömungsmeßtechnik treten je nach Geschwindigkeit Doppler-Frequenzverschiebungen bis zu einigen 100 MHz auf, die jedoch vernachlässigbar klein gegenüber der eigentlichen Lichtfrequenz von etwa $f_0 = 455$ THz (für rotes Licht) sind. Eine direkte Detektion über dispersive Elemente wie z.B. Prismen oder Gitter, ist daher wegen deren begrenzter Auflösung unmöglich. Für technische Anwendungen wird der Überlagerungsempfang (Heterodyn-Empfang) genutzt, bei dem das Doppler-frequenzverschobene Streulicht mit einem kohärenten Laserstrahl vergleichbarer Frequenz überlagert wird. Die entstehende Schwebungsfrequenz wird damit der Messung zugänglich. Auf den optischen Überlagerungsempfang wird in Abschnitt 2.1.2) näher eingegangen. Für dieses Verfahren sind zwei Konfigurationen einsetzbar:

a) Die Referenzstrahl-Technik

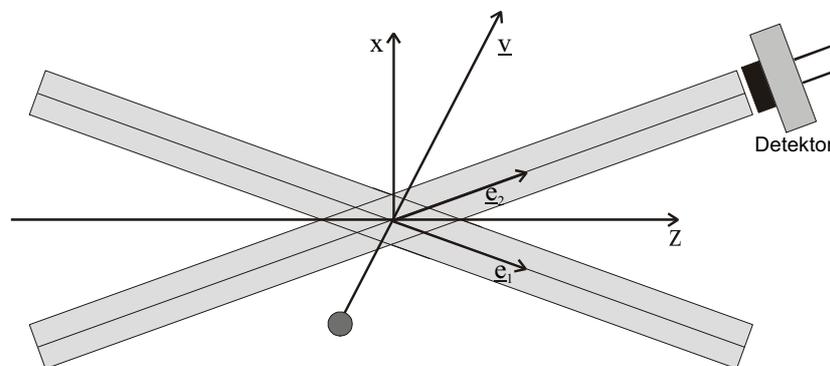


Abb. (2.2): Laser-Doppler-Velozimeter in Referenzstrahl-Anordnung

Bei der Referenz-Doppler-Technik wird das Doppler-frequenzverschobene Streulicht mit dem nicht-frequenzverschobenen Laserlicht überlagert. In der in Abb. (2.2) dargestellten Anordnung registriert der Detektor einerseits das dopplerverschobene Streulicht vom Strahl \underline{e}_1 , andererseits das direkte Laserlicht vom Strahl \underline{e}_2 , das wegen der Parallelität von Beobachtungs- und Einstrahlrichtung nicht dopplerverschoben ist. Auf den Detektor treffen also folgende zwei Frequenzen: