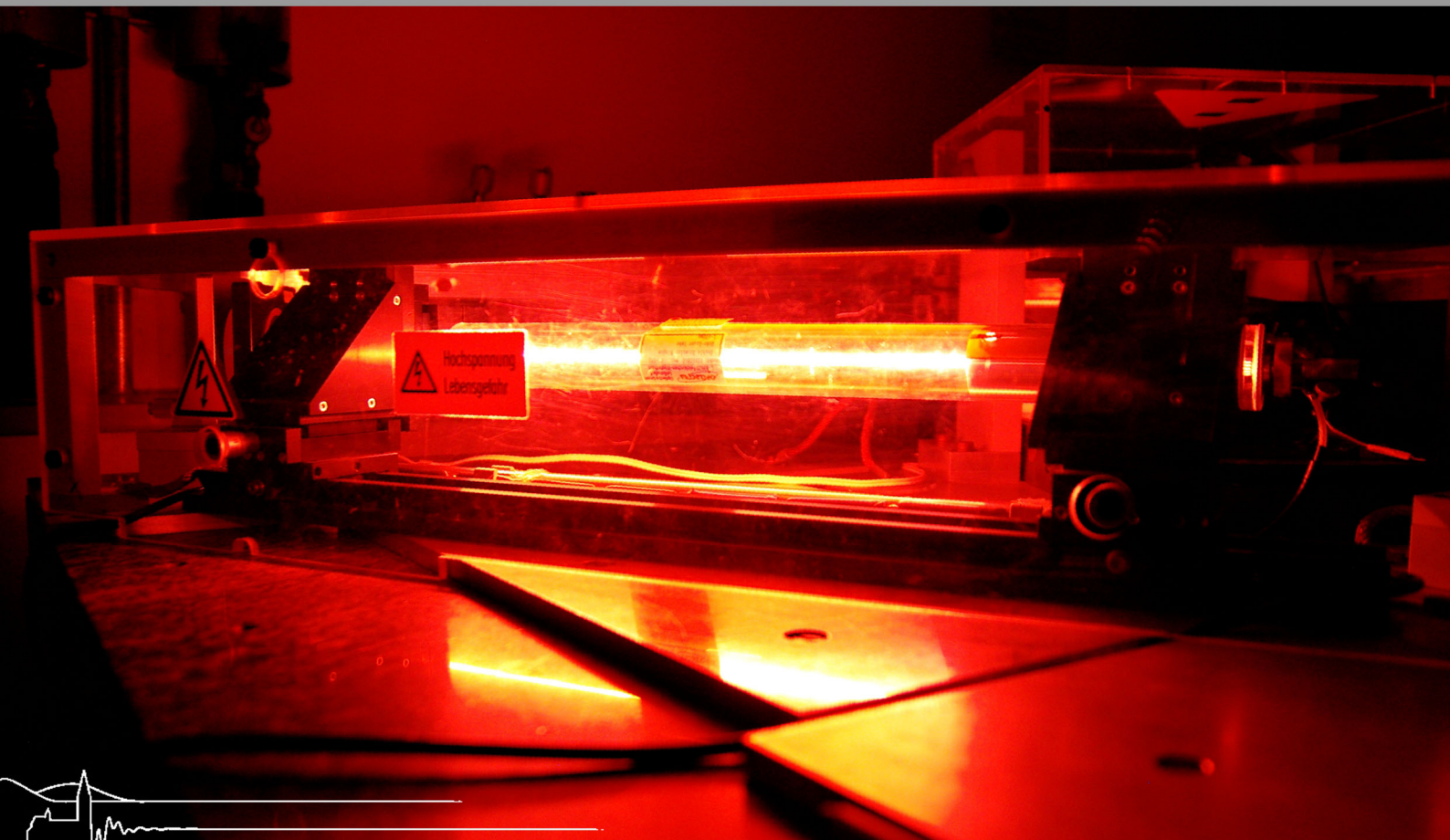




Universität Freiburg

Versuchsanleitung
**Fortgeschrittenen
Praktikum**
Teil I

Ringlaser



Ringlaser

INSTITUT FÜR MATHEMATIK UND PHYSIK
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT
FREIBURG IM BREISGAU

26. JUNI 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort zum Versuch	1
2	Versuchsbeschreibung	2
3	Aufgabenstellung	3
4	Versuchsdurchführung	3
5	Geräteliste	4
6	Versuchsaufbau	5
7	Literatur	7
	Quellenverzeichnis	7

1 Vorwort zum Versuch

Seit 1851 wurden von zahlreichen Physikern Experimente zur Messung des Einflusses bewegter Medien auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes unternommen (Fizeau 1851, Michelson und Morley 1886, Zeeman 1914). Das Interesse an solchen Experimenten entstand im letzten Jahrhundert aus der Kontroverse um die verschiedenen Varianten der Theorie des Lichtäthers. Man nahm seinerzeit an, dass durch die Bewegung eines materiellen Körpers mit der Geschwindigkeit w der im absoluten Raum ruhende Äther und damit die Lichtwelle zu einem Bruchteil mitgeführt würde. Ein ruhender Beobachter sollte die Lichtgeschwindigkeit

$$v = \frac{c}{n} \pm \alpha \cdot w \quad (1)$$

messen. (c/n = Lichtgeschwindigkeit im ruhenden Medium). Für den Mitführungskoeffizienten α hat Fresnel aufgrund verschiedener Annahmen über das Verhalten des Äthers den Ausdruck $\alpha = 1 - 1/n^2$ hergeleitet. Für die im Labor erreichbaren Medium-Geschwindigkeiten w von etwa 10^2 cm/s bis 10^3 cm/s ($c/n = 2 \cdot 10^{10}$ cm/s) liegt die zu erwartende Geschwindigkeitsänderung in der Größenordnung von 10^{-7} - 10^{-8} . Man sieht daran, welch großes experimentelles Geschick zum Nachweis dieses Effektes mit den Hilfsmitteln der damaligen Zeit notwendig war.

Die Erklärung für den Mitführungseffekt ergibt sich heute zwanglos und ohne zusätzliche Annahmen aus dem relativistischen Gesetz über die Addition von Geschwindigkeiten:

$$v = \frac{c/n \pm w}{1 + \frac{c/n \cdot w}{c^2}} \quad (2)$$

Für den Fall $w \ll c$ kann man das vereinfachen zu

$$v = \frac{c}{n} \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) w \quad (3)$$

Die relativistische Zusammensetzung von Geschwindigkeiten führt genau zu dem Ergebnis, das Fresnel mit einer teilweisen Mitführung des Lichtes erklären musste. Obwohl die ursprünglich gemeinte Bedeutung nicht mehr zutrifft, wird die Bezeichnung Mitführung für diesen rein relativistischen Effekt immer noch verwendet (englisch : Fresnel \sim oder light drag). Nach der Entwicklung den Lasers sind erneut Experimente zur Bestimmung des Mitführungskoeffizienten aufgenommen worden. Der Grund dafür liegt darin, dass mit einer Ringlaser-Anordnung, wie sie auch hier benutzt wird, der Mitführungskoeffizient wesentlich genauer gemessen werden kann, als es in den historischen Experimenten möglich war. So lässt sich heute auch ein in obiger Ableitung unberücksichtigt gebliebener Term (Dispersions- oder Doppler-Term, siehe Staatsexamensarbeit [Ip79]), der nur etwa 1 % des Fresnels-Terms ausmacht, bestimmen.

2 Versuchsbeschreibung

Ein aus den drei Spiegeln (siehe Versuchsaufbau in Abbildung 1) S_1 , S_2 und S_3 'ringförmig' aufgebauter Resonator mit dem Helium-Neon-Entladungsrohr in einem Arm bildet einen sogenannten Ringlaser. In einem solchen Resonator können sich voneinander unabhängige, rechts- und links herumlaufende Wellen ausbilden (bei einem linearen Resonator existieren nur stehende Wellen). In einem zweiten Arm des Resonators befindet sich eine Quarzglasscheibe Q , die durch einen Motor in Rotation versetzt werden kann. Der Laserstrahl tritt unter einem Winkel Θ_B (=Brewster-Winkel, zur Verringerung der Reflexionsverluste) zur Normalen der Quarzgrenzfläche ein, so dass in der Scheibe eine Geschwindigkeitskomponente w_r in bzw. gegen den r- bzw. l-Strahl vorhanden ist (Geometrie der Scheibe siehe Staatsexamensarbeit A. Ippendorf). Da der optische Weg bei ruhender Scheibe für beide Umlaufrichtungen derselbe ist, fallen die Frequenzen der r-Moden mit den Frequenzen der l-Moden zusammen. Bei rotierender Scheibe ändert sich die Lichtgeschwindigkeit innerhalb der Quarzscheibe für den einen Umlaufsinn um $+\alpha w_r$ und für den anderen um $-\alpha w_r$. Dies bedeutet eine Änderung des optischen Weges und damit der optischen Länge des Resonators. Die Frequenzen der Moden für den einen Umlaufsinn werden etwas erhöht, für den anderen etwas erniedrigt. Bei Überlagerung von r- und l-Strahl hinter dem Auskoppelspiegel S_3 (Transmission $\approx 0,1\%$) erhält man auf der Photodiode P als Schwebungsfrequenz die Differenzfrequenz zwischen r- und l-Moden. Das Signal von der Photodiode wird auf einem digitalen Speicheroszillographen sichtbar gemacht.

Der Zusammenhang zwischen gemessener Frequenz $\Delta\nu$ und Mitführungskoeffizient α beträgt (zur Herleitung siehe ebenfalls [Ip79]):

$$\alpha = \frac{L\lambda\Delta\nu}{2n\omega dx_0}, \quad (4)$$

mit

- L : optische Gesamtlänge des Resonators einschließlich des optischen Weges in den Quarzscheiben und den Fenstern des Laser-Entladungsrohres = 214,9 cm,
- λ : Laserwellenlänge in Luft = $6,3282 \cdot 10^{-5}$ cm,
- n : Brechungsindex von Quarzglas = 1,457,
- d : Dicke der Quarzscheibe = 1,27 cm,
- ω : Drehfrequenz der Scheibe,
- x_0 : x-Koordinate des Auftreffpunktes auf der Scheibe.

Die Drehfrequenz der Scheibe wird aus der mit Lichtschranke und Periodenzähler ermittelten Umlaufzeit bestimmt.

3 Aufgabenstellung

1. Man bestimme den Mitführungskoeffizienten durch Messung der Schwebungsfrequenz
 - (a) bei Variation des Durchtrittspunktes x_0 für drei bis vier feste Drehzahlen. Die Steigung der Schlittenspindel beträgt 1 mm/Umdrehung.
 - (b) bei drei bis vier fest eingestellten Werten von x_0 und Variation der Drehzahl.
2. Man vergleiche den experimentell gefundenen Wert mit dem aus dem Brechungsindex berechneten Wert

$$\alpha = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda \Delta n}{n \Delta \lambda}, \quad (5)$$

wobei für Quarzglas bei 632,8 nm gilt:

$$n = 1,457, \\ \Delta n / \Delta \lambda = -300 \text{ cm}^{-1}.$$

4 Versuchsdurchführung

1. Laser in Betrieb nehmen:
 - Lasernetetzgerät einschalten
 - Blende B öffnen
 - Auf maximale Intensität einstellen durch vorsichtiges Drehen des aus der Abdeckplatte herausstehenden Hebels am Spiegel S_3
 - Spiegel S_1 , so einstellen, dass der r-Strahl nach Reflexion an S_3 sich auf der Photodiode mit dem l-Strahl überlagert.
2. Erzeugen des Signals:
 - Quarzscheibe rotieren lassen. Spannung am Motornetzgerät ca. 10 V
 - Oszilloskop einschalten. Durch Drücken der Taste AUTOSET muss nun ein Signal zu sehen sein.
 - Periodenzähler einschalten.
 - Starten des Programms SP107 (HAMEG-Software für Oszilloskop HM 1507) zur Datenaufnahme.
3. Optimieren des Signals:
 - Funktion der Blende
 Das auf dem Oszillographen zu beobachtende Signal zeigt einen irregulären Verlauf. Es enthält Anteile verschiedener Frequenzen. Durch langsames Schließen der Blende B und Beobachten des Signals auf dem Oszillographen erreicht man eine Blendeneinstellung (kurz vor dem Ausgehen des Lasers), bei der ein ziemlich gleichförmiges, sinusförmiges Signal zu sehen ist. Die Ursache dieser Problematik liegt darin, dass das Strahlprofil des Lasers im Frequenzraum mehrere sogenannte Moden¹ enthält. Innerhalb der dopplerverbreiterten Ne-Linie von 1,5 GHz Breite liegen etwa 10 longitudinale Moden mit einem Modenabstand von $c/l = 139,5 \text{ MHz}$. Dieser Abstand ist nicht für alle benachbarten Moden derselbe, sondern er ändert sich wegen der Dispersion des Brechungsindex über die Nonlinie hinweg. Die Frequenzabweichungen liegen je nach Abstand von der Linienmitte im Bereich von 1 kHz bis 100 kHz. Die Überlagerung der Moden auf dem Photodetektor liefert ein Ausgangssignal, das alle möglichen Differenzfrequenzen (und deren Differenzen) zwischen den optischen Frequenzen enthält und

¹= Frequenzzustände, der Laser ist damit nicht vollends 'monochromatisch'.

die Ursache des fluktuierenden Signals sind. Durch Einengen des Laserstrahls mit der Blende B werden die Verluste im Resonator soweit erhöht, dass nur noch ein oder zwei im Maximum des Verstärkungsprofils liegende Moden schwingen können. Das Signal enthält dann nur noch die durch die Rotation der Quarzscheibe verursachte Differenzfrequenz. Gelegentliche Störungen sind durch Staubpartikel auf der Scheibe verursacht.

- Durch Feinjustierung des Spiegels S_4 kann anhand des Oszillographenbildes die exakte Überlagerung von r- und l-Strahl überprüft werden.

Das Netzgerät für Lichtschranke und Zähler wird eingeschaltet. Die Anzeige des Zählers gibt die Zeit für einen vollen Umlauf der Quarzscheibe in μs an (Zeitbereich etwa (17 - 100) ms, entsprechende Drehfrequenzen (60 - 10) Hz. Am Oszilloskop erhält man bei Betätigung der 'HOLD'-Taste ein stehendes Oszillographenbild. Durch wiederholtes Drücken der Taste kann man ein Signal wählen, welches zur Frequenzbestimmung geeignet ist.

Möglichst gleichzeitig dazu ist am Lichtschrankenzähler die Umlaufdauer abzulesen. Auf dem Oszillographenbild wird die Anzahl der Perioden bestimmt. Bei etwas Übung lässt sich das auf fast 1/10 der Periode genau durchführen. Dabei ist der Datensatz nur bis zu der sichtbaren Unterbrechung (oder dem Sprung) des Signals etwa 1 cm vor dem Ende des Bildes auszuwerten. Diese Länge entspricht bei Stellung 0,1 ms/div einer Zeitdifferenz von 1 ms. Bei niederen Frequenzen ist es günstiger den Zeitschalter auf 0,2 ms/div oder 0,5 ms/div zu stellen, um genügend Perioden zur Auszählung zu haben. Die entsprechenden Zeitintervalle sind dann 2 ms, beziehungsweise 5 ms.

5 Geräteliste

- He-Ne Laserrohr 'Open Cavity' 15 mW
- He-Ne Netzgerät
- Photodiode
- Infrarotlichtschranke
- Periodenzähler (Eigenbau)
- Netzgerät für Motor zum Antrieb der Quarzscheibe (Eigenbau)
- Oszilloskop Hameg 1507
- Computer

6 Versuchsaufbau

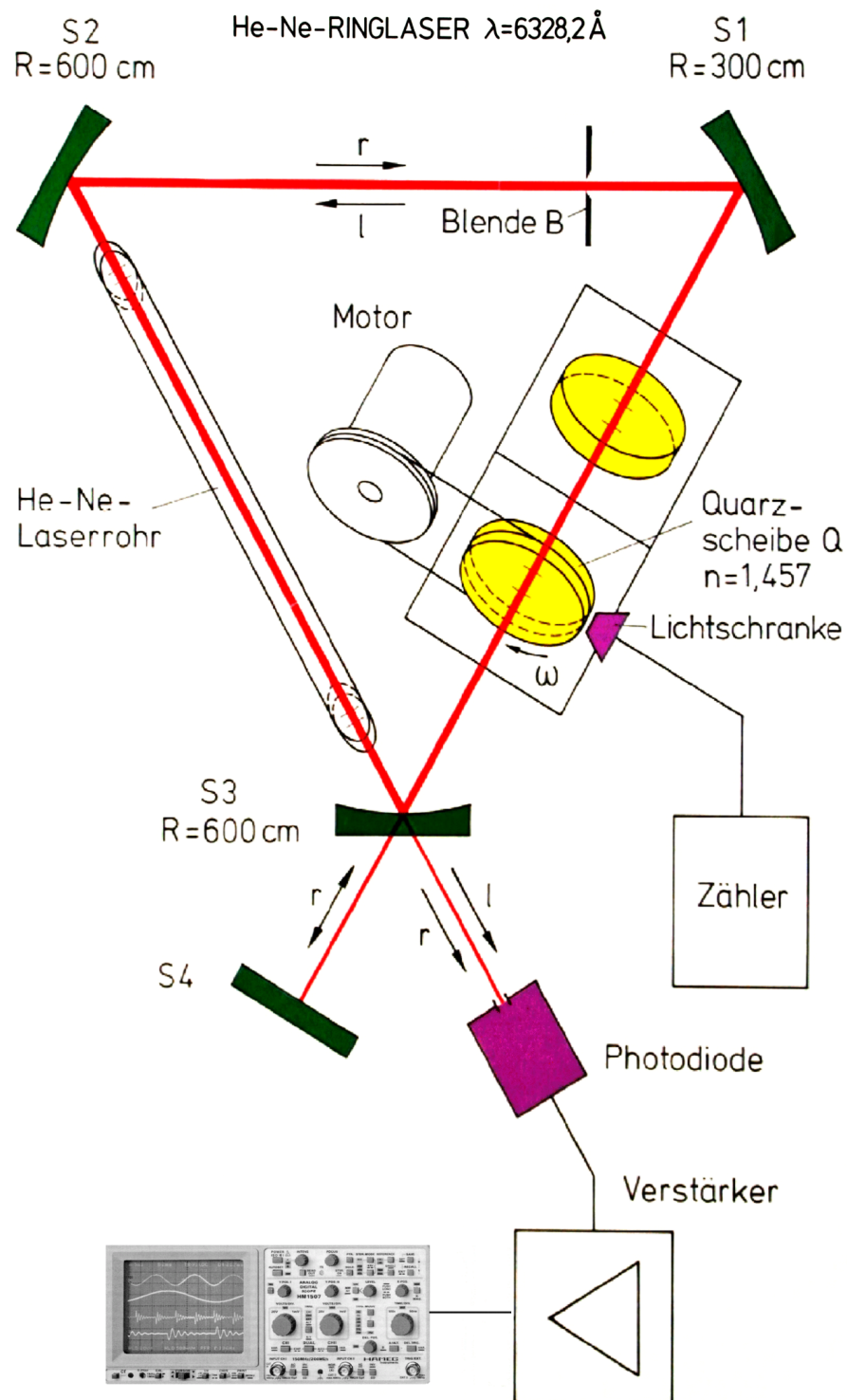


Abbildung 1: Schema des Aufbaus des Versuchs Ringlaser

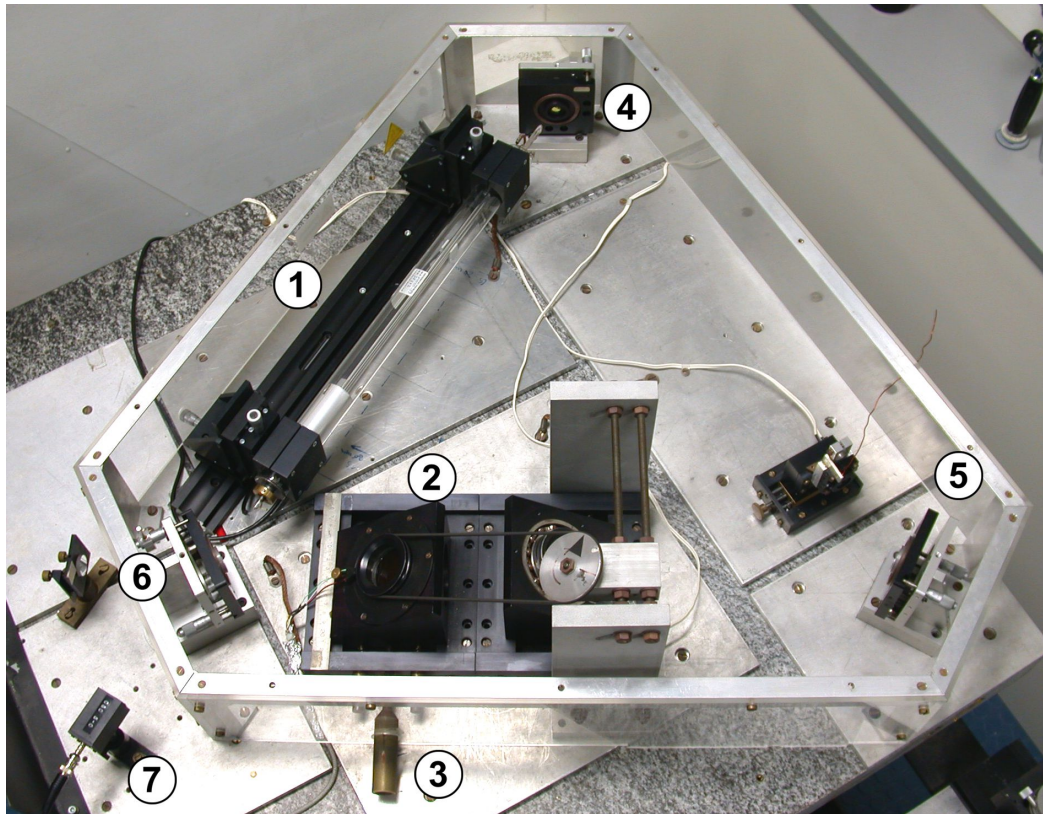


Abbildung 2: 1) He-Ne Laserrohr 2) Quarzglasscheibe 3) Mikrometerschraube 4) 5) und 6) Spiegel des Resonators 7) Photodiode

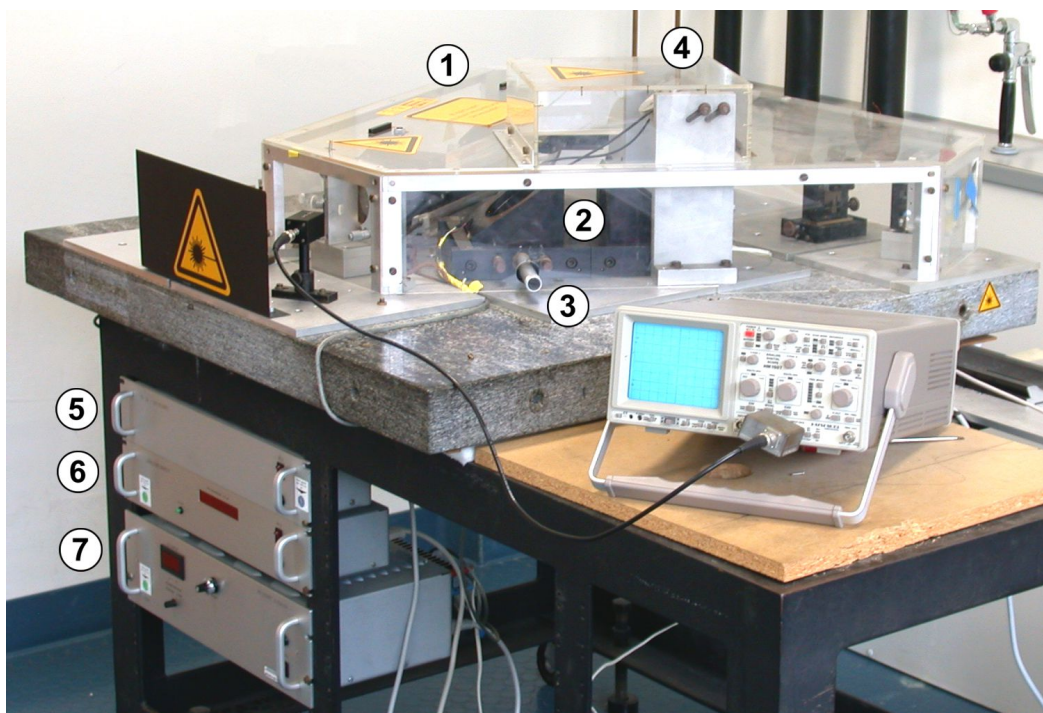


Abbildung 3: 1) Ringlaser-Anordnung 2) Quarzglasscheibe 3) Mikrometerschraube 4) Drehmotor 5) Lasernetzgerät 6) Frequenzzähler 7) Netzgerät des Drehmotors

7 Literatur

Wissenschaftliche Arbeiten

- BUCHWALD, E.: *Hundert Jahre Fizeauscher Mitführungsversuch*, Die Naturwissenschaften Vol 38, Iss 22, Springer Verlag, 1951, S. 519-524
- BILGER, H.R.; ZAVODNY, A.T.: *Fresnel drag in a ring laser*, Phys. Rev. A5, 591 (1972)
- BILGER, H.R.; STOWELL, W.K.: *Light drag in a ring laser*, Phys. Rev. A16, 313 (1977)

Weiterführende Literatur

- FRENCH, A.P.: *Die spezielle Relativitätstheorie*, Vieweg Verlag, 2. Aufl., 1990
- SEXL, R.U.; SCHMIDT, H.K.: *Raum, Zeit, Relativität*, Springer Verlag, Berlin, 4. Aufl., 2001
- WEBER, H.; HERZIGER, G.: *Laser, Grundlagen und Anwendungen*, Physik Verlag, Weinheim, 1972
- TRADOWSKY, K.: *Laser*, Vogel Verlag, 1983

Quellenverzeichnis

- [Ip79] IPPENDORF, A.: *Messung des Mitführungskoeffizienten von Licht mit einem Ringlaser*, Staatsexamensarbeit, (Auszug), Freiburg 1979