

# PRAKTIKUMSBERICHT

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO EM SÃO CARLOS  
INSTITUTO DE FÍSICA  
CENTRO DE PESQUISA EM ÓPTICA É FOTÔNICA

## **Experimentelles Arbeiten im Strontiumlabor**

Manuel Kaiser  
Physik Bachelor  
Matr.Nr.3565966  
Universität Tübingen

10.02.2015 bis 17.03.2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Die Universität</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Die Forschungsgruppe</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Die Experimente [2]</b>	<b>3</b>
4.1	Ultrakaltes Strontium . . . . .	3
4.2	Quantensensor . . . . .	4
<b>5</b>	<b>Die Projekte</b>	<b>4</b>
5.1	Laser Beam Profiler . . . . .	4
5.2	Mechanische Shutter . . . . .	5
<b>6</b>	<b>Résumé</b>	<b>7</b>
<b>A</b>	<b>Praktikumszeugnis, Praktikumsnachweis</b>	<b>9</b>
<b>B</b>	<b>Praktikumsvertrag</b>	<b>10</b>
<b>C</b>	<b>Beam Profiler</b>	<b>11</b>
<b>D</b>	<b>Mechanischer Shutter</b>	<b>15</b>

## 1 Einleitung

Das Orientierungspraktikum im Bereich Physik habe ich vom 10.02.2015 bis zum 17.03.2015 an der Universität von Sao Paulo in Sao Carlos bei Philippe W.Courteille absolviert. Den Kontakt stellte mein HiWi-Job Betreuer Sebastian Slama her - zwischen der entsprechenden Abteilung der Universität Tübingen und der Grupo de Óptica herrscht reger wissenschaftlicher Austausch.

Da im Physikstudium bisher vor allem das Lernen im Vordergrund stand, freute ich mich auch einmal die Anwendungen der Physik kennen zu lernen, zumal ich noch keine Vorstellung von meinem späteren beruflichen Betätigungsfeld habe. Während des Studiums habe ich mich bereits mit dem Themengebiet der kalten Gase beschäftigt und von der Forschung in Tübingen schon einiges mitbekommen. Die Chance nach Brasilien zu gehen und neue Erfahrungen zu sammeln wollte ich mir deshalb nicht entgehen lassen.

## 2 Die Universität

Die staatliche Universität in Sao Paulo (USP) ist eine der größten und besten Südamerikas und ist auch in internationalen Rankings stets vertreten. Im Campus der USP in Sao Carlos sind neben dem Institut für Physik (IFSC) unter anderem auch das Institut für Chemie (IQSC) und die Ingenieursschule (EWSA) angesiedelt [3]. Das 1994 gegründete IFSC gliedert sich in zwei Forschungsabteilungen, die Abteilung für Physik und interdisziplinäre Wissenschaften FCI und die Abteilung für Physik und Materialwissenschaften FCM. Die FCM beinhaltet mehrere Forschungsgruppen, zu der auch die Grupo de Óptica gehört. Die Forschung an dem IFSC hat eine gute finanzielle Grundlage. Jedoch stellt es ab und an ein Problem dar, dass Brasilien noch kein so hoch technologisiertes Land wie zum Beispiel Deutschland ist. So fehlen viele einheimische Technologieunternehmen, so dass gerade für die Forschung fast alles importiert werden muss; das dauert sehr lange und ist kostenintensiv. An dem Institut selbst scheint sich vieles noch im Aufbau zu befinden, jedoch entwickelt es sich zusammen mit der ganzen Region Sao Carlos schnell.

## 3 Die Forschungsgruppe

Die Forschungsgruppe befasst sich mit der Wechselwirkung von Licht mit ultrakalter Materie. An verschiedenen, sowohl experimentellen, als auch theoretischen Projekten arbeiten um Professor Philippe Courteille ein Young Researcher, drei Post-docs, zwei PhD-Studenten, sowie zwei Iniciação científica (etwa studentische Hilfskräfte). Jeden Montag Vormittag treffen sich die Experimentalphysiker zu einer Besprechung. Jeder stellt vor, wie weit er mit seiner Arbeit gekommen ist und was für die Woche ansteht. Außerdem werden neue Ideen und Vorhaben diskutiert. Zum Beispiel wie man mit dem frisch eingetroffenen Frequenzkamm

am besten die Laser locken kann, ob ein Pound-Drewe-Hall System gekauft werden soll oder wegen des Know-Hows lieber selber entwickelt werden soll, oder wie sich in einer kalten Atomwolke einzelne Bereiche synchronisieren können. Als Teil der Gruppe durfte ich sehr frei an meinen Projekten arbeiten und es waren immer Ansprechpartner im Labor, die mir bei Fragen weiter helfen konnten. Aber auch in den Aufbau der Experimente und die Arbeitsweisen der anderen habe ich einen guten Einblick bekommen.

## 4 Die Experimente [2]

Das Labor besteht im Wesentlichen aus zwei Experimenten, mit verschiedenen Anordnungen um ultrakalte Strontiumgase zu erzeugen und zu untersuchen. Strontium gilt als interessantes Forschungsobjekt im Bereich kalter Quantengase, da es zum optischen Kühlen geeignete, schmalbandige Energieübergänge besitzt. Es gilt außerdem als aussichtsreicher Kandidat, um einen neuen Zeitstandard zu setzen, der den jetzigen Cäsiumstandard ablösen könnte, da man beim Strontium optische Übergänge (höhere Frequenz) verwendet anstatt der Mikrowellen beim Cäsium.

### 4.1 Ultrakaltes Strontium

Im ersten Experiment, das seit 2011 aufgebaut wird, sollen Strontiumatome in einem optischen Gitter gespeichert werden und dann das Verhalten beim Streuen von Licht beobachtet werden. Dazu wird das Strontium in einem Ofen erhitzt, um genügend gasförmige Atome zur Verfügung zu haben. Der heiße Atomstrahl wird dann in einem Zeemans-Slower abgebremst/abgekühlt und schließlich in einer 2D Magnetooptischen Falle (MOT) gefangen. Dort wird die Gaswolke zuerst mit einem blauen Laser, dann mit einem roten auf wenige Mikrokkelvin heruntergekühlt. Dann sollen die kalten Atome in ein dreidimensionales optisches Gitter geladen werden. Da es vor ein paar Wochen Probleme mit den Vakuumkammern gab, wurde dieser Teil des Experiments abgebaut. In den letzten Wochen wurden dann die Teile neu präpariert um sie anschließend zusammenbauen zu können. Zuerst wurden alle metallischen Teile der Vakuumkammer (sofern möglich) „ausgeheizt“ (prebaked), also für einige Tage auf ca. 500°C erhitzt um Wasserstoff aus der Oberfläche zu lösen, der einen negativen Effekt auf das Vakuum hätte. Danach wurde ein „Leak-Test“ gemacht: an das zusammengebaute Vakuumsystem wird ein Heliumdetektor angeschlossen und anschließend von außen Helium an alle kritischen Stellen gebracht. Dringt das Helium ein, so besteht an der Stelle ein Leck. Der Test entlarvte ein Loch an einem Fenster (Metall-Glas-Übergang) welches dann ausgetauscht werden musste. Der nächste Schritt wäre dann die Vakuumkammer abzupumpen und das Ausheizen zu starten ( 120°C).

## 4.2 Quantensensor

Eine Möglichkeit um kritische Übergänge zwischen Glas und Metall zu verbessern, wird in dem anderen Experiment ausprobiert. Hier soll Indium zwischen Glasfenster und Metallrahmen der Kammer angebracht werden, um die Kammer dicht zu machen. In dem noch weniger weit fortgeschrittenen Experiment soll ein Ring-Resonator hoher Güte entwickelt werden. Der Ring-Resonator kann dann mit einem Laser in eine oder beide Richtungen betrieben werden; der Laser wird mit der Pound-Drever-Hall Technik auf eine Eigenfrequenz des Resonators gelockt.

Für das Experiment stehen unter anderem zwei sehr stabile Dioden Laser in Littrow-Anordnung zur Verfügung. Da diese normalerweise teuer sind wurden sie nach einem Design nach A.Steck [1] nachgebaut. Leider machte einer der Laser nicht den Eindruck stabil zu sein. Deshalb versuchte ich den Laser zuerst richtig einzustellen (kollimierter Strahl, hohe Intensität an der Lasing-Schwelle) und dann im Verlauf einer Woche sowohl die Veränderung der Schwelle, als auch Veränderungen im Strahlprofil zu messen.

## 5 Die Projekte

Während meines Aufenthaltes hatte ich zwei kleinere Projekte die ich im Folgenden kurz vorstellen möchte.

### 5.1 Laser Beam Profiler

Für die Experimente mit kalten Gasen sind Laser essentiell. Durch optisches Kühlen können die Atome verlangsamt werden und so auf sehr niedrige Temperaturen gebracht, gespeichert oder gar kondensiert werden. Um einen Laser Strahl qualifizieren zu können benutzt man einen so genannten Beam Profiler. Im wesentlichen besteht er aus einer (CCD-)Kamera und einer dazugehörigen Software.

Meine Aufgabe war es mit Matlab ein Programm zu entwerfen, das alle wichtigen Eigenschaften des Lasers messen und auswerten kann. Die wichtigste Größe ist dabei die Strahltaile (beam waist). Ausgangspunkt ist ein Intensitätsprofil: zuerst wird der Laser- Strahl durch Filter so weit abgeschwächt, dass wenn er auf den CCD-Chip der Kamera trifft nicht mehr zu stark ist und der Chip nicht sättigt. Die Software liest das Bild der Kamera dann ein und erstellt daraus ein dreidimensionales Abbild. Bei einem perfekten Strahl entspricht das Profil nun einer Gauß-Funktion, sodass die Software eine zweidimensionale Gauß-Funktion anfittet. Als Ergebnis erhält man die Ausdehnung des Strahls in x- und y-Richtung (senkrecht zur Ausbreitungsrichtung), die Abweichung des Fits von dem Messwert, sowie einen Winkel, um den der Strahl gekippt sein kann. In einem Fenster kann man nun durch verschiedene Knöpfe die Pixelgröße verändern, einen Offset hinzufügen, der bei einer hellen Umgebung wichtig sein könnte, oder die Ergebnisse in einer Text-Datei speichern. Bei einem weiteren Knopf wird ein

2D-Plot der gemessenen Werte und des Fits in x- und y-Richtung angezeigt, an dem man dann zum Beispiel erkennen, kann ob der Laserstrahl unerwünschte Streuungen macht, oder ob die meiste Intensität im Bereich unter der Gauß-Kurve liegt.

Durch einen weiteren Knopf kann man mehr Bilder einlesen, wenn man die Entwicklung des Strahls messen will. Dazu erstellt man mehrere Bilder, mit steigendem Abstand von der Laserquelle. In einem nächsten Fenster erscheinen dann die eingelesenen Bilder und der Abstand. Man kann nun ein Profil erstellen, das die Entwicklung des Strahls zeigt, also wo er seinen Fokus hat und wie kollimiert er ist. Ein wichtiger Wert für die Qualität eines Strahls ist  $M^2$  (M-squared). Er gibt an, um wie viel größer der Fokus des gemessenen Strahls ist, im Vergleich zu einem single-mode  $TEM_{00}$  Gauß-Strahl.

Da das Programm schon etwas aufwändiger ist und ich nicht sehr vertraut bin mit dem Programmieren, hat es einige Zeit gedauert bis das Programm gut funktionierte. Schließlich hat der Beam Profiler dann sein Können bei der Untersuchung der Stabilität eines Lasers unter Beweis gestellt.

## 5.2 Mechanische Shutter

Beim optischen Kühlen von Atomen werden oft mehrere Laser verwendet, die nacheinander unterschiedliche Übergänge der Atome anregen. Dazu ist es wichtig ein genaues Timing beim Einschalten des einen und Ausschalten des anderen Lasers zu haben. Da man die Laser nicht einfach ausschalten kann, werden Shutter verwendet. Um eine schnelle Umschaltzeit zu gewährleisten verwendet man meist AOMs (Acusto-optical-modulators), die einen Laserstrahl innerhalb einer Mikrosekunde umlenken und somit für das Experiment ausschalten können. Das Problem bei den AOMs ist, dass sie oft Streulicht durchlassen, welches das Experiment beeinflussen kann. Deshalb verwendet man meist zusätzlich zu den AOMs mechanische Shutter, die kein Licht mehr durchlassen.

Meine Aufgabe war es nun, einen vorhandenen Shutter zu quantifizieren, gegebenenfalls zu verbessern und einige davon zusammenzubauen. Wichtig für die Shutter ist vor allem die Zeit, die sie brauchen, bis sie geschlossen sind. Mit einem Aufbau, bestehend aus einem HeNe-Laser, eines Funktionsgenerators, einer Fotodiode und eines Oszilloskops konnte ich die Zeiten sehr gut bestimmen: Der Laser-Strahl trifft auf den Shutter, der vom Funktionsgenerator gesteuert wird, und dann auf die Fotodiode, die ihr Signal an das Oszilloskop weiter gibt. Die Zeit, die der Strahl von voller zu verschwindender Intensität braucht, ist dann die Schließzeit des Shutters, die man einfach am Oszilloskop ablesen kann. Auch die Verzögerung zwischen dem Signal des Funktionsgenerators und dem Einsetzen des Schließvorgangs kann man so gut bestimmen. Für den vorhandenen Shutter ergab sich eine Schließdauer von ca. 3 Millisekunden bei einem kleinen Strahldurchmesser und etwa 5 Millisekunden bei einem Strahl, der den ganzen Shutter beleuchtet.

Zur Modifizierung des Shutters, der normalerweise für Fotos verwendet wird, gab es nicht sehr viele Möglichkeiten. Die rückstellende Kraft, die für das Öffnen verantwortlich ist, wird von einem statischen Magneten erzeugt. Zum Schlie-

ßen wird eine Spule verwendet. Also habe ich den elektrischen Schaltkreis, der die Spule versorgt, neu berechnet, simuliert und schließlich eine Verbesserung (größeren Kondensator) gefunden, nachdem bei einem ersten Versuch die Spule zu heiß wurde. Anschließend habe ich noch vier weitere Shutter zusammgebaut, gelötet und getestet. Es ergaben sich Schließzeiten von weniger als einer halben Millisekunde, beziehungsweise weniger als einer Millisekunde für einen größeren Strahldurchmesser. Es war sehr interessant, solch ein Projekt komplett von Anfang bis Ende, also von der Theorie bis zum Test des fertigen Bauteils, durchzuführen.

## 6 Résumé

Insgesamt stellte das Praktikum eine wertvolle Erfahrung für mich dar. Nicht nur die Arbeit an sich, sondern auch der Aufenthalt in einem für mich fremden und sehr vielseitigen Land haben sich mehr als gelohnt.

Vor dem Praktikum konnte ich mir nicht vorstellen einmal in der Forschung zu arbeiten. Doch die Arbeit im Labor war sehr interessant und auch die Arbeitsbedingungen waren bestens. Ich konnte viel selbständig arbeiten, hatte aber dennoch immer eine klare Aufgabenstellung und wurde auch gut in der Arbeitsgruppe integriert. Gerade der Ausgleich zwischen handwerklichem Tun und der Theorie dahinter hat mir sehr zugesagt, da ich während dem praktischen Arbeiten gute Ideen und neue Impulse für die Theorie bekomme und anders herum. Meinem Berufswunsch bin ich jedoch nicht wirklich näher gekommen, ich kann mir aber gut vorstellen etwas Ähnliches zu arbeiten. Deswegen werde ich wohl noch weitere Praktika machen müssen.

Zu Beginn hatte ich etwas Bedenken was die Sprache und das Land angehen. In der Universität bin ich mit Englisch gut zurecht gekommen, und auch außerhalb gab es keine größeren Probleme, die Leute waren hilfsbereit und freundlich.

Auch bei meiner anschließenden zweiwöchigen Rundreise kam ich alleine gut zurecht, ich sah ein beeindruckendes Land und besonders die entspannte Lebenseinstellung der Menschen zeigte mir eine attraktive Alternative zum Alltag bei uns auf.

## Quellenübersicht

- [1] Eryn C Cook, Paul J Martin, Tobias L Brown-Heft, Jeffrey C Garman, and Daniel A Steck. High passive-stability diode-laser design for use in atomic-physics experiments. *Review of Scientific Instruments*, 83(4):043101, 2012.
- [2] P.W Courteille. Optics group, April 2015. URL <http://www.ifsc.usp.br/strontium/>.
- [3] USP. Usp, April 2015. URL <http://www.ifsc.usp.br/strontium/>.

## A Praktikumszeugnis, Praktikumsnachweis

## **B Praktikumsvertrag**

## C Beam Profiler

### Zusammenfassung

The program allows you to easily create a 2D profile of your laser beam. Furthermore you can also characterize the evolution of your beam.

The program needs a two dimensional intensity profile. It doesn't matter which camera you use to take a picture of your laser beam. You only have to make sure your camera is not saturated (too much). If you start the program you are requested to select your first image from some directory of your computer. Next you have to chop your image: You draw a square into the picture of your beam. It should be pretty much a square since the program cuts the non-square part of a rectangle off. Furthermore the middle of the beam should be in the middle of the square. The selected square has to contain the whole laser beam, better too much than too little. If you have finished click with the right mouse button and select 'crop Image'.

A window will open (1), on the left side there is a plot of the original image. On the right you can find a 2D plot of the fitted Gaussian function. The function

$$f(x, y) = I \cdot \exp \left( - \frac{(\cos(\alpha)(x - c_x) + \sin(\alpha)(y - c_y))^2}{2 \cdot w_x^2} - \frac{(-\sin(\alpha)(x - c_x) + \cos(\alpha)(y - c_y))^2}{2 \cdot w_y^2} \right) - I_{offset}$$

is used to describe the 2D-gaussian, dependent on the maximum intensity, the waist in x and y-direction, the angle with respect to the x-axis and the optional offset. For getting the results the 'chi-square' is minimized. In the table below you can find the estimated values. The waist in x and y tells you the size of the waist in micrometres. For a straight standing camera you get an angle for your waists in x and y direction, measured from the horizontal axis (x) in degrees. The table also gives a value for the maximum intensity and the goodness of the fit in form of a normalized  $|\chi|^2$ . For working in bright areas you can also switch on the offset button, the program takes the light in the background into account. You can also select the pixel-size of your camera to get reasonable values, the initial value is  $3,75 \mu m$ . There is also a button to save the results of the fit to a txt.-file. The button 'Intensity Profile' opens a new window where you can see the measured intensities in a two dimensional plot with the Gauss-fit in x- and y-waist direction (2).

To see how your beam evolves you can add more images ('Add images'). You are requested to again choose a image like in the beginning. After selecting 'crop image' again you have to type in the distance of the current image to the first image (reference value 0 mm) in millimetres. A new window shows up where you can see both images and plots of the fits on top (3).

In the table on the bottom you find again the results. You can again save all values to a txt.-file called 'beamFitFile1' by clicking on the button 'Save All'. If

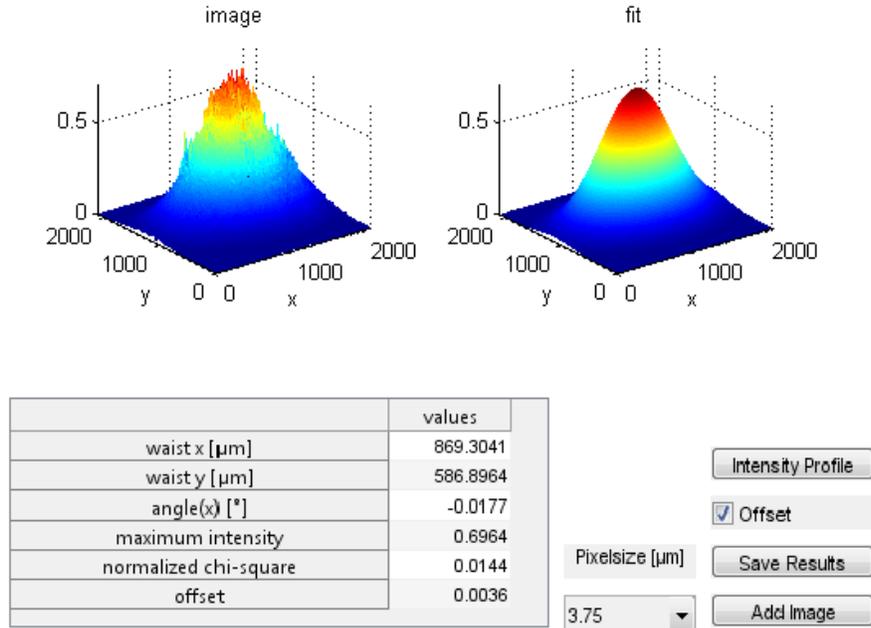


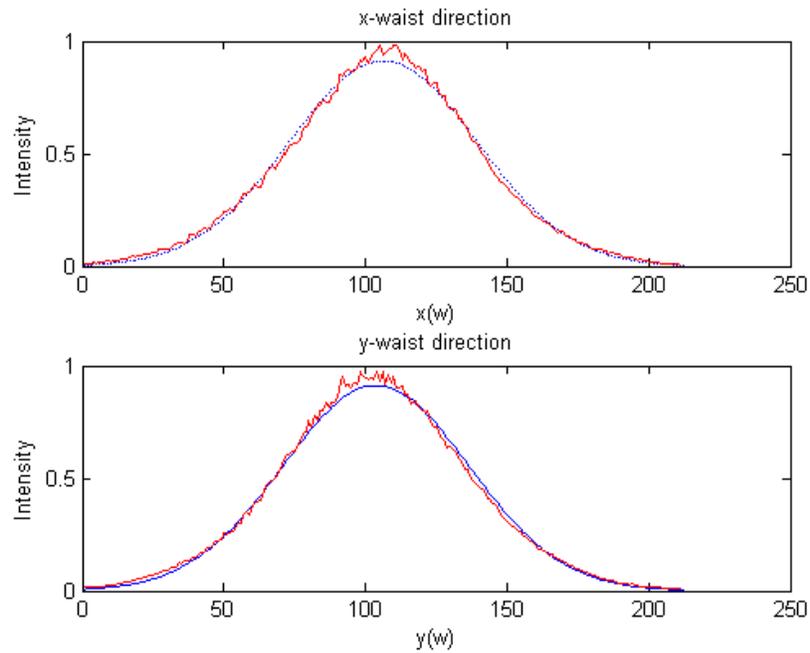
Abbildung 1: Window: image, 2D-fit and results

you want to forget the images read in and start a new measurement click 'New Measurement'. By clicking 'Add Next Image' you can read in more images in the same way as before. The window opens again and you can see all of your images and the belonging fits. If you select 'Intensity Profile' with the number of the image you get again the intensity profiles. You can now click the button 'Create Profile' which shows you the evolution of your beam. For good results you have to read in about 10 images: five of them should be taken around the focus of the beam, another five in distances greater than the Rayleigh length. Type in the wavelength of your beam in nanometres when the dialogue window pops up.

On the top of the new window there are two plots of the evolution of the beam (4). The distance of the measured intensity profiles are plotted on x-axis. The estimated beam waists (in x and y-direction) are plotted on the y-axis. The red circles show where the waists calculated earlier are. The blue line is the fit estimated by the formula

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

with the Rayleigh range  $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$ . The table on the bottom provides the results. You can save them again with 'Save results'. You get the waist size



**Abbildung 2:** Window: Intensity profiles

$\omega_0$ , the Rayleigh length, the position  $z_0$  of the focus of your beam and the goodness of the fit with the normalized  $|\chi|^2$ . The M-squared is a parameter for the goodness of the beam. If it is a perfect  $TEM_{00}$  mode M-squared is equal to 1. If it is greater than 1 the beam can be focussed only to a minimal waist M times bigger compared to a  $TEM_{00}$  mode beam.

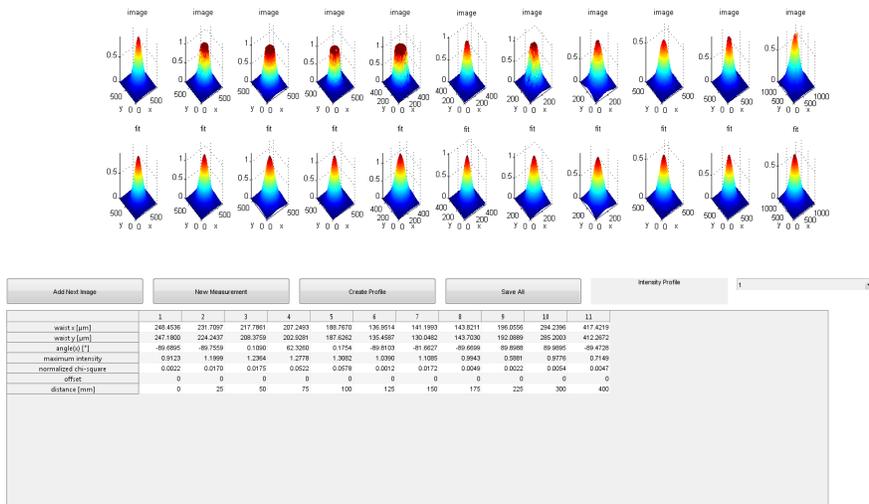


Abbildung 3: Window: image, 2D-fit and results

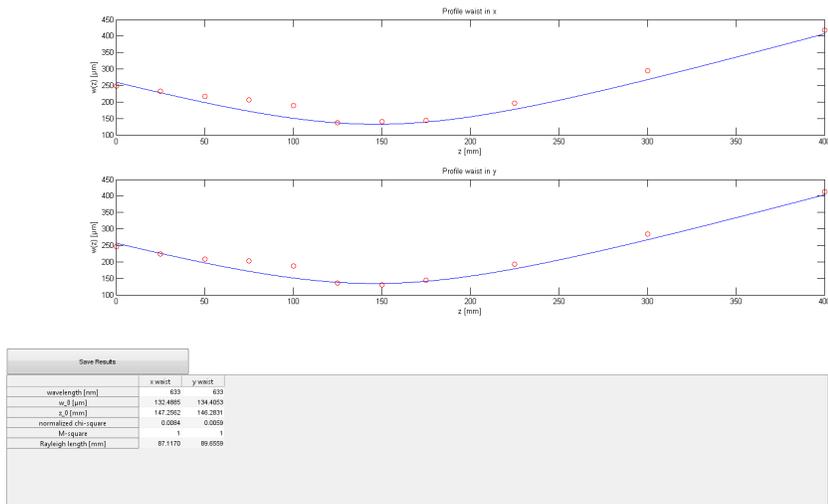


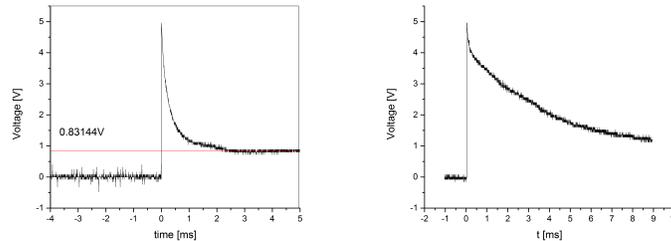
Abbildung 4: Window: evolution of beam

## D Mechanischer Shutter

- Speed (close):  $< 0,5 \text{ ms}$  (small beam),  $< 0,8 \text{ ms}$  (large beam)
- Speed (open):  $< 1,0 \text{ ms}$  (small beam),  $< 2,2 \text{ ms}$  (large beam)

### D.1 Features

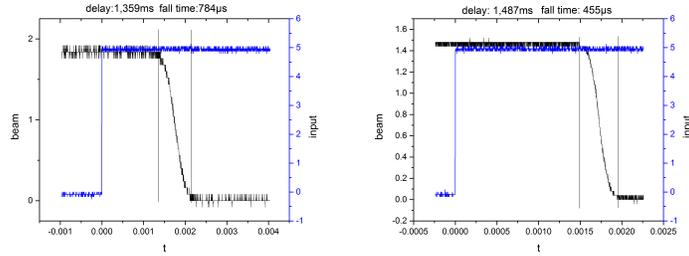
The problem with the previous shutter was the closing time. The measurements with a HeNe Laser and a fast photo diode showed a closing time of about 5ms for a big beam. Voltage measurements on the coil proved the assumption that the recommended tension of 3 V was not provided. Changing the resistance from  $22 \Omega$  to  $2,2 \Omega$  to increase the tension on the coil was not a good idea, the coil heated up quickly to more than  $90^\circ\text{C}$  due to too much current passing through it. The new circuit design improved the closing time and the coil doesn't heat any more. The opening time could not be decreased since it is only dependent on the force of the static magnet inside the coil and a metallic plate around the coil. To increase opening time you could install a static magnet on the metallic plate but this effects also the closing time. As the fast opening caused problems with the mechanical parts of the shutter, the coil had to be moved.



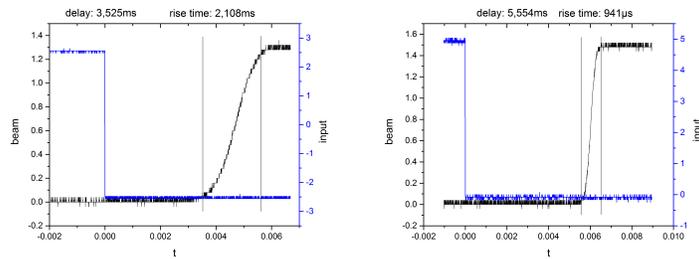
**Abbildung 5:** Voltage on the coil with the old circuit (l) and the new one (r)

The new circuit design with a larger capacitor provides enough Voltage (5, right image) for the coil to guarantee a fast closing. But since the current decreases there is not passing much current through the coil after a few milliseconds. With the old circuit the high tension on the coil was not provided long enough to close the shutter fast.

The times for opening and closing the shutter are shown in the figures 6 and 7. For the first measurements the beam was enlarged by a telescope in order to illuminate the whole opening of the shutter. The next measurements (diagrams on the right) were done with a small beam. The closing time is less than half a millisecond for a small beam and less than 0,8 ms for the large beam. It is faster than the producer says in his specifications. The opening time is almost identical to the specifications. The delay between the signal and the closing varies from 1,3 to 1,6 ms. For the closing the delay is worse (between 3,5 and 6 ms) but stable for each shutter.



**Abbildung 6:** closing time for a large (l) and small (r) beam



**Abbildung 7:** opening time for a large (l) and small (r) beam

## D.2 Mounting

The electric circuit contains

- resistor  $22\ \Omega$
- capacitor  $100\ \mu F$  and  $1000\ \mu F$
- diode
- resistor  $10\ k\Omega$
- transistor IRLMS2002TRPbF

are mounted on the circuit board as shown in the circuit diagram in figure 8.

The mechanical shutter assembly (SUNEX) is glued on the board. Probably the hole in the board has to be enlarged so the part can fit in. After that the small screw on the coil has to be loosened. In order not to get stuck the coil has to be moved as shown in the picture. The fast movement of the shutter caused problems if the position of the coil is not changed. Make sure the white plastic pin fits in the black plastic part that moves the shutter. The coil is then glued on the shutter. At last a piece of aluminium foil is glued on the backside of the shutter (the side turned towards the beam) so that the shutter doesn't heat up.

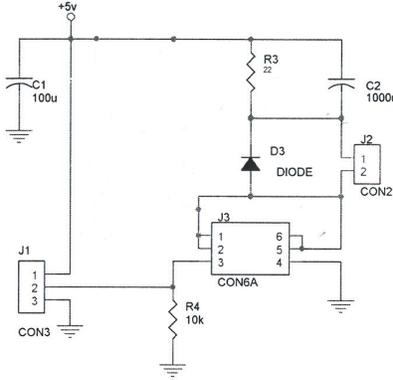


Abbildung 8: circuit diagram

### D.3 Electric circuit

The basic concept of the circuit is to supply a high tension to the coil of the shutter. The coil generates a magnetic field and forces a static magnet to move, the shutter closes. The previous design of the electric circuit had some problems: The resistance connected in series with the coil is big. A initial tension of 5 Volts only provides only 0.8 Volts to the coil. The mechanical movement is therefore slower (  $2ms$ ). Replacing the resistor by a smaller one (2 Ohms instead of 22) is not useful because the coil heats due to its ohmic resistance rapidly over  $90^\circ$  and destroys the shutter. So the tension at the coil should increase shortly to a high voltage (5 V) and then change to a low voltage. As a result the shutter closes fast and doesn't heat up.

The circuit consists only of three different electric components: An inductivity  $L$ , a capacitor and a resistor. The voltage supply generates a square wave.

#### D.3.1 Calculation

The three elements are characterized by:

$$U_L = L \cdot \frac{dI}{dt}, \quad U_R = R \cdot I, \quad U_C = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t I(\tau) \cdot d\tau$$

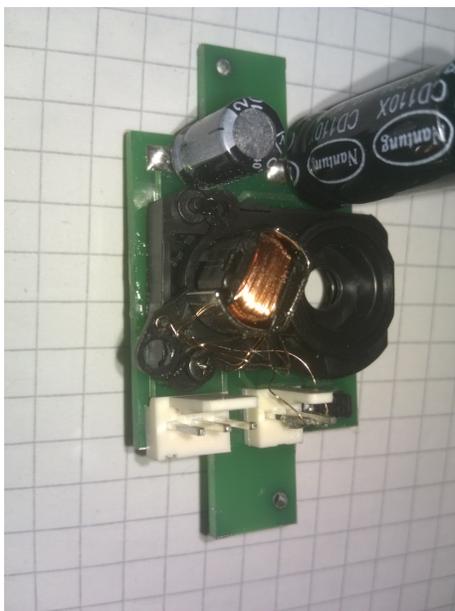
Now we can use the Kirchoff's circuit laws:

$$U_L + U_{RL} + U_C = U_0(t)$$

$$U_L + U_{RL} + U_R = U_0(t)$$

and the square wave:

$$u_0(t) = \sum_{k=0}^{\infty} V(\text{heaviside}(t - kT) - \text{heaviside}(t - kT - \tau))$$



**Abbildung 9:** Coil on the circuit board

With the current through the coil  $I(t)$  and the tension on the capacitor  $U(t)$  you get the two equations

$$0 = u_0(t) - (i(t) - C \frac{du(t)}{dt}) \cdot R - L \frac{di(t)}{dt} - i(t) \cdot R_L$$

$$0 = u_0(t) - u(t) - L \frac{di(t)}{dt} - i(t) \cdot R_L$$

Now we can use the *Laplace Transformation* and its calculation rules:

$$0 = \frac{1 - e^{-\tau s}}{1 - e^{-Ts}} \frac{V}{s} - R(I(s) - C(sU(s) - u(0))) - L(sI(s) - i(t)) - R_L \cdot I(s)$$

$$0 = \frac{1 - e^{-\tau s}}{1 - e^{-Ts}} \frac{V}{s} - L(sI(s) - i(t)) - R_L \dot{I}(s)$$

We can set  $i(0)$  and  $u(0)$  to zero and solve the equations and do the inverse Laplace transform to get the results for the voltage on the capacitor and the current through the coil. Using  $U_L = L \cdot \frac{dI}{dt}$  we can calculate the tension on the coil.

The figures 10 show the results computed with Matlab for a input voltage of 5 V and different resistances and capacitors. You can see that the 'end Voltage' is only dependent on the resistor. The speed of decreasing is dependent on the capacitor. In order to achieve a short closing time a big capacitor is better. The resistance should be large, in order not to heat the coil. The diagram in figure

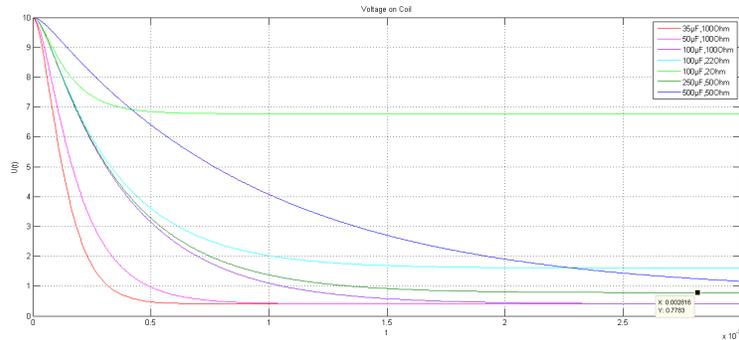


Abbildung 10: Computation of circuit

11 shows the circuits behaviour for  $5V$ ,  $22\Omega$  and  $1mF$ . As you can see the computation is almost identical to the measured curve.

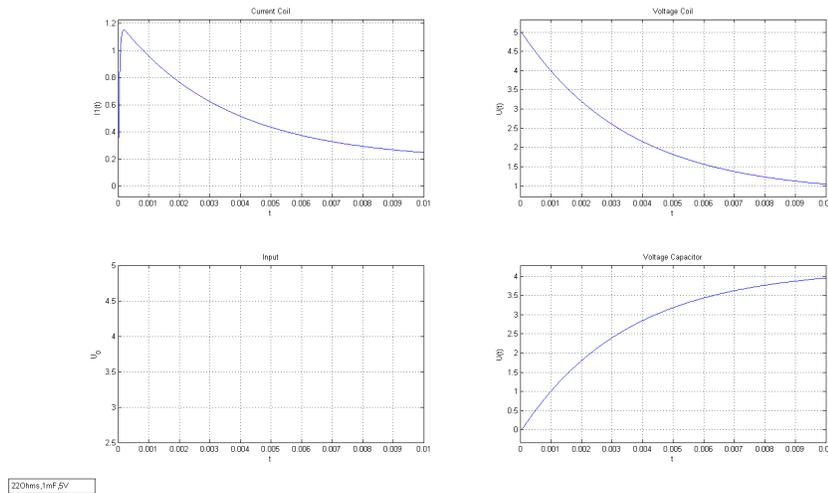


Abbildung 11: Computation of circuit

### D.3.2 Measuring inductance

There is a easy and fast way to measure the inductance of a coil, although it is not very precise. You only need a function generator with a  $50\Omega$  resistance, an oscilloscope and a multimeter. At first you measure the resistance of your coil. Then you connect your function generator to your oscilloscope and the

coil parallel to both, as shown in the diagram. The generator is set to a sine

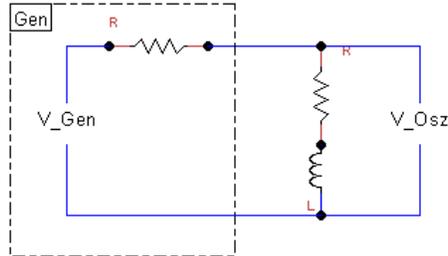


Abbildung 12: circuit diagram

wave with for example  $1V_{pp}$  and  $20kHz$ . Now you change the frequency of the generator until the voltage on the oscilloscope is half of the input voltage, so for in this case  $0,5V$ . Read out the frequency. To calculate the inductance of the coil you use the Kirchhoff's laws:

$$I_L = \frac{V_{gen}}{Z_L + R_L + R_{gen}} = \frac{V_{osz}}{Z_L + R_L}$$

$$\left| \frac{V_{gen}}{V_{osz}} \right| = \left| \frac{i\omega L + R_L + R_{gen}}{i\omega L + R_L} \right| \stackrel{!}{=} 2$$

$$\Rightarrow L = \frac{\sqrt{3R_L^2 - R_{gen}^2}}{2\pi f}$$

The coil in the shutter has a resistance of  $4,2\Omega$ . The measured frequency is about  $31kHz$  and the resistance in the generator is  $50\Omega$ . So the coil has a inductance of about  $150\mu H$ .

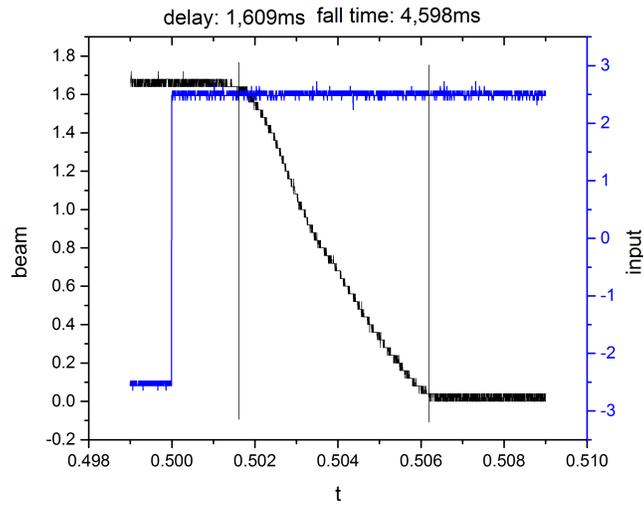


Abbildung 13:  $100 \mu F$  Capacitor, 5V, big beam

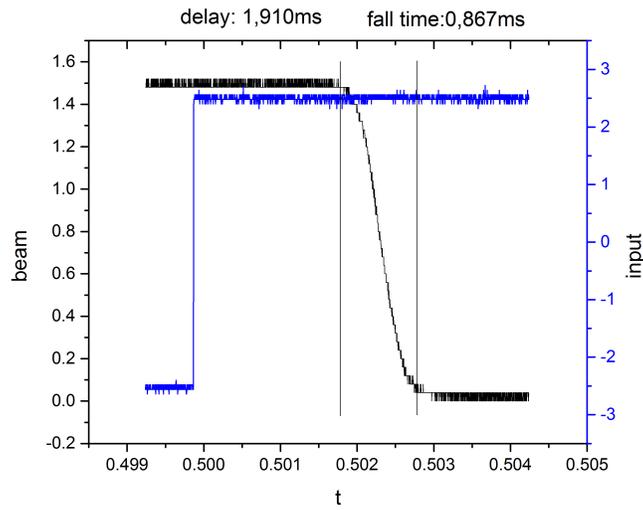
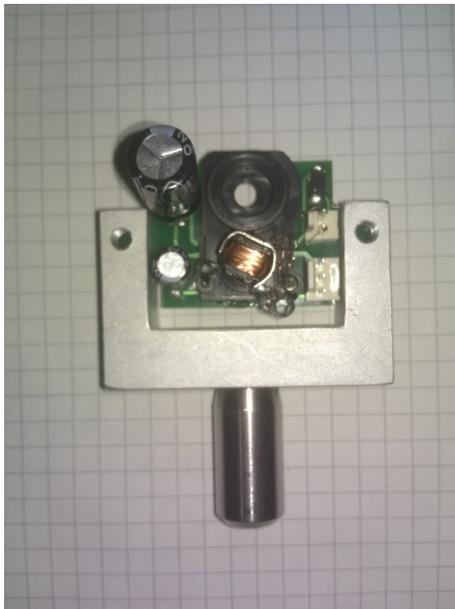


Abbildung 14:  $100 \mu F$  Capacitor, 5V, small beam



**Abbildung 15:** Shutter with mounting