

Projektpraktikum Physik

Laserkreisel

Gruppe 1

Daniel Träutlein, Moritz Bubek, Markus Müller,
Tim Thomay, Pascal Frank, Markus Beyer

Sommersemester 2002

Die Funktionsweise eines Laserkreisel beruht auf dem Sagnaceffekt. Im Rotierenden System sind die Wege des im Uhrzeigersinn laufenden Lichtes und des gegen den Uhrzeigersinn laufenden Lichtes unterschiedlich. Daraus resultiert eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Strahlen. Diese ist proportional zur Kreisfrequenz ω . Mit Laserkreiseln lässt sich zum Beispiel die Rotationsgeschwindigkeit der Erde ziemlich genau bestimmen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	4
2.1	Historisches	4
2.2	Der Harress- und Sagnac - Versuch	4
2.3	Lock-In-Verstärker	5
2.3.1	Rauschen	5
2.3.2	Prinzip des Lock In Verstärkers	6
2.4	Photodiode	6
3	Aufbau und Durchführung	9
3.1	Mechanischer und optischer Aufbau	9
3.2	Antrieb und Lagerung	10
3.3	Signalübertragung	10
3.3.1	Signalübertragung per Funk	14
4	Fazit	15

1 Einleitung

Mit Laserkreisel lässt sich die Kreisfrequenz der Erdrotation recht genau bestimmen. Dazu benutzt man allerdings andere Kreisel, als wir im Praktikum. Bei uns sollte ein Laserstrahl in zwei Strahlen geteilt werden, von denen einer im Uhrzeigersinn, der andere gegen den Uhrzeigersinn im Kreis läuft. Rotiert nun das Gesamtsystem, so sind die beiden Wege unterschiedlich lang. Die daraus resultierende Phasenverschiebung wollten wir nun bestimmen. Bei einem präzisen Laserkreisel, wie sie zur Bestimmung der Erdrotation benutzt werden, verwendet man einen Ringlaser, welcher sein Licht nach beiden Seiten aussendet. Über Spiegel oder Faseroptik werden die beiden Strahlen gegenläufig im Kreis herumgeführt, sodaß ein Strahl am Austrittsort des jeweils anderen in den Laser eintritt. Wird der Apparat nun in Rotation versetzt, so sind die beiden Wege unterschiedlich lang. Dies bedeutet, daß sich der Resonanzraum des Lasers verändert hat. Eine Längenveränderung des Resonanzraumes führt zu einer Frequenzänderung, welche proportional zur Kreisfrequenz ist.

2 Theorie

2.1 Historisches

Der Effekt wurde zuerst von Harress 1911 durchgeführt, 1913 von Sagnac etwas verändert wiederholt. Obwohl Sagnac nur vier Meßreihen veröffentlichte, wurde der Effekt nach ihm benannt. Wegen der hohen Genauigkeit der Interferometer ist der Effekt gut geeignet langsame Drehungen, z.B. die Erddrehung genau auszumessen. Der erste Versuch, die Erdrotation mit dem Sagnaceffekt zu messen, wurde 1925 von Michelson und Gale mit einem rechteckigen Röhrensystem (643 m lang, 322 m breit) durchgeführt. Heutzutage werden Lasergyroskope als Navigationsanlagen in Schiffen und Flugzeugen, in der Raumfahrt und anderen Systemen verwendet. Jede Kursänderung wird als Verschiebung der Interferenz gemessen. Die besten Lasergyroskope können heute eine Winkelgeschwindigkeit von $0,00001 \text{ } ^\circ/h$ messen.

2.2 Der Harress- und Sagnac - Versuch

Sagnac benutzte dabei einen Drehteller mit vier Spiegeln. Er leitete monochromatisches, kohärentes Licht über ein Prismensystem in bzw. aus der Apparatur, dort wurde der Lichtstrahl geteilt. Einer wurde nun rechtsherum geleitet, während der andere links herum lief. Die beiden Strahlen wurden außerhalb der Apparatur überlagert und interferierten. Das Interferenzstreifensystem entsteht durch die feste Phasenbeziehung der einzelnen, im Versuchsaufbau reflektierten Strahlenbündel. Beim Durchgang durch den Strahlenteiler entsteht ein fester Gangunterschied zwischen dem Strahl, der diesen zweimal durchläuft und dem Strahl, der an diesem zweimal reflektiert wird. Infinitesimale Verkippungen der Spiegel führen zu einer Ablenkung der beiden Teilbündel nach entgegengesetzten Seiten von ihrer Ursprungsrichtung. Somit entstehen in der Bildebene (hier: auf der Photodiode) mehrere Bilder, die die Interferenz aufbauen. Wurde nun der Drehteller in Rotation versetzt, beobachtete man eine Verschiebung der Interferenzstreifen. Diese Änderung ist dadurch zu erklären, dass die optischen Weglängen der beiden Streifen differieren. So braucht der sich im Drehsinn herum geleitete Strahl länger, da sich auf dem Weg von Spiegel 1 zu Spiegel 2 dieser schon weiterbewegt hat. Die Differenz der Weglängen in Ruhe und in Rotation ergibt sich zu

$$a' - a = 2r(\sin\phi' - \sin\phi)$$

Die Strahlen haben nach Umlauf einer Umdrehung den Gangunterschied von $8 \cdot (a' - a)$, sodass sich das Interferenzstreifenmuster verschiebt. Die Zeit zum Durchlaufen der Apparatur für den Strahl mit längerem Weg ergibt sich nun aus

$$\tau_+ = \frac{8r \cdot \sin\phi'}{c} = \frac{8r}{c} \cdot \sin\left(\frac{\pi + 2\omega t}{4}\right),$$

2 Theorie

wobei im Argument des Sinus $\frac{\tau_{\pm}}{4} \approx t$ genähert wurde. Entsprechend für den entgegengesetzt laufenden Strahl:

$$\tau_{-} = \frac{8r}{c} \cdot \sin\left(\frac{\pi - 2\omega t}{4}\right).$$

Mit der Periodendauer T ergibt $\Delta = \frac{\tau_{+} - \tau_{-}}{T}$ die Verschiebung der Interferenzstreifen.

$$\Delta = \frac{8r}{\lambda} \cdot \left[\sin\left(\frac{\pi + 2\omega t}{4}\right) - \sin\left(\frac{\pi - 2\omega t}{4}\right) \right] = \frac{16r}{\lambda} \cdot \cos\frac{\pi}{4} \cdot \sin\frac{\omega t}{2} \approx \frac{8r}{\lambda} \cdot \cos\frac{\pi}{4}$$

Setzt man $t = \frac{a}{c} = \frac{2r}{c} \cdot \sin\frac{\pi}{4}$, so folgt für die relative Streifenverschiebung

$$\Delta = 8r^2 \cdot \frac{\omega}{c \cdot \lambda} \cos\frac{\pi}{4} \sin\frac{\pi}{4} = \frac{4r^2\omega}{c \cdot \lambda}$$

In dieser Rechnung steckt die Voraussetzung, dass die Fresnelschen Reflexionsgesetze auch bei bewegten Spiegeln gelten. Tatsächlich bleiben sie bei Bewegung in der Spiegelebene gültig und wir können dies bei unserer Anordnung in guter Näherung annehmen.

Die Streifenverschiebung, die wir bei idealer Versuchsdurchführung zu erwarten hatten, hängt nun vom Spiegelabstand und von der Rotationsgeschwindigkeit ab. Mit dem Abstand 36 cm, d.h. $r = 0.255$ m, einer Rotationsgeschwindigkeit von 720 U/min, d.h. $\omega = 75,4$ s⁻¹ und der Wellenlänge des Lasers von 635 nm ergibt sich eine theoretische Verschiebung von $\Delta = 0,2$ in Streifenbreiten, was auch der von Harress beobachteten Verschiebung entsprechen würde.

Dieser hatte 1912 versucht, mithilfe einer ähnlichen Apparatur „den Mitführungskoeffizienten des Äthers im Glase“ zu bestimmen. Die dabei eingesetzte Apparatur unterschied sich von der Sagnacs dadurch, dass er anstatt Spiegeln mehrere Glasprismen verwendete, in denen die Lichtstrahlen liefen, und dass er die resultierenden Interferenzstreifen photographisch aufnahm. Er ging technisch bedingt nicht über 750 Umdrehungen pro Minute hinaus.

2.3 Lock-In-Verstärker

Ändert sich das Meßsignal nur in einem sehr kleinen Wertebereich, so besteht die Gefahr, dass es im Rauschen untergeht. Im Gegensatz zum Meßsignal setzt sich das Rauschen aus einem breitbandigen Frequenzspektrum zusammen. Dies nutzt ein Lock-In-Verstärker

2.3.1 Rauschen

Rauschen ist ein wesentlicher Störfaktor, wenn man eine Meßung durchführen will, bei der nur sehr kleine Meßwerte auftreten. Allgemein versteht man unter

2 Theorie

Rauschen die statistische Abweichung der Elektronenbewegung vom erwarteten Mittelwert. In einem stromdurchflossenen Leiter oder Widerstand bewegen sich eine Anzahl von Elektronen, wobei deren Geschwindigkeit um einen Mittelwert, der proportional zum Strom ist, schwankt.

Thermisches Rauschen tritt in jedem Leitermaterial auf. Da alle Frequenzen des Spektrums auftreten, nennt man es auch weißes Rauschen. Der Effektivwert der Rauschspannung eines Widerstandes ist abhängig von der Größe des Widerstandes, der betrachteten Bandbreite des Meßgerätes und der absoluten Temperatur:

$$U_{R_{eff}} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta F}$$

k: Boltzmannkonstante, T: Temperatur, R: Widerstand, ΔF : Bandbreite
Da die Rauschspannung alles andere als sinusförmig ist, sollte man nicht mit dem Effektivwert rechnen. In der Praxis wird der Effektivwert mit 6 multipliziert, um mit 99% den Spitzenwert (von Peak zu Peak) abzuschätzen.

$$U_{R_{pp}} = U_{R_{eff}} \cdot 6$$

2.3.2 Prinzip des Lock In Verstärkers

Beim Lock-In-Verstärker wird das Meßsignal mit einer Referenzspannung, bekannter Frequenz (ω_{ref}) und Phasenlage moduliert. Danach wird das Signal durch einen Bandpaß mit der Mittenfrequenz ω_{ref} geschickt. Dies filtert schon viele Rauschanteile heraus. Anschließend gelangt das Signal in das entscheidende Teil des Lock In Verstärkers: den Demodulator. In diesem Teil des Gerätes wird das vorgefilterte Meßsignal mit dem Referenzsignal multipliziert. Das Ergebnis dieser Operation ist ein Signal, das sich aus Anteilen der Summen- und Differenzfrequenzen beider Signale zusammensetzt. Sind beide Frequenzen identisch, erhält man eine pulsierende Gleichspannung, deren Welligkeit im folgenden Tiefpassfilter (mit der Grenzfrequenz $f_g \approx 0\text{Hz}$) eliminiert wird. Am Ausgang steht eine dem Meßsignal proportionale und vom Rauschen gefilterte Gleichspannung zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

Wie leicht einzusehen ist, ist es hierbei notwendig, dass Signal und Referenz in Phase zueinander liegen. Liegen die Phasen der beiden Wechselspannungen ungünstig zueinander, so kann es passieren, daß ein Signal herausgemittelt wird. Deshalb benötigt man einen Phasenschieber.

2.4 Photodiode

Photodioden sind optische Sensoren, deren Wirkungsweise auf dem inneren Photoeffekt beruht. Beim Photoelektrischen Effekt werden durch Absorption von

2 Theorie

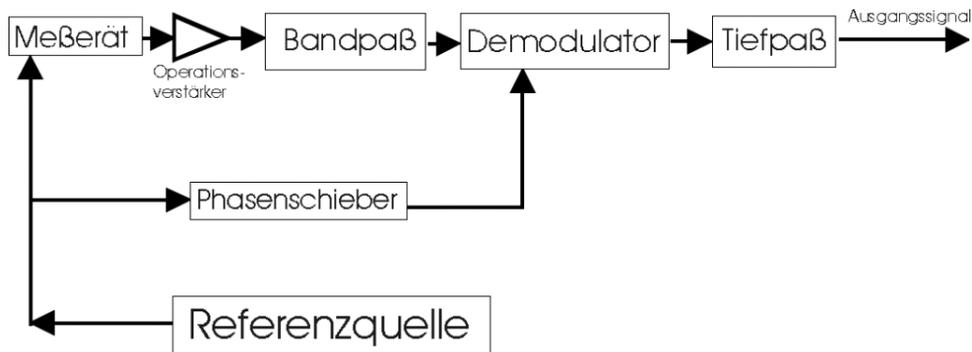


Abbildung 1: Prinzip eines Lock-In-Verstärkers

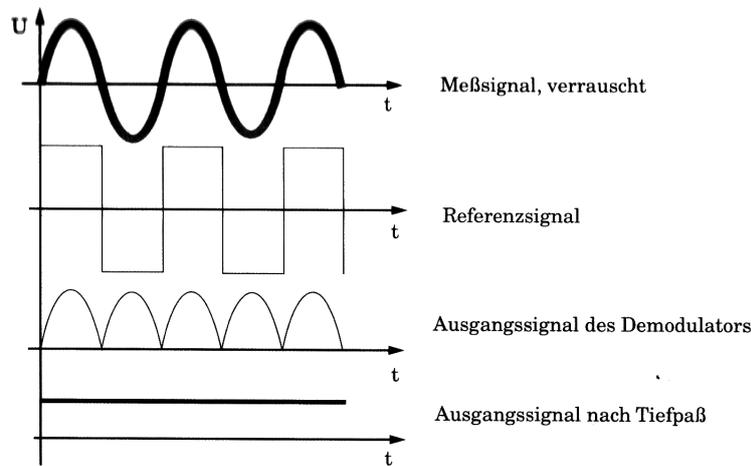


Abbildung 2: Messignal und Referenzsignal

kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung (in unserem Fall im Bereich des sichtbaren Lichts) freie Ladungsträger erzeugt. Die pro Zeiteinheit freigesetzte Ladungsmenge, bzw. der entsprechende Strom, sind ein Maß für die einfallende Strahlungsleistung (Einheit W) bzw die Bestrahlungsstärke (Einheit W/m^2).

Wird das Photoelement bei geschlossenem Stromkreis belichtet, so fließt ein Sperrstrom, bei offenem Kreis ist eine Photospannung an der Diode meßbar. Der durch Licht erzeugte Photostrom hängt bei Photodioden in sehr weiten Grenzen linear von der Bestrahlungsstärke ab. Das Signal der Photodiode wird direkt dahinter verstärkt, man nutzt hierzu einen Operationsverstärker.

2 Theorie

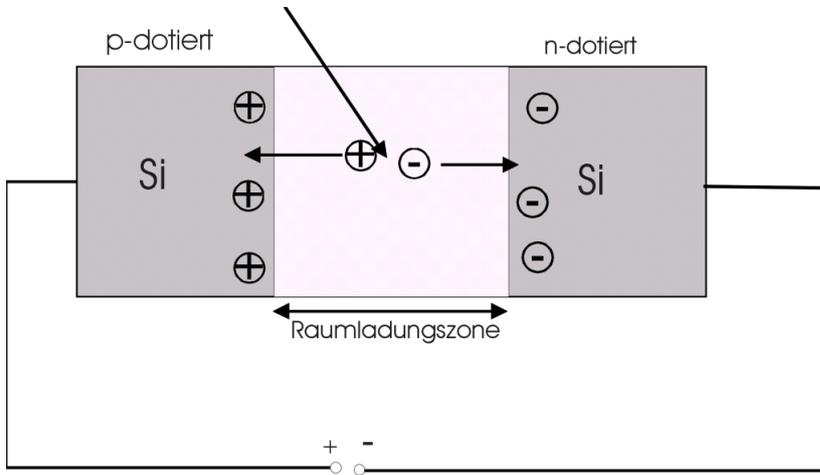


Abbildung 3: Aufbau einer Photodiode

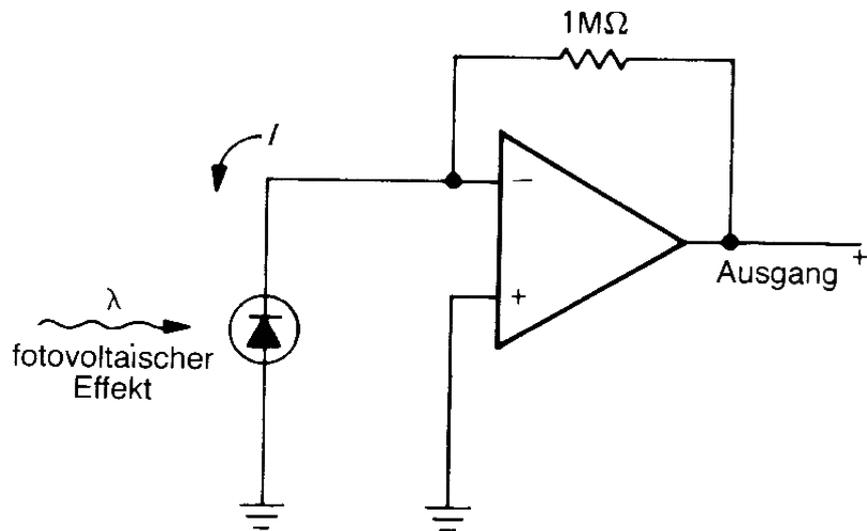


Abbildung 4: Schaltung der Photodiode mit Operationsverstärker

3 Aufbau und Durchführung

Bevor der Bau des Laserkreisels beginnen konnte, haben wir in gemeinsamer Runde zunächst einige wichtige Vorüberlegungen angestellt und einige Entscheidungen über Bauart, Material und Antrieb des Kreisels getroffen. Nachdem wir die zu erwartende Änderung des Interferenzbildes der beiden gegenläufigen Teilstrahlen rechnerisch abgeschätzt hatten, kamen wir zu dem Schluß, daß bei einem Durchmesser der Platte von ungefähr einem halben Meter und bei über hundert Umdrehungen pro Minute ein gut meßbarer Effekt auftreten sollte.

3.1 Mechanischer und optischer Aufbau

Als erstes stellte sich die Frage, welches Material wir für die Basisplatte des Kreisels verwenden wollten. Für Holz sprach das geringere Gewicht gegenüber Metall. Außerdem kann Holz bequem und gut bearbeiten werden. Wir entschieden uns aber dann doch für eine quadratische Platte aus Aluminium von 8 mm Dicke (Maße: 45cm \times 45cm, Gewicht: ca 5 kg), da wir der Ansicht waren, daß sich auf der Aluminiumplatte vor allem die erschütterungsempfindlichen optischen Bauteile exakter justieren lassen. Außerdem war darauf zu achten, daß die Platte dick genug war, sodaß sie sich nicht durchbog.

Nachdem wir kurzzeitig überlegt hatten, das kohärente Laserlicht von oben zentriert auf die Platte einzustrahlen und auch die Interferenzmessung außerhalb der sich drehenden Platte durchzuführen, verwarfen wir diese Idee, weil uns der Übergang von außerhalb in das rotierende System und anschließend zur Messung des Interferenzmusters als zu störanfällig erschien, vor allem sahen wir darin Probleme, den austretenden Strahl exakt aus der Mitte herauszuführen. Stattdessen beschlossen wir, sowohl den Laser selbst, als auch als auch die Photodiode zur Messung der Intensität des Interferenzmusters auf der rotierenden Aluminiumplatte anzubringen. Es blieb nun noch die Frage, auf welche Art und Weise der vom Laser erzeugte Lichtstrahl aufgespalten und auf den verschiedenen Wegen entlanggeführt und anschließend wieder zusammengebracht werden sollte. Die Möglichkeit, die durch einen Strahlteiler getrennten Teilstrahlen über feinste Linsen in Lichtleiter einzukoppeln, schied zum einen aus finanziellen Gründen, aber vor allem deshalb aus, weil es uns praktisch unmöglich erschien, ohne teure Spezialapparatur die beiden Teilstrahlen aus dem Lichtwellenleiter so auszukoppeln, daß wir wieder zwei parallele Strahlen bekommen würden.

Um die Anzahl der für eine saubere Überlagerung des Signals kritischen Stellen zu minimieren, entschieden wir uns für einen optischen Aufbau mit nur vier wesentlichen Komponenten. Den zylinderförmigen, etwa 5-6 cm langen Laser justierten wir auf einem kleinen Hartplastikklotz in einer Ecke der Metallplatte. Das vom Laser produzierte Licht wird kurz hinter dem Laser über einen Strahlteiler in zwei Teilstrahlen zerlegt, die über drei Spiegel an den drei übrigen Ecken der Platte auf einen geschlossenen Weg gelenkt werden. Nach den jeweils drei Spiegelungen

an den Spiegeln werden die beiden Teilstrahlen über denselben Strahlteiler wieder vereinigt und treffen auf die Photodiode.

3.2 Antrieb und Lagerung

Zwischenzeitlich kümmerte sich parallel zum optischen Aufbau ein Teil unseres Teams um die Lagerung und den Antrieb der Kreiselplatte. Zuerst hatten wir die Idee, die Stahlplatte auf einen alten Waschmaschinenmotor zu montieren, wichen jedoch wegen der schwierigen Halterung von diesem Plan schnell wieder ab. Besser geeignet erschien uns ein nicht mehr benötigter Drehstrommotor (mit ca. 1400 Umdrehungen pro Minute), auf dessen Achse wir die Aluplatte genau zentriert gut festschrauben konnten. Nachdem uns bei den notwendigen Bohrungen für die vier Befestigungsschrauben und den Gewinden auf dem Motorkopf die Werkstatt schnell und unkompliziert geholfen hatte, testeten wir schon einmal, wie die Platte sich bei hoher Umdrehungszahl des Motors verhält: Sie war offensichtlich gut gelagert und drehte sich relativ ruhig und ohne größere Vibrationen. Ein Problem hierbei war, daß sich die Umdrehungszahl des Drehstrommotors nicht durch die Versorgungsspannung regeln ließ, deshalb bauten wir den Motor leicht um, sodaß wir ihn auch einphasig betreiben und seine Drehgeschwindigkeit über die Spannung steuern konnten. Leider stellte sich heraus, daß das Drehmoment des Motors im einphasigen Betrieb so stark absinkt, daß man keine nennenswerte Beschleunigung der Platte mehr hat. Wir überlegten deshalb, wie man die Platte eventuell über eine mechanische Übersetzung antreiben könnte. Wir probierten den tragbaren kleinen Gleichstrommotor aus dem Anfängerpraktikum aus, mit dem im Versuch *Kreisel* die Radfelge angetrieben wird. Wir trieben die Aluplatte über einen Keilriemen zwischen Motorachse und dem kleinen Antriebsaggregat an und stellten fest, daß sich so eine beträchtliche Umdrehungsgeschwindigkeit erreichen ließ. Ein weiterer Vorteil hierbei war, daß wir den großen Motor als Drehlager nutzen konnten, und daß sich bei dem kleinen Motor die Antriebsgeschwindigkeit kontinuierlich regeln ließ. Um für spätere Messungen mit Laser und den daraus ermittelten Geschwindigkeiten einen Vergleich zu haben, maßen wir mit der Lichtschranke die Drehfrequenzen aus. In der höchsten Stufe der Spannungsquelle ergaben sich fast 12 Hz, also fast $720 \frac{U}{min}$. Die einzelnen Frequenzen können aus dem aufgenommenen Schaubild 5 abgelesen werden.

3.3 Signalübertragung

Als besonders knifflig stellte es sich heraus, die elektrischen Zuleitungen von außen auf die rotierende Platte zu gewährleisten. Zunächst versuchten wir dies über eine Konstruktion mit vier von einem Rohr (ca. 3 cm \varnothing) abgesägten Kupferringen, die untereinander isoliert auf einem Metallzylinder mit Spezialklebstoff angebracht werden sollten. Schnell stellte sich heraus, daß es praktisch unmöglich war, die vier Ringe symmetrisch anzubringen. Deshalb entschieden wir uns da-

3 Aufbau und Durchführung

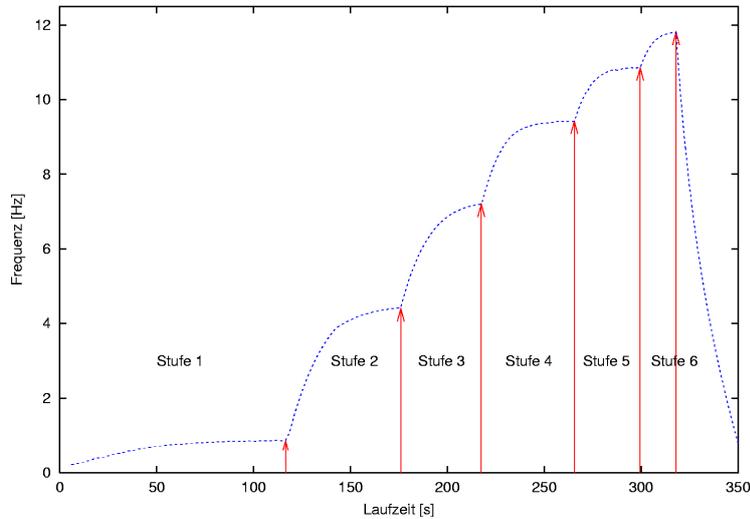


Abbildung 5: Drehfrequenzen bei den verschiedenen Stufen des Netzteils

für, eine Kupferplatine zu verwenden, auf der in der Mitte eine kleine Kreisfläche und um diese herum drei Kreisringe ausgeätzt wurden. So konnten wir die Versorgungsspannung für den Laser, das Modulationssignal, die Erde und das Meßsignal ausführen. Dazu befestigten wir einen Holzblock zwischen zwei Stativstangen so, daß er zentriert über dem Mittelpunkt der Platte hing. Im Holzblock befanden sich vier Kupferrohre, die jeweils bei richtiger Justierung des Holzblocks über den Kupferringen waren. Diese waren von oben mit einer Einstellschraube verschlossen, die den Anpreßdruck der Schleifkohle (mit Feder) im Rohr regelt. An die Kupferrohre löteten wir dann die Zuleitungen (siehe Skizze 6).

Da der Operationsverstärker eine höhere Versorgungsspannung ($> 15\text{V}$) braucht als der Laser (ca 5V), bauten wir noch einen Spannungsregler auf die Platte, um eine konstante Spannungsversorgung für den Laser zu erreichen. Nach etlichen Problemen mit dem Operationsverstärker (OP) entschieden wir uns jedoch, zwei 9V Blockbatterien als Spannungsversorgung für den OP zu benutzen, ließen jedoch den Spannungsregler für den Laser bestehen. Die Photodiode (siehe 2.4) wurde auf einer Platine mit einer x-y Verschiebung zusammen mit dem Operationsverstärker angebracht und im Strahlengang positioniert (siehe Schaltungsskizze 8).

Die Schaltung ist so aufgebaut, daß durch den $1\text{ k}\Omega$ - Widerstand eine Verstärkung von ungefähr Faktor zehn erreicht wird. Die Kondensatoren dienen der Glättung des Signals.

Nun haben wir erstmal das Modulationssignal auf der Platte wieder an das Meßsignal gehängt, um einen Überblick über das Rauschen bei drehender Platte

3 Aufbau und Durchführung

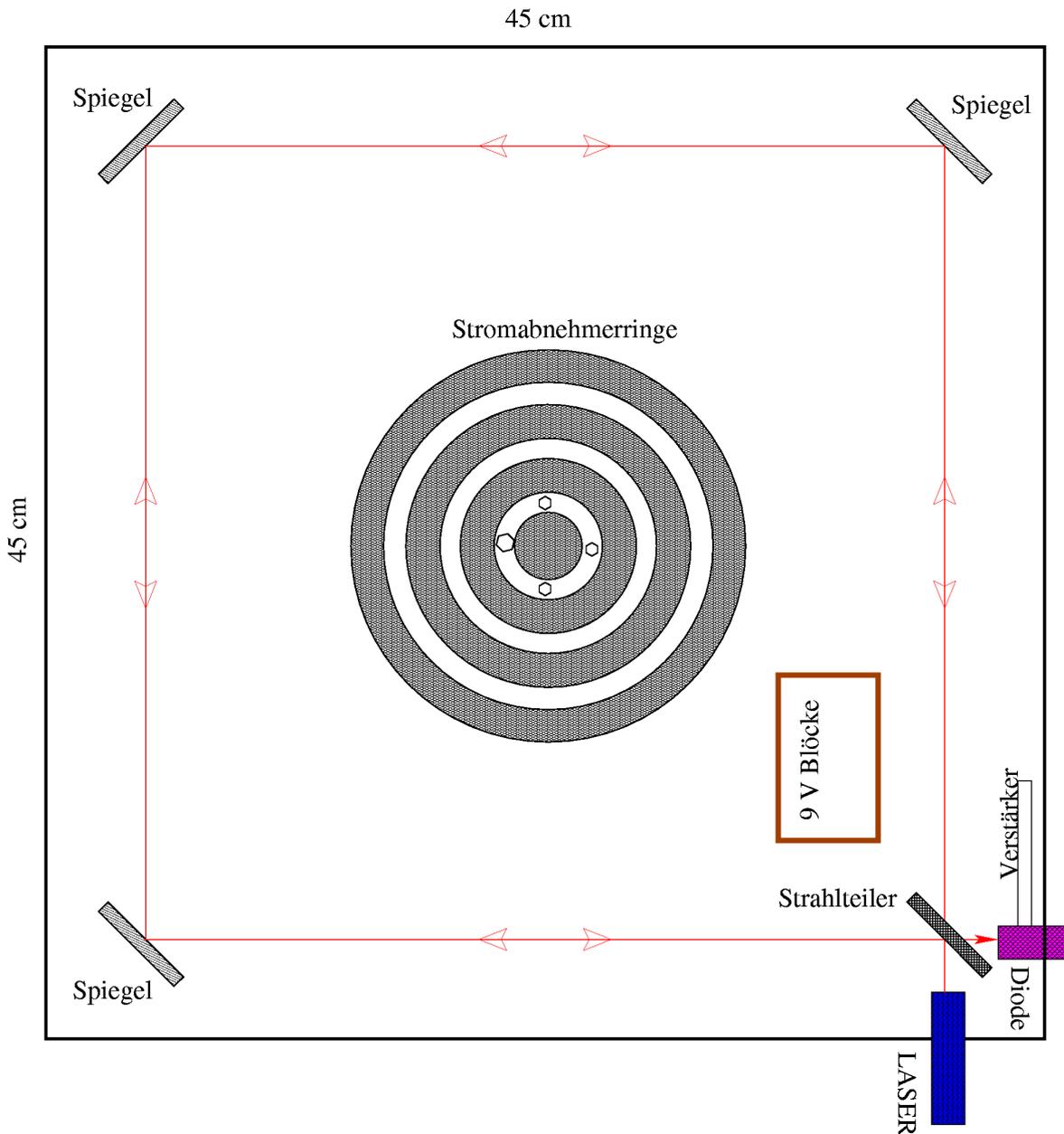


Abbildung 6: Mechanischer Aufbau des Laserkreisels

zu bekommen. Zunächst war das Signal sehr schlecht, doch durch stärkeren Druck der Kohlen auf die Platte konnten wir das Signal verbessern. Außerdem wuchteten wir die Platte nun aus, um eine höhere Umdrehungszahl zu erreichen, da schon ab ca. 200 Umdrehungen pro Minute der ganze Aufbau stark zu vibrieren begann. Nach der Auswuchtung konnten wir erheblich schneller drehen, wobei zu beachten war, daß im mittleren Tourenbereich die Aufhängung der Kohlen eine

3 Aufbau und Durchführung

Resonanzfrequenz zu haben scheint, sodaß man diese festhalten muß. Wir entschärften dieses Problem etwas, indem wir zu einer etwas stabileren Verstrebung der Stativstangen übergingen.

Bei den höheren Geschwindigkeiten schienen sich auch die Kohlen besser einzu-

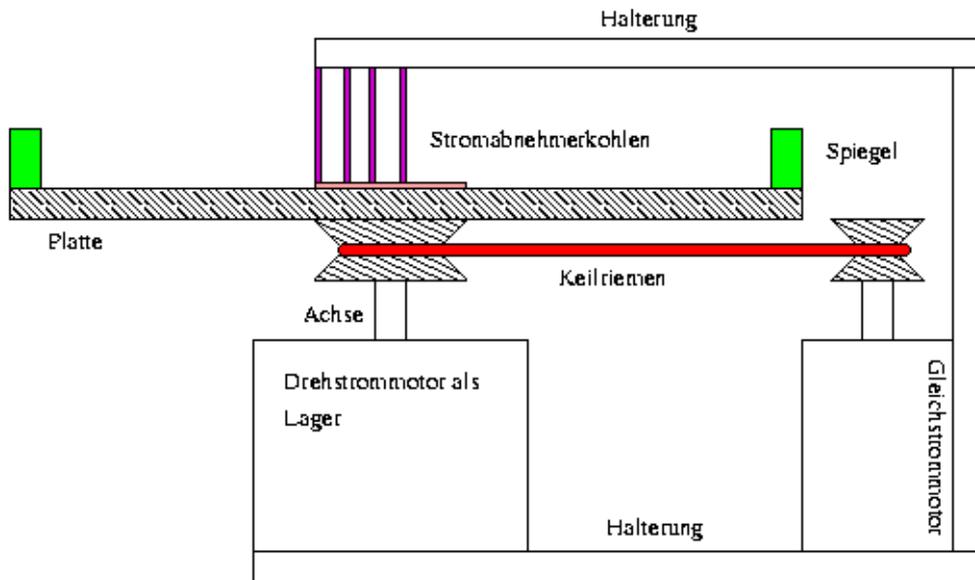


Abbildung 7: Seitenansicht des Laserkreisel

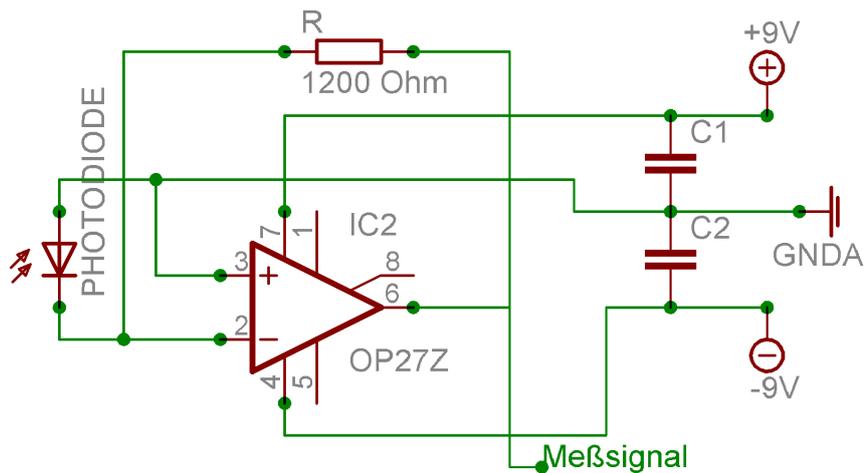


Abbildung 8: Schaltung der Photodiode

3 Aufbau und Durchführung

schleifen, da nach einiger Zeit konstanten Betriebs das Signal weniger Rauschen enthielt, wobei man, wenn man nun die Drehrichtung umpolte, erneut die Kohlen einschleifen lassen mußte. Auffällig war, daß bei höherer Geschwindigkeit die Amplitude des Signals größer wurde, was wohl mit einem geringeren Widerstand der Schleifkohlen zusammenhängt. Leider erreichten wir nicht die gleiche Spannung, sondern blieben bei Linksdrehung ca. 10% unter der bei Rechtsdrehung erreichten Spannung, was man mit einer Vorzugsrichtung der Schleifkontakte erklären kann.

Nun machten wir uns daran, eine Blende vor die Photodiode zu bauen, um nur einen Interferenzstreifen oder eben gerade keinen zu bekommen. Dazu machten wir in einen Karton mit einem Skalpell einen schmalen Schlitz und brachten diesen mit Klebeband vor der Photodiode an. Um nun das Signal zu justieren, konnte man an der Position des Strahlteilers drehen und konnte so auf dem Oszilloskop sehen, ob ein Signal ankam oder nicht.

Nun stellte sich heraus, daß das Signal ab einer bestimmten Umdrehungszahl plötzlich verschwand. Auch die Kontrolle ohne Photodiode, indem man also einfach das Interferenzmuster nach außen durchließ und an der Wand verfolgte, brachte dasselbe Ergebnis. Zunächst verbesserten wir die Befestigung des Lasers, den wir nun in einem Alublock befestigten und so ein Verrutschen ausschließen konnten. Dies führte zu einem besseren Signal, aber dennoch zu keinem Ergebnis. Nun führten wir noch die Versuche bei Nacht durch, um zum einen Störlicht von außen zu minimieren, und zum anderen den Laserstrahl besser verfolgen zu können. Dazu befestigten wir noch anstelle der Platine eine Lochblende mit einem Millimeter Durchmesser. Außerdem legten wir nun den Laser an die Spannungsversorgung der Batterie, so daß wir auf den Stromabnehmer komplett verzichten konnten. Als wir nun wieder die Platte drehten, verschwand zunächst das Signal, kam jedoch bei höherer Drehfrequenz wieder. Wir dachten zunächst, das liege daran, daß die Spiegel sich nach außen biegen würden, waren jedoch überrascht, daß das Signal bei noch höherer Drehfrequenz wieder erschien, dann nochmals verschwand und bei der höchsten Umdrehungszahl wieder, sogar in der gleichen Intensität, wiederkam. Dies schloß die Vermutung mit den nach außen kippenden Spiegeln weitgehend aus, da dann ja das Signal nicht hätte wiederkommen dürfen.

3.3.1 Signalübertragung per Funk

Nun machten wir noch einmal einen radikalen Schnitt und bauten den gesamten Aufbau, bis auf die Spiegel, Strahlteiler und Laser ab und nahmen anstatt der Photodiode eine kleine CCD-Kamera und dazu einen Funksender, der das Videosignal nun per Funk an den Fernseher sandte. Das Ergebnis war aber weitgehend das gleiche und zwar ging das Interferenzmuster bei zunehmender Rotation nach oben weg. Leider konnten wir nicht so schnell drehen, um zu sehen, ob es dann wiederkam.

4 **Fazit**

Abschließend kann man sagen, daß es wohl noch viele Faktoren gibt, die zu verbessern sind und es wohl hauptsächlich am ungenügend stabilen mechanischen Aufbau lag, daß wir nicht zu einer Messung kamen. Außerdem ist die von uns zuerst gewählte Signalübertragung via Schleifkontakte eher ungeeignet.

Literatur

- [1] J. Niebuhr/G. Lindner, Physikalische Meßtechnik mit Sensoren, Oldenburg Verlag, 1994
- [2] G. Heyne, Elektronische Meßtechnik, Oldenburg Verlag
- [3] Pogany, B. : Annalen der Physik 85, 244, 1928, Über die Wiederholung des Harresschen Versuches
- [4] Pogany, B. : Annalen der Physik 80, 217, 1926, Über die Wiederholung des Harres-, Sagnac-schen Versuches
- [5] Knopf O.: Annalen der Physik 62, 389, 1920, Die Versuche von F. Harres über die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern
- [6] M. v. Laue : Annalen der Physik 62, 448, 1920, Zum Versuch von F. Harress
- [7] Bergmann-Schäfer Optik

Autoren

- Markus Beyer, maku@gmx.net
- Moritz Bubek, bubek@gmx.de
- Pascal Frank, pascal.frank@uni-konstanz.de
- Markus Müller, muelli@epost.de
- Tim Thomay, tim@thomay.de
- Daniel Träutlein, daniel.traeutlein@uni-konstanz.de