

Facharbeit

aus dem Fach
Physik

Thema: Das Gyroskop

Verfasser: Konstantin Fichtner

Leistungskurs: Physik

Kursleiter:

Abgabetermin: 8.01.09

Erzielte Punkte: (gewichtet)x3 =

Mündliche Prüfung:

Summe: $\frac{x1}{4} =$
(einfache Wertung)
Summe: $\frac{x1}{2} =$
(doppelte Wertung)

.....
Unterschrift des Kursleiters

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 : Eigenschaften ,welche ein Körper ,bei schneller Rotation bekommt

§ 1. Ein sich schnell drehendes Kreisel und seine Anwendungen.....	S.3
§ 2. Gyroskop in einer Kardanaufhängung; Standfestigkeit der Achse eines ausgeglichenen Gyroskops, ausgelöst durch die schnelle Rotation.....	S.4
§ 3. Auswirkungen einer anliegenden Kraft an ein sich schnell rotierendes Gyroskop	S.5
§ 4. Die Präzession Regel.....	S.7
§ 5. Stabilität eines sich schnell rotierenden, astatischen Gyroskops mit drei Freiheitsgraden; Instabilität eines Gyroskops mit zwei Freiheitsgraden	S.8
§ 6. Nutation der Gyroskop Achse.....	S.8
§ 7. Gyroskop mit drei Freiheitsgraden auf einem rotierenden Untergrund; Experimenteller Beweis der Erdrotation	S.9
§ 8. Gyroskop mit zwei Freiheitsgraden auf einem rotierenden Untergrund ; Regel von Foucault	S.10

Kapitel 2: Einige Anwendungen des Gyroskops

§ 9. Gyroskopisch richtender Apparat des Torpedo Obry	S.11
§ 10. Gyroskopischer Zeiger der Längsneigungen und Kursabweichungen; Gyro-Horizont der Firma Sperry	S.11
§ 11. Stabilität des Fluges eines rotierenden Geschosses	S.13

Kapitel 3 : Gyroskopischer Halbkompass und gyroskopischer Kompass

§ 12. Gyroskopischer Halbkompass.....	S.14
§ 13. Einige Details der Konstruktion des Halbkompasses	S.14
§ 14. Anfangsgedanke des Physikers Foucaults	S.16
§ 15. Gyro-Kompass der Firma Sperry mit einem Pendel.....	S.17
§ 16. Gyro-Kompass der Firma Sperry mit Quecksilbergefäßen.....	S.17

Kapitel 4 : Heutige und zukünftige Verwendung des gyroskopischen Prinzips

§ 17. Verschiedene gyroskopische-Geräte in der heutigen Zeit	S.18
--	------

Kapitel 5: Überprüfung der Theorie aus dem Kapitel 1 durch ein eigengebautes Gyroskop

§ 18. Darstellung der Präzession mit einem selbst gebauten Gyroskop und Auswertung der theoretischen Präzessionsregel.....	S.19
§ 19. Darstellung der Stabilität eines Gyroskops mit drei Freiheitsgraden und der Instabilität eines Gyroskops mit zwei Freiheitsgraden	S.21
§ 20. Darstellung der Nutation.....	S.21
§ 21. Darstellung des Verhaltens des Gyroskops auf einem drehenden Untergrund (drei und zwei Freiheitsgrade)	S.21

Anhang:

Auswertungsbilder zu §.18.....	S.22
Maße des gebauten Gyroskops.....	S.22
Literaturverzeichnis.....	S.23
Bilderherkunft	S.24
Selbständigkeitserklärung	S.25
CD „Gyroskop“	

1. Eigenschaften ,welche ein Körper ,bei schneller Rotation bekommt

§ 1. Ein sich schnell drehendes Kreisel und seine Anwendungen

Wen hat es in der Jugend nicht fasziniert mit dem Kreisel zu spielen? Solange man ihm keine schnelle Rotation verpasst hatte, lag er unbewegt, „wie tot“ da, doch versetzte man ihn in eine schnelle Drehbewegung, schien es, als ob er lebendig wurde und außergewöhnliche Eigenschaften bekam. Man sah ihn auf der Spitze seiner Achse balancieren und versuchen, sich, wie von Geisterhand, im Gleichgewicht zu halten (Abb.1).

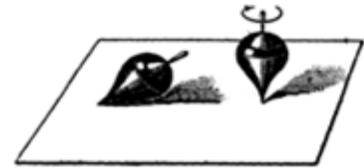


Abb.1

Diese Stabilität, welche der Kreisel, mit einer schnellen Rotation, aufwies, hatte schon damals die Aufmerksamkeit der Wissenschaftler auf sich gezogen. Schon vor 250 Jahren wurde in der Englischen Flotte der Versuch gemacht, diese Eigenschaft, eines sich schnell rotierenden Kreisels auszunutzen, um einen stabilen „künstlichen Horizont“ zu schaffen, welcher den gebrauchten Horizont für die astronomischen Beobachtungen, bei Nebel ersetzen konnte. Nach dem Tod der Fregatte, „Victory“ auf welcher die Erprobung eines solchen Geräts stattfand, starb auch der Erfinder des „künstlichen Horizontes“ Serson, was zu erst einmal die Forschung auf diesem Gebiet anhielt. In den folgenden 100 Jahren wurden die Versuche der praktischen Anwendung, eines sich schnell drehenden Kreisels nicht erneuert. Erst die bekannten Versuche des französischen Physikers Leon Foucault im Jahre 1852 machten den neuen Schritt in diesem Gebiet. Zwischen vielen anderen Experimenten, demonstrierte, das von ihm gebaute „Gyroskop“, dessen Hauptteil, ein schnell drehender Rotor war, zum ersten Mal die tägliche Rotation der Erde in einem Laborversuch.

Seitdem hat sich der Begriff „Gyroskop“ (in wörtlicher Übersetzung – „Gerät, welches Rotation erkennt“) in der Wissenschaft erhalten. In der heutigen Zeit wird dieser Begriff weitläufiger gefasst und jedes Gerät so benannt, in welchen die Eigenschaften eines, sich schnell drehenden Körpers verwendet werden. Diese Eigenschaften nennt man auch gyroskopische Eigenschaften.

Ebenfalls im Jahr 1852 zeigte Foucault die Möglichkeit (damals nur in theoretischer Form) ein Instrument zu bauen, welches in der Lage wäre, sich nach einem Meridian auszurichten und so als ein Ersatz für einen Magnetkompass zu wirken. Diese Idee wurde zu einem aktuellen Problem mit dem Erscheinen von sehr großen Metallmassen und immer mehr werdenden Elektrotechnik auf den neuen Kriegsschiffen, welche die Arbeit eines Magnetkompasses erheblich erschwerten. Doch erst am Anfang des 20. Jahrhunderts gelang, mit dem massiven Aufschwung der Technik in diesen Jahren, die Entwicklung und der Bau von hochpräzisen Gyro-Kompassen, welche rasch ein sehr großes Ansehen bei den Weltkriegsflotten fanden. Auch im Flugwesen bekam das Gyroskop eine weite Verwendung. Der sichere Blindflug bei Bedingungen, bei denen man keine äußeren Orientierungspunkte wahrnehmen kann und langwierige, mehrstündige Flüge wurden dank vielzähliger gyroskopischer Instrumente im „modernen“ Flugzeug, möglich.

In den folgenden Kapiteln werden die Wirkungsweise und einige Anwendungen in der Technik dargestellt und erklärt.

Doch zuerst kommen wir zum Zustandekommen der Eigenschaften, die man bei schneller Rotation sehen kann und welche man allgemein unter den gyroskopischen Eigenschaften zusammenfasst.

§ 2. Gyroskop in einer Kardanaufhängung; Standfestigkeit der Achse eines ausgeglichenen Gyroskops, ausgelöst durch eine schnelle Rotation

Beginnend, ein paar Worte zur einfachsten Ausführung eines Gyroskops – dem Gyroskop in einer Kardanaufhängung, welches einen wesentlichen Bestandteil vieler gyroskopischer Geräte ist (Abb.2):

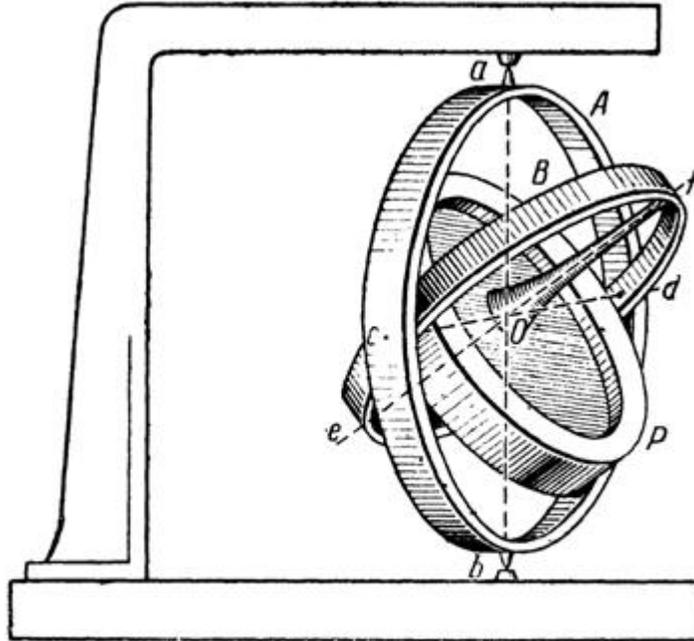


Abb. 2

Der Rotor P ist in zwei Ringen A und B aufgehängt, welche die Kardanaufhängung darstellen (Abb.2). Der äußere Ring A kann sich frei um die vertikale Achse ab drehen, welche fest mit der Basis verankert ist. Um die Achse cd , welche horizontal gerichtet ist, rotiert der innere Ring B , welcher die Achse ef des Rotors trägt. Diese Achse ef ist senkrecht zur Achse cd , deswegen haben wir hier drei Rotationsachsen, welche sich im Punkt O treffen. Die Rotation des Rotors wird Eigenrotation genannt, im Gegensatz zur Rotation der beiden Ringe. Folgendermaßen heißt die Achse ef „Achse der Eigenrotation“, „Achse des Gyroskops“ oder einfach Figurenachse. Die Achsen ab und cd heißen Kardanachsen.

Treffen sich die beweglichen Einzelteile – Rotor und die beiden Ringe –, im Kreuzungspunkt O treffen, dann ist das Gerät ausgeglichen, also haben wir hier ein *ausgeglichenes* Gyroskop. Solch ein Gyroskop behält das Gleichgewicht in jeder Position des Rotors, deswegen heißt es ausgeglichen oder astatisch. Weiterhin kann man festhalten, dass das Gleichgewicht des Gyroskops gleichgültig oder indifferent ist d.h. wenn man durch einen kleinen Schlag auf einen der beiden Ringe, die Position des Rotors verändert, bleibt er immer noch im Gleichgewicht¹. Logischerweise ist festzustellen, dass das Gyroskop keine Standfestigkeit hat, solange der Rotor sich nicht dreht. Doch die Sache ändert sich, wenn man den Rotor in schnelle Rotation versetzt. Schlägt man jetzt kurz auf einen der beiden Ringe, so erfährt dieser keine sichtliche Veränderung, sondern man erkennt nur ein kleines und sehr schnelles Zittern² der Rotorachse, welches nach einer sehr kurzen Zeit erlischt. Es scheint, dass das ganze Gerät durch die Rotation des Rotors eine starke Stabilität gewonnen hat, welche um so stärker wird je schneller sich der Rotor dreht.

-
1. In diesem Fall erfährt der Rotor noch keine Rotation. Das Stehenbleiben in einer neuen Position wird durch die Reibungskräfte und den Luftwiderstand hervorgerufen
 2. Dieses Zittern wird Nutation genannt, zur Erklärung komme ich im Paragraph 6

Aber man muss beachten, dass es eine Position gibt bei welcher diese Stabilität verschwindet, egal wie schnell sich der Rotor dreht. Das passiert dann, wenn die Achse des Rotor ef mit der Achse des äußeren Rings ab zusammenfällt (Abb.2).

§ 3. Auswirkungen einer, an ein schnell rotierendes Gyroskop, anliegenden Kraft

Wie wir schon aus den vergangenen Jahren Physikunterricht wissen, haben Körper, die sich schnell bewegen eine sog. Trägheit, welche man zum Beispiel als ein Fahrradfahrer oder Autofahrer in jeder Kurve wahrnimmt. Das heißt, wenn auf einen Körper, der sich schnell bewegt, für einen kleinen Augenblick eine Kraft z.B. seitlich und senkrecht einwirkt, ändert dieser nicht vollständig die Richtung, sondern wird nur minimal von seiner Bewegungsrichtung abgelenkt.

Betrachtet man das zweite newtonische Gesetz :

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{\vec{v}}{t} \quad (1) \text{ (Physik-Formelsammlung 3.2; S.12)}$$

sieht man, dass je schneller sich ein Körper bewegt oder/und je kleiner der Zeitabschnitt t ist, desto mehr Kraft braucht man, um die Bewegung abzulenken. Nun fragen wir uns welche Auswirkungen eine kurz anliegende Kraft hat, wenn sie an der Achse des Gyroskops angreift oder besser gesagt, welche Kräfte sind erforderlich um die Achse des Gyroskops von ihrer Anfangslage in eine andere Position zu ändern? Die Antwort auf diese Frage ist der wichtigste Punkt bei den späteren Erklärungen der gyroskopischen Eigenschaften.

Nehmen wir an, dass wir folgende Situation haben:

Dem Rotor $ABCD$ wurde eine schnelle Rotation um die Achse KL verschafft, welche hier im Beispiel horizontal liegt (Abb. 3; Die Kardanringe werden in den folgenden Skizzen nicht eingezeichnet um das Verstehen zu erleichtern). Die Rotation erfolgt in die Uhrzeigerichtung, wie es mit dem gekrümmten Pfeil dargestellt ist. Man erkennt auch, dass die Punkte $ABCD$, welche die Ecken des horizontalen und vertikalen Durchmessers darstellen, die selbe Geschwindigkeit \vec{v} haben.

Im nächsten Schritt wird die Richtung der Achse KL in der horizontalen Ebene um den Winkel α gedreht (Abb. 4). Hier wird die neue Lage der Achse durch K_1L_1 bezeichnet. Hierbei dreht sich auch die Rotorebene um die Gerade ZZ um den Winkel α und ist nun in der Stellung A_1BC_1D . Die Drehung wird hier in einem sehr kurzem Zeitraum t ausgeführt. Um jetzt herauszufinden welche Kräfte dazu nötig waren die ganze Konstruktion um den Winkel α zu drehen, schauen wir uns die Geschwindigkeitsänderungen in den Punkten $ABCD$ an.

Leicht zu sehen ist, dass die Geschwindigkeit und die Richtung in den Punkten A_1 und C_1 sich nicht geändert hat. Anders ist es mit den Punkten B und D , welche zwar die Geschwindigkeit beibehalten haben, aber die Richtung der Geschwindigkeitsvektoren sich geändert haben. Nehmen wir den Punkt B mit der Anfangsgeschwindigkeit \vec{v} tangential zur Ebene $ABCD$. Nach der Drehung hat dieser Punkt zwar die Geschwindigkeit $\vec{v}_1 = \vec{v}$, welche aber nun tangential zu der Ebene A_1BC_1D gerichtet ist.

In der Abb. 5 sieht man die beiden Geschwindigkeiten \vec{v} und \vec{v}_1 auf die Ebene AA_1CC_1 und senkrecht der Geraden ZZ abgebildet. Zeichnet man nun das Geschwindigkeitsparallelogramm ein, erkennt man gleich, dass der Übergang, der Geschwindigkeit \vec{v} in die Geschwindigkeit \vec{v}_1 , identisch mit dem Erscheinen einer neuen Geschwindigkeit \vec{u}_1 ist, welche

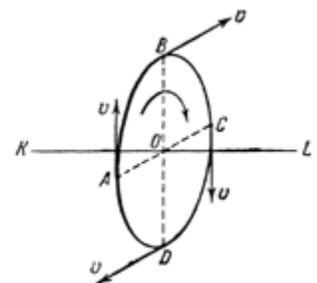


Abb. 3

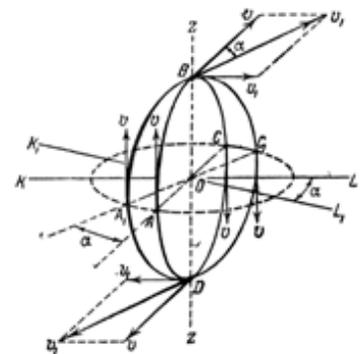


Abb. 4

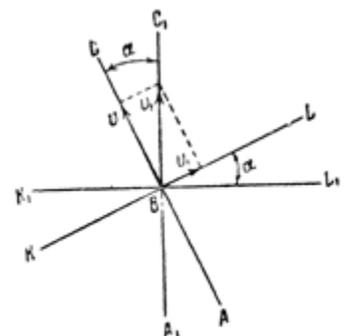


Abb. 5

zusammengenommen mit \vec{v} , die neue Geschwindigkeit \vec{v}_1 , im Punkt B ergibt. Da wir α sehr klein angenommen haben, weil der Zeitraum der Kraftereinwirkung auch sehr klein gewählt wurde, kann man sagen, dass die ergänzende Geschwindigkeit $\vec{u}_1 = \vec{v}\alpha$ ist. Die Richtung von \vec{u}_1 ist senkrecht zur Ebene $ABCD$, daher auch parallel zu KL . Das gleiche passiert auch im Punkt D nur entgegengesetzt. Doch das ist nicht alles, bleiben wir beim Punkt B , welcher auch an der Rotation um KL , während der Zeit t , beteiligt ist. Dieser durchläuft den Weg $BB_1 = \vec{v}t$ auf dem Umkreis $ABCD$ und hat am Ende der Zeit t nicht mehr die Position auf der Geraden ZZ , sondern auf der Entfernung BB_1 (Abb. 6) und bekommt somit eine neue Geschwindigkeit \vec{u}_2 , welche durch die Rotation der Ebene $ABCD$ um die Gerade ZZ hervorgerufen wird und wiederum parallel zu KL gerichtet ist. Hierbei ist \vec{u}_2 das Produkt aus der Entfernung des Punktes B_1 von der Geraden ZZ und der Winkelgeschwindigkeit ω_1 der Rotorebene um die Gerade ZZ .

Da $\omega_1 = \frac{\alpha}{t}$ (Physik-Formelsammlung 7.4.3; S.18) ist, folgt

$$\vec{u}_2 = BB_1 \omega_1 = \vec{v}t \frac{\alpha}{t} = \vec{v}\alpha.$$

Man kann also festhalten, dass eine Drehung der Rotors um einen Winkel α immer von einer Geschwindigkeit \vec{u} begleitet wird, welche sich aus \vec{u}_1 und \vec{u}_2 zusammenschließt und parallel der Achse KL gerichtet ist.

$$\vec{u} = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 = \vec{v}\alpha + \vec{v}\alpha = 2\vec{v}\alpha$$

Genau dieselbe Geschwindigkeit \vec{u} entsteht auch im Punkt D , nur entgegen gesetzt. Eigentlich muss man sagen, dass auf dem ganzen Halbkreis ABC Geschwindigkeiten entstehen, die parallel der Achse KL gerichtet sind aber jede von ihnen kleiner ist als \vec{u} (Abb. 7). Auf dem Halbkreis ADC entstehen dieselben nur in die andere Richtung. Widmen wir uns jetzt der Kraft, die bei einer Rotation um ZZ wirkt. Es wird angenommen, dass das ganze Gewicht des Rotors auf dem Umkreis $ABCD$ liegt. Nun zerlegt man die Masse in lauter kleine Teilchen m und wendet Newtons zweite Formel (1) an. Da jedes Teilchen eine Geschwindigkeitsänderung erfährt und zwar $\vec{u} = 2\vec{v}\alpha$ parallel der Achse KL , so muss auf das Teilchen (im Punkt B) eine Kraft F wirken, welche folgend ausgedrückt werden kann:

$$\vec{F} = m \frac{\vec{u}}{t} = 2m\vec{v} \frac{\alpha}{t}$$

Im Punkt D ist diese entgegen gesetzt. Auf jedes andere Teilchen im Halbkreis ABC wirkt eine kleinere Kraft als F (Abb. 8). In den Punkten A und C sind die Kräfte gleich Null. Die ganzen Kräfte auf beiden Halbkreis werden in den beiden Kräften R zusammengefasst, die in den Punkten E und entgegen gerichtet im Punkt G angreifen. Solche entgegen gerichteten, parallele Kräfte, die nicht im Massenmittelpunkt angreifen, heißen Kräftepaar. Der Abstand EG ist der Hebel des Kräftepaars und das Produkt $EG \cdot R$ ist dann das Drehmoment dazu. Zur Vereinfachung nennen wir $EG = d$ und das Drehmoment M .

$$M = Rd$$

(Physik-Formelsammlung 1.5; S.9)

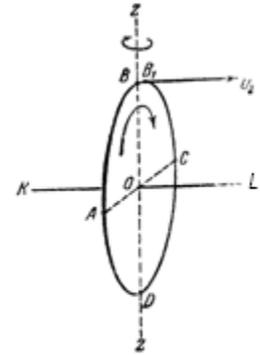


Abb. 6

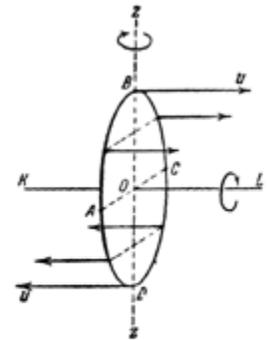


Abb. 7

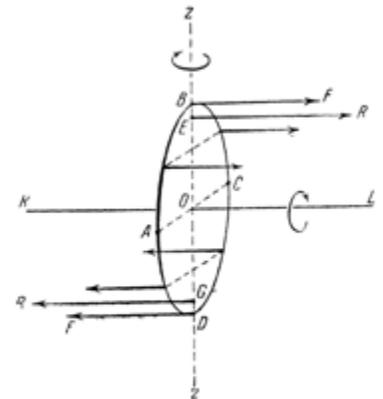


Abb. 8

1. Bei einem kleinen α , kann man die gegenüberliegende Seite des Parallelogramms \vec{u}_1 mit dem Bogen auf dem Umkreis mit dem Radius \vec{v} gleichsetzen, welcher dem Mittelpunktswinkel α entspricht. So ist der Bogen das Produkt vom Radius und dem Mittelpunktswinkel. Folglich: $\vec{u}_1 = \vec{v}\alpha$

Benennt man nun die Winkelgeschwindigkeit der Eigenrotation mit ω erhält man die zweite Formel für das Drehmoment:

$$\dot{L} = M = J\omega \frac{\alpha}{t}$$

(Physik, Mechanik Additum „Drehbewegung des starren Körpers“ Oldenburg : G1,G2,G4; S.15,S.26,S.30)

oder
$$M = J\omega\omega_1 \quad (2)$$

wenn man die Winkelgeschwindigkeit um die Achse ZZ als $\omega_1 = \frac{\alpha}{t}$ annimmt. Dieses Drehmoment M heißt auch gyroskopisches Drehmoment. Hierbei ist $J = mr^2$ (genauer $J = \frac{1}{2}mr^2$) der Faktor, welcher durch die Masse, Form und Größen des Rotors bestimmt wird. Die Kräfte R , die in den Punkten E und G angreifen, kann man auch ohne was am Effekt des Kräftepaars zu ändern, in beliebigen Punkten E_1 und G_1 (Abb. 9) auf der Achse KL angreifen lassen. Beliebig wird auch die Größe von R_1 und der Abstand $E_1G_1 = d_1$ gewählt, man muss nur darauf achten, dass die Bedingung $R_1d_1 = M = J\omega\omega_1$ erfüllt wird. Durch die vorhergehenden Überlegungen folgt, dass man für eine Drehung des Rotors in der horizontalen Ebene um einen Winkel α ein **vertikales Kräftepaar**, mit dem Drehmoment $M = J\omega \frac{\alpha}{t}$ braucht, welches an der Achse des Rotors (hier KL) angreifen muss.

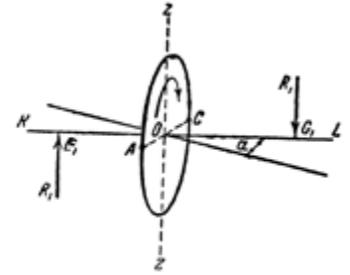


Abb. 9

§ 4. Die Präzession Regel

Nehmen wir aus dem vorherigen Paragraph die Formel $M = J\omega \frac{\alpha}{t}$ her, mit dieser Formel lässt sich jetzt leicht α bestimmen, wenn man die anderen Größen hat und die Krafteinwirkung nicht dauerhaft erfolgt. Durch Umformung ergibt sich:

$$\alpha = \frac{Mt}{J\omega} \quad (3)$$

Angenommen wir nehmen nicht ein Kräftepaar, sondern nur eine Kraft S , welche einen kleinen Zeitabschnitt t senkrecht und vertikal auf die Achse KL im Punkt A wirkt (Abb. 10). Folgendes passiert: Da der Punkt O der Schnittpunkt der Kardanachsen ist, ist dieser fest und die wirkende Kraft S bekommt so im Punkt O eine Gegenkraft S_1 die nach oben gerichtet ist. Auf diese Weise wirken S und S_1 als ein Kräftepaar mit dem Hebelarm $AO = a$ und ihr Drehmoment ist $M = Sa$. Es ist schon bekannt, was dieses Kräftepaar bewirkt, es dreht nämlich die Achse des Rotors KL in dem Zeitraum t um den Winkel α in der horizontalen Ebene. Dieses „Ausweichen“ der Achse nennt man **Präzession**. Wenn man sich die Richtung ansieht, in welche die Achse präzessiert, stellt man fest, dass sie sich um $\varepsilon = 90^\circ$ zur Einwirkungskraft S und senkrecht zur Achse KL in Rotationrichtung des Rotors dreht. Den Winkel α , um welchen sich die Achse wegdreht bekommt man durch folgende Formel:

$$\alpha = \frac{Sat}{J\omega}$$

Würde die angenommene Kraft S nicht senkrecht auf die Achse wirken, sondern schräg dazu, so müsste man sie nur mit einem Kräfteparallelogramm zerlegen und die vertikale Komponente nehmen, da sich die horizontale Komponente mit der Festigkeit des Punktes O kompensiert. Wirkt aber die Kraft nicht nur einen kleinen Zeitpunkt t , sondern hängt man an die Achse AB z.B. ein kleines Gewicht dran (Abb. 11), sodass die Kraft P im Punkt A permanent

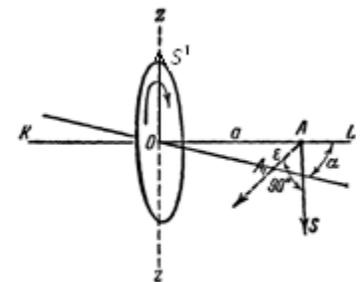


Abb. 10

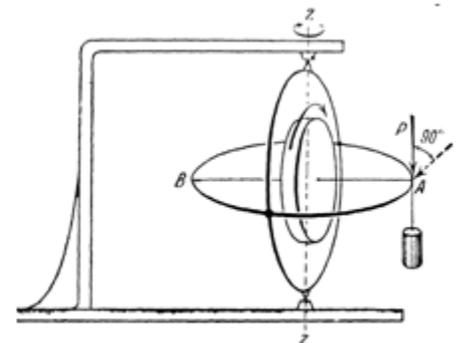


Abb. 11

einwirkt, dann fängt, nach der Regel der Präzession die Rotorachse gegen den Uhrzeigersinn, an zu präzessieren. Um diese Präzessionsgeschwindigkeit auszurechnen, formt man Formel (3) nach ω_1 um.

$$\alpha = \frac{Mt}{J\omega} ; \quad \omega_1 = \frac{\alpha}{t} = \frac{M}{J\omega} \quad (4)$$

Aus der Formel (4) sieht man, dass die Präzessionsgeschwindigkeit ω_1 von der Rotorgeschwindigkeit ω abhängt, so sieht man auch im realen Versuch, dass mit der Zeit die Präzession immer schneller wird, da durch Reibung der Rotor langsamer wird und so der Nenner kleiner wird.

§ 5. Stabilität eines sich schnell rotierenden, astatischen Gyroskops mit drei Freiheitsgraden; Instabilität eines Gyroskops mit zwei Freiheitsgraden

Um die Stabilität zu erklären, wurden im vorherigen Paragraph schon die Grundlagen geschaffen. Als wichtigstes Ergebnis nimmt man hier die Formel (3) $\alpha = \frac{Mt}{J\omega}$ her.

Aus dieser Formel sieht man, dass je schneller die Drehung des Rotors und je kürzer der Zeitraum t ist, desto kleiner ist der Winkel α um welchen sich die Achse KL in der horizontalen Ebene dreht. Dieser Winkel erweist sich als sehr wichtig für den Experimentator, da solange α sehr klein bleibt, der Experimentator keine Veränderung an der Richtung der Gyroskop Achse wahrnimmt. Folglich scheint die Konstruktion bei schneller Rotation des Rotors eine gewisse Stabilität zu haben. Anders ist es, wenn das Gyroskop einen Freiheitsgrad verliert, indem man zum Beispiel einen der Ring festhält. In der Abb. 12 wird der äußere Ring in den Punkten C und D festgehalten und dem Gyroskop ein kleiner Schlag senkrecht und vertikal auf den inneren Ring im Punkt A verpasst. Die Reaktion auf den Schlag, wäre bei einem Gyroskop mit drei Freiheitsgraden klar, die Achse AB würde anfangen im Uhrzeigersinn (wenn man von oben schaut) zu präzessieren und somit auch der äußere Ring. Da dieser aber festgehalten wird und Actio gegengleich Reactio ist, fängt in den Punkten C und D entgegen gerichtet die Kraft F in der horizontalen Ebene an zu wirken, welche gleich in dem Punkt A , durch die Regel der Präzession nach unten und im Punkt B nach oben wirkt d.h. dass nach dem Stoß S die Rotorachse nicht stabil seine Lage beibehält, sondern anfängt sich langsam um die Achse CD in Schlagrichtung zu drehen. Dieser Effekt hängt nicht von der Winkelgeschwindigkeit des Rotors ab, deswegen ist es egal wie schnell sich dieser dreht. Dieses langsame Rotieren um die Achse CD kommt nach einiger Zeit, wegen Reibungskräften an den Verbindungspunkten C und D , wieder zum Stillstand.

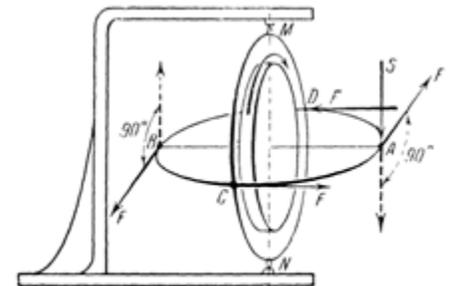


Abb. 12

§ 6. Nutation der Gyroskop Achse

In den Überlegungen, die wir in den Paragraphen 3 bis 5 gemacht haben, haben wir die Nutation, die eigentlich beim Gyroskop nebensächlich ist, unbeachtet gelassen. Nun will ich die Nutation am Beispiel eines kräftefreien Kreisels kurz darstellen. „Wird der Kreisel - z.B. durch einen kurzen seitlichen Schlag – in dieser Bewegungsform gestört oder rotiert er von vornherein nicht um die Figurenachse, so tritt die sog. Nutationsbewegung auf.“ (<http://gpr.physik.hu-berlin.de/Skripten/Mechanik%20und%20Thermodynamik/PDF-Dateien/M10.pdf>). Auf diese Weise sind der Trägheitsvektor \vec{L} und die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ nicht mehr parallel zu einander, da

$$\vec{L} = J_x \vec{\omega}_x + J_y \vec{\omega}_y + J_z \vec{\omega}_z \quad (5)$$

(Physik, Mechanik Additum „Drehbewegung des starren Körpers“ Oldenburg :G3,S.29)

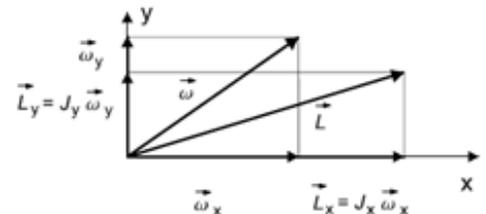


Abb. 13

In Abb. 13 ist der Zeitpunkt der Rotation so gewählt, dass $\vec{\omega}_z = 0$ ist.

In diesem Fall ist $\vec{\omega}$ nicht mehr raumfest und heißt deswegen *momentane Drehachse* (d.h. ist zu jedem Zeitpunkt an einer anderen Stelle).

Nach dem kurzen Schlag ist auch die

Figurenachse AO (Abb. 15) weder zu \vec{L} noch zu $\vec{\omega}$ parallel. Beobachtet man die Bewegung, sieht man, dass sich die momentane Drehachse und die Figurenachse um die Drehimpulsachse EO , die nach dem Drehimpulssatz beim kräftefreien Kreisel ihre Richtung im Raum beibehält, (Abb. 15) symmetrisch mit der

Nutationsgeschwindigkeit $\vec{\omega}_N$ drehen (Abb. 14). In der Abb. 15 sieht man deutlich, wie eine Nutation einer Kreiselachse aussieht, welche wegen Kräften, wie z.B. der Reibung oder dem

Luftwiderstand immer kleiner wird und nach einer bestimmten Zeit ganz erlischt.

Um die Nutationswinkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_N$ auszurechnen muss man folgende Überlegungen machen.

Wenn $J_y = J_z = J_s$ (bei verlängertem Kreisel (Abb.15) ist $J_x < J_y = J_z$) und $\vec{\omega} = \vec{\omega}_x + \vec{\omega}_y + \vec{\omega}_z$ und man die Formel (5) nach $\vec{\omega}$ auflöst, kommt folgendes raus: $\vec{\omega} = \frac{\vec{L}}{J_s} + \left(1 - \frac{J_x}{J_s}\right) \cdot \vec{\omega}_x$

Dieser Ausdruck ist eine „Komponentenzerlegung von $\vec{\omega}$ in Richtung \vec{L} und in x-Richtung dar. Die erste

Komponente ist die Nutationswinkelgeschwindigkeit: $\vec{\omega}_N = \frac{\vec{L}}{J_s}$ “ (6) (M10-Das Gyroskop;

<http://gpr.physik.hu-berlin.de/Skripten/Mechanik%20und%20Thermodynamik/PDF-Dateien/M10.pdf>).

Kommen wir wieder auf das Gyroskop in einer Kardanaufhängung zurück, dort findet diese Nutationsbewegung der Achse AB (Abb. 12) auch statt, nur wird sie für nebensächlich gehalten, da erstens, die Reibungskräfte zu groß sind, welche die Nutation in sehr kurzer Zeit auslöschen und zweitens ist die Rotationsgeschwindigkeit des Rotors viel zu groß, um eine Nutation zu sehen oder ihre Geschwindigkeit auszurechnen. Deswegen wird sie in den nächsten Paragraphen unbeachtet gelassen.

§ 7. Gyroskop mit drei Freiheitsgraden auf einem rotierenden Untergrund; Foucaults experimenteller Beweis der Erdrotation

Um das Verhalten zu beobachten, stellt man das Gyroskop (dem Rotor wurde vorher die nötige Umdrehungszahl verpasst) auf eine Platte L und versetzt diese in Rotation um die Achse MN in die abgebildete Richtung (Abb. 16). Der Experimentator beobachtet sofort, dass das Rotieren der Platte L überhaupt nicht auf die Achse AB wirkt und diese sich unbewegt im Raum aufhält. Das heißt, dass die Achse eines schnell rotierenden Gyroskops mit drei Freiheitsgraden, welches auf einem rotierenden Untergrund steht, immer konstant die Richtung beibehält. Dieser Tatsache zufolge, konnte, der schon oben erwähnte, Physiker Leon Foucault die Rotation der Erde im Labor mit seinem hoch präzisen Gyroskop (Abb. 17) nachweisen, da die Erde, mit ihrer Eigenrotation auch sozusagen eine rotierende Platte darstellt.

Er stellte die Achse des Gyroskops AB (Abb. 16) so ein, damit sie auf einen unbewegten Stern (z.B. am Morgen auf die Sonne) im Osten zeigte. Nach

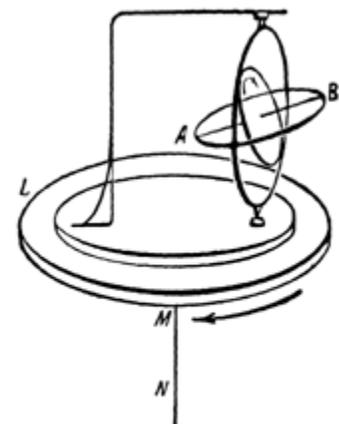
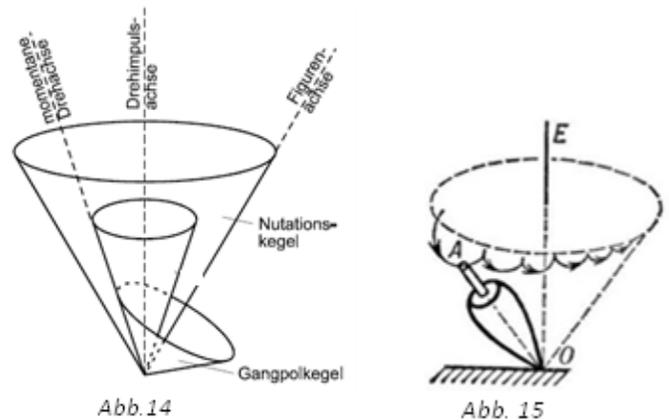


Abb. 16

längerem arbeiten des Gyroskops, hat man schließlich eine leichte Drehung dieser Achse gesehen. Das geschah, weil die Achse stabil im Raum blieb und so immer auf denselben Stern zeigte, welcher von Ost nach West im Laufe des Tages wanderte. Um die Reibung minimal bei seinem Gyroskop zu halten, hatte Foucault den äußeren Ring an einem dünnen, drallfreien Faden aufgehängt und an der Unterseite mit einem Stützapfenlager gelagert. Der innere Ring wurde durch eine Art Messerspitzen gehalten, welche fast keinen Widerstand dem Rotieren des inneren Rings entgegen hielten. Mit diesem beinahe idealen Gyroskop konnte er tatsächlich die Erdrotation experimentell nachweisen und demonstrieren.

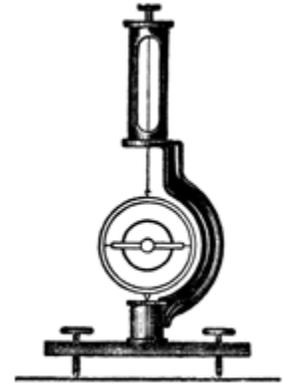


Abb. 17

§ 8. Gyroskop mit zwei Freiheitsgraden auf einem rotierenden Untergrund ; Regel von Foucault

In diesem Paragraph wird nun ein Gyroskop mit zwei Freiheitsgraden verwendet und auf die Platte L gestellt. Dieses besteht aus einem inneren Ring S , welcher an dem äußeren, stabilisierten Ring in den Punkten C und D befestigt wird und einem Rotor, der in Pfeilrichtung rotiert (Abb. 18). Man stellt fest, dass der Rotor gleich versucht seine Position zu ändern und sich seiner Achse AB parallel zu der Achse MN auszurichten (Abb. 19). Die Richtung in welcher er sich um die Punkte CD dreht, hängt von der Rotationsrichtung der Platte L ab. Würde man die Platte gegen den Uhrzeigersinn (von oben betrachtet) rotieren lassen, so würde sich die Achse AB um 180° drehen und wieder parallel der Achse MN ausrichten, jetzt aber mit dem Punkt A nach oben da die Rotationsrichtung ebenfalls zusammenfallen muss. Dieses Phänomen heißt **gleichnamiger Parallelismus**. Dieses sagt auch die Regel von Foucault aus: Die Achse eines Gyroskops mit zwei Freiheitsgraden auf einem rotierendem Untergrund strebt immer den gleichnamigen Parallelismus mit der Achse des rotierenden Untergrundes an.

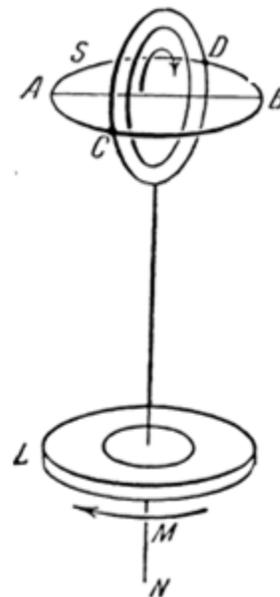


Abb. 18

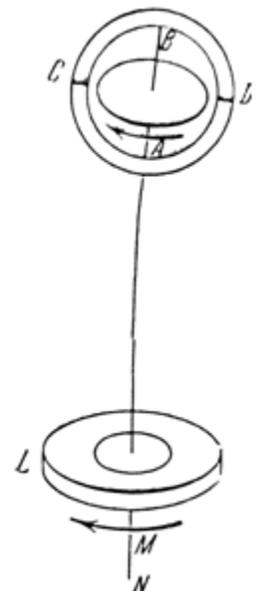


Abb. 19

2. Einige Anwendungen des Gyroskops

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Geräte erklärt und beschrieben, in welchen ein Gyroskop verwendet wird. Doch man muss primär dazu sagen, dass diese Geräte eher dem letzten Jahrhundert angehören und in unsere Zeit fast ganz durch GPS und Elektrotechnische Geräte abgelöst wurden.

§ 9. Gyroskopisch richtender Apparat des Torpedo Obry

Eine verbreitete Anwendung in der Technik, fand das Gyroskop im vorletzten und letzten Jahrhundert. Einer der wichtigsten und sehr erfolgreichen Schritte war die Erfindung, eines gyroskopisch selbstlenkenden Torpedos des österreichischen Ingenieurs Ludwig Obry im Jahr 1898. Dieser Torpedo hat eine zigarrenähnliche Form und wird mit zwei Schrauben angetrieben, welche sich im Endteil befinden. Im vorderen Teil des Torpedos ist die Sprengkapsel eingebaut und im Rumpf befindet sich ein pneumatischer Motor, welcher die Schrauben antreibt. Dort befindet sich ebenso eine Luftkammer mit zusammengesprester Luft, durch welche der Motor betrieben wird. Um den Torpedo auf richtiger Tiefe und Richtung zu halten, sind zwei Steuergeräte nötig: Das Steuergerät für die Tiefe (in der horizontalen Ebene) und das Steuergerät für die Richtung (in der vertikalen Ebene). Beide Steuergeräte werden automatisch durch das Tiefengerät und das Richtungsgerät betätigt. Widmen wir uns nun dem Gerät, welches für die Richtung bestimmt ist, da das Gerät für die Tiefe auf den Gesetzen der Hydrostatik basiert und dieses Gebiet nicht im Thema „Gyroskop“ enthalten ist. Dieser Richtungsapparat des Torpedos, welcher das Steuergerät für die Richtung, steuert, besteht aus einem sich schnell drehendem, astatischen Gyroskop mit drei Freiheitsgraden in einer Kardanaufhängung (Abb. 20). In der Normallage des Torpedos, befindet sich die Achse xx vertikal, die Achse yy liegt senkrecht zur Bewegungsrichtung und die Achse zz längs des Torpedos (Abb. 21)¹. Wird aber der Torpedo z.B. durch einen Wellenschlag von seiner Laufbahn um den Winkel α abgelenkt (Abb. 20), dann kommt das Richtungssteuergerät ins Spiel, welches durch eine Richtungsmaschine, die durch zusammengespreste Luft aus der Luftkammer angetrieben wird, ausgelöst wird. Der Eintritt der zusammengespresten Luft wird durch einen Schieber reguliert, welcher mit dem äußeren Ring des Gyroskops verbunden ist. Da der äußere Ring bei einem Gyroskop stabil in seiner Ausgangslage bleibt, wird der Schieber bei jeder Ablenkung der Längsachse von der Achse zz , geöffnet. So strömt zusammengespreste Luft in die Richtungsmaschine, welche den Torpedo automatisch in die Gegenseite der Auslenkung richtet, solange bis die Längsachse und die Achse zz wieder aufeinanderliegen.

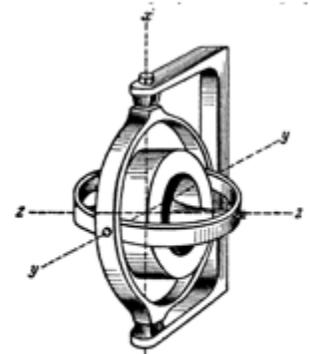


Abb. 20

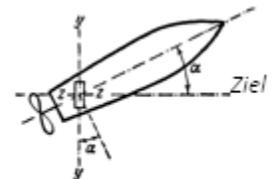


Abb. 21

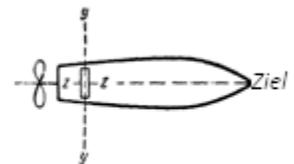


Abb. 22

§ 10. Gyroskopischer Zeiger der Längsneigungen und Kursabweichungen: Gyro-Horizont der Firma Sperry

Ein weiteres Gebiet in welchem sich das Gyroskop sehr ausbreiten konnte, war das Flugwesen. Vor allem Geräte die den „Blinden Flug“ möglich machten. In dem Fall des „Blinden Fluges“, in dem es dem Piloten nicht möglich ist, irgendwelche irdischen Orientierungspunkte zu sehen, bräuchte man ein Gerät, welches jegliche Abweichungen vom dem richtigen geradlinigen Kurs in angegebene Richtung zeigen würde.

1. Auf den Abbildungen 20 und 21 ist nur der Rotor des Gyroskops ohne die Kardanringe abgebildet und der Torpedo wird von oben betrachtet.

Durch das vorher gewonnene Wissen im Kapitel 1, kann man schnell eine Skizze, solch eines Gerätes machen.

Nehmen wir an, dass im Cockpit auf dem Schaltpult ein Gerät mit einem astatischem Gyroskop mit drei Freiheitsgraden untergebracht ist (Abb.23). Die Achse xx des äußeren Rings ist hier fest mit dem Kasten des Gerätes verbunden und ist horizontal und quer zur Flugzeuglängsachse ausgerichtet. Die Achse yy ist in der Normalstellung des Flugzeuges vertikal und die Achse zz längs der Flugzeuglängsachse gerichtet. An dem Inneren Ring b ist fest eine weiße Scheibe c montiert die man durch die Öffnung d (rechts im Bild), in der Normallage nicht sieht. Das Viereck um die schwarze Öffnung ist aus Glas. Verliert nun der Pilot im geradlinigem Flug die Richtung, bekommt er es sofort mit, da er die weiße Scheibe sofort hinter dem durchsichtigem Glas auftauchen sieht

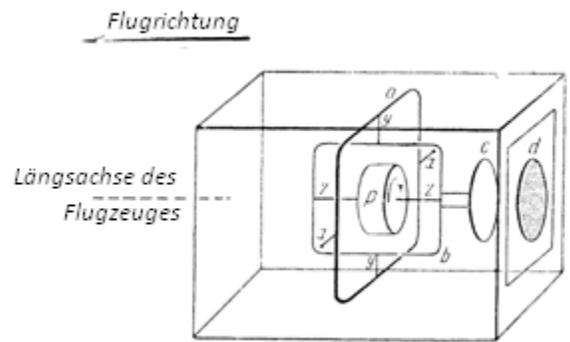


Abb. 23

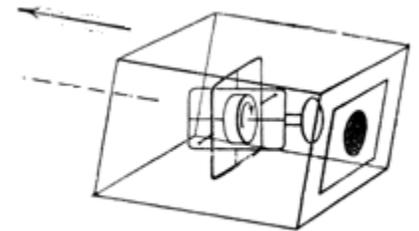


Abb. 24

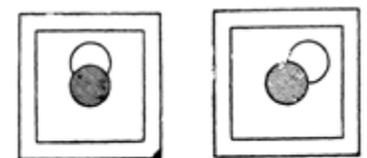


Abb. 25

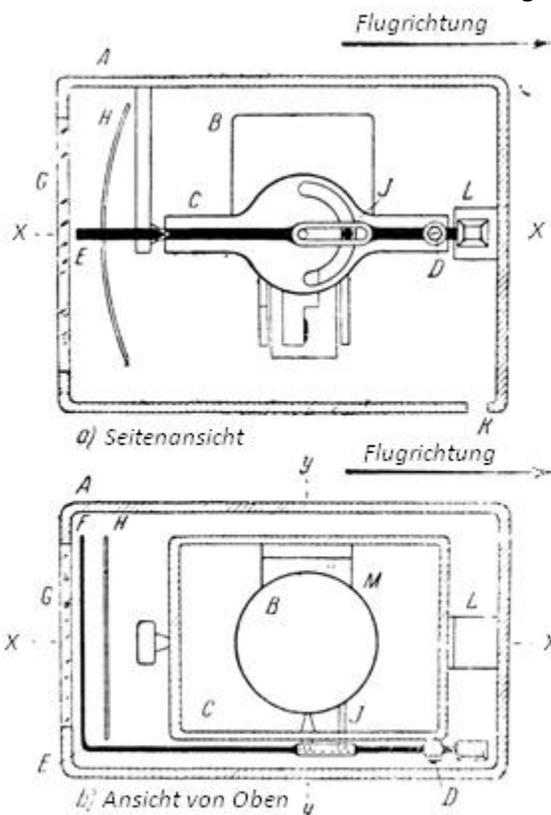


Abb. 26

Scharnier D befestigt, um welches der krumme Hebel DEF rotieren kann. Der Teil EF ist dem Pilot, in Form einer weißen Linie, durch das Fenster G sichtbar. Diese weiße Linie spielt die Rolle des Horizonts. Ebenso sieht der Pilot durch das Fenster G die zylinderförmige Ebene H , welche in zwei Farben angemalt ist. Die obere Hälfte hellblau für den Himmel und die untere Hälfte dunkelgrau für die Erde. Im horizontalen Flug wird die Form des Flugzeugs auf die Linie des Horizonts EF projiziert (Abb. 27). Wird das Flugzeuges jetzt abgelenkt, zeigt sich auch das Silhouette in die abgelenkte Richtung (Abb. 28 - 29). Wenn man z.B. die Abbildung 29 betrachtet dann sieht man, dass das Flugzeug nach unten fliegt und eine Rechtsneigung hat.



Abb. 27

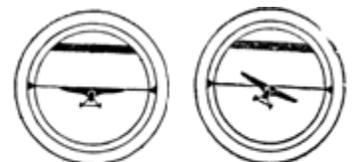


Abb. 28



Abb. 29

§ 11. Stabilität des Fluges eines rotierenden Geschosses

In diesem Paragraph wird die interessante Anwendung der gyroskopischen Gesetze im Kriegswesen angesprochen. Seitdem die kugelförmigen Geschosse in der Schieß- und Artillerie Praxis durch längliche Geschosse ersetzt wurden, wurde klar, dass man für eine höhere Zielfähigkeit und bessere Stabilität im Flug ihnen eine schnelle Rotation um ihre Längsachse verpassen musste. Dieses hatte zur Folge, dass man auf der Innenseite des Laufs, Schraubenzüge einritzte, durch welche das Geschoss die nötige Rotation erhielt. Welche Folgen hatte dies auf die Lage des Geschosses im Flug? Würde der Flug in einem Luftleerem Raum stattfinden oder in der Stratosphäre (ab 20 km über dem Meeresspiegel)¹, wo die Luftdichte sehr klein ist, dann kann man das rotierende Geschoss mit einem Gyroskop mit drei Freiheitsgraden vergleichen. Denn dort wirkt nur als einzige Kraft, die Gewichtskraft, welche im Mittelpunkt des Geschosses angreift und keine Auswirkung auf die



Abb. 30

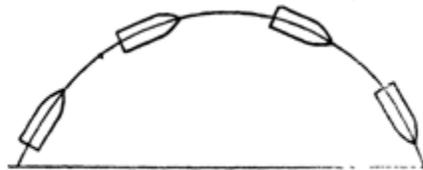


Abb. 31

Rotationsbewegung um sein Zentrum hat. Auf diese Weise würden die Flugbahn und die Lage des Geschosses wie in Abbildung 30 aussehen. Andres ist die Sache bei einem Flug in der Atmosphäre aus, denn da bekommt es eine hervorragende Eigenschaft, nämlich mit dem Kopfvorderteil immer nach vorne zu fliegen und so die Treffsicherheit wesentlich zu erhöhen (Abb. 31). Dies passiert aber nur dann, wenn es genügend

Luftwiderstand gibt. In der Abbildung 32 sieht man ein Modell eines Geschosses, welches in einen Luftstrom gehalten wird. Die Luft, welche das Modell umströmt, wirkt in verschiedenen Punkten Druck aus, welchen man in eine resultierende Kraft R zusammenfassen kann. Diese heißt auch die Widerstandskraft der Luft. Wird nun das Geschoss um einen Winkel α von der Linie, welche parallel des Luftstroms geht, abgelenkt, dann fängt die Kraft R , immer vor dem Schwerpunkt Z , an zu wirken. Würde das Geschoss keine Rotation um die Längsachse haben, würde es einfach nach hinten umkippen und überhaupt keine Stabilität aufweisen. Da aber unser Geschoss die nötige Rotation besitzt, kann man mit der Regel der Präzession aus § 4 leicht heraus finden, wie es sich auf die Kraft R verhalten wird. Dazu muss man zuerst die Kraft R in ihre Komponenten R_1 und R_2 zerlegen (Abb. 33). Wie man sieht hat die Kraft R_2 keine Auswirkung auf die Bewegung, da diese längs der Geschossachse wirkt. Durch die Präzessionsregel sieht man, dass das Geschoss, durch die Einwirkung von R_1 , einen Kegel mit der Spitze in Z und dem Ausweitungswinkel α , beschreibt. Ist also der Ausweitungswinkel α am Anfang klein, so bleibt dieser, den ganzen Flug über, nahe diesem Wert und das Geschoss bewegt sich kegelförmig um die Achse der Luftströmung, welche man auch als Richtung des Geschossflugs bezeichnen kann. Folglich sehen die Flugbahn und Lage des Geschosses im Flug gemäß Abbildung 31 aus.

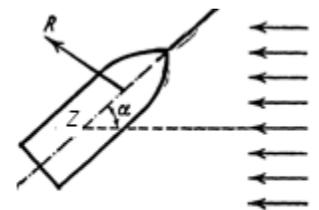


Abb. 32

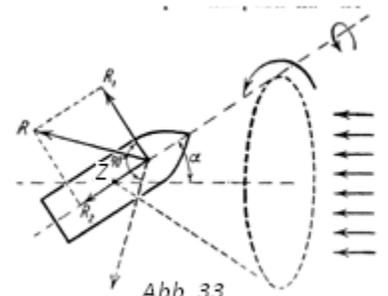


Abb. 33

1. Ein Artilleriegeschoss steigt auf solch eine Höhe bei Schüssen über eine weite Distanz

2. Gyroskopischer Halbkompass und gyroskopischer Kompass

§ 12. Gyroskopischer Halbkompass

Um den Weg im Flug ohne jegliche Sicht zu vollführen, braucht man auch einen Richtungszeiger, um zu wissen wo Norden, Osten, Süden und Westen ist, dazu könnte man natürlich einen normalen Magnetkompass verwenden, doch die Arbeit mit solch einem Kompass ist erschwert, da dieser dauernde Schwankungen während dem Flug aufweist. Sofort kam die Idee ein Gyroskop mit drei Freiheitsgraden zu verwenden, um ein stabileres Zeigerinstrument zu bauen. Nehmen wir an, dass sich das Flugzeug auf einem horizontalen, geradlinigem Flug auf dem Kurs AB (Abb. 37a) befindet. Um die Sache nicht zu erschweren,

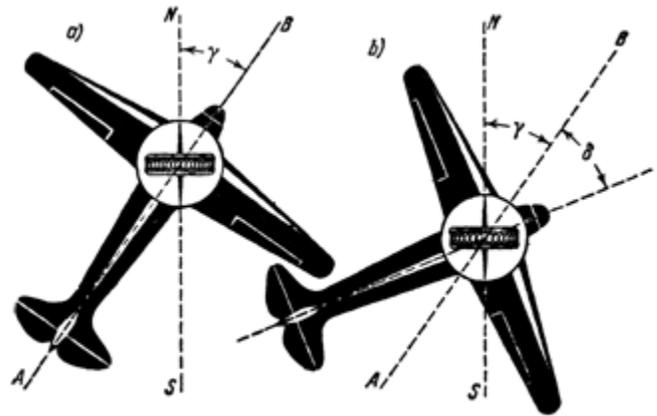


Abb. 37

verläuft der Flug bei windstillem Wetter. Der Winkel γ zwischen AB und SN ist der Kurswinkel (Er wird von der Nordrichtung zur Ostrichtung abgezählt). Die Aufgabe des Piloten ist es nun diesen Kurswinkel einzuhalten. Im Cockpit ist ein astatisches Gyroskop mit drei Freiheitsgraden (Abb. 2) so aufgestellt, dass die Achse des äußeren Rings vertikal steht (die äußere Achse ist auf der Abb.37 nicht abgebildet). Stellt man jetzt die Achse des Gyroskops so ein, dass sie dieselbe Richtung wie NS hat, dann ist der Winkel zwischen der Längsachse des Flugzeugs und der Achse des Gyroskops der Kurswinkel γ . Würde sich die Erde nicht Rotieren, würde die Sache jetzt ganz einfach sein, dann würde nämlich das Gyroskop immer die Richtung NS beibehalten und der Pilot würde gleich jede Abweichung vom Kurs z.B. um den Winkel δ (Abb. 37b) bemerken und könnte diesen ausbessern. Da es aber nicht der Realität entspricht, schauen wir uns den Fall mit Erdrotation an. Um einen eher leichten Fall zu betrachten, nimmt man ein Flugzeug, welches sich gerade über dem Nordpol befindet, indem sich die Meridiane treffen und sich, wie die Erdkugel, einmal in 24 Stunden gegen den Uhrzeigersinn um 360° drehen. Dem zufolge dreht sich jeder Meridian in einer Stunde um 15° . Will man nun, dass das Gyroskop, welches sich an Bord befindet, die Richtung eines Meridians einhält, so muss seine Achse auch in einer Stunde um 15° sich gegen den Uhrzeigersinn drehen. Wie man das erreicht, wurde im zweiten Teil von §4 besprochen. Betrachtet man nun Orte nicht am Nordpol, sondern südlicher, dann ist der Winkel, um welchen sich die Meridiane in einer Stunde drehen, kleiner als 15° und das Gyroskop muss neu eingestellt werden. So ist die Wirkungsweise des gyroskopischen Halbkompasses, es ist klar, dass dieses Gerät nur ein Halbkompass ist, da es sich nicht automatisch nach Norden ausrichten kann, sondern von der Hand des Beobachters mit Hilfe eines Magnetkompasses erst in die richtige Position gebracht werden muss.

§ 13. Einige Details der Konstruktion des Halbkompasses

Kommen wir nun zu ein paar Details, welche das Gerät funktionstüchtig machen. Das Gerät ist in einem luftdichten Kasten (Abb.38) verbaut, welcher auf dem Schaltpult im Cockpit vor dem Pilot montiert ist.

Der Pilot beobachtet die Bewegung des Geräts durch eine rechteckige Öffnung auf der Vorderseite des Kastens, in Form eines graduierten Kreises, welcher an dem äußeren Ring (äußeren Rahmen) des Geräts befestigt ist. Die Linie cc ist die Kurslinie (Abb.38), welche gleichzeitig auch die Längsachse des Flugzeuges darstellt. Damit

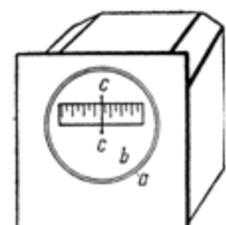


Abb. 38

das Gerät richtig arbeiten kann, muss der Rotor des Gyroskops ununterbrochen angetrieben werden. In dem beschriebenen Gerät funktioniert es folgendermaßen:

Die Luft wird dauerhaft aus dem Gehäuse des Geräts (mit Hilfe des Ventury-Röhrchens) entzogen. So kommt es zu einem Druckunterschied zwischen Inneren und Äußeren des Gehäuses. Durch diesen Druckunterschied wird Luft ins Gehäuse durch eine Öffnung an der Unterseite des Gerätes eingesaugt und kommt in den Kanal *a* (Abb. 39), welcher durch das Axiallager des äußeren Rings/Rahmen *b* geführt ist. Von hier aus geht die Luft in die Düse *c*, welche unveränderlich mit dem Rahmen *b* verbunden ist. Auf dem Kranz des Rotors *d*, dessen Achse *e* im inneren Ring *f* befestigt ist, sind Einbuchtungen eingeritzt. In diese Einbuchtungen schlägt die Luft, die aus der Düse *c* rauskommt und erhält so auf Dauer die Geschwindigkeit des Rotors. Der Druck wird auf 90 mm auf der Quecksilberskala gebracht und treibt so den Rotor mit ca. 12000 Umdrehungen pro Minute an. Der Luftkreislauf ist durch die schwarzen Pfeile dargestellt.

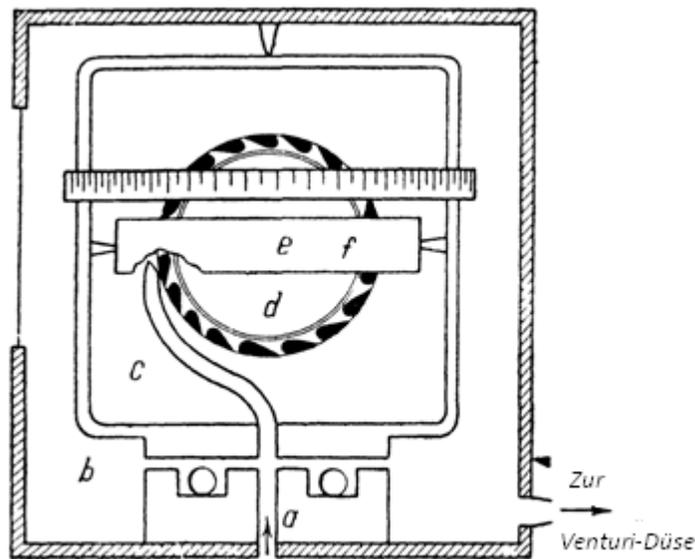


Abb. 39

Ein weiteres interessantes Detail dieser Konstruktion ist die Funktion, die die Achse des Rotors automatisch horizontal bzw. senkrecht zur Drehachse des äußeren Rings ausrichtet, wenn diese auf irgendeine Weise aus dieser Position entweichen sollte. Dazu hat der Kranz des Rotors zwei Verdickungen zwischen welchen die Luft, die aus der Düse *a* (Abb. 40) austritt, schlägt. Nehmen wir an, dass aus irgendeinem Grund die Achse *AB* nicht mehr horizontal liegt, sondern gegen den Uhrzeigersinn ausgelenkt wurde (Abb. 41). Nun schlägt die Luft nicht nur auf den Rotor, sondern auch auf die rechte Verdickung. Dies hat zu Folge, dass die Komponenten des Drucks nicht nur den Rotor um die Achse *AB* antreiben, sondern auch senkrecht auf die rechte Verdickung wirken. Diese senkrecht wirkende Komponente strebt nun, das ganze Gerät um die vertikale Achse *zz* zu drehen gegen den Uhrzeigersinn zudrehen (Sicht von oben). Diesen senkrecht wirkenden Druck kann man auch mit der Kraft *F*, welche auf die Achse *AB* z.B. im Punkt *B* wirkt, ausdrücken. Diese ruft eine Präzession um 90° in Rotationsrichtung gedreht hervor, welche die Achse

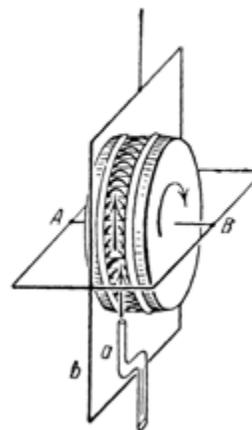


Abb. 40

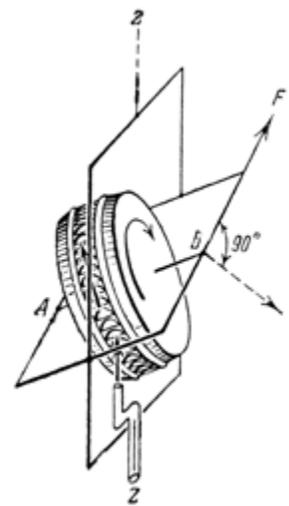


Abb. 41

AB wieder in ihre Ausgangslage befördert. Dieses beschriebene Gerät wurde zum ersten Mal von der amerikanischen Firma Sperry gebaut und getestet. Seitdem hatte es lange Zeit eine wichtige Rolle im Flugwesen gespielt, vor allem bei Flügen nahe den Polen, dort wo magnetische Kompass versagten. Die Einstellung des Halbkompasses wurde dort durch astronomische oder hochfrequenzphysische Methoden vorgenommen. Doch es gab auch andere gyroskopische Halbkompass wie z.B. den Halbkompass von der deutschen Firma Anschütz¹, welche den Antrieb des Rotors nicht durch eine Düse, sondern durch einen Elektromotor verwirklichte und so bis auf 20000 U/min kam. Ein Nachteil dieser Konstruktion war aber, dass sie keine automatische Korrektur der Rotorachse hatte, welche sie wieder in die Horizontallage beförderte.

§ 14. Der Anfangsgedanke des Physikers Foucaults zur Erfindung eines mechanischen Kompasses

Wie schon im ersten Kapitel erwähnt, war es nötig, einen mechanischen Kompass zu entwickeln, denn der magnetische Kompass verlor seine Wirkung und gab falsche Angaben auf dem Bord eines Kriegsschiffs oder in der Nähe der Pole. Schauen wir uns nun die Grundidee des Gyro-Kompasses von Foucault an, welche er schon 1852 hatte. Die Erde ist wie ein großer Magnet, dessen Pole, welche in der Nähe der geographischen Pole liegen, die Magnetnadel in Richtung der magnetischen Meridiane ausrichten. So funktioniert der normale magnetische Kompass, doch die Erde hat auch noch eine zweite Eigenschaft und zwar die Eigenrotation um die Erdachse yy (Abb.43), die durch den Nord und Südpol gegen den Uhrzeigersinn geht. Aus §8 wissen wir, dass ein Gyroskop mit zwei Freiheitsgraden versucht sich parallel der Rotationsachse des Untergrunds auszurichten. Von hier kommt auch die Idee, ein Gyroskop mit zwei Freiheitsgraden, als einen mechanischen Kompass zu verwenden.

Nehmen wir uns nun so ein Gyroskop her, welches sich nur um die Achse xx drehen kann und der Rotor um die Achse AB rotiert (Abb. 42). Nehmen wir jetzt irgendeinen Punkt M auf der Erdoberfläche (Abb. 43) (hier in der nördlichen

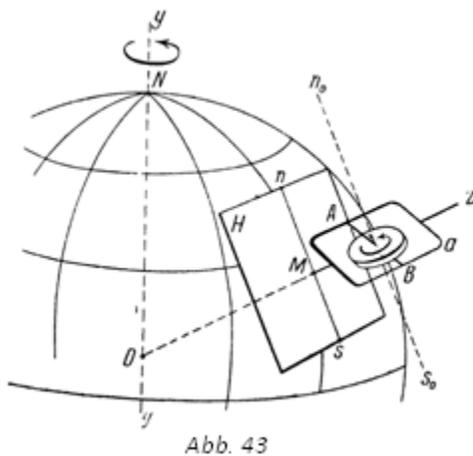


Abb. 43

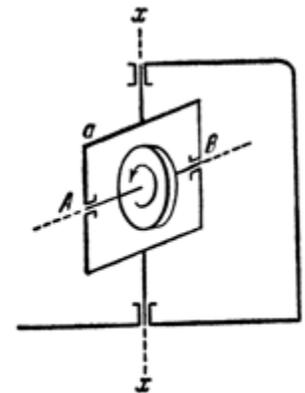


Abb. 42

Halbkugel) und zeichnen den Erdradius OM ein. Die Verlängerung MZ stellt die Vertikale und die senkrechte Fläche H die horizontale Ebene im Punkt M dar. Malen wir noch eine Linie ns ein, welche den Kreuzungspunkt des Meridian NM und der horizontalen Ebene H darstellt.

Diese Linie heißt Mittagslinie im Punkt M . Stellen wir nun das Gyroskop im Punkt M (Abb. 43) so auf, dass die Drehachse des Rahmens a auf der Vertikalen MZ liegt. Da das Gyroskop jetzt auf einem sich drehendem Untergrund befindet, strebt es, nach der Regel Foucaults, den gleichnamigen Parallelismus mit der Erdachse yy an, doch schafft es nicht, weil die Achse AB gleichzeitig parallel der horizontalen Ebene ausgerichtet sein muss. Am nächsten zu

diesem angestrebten Zustand ist die Mittagslinie ns zu welcher man parallel die Linie n_0s_0 durch den Mittelpunkt des Gyroskops durchzeichnen kann. Das Gyroskop richtet sich also nach dieser Linie mit dem Punkt A nach oben aus, da die Rotationsrichtung der Erde und des Rotors in dieselbe Richtung zeigen müssen. Wie man sieht, richtet sich tatsächlich ein Gyroskop mit zwei Freiheitsgraden nach Norden und Süden aus (nach den geographischen Polen nicht magnetischen!). Der Experimentator würde aber enttäuscht sein, würde er diesen Versuch durchführen wollen, da die Achse ihre Anfangsposition beibehalten würde, welche er ihr am Anfang gegeben hat,

1. Wer mehr über die Firma Anschütz und ihre Kreiselkompass wissen will, ist der folgende Link zu empfehlen: http://www.dmkn-beta.de/downloads/06/10/FILE606/100_Jahre_Anschuetz.pdf

da die Erdrotation viel zu langsam ist und nicht die Reibungskräfte die im Gyroskop auftreten übertreffen könnte. Deswegen bleibt Foucaults Idee nur ein theoretischer Gedanke und kann nicht in der Praxis verwendet werden.

§ 15 Gyro-Kompass der Firma Sperry mit einem Pendel

Da es nur theoretisch geklappt hat, mit einem Gyroskop, mit zwei Freiheitsgraden, die Richtung Nord-Süd zu bestimmen, hat die Firma Sperry weitere Versuche gemacht und tatsächlich es geschafft einen mechanischen Kompass zu bauen, doch mit einem Gyroskop mit drei Freiheitsgraden. Es klingt vielleicht zuerst komisch, dass man ein Gyroskop mit drei Freiheitsgraden genommen hat, da man weiß, dass dieses immer seine Lage im Raum beibehält. Doch die Firma Sperry befestigte an dem inneren Ring S ein Pendel Q (Abb. 44),

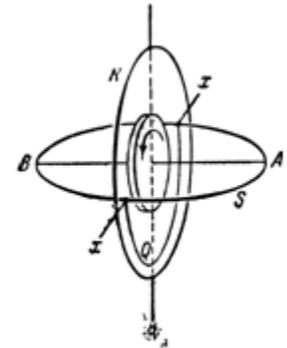


Abb. 44

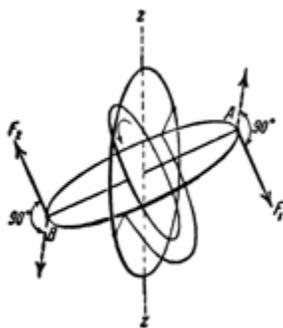


Abb. 45

Wird jetzt die Achse AB aus ihrer horizontalen Lage rausgebracht und dabei auch das Pendel Q , welches ein bestimmtes Gewicht hat, dann wirken die Kräfte $F_1 F_2$ (Abb. 45) in den Punkten A und B , welche eine Präzession um die Vertikalachse gegen den Uhrzeigersinn (wenn der Betrachter von oben drauf schaut) hervorrufen. Diese Eigenschaft hat man sich zu Nutze gemacht. Stellt man das Gyroskop mit dem Pendel in irgendeinen Punkt M (Abb. 43) z.B.

wieder auf der Nordhalbkugel auf und richtet man die Achse AB auf einen Stern im Osten (bei der Rotation gegen den Uhrzeigersinn des Rotors muss der Punkt

A in die östlichen Hälfte zeigen), dann wird die Achse AB langsam, mit dem Ende A nach oben aus der horizontalen Lage ausgelenkt, da sich die Erdrotation bemerkbar macht und der Stern langsam über den Himmel wandert. Durch diese Auslenkung kommt es durch die Einwirkung vom Pendel zu einer Präzession gegen den Uhrzeigersinn und die Achse AB richtet sich nach der Mittagslinie ns (Abb. 46) aus, welche gleichzeitig ein Meridian ist.

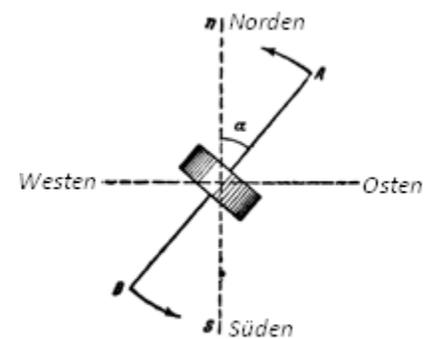


Abb. 46

§ 16 Gyro-Kompass der Firma Sperry mit Quecksilbergefäßen

Die Konstruktion die oben gezeigt wurde, konnte man nur auf einem ebenen und ruhestehenden Platz verwenden. Zum Beispiel auf einem Schiff wäre sie viel zu sensibel zu dem Wellengang, da die Rotationsbewegungen des Schiffs viel intensiver waren, als die Rotation der Erde. So wurde das Pendel durch zwei Gefäße mit Quecksilber ausgetauscht, welche, freibeweglich in der vertikalen Ebene, im Punkt O aufgehängt wurden (Abb. 47). In die Gefäße wurde soviel Quecksilber eingefüllt, dass der Punkt O der gemeinsame Schwerpunkt ist und das ganze System im indifferenten Gleichgewicht ist. Diese beiden Gefäße werden nun mit dem Gyroskop verbunden, sodass das Gefäß N das nördliche ist und das Gefäß S das südliche (Abb. 48). Wird nun die Achse, während des Tages aus der horizontalen Lage ausgelenkt, dann passiert dasselbe wie im vorherigen Paragraph. Die Flüssigkeit fließt in das Gefäß S und wirkt auf die Achse des Gyroskops wie ein Pendel. Hierbei muss man aber sagen, dass die Rotationsrichtung des Rotors im Uhrzeigersinn

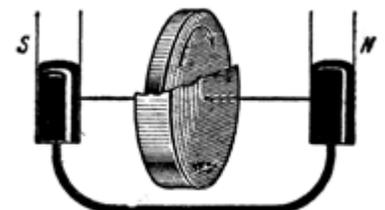


Abb. 47

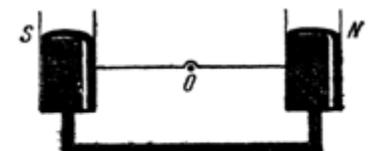


Abb. 48

stattfinden muss. Zum Modell mit Pendel, ist dieses praktischer, weil man mehr Möglichkeiten zur Regulation hat. Hier kann man z.B. durch besondere Ventile die Menge der Quecksilberflüssigkeit, welche von einem in das andere Gefäß fließt, regulieren und so das Gerät unsensibel auf die schnellen Bewegungswechsel des Schiffes machen.

4. Heutige und zukünftige Verwendung des Gyroskop-Prinzips in der Technik

§ 17 Verschiedene Gyroskop-Geräte in der heutigen Zeit

Auch in der heutigen Zeit ist das Thema Gyroskop aktuell und Forscher versuchen immer weitere Geräte auf diesem Gebiet zu bauen und zu erfinden. Ein Gerät, welches auch in der Navigation verwendet wird ist das Ring-Laser-Gyroskop, welches ein dreidimensionales Messgerät darstellt (Abb.49).“ Die Bestimmung der Drehung im Raum erfordert drei Ringlaser, die in unterschiedlichen Ebenen angeordnet sind. Der Laserkreisel hat mit einem Kreisel die Eigenschaft gemein, dass er absolute Drehraten im Raum anzeigen kann. Daher kommt auch der Name Laserkreisel. Er besteht aus zwei Lichtstrahlen, die gemeinsam in Gegenrichtung eine Kreisbahn durchlaufen. Technisch wählt man als Lichtquelle einen Laser, für die Lichtstrecke mehrere Spiegel oder Lichtleiter (*Ringlaser*). Nach dem Durchlauf überlagern sich die Signale.



Abb. 49

Ist die Lichtschleife in Ruhe, sind beide Signale identisch. Hingegen verursacht eine Drehung der Schleife um die Ebenennormale eine Phasenverschiebung, die im Interferenzmuster nachweisbar ist.“(<http://de.wikipedia.org/wiki/Laserkreisel>). Solche Laser Gyroskope werden hauptsächlich als zusätzliche Hilfe zum Inertialen Navigationssystem (*INS*) in Militärfahrzeugen verwendet. Doch die Forscher der Uni Ulm und der Ludwig-Maximilians-Universität in München, wollen noch einen Schritt weiter gehen und durch die Weiterentwicklung des Laserkreisel-Gyroskops zum Quanten-Gyroskop¹ den „Lense-Thirring-Effekt“ erstmals direkt nachweisen und sogleich die Rotation des Universums messen. Da dieses Quanten-Gyroskop auf der Erde, wegen der Trägheit der Atome und der Gravitation, nicht funktionieren kann, will „[D]ie Esa[will] deshalb ein Kaltatom-Gyroskop namens "Hyper" (hyper-precision cold-atom interferometry in space) in den Orbit schießen. Das hochempfindliche Gerät soll herausfinden, ob durch die Drehung der Erde ein Lense-Thirring-Gravitationsfeld entsteht.“

(<http://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/0,1518,205899,00.html>). Doch dieses Gerät würde immer noch für den Nachweis der Universumrotation zu unsensibel sein. „Hyper“ soll nach der Aussage der ESA frühestens 2012 ins All geschossen werden.

Ein weiteres Gebiet wären die Minigyroskope², welche durch kleine Sensoren verwirklicht werden und jegliche Drehraten wahrnehmen. Solche Mikrogyroskope in Form einer Mikrokarte (Abb. 50) werden z.B. in Digitalkameras zur Bildstabilisierung eingebaut oder im Modellbau und anderen Technischen Geräten (Segway, Robotronik, ...) zur Stabilisierung des Zustandes und zur Vermeidung von Schwingungen eingesetzt. Neben diesen, von mir aufgeführten Geräte gibt es noch eine lange Aufzählung von Instrumenten und Technischen Anwendungen in dem die Eigenschaften eines Gyroskops verwendet werden, deswegen wird die Technik auf diesem Gebiet sich auch in der Zukunft nicht zur Ruhe setzen, sondern immer weitere und präzisere Geräte erfinden und herausbringen.

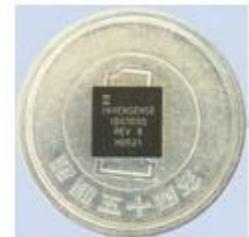


Abb. 50

1. Wissenswertes zum Thema: Quanten-Gyroskop: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/0,1518,205899,00.html> ; <http://www.iop.org/EJ/article/1367-2630/4/1/337/nj2137.pdf?request-id=88705d0c-1b1b-407f-a3cf-f985dcef3994> (ENG)
2. Wissenswertes zum Thema: Mikrominiaturisierte Gyroskope: http://www.topas.de/tt/2007_02/news_sept07.pdf

5.Überprüfung der Theorie aus dem Kapitel 1 durch ein eigengebautes Gyroskop

Um die Theorie zu überprüfen, habe ich mein eigenes Gyroskop in einer Kardanaufhängung gebaut (Abb.51).Die praktischen Versuche werden in kleinen Videos dargestellt, welche im Ordner „Videos“ hinterlegt sind. Die Videos sind im Format .mp4 gespeichert, um sie ohne Probleme abspielen zu können gebrauchten sie den auf der CD beigelegten VLC-Player(Windows). MAC-User müssen auf den Quicktime Player zurückgreifen.



Abb. 51

§18.Darstellung der Präzession mit einem selbst gebauten Gyroskop und Auswertung der theoretischen Präzessionsregel aus dem Paragraphen 4

Video 1: [Präzession 1.mp4](#)

(Zusatz.mp4 =>weitere Darstellung der Präzession, wurde in der Facharbeit nicht weiter beschrieben)

Versuchsaufbau: (Abb.52;Abb.53;Abb.54;Video1)



Abb. 52



Abb. 53

Gemessenen Größen: m (Rotor) = 213g

r (Radius des Rotors)= 32mm

a (Strecke von 0 bis zum Aufhänge Punkt A des Gewichtes)= 42mm

Gewichtsmassen: $m_1 = 10g$; $m_2 = 15g$; $m_3 = 33g$

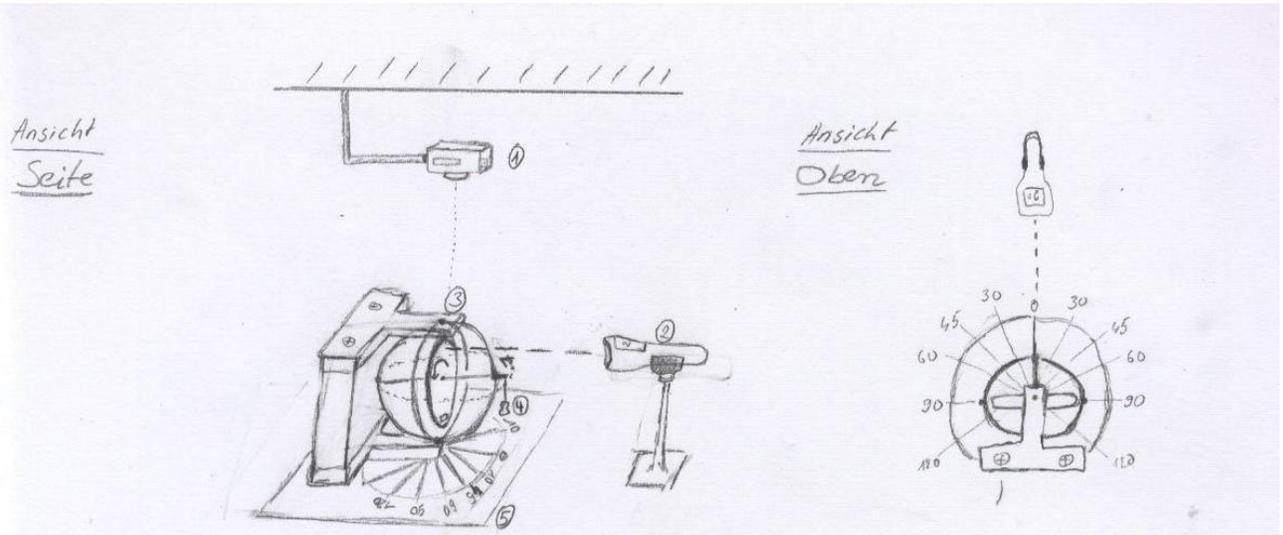


ABB. 54

- ① Befestigte Kamera (Multi-Burst Aufnahme \Rightarrow 16 Bilder pro sek.) Marke: Sony Cyber-shot DSC-W11
- ② Drehzahlmesser (misst Umdrehungen pro Min) Marke: Voltcraft Laser Drehzahlmesser DT-10L
- ③ Gyroskop in einer Kardanaufhängung
- ④ Gewichte die an die Gyroskopachse angehängt werden $m_1 = 10g$
 $m_2 = 15g$
 $m_3 = 33g$
- ⑤ Winkelscheibe, zur Bestimmung des Präzessionswinkels α_p

Formel die überprüft werden soll: $\alpha = \frac{Mt}{J\omega}$ (α wird hier im Bogenmaß ausgerechnet!);

Mit: $M = Sa$ ($S = n \cdot g$; Für n werden m_1 ; m_2 oder m_3 eingesetzt);
 $t = 1 \text{ sek}$;

$J = mr^2$; (genauer $J = \frac{1}{2}mr^2$ für einen Vollzylinder)

$\omega = 2\pi\bar{f}$ (\bar{f} =Durchschnittsfrequenz; z.B. $(2999 \text{ U}/\text{min} + 2989 \text{ U}/\text{min}) : 180 = 49.9 \text{ Hz}$)

Umrechnung ins Gradmaß: $\alpha_p = \frac{\alpha}{\pi} \cdot 180^\circ$

α_p nach der theoretischen Formel ausgerechnet:

\bar{f} in Hz	49,9	28,57	52,26	30,42	44,66	29,44
S in N	0,098	0,098	0,15	0,15	0,32	0,32
Präzessionswinkel α_p	3,45	6,02	5,04	8,49	12,73	19,3

α_p aus den aufgenommenen Bildern ausgemessen:

\bar{f} in Hz	49,9	28,57	52,26	30,42	44,66	29,44
S in N	0,098	0,098	0,15	0,15	0,32	0,32
Präzessionswinkel α_p	3	5	5	8	10	16

Relative Abweichung von α_p in %	15	20,4	0,8	6.1	27,3	20.6
---	----	------	-----	-----	------	------

Fotos zur Auswertung sind auf der CD in den Ordnern „10g“, „15g“ und „33g“ beigelegt.

Berechnung und Vergleich der Präzessionswinkelgeschwindigkeit anhand eines Videos:

PWinkelgeschwindigkeit.mp4

Verwendete Gewichte: Versuch 1 = **10g**; Versuch 2 = **33g**

Gemessene Durchschnittsfrequenz im Versuch 1 : **21,90 Hz**

Gemessene Durchschnittsfrequenz im Versuch 2 : **27,22 Hz**

Formel aus dem Paragraphen 4 die überprüft werden soll :

$$\omega_p = \frac{\alpha}{t} = \frac{M}{J\omega}$$

Durch die Theorie ω_p berechnet (Daraus T berechnet: $T = \frac{2\pi}{\omega_p}$, um es auch mit der praktischen Wert T vergleichen zu können):

	Versuch 1	Versuch 2
\bar{f} in Hz	21,90	27,22
S in N	0,098	0,32
ω_p in s^{-1}	0,137	0,364
T in s	45,86	17,2

Gemessener Wert T (Daraus ω_p ausgerechnet : $\omega_p = \frac{2\pi}{T}$):

\bar{f} in Hz	21,90	27,22
S in N	0,098	0,32
ω_p in s^{-1}	0,15	0,39
T in s	41	16

Berechnung der Relativen Abweichung am Beispiel : Versuch 1

$$\frac{0.15s^{-1}-0.137s^{-1}}{0.137s^{-1}} \cdot 100 \% \approx 9.5 \%$$

Relative Abweichung von ω_p in %	9,5	7,1
---	-----	-----

§19. Darstellung der Stabilität eines Gyroskops mit drei Freiheitsgraden und der Instabilität eines Gyroskops mit zwei Freiheitsgraden

Video 2: Stab-Instab.mp4

§20. Darstellung der Nutation

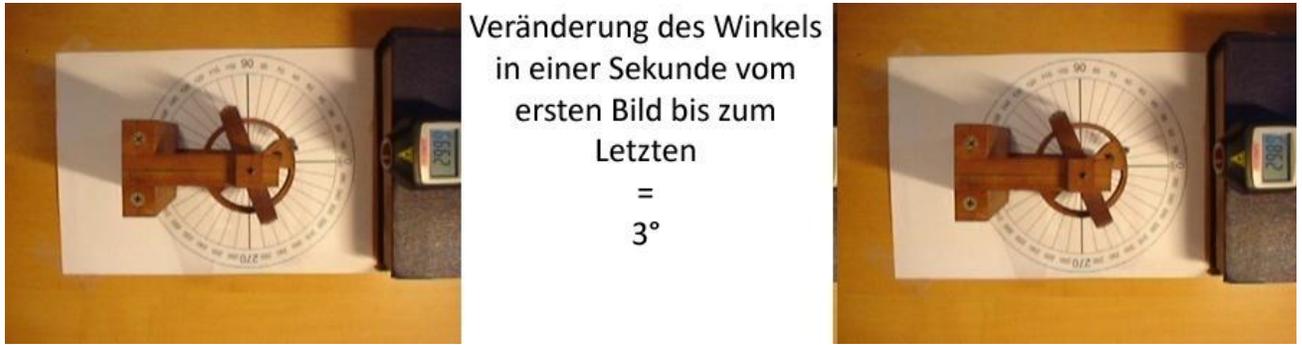
Video 3: Nutation.mp4

§21. Darstellung des Verhaltens des Gyroskops auf einem drehenden Untergrund (drei und zwei Freiheitsgrade)

Video 4: Drehuntergrund.mp4

Anhang

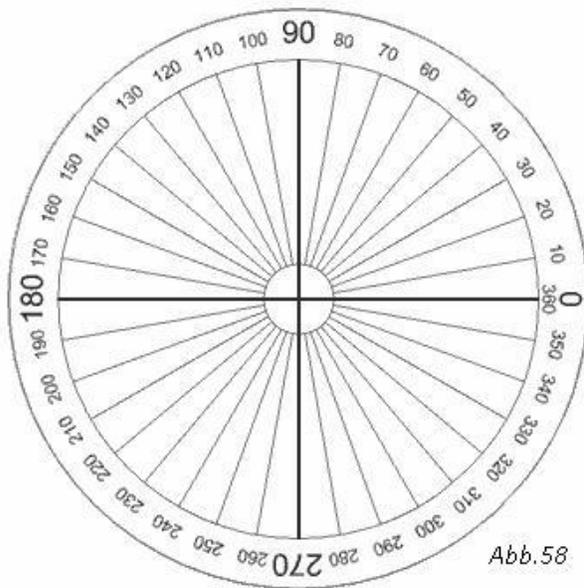
Auswertungsbilder zu §.18



Dies war ein Beispiel der Auswertung für das Gewicht = 10g und die Durchschnittsfrequenz = 49.9 Hz. Die übrigen Bilder sind in den Ordnern „10g“, „15g“ und „33g“ auf der CD hinterlegt, da man dort die Bilder besser analysieren kann indem man sie zoomt.

Winkelscheibe (Abb.58)

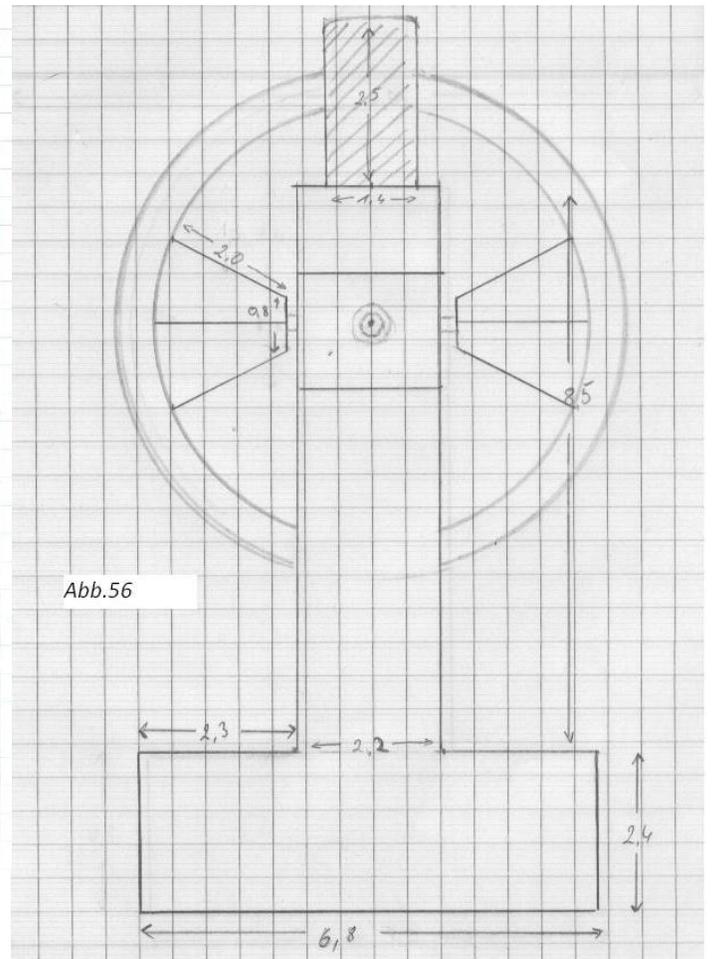
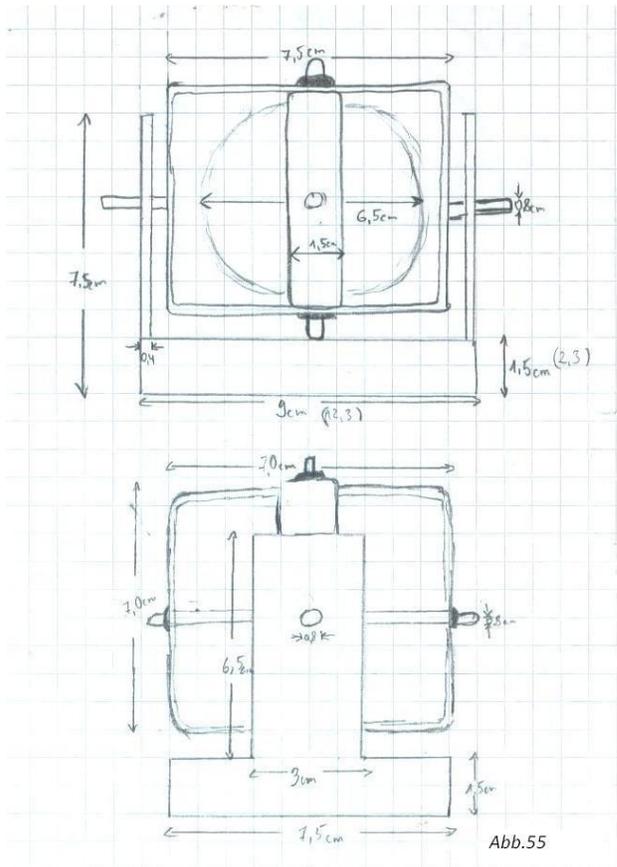
Gewichtsmassen: $m_1 = 10g$; $m_2 = 15g$; $m_3 = 33g$
(Abb.59)



Maße des gebauten Gyroskops (Angaben in cm)

Anfangs Skizze für den Bau des Gyroskops (Abb.55):

Skizze des gebauten Gyroskops (Abb.56 , Abb.57) :



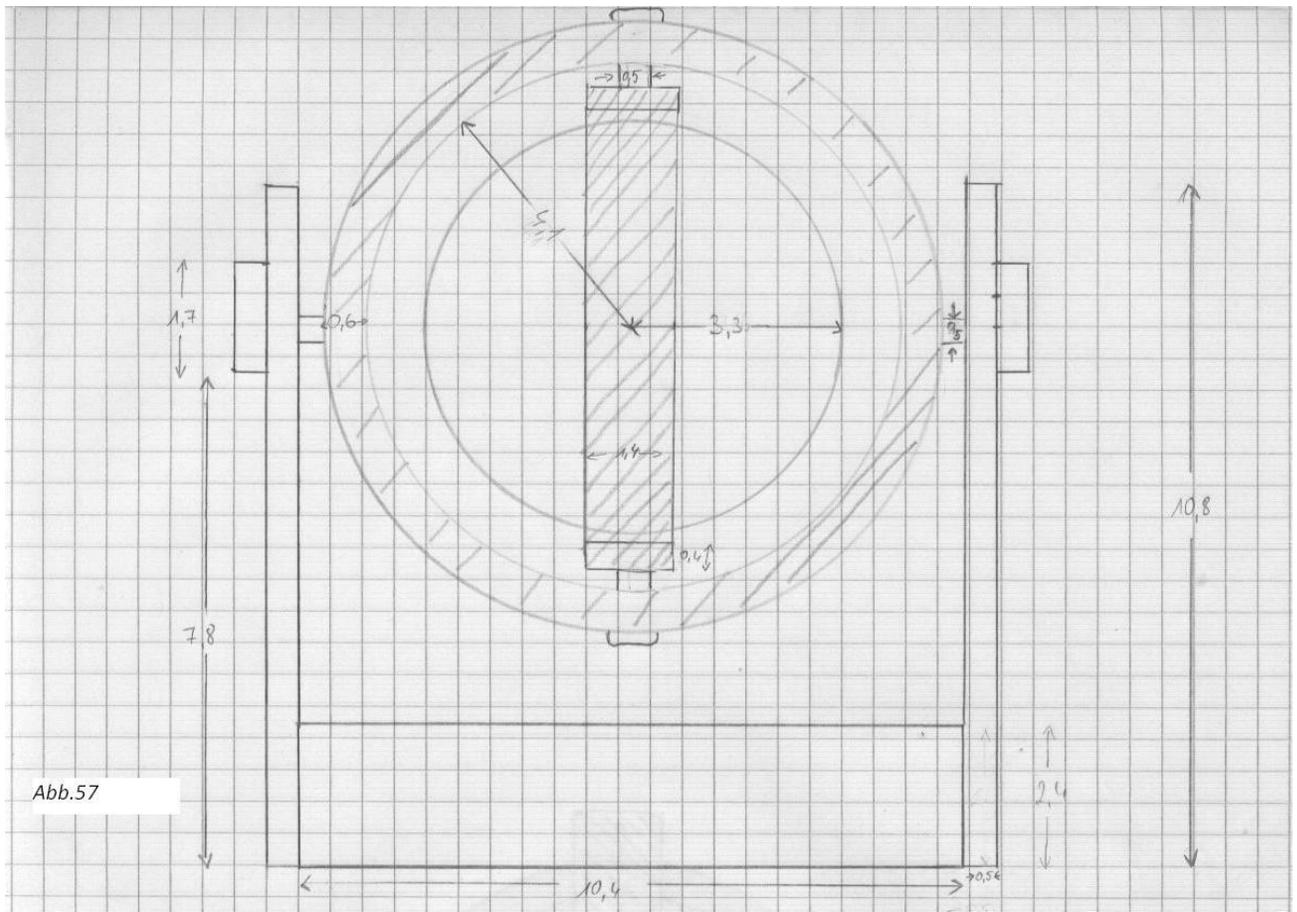


Abb.57

Literaturverzeichnis:

Internetseiten:

1. <http://www.personal.uni-jena.de/~p1erra/physik/protokolle/seite%20157-%20versuch%20115.pdf> (15.02.08)
2. <http://de.wikipedia.org/wiki/Gyroskop> (5.01.08)
3. <http://de.wikipedia.org/wiki/Ringlaser> (25.09.08)
4. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/0,1518,205899,00.html> (20.07.08)
5. <http://www.uni-saarland.de/fak7/jacobs/lehre/ws04-05/dez04.pdf> (15.05.08)
6. <http://www.physik.unibas.ch/Praktikum/VPII/PDF/gyroscope.pdf> (9.06.08)
7. http://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/kreisel.pdf (5.03.08)
8. <http://www.weitensfelder.at/Eleonore/Energie%20&%20Impuls/Kreiselbewegung-fertig.pdf> (2.05.08)
9. http://www.topas.de/tt/2007_02/news_sept07.pdf (5.08.08)
10. <http://gpr.physik.hu-berlin.de/Skripten/Mechanik%20und%20Thermodynamik/PDF-Dateien/M10.pdf> (5.08.08)
11. http://www.dmkn-beta.de/downloads/06/10/FILE606/100_Jahre_Anshuetz.pdf (26.08.08)
12. <http://de.wikipedia.org/wiki/Torpedo> (29.04.08)

Bücher:

13. Hammer ,Knauth , Kühnel ,Oldenburg: Physik Mechanik Additum ,Drehbewegung des starren Körpers,1986
14. Е. Л. НИКОЛАИ,огиз ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, ГИРОСКОП И НЕКОТОРЫЕ ЕГО ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ОБЩЕДОСТУПНОМ ИЗЛОЖЕНИИ,1947
15. Hammer/Hammer :Physikalische Formeln und Tabellen
16. Barth, Mühlbauer, Nikol, Wörle: Mathematische Formeln und Definitionen

Bilderherkunft:

1. Abb.1 – 12 ; Abb. 16 – 48
Е. Л. НИКОЛАИ,огиз ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ,1947, ГИРОСКОП И НЕКОТОРЫЕ ЕГО ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ОБЩЕДОСТУПНОМ ИЗЛОЖЕНИИ
2. Abb. 13 , 14
<http://gpr.physik.hu-berlin.de/Skripten/Mechanik%20und%20Thermodynamik/PDF-Dateien/M10.pdf>
3. Abb.15
<http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/009/001/228845650.jpg>
4. Abb.49
<http://de.wikipedia.org/wiki/Ringlaser>
5. Abb.50
http://www.topas.de/tt/2007_02/news_sept07.pdf
6. Abb.51-57;Abb.59
Selbstgemachte Bilder und Skizzen
7. Abb.58
<http://www.schoolplusstonybrook.org/classes/f2007/math3a-f2007/f2007-Math3a/Class9/files/degrees-360.jpg>

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den
Ort Datum

.....
Unterschrift des Schülers