

Freischwebende Halterung durch die mechanisch-elektrischen
Feldkräfte zwischen Kondensatorelektroden bei Meß- und Steuer-
kreisläufen.

Der Bericht umfaßt:

7 Seiten Text

3 Skizzen.

Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen E.V.

Institut für Geräteentwicklung.

Institutsleiter

Mühlhäuser

(Mühlhäuser)

Bearbeiter

Kemper

(Kemper)

gesehen

Alb. Betz

(Alb. Betz)

Göttingen, den 2. Februar 1942.

Freischwebende Halterung durch die mechanisch-elektrischen
Feldkräfte zwischen Kondensatorelektroden bei Meß- und Steuer-
kreislern.

(Vorschlag zum Bau von Kugelkreislern nach Dr.-Ing. H.E. Hollmann
Berlin - Lankwitz).

I. Grundlagen. (vgl. Abb. 1).

Die freischwebende Aufhängung oder - allgemeiner ausgedrückt - die freischwebende Halterung von Körpern durch die Kräfte von Magnetfeldern eignet sich nicht so sehr, wenn es sich darum handelt, bei geringsten Abständen kleine Gewichte in möglichst genauer Lage festzuhalten. In diesem Falle ist die Verwendung der mechanischen Kräfte des elektrischen Feldes zwischen Kondensatorelektroden vorzuziehen.

Der physikalische Grund ist die verschiedene Leitfähigkeit der Baustoffe für den magnetischen Induktionsfluß und den elektrischen Stromfluß. Während die magnetische Permeabilität des Eisens, vor allem wenn man einen für Hochfrequenz verlustarmen Aufbau benötigt, nur 10 bis 100 mal größer als die von Luft gehalten werden kann, ist die elektrische Leitfähigkeit von Metallen praktisch unendlich gegen die von Nichtleitern wie Luft. Damit gebührt für Halterungen kleiner Gewichte in kleinen Abständen z.B. von 1/10 mm, wie sie für den Ersatz von Kugellagern infragekommen, der Anwendung elektrischer Feldkräfte der Vorzug. Es ist dabei zu erreichen, die Lagerung mit einer Genauigkeit von wenigen μm aufrechtzuerhalten, was mit magnetischer Halterung zur schwer gelingen dürfte.

Wenn die freischwebend gehaltenen Körper (z.B. Kreislerratoren) gegen ihre Lagerungen schnelle Bewegungen ausführen, dürften bei der elektrischen Halterung überdies weit geringere den mechanischen Lagerreibungsverlusten entsprechende Energie-

verluste auftreten als bei magnetischer Halterung, selbst wenn man die Körper aus dem geeignetsten Hochfrequenz Eisen aufbaut.

Die elektrisch zu erreichenden mechanischen Kräfte lassen sich in ihren Höchstwerten nicht ohne weiteres angeben, da sie durch die nicht leicht vorausbestimmbare elektrische Festigkeit der Strecke zwischen den Elektroden begrenzt sind. Diese ist jedenfalls nicht hoch, wenn die Elektrodenstrecke mit Luft gefüllt ist; dementsprechend lassen sich in freier Luft auch nur ganz kleine Gewichte elektrisch freischwebend halten. Dagegen steigt die elektrische Festigkeit bekanntlich außerordentlich an, wenn zwischen den Elektroden Hochvakuum geschaffen wird. Dabei ist es ohne weiteres z.B. erreichbar, bei $30 \mu m$ Elektrodenabstand 2000 V Gleichspannung aufrecht zu erhalten, was eine Zugkraft von rund 120 g je cm^2 der Elektrodenfläche ergibt. Die für Meß- und Steuerkreisel erforderlichen Kräfte lassen sich auf diese Weise sicherlich beherrschen.

Der elektrische Aufbau, vor allem die Steuerungseinrichtungen, lassen sich bei der elektrischen freischwebenden Halterung sehr einfach halten. In Abb. 1 ist ein geeignet erscheinender Vorschlag für den einfachen Fall dargestellt, daß ein Gewicht (G) durch eine mit ihm starr verbundene kreisförmige Kondensatorplatte (P_1) schwebend an kreisring- bzw. kreisförmigen, durch einen Wandarm (W) räumlich festgehaltenen Gegenplatten (P_2' , P_2'') in einem kleinen Abstand x_1 aufgehängt werden soll. Die mechanischen Kräfte werden hier nicht durch Gleichspannung erzeugt, sondern durch Wechselspannung. Letztere ergibt bei gleichem Effektivwert dieselben mittleren Kräfte. Im einzelnen schwanken diese zwar mit der doppelten Betriebsfrequenz zwischen Null und dem Spitzenwert; verwendet man aber Hochfrequenz, so wirken sich diese Kraftpulsationen mechanisch nicht aus. Nach Abb. 1 wird die Betriebs-Hochfrequenzspannung (HF) der Einrichtung über einen Transformator T zugeführt, der die Spannung gegen Erde symmetriert. Über zwei gleichartige Wicklungen w_2' und w_2'' , die auf zwei Schenkel einer Drossel mit Hochfrequenz Eisenkern aufgebracht sind, fließt der Hochfrequenzstrom in dem "Kraftplattenpaar" P_2' , P_2'' zu,

er schließt sich über die mit dem Gewicht verbundene Platte P_1 , deren Potential das der Erde bleibt, wenn alle Aufbau- teile vollkommen symmetrisch, also insbesondere die Fläche von P_2' und P_2'' und damit die Teilkapazitäten P_1/P_2' und P_1/P_2'' gleichgroß gehalten werden.

Nach Abb. 1 erfolgt die Einstellung der statischen Kraft zwischen P_1/P_2' , P_2'' selbsttätig dadurch, daß die Kombinationsinduktivität von L_2' und L_2'' mit der Kombinationskapazität von P_1/P_2' und P_1/P_2'' so abgestimmt wird, daß bei dem Größt- abstand x_1 ^{max} Resonanz auftritt. Die mechanische Kraft zwischen P_1/P_2' , P_2'' erreicht dabei ihren höchsten (das Gewicht G ggf. vielfach übersteigenden) Betrag. Ist z.B. x_1 ^{max} = $35 \mu m$, so kann man bei passenden elektrischen Verlusten des Resonanz- kreises erreichen, daß z.B. bei x_1 ^{norm} = $30 \mu m$ gerade Gleich- gewicht zwischen Schwerkraft und elektrisch erzeugter Gegen- kraft herrscht und daß schon bei x_1 = $25 \mu m$ nur noch ein Bruchteil des Gewichtes an Kraft erzeugt wird. Mit anderen Worten: Es läßt sich eine freischwebende elektrische Halterung erzielen, die wie eine steife mechanische Federung wirkt; auch beim Auftreten äußerer Kräfte (z.B. von Beschleunigungen) bleibt die Lage sehr genau erhalten. Allerdings erfordert es eine umso höhere Betriebsfrequenz (und danach verhältnis- mäßig steigenden Leistungsaufwand), je steifer und genauer man die Lagerung gestaltet und je schroffer und höher die Kraft- stöße sind, die von außen auf das System einwirken können; denn umso kürzer muß die Einschwingzeit der Resonanzschaltung gehalten werden. Größenordnungsmäßig dürfte man bei dem vor- liegenden Kreiselproblem auf 150 kHz kommen.

Leider läßt sich nicht erreichen, daß sich die statische Kraft, die jeweils zu irgendeinem sich einstellenden Abstand x_1 gehört, ohne jeden Zeitverlust ergibt. Diese Verzögerung in der statischen Kraft führt zu mechanischen Eigenschwingun- gen. Diese müssen durch Gegenkräfte gedämpft bzw. am Ent- stehen verhindert werden. In Abb. 1 ist für diesen Zweck fol- gender Weg vorgeschlagen worden: Neben dem Kraftplatten- paar P_2 ist ein zweites (P_2 ringförmig umschließendes, von ihm kapazitiv abzuschirmendes) weiteres Kondensatorplatten-

paar P_3 vorgesehen. Dieses erhält HF Spannung über die beiden einander gleichen Widerstände R_3' , R_3'' . Die an dem "Dämpfplattenpaar" P_3 liegende HF-Spannung muß so bemessen werden, daß sie im Zusammenwirken mit P_1 keine mechanische Kraft erzeugen kann, die gegen die durch das elektrische Feld zwischen P_2 und P_1 erzeugte in Betracht kommt. Damit dies auch bei kleinen Abständen x_1 noch der Fall ist, wird man dem Abstand x_2 von P_3/P_1 (wie in Abb. 1 angedeutet) von vornherein ein Stück zugeben.

An den Widerständen R_3 entsteht eine Spannung, die eine Funktion des Abstandes x_2 (bzw. x_1) ist. Ueber die Gleichrichter G , die Widerstände R_4 und den Transformator DT werden Ströme i_3 abgezweigt und gleichgerichtet, die ebenso eine Funktion des Abstandes darstellen. Aus diesen Strömen wird nun die Dämpfung der mechanischen Eigenschwingungen des Systems abgeleitet. Je nach der Steifheit der Federung, die die mechanischen Kräfte des elektrischen Feldes zwischen den Kraftplatten und der Gewichtsplatte hervorbringen, ist die zu verhindernde mechanische Eigenschwingung des Systems mehr oder weniger hoch. Man kann hier auf mehrere hundert Hertz kommen. Die Induktivität, die sich aus der Zusammenschaltung des Transformators DT und dem angekoppelten Sekundärkreis ergibt, bemißt man so, daß für diese Eigenschwingungsfrequenzen der Blindwiderstand klein bleibt gegen die Wirkwiderstände (R_4) der Abzweigung. Die Sekundärwicklung von DT führt der Wicklung w_1 auf dem Mittelschenkel der HF-Drossel einen Strom i_1 zu, der im Bereich der Eigenschwingungsfrequenzen den 1. Differentialquotienten der Ströme i_3 darstellt. Da i_3 eine Funktion vom Abstand x ist, so ist i_1 eine Funktion des 1. Diff. Quot. von x , also der Geschwindigkeit, mit der sich die bewegliche Platte P_1 gegen die anderen bewegt.

Die Aufgabe des Stromes i_1 ist die Aenderung der Permeabilität des Eisenkerns der HF-Drossel für den Strom i und damit eine Verstimmung von L_2 und der Resonanz. Das Kernmaterial ist für diesen Zweck passend zu wählen.

Die Wicklungen w_2 und w_1 sind durch entsprechenden Aufbau vollständig entkoppelt zu denken. Damit der Strom i_1 in seinen beiden entgegengesetzten Flußrichtungen wirksam sein kann, muß der Mittelschenkel entweder eine konstante Gleichstrommagnetisierung erhalten oder man muß den Schenkel aus permanent-magnetisiertem Material wählen. Für das Letztere dürfte eine Anwendung gepreßter Dauermagnete (vgl. Aufsatz von Dehler in der ETZ 62 (1941) S. 601 . . 606: Tromalit - Preßmagnete) mit Kunstharzbindemitteln infragekommen. Derartige Kerne besitzen durch ihren Aufbau einen hohen inneren elektrischen Widerstand. So ist die erforderliche genügend rasche, nicht durch zu starke Wirbelstrombildung verhinderte Änderung des magnetischen Zustandes durch den Strom i_1 zu erreichen. x)

Die Verstimmung des elektrischen Resonanzkreises L_2/P_2 durch die Beeinflussung der Permeabilität der HF-Drossel bewirkt, wenn ihr Sinn richtig gewählt wird, daß die dynamische Einstellung der Halterungskräfte richtiggestellt wird; es ergibt sich so eine Art Geschwindigkeitsdämpfung. Diese verhindert jede Eigenerrregung und sorgt für gedämpfte oder aperiodische Abstandseinstellung des schwebend gehaltenen Gewichtes, auch wenn von außen Kraftstöße einwirken.

Um die Wirkung der Dämpfung noch zu erhöhen, ist es zweckmäßig, auch in die Zuleitung zu dem Dämpfplattenpaar P_3 eine Induktivität einzuschalten und die Änderungen des Stromes i_3 durch Arbeiten in Resonanznähe noch zu verstärken.

II. Freischwebende Kreiselhalterung.

a) Allgemeines.

Nach der beschriebenen Grundanordnung dürfte die freischwebende elektrische Halterung eines Kreisels mit Erfolg

x) Will man eine Verstärkerröhre anwenden, wobei man deren Gitter die Sekundärspannung des Transformators DT zuführt und deren Anodenstrom durch die Wicklung w_1 fließen läßt, so ergibt der Anoden-Ruhestrom eine u.U. passende konstante Vormagnetisierung.

ausführbar sein. Abb. 2 zeigt ein Schema, das von der für den vorliegenden Fall zweifellos einfachsten, von Dr.-Ing. Hollmann vorgeschlagenen Lösung in der Form eines Kugelkreisels ausgeht.

Allerdings ist der Rotor nicht als "Kugel"Kreisel im Sinne des Sprachgebrauchs der Mechaniktheorie, als Kugel mit überall gleichmäßig verteilter Masse, zu verstehen. Der Rotor soll nur der Einfachheit der Halterung halber äußerlich Kugelform besitzen; im übrigen ist aber die Masse - bei senkrecht zu denken - der Drehachse - nach Möglichkeit am Kugeläquator zusammengefaßt zu denken.

Die Kugel wird umschlossen von einem Gehäuse, das an 4 gleichmäßig an der Kugel verteilten Stellen Kraft- und Dämpfplattenpaare (P_I bis P_{IV}) trägt, die den Rotor durch vier nach verschiedenen Raumrichtungen wirkende Kräfte in der oben dargelegten Art freischwebend und praktisch vollkommen reibungslos halten. Die Kugel und die Plattensysteme befinden sich im Hochvakuum.

Es ist vorausgesetzt, daß das Gehäuse sich durch selbsttätige Nachdrehung (etwa von optischer Abtastung ausgehend) stets der Kreisellage gleich einstellt, unabhängig von der Lage, die etwa das Flugzeug annimmt, in das das Gerät eingebaut ist. Dabei ist nicht nötig, daß dies in jedem kurzen Augenblick zutrifft, jedoch im Zeitmittel.

Die Kugel trägt an ihren Polen Eisenplättchen (F_e' , F_e''), auf die Elektro-Magnetpaare ($M_r' + M_r''$; $M_l' + M_l''$; $M_v' + M_v''$ oder $M_h' + M_h''$) einwirken können. Dies soll die Erzeugung von links-, rechts-, nach vorne oder hinten drehenden Momenten auf den Kreiselrotor gestatten, um der Kreisellachse eine etwa erforderliche Präzession zu erteilen.

Der Elektromagnet M_a ist bestimmt, das Auslaufen des Kreisels (durch Wirbelstromerzeugung) beim Stillsetzen abzukürzen.

b) Antrieb.

Zur Ingangsetzung und zur Aufrechterhaltung der Kreisel-drehung dürfte sich eine Uebersetzung der bekannten, mit magnetischen Kräften arbeitenden Zahnrad-Elektromotorform in eine Form eignen, bei der die Kräfte elektrisch erzeugt werden, (Abb. 3). In die Kugel wird dazu an ihrem Aequator ein schmales Band feiner Zähne eingefräst. Am Gehäuse sitzen dementsprechend, einander diametral gegenüber, zwei gebogene und gezahnte Kondensatorplatten. Legt man an diese Platten Wechselspannung geeigneter Frequenz und Spannung, so wird eine Antriebskraft erzeugt.

Ogleich der Drehsinn bei dieser Anordnung ohne weiteres nicht festliegt, kann man ihn bestimmen, z.B. indem man den ersten Anstoß von dem Magnet M_a (Abb. 2) aus bewirkt. Dieser müßte zu diesem Zweck mit Wechselstrom erregt und nach dem Prinzip ausgebildet werden, nach dem man Elektrizitätszählerscheiben anzutreiben pflegt.

c) Inbetriebnahme.

Es ist zweckmäßig, die Resonanzlage der Halterung so zu legen, daß sie nicht erst auftritt, wenn der Abstand zwischen einem der 4 Kraftplattensysteme (P_I bis P_{IV} , Abb. 2) und der Kugel den möglichen Größtwert erreicht, wenn die Kugel also an die gegenüberliegenden Plattensysteme anstößt, sondern dann, wenn der Sollabstand (der idealerweise der zentrischen Kugellage entspricht) nur ein wenig überschritten wird.

Das hat zur Folge, daß vor der Inbetriebsetzung, wenn der Rotor der Schwerkraft folgend unten aufliegt, die normalerweise auftretenden Kräfte nicht ausreichen, um die Kugel in die Schwebelage zu heben. Um das doch zu erreichen, ist es am einfachsten, eine vorübergehende Verstimmung der Resonanzlage vorzunehmen, sodaß diese ungefähr bei Größtabstand auftritt. Der einfachste Weg dürfte eine passende kurzzeitige Variation der Betriebshochfrequenz sein.

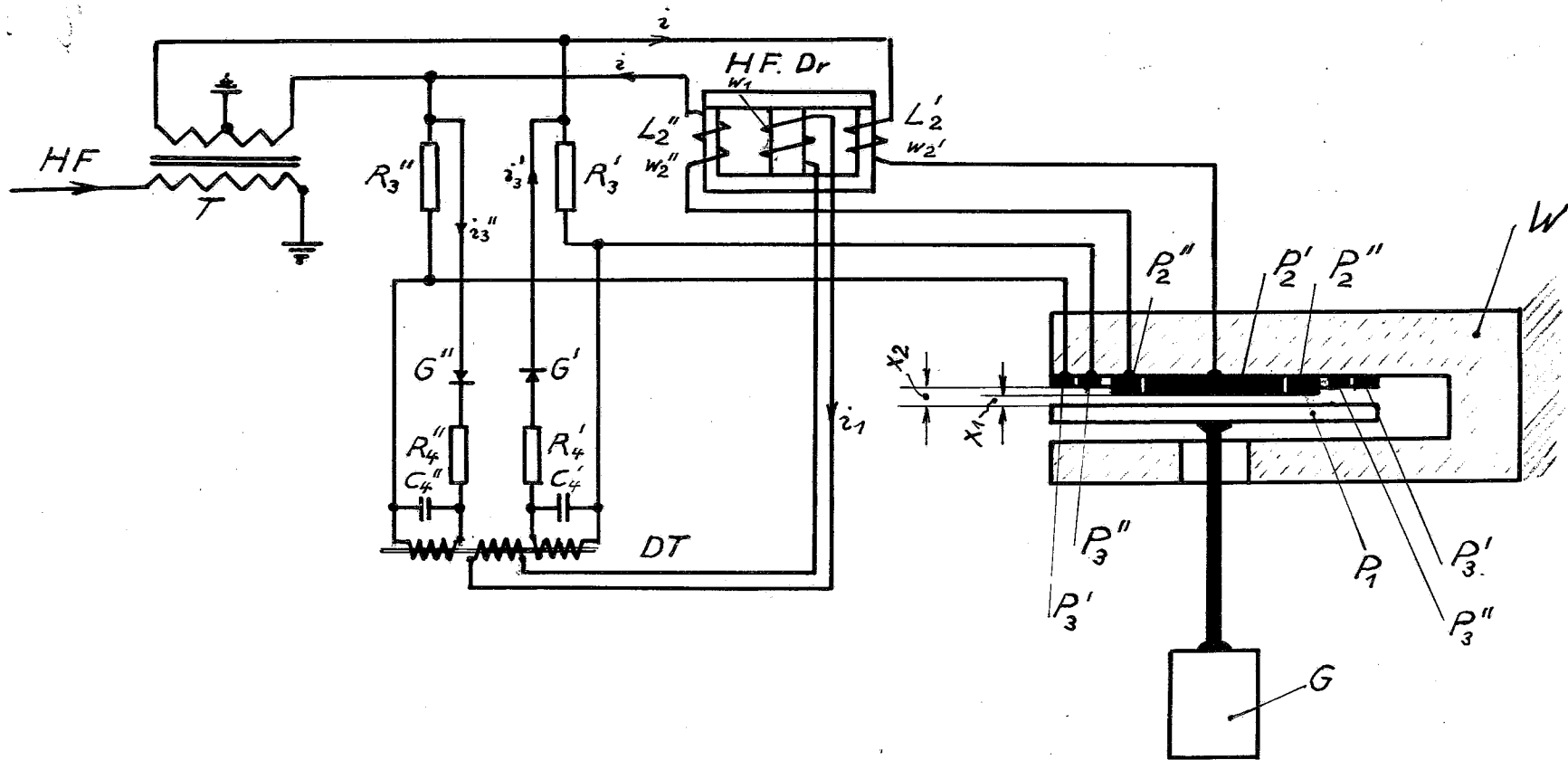


Abb. 1. Freischwebende Halterung durch elektrische Feldkräfte.

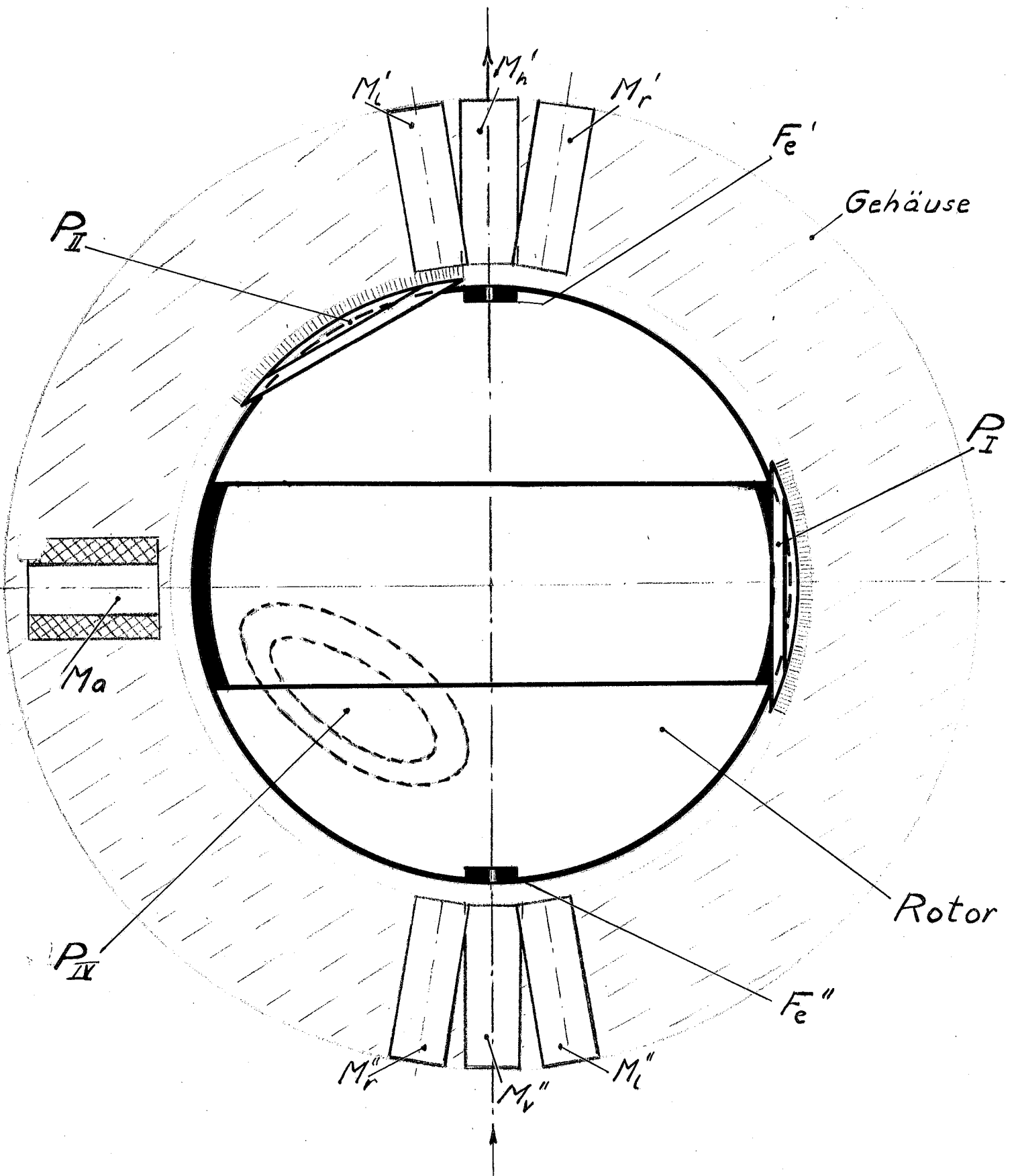


Abb. 2. Schema für die freischwebende Halterung eines Kugelkreisels.

(Schnittzeichn.)

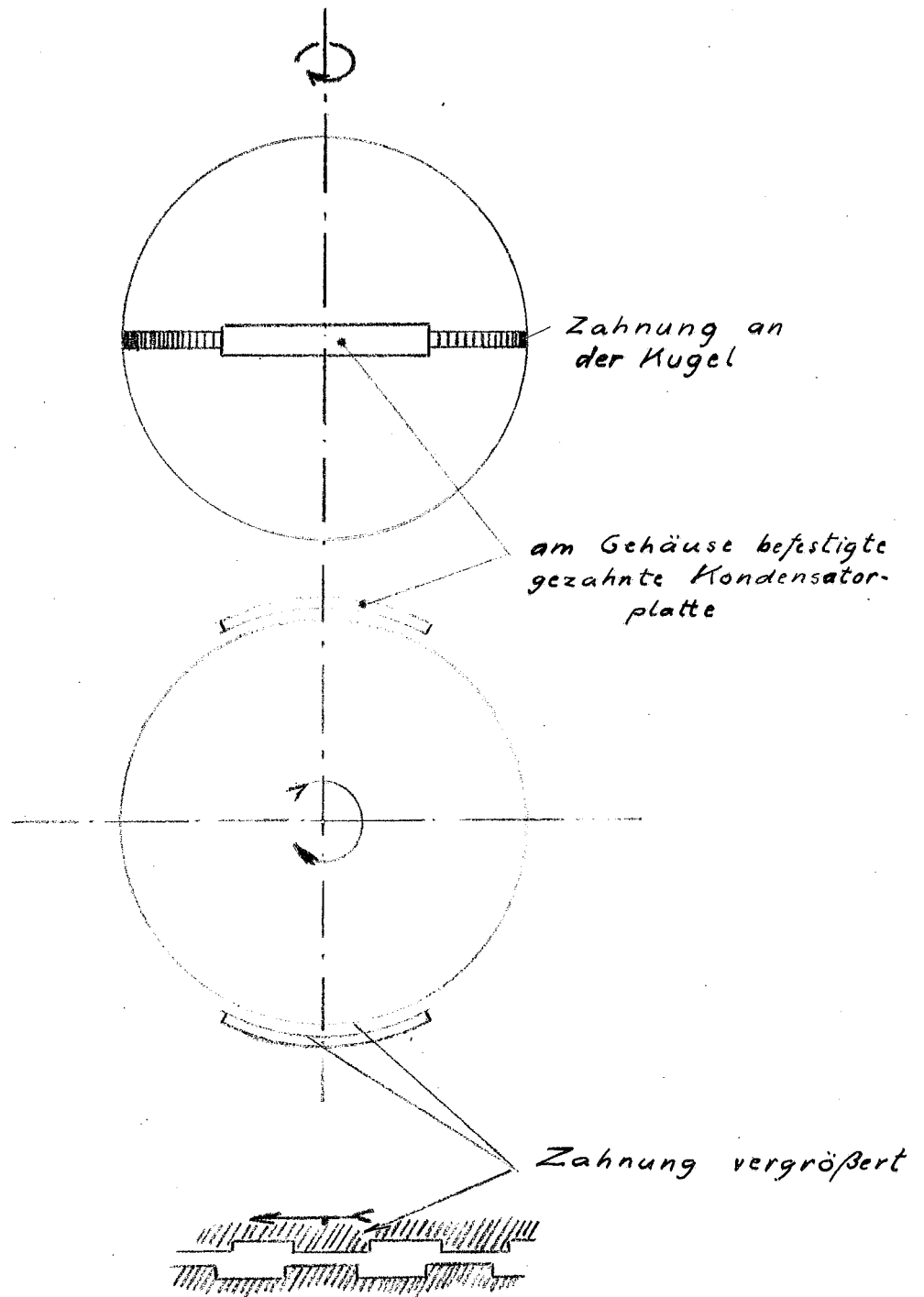


Abb. 3. Vorschlag für den Antrieb.