**12. Ueber eine Vorrichtung um
Messinstrumente gegen die Erschütterungen des
Bodens zu schützen; von W. H. Julius.**

(Der Kon. Akad. v. Wetensch. zu Amsterdam mitgetheilt in der
Sitzung vom 25. Mai 1895.)

(Hierzu Taf. I Fig. 8.)

Den meisten Physikern, welche ihre feineren Messungen in der Mitte einer belebten Stadt durchzuführen haben, sind die unaufhörlichen Erschütterungen der auf weichem Boden stehenden Gebäude leider wohl bekannt. Der Einfluss dieser Erschütterungen auf die Ruhe frei aufgehängter Körper, wie z. B. der Magnetsysteme unserer Galvanometer, ist im allgemeinen um so grösser, je leichter das System und je geringer dessen Trägheitsmoment bezogen auf die verticale Axe ist.

H. du Bois und H. Rubens haben die Bedingungen entwickelt¹⁾ — und bei der Construction der Magnetsysteme ihres Galvanometers möglichst vollständig berücksichtigt — die ein an einem torsionslosen Faden aufgehängter Körper erfüllen muss, damit kleine Verschiebungen des Aufhängepunktes wenigstens keine Drehungen des Systems um eine verticale Axe veranlassen können und also das Bild einer Scala nicht ablenken.

Wenn man ein System so angefertigt hat, dass es den von ihnen gestellten Anforderungen wirklich Genüge leistet, so ist jedenfalls ein grosser Schritt vorwärts gethan. Leider ist es aber sehr schwierig, ganz besonders bei kleinen Systemen, die „Trägheitssymmetrie“ mit der erforderlichen Genauigkeit herzustellen und während der Handhabung des Apparates zu erhalten. Ich habe das noch vor kurzem bei der Construction äusserst leichter Radiomikrometerkreise besonders unangenehm empfunden und gewann die Ueberzeugung, dass der Besitz eines erschütterungsfreien Aufstellungsortes für den ganzen

1) H. du Bois u. H. Rubens, Wied. Ann. 48. p. 241. 1893.

Apparat doch eigentlich eine nothwendige Bedingung sei, um mit demselben arbeiten zu können.

Höchstwahrscheinlich wird schon mancher mit mehr oder weniger gutem Erfolge gegen die Erschütterungen des Bodens gekämpft haben. So viel ich weiss, sind aber nur wenige wohl-gelungene Versuche in dieser Richtung veröffentlicht worden.

In „Monthly notices of the Royal Astronomical Society“, 17. p. 160, beschreibt Airy eine von ihm benutzte Vorrichtung, um einen ruhigen Quecksilberhorizont zu bekommen. Er stellt das Quecksilbergefäss auf eine Tischplatte, welche an Kautschukbändern aufgehängt ist. Die Aufhängepunkte befinden sich oben an einem kleinen Holzgerüst, welches auf eine zweite Tischplatte befestigt ist, die ihrerseits wiederum an Kautschukbändern hängt. Diese Combination wiederholt sich noch einmal.

Auch im physiologischen Laboratorium der Universität in Leyden ist eine erschütterungsfreie Aufstellung seit einiger Zeit in Gebrauch, und zwar mit vorzüglichem Erfolg. Prof. Einthoven hat dort den Meniscus eines Capillarelektrometers — dessen Bewegungen bei 800 maliger Vergrösserung photographirt werden — vollständig gegen das Rütteln geschützt, indem er den Apparat auf einer grossen eisernen Platte befestigt hat, welche auf Quecksilber schwimmt.

Es war mir wegen verschiedener Ursachen nicht möglich, bei einer gewissen Untersuchung die letzterwähnte Methode zu benutzen, hauptsächlich weil die hierzu erforderliche Einrichtung in meinem speciellen Falle in sehr grossem Maassstabe hätte ausgeführt werden müssen.

Da es mir nun vor kurzem gelang, denselben Zweck auf ganz anderem Wege zu erreichen, halte ich es nicht für überflüssig, auch meine Resultate mitzuthemen.

Meine Ueberlegungen richteten sich auf folgende zwei Punkte:

1. die immer wechselnden Kräfte, denen der zu schützende Apparat durch die Bewegung seiner Verbindungsstellen mit der Umgebung ausgesetzt ist, möglichst zu schwächen;
2. die Bedingungen so zu wählen, dass diese geschwächten Kräfte möglichst wenig Veränderung bringen können in der

Lage der verschiedenen Punkte des Apparates und speciell derjenigen Punkte, deren Stabilität am nothwendigsten ist.

Dies führte, nach einigen vorläufigen Versuchen, auf die folgende Construction.

An einem Balken (Fig. 8) (der am besten ohne Verbindung mit der Zimmerdecke in den Wänden eingemauert ist) oder an einer hohen Wandconsole sind in den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks ABC drei Stahldrähte von 2—3 m Länge befestigt. Unten an diesen hängt ein nicht sehr schweres aber doch stark construirtes Stativ (in der Figur in ungefähr $\frac{1}{15}$ der wirklichen Grösse abgebildet), in dessen Mitte sich ein Cylinder mit Zahnstange befindet. Längs dieser lässt sich ein Gewicht G von 3 oder 4 Kg mit Hülfe eines Zahnrades auf und nieder schieben und durch eine (in der Zeichnung nicht sichtbare) Klemmschraube in jeder Höhe fixiren. Auf das Tischchen stellt man das zu schützende Instrument in solcher Weise auf, dass sein Schwerpunkt in die Axe der ganzen Vorrichtung kommt, und schraubt es am besten fest.

Indem man nun das Gewicht G verschiebt, ist man im Stande den Schwerpunkt des ganzen aufgehängten Systems in verticaler Richtung zu verschieben. Die Befestigungspunkte $A' B' C'$ der Drähte sollen sich senkrecht unter den Punkten A, B, C befinden.

An die Fussplatte des Stativs sind noch drei Stellschrauben angebracht. Dieselben werden nur gebraucht, wenn man an dem Apparat etwas zu verändern hat; in jenem Falle wird ein gewöhnlicher verstellbarer Tisch, der sich dicht darunter befindet, ein wenig in die Höhe geschoben, sodass das Stativ darauf ruht.

Untersuchen wir jetzt den Einfluss, den bei dieser Anordnung die theils periodischen, theils unregelmässigen allseitigen Verschiebungen der Punkte A, B, C auf das Instrument ausüben werden, und fassen wir dabei zunächst nur die horizontalen Componenten der Bewegungen ins Auge.

Als erste Annäherung darf man jedenfalls voraussetzen, dass die drei Aufhängepunkte ganz ähnliche Bewegungen gleichzeitig ausführen, und dass also die Wellenzüge in den Drähten mit gleicher Phase anfangen. Wenn nun die Drähte

gleich stark gespannt sind (und das wird der Fall sein, wenn der Schwerpunkt in der Verbindungslinie der Mittelpunkte der Dreiecke ABC und $A'B'C'$ liegt), so kommen die drei Wellen auch immer mit gleicher Phase unten an und ertheilen dort in einem bestimmten Momente der hängenden Masse (die wir uns als ganz feste vorstellen) in den Punkten A' , B' und C' drei gleiche und gleichgerichtete horizontale Impulse.

Liegt der Schwerpunkt des Körpers über oder unter der Ebene $A'B'C'$, so wird der Antrieb nicht nur eine Verschiebung des Schwerpunktes, sondern ausserdem eine Drehung um eine horizontale, durch denselben gehende Axe hervorbringen. Die Gleichheit der Spannung in den Drähten wird dadurch gestört und das System wird in Schwingungen von ziemlich kurzer Periode um eine solche horizontale Axe versetzt.

Sorgen wir aber dafür, dass der Schwerpunkt sich gerade in der Ebene $A'B'C'$ befindet, so vermeiden wir jedenfalls die bezeichneten Drehungen und Schwingungen ganz.

Ferner könnte das System noch in drehende Schwingungen um die verticale Axe OO' gerathen. Diese Bewegungsart würde zunächst auftreten, wenn sich das obere Dreieck um irgend eine verticale Axe drehte. Es ist aber klar, dass die gewöhnlichen Erschütterungen eines Hauses zu solchen Drehungen in weit geringerem Maasse als zu Parallelverschiebungen der Punkte A , B , C Anlass geben. Indessen könnten auch die Parallelverschiebungen eine Drehung des unteren Dreiecks herbeiführen, aber nur dann, wenn die drei Drähte ungleich gespannt wären, wodurch die Wellen mit ungleicher Phase ankommen würden — und diesen Fall haben wir gerade auszuschliessen gesucht. Drehungen um OO' sind also, als Folge der Erschütterungen, kaum zu erwarten.

Die horizontalen Verrückungen des Schwerpunktes aber sind unvermeidlich und werden sich bei regelmässiger Wiederkehr der Impulse zu Pendelschwingungen der ganzen Vorrichtung um den Punkt O ausbilden können; wobei jedoch die verticale Axe des Instrumentes sich selbst genau parallel bleibt.

Es soll hier bemerkt werden, dass es für jedes Gebäude Schwingungen von bestimmter Dauer gibt, welche durch die unregelmässigen Bodenerschütterungen bisweilen besonders

stark hervorgerufen werden. Man muss also darauf vorbereitet sein, dass zufällig zwischen diesen Perioden und denen der Aufhängevorrichtung ein einfaches Verhältniss bestehen könnte, was für die Ruhe des Systems bedenklich wäre. In solchem Falle müsste man die Länge der Drähte ein wenig ändern; meistens wird das aber nicht nöthig sein. Je grösser die eigenthümliche Periode des Systems gegen die am meisten vorkommenden Erschütterungsperioden ist, um so geringer ist im allgemeinen die Gefahr für das Eintreten grosser Schwingungsamplituden. Deshalb soll man die Drähte nicht zu kurz nehmen.

Um ferner die pendelartigen und drehenden Eigenschwingungen des Systems — welche doch immerhin in gewissem Grade hervortreten werden, zumal weil auch Luftströmungen dieselben verursachen können — schnell zu beruhigen, wenden wir Flüssigkeitsdämpfung an. Es befinden sich zu dem Zwecke an der Peripherie des Stativs drei starke Messingdrähte, deren jeder ein System von zwei sich senkrecht schneidenden Blechplatten trägt, welche in kleine Gefässe mit Flüssigkeit ganz untertauchen. Die Gefässe sind auf irgend eine Weise an der Wand oder am Boden befestigt.¹⁾

Indem man also den Schwerpunkt in die Mitte des Dreiecks $A' B' C'$ versetzt, hat man erreicht, dass die horizontalen, in den Scheitelpunkten angreifenden Kräfte allen Punkten des Körpers gleiche und gleichgerichtete Verschiebungen ertheilen; wodurch also ausgeschlossen ist, dass gewisse hervorragende Theile (z. B. ein Torsionskopf) übermässig grosse Bewegungen ausführen; indem man die Aufhängedrähte lang und folglich die Periode der Eigenschwingungen des Systems gross nimmt, ist die Gefahr des Mitschwingens mit gewissen Perioden der Bodenbewegungen vermindert; und durch die Dämpfungsvorrichtung schliesslich bringt man die überhaupt noch auftretenden Schwingungen bald zur Ruhe.

1) Hr. W. v. Uljanin aus Moskau, der gelegentlich eines Besuches in Amsterdam meine Aufhängevorrichtung sah und mir später brieflich mittheilte, er habe die Methode mit bestem Erfolge in Berlin angewandt, zieht es vor, statt der Flüssigkeitsdämpfer einfach ganz lockere Wattebüschel zu benutzen.

Die vorhergehenden Betrachtungen beziehen sich nur auf die Art und Weise, auf welche das Gleichgewicht des Apparates durch die Einwirkung gewisser Kräfte gestört wird. Jetzt bleibt uns noch zu untersuchen übrig, inwiefern unsere Vorrichtung auch der anderen Eingangs erwähnten Absicht entspricht, nämlich dass man die Kräfte selbst möglichst schwächen soll.

Wie gross die erschütternden Kräfte sind, wenn das Instrument einfach auf einem Tisch steht, ist schwer zu sagen, denn dabei kommen Reibungswiderstände, Masse des Tisches u. s. w. mit ins Spiel. Ist der Apparat an einem steinernen Pfeiler gut befestigt, so sind die Kräfte sicher sehr gross, denn er würde in jenem Falle den Bewegungen des Pfeilers vollständig und unmittelbar folgen müssen.

Hängt ein Körper an einem Draht, so können wir in Bezug auf die Grösse der wirkenden Kräfte etwas Näheres aussagen. Man betrachte den Draht als eine vollkommen biegsame gespannte Saite, in welcher durch die horizontalen Verrückungen des oberen Endes transversale Wellen entstehen. Dieselben werden am unteren Ende beinahe ungeschwächt zurückgeworfen. Bei gegebener Spannung und gegebener Amplitude der Bewegungen des Aufhängepunktes werden, je nach der Geschwindigkeit, mit welcher diese Bewegungen stattfinden, Wellen von verschiedener Länge und verschiedener „Neigung“ gegen die Ruhelage durch den Draht wandern. Die Kraft, welche auf den unteren Befestigungspunkt des Drahtes wirkt, ist nun in jedem Augenblicke von der Neigung der Welle daselbst abhängig, und zwar gleich dem spannenden Gewichte multiplicirt mit dem Sinus des Neigungswinkels.

Es sei a mm die grösste Elongation des Aufhängepunktes; die Länge des Drahtes sei 2 m; so ist, falls die Bewegungen langsam, also die Wellen sehr lang sind, der maximale Neigungswinkel $a/2000$. Setzen wir das spannende Gewicht gleich 4000 g; die Masse von 1 m des Drahtes gleich 2,5 g, so berechnet sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Transversalwellen auf 125 m pro Secunde. Wenn nun einmal der Aufhängepunkt eine harmonische Bewegung ausführte mit einer Periode von $\frac{2}{125}$ Sec., so würde der Draht gerade gleich einer

ganzen Wellenlänge sein. Für den maximalen Neigungswinkel findet man in diesem Falle

$$\frac{\frac{\pi}{2} a}{\frac{1}{4} \lambda} = \frac{2\pi a}{2000}.$$

Je kürzer die Schwingungsdauer, desto grösser ist bei gegebener Amplitude die maximale Neigung. Die verschiedenen Werthe, welche der Neigungswinkel durchläuft, hängen von den absoluten Geschwindigkeiten des Aufhängepunktes ab. Dies gilt gleichfalls, wenn die Bewegung nicht harmonisch ist. Wenn nun z. B. zu einer gewissen Zeit die absolute Geschwindigkeit des bezeichneten Punktes gleich der maximalen Geschwindigkeit einer harmonischen Bewegung von 62,5 Perioden pro Secunde und einer Amplitude von 0,1 mm wäre, so wäre die entsprechende Neigung der Welle

$$\frac{2\pi a}{2000} = \frac{\pi}{10000}$$

und die Kraft

$$\frac{\pi}{10000} \times 4000 = 0,4 \pi g.$$

In diesem Falle würde also auf unsere Masse von 4000 g eine Kraft von nur etwa 1 g wirken.

Aus dieser Betrachtung kann man sich über die Grösse der ins Spiel tretenden Kräfte einigermaassen eine Vorstellung bilden.

Wir haben bis jetzt die verticalen Componenten der Verrückungen ausser Acht gelassen. Dieselben üben auf den hängenden Körper grössere Kräfte aus als die horizontalen Componenten. Denn es betrage z. B. die verticale Verrückung eines Aufhängepunktes $1/n$ von der elastischen Verlängerung, welche der Draht durch die Belastung erfahren hat, und es befinde sich der Körper noch in der Gleichgewichtslage, so ist die Kraft, welche ihn zu bewegen strebt, $= \pm 1/n$ seines Gewichtes. Da nun der Stahldraht im soeben aufgeführten Beispiel eine Verlängerung von kaum 1,5 mm erfahren würde, während das spannende Gewicht 4 kg betrug, so entsprächen Verrückungen von 0,1 mm schon Kräften von einigen Hectogrammen. Auch deshalb empfiehlt es sich lange Drähte zu benutzen.

Rein verticale Erschütterungen sind aber für Galvanometer und ähnliche Apparate am wenigsten schädlich. Nur soll die Bedingung erfüllt sein, dass die Störungen in den Stützpunkten A' , B' und C' gleichzeitig eintreffen, sonst würden Drehungsmomente um horizontale Axen auftreten und die Bewegungen des Instrumentes wären nicht rein vertical. In dem ungleichzeitigen Eintreffen der von ursprünglich gleichzeitigen verticalen Verrückungen herrührenden Wellen liegt vielleicht eine Hauptursache dafür, dass die Versuche, einen Apparat durch Unterstützung mittels Kautschuk, Filz oder Spiralfedern gegen das Rütteln zu schützen, in den meisten Fällen misslingen. Bei unserer Vorrichtung dagegen müssen die Impulse ziemlich genau gleichzeitig ankommen, weil die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Longitudinalwellen in Saiten fast ausschliesslich von deren Material und nur in geringem Maasse von der Spannung abhängig ist, und weil überdies noch die Spannung der drei Drähte als gleich vorausgesetzt werden darf.

Was nun den praktischen Werth der vorstehenden Betrachtungen anbelangt, so kann ich nur auf einige vorläufige Beobachtungen hinweisen, weil ein starkes, der Beschreibung entsprechendes Stativ mit verstellbarem Schwerpunkt noch nicht fertig ist. Ich habe aber Versuche angestellt mit einem Radiomikrometerkreise von 20 mg, der innerhalb eines gut 2 kg schweren Apparates an einem $1\frac{1}{2}$ Mikron dicken, 5 cm langen Quarzfaden aufgehängt war. Wenn der Apparat auf einem steinernen Pfeiler stand, zeigte das System eine so grosse Beweglichkeit, dass ein von dem Spiegelchen auf eine 2 m entfernte Scala entworfenen Lichtbild fortwährend Schwingungen von 10—20 mm Amplitude ausführte. Stand das Instrument auf einem nicht vom Fussboden isolirten Tische, so reichten ein Paar Schritte aus, um das Lichtbild in Schwingungen von mehreren Decimetern zu versetzen. Sobald jedoch der Apparat an drei dünnen Stahldrähten von 1,5 m Länge aufgehängt und in solcher Weise an diesen befestigt war, dass der Schwerpunkt nach roher Schätzung in der Unterstüzungsebene lag, so kam das Lichtbild innerhalb einer Minute ganz zur Ruhe und betrug die Unsicherheit der Einstellung gewiss keinen halben Millimeter mehr.

Bei diesem Versuche waren die Drähte aber an einem kleinen Balken befestigt, der auf zwei frei auf dem Fussboden stehenden Schränken aufgelegt war, sodass die Aufhängepunkte von den durch das Herumgehen verursachten Erschütterungen stark beeinflusst wurden. Dessen ungeachtet hatte kräftiges Stampfen auf den Boden nur ein Schwanken des Lichtbildchens über ein Paar Millimeter zur Folge. Die Dämpfer tauchten in Gläschen mit Oel.

Befestigte man an dem Apparat eine Masse von einem Kilogramm entweder über oder unter der Unterstützungsebene, so gerieth das Bildchen beim Stampfen in heftige Schwingungen mit einer Amplitude von 2—5 cm. Dagegen beeinflusste das Anbringen von zwei Kilogrammen in gleichen Entfernungen über und unter der Ebene $A' B' C'$, wobei der Schwerpunkt an Ort und Stelle blieb, die Ruhe des Systems nicht merklich.

Es ist also sehr leicht, sogar mit groben Hülfsmitteln die nöthigen Bedingungen bis auf eine solche Höhe zu verwirklichen, dass eine ganz erhebliche Beruhigung eintritt, und wenn man sich einige Mühe gibt, den Schwerpunkt genau in die Mitte des Unterstützungsdreiecks einzustellen, wird im allgemeinen das Ziel erreicht sein.

Indessen liessen einige Beobachtungen vermuthen, dass die Lage des Schwerpunktes noch ein wenig günstiger als gerade in der Unterstützungsebene gewählt werden könne, und zwar indem man ihn etwas *höher* bringt, falls nämlich — wie das meistens zutrifft — der Punkt, dem man vor allen anderen eine unveränderliche Stelle sichern möchte, oben in dem Instrumente liegt. Dieser Punkt — in unserem Falle der Aufhängepunkt des feinen Quarzfadens — macht ja, wenn der Schwerpunkt in der Unterstützungsebene liegt, dessen kleine übrig gebliebene Bewegungen vollständig mit. Befände sich aber der Schwerpunkt höher, irgendwo zwischen der Unterstützungsebene und dem bezeichneten Punkte, so könnte die der Schwerpunktsverschiebung entsprechende Bewegung des letzteren durch die jetzt hinzukommende Rotationsverrückung nahezu aufgehoben werden. Es versteht sich, dass diese Compensation höchstens nur für die rein erzwungenen Bewegungen eintreten könne; die Eigenschwingungen des Schwerpunktes und diejenigen um eine durch den Schwerpunkt

gehende horizontale Axe können sich in ihrer Wirkung, wegen der Verschiedenheit der Perioden, niemals aufheben.

Ob also diese kleine Abänderung wirklich eine Verbesserung darstellen würde, erfordert noch eine nähere experimentelle Untersuchung mittels einer Vorrichtung, welche ein ganz gleichmässiges und messbares Verschieben des Schwerpunktes gestattet.

Die Lieferung der beschriebenen Vorrichtung in jeder gewünschten Grösse hat die Firma P. J. Kipp & Zonen, J. W. Giltay, Opvolger, Delft, übernommen.

Amsterdam, Juni 1895.