Ueber Pendelschwingungen.

Von

DR. A. FREIH. V. BURG.

Vortrag, gehalten am 10. März 1875.

1. Als der noch kaum 19 Jahre alte Galilei, angeregt durch die Schwingungen eines von dem Gewölbe des Domes zu Pisa herabhängenden Kronleuchters, im Jahre 1582 die Gesetze der Pendelschwingungen entdeckte, hatte er wohl noch keine Ahnung von der grossen Rolle, welche das Pendel nicht nur in den Naturwissenschaften überhaupt, sondern auch im gewöhnlichen Leben spielen würde.

So geben uns die Pendelschwingungen Aufschluss über die abweichende Stärke oder Intensität der Schwerkraft in den verschiedenen Breitegraden, sowie von der damit zusammenhängenden Abplattung der Erde; liefern den Beweis, dass alle unsere auf der Erde befindlichen Körper, wie: Gold, Eisen, Kohle, Seide, Wolle, Wasser, Aether u. s. w. von derselben mit absolut gleicher Stärke angezogen werden, d. i. gleich schwer sind, so wie sie auch den einfachsten und augenscheinlichsten Beweis von der Achsendrehung unseres Erdballes geben; endlich kann man auch, um nur noch einer Eigenschaft zu erwähnen, die Länge des Pendels an einem bestimmten Ort der Erde gemessen, als ein Normalmass benützen.

2. Unter einem Pendel versteht man jeden Körper, welcher um eine horizontale Achse, insoferne diese nur

nicht durch seinen Schwerpunkt geht, schwingen kann, und zwar heisst ein solches Pendel ein physisches oder zusammengesetztes, auch materielles Pendel, um es von dem sogenannten mathematischen oder einfachen Pendel zu unterscheiden, welches nur ein ideales ist und aus einer geraden verticalen mathematischen (also nicht schweren) Linie besteht, an deren unterem Ende sich ein schwerer Punkt (also ohne Ausdehnung) befindet, welcher um das obere Ende dieser Linie in einer verticalen Ebene schwingen kann. Man kann sich annähernd ein solches Pendel verschaffen, wenn man ein kleines Blei- — oder überhaupt Metallkügelchen (zur leichteren Ueberwindung des Luftwiderstandes) — an einen feinen Faden befestiget und dasselbe wie ein Bleiloth um einen festen Aufhängpunkt in einer verticalen Ebene hin und her schwingen lässt; je gewichtsloser dabei der Faden (dessen Länge zugleich auch die Pendellänge vorstellt) und je kleiner das Kügelchen ist, desto mehr hat man sich der Eigenschaft des mathematischen Pendels genähert, obschon es in der Wirklichkeit immer noch ein materielles Pendel bleibt.

Zur leichteren Entwickelung der Pendelgesetze setzt man eben ein mathematisches Pendel voraus, und überträgt dann diese Gesetze mit den nöthigen Modificationen auf das physische oder zusammengesetzte Pendel.

3. Theorie des einfachen Pendels. Bezeichnet in der nebenstehenden Figur 1 CB die Länge des

Pendels, B den schweren Punkt und C den Aufhängpunkt, um welchen dasselbe frei schwingen kann; so wird, wenn dasselbe aus seiner Ruhelage CB in die schiefe Lage CA gebracht, also der Punkt B bis A gehoben und dann frei gelassen wird, der schwere Punkt B durch die Schwerkraft getrieben, zwar nicht vertical, sondern, daran durch den Faden gehindert, in der durch C gehenden verticalen Ebene im Kreisbogen AB mit gleichförmig beschleunigter Bewegung (Bd. XI dieser Vereinsschriften, S. 507) herabgehen und im tiefsten Punkte B dieselbe Geschwindigkeit erlangen, als ob der schwere Punkt durch die Höhe bB frei herabgefallen wäre. Mit dieser Geschwindigkeit steigt aber dieser Punkt in Folge des Beharrungsvermögens (S. 506) mit gleichförmig verzögerter Bewegung genau eben so hoch, d. i. bis zu einem Punkte A' des Kreisbogens auf der anderen Seite hinauf, welcher mit dem Punkte A in derselben Horizontalen AA' liegt; das Pendel schwingt sonach durch den Bogen ABA', und da dasselbe in der schiefen Lage CA' nicht ruhen kann, so muss es aus dem gleichen Grunde denselben Bogen $A'BA$ zurückschwingen, wobei es sich durch den Winkel $A'CB$ (den sogenannten Elongationswinkel) gleichförmig beschleunigt, und durch den eben so grossen Winkel BCA gleichförmig verzögernd bewegt. Im Punkte A momentan zur Ruhe gekommen, treten nun genau wieder die ursprünglichen Bedingungen ein, in deren Folge der schwere Punkt oder das Pendel abermals durch den Bogen ABA' und von da wieder zurück durch $A'BA$ schwingen muss. Wäre am Aufhängepunkt C keine Reibung und für das Kügelchen kein Luftwiderstand vorhanden, so müsste ein solches Pendel seine Schwingungen ohne Aufhören fortsetzen, und man würde so auf die einfachste Art ein mechanisches Perpetuum mobile, welchem von je her so eifrig nachgejagt wurde, besitzen; durch diese Widerstände, die man zwar auf ein Minimum herabbringen, jedoch in der Wirklichkeit niemals ganz verschwinden machen kann, wird der Schwingungsbogen ABA' oder die sogenannte Amplitude immer kleiner und kleiner und reducirt sich endlich auf Null, so, dass das Pendel in der Ruhelage CB stehen bleibt.

Die Zeit, welche das Pendel braucht, um den Schwingungsbogen ABA' oder den gleich grossen $A'BA$ zu beschreiben, heisst die Schwingungszeit und es hängt diese von der Länge des Pendels ab, indem kurze Pendel schneller, lange dagegen langsamer schwingen; dabei braucht das Pendel, um durch den halben Bogen BA' hinauf zu steigen dieselbe Zeit, wie um durch den eben so grossen Bogen AB herabzugehen und umgekehrt.

Braucht ein Pendel zu einem Schwunge genau eine Secunde, so heisst das Pendel ein Secundenpendel.

4. Gesetze der Pendelschwingungen. Als erstes Gesetz muss constatirt werden, dass, wenn das Pendel überhaupt nur kleine Schwingungen macht, nämlich der Schwingungsbogen ABA' nicht über 2 bis 3 Grade beträgt, die Schwingungsdauer von der Grösse

dieses Bogens ganz unabhängig ist, so dass also innerhalb dieser Grenze das Pendel genau dieselbe Zeit braucht, um durch den kleinen Bogen aBa', wie um durch den grösseren ABA' zu schwingen *). Das zweite Gesetz bezieht sich auf die Schwingungszeiten ungleich langer Pendeln, die an demselben Orte der Erde schwingen; diese Schwingungszeiten verhalten sich nämlich wie die Quadratwurzeln aus den Pendellängen, wornach also das 4mal so lange Pendel die 2fache, das 9mal so lange die 3fache Zeit u. s. w. des nur 1mal so langen Pendels braucht, indem 2, 3, 4, . . . die Quadratwurzeln aus den Zahlen 4, 9, 16, u. s. w. sind. Würde also z. B. ein 3 Fuss langes Pendel Secunden schwingen, so würde ein 12 Fuss, d. i. 4mal so langes Pendel zu jeden Schwung zwei Secunden brauchen oder Doppel-Secunden schwingen **).

5. **Physisches oder zusammengesetztes** (materielles) **Pendel**. Wie bereits erwähnt, existirt in der Wirklichkeit streng genommen kein einfaches

*) Bei grösseren Schwingungsbögen ABA' trifft diese Eigenschaft nicht mehr zu, und man müsste durch eine besondere Vorrichtung das Pendel anstatt im Kreisbogen ABA' in einer **Cykloide** schwingen machen, dann würde dasselbe auch bei noch so grossen Schwingungsbögen in **gleichen** Zeiten, d. i. isochron schwingen. — Für kleine Bögen fällt eben der cykloidische mit dem Kreisbogen sehr nahe zusammen.

**) Die mathematische Berechnung gibt für die Schwingungszeit des einfachen Pendels, wenn dasselbe im leeren oder mathematisches Pendel, und es müssen die für dasselbe gefundenen Gesetze nunmehr auf das phy-

---

Raume schwingt und nur kleine Schwingungen macht, die Formel:

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \; . \; . \; (1)$$

wobei t die Schwingungszeit in Secunden, l die Länge des Pendels, g die Intensität der Schwere an dem betreffenden Orte, wo das Pendel schwingt, u. z. beide Grössen in ein und demselben Längenmass ausgedrückt, und π die bekannte Verhältnisszahl ($\frac{22}{7}$ oder $\frac{355}{113}$ oder 3·1416) des Durchmessers eines Kreises zu seinem Umfange bezeichnet; drückt man dabei l in Wiener Fuss aus, so ist für Wien $g = 31$ (Bd. XI, S. 508) zu setzen; würde man dagegen die Pendellänge l in Metermass ausdrücken, so müsste man für g den Werth 9·81 setzen.

Aus dieser Formel erhält man einfach für zwei Pendeln von den Längen l und l', deren Schwingungszeiten beziehungsweise t und t' sind, wenn sie an demselben Orte schwingen, die Proportion:

$$t : t' = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} : \pi \sqrt{\frac{l'}{g}} = \sqrt{l} : \sqrt{l'}$$

(wenn man nämlich abkürzt) oder auch

$$l : l' = t^2 : t'^2 \; . \; . \; (\alpha)$$

d. h. die Längen verhalten sich wie die Quadrate der Schwingungszeiten. Macht das eine Pendel in einer bestimmten Zeit z. B. in einer Minute n, das andere in derselben Zeit n' Schwingungen, so ist auch, weil dann (s) $t = \frac{60}{n}$ und $t' = \frac{60}{n'}$ ist, für die Beobachtung bequemer:

$$l : l' = n'^2 : n^2 \; . \; . \; . \; (\beta).$$

Schwingt das zweite Pendel von der Länge l' an einem anderen Ort der Erde, an welchem die Intensität der Schwere sische Pendel übertragen werden. Diese Gesetze sowie die obige Formel (1) in §. 4 haben nun auch für dieses

---

durch g' gemessen wird, so ist dafür die Schwingungszeit (nach der obigen Form. 1)

$$t' = \pi \sqrt{\frac{l'}{g'}}$$

folglich mit dem ersten Pendel verglichen:

$$t : t' = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} : \pi \sqrt{\frac{l'}{g'}} = \sqrt{\frac{l}{g}} : \sqrt{\frac{l'}{g'}}$$

Sollen beide Pendel gleiche Schwingungszeiten besitzen, soll nämlich $t = t'$ sein, so muss auch $\sqrt{\frac{l}{g}} = \sqrt{\frac{l'}{g'}}$ oder $\frac{l}{g} = \frac{l'}{g'}$ sein, woraus sofort die Proportion $g : g' = l : l' \ldots (\gamma)$ also der Satz folgt, dass sich unter der gemachten Bedingung die Schwerkräfte wie die Pendellängen verhalten. Wäre daher z. B. die Intensität der Schwere unter dem Aequator nur halb so gross, wie unter den Polen, so müsste ein Pendel, welches unter den Polen Secunden schwingt, unter dem Aequator auf die Hälfte verkürzt werden, um auch dort als Secundenpendel zu gelten.

Um die Intensität der Schwere d. i. den Werth von g an irgend einem bestimmten Orte der Erde selbst zu finden, darf man blos an diesem Orte für ein Pendel von der Länge l die Schwingungszeit t beobachten und aus der obigen Formel *(1)* g bestimmen, dann hat man:

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2} = 9{\cdot}87 \frac{l}{t^2}$$

oder wenn man das Secundenpendel, dessen Länge wir mit L bezeichnen wollen, benützt, auch, wegen $t = 1$ annähernd:

$$g = 9{\cdot}87\ L$$

da für Wien die Länge des Secundenpendels, dieses auf den

Pendel ihre volle Giltigkeit und es kommt nur darauf an zu erfahren, was man bei einem materiellen Pendel unter der Länge l des Pendels zu verstehen hat.

Lässt man neben einem materiellen Pendel, von was immer für einer Form, ein Pendel welches (nach §. 2) als ein einfaches gelten kann schwingen, und verlängert oder verkürzt den Faden des letzteren so lange, bis beide Pendeln vollkommen gleiche Schwingungszeiten besitzen, so gilt die Länge des einfachen, auch für die Länge des materiellen Pendels.

Lässt man z. B. eine dünne cylindrische Stange (einen dünnen Draht) von durchaus gleicher Dichte von 3 Fuss Länge um ihr oberes Ende schwingen, so findet man, dass ein einfaches Pendel von 2 Fuss Länge (dieses vom Aufhängpunkt des Fadens bis zum Mittelpunkt des Kügelchens gemessen) genau eben so, d. i. isochron schwingt. Für die Theorie hat daher dieses physische Pendel eine Länge von $l = 2$ Fuss. Man nennt den Punkt O, welcher in der geometrischen Achse dieser Stange in der Entfernung von 2 Fuss von dem oberen Endpunkt oder der Schwingungsachse absteht, den Mittelpunkt des Schwunges, für diese cylindrische Stange. Kann man daher überhaupt für ein physisches Pendel den Mittelpunkt des Schwunges be-

---

leeren Raum und das Niveau der Meeresfläche reducirt, sehr nahe 3·144 Wiener Fuss beträgt, oder $L = 3{\cdot}144$ ist, so ist für Wien $g = 31{\cdot}03$ Fuss (wofür gewöhnlich 31 gesetzt wird) oder 0·99395 Meter.

stimmen, so gibt die Entfernung dieses Punktes von der Schwingungsachse oder dem Aufhängepunkt sofort die Länge des einfachen Pendels, welches mit dem betreffenden materiellen Pendel die gleichen Schwingungen macht, und damit hat man auch den Werth der in der genannten Formel (1) vorkommenden Länge l des äquivalenten einfachen Pendels *).

6. Tactmesser oder Metronom. Ein materielles oder physisches Pendel kann man, selbst wenn

---

*) Nach der Theorie findet man den Abstand des Mittel, punktes des Schwunges vom Aufhängepunkt d. i. die Länge l des einfachen Pendels, welches mit dem materiellen dieselben Schwingungen macht, durch die Formel

$$l = \frac{m}{M.d} \quad . . (2)$$

in welcher m das sogenannte Moment der Trägheit des Pendels, bezogen auf eine durch den Aufhängepunkt gehende Schwingungsachse, M das Gewicht des Pendels und d den Abstand des Schwerpunktes des Pendels von der Schwingungsachse, bezeichnet.

So ist z. B. nach der Theorie für eine materielle gerade Linie (also wie für einen geraden dünnen Draht) von der Länge L, welche um ihr oberes Ende schwingt:

$$m = {}^1/_3\ M\ L^2 \quad \text{und} \quad d = {}^1/_2\ L,$$

daher nach dieser Formel:

$$l = {}^1/_3\, M\, L^2 : {}^1/_2\, M\, L = {}^2/_3\, L$$

(wie bereits bemerkt).

Für eine an einem als gewichtslos angesehenen feinen Faden hängende Kugel vom Halbmesser γ, welche um einen von ihrem Mittelpunkt um d abstehenden Aufhängepunkt schwingt, findet man ebenso

$$l = {}^2/_5\, \frac{r^2}{d} + d$$

es ganz kurz ist, so einrichten, dass es nur langsame Schwingungen macht, dazu braucht man nur die Pendelstange über die Schwingungsachse nach aufwärts zu verlängern und am oberen Ende ein kleines Gegengewicht, welches durch die Pendellinse mit bewegt werden muss (also für das Schwingen ein Hinderniss bildet, und die Schwingungen retardirt), anzubringen *).

---

also daraus den Abstand des Mittelpunktes des Schwunges dieses Pendels unter dem Mittelpunkt der Kugel, d. i.

$$l - d = {}^2/_5 \frac{r^2}{d}.$$

Würde man daher, um sich annähernd nach §. 2 ein einfaches oder mathematisches Pendel zu verschaffen, ein Kügelchen von nur vier Linien oder $^1/_3$ Zoll Durchmesser benützen, und hätte der Faden vom Aufhänge- bis zum Mittelpunkt dieses Kügelchens gemessen eine Länge von 36 Zoll (ungefähr die Länge eines Secundenpendels), so würde wegen $r = {}^1/_6$ und $d = 36$ der Mittelpunkt des Schwunges O dieses Pendels nur um $^2/_5 \times \frac{1}{36} : 36 = \frac{1}{3240}$ Zoll oder $\frac{1}{270}$ Linie unter dem Mittelpunkte der Kugel liegen, so, dass man für alle gewöhnlichen Fälle, diesen Mittelpunkt selbst für den Mittelpunkt des Schwunges nehmen, also $l = d$ setzen kann.

*) Durch dieses Verfahren fällt nämlich der Schwerpunkt des mit dem Gegengewichte versehenen Pendels mehr oder weniger nahe unter die Schwingungsachse, so dass dadurch in der obigen Formel (2) die Entfernung d klein, also der Werth des Bruches oder l gross wird, und sonach dieses physische Pendel wie ein langes einfaches schwingt. Würde der Schwerpunkt des Pendels in die Schwingungsachse selbst fallen, also $d = o$ sein, so würde aus der genannten Formel $l = \infty$ d. h. unendlich gross werden, was so viel sagen will, dass das Pendel zu einem Schwung eine

Um ein Pendel zu construiren, dessen Schwingungszeiten nach Belieben kleiner oder grösser werden, welches also schneller oder langsamer schwingt, braucht man das genannte Gegengewicht, welches, wie in Figur 2 die Form einer Hülse *a* haben kann, nur verschiebbar einzurichten und dasselbe so zu stellen, dass der dadurch veränderliche Schwerpunkt des Pendels in eine grössere oder geringere Entfernung unter die Drehungsachse *C* fällt.

7. Auf dieser Eigenschaft beruht die Construction der musikalischen Tactmesser, unter denen das Metronom von Mälzel (aus Wien) das bekannteste ist. Mit diesem kleinen Instrument kann man das Zeitmass des Tactes in den verschiedenen Tonstücken viel genauer als durch die Ausdrücke der Componisten: Allegro, Largo, Adagio, Presto u. s. w. angeben.

Das die Pendelstange bildende, meist hölzerne oder eiserne dünne Stäbchen, welches am unteren Ende eine kleine Kugel oder Scheibe *B* aus Blei trägt (Fig. 2), wird an seinem oberen Theile, durch Versuche in mehrere kleine Theile so getheilt, dass das Pendel, je nachdem man das Gegengewichtchen auf den Theilstrich 30 (ganz oben angebracht) oder auf jenen (unten markirten) 160 schiebt, das Pendel per Minute 30 oder 160

unendlich grosse Zeit brauchen würde, also eigentlich gar nicht mehr schwingt, was damit übereinstimmt, dass das Pendel jetzt in jeder, also auch in der schiefen Lage in Ruhe bleibt (übereinstimmend mit der Definition des Schwerpunktes).

Schwingungen macht. Ist dann im betreffenden Tonstück z. B. ♩ = 50 Mälz. (als Larghetto) verzeichnet, so hat man das Gewichtchen oder die Hülse *a* nur auf die Zahl 50 zu schieben und jede Note von der Bedeutung ♩ (also eine Viertelnote) so lange auszuhalten, bis das Pendel Einen Schwung gemacht hat. Um das Pendel längere Zeit im Gange zu erhalten und zugleich die Schwingungen durch einen hörbaren Ausschlag zu markiren, wird gewöhnlich noch ein kleines Uhrwerk damit in Verbindung gebracht.

8. Das Reversionspendel. Sowohl theoretisch als durch Versuche lässt sich erweisen, dass wenn *O* der Mittelpunkt des Schwunges eines um *C* schwingenden Pendels ist, und man durch Umkehrung des Pendels dasselbe nun um den Punkt *O* schwingen lässt, sofort der vorige Aufhängpunkt *C* zum Mittelpunkt des Schwunges für diese neue Lage des Pendels wird; es schwingt also das Pendel in beiden Fällen, es mag um *C* oder *O* schwingen, vollkommen gleich oder isochron mit einem einfachen Pendel von der Länge *C O* (§. 5). Diese Eigenschaft bietet nun das einfachste und genaueste Mittel dar, zur Bestimmung der wahren Länge eines materiellen Pendels, d. h. jener Länge l (in der obigen Formel [1]) des einfachen Pendels, welches mit dem betreffenden physischen Pendel dieselben Schwingungen macht.

Lässt man z. B. die mit zwei Messerschneiden (als Schwingungsachsen) *C* und *C'*, wovon die eine, z. B. jene *C'*, verschiebbar ist, versehene Stange *A*, Figur 3, um die Achse *C* schwingen und ist dafür *C'* der Mittelpunkt des Schwunges, so muss, wenn man das Pendel umkehrt und es nun um C' schwingen lässt, dasselbe genau wie vorhin, und zwar wie ein einfaches Pendel, von der Länge $l = CC'$ schwingen. — Besitzt es im zweiten Falle nicht dieselbe Schwingungszeit, so liegt die Schneide C' noch nicht genau in dem zuerst genannten Mittelpunkt des Schwunges, und man muss die verschiebbare Schneide C' (mittelst einer Mikrometerschraube) der ersten C so lange nähern, oder von ihr entfernen, bis es durch wiederholte Versuche gelungen ist, mit dem Pendel in beiden Fällen (es mag um C oder C' schwingen) vollkommen gleiche Schwingungszeiten zu erhalten. Die Entfernung dieser beiden Schneiden C und C', die man mittelst eines Comparators sehr scharf, gleichsam mathematisch genau messen kann, gibt dann die genaue geltende Länge l dieses Pendels.

Beträgt die Schwingungszeit dieses materiellen Pendels an irgend einem Orte der Erde, Eine Sekunde, so hat man durch das angegebene Verfahren die genaue Länge des einfachen Secundenpendels für diesen Ort.

9. Schon der deutsche Physiker Bohnenberger, machte im Jahre 1810 auf diese Eigenschaft des Reversionspendels aufmerksam, allein erst acht Jahre später, benützte der englische Capitän Kater (welcher von Bohnenberger's Bemerkung wohl kaum eine Kenntniss hatte) dieses Pendel, als er im Jahre 1818 von der königlichen Societät in London den Auftrag erhielt, die Länge des einfachen Secundenpendels mit der grössten Genauigkeit

zu finden, weil man das englische Fundamentalmass auf dasselbe gründen wollte.

Mit Hilfe dieses Reversionspendels, welches auch das unveränderliche genannt wurde, weil man dasselbe zu den Beobachtungen in verschiedenen Breitengraden der Erde vollkommen intact oder unverändert liess, und aus der Zahl der Schwingungen desselben nach dem Satze: „dass sich die Pendellängen gerade wie die Quadrate der Schwingungszeiten, oder verkehrt wie die Quadrate der Zahlen verhalten, welche angeben, wie viele Schwingungen jedes Pendel in einer beliebigen, jedoch gleichen Beobachtungszeit macht“ (Note in §. 4 Proportion [α] und [β]), berechnete man die Länge des einfachen Secundenpendels an dem betreffenden Orte der Erde mit der grössten Genauigkeit.

10. Abnahme der Schwerkraft von den Polen gegen den Aequator. Selbst der berühmte Huyghens, welcher die Länge des Secundenpendels als Normalmass vorschlug und später zeigte, dass diese Länge das einfachste und sicherste Mittel darbiete, um die wahre Grösse der Schwerkraft der Erde zu bestimmen, war bis zum Jahre 1672 noch der Meinung, dass das Secundenpendel an allen Orten der Erde gleich lang sei, bis der Astronom Richer, welcher um diese Zeit von Paris aus eine wissenschaftliche Reise nach Cayenne (4^0 $56'$ nördl. Breite) unternahm, die Erfahrung machte, dass an dem letztern Orte seine Pendeluhr, welche in Paris ganz genau zeigte, täglich um nahe $2\frac{1}{2}$ Minuten zu langsam ging und er zur nöthi-

gen Correctur das Pendel derselben um $^5/_4$ Linien verkürzen, dagegen sobald er nach Paris zurückgekehrt, zur Erreichung des richtigen Ganges dasselbe genau wieder um eben so viel verlängern musste *).

Durch diese Beobachtung wurde zugleich auch die schon von Newton geäusserte Vermuthung, dass unsere Erde keine genaue Kugelform besitze, sondern an den Polen abgeplattet und unterm Aequator ausgebaucht sei, mit bestätigt, indem durch dieselbe festgestellt war, dass die Schwerkraft von den Polen gegen den Aequator (welcher vom Mittelpunkt der Erde entfernter ist) abnimmt; allerdings hat an dieser Abnahme die durch die Achsendrehung der Erde erzeugte Centrifugalkraft den bei weitem grösseren Antheil (M. s. Bd. XI. Seite 525) **).

11. Uhrpendel. Bald, nachdem Galilei die Grundgesetze des Pendels entdeckt hatte, machte sich der

*) Aus der Proportion (γ) in der Note zu §. 4 folgt, dass sich die Schwerkräfte wie die Pendellängen verhalten; da nun das Secundenpendel in Paris und Cayenne beziehungsweise 993·86 und 991·10 Millim. lang ist, so ist auch die Schwerkraft in Cayenne in demselben Verhältniss kleiner, als in Paris.

**) Um eine kleine Uebersicht über die erwähnte Abnahme der Schwere also auch der Pendellänge gegen den Aequator hin zu geben, will ich einige Beobachtungen des verdienstvollen englischen Physikers und Mathematikers Sabine anführen, die er auf seinen zu diesem Behufe unternommenen Reisen gemacht und im Jahre 1825 in London (*„A pendulum expedition"*) veröffentlicht hat. In der nach-bekannte holländische Mathematiker und Physiker Huyghens, durch die genaue Bestimmung des Mittelpunktes des Schwunges (§. 5) eines physischen Pendels, sowie insbesondere durch die Anwendung desselben zur Regulirung der Uhren (um das Jahr 1656), wodurch erst eine genaue Zeitmessung möglich wurde, besonders verdient.

---

stehenden kleinen Tabelle sind die Längen des Sekundenpendels (diese überall auf das Niveau der Meeresfläche reducirt) für die genannten Orte in englischen Zollen angegeben:

Ort	Breite	Länge des Sekunden-Pendels in englischen Zollen
St. Thomas	0° 24′ 41″	39·012
Ascension	7 55 48 S.	39·024
Jamaica	17 56 7 N.	39·035
New-York	40 42 43 „	39·101
London	51 31 8 „	39·139
Dortheim (Norwegen)	63 25 54 „	39·174
Spitzbergen	79 49 58 „	39·215

Nach den Beobachtungen des Capitän Kater mit seinem unveränderlichen Pendel beträgt die reducirte Länge des Secundenpendels unter dem Aequator 39·00734 engl. Zolle. Ebenso fand er, die Länge desselben in Millimeter ausgedrückt, für London = 994·1234; für Paris (48° 50′ 14″) fanden Sabine und Kater dasselbe = 993·8606; Biot = 993·8668; Lisganig für Wien (48° 12′ 36″) = 993·83. Mit ganz besonderer Genauigkeit fand Bessel diese Länge für Königsberg (54° 42′ 50″) = 994·4099 Millim.

Hiezu bringt man, um hier nur von den Wand- oder Standuhren zu reden, mit dem in einer verticalen Ebene schwingenden Pendel, welches für den gewöhnlichen Gebrauch Secunden oder halbe Secunden der mittleren Sonnenzeit (bei astronomischen Uhren Sternzeit) *) schwingt, einen Mechanismus in Verbindung, durch welchen erstens dem Pendel nach jedem Schwunge mittelst eines kleinen Impulses oder Antriebes genau so viel an Kraft ersetzt wird, als es durch die, zum Theil schon oben erwähnten Hindernisse in seiner Bewegung verliert, um die Schwingungsbögen, folglich auch die Schwingungszeiten vollkommen gleich zu erhalten, und durch welchen zweitens die Anzahl der Schwingungen mechanisch markirt werden und so die verflossene Zeit von selbst gemessen und bezeichnet wird.

Einer der gewöhnlichsten Mechanismen besteht im Wesentlichen aus einem gezahnten Rade *A*, Fig. 4, um dessen Welle *a* sich eine Schnur mit dem daran hängenden Gewicht *G* wickelt, durch dessen Herabsinken das Rad, in der durch den Pfeil angedeuteten Richtung, umgedreht wird. (Oft besteht die bewegende Kraft anstatt des Gewichtes, in einer spiralförmig aufgewickelten Stahlfeder.)

---

*) Ein Sterntag beträgt in mittlerer Sonnenzeit 23 St. 56 Min. 4·09 Sec., dagegen ein mittlerer Sonnentag 24 St. 3 Min. 53 Sec. in Sternzeit; der Sterntag ist daher nahe um 4 Min. (die Stunde um nahe 10 Sec.) kürzer als der (mittlere) Sonnentag; es müsste also das Pendel unserer Uhren um Etwas verkürzt werden, wenn die Uhr Sternzeit zeigen sollte.

Ueber diesem gezahnten Rade, befindet sich in derselben Ebene der sogenannte Anker, welcher aus zwei miteinander fest verbundenen Armen *f* und *g* besteht und um *O* hin und her schwingen kann, dabei können die Klinken oder Haken *m* und *h*, wovon der eine nach innen, der andere nach aussen abgeschrägt ist, während sich das Rad *A* in der angedeuteten Richtung dreht und der Anker seine Schwingungen macht, abwechselnd bald auf der rechten, bald auf der linken Seite in die Zähne des Rades eingreifen und dasselbe in seiner Bewegung momentan aufhalten oder hemmen. Eine solche Vorrichtung heisst deshalb auch eine Hemmung (Echapement) und hier insbesondere, eine Ankerhemmung.

Die Oscillationen des Ankers werden durch die Pendelschwingungen selbst, und zwar mit diesen gleichzeitig am einfachsten dadurch hervorgebracht, dass der an der Drehachse *O* desselben angebrachte Arm *l*, an seinem untern Ende rechtwinkelig abgebogen ist und in einer Gabel endet, durch welche die Pendelstange durchgeschoben wird. — (Oder der abgebogene Arm, wird durch einen in der Pendelstange angebrachten Längenschlitz durchgesteckt).

Hat daher das schwingende Pendel, wie es in der Zeichnung dargestellt ist, nach rechts seinen Ausschlag vollendet und dabei den Anker auf der linken Seite in das gezahnte Rad zum Eingriffe gebracht, so stösst der Zahn *n* an den Ankerhaken *m* und hemmt dadurch für einen Moment den Fortgang des Rades *A*, welches sonst wegen des herabsinkenden Gewichtes in der Richtung des Pfeiles, eine beschleunigte Bewegung annehmen würde.

Bei dem Zurückschwingen des Pendels (und mit diesem auch des Ankers) löst sich der Haken *m* aus, lässt nämlich den Zahn *n* wieder frei und das gezahnte Rad kann seine Drehung fortsetzen; doch nicht lange, weil dann durch die neue Stellung des Ankers der rechts liegende Haken *h* in das Rad eingreift und dasselbe, indem der Zahn *s* an diesen Haken *h* anstösst, ebenfalls wieder auf einen Moment hemmt und zum Stillstand bringt; auf diese Weise rückt das Zahnrad nach jedem Hin- und Herschwung des Pendels stossweise um Eine, folglich nach jedem einfachen Schwunge oder Pendelschlag, um eine halbe Zahnabtheilung vor. Hat nun das Rad 30 Zähne und befestigt man auf der Achse *c* dieses Rades einen Zeiger, so durchlauft derselbe in 60 Sprüngen oder Pendelschlägen den Umfang eines ganzen Kreises; ist daher das Pendel ein Secundenpendel, so markirt der Zeiger springende Secunden und durchläuft den ganzen Kreis in 60 Secunden oder 1 Minute.

Der durch die Widerstände entstehende Kraftverlust wird dem oscillirenden Pendel nach jedem Schwunge dadurch wieder ersetzt, dass der Zahn an der schiefen Fläche des austretenden Ankerhakens hinschleifend diesem einen kleinen Impuls gibt, oder eine geringe Beschleunigung erzeugt *).

*) Zur genaueren Erklärung des hiebei stattfinden Vorganges, wurde in den Figuren 5, 6 und 7 der Anker und das Zahn- oder Hemmrad im grösseren Massstab in drei

12. Da die Pendelstange, namentlich wenn sie aus Metall besteht, durch die Wärme länger, durch die

---

verschiedenen Stellungen u. z. in jener (5), in welcher das Pendel seinen Schwung von rechts nach links soeben beginnt, ferner in welcher beim weiteren Fortgange (6) die Zahnspitze von *s* eben an der schrägen Abschnittsfläche des Hakens *h* steht, und endlich (7), in welcher das Pendel seinen Schwung nach links eben vollendet hat und seinen Rückschwung von links nach rechts beginnt.

Man sieht leicht, dass bei jedem Schwunge Kraftverlust eintritt, in dem Momente, in welchem die innere Hakenfläche *m* (5) an der Zahnfläche *n*, und die äussere Hakenfläche *h* (7) an der Zahnfläche *s* hinschleift, u. z. ist dieser Kraftverlust um so grösser, je grösser der Schwingungsbogen des Pendels ist, weil dadurch auch die aufeinander schleifenden Flächen zunehmen; andererseits wird aber dem Pendel jedesmal Kraft ersetzt, wenn eine Zahnspitze (wie in Fig. 6) an der Abschrägung eines der beiden Haken *h* oder *g* hingleitet, u. z. um so mehr, je kleiner der Schwingungsbogen des Pendels ist, indem (weil der kleinere Bogen §. 4 in einer eben so langen Zeit als der grössere zurückgelegt wird) das Pendel mit geringerer Geschwindigkeit schwingt und also auch der Ankerhaken langsamer ausweicht, und vom Motor aus stärker gepresst oder geschoben wird. Fängt daher das Pendel mit kleinen Bögen zu schwingen an, so ist der Kraftverlust noch klein, und der Kraftzuwachs gross; dadurch wird der nächste Schwung grösser und damit nimmt der Kraftverlust zu, der Ersatz dagegen ab, und so stellt sich schon nach einigen Schwingungen zwischen dem nach jedem Schwunge entstehenden Kraftverlust und Kraftersatz das Gleichgewicht von selbst her oder es tritt dabei sehr bald der sogenannte B e h a r r u n g s z u s t a n d, u. z. nach Umständen, ebenso für einen grösseren, wie für einen kleineren Schwingungsbogen des betreffenden Pendels ein.

Kälte kürzer wird, so würde eine Pendeluhr im Sommer langsamer, und im Winter schneller gehen. Zur Vermeidung dieses Uebelstandes, benützt man, besonders bei astronomischen Uhren, welche immer vollkommen genau gehen müssen, ein sogenanntes Compensationspendel, welches den Zweck hat, den Mittelpunkt des Schwunges (§. 5) innerhalb der Grenzen der gewöhnlichen Temperatursveränderungen genau in seiner Lage oder Entfernung von der Schwingungsachse zu erhalten.

Unter den verschiedenen Modificationen, ist eines der gebräuchlichsten, nämlich das sogenannte Rostpendel, in der dargestellten Figur 8 skizzirt. Dasselbe besteht gewöhnlich aus zwei Eisenstäben *E* und zwei Zinkstäben *Z*, von denen die beiden äusseren *EE* an den Querstücken *ab* und *ef*, dagegen die beiden innern Zinkstäbe *ZZ* mit den Querstegen *ef* und *cd* verbunden sind; die Linse *L* des Pendels ist ebenfalls an eine, im Querstege *cd* befestigte eiserne Stange *S*, welche durch eine in dem Querstücke *ef* angebrachte Bohrung durchgeht und sich in dieser auf und abschieben kann, befestiget; das ganze rostförmige Pendel schwingt dabei um den Punkt *C*.

Dehnen sich nun durch die Wärme die drei Eisenstäbe *EES* aus, so wird der Mittelpunkt des Schwunges nach abwärts bewegt, oder vom Aufhängepunkt *C* entfernt, dagegen wieder durch die Ausdehnung der beiden Zinkstäbe *ZZ*, wodurch der Quersteg *cd* mit der Stange *S* nach aufwärts bewegt wird, dem Aufhängepunkt oder der Schwingungsachse *C* genähert. Bei einem richtigen

Verhältnisse zwischen den Längen der Eisen- und Zinkstäbe, compensiren sich die beiden Bewegungen der Art, dass die Entfernung des Mittelpunktes des Schwunges von der Schwingungsachse, folglich auch die geltende Länge des Pendels ungeändert bleibt *).

Eine zweite und in der neueren Zeit noch häufiger angewendete Compensation besteht darin, dass man mit der Pendelstange ein Gefäss (gewöhnlich einen hohlen Glascylinder) welches Quecksilber enthält, in Verbindung bringt. Bewegt sich nun durch die Ausdehnung der z. B. eisernen oder stählernen Pendelstange, der Schwerpunkt der Quecksilbersäule im Gefäss nach abwärts, so hebt er sich bei richtiger Anordnung wieder um eben so viel durch die Ausdehnung der Quecksilbersäule, und es bleibt auch in diesem Falle der Mittelpunkt des Schwunges unverändert.

Bei Taschenuhren wird das Pendel durch die sogenannte Balance, nämlich einen Metallring (Schwungrad) ersetzt, welcher durch eine feine Spiralfeder hin und her bewegt wird.

Die bewegende Kraft ist dabei immer eine gespannte Stahlfeder (Uhrfeder) **).

---

*) Da sich Zink im Verhältniss von 122 : 294 (oder 1:2·41) mehr ausdehnt als Eisen, so darf man die Längen der Stangen nur so einrichten, dass dabei $E + S : Z = 294 : 122$ stattfindet.

**) Statt der Regulirung durch ein hin- und herschwingendes Pendel, welches eine periodische Bewegung besitzt, kann eine solche auch durch eine continuirliche gleich-

13. Bessel's Pendelversuche. Die Frage, ob alle unserer Erde angehörigen Körper von dieser mit gleicher Stärke angezogen werden oder gleich schwer seien, beschäftigte die Naturforscher schon vor langer Zeit. Da nun die Schwingungszeiten des Pendels (§. 4) von der Intensität der Schwere oder der Anziehung der Pendellinse durch die Erde abhängen, so bilden die Pendelschwingungen ein sehr einfaches und verlässliches Mittel zur Beantwortung dieser höchst wichtigen Frage.

Schon Newton benützte das Pendel hiezu, indem er der Linse die Form einer hohlen Kugel gab und diese abwechselnd mit den verschiedenartigsten Stoffen und Körpern füllte; er erhielt zum Beweise, dass alle diese verschiedenartigen Körper mit gleicher Stärke von dem Erdballe angezogen werden, für eine bestimmte Zeit

---

förmige Bewegung erzielt werden, wenn man dazu, wie z. B. bei Tertien-Uhren, bei astronomischen Fernröhren, welche einem in diese eingetretenen Stern folgen sollen u. s. w., ein konisches oder Centrifugalpendel benützt.

Ein solches Pendel erhält man, wenn man den schweren Punkt oder das Kügelchen A (Fig. 9) eines Fadenpendels CA, anstatt in einer durch C gehenden verticalen Ebene schwingen zu lassen, durch einen horizontalen Kreis $ADBA$ mit gleichförmiger Geschwindigkeit um diesen Punkt C herumlaufen lässt; dabei beschreibt der Faden CA des Pendels die Oberfläche eines senkrechten oder geraden Kegels $CADB$.

Die Umlaufzeit dieses Pendels ist genau doppelt so gross wie die Schwingungszeit eines einfachen gewöhnlichen Pendels, dessen Länge l gleich ist der Höhe CO dieses Kegels.

immer genau die gleiche Anzahl von Schwingungen. Da jedoch später der Zweifel auftauchte, ob denn auch jene Körper diese Eigenschaft besitzen, welche ausser der Schwerkraft auch noch durch eine magnetische Kraft von der Erde angezogen werden, so unternahm der berühmte, im Jahre 1846 verstorbene Königsberger Astronom Bessel, welcher sich nebst seinen vielen anderen ausgezeichneten Arbeiten auch um die Bestimmung der Länge des einfachen Secundenpendels (in den Jahren 1828 und 1837) besonders verdient gemacht hatte, zur endgiltigen Entscheidung dieser Frage neuerdings eine Reihe von Pendelbeobachtungen, in welche er nicht nur magnetisches Eisen, sondern selbst auch Meteorsteine mit einbezog. Dabei gelangte er nun in der That zu dem Resultate, dass alle Atome der verschiedenartigsten Körper von der Erde gleich stark angezogen werden, diese Körper also durchaus gleich schwer sind, eine Eigenschaft, welche für die Bestimmung der Dichte oder des specifischen Gewichtes der Körper, von der grössten Wichtigkeit ist*).

*) Wenn also z. B. ein Kubikfuss Eisen 8mal so viel wiegt als ein Kubikfuss von irgend einer Holzgattung, so liegt der Grund (wie wir nun aus diesen Versuchen bestimmt wissen) nicht darin, dass ein Eisenatom etwa 8mal schwerer als ein Holztheilchen ist (was ja auch möglich gewesen wäre), sondern lediglich darin, dass sich in dem Kubikfuss Eisen 8mal so viele Atome als in dem Kubikfuss Holz befinden, das Eisen also 8mal dichter als das betreffende Holz ist.

14. Foucault's Pendelversuche. Zum Schlusse meines heutigen Vortrages, möchte ich nur noch in Kürze die sehr interessanten Versuche erwähnen, welche in der neuesten Zeit (im Jahre 1851) der französische Physiker Foucault mit dem Pendel zur Herstellung eines einfachen und augenscheinlichen Beweises für die Achsendrehung der Erde, ausgeführt hat.

Lässt man nämlich zur Begründung dieses Beweises, eine an einem langen Faden in *a* (Fig. 10) aufgehängte schwere Kugel *K*, die also nach allen Seiten hin frei schwingen kann, zum Beginne des Versuches etwa in der durch den Durchmesser *AB* der horizontalen kreisrunden Scheibe *F* gehenden verticalen Ebene *ABa* schwingen, so wird der Erfahrung zufolge die Schwingungsebene (vermöge des Beharrungsgesetzes) auch dann noch in derselben Lage *MNa* verharren, wenn die Scheibe, auf welcher der Bügel *L* mit dem Aufhängepunkt *a* befestigt ist, um ihren Mittelpunkt *C* oder verticale Achse *Ca* continuirlich gedreht wird. Findet die Drehung in der Richtung des Pfeiles statt, so wird allmälig ein Durchmesser nach dem andern der Kreisscheibe unter der Schwingungsebene *MNa* durchgehen und es nimmt nach einer Vierteldrehung der Durchmesser *DE* (90—270) dieselbe Stellung ein, welche ursprünglich jener *AB* (0—180) einnahm; in diesem Momente schwingt daher das Pendel in einer durch *DE* gehenden verticalen Ebene, welche nunmehr mit der ursprünglichen, durch *AB* gegangenen Schwingungsebene einen rechten Winkel bildet; dabei hat es (wenn man die Drehung der Scheibe nicht wahrnimmt) den Anschein, als drehe sich die Schwingungsebene in der entgegengesetzten Richtung von 0 nach 90. Es behält also die Schwingungsebene ihre Richtung unveränderlich bei; dagegen bringt eine Drehung der Scheibe eine scheinbare Drehung der Schwingungsebene in entgegengesetzter Richtung hervor.

Könnte man das Pendel gerade am Nordpol aufhängen, so würde die Gleichgewichtslage des Pendels mit der Erdachse und unsere horizontale Scheibe mit dem scheinbaren Horizont zusammenfallen, die sich nun wegen der Rotation der Erde jetzt von selbst in 24 Stunden langsam von West nach Ost drehen würde. Liesse man dabei das Pendel anfangs in der Richtung von 0 nach 180 schwingen, so würde die durch diesen Meridian gehende verticale Schwingungsebene in der That unverändert bleiben, während es bei der langsamen Drehung des Horizontes von West nach Ost den Anschein hätte als drehe sich diese Ebene in Bezug auf die Erdoberfläche oder den Horizont mit gleicher Geschwindigkeit in der entgegengesetzten Richtung, nämlich von Ost nach West *).

---

*) Dabei kann es scheinen, als könnte der Umstand, dass sich auch der Aufhängpunkt des Pendels mitdreht, hierauf einen Einfluss haben. Durch einen einfachen Versuch kann man sich jedoch leicht vom Gegentheil überzeugen. Versetzt man nämlich ein einfaches Fadenpendel in Schwingungen und dreht dabei den Aufhängepunkt, d. i. den Faden, um seine Längenachse, so schnell man will, so wird die

Unterm Aequator entfällt jede, auch nur scheinbare Bewegung der Schwingungsebenen gegen die Erdoberfläche oder den unsere Scheibe repräsentirenden Horizont. Lässt man z. B. an diesem Orte das Pendel in der Richtung des Meridians oder in jener der Aequatorlinie schwingen, so nimmt augenscheinlich die Schwingungsebene keine scheinbare Drehung gegen den betreffenden Horizont an; dasselbe gilt aber auch hier für jede andere Richtung der Schwingungsebene.

Zwischen diesen beiden Extremen, nämlich der Breite von 90 und 0 Graden, für welche der Drehungswinkel beziehungsweise unterm Pol per Stunde 15 Grad beträgt und unterm Aequator gleich Null ist, muss nun naturgemäss, je nach den verschiedenen Breitengraden, auch dieser Drehungswinkel für dieselbe Zeit ein grösserer oder kleinerer sein, und zwar muss dieser Winkel, von den Polen gegen dem Aequator zu, continuirlich abnehmen; so beträgt dieser z. B. für Wien per Stunde statt 15^0 nur mehr sehr nahe $11^0\ 11'$, und so wie die Schwingungsebene unterm Pol den ganzen Kreis scheinbar in 24 Stunden durchläuft, bedarf dieselbe in Wien hiezu nahe 32 Stunden, 12 Minuten *).

Schwingungsebene ungeachtet der entstehenden Torsion des Fadens (oder auch eines dünnen Drahtes) vollkommen unverändert bleiben.

*) Nach der Theorie findet man den Winkel, um welchen sich die Schwingungsebene in einer bestimmten Zeit an irgend einem Orte scheinbar dreht, dadurch, dass man den Drehungswinkel, welchen diese Ebene unter dem Pol in der-

Foucault hatte nun der Erste den glücklichen Gedanken ausgesprochen, dass durch das thatsächliche Zutreffen dieser eben angeführten Erscheinung, ein neuer Beweis für die Achsendrehung der Erde, und zwar in der augenscheinlichsten Weise gegeben wäre, und sohin auch wirklich gegeben ist.

Den ersten Versuch stellte er in einem Kellergewölbe mit einem 6 Fuss langen Pendel an, welches aus einer an einem Stahldraht hängenden zehnpfündigen Messingkugel bestand. Hierauf wiederholte er den Versuch im sogenannten Meridiansaale der Sternwarte zu Paris, mit einem 11 Meter langen Pendel. Einen dritten noch grossartigeren Versuch führte Foucault im Jahre 1852 im Pantheon zu Paris mit einem 67 Meter langen Pendel aus, bei welchem die Kugel ein Gewicht von 28 Kilogramm besass.

Aehnliche Versuche wurden hierauf mit gleich günstigem Erfolge an anderen Orten, wie namentlich von Garthe im Kölner, und Schwerd im Speyer-Dom ausgeführt.

In der neuesten Zeit hat auch der strebsame Director der hiesigen Staats-Realschule am Schottenfeld

---

selben Zeit beschreibt, mit dem Sinus der geographischen Breite dieses Ortes multiplicirt. Da nun unterm Pol per Stunde ein Winkel von 15° beschrieben wird, so legt die Schwingungsebene in einer Stunde an einem Orte von der Breite φ scheinbar den Winkel 15 Sin φ Grade zurück, da für Wien $\varphi = 48^0\ 12'\ 36''$ ist, so erhält man aus diesem Ausdruck den obigen Werth von $11^0\ 11'$.

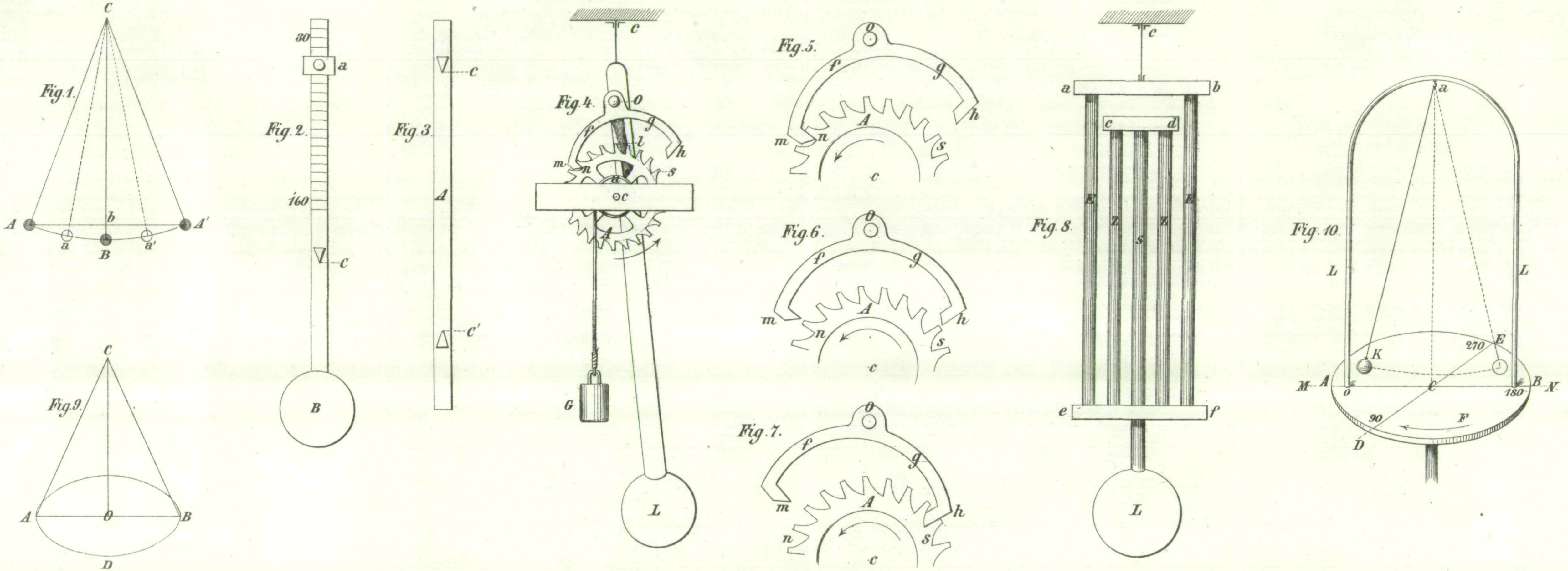
Herr Streinz, diese Versuche mit einem 13 Meter langen Pendel, wobei die Messingkugel 12 Pfund wiegt, in der gelungensten Weise ausgeführt und ist er auch heute noch in der Lage dieselben auf besonderes Verlangen zu wiederholen *).

Wäre die heutige Stunde nicht schon so weit vorgeschritten, so könnte ich wohl noch auch das von dem Engländer Robins zur Bestimmung der Anfangsgeschwindigkeit abgeschossener Flinten- und Kanonenkugeln construirte sogenannte ballistische Pendel anführen; ich will indess hierüber nur so viel bemerken, dass dasselbe der Hauptsache nach aus einem schweren massiven Holzklotze besteht, welcher pendelartig auf-

*) Die Kugel, welche vollkommen gleich dicht sein muss, damit der Schwerpunkt genau mit ihrem Mittelpunkt zusammenfällt, lässt man in eine feine Spitze auslaufen, welche die Verlängerung des Aufhängefadens (oder Drahtes) bildet. Unter dem Pendel wird ein möglichst grosser, in Graden getheilter und mit Radien bezeichneter horizontaler Kreis (oder Scheibe) fest angebracht, dessen Mittelpunkt genau mit der Spitze der Kugel, wenn sich diese in ihrer Ruhelage befindet, zusammenfällt.

Zur Vornahme eines Versuches umschlingt man die Kugel mit einem Faden, bringt das Pendel aus der Ruhelage und befestigt den Faden um das Pendel in der schiefen oder gehobenen Lage festzuhalten, an irgend einem festen Punkt, z. B. an einer Wand; nachdem wieder vollkommene Ruhe eingetreten ist, brennt man den Faden ab, und überlässt so das Pendel den dadurch eingeleiteten Schwingungen; es ist selbstverständlich, dass man dabei ganz ruhig bleiben und auch jeden Luftzug vermeiden muss.

gehängt wird und in welchen die abgeschossene Kugel, sobald sie die Rohrmündung verlassen hat, eindringt; aus dem beobachteten Elongationswinkel des ersten Schwunges, in welches das Pendel durch den erzeugten Stoss versetzt wird, lässt sich dann die Anfangsgeschwindigkeit der Kugel berechnen.



Lith. Inst. v. F. Köke, Wien