

ASTRONOMISCHE NACHRICHTEN.

Band 247.

Nr. 5914.

10.

Präzisionszeitmessung und Schuler-Pendel. Von G. Th. Gengler.

In AN 246.359 geht *H. C. Freiesleben* gelegentlich der Behandlung der Frage nach der Einwirkung von Erschütterungen auf den Gang und den Stand von Pendeluhrn auch auf einige prinzipielle Punkte über das Arbeiten eines Pendels *Schulerscher* Konstruktion ein. Obwohl die an der Göttinger Sternwarte vorgenommenen Untersuchungen der *Schuler-Uhr* zurzeit noch nicht völlig zum Abschluß gekommen sind, geben diese Ausführungen doch Anlaß zu einigen Richtigstellungen und allgemeinen Bemerkungen, um für eine kritische Beurteilung der *Schuler-Uhr* und ihrer Konstruktions-eigenarten ein klares Bild der bestehenden Verhältnisse zu schaffen.

1. Kurze Beschreibung der Anlage¹⁾. Bei der *Schulerschen* Uhrenanlage ist das erstmals bei den *Shortt-Uhren* in Greenwich angewandte Prinzip einer Trennung von Präzisionspendel und Uhrwerk übernommen worden. Als Arbeitsuhr (slave-clock) dient eine gewöhnliche Rieflersche Sekundenpendeluhr mit Rieflerhemmung und Kompensationspendel des Typus *J*. Fig. 1 gibt ein schematisches Bild der Anordnung des Meßpendels. Das eigentliche Pendel ist ein vollkommen freischwingendes Sekundenpendel von besonderer Form, das auf feinen Stahlschneiden und plangeschiffenen Achatplatten *A* ruht. Außer dem Pendelaufleger hat das *Schuler-Pendel* während seiner gesamten Schwingungsdauer keinerlei mechanische Berührung. Dadurch unterscheidet es sich prinzipiell von den »freien« Pendeln der *Shortt-Uhren* und anderer Konstruktionen. Während bei den *Shortt-Uhren* Antrieb und Kontakt durch mechanische Berührung mit dem Meßpendel zuwege gebracht werden, hat *Schuler* den Antrieb so gebaut, daß er an dem oberen Ende seines Pendels einen Hufeisenmagneten befestigte, der mit seinen Polen im Feld zweier gegeneinandergewickelten Magnetspulen *B* schwingt. Die Umsteuerung des Stromkreises der Spulen besorgt die Arbeitsuhr. Um im Antrieb keine Phasenverschiebung eintreten zu lassen, wird die Arbeitsuhr jede Stunde einige Minuten lang von dem *Schuler-Pendel* synchronisiert. Hierzu dient die übliche Rieflersche Synchronisierungseinrichtung, die vom *Schuler-Pendel* durch einen berührungsfreien, lichtelektrischen Kontakt²⁾ gesteuert wird. Der Kontakt besteht aus einer vor dem unteren Pendelende angebrachten Lichtquelle, die durch ein Linsensystem auf eine Photozelle *C* wirkt; während seiner Schwingungen deckt das Pendel mittels einer Blende *D* eine Sekunde lang das Licht vor der Zelle ab und gibt es dann wieder für eine Sekunde frei. Die so in der Photozelle entstehenden intermittierenden Stromstöße werden durch eine einfache Einröhren-Widerstandsverstärkung verstärkt und dienen entweder direkt als Kontakt für die Registrierung auf einem Siemens-Oszillographen oder bedienen

über ein Relais die Synchronisierung der Arbeitsuhr. Das *Schuler-Pendel* selbst befindet sich in einem gasdichten Gehäuse, das mit Wasserstoff von 100 mm Druck gefüllt ist. Zur Kontrolle der Temperatur und der Temperaturschichtung befinden sich im Pendelraum zwei Widerstandsthermometer, deren Angaben an einem geeichten Meßinstrument vor der Uhr abgelesen werden. Außer dieser thermischen Überwachung wird auch die Amplitude des Pendels einer ständigen Kontrolle durch fortlaufende photographische Registrierung unterzogen. Diese Kontrolle hat sich als erforderlich und nützlich erwiesen, denn es stellte sich des öfteren heraus, daß selbst bei den Werkuhren ein besserer Gang erzielbar wäre, wenn man eine Zusatzverbesserung wegen Amplitude an dem täglichen Uhgang anbrächte. Mehr noch ist diese Verbesserung bei völlig freien Pendeln am Platze. Die *Schuler-Uhr* ist als Uhr mit völlig freischwingendem Pendel ein Idealfall, dem die Uhrmacherskunst schon seit vielen Jahrzehnten zustrebt und der durch die Konstruktion der *Shortt-Uhren* nur unvollkommen erreicht wird.

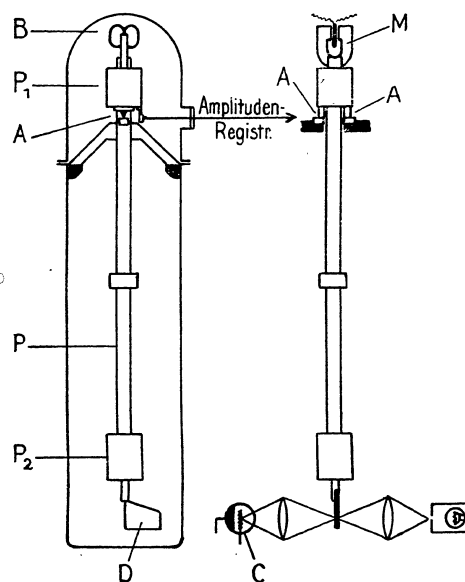


Fig. 1.

2. Prinzipielle Konstruktionseigenarten des *Schuler-Pendels*.

a) Physische Formgebung. In der Eigenart der von *Schuler* erstmals in den Uhrenbau eingeführten körperlichen

¹⁾ *M. Schuler*. Ein neues Pendel mit unveränderlicher Schwingungszeit. *Z. f. Phys.* **42**.547 (1927).

M. Schuler. Die Fehler unserer Zeitmessung und ein Vorschlag zur Verbesserung der astronomischen Uhren. *Phys. Z.* **30**.884 (1929).

²⁾ *G. Th. Gengler*. Das freie Pendel als Zeitnormale äußerster Präzision. *Erg.-Hefte f. angew. Geophys.* **2**, Heft 2-3 (1931).

Gestaltung des Pendels finden wir die praktische Anwendung eines schon früher von *J. Wilsing*¹⁾ und dann von *K. Lichtenecker*²⁾ gemachten, von *M. Schuler*³⁾ unabhängig wieder aufgegriffenen Vorschlages, das Pendel so zu gestalten, daß seine Schwingungszeit in bezug auf die Entfernung des Aufhängepunktes vom Schwerpunkt ein Minimum wird. Diese physikalische Bedingung läßt sich mathematisch einfach ableiten. Es sei:

- T = die Halbschwingung des Pendels⁴⁾,
 M = die Pendelmasse,
 s = Abstand Schneide-Schwerpunkt,
 ρ_0 = Trägheitsradius um den Schwerpunkt,
 l = reduzierte Pendellänge,
 g = Schwerebeschleunigung,

so gilt die bekannte Beziehung

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} = \pi \sqrt{\left(\frac{M(\rho_0^2 + s^2)}{Mgs}\right)} \quad (1)$$

und hieraus erhält man für die reduzierte Pendellänge l

$$l = \frac{\rho_0^2}{s} + s = \frac{\rho^2}{s} \quad (2)$$

wobei ρ der Trägheitsradius des Pendels um den Aufhängepunkt ist. Oder

$$s^2 - ls + \rho_0^2 = 0. \quad (3)$$

Setzen wir in diese Gleichung $s = \rho_0$, so wird die reduzierte Pendellänge

$$l = 2\rho_0 = 2s. \quad (4)$$

Hierdurch ist ein Grenzfall charakterisiert, in dem die Schwingungsdauer des Pendels ein Minimum wird, da jetzt gleichzeitig

$$\frac{\partial l}{\partial s} = 0. \quad (5)$$

Die Formel (1) wird jetzt lauten

$$T = \pi \sqrt{\frac{2\rho_0}{g}}. \quad (6)$$

Dies ist aber eine Darstellung der Schwingungsdauer, die nur noch von dem Trägheitsradius des Pendels um den Schwerpunkt abhängig, also wegen (5) gegen kleine Änderungen von s unempfindlich ist. Wie groß der Vorteil eines Pendels der eben abgeleiteten Art gegenüber einem mathematischen Pendel ist, geht aus der nachfolgenden Tabelle hervor. Diese gibt für ein mathematisches Pendel und zum Vergleich für ein *Schuler*-Pendel die Änderung der Halbschwingungszeit und des täglichen Uhranges bei den in der ersten Spalte vorgegebenen Verlagerungen des Aufhängepunktes.

Man sieht, daß das *Schuler*-Pendel dem mathematischen im Mittel um den Faktor 5000 überlegen ist, soweit es auf Verlagerungen des Aufhängepunktes als Störungsquellen der Schwingungsdauer ankommt.

e	Mathem. Pendel $T = 1^{\text{so}}$		<i>Schuler</i> -Pendel $T = 1^{\text{so}}$	
	$\Delta T \cdot 10^7 \text{ sec}$	ΔG	$\Delta T \cdot 10^7 \text{ sec}$	ΔG
10 μ	50.0	0.435	0.00	0.0000
20	100.0	0.871	0.00	0.0000
30	150.0	1.306	0.01	0.0001
40	200.0	1.742	0.02	0.0002
50	250.0	2.177	0.03	0.0003
60	300.0	2.612	0.04	0.0004
70	350.0	3.048	0.05	0.0004
80	400.0	3.483	0.06	0.0005
90	450.0	3.919	0.08	0.0007
100 μ	500.0	4.354	0.10	0.0009

Die bisher gebauten Uhren sind ausschließlich mit Pendeln ausgerüstet, die in ihrer Massenverteilung dem mathematischen Pendel sehr nahe kommen. Es ist daher verständlich, wenn man der Einführung des *Schuler*-Pendels bei Präzisionsuhren nicht kritiklos entgegenkommt. Bevor man jedoch eine Entscheidung über den praktisch günstigeren Fall zu treffen sich anschickt, bedarf es der Überlegung, welcher Art die Störungsquellen des *Schuler*-Pendels sind und in welcher Größenordnung Störungen auftreten können.

b) Massenkonfiguration. Betrachten wir zunächst Störungen der Massenkonfiguration des Pendels, so können wir zwei Fälle unterscheiden. Zunächst nehmen wir an, zu der vorgegebenen Pendelmasse M kommt an irgendeiner beliebigen Stelle des Pendels eine kleine Zusatzmasse m . Ist der Abstand dieser störenden Masse vom Aufhängepunkt u , dann verändert sich die Halbschwingung des Pendels durch die aufgebrauchte Zusatzmasse um den Betrag ΔT und die nunmehrige Halbschwingung des Pendels beträgt gemäß (1)

$$T + \Delta T = \pi \sqrt{\left(\frac{M(\rho_0^2 + s^2) + mu^2}{Mgs + mg u}\right)}. \quad (7)$$

Da das Verhältnis l/s verschiedene Werte annehmen kann, führen wir ein

$$s = bl \quad (8)$$

wobei

$$0 < b < 1 \quad (9)$$

sein soll, und erhalten schließlich für die weitere Annahme, daß $m/M \ll 1$,

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{m}{2bM} \cdot \frac{u}{l} \left(1 - \frac{u}{l}\right). \quad (10)$$

Diese Beziehung gibt die Änderung der Schwingungsdauer, hervorgerufen durch einen positiven oder negativen Massenzuwachs an einer beliebigen Stelle des Pendels. Da für das mathematische Pendel $b = 1$, für das *Schuler*-Pendel $b = 0.5$ ist, wirken bei dem letzteren Massenänderungen doppelt so stark wie bei dem mathematischen Pendel. Fig. 2 ist die graphische Darstellung von (10). Die beiden Kurven gelten für die uns

1) *J. Wilsing*. Über eine besondere Form invariabler Pendel. Z. f. Instr. 17.109 (1897).

2) *K. Lichtenecker*. Zur Lehre vom physischen Pendel. Z. f. d. phys. und chem. Unterricht 35.110 (1922).

3) *M. Schuler*. Ein neues Pendel mit unveränderlicher Schwingungszeit. Z. f. Phys. 42.547 (1927).

M. Schuler. Die Fehler unserer Zeitmessung und ein Vorschlag zur Verbesserung der astronomischen Uhren. Phys. Z. 30.884 (1929).

4) Einführung des Begriffs »Halbschwingung« bei Zeitmessern. Z. f. Instr. 50.120 (1930) und Z. f. Geophys. 6.127 (1930).

interessierenden Grenzfälle $b=1$ und $b=0.5$; dazwischen werden die Werte für alle gewöhnlich benutzten Uhrpendel zu suchen sein.

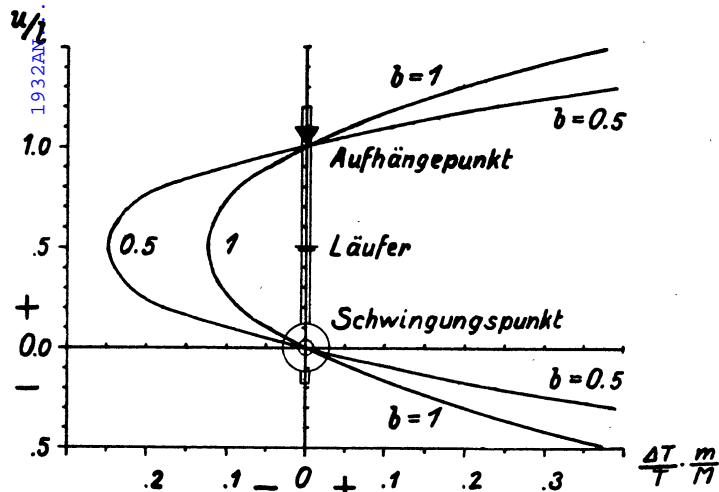


Fig. 2.

Der zweite Fall einer Störung der Massenkonfiguration des Pendels ergibt sich aus der Annahme einer Veränderung der Massenverteilung durch Verschiebung eines kleinen Massenteilchens m um den Betrag du . Der Abstand des wandernden Teilchens vom Aufhängepunkt sei wieder u , die Gesamtmasse des Pendels sei M . Eine (7) analoge Überlegung führt hier für die Änderung der Halbschwingung zu der Beziehung

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{m}{bM} \cdot \frac{du}{l} \left(1 - \frac{2u}{l}\right) \quad (11)$$

deren graphische Darstellung, wieder für die beiden Grenzfälle für b , in Fig. 3 gegeben ist. Auch Massenverschiebungen wirken beim *Schuler*-Pendel doppelt so stark wie beim mathematischen Pendel.

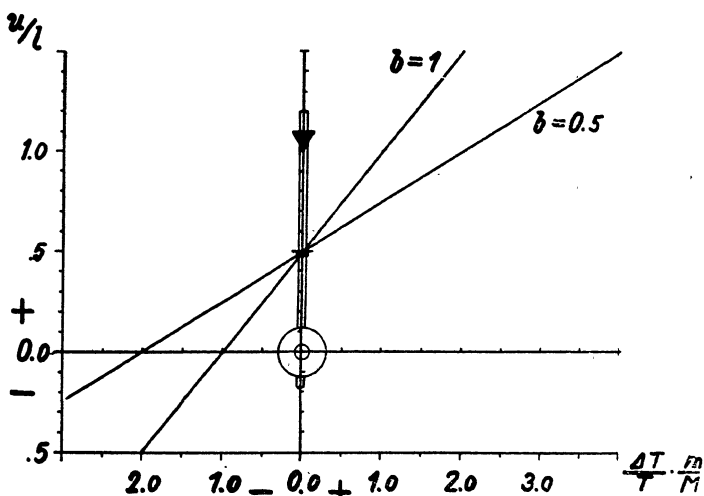


Fig. 3.

c) Erschütterungen. Die theoretische Ermittlung des Einflusses von Stößen auf den Gang und Stand von Pendeluhren bringt mancherlei Schwierigkeiten mit sich. *M. Schuler* hat bereits in AN 243.301 gelegentlich eines Erdbebens hier

über einige größenordnungsmäßige Betrachtungen angestellt. *H. C. Freiesleben* hat in seinem Aufsatz in AN 246.359 versucht, das Problem nochmals aufzugreifen; seine Abhandlung behandelt jedoch wohl den Einfluß von Stößen auf das Pendel selbst, nicht aber die für seismische Vorgänge allein in Frage kommenden Einflüsse von Stößen auf die Unterlage und den Aufhängepunkt des Pendels. Die von *Freiesleben* formulierte Problemstellung gehört sachlich in den folgenden Abschnitt über die Wirkung des Antriebs des Pendels; es ist klar, daß theoretisch hier der Faktor 2 zuungunsten des *Schuler*-Pendels auftreten muß. Die andere Frage, wie sich ein Stoß auf die Pendelaufhängung im Uhrgang und -Stand auswirkt, erfordert die Lösung schwieriger Fourierscher Integrale. Es wird zurzeit in Göttingen gerade an diesem Problem intensiv gearbeitet; über die Ergebnisse wird nach Abschluß der Rechnungen an geeigneter Stelle berichtet werden. Ohne vorgreifen zu wollen, sei nur bemerkt, daß sich bereits gezeigt hat, daß Schwingungen von konstanter Frequenz keinen Einfluß auf den Uhrgang ausüben können. Sprunghafte Einflüsse treten auf bei Einsatz der Schwingungen und bei Frequenzänderungen. Über die Größenordnung dieser Störungen sowie über das Verhalten verschiedener Pendelformen kann zunächst noch nicht berichtet werden.

d) Antrieb. Für die Verwendung des *Schuler*-Pendels im Uhrenbau ist ein Antrieb des Pendels erforderlich. Der Antrieb hat bekanntlich die Aufgabe, die während einer Periode verlorengene Energiemenge dem Pendel wieder zuzuführen. Diese Energiemenge wird in Bruchteilen der Gesamtenergie des Pendels durch das Dekrement gegeben. Die Gesamtenergie eines Pendels ist

$$E = Mgs \cdot \frac{\phi^2}{2} \quad (12)$$

woraus folgt, daß ein *Schuler*-Pendel nur halb so viel Energie besitzt, wie ein gleichschweres mathematisches Pendel von gleicher Schwingungszeit. Bei gleichen Reibungsverhältnissen, gleicher Masse und gleicher Schwingungsdauer wird demnach das Dekrement des mathematischen Pendels nur die Hälfte desjenigen eines *Schuler*-Pendels, somit der Antrieb für das letztere doppelt so groß wie der enige für ein mathematisches Pendel.

e) Mitschwingen. Im Vorteil ist das *Schuler*-Pendel gegenüber dem mathematischen Pendel hinsichtlich seiner Empfindlichkeit gegen das Mitschwingen der Pendelunterlage. Das Mitschwingen entsteht durch die Koppelung des Pendels mit seiner Unterlage und ist abhängig von der Elastizität des Stativs und von dem durch das Pendel auf das Stativ ausgeübten Horizontalzug. Dieser beträgt bei einer Amplitude ϕ des Pendels

$$H = Mgs/l \cdot \sin \phi. \quad (13)$$

Der auf die Unterlage ausgeübte Horizontalzug des *Schuler*-Pendels beträgt nur die Hälfte desjenigen eines gleichschweren mathematischen Pendels.

f) Temperaturkorrektur. Zur Zeit der ersten Einführung des *Schuler*-Pendels wurde wiederholt von verschiedenen Seiten die irr tümliche Ansicht vertreten, daß das *Schuler*-Pendel dank seiner Konstruktionseigenart nicht nur

gegen Störungen des Aufhängepunktes, sondern auch gegen Temperaturstörungen immun sei. Die mathematische Folgerung, zu der wir mit Formel (5) gekommen sind, sagt jedoch ausdrücklich, daß wohl eine Invarianz der Schwingungsdauer gegen Änderungen der Strecke Schneide-Schwerpunkt besteht, nicht aber gegen Änderungen des Trägheitsradius. Die thermischen Längenänderungen bewirken jedoch, wie leicht einzusehen ist, gerade die ohne Kompensation konstruktiv nicht vermeidbare Veränderung des Trägheitsradius des Pendels: Das *Schuler*-Pendel bedarf im gleichen Maße wie das mathematische Pendel einer Zusatzkorrektur für etwaige Temperaturschwankungen.

3. Aus der Praxis der *Schuler*-Uhr. Es erhebt sich nunmehr die Frage, wieweit die bisher behandelten Vor- und Nachteile des *Schuler*-Pendels von Bedeutung sind und welche Konstruktionselemente der technischen Ausführungen der *Schulerschen* Uhrenanlage das Vertrauen auf die bei der Herstellung der Uhr eingeschlagenen Wege rechtfertigen.

Die große Überlegenheit des *Schuler*-Pendels gegenüber dem mathematischen Pendel hinsichtlich der Konstanz der Schwingungsdauer bei geringen Verlagerungen des Aufhängepunktes spricht zunächst ohne weiteres für das *Schuler*-Pendel. Praktisch scheint jedoch der Vorteil der Bedingung (4) noch stärker zutage zu treten, wenn das *Schuler*-Pendel anstatt auf Schneiden an Stahlbändern aufgehängt wird. Gerade die Pendelfedern neigen infolge ihrer starken Belastung durch die fortgesetzte Biegung unter gleichzeitigem Einfluß der wenn auch innerhalb geringer Grenzen immer vorhandenen Temperaturschwankungen leicht zu unkontrollierbaren Elastizitätsänderungen und damit verbundenen Verschiebungen des ideellen »Knickpunktes«. Es sind bisher noch wenige Versuche unternommen worden, die Beibehaltung des Federknickpunktes durch entsprechende Konstruktion des Pendelgehänges zu sichern; und wenn dies versucht wurde, so scheiterte die praktische Ausführung zumeist an der Unmöglichkeit des Einbaues in eine der wenigen heute noch gebräuchlichen Typen der Präzisionsuhren. Das gleiche gilt auch für die Anwendung der Minimumsbedingung (5) auf gewöhnliche Uhrenpendel. Wenn mit *H. C. Freiesleben* (AN 246.359) wirklich angenommen werden darf, daß der Gedanke einer Verwirklichung dieses Prinzips für den Uhrenbau je gefaßt wurde, so wäre ohne grundlegende Änderung des Echappements und damit des ganzen Antriebsmechanismus kaum eine praktische Verwertung eines *Schuler*-Pendels im Uhrenbau zu denken gewesen. Prinzipiell erweist sich das *Schuler*-Pendel jedoch auch gegenüber der Schneidenaufhängung als günstiger als das mathematische Pendel, da durch den geringeren Horizontalzug (13) eine größere Schonung der Schneiden und ihrer Auflager gewährleistet werden kann. Bei den zurzeit noch gebräuchlichen messerscharfen Schneiden ist dieser Gesichtspunkt von Wichtigkeit und der Faktor 2 zugunsten des *Schuler*-Pendels spielt in diesem Falle eine größere Rolle als bei den anderen genannten Effekten, die zum Teil gegen das *Schuler*-Pendel sprechen würden.

Die Bemerkung von *H. C. Freiesleben* in AN 246.359, »daß es bei der Schneidenaufhängung auch unerlässlich sei,

eine dauernde Überwachung des Schwingungsbogens durchzuführen«, läßt leicht den Fehlschluß aufkommen, daß eine derartige Überwachung bei der Feder überflüssig sei. Die Tatsache, daß es bei der Feder gelegentlich gelungen ist, durch geeignete Formgebung bis zu einem gewissen Grade Isochronismus der Pendelschwingungen zu erreichen, spricht noch nicht dafür, dann von einer Überwachung des Schwingungsbogens des Pendels überhaupt abzusehen; denn einmal handelt es sich bei derartigen Manipulationen immer um eine Kompensationsmethode, die gerade in dem fraglichen Fall mehr denn sonst ein Geschenk des Schicksals ist, und zweitens wird durch die Einführung einer Kompensation, gleichgültig welcher Art, immer eine gewisse Kompliziertheit in die Apparatur hineingebracht, die eine saubere Trennung vorhandener Störungen verhindern kann. Daß bei der scharfen Schneide die fortlaufende Registrierung des Schwingungsbogens erforderlich ist, bedeutet also nichts Außergewöhnliches, sondern diese Registrierung ist eigentlich heute eine Selbstverständlichkeit für jede Uhr, die zu Präzisionsmessungen verwendet werden soll.

Bei der Schneide sind Verlagerungen des Aufhängepunktes weniger leicht zu befürchten als bei der Feder. Kommen jedoch solche vor, so ist allerdings nach neueren Untersuchungen die Gefahr einer Schwingungsdaueränderung des Pendels durch damit verbundene Änderungen des Krümmungsradius der Schneide trotz der Minimumeigenschaft des Pendels sehr groß, wie von *G. Schmerwitz*¹⁾ gezeigt werden konnte. Es ist jedoch erwiesen, daß in solchen Fällen die Amplitudenkorrektur des Pendels eine empfindliche Änderung erfahren würde. Auch *H. Gebelein*²⁾ hat eingehende Untersuchungen über das auf Schneiden abrollende physikalische Pendel angestellt und das Verhalten des mathematischen und des *Schuler*-Pendels bei Änderung der Schneidenkrümmungsradien diskutiert. Unter der Annahme kreisbogenförmiger Schneiden konnte gezeigt werden, daß Änderungen des Krümmungsradius die Schwingungsdauer beider Pendeltypen in gleicher Weise beeinflussen, vorausgesetzt, daß die Schneidenform auch nach der Veränderung der Radien kreisbogenförmig geblieben ist. Für diesen Fall ist also das mathematische dem *Schuler*-Pendel gleichzustellen. Wenn jedoch differentielle Veränderungen der Schneidenform eintreten, dann wird die dadurch bewirkte Schwingungsdaueränderung des *Schuler*-Pendels den doppelten Betrag annehmen wie beim mathematischen Pendel. Von besonderem Interesse ist das Ergebnis eines von *H. Gebelein* in Göttingen angestellten Versuches, eine Schneidenkurve schleifen zu lassen, die für sämtliche Amplitudenwerte des Pendels Isochronismus bewirkt. Es konnte so gezeigt werden, daß die früher nur bei Federn gelungene Kompensation des Pendels gegen Amplitude auch bei der Schneidenaufhängung praktisch durchführbar ist. Allerdings wird es auch hier nur bis zu einer großen Näherung gelingen, die Schwingungsdauer eines Pendels amplitudenunabhängig zu machen, so daß auch für diesen Fall eine Amplitudenregistrierung im Dauerbetrieb wohl kaum entbehrt werden kann. Durch die fortlaufende Registrierung der Amplitude und die tägliche Berechnung der maßgeblichen Korrekturen hat man ein Mittel in der Hand,

¹⁾ *G. Schmerwitz*. Messung von Schneidenkrümmungsradien. Z. f. Instrk. 52.1 (1932).

²⁾ *H. Gebelein*. Das abrollende physikalische Pendel. Z. f. Geophys. 8.272 (1932).

das Eintreten einer Veränderung der Schneidenradien zu ermitteln und ist so durch die fortgesetzt durchgeführte Kontrolle des Schwingungsbogens gegen unvorhergesehene Überraschungen gesichert. Das Gesagte gilt sinngemäß auch für die Pendelfeder, deren Elastizitätsänderungen sich ebenfalls in der geschilderten Weise auswirken müßten. Während der gesamten Betriebszeit von 2 Jahren ist bisher noch kein Fall eingetreten, der auf eine Anomalie der Amplitudenkorrekturen des *Schuler*-Pendels hätte schließen lassen.

Daß das in Absatz 2 dieser Arbeit behandelte Auftreten des Faktors 2 zuungunsten des *Schuler*-Pendels von untergeordneter Bedeutung sein wird, soll nun kurz gezeigt werden. Fälle von Störungen der Massenkonfiguration sind so gut wie ausgeschlossen. Das Pendel schwingt in einem luftdichten Gehäuse, das nach mehrmaliger tagelanger Spülung mit Wasserstoff und dazwischen vorgenommener Evakuierung schließlich mit 100 mm gut getrocknetem und gereinigtem Wasserstoff gefüllt wurde. Ein Beschlagen des Pendels bei wechselnden Temperaturen, wie dies bei anderen Uhren unter luftdichtem Verschuß gelegentlich beobachtet wurde¹⁾, kann so infolge des Mangels von Wasserdampf nicht in Frage kommen. Auch das Vorkommen einer Massenwanderung am Pendel ist unmöglich, da das ganze Pendel aus einem Stück gedreht und die notwendig angesetzten Zubehöerteile von kleiner Masse und außerdem sorgfältig verschraubt und gesichert sind.

Zur Vermeidung von Erschütterungen ist gegenüber Straßenunruhen, Gebäudeschwingungen durch den Betrieb der Institutswerkstatt und sonstigen Störungen große Vorsicht geboten. Man darf jedoch sagen, daß die Aufstellungsräume von Präzisionsuhren heute überall bereits so sorgfältig ausgewählt sind, daß von solchen Störungen kaum mehr etwas zu befürchten sein wird. Auch die Untersuchung der Wand, an der die *Schuler*-Uhr zurzeit befestigt ist, die seitens des Geophysikalischen Instituts der Universität Göttingen ausgeführt wurde, konnte vorläufig keine bedenklichen Erschütterungen durch den gewöhnlichen Tagesbetrieb feststellen. Für den Fall großer Erdbeben gibt es allerdings keine Sicherung, doch ist Göttingen so gelegen, daß man das fühlbare Eintreten eines derartigen Ereignisses allgemein nicht zu befürchten hat, es sei denn, es handelt sich um ein Weltbeben größten Ausmaßes, das seine fernen Boten noch bis in unsere ruhigen Gegenden trägt. Von den drei bisher an der Amplitudenregistrierung beobachteten Beben hat sich noch keines in einer Veränderung des Uhrstandes bemerkbar gemacht. Durch die Berücksichtigung der Amplituden bei der Berechnung der täglichen Uhrstände haben sich offenbar die kleinen, nur wenige Minuten dauernden Schwankungen praktisch wegkorrigiert. Über den Verlauf der Amplituden bei dem letzten hier wahrgenommenen Beben von 1931 Aug. 10 22^h27^m unterrichtet in anschaulicher Weise Fig. 4. Die Amplitudenkurve wurde aus 20 Meßpunkten über die Zeit von 1^h30^m erhalten. Darunter befindet sich maßstäblich verkleinert die Registrierung des Bebens mit dem *Wiechertschen* Horizontalpendel des Geophysikalischen Instituts Göttingen. Sehr instruktiv sind die einzelnen Einsätze des Bebens in ihrer

sprunghaften Auswirkung auf die Amplitude des *Schuler*-Pendels.

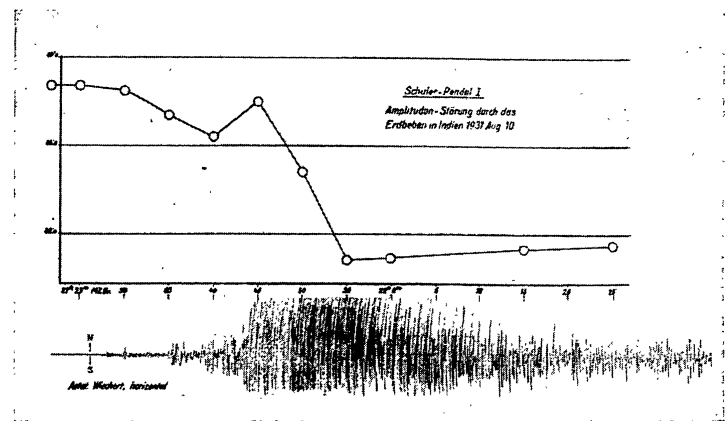


Fig. 4.

Wenn das *Schuler*-Pendel die doppelte Antriebsenergie benötigt wie ein gleich schweres mathematisches Pendel von gleicher Schwingungsdauer, so bedeutet das, daß das *Schuler*-Pendel gegen unkontrollierbare Schwankungen der Antriebsenergie eine im Vergleich zum mathematischen Pendel doppelte Empfindlichkeit besitzt. Bei dem einzigen vorerst betriebenen Modell der *Schulerschen* Pendelanlage ist es gelungen, diesem letzten, theoretisch gegen das *Schuler*-Pendel anzuführenden Einwand ebenfalls seine Bedeutung zu nehmen. Durch die große Masse des Pendels sowie durch die Füllung des Pendelgehäuses mit Wasserstoff ist es möglich geworden, das Dekrement des Pendels so klein zu halten, daß sein Betrag gegenüber anderen Uhrpendeln um nahezu eine Größenordnung im Vorteil ist. Das Fehlen jeder mechanischen Berührung durch Kontakte oder durch Antriebsvorrichtungen verdient an dieser Stelle nochmals als äußerst günstig hervorgehoben zu werden. Die Halbwertszeit des *Schuler*-Pendels beträgt in 100 mm Wasserstoff 14 Stunden, d. h. bei einer Amplitude von rund 90' sich selbst überlassen, schwingt das Pendel nach vier Tagen immer noch mit einer Amplitude von 1/5. Eine derartig geringe Dämpfung ist wohl bisher an keinem Pendel einer anderen Uhr festgestellt worden. Ein besonderer Beweis für die Präzision der *Schuler*-Uhr dürfte darin liegen, daß bei diesen geringen Amplituden der lichtelektrische Kontakt des Pendels noch durchaus einwandfrei arbeitet, so daß er die Synchronisierung der Arbeitsuhr noch besorgt, ohne zu irgendwelchen Beanstandungen Anlaß zu geben. Auch für die Ausführung von Feinmessungen sind die registrierten Kontaktzeichen der Uhr trotz der geringen Amplituden einwandfrei verwendbar.

Eine nach zweijähriger Gangzeit vorgenommene Abschaltung des Antriebes ergab keine Änderung der Halbwertszeit des Pendels gegen frühere Versuche. Fig. 5 zeigt das Ergebnis zweier Ausschwingversuche, deren einer in atmosphärischer Luft, der andere in 100 mm Wasserstoff vorgenommen wurde. Auf die gute Reproduzierbarkeit des

¹⁾ H. Kienle. Untersuchungen über Pendeluhren. Neue Ann. Stw. München 5, Heft 2 (1918).

Versuchs, unbeeinflusst durch die große Zahl der Schwingungen, die das Pendel innerhalb von zwei Jahren ausführen mußte, sei besonders hingewiesen. Der großen Halbwertszeit von 15 Stunden stehen bei anderen Uhren wesentlich geringere Werte gegenüber. Ein in Göttingen ausgeführter Ausschwingversuch an einem Rieflerpendel ergab knapp zwei Stunden Halbwertszeit, und man kann wohl annehmen, daß dieser Wert im Vergleich zu anderen heute noch gebräuchlichen Präzisionsuhren immer noch sehr günstig ist. Auf die Antriebsverhältnisse übertragen bedeutet das für das *Schuler*-Pendel einen Vorzug, der den nach der oben angestellten Überlegung auftretenden Faktor 2 praktisch bedeutungslos macht.

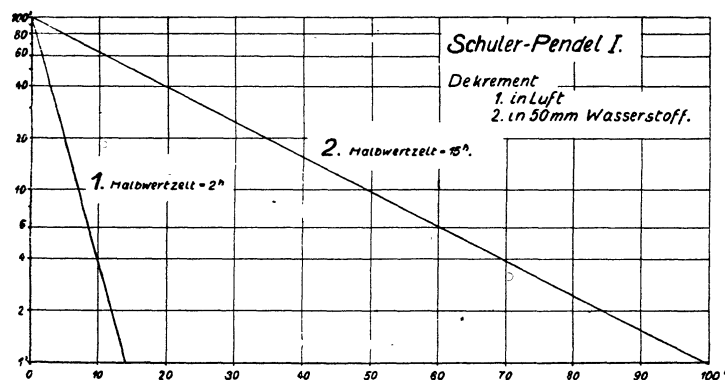


Fig. 5.

Besondere Beachtung verdient während der Betriebszeit jeder Uhrenanlage die auf das Pendel einwirkende Temperatur. Wir haben gesehen, daß im Verhalten gegenüber irgendwelchen Temperaturschwankungen das *Schuler*-Pendel dem mathematischen gleichzustellen ist. Die Empfindlichkeit der *Schuler*-Uhr macht es nun möglich, die einzelnen Störungselemente auf den Uhrgang sauber voneinander zu scheiden. Nicht ohne eine gewisse Absicht hatte man es daher bislang unterlassen, gegen Temperaturschwankungen besondere Vorsichtsmaßregeln zu treffen, sondern man hatte sich begnügt, um das Pendel einen doppelwandigen Holzkasten herumzubauen und den Zwischenraum zwischen den Wänden mit Torf auszufüllen. Durch diese Vorkehrung waren plötzliche, innerhalb weniger Stunden erfolgende Temperaturstöße von dem Pendel ferngehalten, die jährlichen und monatlichen Schwankungen jedoch nicht ausgeschaltet. Die Diskussion der Uhrgänge zeigte zunächst folgendes. Alle nicht mit der Temperatur im Zusammenhang stehenden Fehlerquellen ließen sich einwandfrei erfassen und restlos wegkorrigieren. Der Einfluß der jährlichen Temperaturschwankungen, die zwischen +5 und +20° C variierten, konnte ebenfalls durch Einführung eines experimentell bestimmten Temperaturkoeffizienten beseitigt werden. Nicht erfaßt wurden jedoch die monatlich auftretenden kleineren Temperaturschwankungen in der Größenordnung von 2 bis 3° C. Da eine Beeinflussung des Uhrganges durch irgendwelche mechanischen Vorrichtungen, wie dies bei den bisher gebräuchlichen Uhren immer der Fall ist, nicht in Frage kommen konnte, so lag der Schluß nahe, daß man es in dem beschriebenen Verhalten der Gänge mit einer spezifischen Eigenschaft des Invarstahls zu tun habe. Die Erscheinung steht mit den Erfahrungen, die man an

getemperten Invarstählen machen konnte, nicht in Widerspruch. Daß sie bei der *Schuler*-Uhr erstmals in ihrer ganzen Tragweite für die Zeitmessung zum Ausdruck kam, spricht entschieden für die Feinheit der ganzen Konstruktion und für die Richtigkeit des Prinzips, sämtliche Störungsquellen für den Uhrgang genauestens zu lokalisieren und ihren Einfluß durch Rechnung, nicht aber durch Kompensationen zu beseitigen. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß man die thermischen Anomalien des Invars auch schon an anderen Uhren besser hätte nachweisen können, wenn man in der Lage gewesen wäre, die einzelnen Störungseffekte sauberer zu trennen, was zumeist wohl durch die Verbindung des Pendels mit dem bisher unvermeidlichen Uhrwerk unmöglich war. Es lohnt durchaus, auf Grund der hier gemachten Erfahrungen sich nach Materialien für den Pendelbau umzusehen, die jenen für den Invarstahl charakteristischen thermischen Anomalien nicht zeigen. Arbeiten in dieser Richtung sind in Göttingen bereits im Gange. Für die Fortsetzung der Untersuchungen über das Verhalten der *Schuler*-Uhr wird zurzeit in der Sternwarte Göttingen ein heizbarer Raum gebaut, und es ist zu erwarten, daß kurzperiodische Temperaturschwankungen in Zukunft vermieden werden können, wobei gleichzeitig die Möglichkeit geschaffen wird, zu Versuchszwecken jede beliebige Temperatur auf die Uhr wirken zu lassen. Für die weitere Zeit ist demnach ein einwandfreies Arbeiten der Uhr so gut wie sicher gestellt.

Zur Vermeidung der bei geheizten Räumen zumeist auftretenden Temperaturschichtung hat sich die gute Wärmeleitfähigkeit der Füllung des Pendelgehäuses mit Wasserstoff bestens bewährt. Die Ablesungen der beiden ober- und unterhalb des Pendels angebrachten elektrischen Fernthermometer zeigten während des ganzen Jahres konstante Differenzen. Vorkommende kleinere Schwankungen verliefen völlig unregelmäßig und sind darauf zurückzuführen, daß die Kontakte der Schaltknöpfe vor der Ableseskala zuweilen etwas verschmutzten, wodurch sich der innere Widerstand des Thermometerkreises verändert hatte. Nach einer Reinigung der Kontaktstellen war die Störung stets sofort beseitigt.

Außer der auch bei den Shortt-Uhren beobachteten Erscheinung einer ständigen Längenzunahme des Pendelmaterials sowie der bereits geschilderten Anomalie gegen kurzperiodische Temperaturschwankungen, die zukünftig durch die Konstanzhaltung der Temperatur im Uhrenraum ausgeschaltet wird, zeigte sich bisher ein durchaus regelmäßiges Arbeitsbild. Gangsprünge, wie sie bei anderen Uhren gelegentlich auftreten, kamen trotz der mannigfaltigen Störungen, denen eine Uhr im Versuchsstadium durch absichtliche und zufällige Eingriffe dauernd ausgesetzt ist, niemals vor.

Das Bestreben, mit der *Schuler*-Uhr ein Zeitnormal nicht nur für die Astronomie, sondern auch für die eine Zehnerpotenz mehr erfordernde Physik zu schaffen, führte neben einer genauesten Untersuchung aller einzelnen Konstruktionselemente auch zu einer Prüfung der Vergleichsmöglichkeiten für die Gangkontrolle. Der Anschluß an astronomische Zeitbestimmungen nur einer Sternwarte scheint in Zukunft nicht mehr die genügende Zuverlässigkeit zu erbringen, da die Witterung nicht jederzeit die astronomische Beobachtung zuläßt und andererseits die zufälligen und syste-

systematischen Fehler der Beobachtung sowie der lateralen Refraktion für eine Meridianzeitbestimmung nicht die genügende Genauigkeit zulassen. Es wird daher versucht, über die Aufnahme eines funkentelegraphischen Zeitzeichens den Vergleich mit den Uhren anderer Sternwarten zu bewerkstelligen und sich so die Meridianbeobachtungen möglichst vieler und an verschiedenen Orten gelegener Stationen zunutze zu machen. Das in Göttingen benutzte Bezugssignal ist das Zeitzeichen von Nauen. Über dessen innere Übereinstimmung bringt Fig. 6 zwei Diagramme, auf die sich auch *H. C. Freiesleben* in AN 246.359 bezieht (der von *Freiesleben* zitierte Artikel *Schulers* enthält nur die Teile März bis Juni aus der Fig. 6 dieses Artikels). Die Punkte bedeuten die maximale innere Abweichung innerhalb des Onogo- und innerhalb des Koinzidenzsignals während der Monate Jan. bis Sept. 1931. Beobachtet wurden bei beiden Signalen jeweils die vollen Minuten. Bis April 20 war die innere Überein-

stimmung bei beiden Signalen befriedigend, sie betrug für das Onogesignal $\pm 0^s.01$, für das Koinzidenzsignal $\pm 0^s.005$, von einigen wenigen Ausnahmen abgesehen. Mit dem April 20 jedoch springen diese Werte auf den vierfachen, bzw. doppelten Betrag. Die Erklärung hierfür findet sich in der 1931 April 20 vorgenommenen Überholung des Senders und der Kontaktapparate. Offenbar wurden dadurch einzelne Kontakte aus ihrer ursprünglichen Lage gebracht und das Signal »flatterte«. Die Richtigkeit dieser Vermutung zeigt sich dadurch, daß es möglich ist, auch für die Zeit nach dem April 20 zu der vorher bestehenden inneren Übereinstimmung der Signale zu gelangen, wenn man an den einzelnen Kontakten konstante Korrekturen anbringt, z. B. für das Onogesignal:

- 58. Minute = $+0^s.045$
- 59. » = 0.000
- 60. » = $+0.023$

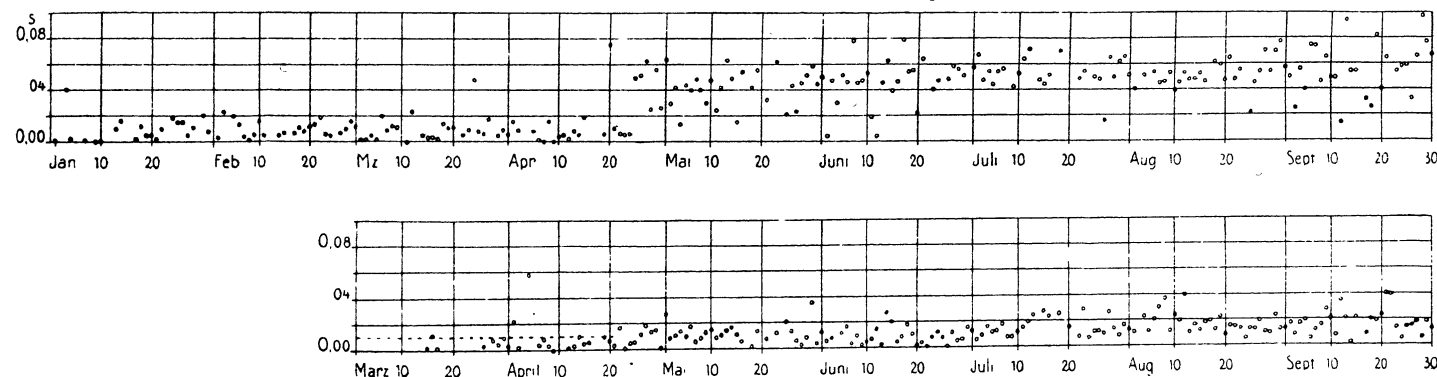


Fig. 6.

Von systematischen Fehlern der Aufnahmeapparatur dürfte das gezeigte Beispiel frei sein, da die Registrierungen ohne Zwischenschaltung von Relais direkt vom Empfänger auf einen Siemens-Oszillographen vorgenommen werden. Ebenso kann der Uhrgang hierbei in erster Näherung keine Rolle spielen, da es sich lediglich um eine Feststellung der Zeitintervalle zwischen den einzelnen Zeichen eines Zeitsignals handelt, wobei sich die Versuchsdauer nur über wenige Minuten erstreckt. Wenn *H. C. Freiesleben* in AN 246.359 die Diagramme Fig. 6 als Beweis für Sprünge im Gang der *Schuler-Uhr* ansieht, so liegt hier ein offenkundiges Mißverständnis vor, da die Figur mit dem Gang der *Schuler-Uhr* überhaupt nichts zu tun hat.

Zum Schluß sei noch ein kleines Beispiel für die Zuverlässigkeit der für die einzelnen Zeitzeichen gegebenen Verbesserungen gebracht. Bekanntlich gibt die Seewarte in Hamburg für das Onogo- und Koinzidenzsignal getrennt Verbesserungen auf $0^s.01$. Bestimmt man für die *Schuler-Uhr* den Stand nach beiden Signalen getrennt, so bekommt man zunächst aus der Beobachtung der gesendeten Signale zwischen den beiden Uhrständen eine Differenz. Diese Differenzen sind in Fig. 7 für jeden Tag der Monate April bis September 1931 aufgetragen, und zwar im Sinne Onogo minus Koinzidenz. Nach Anbringung der von der Seewarte veröffentlichten Verbesserungen an beide Signale hätte man zu erwarten, daß die Streuung der Punkte in Fig. 7 auf $\pm 0^s.01$ zurückgeht, da die Hamburger Verbesserungen mit dieser Genauigkeit gegeben werden. Dies ist jedoch, wie Fig. 8 zeigt, nicht der Fall, sondern der größte Teil der Streuung bleibt bestehen. Die mittlere Streuung der unkorrigierten Differenzen während der Monate April bis Juni 1931 beträgt $\pm 0^s.050$, diejenige der korrigierten $\pm 0^s.035$. Ein besonders auffälliger Sprung in den Differenzen Onogo minus Koinzidenz zeigt sich in der Gegend

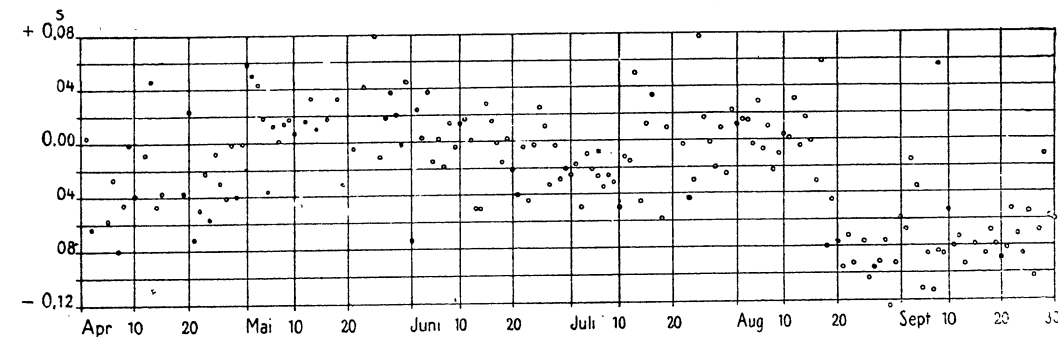


Fig. 7.

von Aug. 20. Obwohl die Diskrepanz in den unkorrigierten Differenzen an diesem Tage plötzlich auf etwa $0^s.1$ ansteigt, ist doch durch die Anbringung der unabhängig gegebenen Korrekturen für beide Signale keine Besserung herbeigeführt. Die Erklärung für den Sprung selber kann bereits aus der Fig. 6 vermutet werden. Dort beginnt die innere Übereinstimmung des Onogsignals mit Aug. 20 erheblich zu streuen. Es war demnach zu vermuten, daß ein Zusammenhang zwischen Onogo- und Koinzidenzsignal besteht. Bei der Durchsicht der in Göttingen aufgenommenen Diagramme durch Herrn Prof. *Schuler* stellte sich heraus, daß offenbar in der Kontaktapparatur des Onogsignals mit Aug. 20 etwas in Unordnung geraten sein mußte. Während früher die einzelnen Striche des Signals sehr genau die Länge einer Sekunde hatten, waren sie mit einem Male plötzlich länger geworden. Fig. 9 zeigt zwei Aufnahmen des Onogsignals mit dem Göttinger Registriergerät. Die kräftigen Verbreiterungen sind die zwei letzten Striche einer vollen Minute von 1931 Juli 16 (unten) und von 1931 Sept. 10 (oben). Man erkennt deutlich die verschiedenen Strichlängen an den beiden Tagen im Vergleich zu den Sekundenschlägen des *Schuler*-Pendels, die auf dem Bilde durch die dünnen, intermittierend versetzten, horizontalen Linien gekennzeichnet sind. Schon eine rohe Betrachtung der Fig. 9 zeigt, daß durch das Längerwerden der Minutenstriche der Größenordnung nach der Sprung von $0^s.1$ in der Differenz Onogo minus Koinzidenz erklärt werden kann. Warum dieser Sprung durch die Verbesserungen der Seewarte jedoch nicht zurückgeholt wird, ist nicht ohne weiteres einzusehen. Definitionsgemäß tritt die volle Minute jeweils mit

dem Ende des dritten Striches ein. Die Göttinger Messungen wurden daher stets auch auf das Strichende bezogen. Wenn eine Verschiebung dieser Marke gegen das Koinzidenzsignal durch die offiziell von der Seewarte veröffentlichten Verbesserungen nicht erfaßt wird, so kann dies offenbar nur darin seinen Grund haben, daß die Verbesserungen anscheinend nicht für die definierten Signalpunkte (Strichenden), sondern für die Strichanfänge bestimmt worden sind. Die Größe des Fehlers, der durch solche Ungenauigkeiten entstehen kann, liegt, wie dieses Beispiel zeigt, durchaus innerhalb der Grenzen der Anforderungen, die man an das Onogsignal zu stellen pflegt.

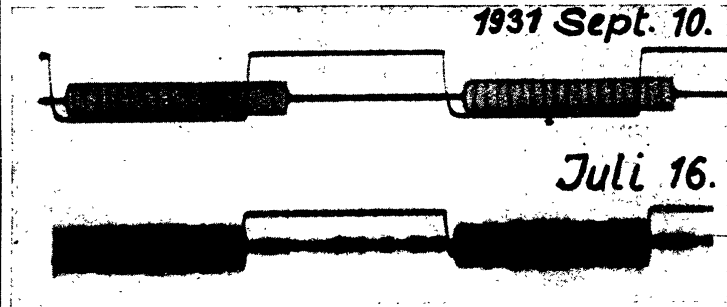


Fig. 9.

Es ist dringend zu wünschen, daß eine weitere Vervollkommnung der Zeitzeichenbetriebe einschließlich der gegebenen Verbesserungen möglichst gefördert werde, denn die Anforderungen der Präzisionszeitmessung werden heute von allen

interessierten Seiten so hoch gestellt, daß nicht allein durch größtmögliche Präzision der Apparaturen, sondern in hohem Maße auch durch eine genauest definierte Erfassung der Absolutzeit erst die Aussicht besteht, daß man in absehbarer Zeit zu der erstrebten Genauigkeit der Festlegung der Tageslänge auf $0^s.001$ gelangen kann.

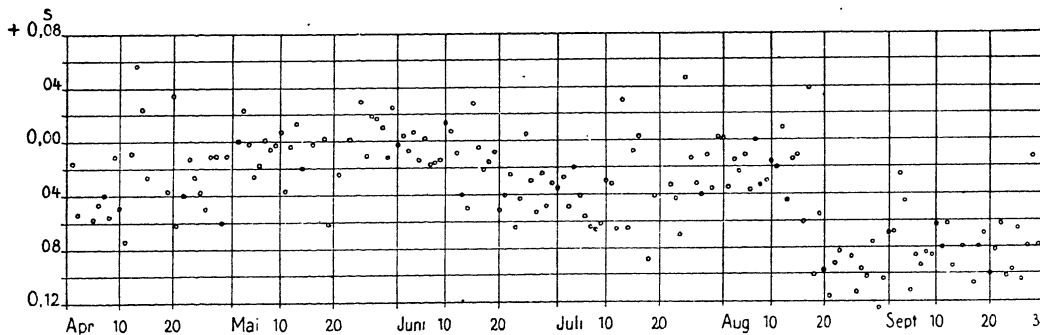


Fig. 8.

Göttingen, Universitäts-Sternwarte, 1932 Okt. 14.

G. Th. Gengler.

Plejadenbedeckung.

Die Plejadenbedeckung am 13.-14. Nov. 1932 beobachtete ich am 3" bei Vergr. 56fach von meiner Wohnung aus ($\phi = +50^{\circ}56'49''$, $\lambda = -27^m40^s.9$) wie folgt:

16 Tauri, Eintritt:	Wolken
17 » »	$23^h49^m13^s.6 \pm 1^s$ an Bergspitze
19 η » »	$23^h59^m4.2 \pm 0^s.5$
20 » »	$0^h14^m49.4$ genau
17 » Austritt:	0^h25^m16 ca. 5^s zu spät? (schon aus-
16 » »	$0^h55^m27.1$ genau [getreten])

19 η Tauri, Austritt:	$1^h19^m3^s.7$ genau
20 » »	$1^h36^m17.4$ »

Zunächst Wolken, dann klar, doch leichter Dunst, ruhige Bilder. 21 und 22 Tauri waren wegen des Dunstes und hellen Mondes am Rand nicht zu erkennen. Zeit: MEZ., Sternzeit-Taschenchronometer an Pendeluhr »Cloos 256« angeschlossen. Die Zehntelsekunden obiger Angaben rühren von der Umrechnung her. Beobachtungsgenauigkeit $0^s.5$ bis 1^s .

Köln, 1932 Nov. 14.

W. Malsch.

Inhalt zu Nr. 5914. G. Th. Gengler. Präzisionszeitmessung und *Schuler*-Pendel. 185. — W. Malsch. Plejadenbedeckung. 199.

Geschlossen 1932 Dez. 20. Herausgeber: H. K o b o l d. Expedition: Kiel, Moltkestr. 80. Postscheck-Konto Nr. 6238 Hamburg 11. Druck von C. Schaidt, Inhaber Georg Oheim, Kiel.