

Chronometrie

Deutsche Gesellschaft für



Mitteilungen Nr. 156 - Winter 2018

Oszilloskopische Ganganalyse bei Groß- und Kleinuhren mit einfachen Mitteln

Ralf Lempken

Einleitung

Der sogenannte Gang ¹⁾ einer Uhr wird durch das Zusammenwirken von Schwingungs-Mechanismus (Taktgeber) und der aus Anker und Ankerrad bestehenden Hemmung bestimmt. Diese erzeugen bei ihrer Bewegung periodische Geräusche – im Wesentlichen das bekannte „Tick-Tack“ –, welche nun prinzipiell die Möglichkeit bieten, den Gang eines mechanischen Uhrwerkes zu prüfen. Da die Geräusche aber zum einen für das menschliche Gehör kaum wahrnehmbar sind, und zum anderen zeitlich sehr schnell aufeinander folgen, müssen sie mit geeigneten technischen Hilfsmitteln erfasst, verstärkt und entsprechend z.B. für eine visuelle Darstellung umgesetzt werden.

Schon seit einigen Jahrzehnten sind unter der Bezeichnung ‚Zeitwaage‘ ²⁾ elektronische Geräte für eine schnelle Ganganalyse an mechanischen Uhrwerken im Fachhandel verfügbar. Diese Instrumente stellen entweder nur die Spitzen des Ganggeräusches („Tick, Tack“) in Form von ‚Ereignis-Punkten‘ oberhalb oder unterhalb einer mit der aktuellen Zeit fortschreitenden (Null-) Linie ³⁾ dar (Bilder 2a und b), oder – meist nur bei höherwertigen Geräten – in Form eines zeitlich aufgelösten Geräusch-Signals mit Darstellung des Amplituden-Verlaufs über der Zeitachse

(oszilloskopische Zeitwaagen). Auch von den meisten einfacheren Geräten werden neben der grafischen Anzeige der ‚Tick-Geräusche‘ zusätzlich noch:

- die Schwingungsfrequenz als Anzahl der Halbschwingungen pro Stunde (HS/h),
- die Amplitude als Winkelauslenkung des Gangreglers zwischen seiner Ruhelage und seinem Wendepunkt (in Winkelgrad),
- die Gangabweichung in Sekunden pro Tag (s/d) als Steigung der auf dem Display der elektronischen Zeitwaage dargestellten ‚Ereignisgeraden‘ gegenüber der Waagerechten,
- den Abfallfehler in Millisekunden (ms) als Zeitdifferenz zwischen den Zeiten der Halbschwingungen zu beiden Seiten der Nulllage auf dem Display einer Zeitwaage dargestellt. Diese Kenngrößen werden weiter unten an den Beispielen der Geräuschsignalbilder noch genauer beschrieben.

Zielsetzung

Ziel dieses Beitrags ist die Beschreibung einer Methode für die Ganganalyse bei Groß- und

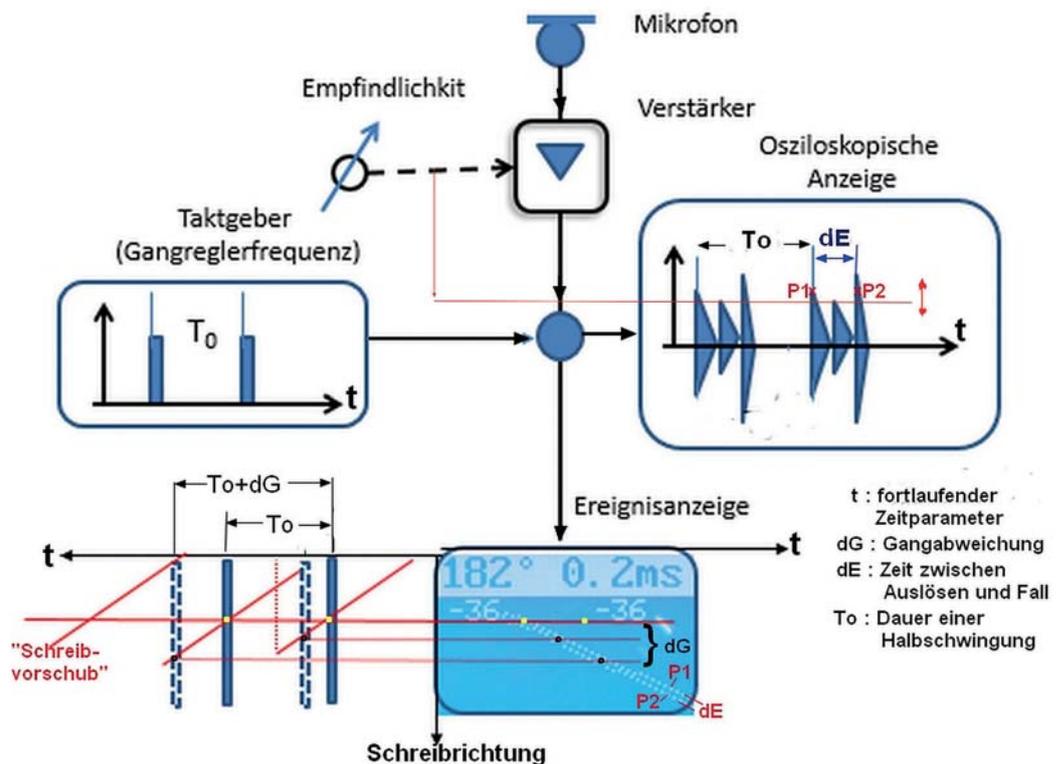


Bild 1:
Allgemeines Funktionsprinzip einer Zeitwaage.

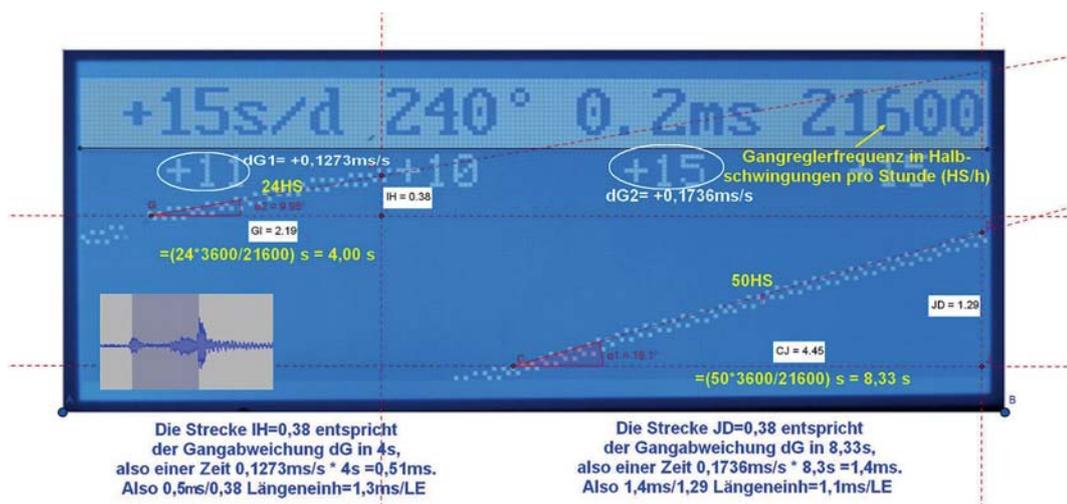


Bild 2:
Display-Anzeige einer Zeitwaage während einer Funktionsprüfung.

a) Moderne Taschenuhr mit Schweizer Ankerhemmung

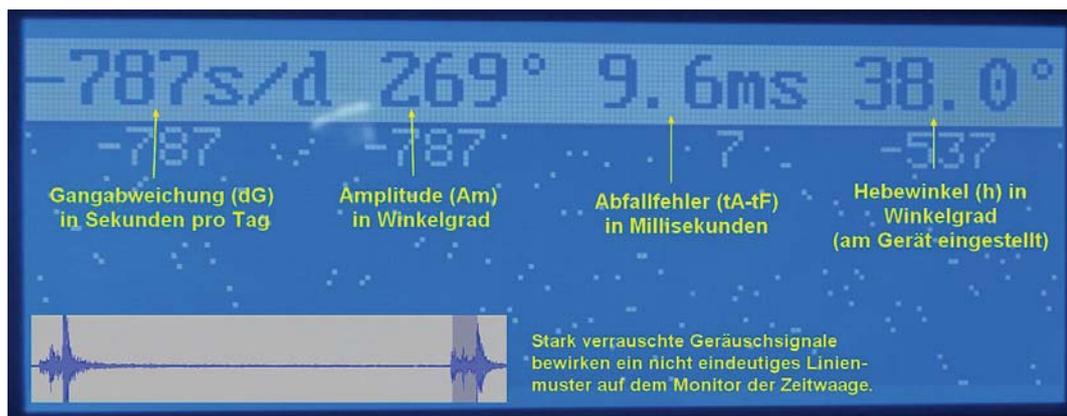
Kleinuhren unter Verwendung einer für den Audiobereich entwickelten Software ⁹⁾, welche folgende, für unsere Zielsetzung nützlichen Funktionen bietet:

- Aufnahmemöglichkeit akustischer Signale über die Soundkarte eines PC,
- Darstellung der aufgenommenen Signale in Echtzeit mit variabler Zeit- und Amplituden-Auflösung,
- Einstellbare Eingangsempfindlichkeit und
- akustische Wiedergabe der aufgenommenen Signale über die Soundkarte des PC
- Speichermöglichkeit der aufgenommenen Geräusche in einer Audiodatei („wav“) mit der Option, diese bei einer späteren Analyse erneut abzuspielen.

Das Herz einer mechanischen Uhr - Gangregler und Hemmung

Jede Uhr benötigt grundsätzlich einen Gangregler (Taktgeber), sowie ein Räderwerk mit Energiespeicher zum Antrieb desselben. Zur Ablauf-Regulierung des Räderwerkes durch den

Gangregler muss zwischen diesen beiden Funktionseinheiten eine ‚Hemmung‘ eingebaut werden. Diese hat im wesentlichen zwei Aufgaben zu erfüllen. Sie muss erstens einen periodischen Antriebsimpuls zum Ausgleich der unvermeidlichen Reibungsverluste, und damit zur Erhaltung der periodischen Schwingung an den Gangregler abgeben, und zweitens einen ungebremsten Ablauf des Räderwerkes durch geeignetes periodisches Abbremsen verhindern. Vollkommen frei von äußeren Einflüssen würde der Gangregler mit einer nur von den Abmessungen der Spiralfeder bzw. der Pendel-Länge, sowie von der gegen die Auslenkung wirkenden Rückstellkraft abhängigen Eigenfrequenz schwingen. Da aber jeder, die Hemmung auslösende Gangregler selber wieder von der Hemmung beeinflusst wird, kann letztere einen entscheidenden Einfluss auf die Ganggenauigkeit einer Uhr haben. Jede mechanische Hemmung verursacht Geräusche, welche auch ein sicheres Zeichen für Energieverluste sind, die aber meist nur zu einem sehr geringen Teil zu Lasten der Schwingungsenergie des Gangreglers gehen. Dennoch muss zur Aufrechterhaltung des Gangs dem Schwingungssystem jeder Uhr in periodischen Zeitabständen Energie zugeführt werden. Entscheidend für die Ganggenauigkeit sind die exakte Periodizität von Energiezuführung und Hemmung, welche sich letztendlich



b) Taschenuhr älterer Bauart mit Zylinderhemmung

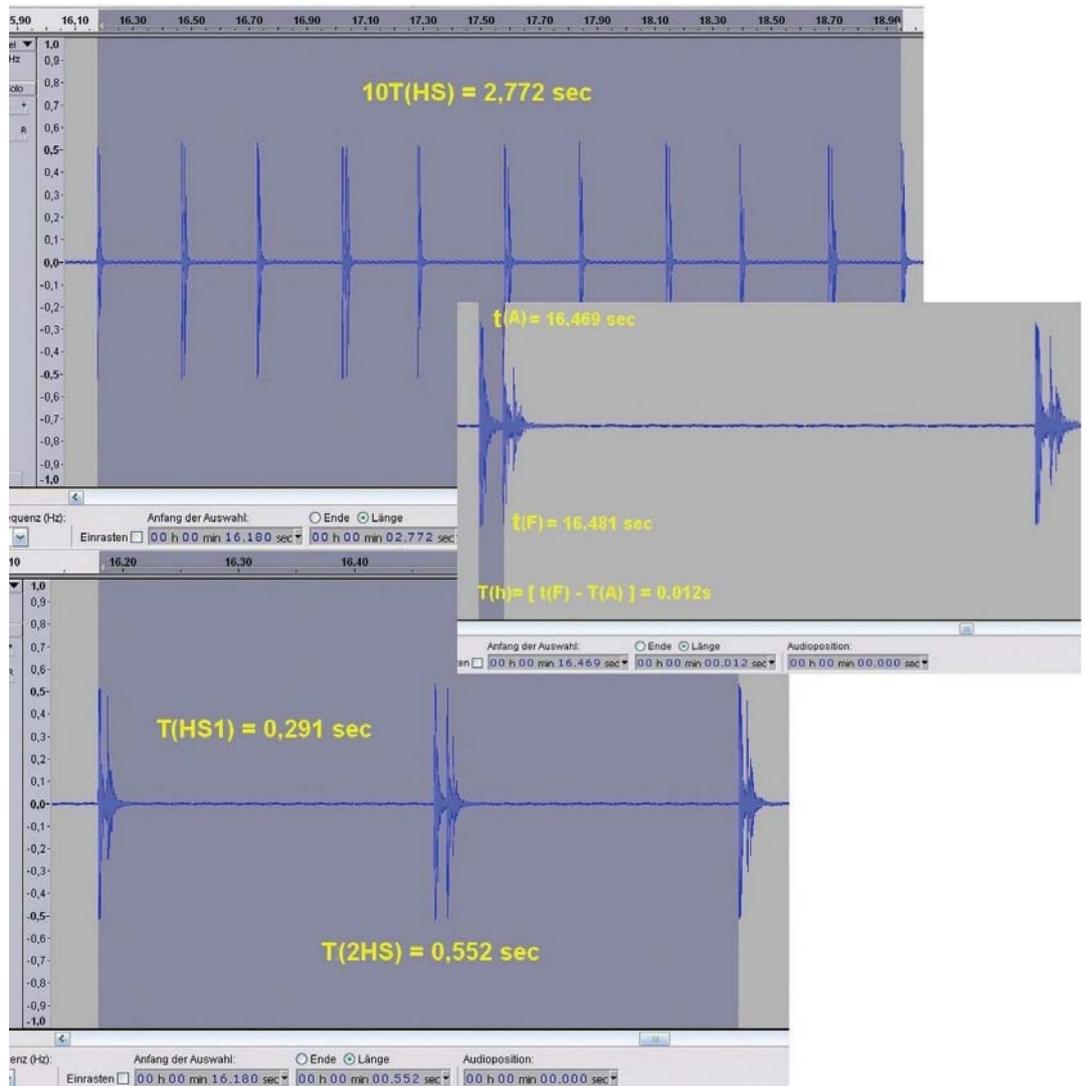


Bild 3:
oszilloskopische
Geräuschbilder

a) Kurzpendel-Tischuhr mit
Federzug

auch in dem Ganggeräusch widerspiegeln muss. Aus dieser letzten Schlussfolgerung leitet sich das Funktionsprinzip einer Zeitwaage ab. Das Ganggeräusch setzt sich zusammen aus Anteilen sowohl von der Hemmung, als auch vom Räderwerk. Das Geräuschmuster der Hemmung wiederum setzt sich aus Schlag- und Reibungsgeräuschen zusammen, wobei das Räderwerk im Idealfall nur geringe Reibungsanteile beisteuern sollte. Die mehr als 200 bekannten Bauformen mechanischer Hemmungen werden bezüglich ihrer Wechselwirkung mit dem Schwingungssystem nach ‚rückführender‘, ‚ruhender‘ und ‚freier‘ Hemmung unterschieden. Diese drei Funktionsprinzipien zeigen im Geräuschbild jeweils charakteristische Merkmale, die je nach Zustand der Hemmung mehr oder weniger deutlich hervortreten. Die grundsätzliche Charakteristik des Geräuschbildes einer Hemmung lässt sich theoretisch aus deren Funktionsweise ableiten, und sollte der des gemessenen Signals zumindest ähneln. Die Bilder 3a bis 3c zeigen beispielhaft die Geräuschbilder der mit den Bildern 5a bis 5c gezeigten Hemmungstypen. Die aus den aufgenommenen Geräuschbildern gemessenen und

ggf. daraus berechneten Kenngrößen sind in den Tabellen 1a-c zusammengestellt.

Von den nachfolgend beispielhaft vorgestellten Bauformen können

- die Hakenhemmung ⁶⁾ - als eine Bauform der Rückfallankerhemmung - dem Grundtyp der rückführenden Hemmung,
- die Zylinderhemmung dem Grundtyp der ruhenden Hemmung, sowie
- die Stiftankerhemmung ⁷⁾ dem Grundtyp der freien Hemmung zugeordnet werden.

Interpretation der Geräuschbilder

Hier soll zunächst der Schwerpunkt auf eine qualitative Beurteilung der Geräuschbilder gelegt werden, sowie darauf, einen Bezug zur Theorie der Hemmungen herzustellen. Eine quantitative Auswertung erfolgt weiter unten auf der Grundlage von Tabelle 1, zusammen mit den numerischen Angaben in den Bildern 3a bis 3c.

Das Zusammenspiel von Anker und Anker-Rad setzt sich grob aus 3 Phasen zusammen:

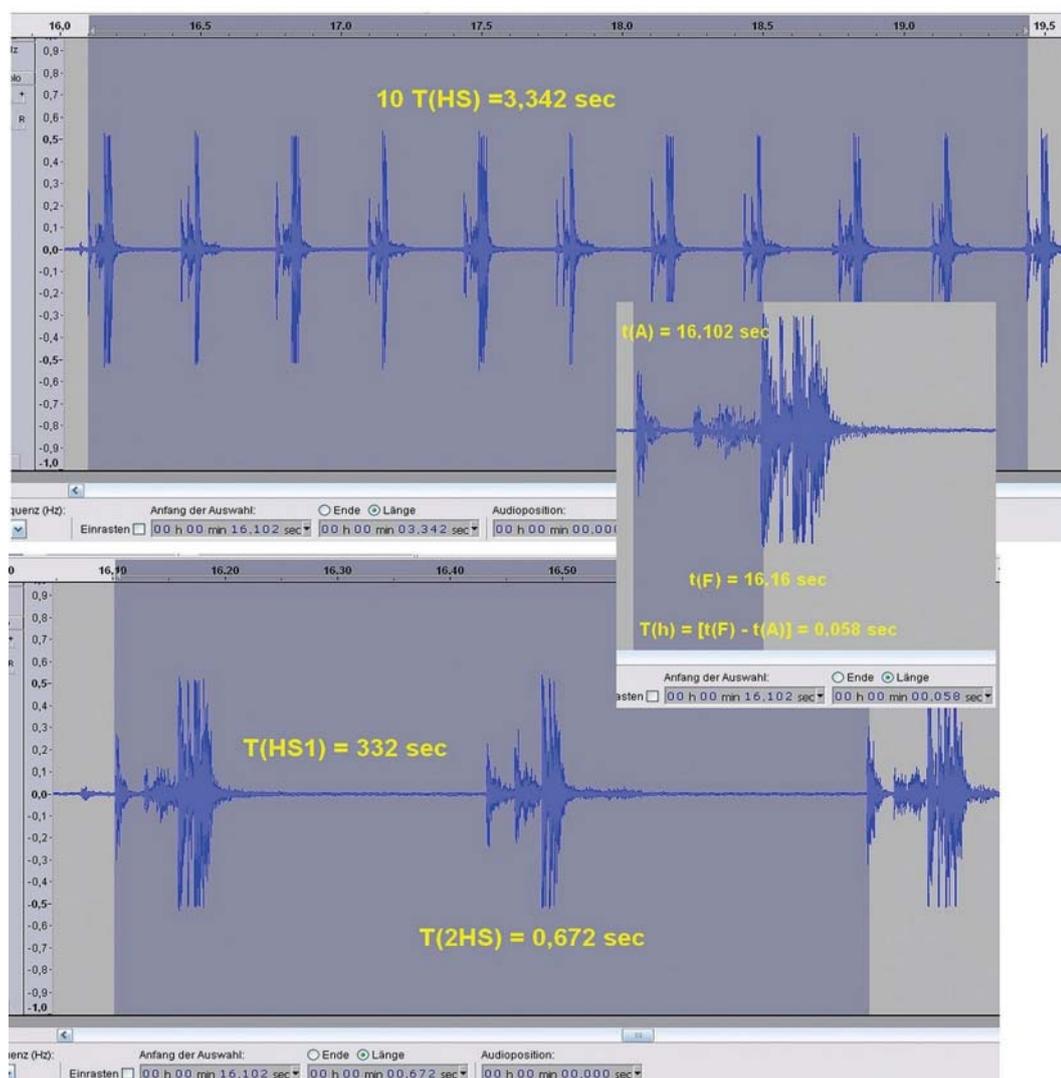
1. Bei der **Auslösung** wird das Anker-Rad vom Anker (Eingangsklaue) freigegeben, und beginnt sich zu drehen. Das Schwingssystem hat im Moment der Auslösung die maximale Auslenkung an einem Ende des Schwingungsbogens erreicht.

2. Während der Drehung erreicht das Schwingssystem zum Zeitpunkt des Durchgangs durch die Ruhelage (Null-Durchgang der Schwingungskurve) seine maximale Winkelgeschwindigkeit. In diesem Augenblick hebt ein Zahn des Anker-Rades die Eingangsseite des Ankers ein wenig an – **die Hebungsphase** –, und erteilt damit über den Anker dem Schwingssystem einen Impuls, welcher ausreichend Energie zum Ausgleich der Reibungsverluste liefern sollte.

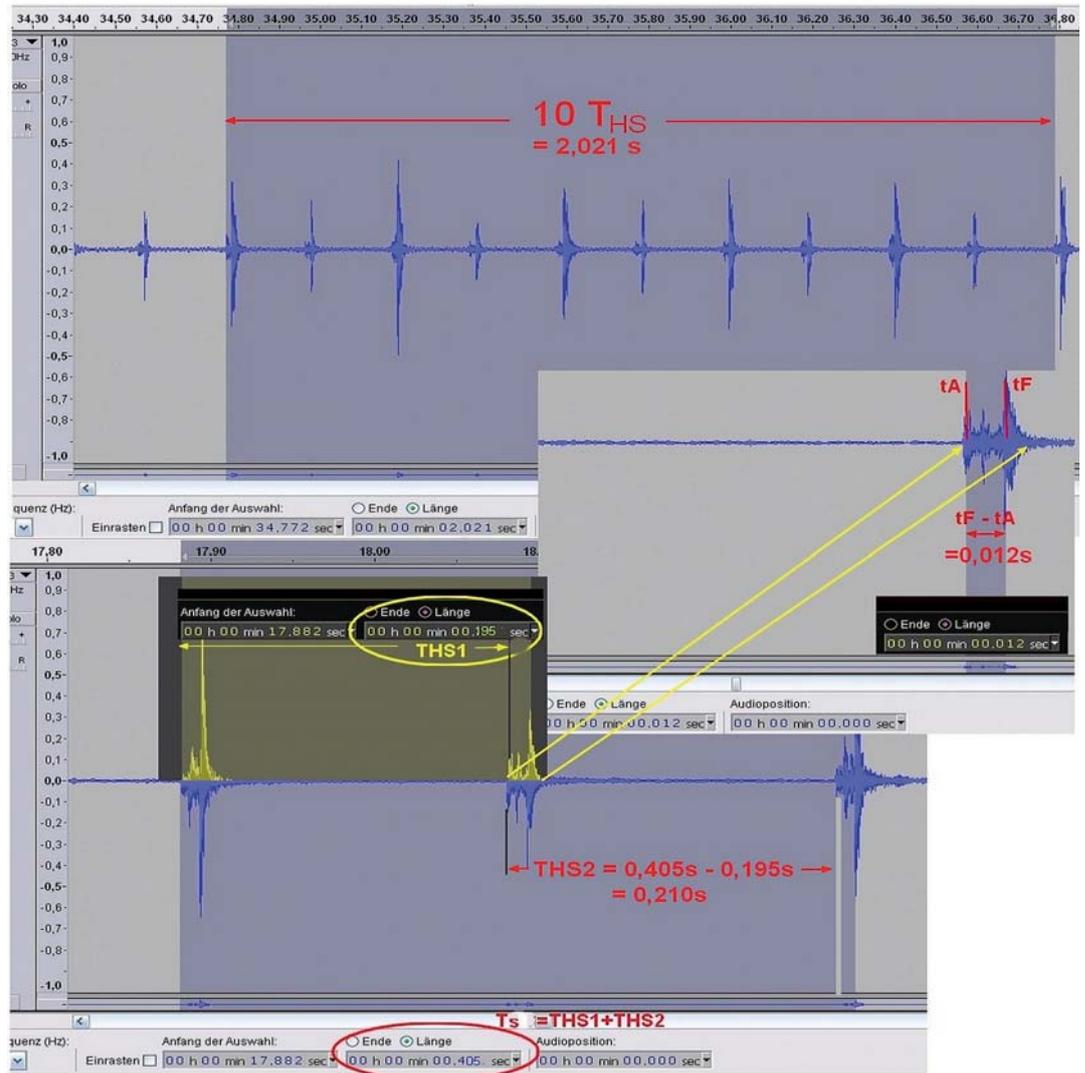
3. Unmittelbar nach der Hebephase erfolgt der sogenannte „Fall“⁸⁾, bei dem ein Zahn des Anker-Rades auf die Ruhefläche der Ausgangsklaue des Ankers fällt, und die Drehung damit stoppt. Damit ist die erste Halbschwingung (HS1) beendet.

Nach diesen 3 Phasen - Auslösung, Hebung und Fall - ist eine Halbschwingung beendet, und das Ankerrad hat sich um den Winkel einer halben Zahnteilung weitergedreht. Die Bewegung des Gangreglers kehrt sich nun um, und die zweite Halbschwingung wird möglichst symmetrisch zur ersten mit den gleichen 3 Phasen durchlaufen. Jetzt ist das Ankerrad eine volle Zahnteilung weiter.

Diese Abläufe erzeugen jeweils charakteristische Geräusche, welche ggf. Rückschlüsse auf Fehler im Gang des Uhrwerkes zulassen. Des Weiteren lassen sich daraus im Idealfall Bauform und Kenngrößen des Systems aus Gangregler, Anker und Anker-Rad ermitteln. Die zweimal drei Phasen des Zusammenspiels von Anker und Ankerrad je Schwingungsperiode zeigen sich in den Geräuschbildern als zwei Gruppen mit markanten Signalspitzen, die durch eine längere ‚geräuscharme‘ Phase getrennt sind. Allgemein markiert die erste Spitze die **Auslösung**, bei der sich die Eingangsklaue des Ankers von der Zahnflanke des Ankerrades löst, und letzteres zur weiteren Drehung freigibt. Unmittelbar darauf erfolgt die



b) Tischuhr mit Unruh und Federzug



c) Taschenuhr
 älterer Bauart mit
 Zylinderhemmung

in den Geräuschbildern durch die oft weniger markante zweite Spitze angedeutete **Hebephase**. Dabei trifft entweder die Ankerklaue auf die Hebefläche des Ankerrad-Zahnes wie bei der Stiftanker-Hemmung (Bild 3b), oder der Ankerrad-Zahn auf die Hebefläche der Ankerklaue wie bei den „Ankerpaletten“ der Schweizer Anker-Hemmung. Die Drehung des Ankerrades wird mit dem oben beschriebenen „Fall“ beendet. Dies verursacht in der Regel das stärkste Geräusch, was sich in den Geräuschbildern auch entsprechend darstellt. Die folgende Beschreibung der aufgenommenen Ganggeräusche folgt der Reihenfolge der historischen Weiterentwicklung von den rückführenden Hemmungen über die ruhenden Hemmungen zur freien Hemmung.

Bild 3a zeigt das Ganggeräusch einer *Federzug-Tischuhr mit Kurzpendel und Hakenanker* (Bild 5a). Zur Beurteilung der Ganggenauigkeit wurde über zehn Halbschwingungen (HS), bzw. 2772 ms gemittelt. Bei einer Halbschwingung sind drei Geräuschspitzen deutlich ausgeprägt, bei der anderen Halbschwingung ist das dem ‚Fall‘ zugeordnete Geräusch weniger ausgeprägt. Beide

Halbschwingungen zeigen auch markante Unterschiede in der Dauer der Hebephase, was auf die unsymmetrische Konstruktion des Ankers zurückgeführt werden könnte. Diese Hemmung gehört zum Typ der *rückführenden Hemmung* bei denen die Drehrichtung des Ankerrades durch den Gangregler kurzzeitig umgekehrt wird, während letzterer den sogenannten Ergänzungsbogen kurz vor Erreichen der maximalen Auslenkung durchläuft. Dem Gangregler wird damit ein Teil seiner Schwingungsenergie entzogen, was letztendlich Auswirkungen auf seine Schwingungsperiode hat. Bei einem unterstellten, in der Praxis aber kaum erreichbaren, konstanten Drehmomentverlauf des Räderwerkes, bleibt der Einfluss der Rückführung ebenfalls konstant, und kann theoretisch ausgeglichen werden. Bei Federkraft getriebenen Uhren lässt sich diese Forderung aber prinzipiell nicht umsetzen.

Bild 3c gibt den Gang einer alten Taschenuhr mit Zylinderhemmung⁵⁾ wieder. Beim Typ der *ruhenden Hemmung*, zu welchem auch die bei dieser Taschenuhr eingesetzte Hemmung gehört, stehen Hemmung und Gangregler in einer

permanenten reibenden mechanischen Verbindung. die sich dann über das Ankerrad auf das Räderwerk ausweitet. Wegen der Drehmomentabhängigkeit der Reibungskraft wird auch der Gang vom Drehmoment der Zugfeder abhängig, und damit ähnlich anfällig gegen Drehmoment-schwankungen im Räderwerk wie die rückführende Hemmung. Die übliche Geräuschspitze, welche die Auslösung kennzeichnet, ist bei der hier vorliegenden Taschenuhr nur undeutlich ausgeprägt und stark verbreitert. Auch zeigt sich eine Asymmetrie zwischen den beiden Halbschwingungen, sowohl qualitativ bezüglich der Form der Geräuschsignale, als auch bezüglich ihrer Dauer.

Die Differenz der Dauer beider Halbschwingungen wird „Abfall-Fehler“ genannt, und kann meist schon mit einfachen Zeitwaagen gemessen werden. Insgesamt ist das Signal stark ‚verrauscht‘, was auf einen erhöhten Verschleiß bzw. eine mangelhafte Schmierung hindeutet. Elektronische Zeitwaagen stoßen bei einem solchen Signal an ihre Grenzen (Bild 2b), da für die Ereignis-Darstellung die beiden Ereignisse Auslösung und Fall an den jeweiligen Geräuschspitzen eindeutig erkannt werden müssen. Die Messwerte dieser Uhr dienten als Grundlage für das in Bild 4 gezeigte Prinzip der Amplitudenberechnung.

Das in Bild 3b gezeigte Geräuschmuster stammt von einer *Federzug-Tischuhr mit Stiftankerhemmung*. Im Detail ist diese Hemmung in (Bild 5b) wiedergegeben. Letzteres zeigt die Hemmung gegen Ende der Hebe-Phase kurz vor dem Fall. Das Ankerrad ist hier rechtsdrehend. Diese vollkommen symmetrisch aufgebaute Hemmung gehört zum Typ der freien Hemmungen. Vergleicht man das Geräuschbild mit demjenigen der Hakenankerhemmung (Bild 3a), so ist der Unterschied

bezüglich der Symmetrie deutlich erkennbar. Entsprechend sollten Asymmetrien zwischen den Halbschwingungen bei der Stiftankerhemmung auch Anzeichen für ein nicht ordnungsgemäßes Verhalten sein. Im vorliegenden Fall fehlt bei einer Halbschwingung die zweite, die Hebe-Phase markierende Geräuschspitze. Dies kann auf eine Asymmetrie des Hebelstein-Eingriffs in die Ankergabel hindeuten. Eines der Ziele bei der Weiterentwicklung der ruhenden Hemmung hin zur freien Hemmung war wohl die weitere Reduzierung der Beeinflussung des Gangreglers durch das Räderwerk. Entsprechend ist bei letzterem Hemmungstyp die Schwingungsbeeinflussung des Gangreglers weitgehend unabhängig von den mechanischen Kontakten zwischen Anker und Hemmungsrade, und beschränkt sich im Wesentlichen auf den Bereich der Hebung.

Schallaufnehmer und Messverstärker

Bild 1 zeigt das allgemeine Funktionsprinzip einer Zeitwaage. Die beiden wesentlichen Schwierigkeiten sind zum einen, die Wahl eines für den geringen Schalldruck geeigneten Schallaufnehmers, und zum anderen die Realisierung einer zur Darstellung der gewünschten Messgrößen geeigneten Anzeige. In dem hier beschriebenen Verfahren dient ein Piezo-Element (Bild 6a) als Schallaufnehmer. Solche Piezo-Elemente generieren bei jeglicher Art von Druckbelastung eine Spannung zwischen den beiden Anschlusskontakten. Bei dem hier vorliegenden Fall des sogenannten Körperschalls, bewegen sich die Schallwellen direkt durch die Bauteile der Uhr.

Das Piezo-Element wird für einen optimalen Wirkungsgrad in direktem Kontakt mit dem Uhrengehäuse gebracht. Die erzeugte Ausgangsspannung liegt im Bereich von einigen Millivolt (mV).

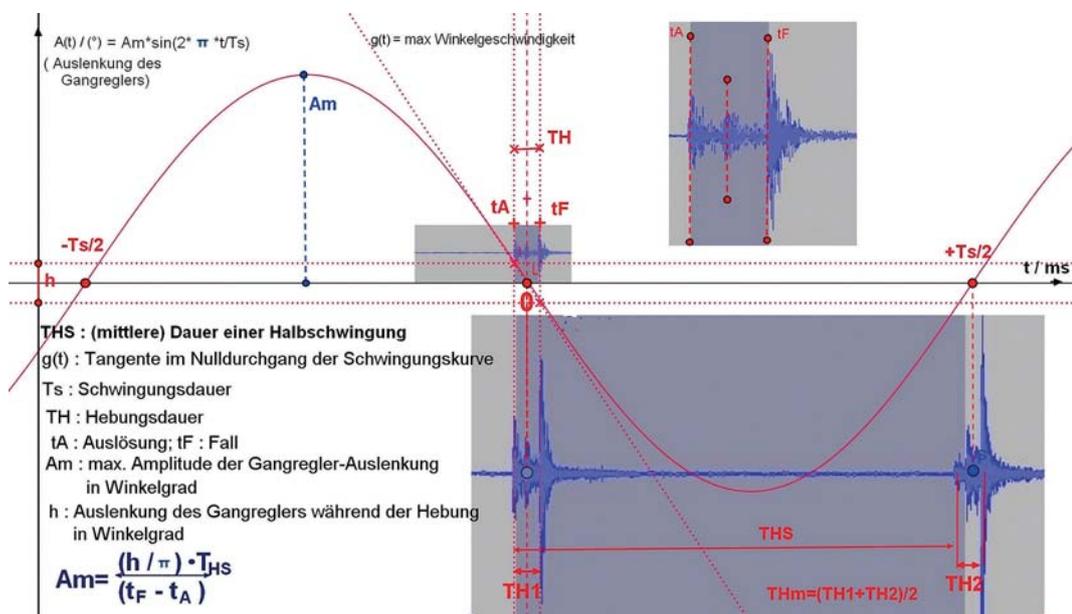


Bild 4:
Prinzip-Darstellung zur Berechnung des Amplitudenwinkels.

Das durch die Druckschwankungen im Piezoelement generierte Signal lässt sich dann mit einem einfach aufzubauenden zweistufigen Transistorverstärker (Bilder 6b und 6c) in solchem Maße verstärken, dass sie als Eingangsspannung für den Mikrofon- oder ‚Line‘ - Eingang eines Personal Computers ausreicht.

Dieses Signal kann dann mit der als ‚Freeware‘ kostenlos verfügbaren Software ‚Audacity‘ [1] sowohl in Echtzeit akustisch und visuell dargestellt, als auch für eine spätere Wiedergabe abgespeichert werden. Ein Benutzerhandbuch der Software ist unter [1] verfügbar.

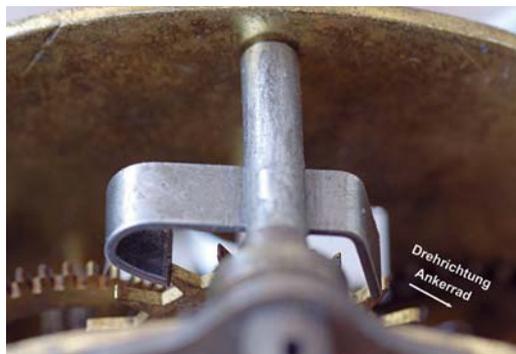


Bild 5:
Hemmungssysteme

a) Hakenanker-Hemmung



b) Stiftanker-Hemmung



c) Zylinderhemmung
(Taschenuhr älterer Bauart)

Abschließende Bemerkungen

Nach meiner Erfahrung zeigt sich bei einem direkten Vergleich zwischen handelsüblichen elektronischen Zeitwaagen ohne eine zeitlich aufgelöste Darstellung der Geräuschsignale und dem hier vorgestellten Verfahren, dass beide sich in den Ergebnissen durchaus ergänzen. Die von den elektronischen Zeitwaagen unmittelbar angezeigten Mittelwerte sind quantitativ verlässlicher als dies mit dem hier vorgestellten Verfahren mit einem vertretbaren Aufwand möglich ist. Letzteres hat dagegen eine deutlich höhere qualitative Aussagekraft. Zum Beispiel lassen sich Asymmetrien bei den Halbschwingungen, höhere Reibungsverluste infolge mangelhafter Schmierung, und evtl. Fehler im Räderwerk deutlicher erkennen. Die Hoffnung, an dem qualitativen Verlauf der Geräuschsignale den eingesetzten Hemmungstyp eindeutig identifizieren zu können, bestätigte sich nicht. Dazu müssten weitere quantitative Messungen wie z.B. die Abhängigkeit des Gangs vom Drehmoment der Zugfeder herangezogen werden. Zum Beispiel lässt sich das in Bild 2b gezeigte Prüfergebnis einer elektronischen Zeitwaage nur sehr schwer interpretieren. Das Geräuschsignal ist dagegen schon deutlich aussagekräftiger, und lässt auch die Probleme erkennen.

Tabellen

Für die gemessenen und berechneten Größen werden folgende Bezeichner bzw. Abkürzungen verwendet (Zeitintervalle werden mit großem T, absolute Zeiten mit kleinem t bezeichnet):

f: Schwingungsfrequenz des Gangreglers in Halbschwingungen pro Stunde (HS / h).

f': Schwingungsfrequenz des Gangreglers in 1/ Sekunde.

f₀: Sollwert der Schwingungsfrequenz des Gangreglers einer zu prüfenden Uhr in Halbschwingungen pro Stunde (HS/h).

HS/h: Anzahl Halbschwingungen pro Stunde.

T_s, T_{s0}: Schwingungsdauer in Millisekunden (ms), gemessener Wert bzw. Sollwert.

dT_s: = (T_{s0} – T_s), Ist die Differenz positiv, bewirkt dies ein Vorgehen der Uhr, andernfalls ein Nachgehen.

TH_{s1}, TH_{s2}, TH_{sm}: Dauer der ersten bzw. zweiten Halbschwingung des Gangreglers, sowie des daraus berechneten Mittelwertes. Die Dauer einer Halbschwingung wird gemessen vom Auslösen

des Ankers (Eingangsseite) beim Durchgang durch die Ruhelage (Zahn des Anker-Rades liegt auf der Ruhefläche der Eingangsseite des Ankers) über den Wendepunkt beim Erreichen der maximalen Amplitude, bis zum erneuten Durchgang durch die Ruhelage (Zahn des Anker-Rades liegt jetzt auf der Ruhefläche der Ausgangsseite des Ankers). Die zweite Halbschwingung verläuft im Idealfall symmetrisch zur ersten,

T_{H1} , T_{H2} , T_{Hm} : Dauer der beiden Hebe-Impulse an der Eingangs- bzw. Ausgangsseite des Ankers, so wie dem Mittelwert aus beiden in ms.

t_A , t_F : Zeitpunkt der Auslösung bzw. des Falls

$A(t)$, A_m : Auslenkwinkel oder Amplitude des Gangreglers als Funktion der Zeit, bzw. maximale Amplitude im Wendepunkt der Schwingung, gemessen in Winkelgrad ($^\circ$).

$S(t)$: Winkelgeschwindigkeit des Gangreglers (Unruh, Pendel) in Winkelgrad pro Sekunde ($^\circ / \text{sec}$) während sich dieser mit maximaler Geschwindigkeit durch die Ruhelage bewegt (diese ist gleich der Steigung der Tangenten im Null-Durchgang der Schwingungsfunktion).

h : Der während der Hebung durchlaufene Auslenkungswinkel des Gangreglers. Der Hebungswinkel ist eine, das System aus Anker und Hemmung bestimmende Größe, welche in der Regel von einer Zeitwaage nicht direkt gemessen werden kann. Dieser Winkel muss – falls vorhanden – den technischen Angaben zum Uhrwerk entnommen, und die Zeitwaage vor der Messung damit entsprechend eingestellt werden. Setzt man voraus, dass die Hebung symmetrisch zwischen den Zeitpunkten der Auslösung (t_A) und

demjenigen des Falls (t_F) erfolgt, so ist die nach der Hebung erreichte Amplitude $A(t) = A(t_F - t_A)/2 = h/2$.

$g(t)$: Gleichung der Tangente an die Schwingungskurve im Punkt der maximalen Winkelgeschwindigkeit des Gangreglers.

dG : Gangabweichung in Sekunden pro Tag. Diese lässt sich nur berechnen, wenn der Sollwert (f_0) der Schwingungsfrequenz des Gangreglers bekannt ist.

Als Testobjekte wurden zwei Tischuhren und eine Taschenuhr bezüglich ihres Gangverhaltens

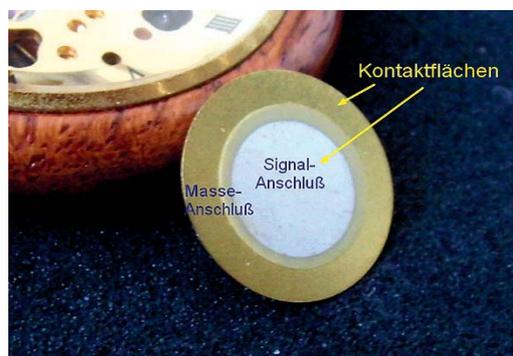
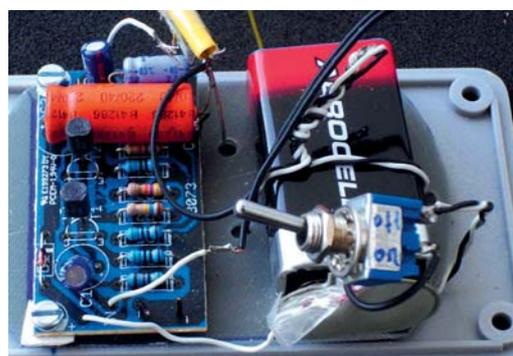
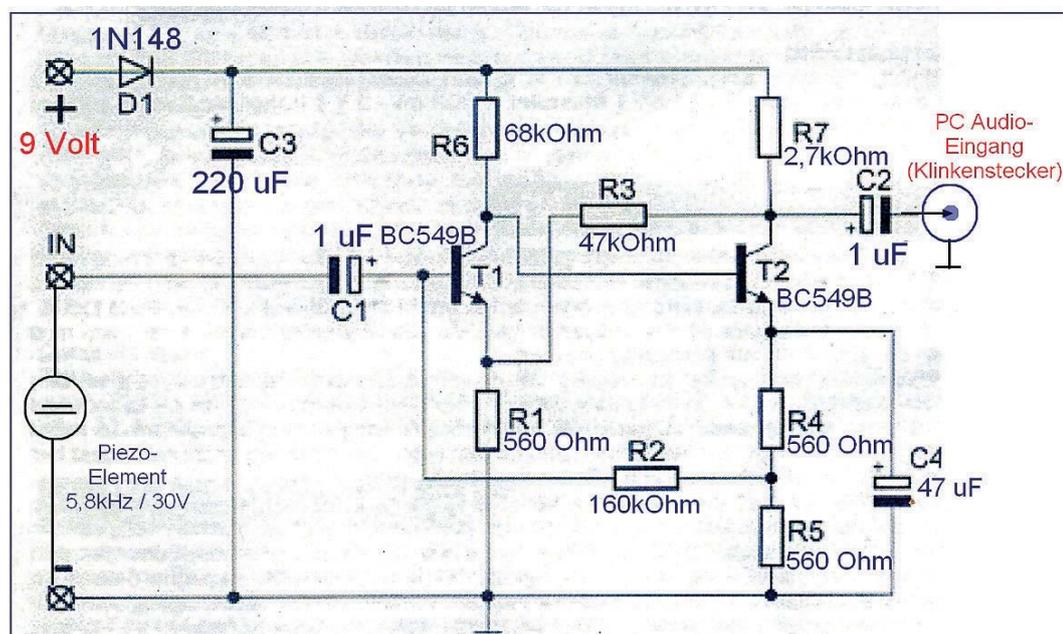


Bild 6:
Aufbau der ‚Zeitwaage‘

a) Piezo-Element als Schallaufnehmer



b) Messverstärker



c) Schaltbild des Messverstärkers

Uhr	Hemmung	10*t _{HS} /ms	t _{HS1} /ms	t _{2HS} /ms	(t _F -t _A) _{HS1} /ms	(t _F -t _A) _{HS2} /ms
Kurzpendel-Tischuhr	Hakenanker	2772	291	552	12	8
Tischuhr mit Unruh	Stiftanker	3342	332	672	58	49
Historische Taschenuhr	Zylinder	2021	195	405	13	12

Tabelle 1:
Zusammenstellung
der gemessenen und
berechneten Werte.

a) Aus den Geräusch-
bildern gemessene Werte.

näher analysiert. Bei den beiden Tischuhren handelt es sich

a) um eine Federzug-Tischuhr mit Kurzpendel und Hakenanker ohne Schlagwerk, und

b) um eine Federzug-Tischuhr mit Schlagwerk, Unruh und Stiftanker.

Bei der Taschenuhr diente ein Modell älterer Bauart (etwa um die Wende zum 20. Jahrhundert) mit Zylinderhemmung als Testobjekt.

Von jeder dieser drei Uhren wurde ein oszilloskopisches Geräuschbild aufgenommen (siehe Bilder 3a bis 3c). Die Ablese-Genauigkeit der Darstellung liegt im Millisekunden-Bereich. Aus dem Geräuschbild sind grundsätzlich ausschließlich Zeiten direkt ablesbar.

Die Höhe oder Intensität der sichtbaren Impulse besitzt nur dann eine Aussagekraft, wenn deren Schwankungen zueinander in Beziehung gesetzt werden. Die absolute Höhe hat keinerlei Bedeutung. Für unsere Ganganalyse wurden nun folgende Werte aus dem Geräuschbild abgelesen (siehe Tabelle 1a):

a) Die Schwingungsdauer (T_s) des Gangreglers bzw. die Dauer (t_{HS}/ms) einer Halbschwingung in Millisekunden.

b) Die Zeitspanne (t_F - t_A) zwischen Auslösung t_A und Fall t_F. Dies entspricht der Hebezeit (T_H) des Ankers durch das Ankerrad. Es können sich Unterschiede in den Hebezeiten für die erste (t_F - t_A)_{HS1} und die zweite Halbschwingung (t_F - t_A)_{HS2} ergeben, daher sind in Tabelle 1a beide Werte angegeben.

c) Der Zeitunterschied (T_{HS1} - T_{HS2}) zwischen der ersten Halbschwingung (HS1) und der zweiten Halbschwingung (HS2) einer vollen Schwingungsdauer T_s = T_{2HS}. Diese Zeitdifferenz wird als Abfall-, oder Symmetriefehler bezeichnet. Um Ablesefehler zu vermeiden, wird hier der Symmetriefehler aus der Dauer T_s = T_{2HS} einer vollen Schwingungsperiode und der Dauer T_{HS1} der ersten Halbschwingung errechnet. Dabei gilt:

$$(T_{HS1} - T_{HS2}) = (2T_{HS1} - T_{2HS}) = (2T_{HS1} - T_s)$$

Zur Verifikation der aus den Geräuschbildern abgelesenen, sowie den daraus abgeleiteten Werten, wurde die Taschenuhr zusätzlich mit einer handelsüblichen elektronischen Zeitwaage geprüft (Bilder 2a und 2b). Die damit gemessenen Werte sind:

- Frequenz (f) des Gangreglers (Unruh) in Halbschwingungen pro Stunde (HS/h), wobei zu beachten ist, dass von den Zeitwaagen meist der Sollwert (f₀) und nicht der wahre Mittelwert (f) angezeigt wird.

- Amplitude (A_m) als Drehwinkel in Winkelgrad (°) zwischen der Ruhelage und dem links- bzw. rechtsseitigen Wendepunkt der Unruh. Dieser Winkel hängt unmittelbar von dem an der Zeitwaage eingestellten Hebewinkel (h/°) ab, welchen von dem Gangregler während der Hebung durchlaufenen Drehwinkel angibt. Diese Abhängigkeit ist in der Gleichung Gl.3 weiter unten wiedergegeben.

- Der Abfall-, oder Symmetriefehler als Zeitdifferenz in Millisekunden (ms) zwischen den beiden zur jeweils gegenüberliegenden Seite um die Ruhelage herum erfolgenden Halbschwingungen HS₁ und HS₂.

- Die Gangabweichung dG in Sekunden pro Tag (s/d),

Diese können dann mit den entsprechenden, aus den Geräuschbildern ermittelten Werten verglichen werden.

In Tabelle 1c sind die aus den abgelesenen Zeitintervallen berechneten Kenngrößen

- mittlere Dauer einer Halbschwingung (T_{HSm}/ms) des Gangreglers im Millisekunden,

- Schwingungsfrequenz (f ¹/(1/s) = 1000/2 T_{HSm}) des Gangreglers als halber Kehrwert der Dauer einer Halbschwingung,

- Die bei den meisten Zeitwaagen übliche Angabe der Schwingungsfrequenz als Anzahl der Halbschwingungen pro Stunde (HS/h),

- der Abfall- oder Symmetriefehler in

Millisekunden (ms), als Betrag der Differenz (T_{HS1} - T_{HS2}) aus den Zeitintervallen der beiden Halbschwingungen, und die

- Gangabweichung in Sekunden pro Tag (s/d)

zusammengestellt.

Die beiden in Tabelle 1c bei der Taschenuhr angegebenen Kenngrößen Amplitude (Am) und Hebewinkel (h) sind - wie oben schon erwähnt - voneinander abhängig. Der Hebewinkel (h) wird nur durch die Bauform des Systems aus Gangregler und Hemmung bestimmt, und kann mit dem hier vorgestellten Verfahren nicht gemessen werden. Ist der Hebewinkel bekannt, lässt sich mit diesem, zusammen mit anderen, aus dem oszilloskopischen Verfahren ermittelten Zeitwerten die Amplitude berechnen. Dies wird in den Angaben zu den Berechnungen weiter unten gezeigt.

Berechnungen

Den folgenden Berechnungen liegt die Gangaufzeichnung für eine Taschenuhr älterer Bauart mit Zylinderhemmung zugrunde. In den Tabellen 1a bis 1c sind die zugehörigen Zeilen markiert.

Berechnung der Schlagfrequenz

Die Schwingfrequenz (f) des Gangreglers wird auf dem Display moderner Zeitwaagen meist in Halbschwingungen pro Stunde (im Beispiel: f = 18000 HS/h, gemessen mit einer modernen Zeitwaage) angegeben. Zur Auswertung der Geräuschbilder ist eine Einheiten-Umrechnung von HS/h in die offizielle SI-Einheit 1/sec (Anzahl voller Schwingungen pro Sekunde) sinnvoll. f ist dann die Schwingfrequenz in HS/h, f' der umgerechnete Wert in 1/s. In einer Stunde macht der Gangregler f/2 volle Schwingungen (hier: f/2=18000/2h=9000/h), und entsprechend in einer Sekunde:

Gl.1 $f' = f / (2 * 1h * 3600sec/h)$

Für unser Beispiel ergibt sich daraus:
 $f' = 18000/2*3600sec) = 2,5/sec$

Der Gangregler der Taschenuhr macht also 2,5 volle Schwingungen in einer Sekunde. Eine volle Schwingung dauert damit $T_s = 1 / (2,5/sec) = 0,4sec = 400ms$.

Der markierte Bereich in Bild 3c umfasst 10 Halbschwingungen, für die man in der Fußzeile des Diagramms $10 T_{hs} = 5 T_s = 2,021sec = 2021ms$ abliest. Die Schwingungsdauer ist dann:

$T_s = 2021ms/5 = 404ms$

Der mit unserer Selbstbau-Anordnung ermittelte Wert wird somit im Rahmen des Toleranzbereichs durch den von der modernen Zeitwaage gemessenen $(2*3600)/18ms=400ms$ (Gl1) bestätigt.

Berechnung des Symmetriefehlers (auch Abfallfehler oder Repère)

In Anlehnung an den Begriff ‚Repère‘ wird hier der Symmetriefehler mit ‚R‘ bezeichnet und in Millisekunden (ms) gemessen. Aus Bild 3c lässt sich ablesen:

Gl.2 $R = (T_{HS1} - T_{HS2}) = [T_{HS1} - (T_{2HS1} - T_{HS1})] = (2T_{HS1} - T_{2HS}) = (2*195 - 405)ms = (-15ms)$

Mit der elektronischen Zeitwaage wurde ein Symmetriefehler von etwa 10 ms ermittelt (Tabelle 1b) (Das negative Vorzeichen hat keine Bedeutung, und hängt nur von der Wahl der Halbschwingung ab, mit der man die Messung beginnt.).

Berechnung der Amplitude (Am)

Die Amplitude, bzw. der Amplitudenwinkel (Am), ist die Auslenkung, welche der Gangregler (hier: Rad-Unruh) vom Durchgang durch die Ruhelage (mit maximaler Winkelgeschwindigkeit) bis zum Erreichen des Wendepunktes erfährt.

Dies gilt für jede der beiden Halbschwingungen, wobei beide Amplituden dem Betrag nach im Idealfall gleich sein sollten. Mathematisch idealisiert lässt sich die Schwingung des Gangreglers als zeitlicher Verlauf seines Auslenkungs-Winkels als harmonische Schwingung der Form $A(t) = Am * \sin(2 * \pi * f' * t)$ beschreiben (Bild 4).

Der Vorgang der Hebung als Impuls für den Gangregler erfolgt während des Durchgangs des Gangreglers durch seine Ruhelage zwischen den Zeitpunkten der Auslösung (t_A) und dem Fall (t_F). In dieser Zeitspanne hat der Gangregler seine maximale Winkelgeschwindigkeit (in Winkelgrad pro Zeiteinheit).

b) Mit einer elektronischen Zeitwaage gemessene Werte (nur bei der Taschenuhr möglich).

Uhr	Hemmung	Gangregler-Frequenz f ₀ / (HS/h)	Hebewinkel h/ °	Amplitude Am/ °	Abfall- (Symmetrie) Fehler /ms	Gangabw./ (s/d)
Historische Taschenuhr	Zylinder	18000	38	354	9,6	-825

Uhr	T_{HSm}/ms	$f' / (1/s)$ [Gl. 1]	$f / (HS/h)$	$f_0 / (HS/h)$	Hebewinkel $h / ^\circ$	Amplitude $Am / ^\circ$ [Gl. 3]	Abfallfehler /ms [Gl. 2]	Gangabw. (s/d) [Gl. 4]
Kurzpendel-Tischuhr	277	1,8038	12987	13000			30	-86
Tischuhr mit Unruh	334	1,4961	10772	11000			8	-1791
Historische Taschenuhr	202	2,4740	17813	18000	38	196	15	-898

c) Auf Grundlage der Geräuschbildern bzw. der Messungen mit der Zeitwaage berechnete Werte.

Die Geradengleichung $g(t) = [S_{(t=0)} * t = (Am * 2 * \pi / TS) * t]$ der an den Nulldurchgang gelegten Tangente ist dann ein Maß für die Winkelgeschwindigkeit des Gangreglers während dieser den Winkelbereich (h) der Hebung durchläuft. Für die kurze Dauer ($t_F - t_A$) kann die Schwingungsfunktion $A(t)$ mit der Tangentengleichung $g(t)$ gleichgesetzt werden.

Also: $A(t_F - t_A) = h = [s * (t_F - t_A)] = [(Am * 2 * \pi / TS) * (t_F - t_A)]$

Löst man die Gleichung nach der Amplitude (Am) auf, kann diese nach Ablesen der Schwingungsdauer (TS) bzw. der Dauer (T_{HS}) für eine Halbschwingung bei bekanntem Hebungswinkel (h) aus

Gl.3 $Am = (h / \pi) * T_{HS} / (t_F - t_A)_m$; mit $(t_F - t_A)_m = [(t_F - t_A)_{HS1} + (t_F - t_A)_{HS2}] / 2$

berechnet werden. Der Quotient $T_{HS} / (t_F - t_A)$ kann aus dem Geräuschbild auch in Längeneinheiten abgemessen, und in die Gleichung eingesetzt werden. Mit den Werten für die alte Taschenuhr aus den Tabellen 1a bis 1c ergibt sich:

$Am = (38^\circ / \pi) * 2 * 202ms / (12ms + 13ms) = 196^\circ$

Der Unterschied zwischen der berechneten (Tabelle 1c) und der mit der Vergleichszeitwaage gemessenen Amplitude resultiert aus der Empfindlichkeit, mit der dieser maximale Auslenkungswinkel des Gangreglers auf eine Änderung der Hebungsdauer ($t_F - t_A$) reagiert. Bei stark durch z.B. Reibungsgeräusche verrauschte Signale lässt sich die Hebungsdauer nur schwer aus den Geräuschbildern ablesen.

Berechnung der Gangabweichung (dG)

Grundlage zur Berechnung der Gangabweichung ist die Differenz zwischen der dem Sollwert

entsprechenden Schwingungsdauer $T_{S0}=(1/f_0)$ des Gangreglers, und der tatsächlich gemessenen $T_S=(1/f)$. Ist f größer als f_0 , so ist die Differenz $dT_S = (1/f_0 - 1/f)$ positiv, und die Uhr geht vor. Ist f kleiner f_0 , ist die Differenz negativ, und die Uhr geht entsprechend nach. Für dG gilt dann:

$dG = dT_S * f$, worin (f) die Anzahl der tatsächlich vom Gangregler ausgeführten Schwingungen ist, welche multipliziert mit der Zeitdifferenz (dT_S) je Schwingung die kumulierte Gangabweichung (dG) ergibt. Mit Berücksichtigung der Einheiten und entsprechenden Umrechnungsfaktoren gilt dann:

Gl. 4 $dG = (1/f_0 - 1/f) * f * 24 * 3600 s/d = (f / f_0 - 1) * 86400 s/d$

T_{S0} und T_S können darin auch in Längeneinheiten eingesetzt werden, die sich dem Geräuschbild direkt entnehmen lassen. Für unser Messobjekt ergibt sich mit $f=17813HS/s$ und $f_0 = 18000HS/s$:

$dG = (f / f_0 - 1) * 86400 s/d = (17813 / 18000 - 1) * 86400 s/d = -898 s/d$

Die elektronische Zeitwaage zeigte $dG=-825 s/d$ (Tabelle 1b).

Anmerkungen

1 Unter dem Gang einer Uhr soll hier das Langzeitverhalten der Schwingungsdauer des Schwingsystems verstanden werden, was sich in der Praxis in Form eines Vor- oder Nachgehens der Uhr bemerkbar macht.

2 Die Bezeichnung „Zeitwaage“ für diese Art von Messgerät wurde in den Dreißiger Jahren des Zwanzigsten Jahrhunderts von Professor Keinath für die Siemens-Straumann Zeitwaage in die Fachterminologie eingeführt.

3 Die „Null-Linie“ ist eine waagerechte Linie, die im Idealfall von den Ereignispunkten geschrieben wird, wenn die Schwingungsdauer bei keinem Ereignis vom Idealwert abweicht. In der Praxis wird die Ereignislinie näherungsweise eine gegenüber der waagerechten Nulllinie steigende oder fallende Gerade sein.

4 Eine sich aus zwei Halbschwingungen zusammensetzende volle Schwingung des Schwingensystems reicht von der mit maximaler Winkelgeschwindigkeit durchlaufenen Nulllage (Unruhfeder entspannt, Pendel im tiefsten Punkt) über die maximale Auslenkung in die eine Richtung bei kurzzeitig stillstehender Unruh, dann mit umgekehrter Winkelbewegung wieder zurück zur Nulllage, wo dann die zur ersten spiegelsymmetrische zweite Halbschwingung startet, welche dann wieder mit der Nulllage endet.

Mathematisch wird die Schwingung durch eine harmonische Schwingung (Sinusfunktion) der Form $S(t) = A_m \cdot \sin(\pi \cdot HS \cdot t / 3600)$ beschrieben.

A_m ist dabei die Amplitude der Schwingung (hier in der Einheit Winkelgrad), HS die Anzahl der Halbschwingungen in einer Stunde und t ist die fortlaufende Zeit in Sekunden.

5 Die Zylinderhemmung wurde Ende des 17. Jahrhunderts von dem englischen Uhrmacher Thomas Tompion entwickelt, und 1720 von George Graham verbessert. Wegen der schwierigen Fertigung wurde die Zylinderhemmung erst ab der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts verstärkt in tragbaren Uhren eingebaut.

6 Die Haken- oder Rückfallankerhemmung (Bild 5a) wurde 1676 von Robert Hooke entwickelt, aber erst etwa ab 1680 auf Initiative von William Clement in Uhren verbaut.

7 Die Entwicklung der Stiftankerhemmung (Bild 5b) durch Louis Perron geht auf das Jahr 1798 zurück. Georg Friedrich Roskopf verbaute ab 1868 eine modifizierte Form dieser Hemmung in großer Stückzahl in seinen „Roskopf-Uhren“. Die Stiftanker-Hemmung wurde über viele Jahre vor allem in tragbaren Uhren, Weckern sowie Tischuhren eingebaut.

8 Genau genommen wird mit dem Begriff ‚Fall‘ der Abstand zwischen Ankerklaue und Ankerrad-Zahn nach der Hebung bezeichnet, wenn die gegenüber liegende Ankerklaue an die Ruhefläche des entsprechenden Ankerrad-Zahnes stößt.

9 Die hier verwendete Software 'Audacity' ist frei verfügbar [1], und läuft mit dem PC-Betriebssystem Windows.

Abbildungen

Bild 1 Das Prinzip einer Zeitwaage.

Bild 2 Display-Anzeige einer Zeitwaage während einer Funktionsprüfung.

- a) Moderne Taschenuhr mit Schweizer Ankerhemmung
- b) Taschenuhr älterer Bauart mit Zylinderhemmung

Bild 3 oszilloskopische Geräuschbilder

- a) Kurzpendel-Tischuhr mit Federzug
- b) Tischuhr mit Unruh und Federzug
- c) Taschenuhr älterer Bauart mit Zylinderhemmung

Bild 4 Prinzip-Darstellung zur Berechnung des Amplitudenwinkels

Bild 5 Hemmungssysteme

- a) Hakenanker-Hemmung
- b) Stiftanker-Hemmung
- c) Zylinderhemmung (Taschenuhr älterer Bauart)

Bild 6 Aufbau der ‚Zeitwaage‘

- a) Piezo-Element als Schallaufnehmer
- b) Messverstärker
- c) Schaltbild des Messverstärkers

Tabellen:

Tabelle 1 Zusammenstellung der gemessenen und berechneten Werte.

- a) Aus den Geräuschbildern gemessene Werte.
- b) Mit einer elektronischen Zeitwaage gemessene Werte (nur bei der Taschenuhr möglich)
- c) Auf Grundlage der Geräuschbildern bzw. der Messungen mit der Zeitwaage berechnete Werte.

Verwendete Quellen

[1] Software Audacity 1.3 Beta: <https://www.heise.de/download/product/audacity-5660>; Audacity-Portable: https://portableapps.com/de/apps/music_video/audacity_portable; Benutzerhandbuch: <http://www.audacity-forum.de/download/Audacity-Handbuch-deutsch-23-Jan-2005.pdf>

[2] Schulungsunterlage: Prüf und Messtechnik für mechanische Uhren: <https://www.witschi.com/assets/files/sheets/Prueftechnik%20fuer%20mechanische%20Uhren.pdf>

[3] Jendritzki, Stern, Heydt, Die Armband und Taschenuhr in der Reparatur, Historische Uhrenbücher, 3.Auflage, Berlin 2014