



Ing. Dietger Meissner, Schlottwitz

## Probleme der Zeitmessung bei der mechanischen Armanduhr

### 0. Einleitung

Die Anforderungen an Durchschnittsuhrer in bezug auf Ganggenauigkeit haben heute einen Grad erreicht, den man früher nur von Präzisionsuhren verlangte. Den Forderungen nach höchster Ganggenauigkeit zu entsprechen, muß neben der sorgfältigen Behandlung einer solchen Uhr der Regler möglichst eine konstante Schwingungszahl aufweisen. Dieser Forderung tragen neben den mechanischen Schwingern vor allem die elektrischen Schwinger mit hoher Frequenz Rechnung.

Die Hauptaufgabe bei der Konstruktion von mechanischen Uhren ist es deshalb, die Amplitude des Reglers möglichst konstant zu halten. Bei genauerer Beobachtung der Amplitude des Schwingers über einen längeren Zeitraum wird man feststellen, daß sich die Amplitude ständig um geringe Beträge ändert, und es somit zu Abweichungen in der Zeitangabe kommt. Dieser Fehler hat mechanische und physikalische Ursachen.

Mechanische Ursachen, die zur Veränderung der Amplitude der Unruherschwingungen führen, sind in erster Linie folgende:

1. Kein konstantes Antriebsmoment während einer Aufzugsperiode,
2. ungleichmäßige Momentenübertragung – Kraftspeicher – Regler,
3. unterschiedliche Unruhzapfenreibung in den einzelnen Gebrauchslagen,
4. durch Alterung der Uhr Verschmutzung und Verdichtung des Öles, höhere Reibungsverluste und somit verstärkte Abnutzung der mechanischen Teile.

Der physikalische Fehler besteht darin, daß in diesem Fall kein Isochronismus vorhanden ist. Isochronismus ist die Eigenschaft eines schwingenden Systems, unabhängig von der Größe des Ausschlages gleiche Schwingungsdauer zu besitzen.

In den folgenden Ausführungen soll zunächst einmal der Komplex der mechanischen Fehler in den markantesten Punkten behandelt werden.

#### 1. Erzeugung eines konstanten Antriebsmomentes

Bei Verwendung einer herkömmlichen Zugfeder (spiralförmig gewundene Biegefeder) wirkt sich die Differenz der beiden Zugfederkräfte  $M_{auf}$  und  $M_{ab}$  ungünstig auf den Regler aus. Ist die Zugfeder voll aufgezogen, so steht am Federhaus ein bestimmtes Moment zur Verfügung, das während des Ganges nach einer bestimmten Gesetzmäßigkeit abnimmt.

Nach Jörg ist der Verlauf des theoretischen und praktischen Drehmomentes bei Aufzug und Ablauf der Zugfeder in Abhängigkeit von der Umdrehungszahl des Federhauses dargestellt (Bild 1).

Der Regler erhält durch den laufend schwächer werdenden Antrieb immer weniger Energie zugeführt. Dies führt zu einer Amplitudenminderung. Hinzu kommen noch Schwankungen des Antriebsmomentes durch Ungleichmäßigkeiten im Ablauf des Räderwerkes.

Man ist nun bestrebt, die Steigung der Zugfederkennlinie

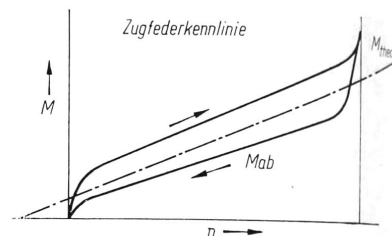


Bild 1. Schema des Verlaufes des theoretischen und praktischen Drehmomentes bei Aufzug und Ablauf der Zugfeder nach Jörg

möglichst gering zu halten, um den Unterschied zwischen  $M_{auf}$  und  $M_{ab}$  einem Minimum zuzuführen. Das erreicht man durch Verkleinerung von Klingenstärke und Klingenbreite und damit verbundener Vergrößerung der Federlänge, unter Beibehalten der Federhausabmessungen.

Eine weitere Möglichkeit ist die Vergrößerung des Federhauses bei gleichbleibender Klingenstärke, wodurch ebenfalls eine Vergrößerung der Federlänge erreicht wird. Obwohl das Zugfedermoment theoretisch linear mit dem Spannwinkel wächst, ist die wirkliche Drehmomentenkurve nur in einem bestimmten Bereich annähernd linear. Um das Werk nur mit Momenten innerhalb dieses Bereichs zu betreiben, kann man mit Hilfe eines Malteserkreuzes, das auf dem Federhaus befestigt ist und durch seine Form als Sperre wirkt, Aufzug und Ablauf der Zugfeder begrenzen. Diese Variante der Momentenbegrenzung läßt sich aus konstruktiven Gründen bei Armanduhren schwierig realisieren.

Die Wirkung von Drehmomentenschwankungen auf den Gangregler, hervorgerufen durch das Räderwerk, wird damit nicht ausgeschaltet. Um also dem Regler ein möglichst konstantes Moment zuzuführen, gibt es zwei Möglichkeiten:

- a) Die Momentenschwankungen des Kraftspeichers unmittelbar an ihm selbst auszuschalten. Durch das Räderwerk hervorgerufene Drehmomentenschwankungen werden dabei nicht mit erfaßt.
- b) Den Antrieb des Reglers unmittelbar vor die Reglerwelle zu verlegen, indem man vor dem Regler einen Hilfsspeicher einbaut, der vom Primärspeicher periodisch aufgezogen wird (Nachspannwerke). Die Kraft am Regler ist nahezu konstant, wenn die Nachspannzeiten sehr kurz sind.

Zur Erläuterung soll von jeder Variante ein Beispiel angeführt werden.

#### 1.1. Momentenausgleich am Kraftspeicher selbst

Die bekannteste Ausführung einer solchen Vorrichtung besteht im Prinzip Zugfeder – Federhaus – Kette – Schnecke (Bild 2).

Dieses System wird vorzugsweise in Seechronometern (auch bei alten Taschenuhren) angewendet und hat dort entschiedene Vorteile. Eine Realisierung in der Armanduhr ist aus konstruktiven Gründen nicht möglich. Es soll hier lediglich der Vollständigkeit halber angeführt werden. Bild 2 zeigt die Endphase des Ablaufes.

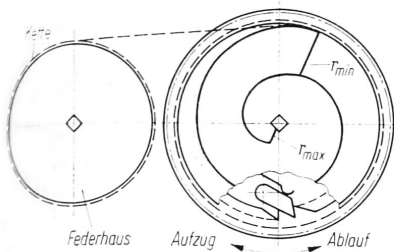


Bild 2  
Prinzip Zugfeder -  
Federhaus -  
Kette - Schnecke

### 1.2. Nachspannwerke für Kleinuhren

Diese Nachspannwerke gehen in der Hauptsache auf das Prinzip zurück, einen Hilfsspeicher (Feder), der sich möglichst nahe dem Regler befinden soll, durch den Primärspeicher über einen gesonderten Mechanismus in kurzen Intervallen um denselben Winkel bei konstanter Vorspannung zu spannen.

Bild 3 zeigt Gangkurven zweier 14-Tage-Uhren mit und ohne Nachspanneinrichtung.

Bild 4 zeigt ein Nachspannwerk nach Jendritzki. „An die Stelle der Ankerpaletten für das Nachspannwerk (1) ist ein sich mit dem Anker drehender Halbzyylinder (2) getreten, der die wechselseitige Arretierung des Nachspannwerkes übernimmt. (3) entspricht auch hier dem Ankerrad, (4) dem Zwischenspeicher und (5) bzw. (3) den Ankerpaletten bzw. dem Ankerrad.“ [1]

Trotz der technischen Vorteile dieser Nachspannwerke werden sie bei Neuentwicklungen aus ökonomischen und konstruktiven Gründen recht selten eingesetzt, denn man kann sagen, daß durch die Entwicklung der Federlegierungen auf Chrom-Nickel-Kobalt-Basis das Problem der Zugfeder (Energiespeicher) gelöst worden ist. Man verfügt somit heute über nichtrostende, nichtermüdende und unzerbrechliche Zugfedern mit unbegrenzter Lebensdauer. Es ist dadurch möglich, dünnere und längere Zugfedern mit flacher Federkennlinie einzusetzen. Hinzu kommt noch, daß auch im Laufe der Entwicklung auf dem Gebiet der Ver-

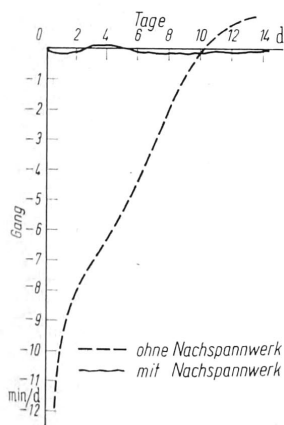


Bild 3  
Gangkurven  
zweier 14-Tage-Uhren  
mit und ohne  
Nachspanneinrichtung

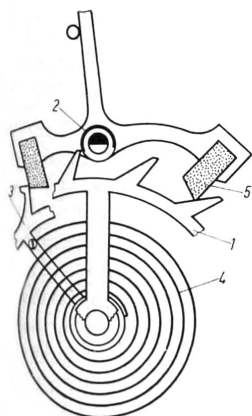


Bild 4. Nachspannwerk nach Jendritzki

zahnung und somit Momentenübertragung vom Kraftspeicher zum Regler wesentliche Fortschritte erzielt wurden.

### 1.3. Automatischer Aufzug

Ein wichtiges Mittel zur Erhöhung der Amplitudenkonstanz ist bei den mechanischen Armbanduhren der automatische Aufzug mit dem Vorteil der gleichmäßigen Kraftabgabe. Diese Variante wendet man heute vorwiegend zur Erzeugung eines konstanten Abtriebsmomentes an, da neben dem Vorteil für den Käufer, eine ständig „laufende“ Uhr zu besitzen, die Zugfeder während des Tragens der Uhr immer neu nachgespannt wird und somit ein relativ konstantes Drehmoment am Regler anliegt. Der automatische Aufzug ist charakterisiert durch eine sogenannte Schwungmasse (Rotor), ein Reduktionsgetriebe und eine Aufzugsbegrenzung. Drehmomentenschwankungen, hervorgerufen durch das Räderwerk, werden dabei nicht erfaßt. Bei der Schwungmasse hat sich die ohne Begrenzung um den Werkmittelpunkt umlaufende Masse (Rotor) allgemein durchgesetzt. Das Reduktionsgetriebe hat die Aufgabe, die Drehbewegung des Rotors zu übertragen und das Aufziehen der Feder bei jeder Drehrichtung des Rotors zu ermöglichen. Um ein Pellen der Unruh zu vermeiden, ist bei automatischen Aufzügen eine Aufzugsbegrenzung erforderlich. Dabei bedient man sich einer Rutschkupplung, die sich aus dem Rutschzaun und der Federhauswand zusammensetzt. Sobald die Zugkraft der Feder einen bestimmten Höchstwert erreicht hat, wird die Haftreibung überwunden und das äußere Federende (Rutschzaun) gleitet an der Federhauswand entlang. Die tragbare Kleinuhr mit Selbstaufzug ist auf Betriebsenergie aus der in der gespannten Zugfeder vorhandenen Kraftreserve nur noch während der Zeit angewiesen, in der die Uhr nicht getragen wird. Nimmt man an, daß die Betriebszeit der Uhr bei voll aufgezogener Feder mit 40 Stunden berechnet ist, so wird ungefähr  $\frac{1}{3}$  der Gangreserve für die Zeit entnommen, in der die Uhr nicht getragen wird. In diesem  $\frac{1}{3}$  der Betriebszeit der Uhr führt das Federhaus 1 bis  $1\frac{1}{3}$  Umdrehungen aus, während der das Antriebsmoment an sich nur minimal abfällt.

## 2. Kraft-(Energie) Übertragung mittels Zahnräder

Wie bereits erwähnt, hat die kontinuierliche und verlustlose Übertragung der Antriebsenergie vom Kraftspeicher zum Regler einen großen Einfluß auf die Amplitude des Reglers und somit auf den Gang der Uhr.

Es soll hier deshalb auf die Probleme der Verzahnung allgemein und auf Probleme der Verzahnung in der Uhrenindustrie im besonderen eingegangen werden.

In der Uhrenindustrie wird gefordert, daß die Verzahnungsabmessungen möglichst klein, die Übersetzungen möglichst groß sein sollen, d. h., daß Rad und Trieb auch bei extremen Zähnezahlen ihre Funktion zu erfüllen haben. Von den Zahngetrieben bei Meßuhren verlangt man in erster Linie winkelgetreue Bewegungsübertragung, bei Getrieben dagegen, die Kräfte zu übertragen haben, wird in erster Linie eine momentengetreue Übertragung angestrebt. Theoretisch werden beide Forderungen erfüllt. Aus Fertigungsgründen müssen aber Toleranzen zugelassen werden, die es nur gestatten, daß die eine oder andere Bedingung wenigstens angenähert eingehalten wird. Ebenfalls kann aus fertigungstechnischen Gründen die Toleranz des Achsenabstandes nicht linear mit den geometrischen Abmessungen des Getriebes im Verhältnis stehen. Aus diesem Grund kann es bei achsabstandsempfindlichen Verzahnungen in der Momentenübertragung zu Schwankungen und somit zu merklichen Ungenauigkeiten in der Zeitangabe kommen. Betrachtet man die übliche Uhrenverzahnung unter einem Mikroskop, so kann man feststellen, daß die Zahnform der angestrebten Zykloidenform nicht ganz entspricht. Die Möglichkeit, auch die Zykloide vorwiegend bei Rädern im Wälzverfahren herstellen zu können, senkt die Fertigungskosten, und es wird eine höhere Funktionstätigkeit des Getriebes erzielt.

In der Uhrenindustrie kommt es vor allem darauf an, eine möglichst momententreue Verzahnung zu verwenden. Über das Verzahnungsproblem in Kleinuhren wurde bereits in vielen Vorträgen, Fachartikeln und Fachbüchern eingehend gesprochen und geschrieben. Das Problem liegt im großen und ganzen darin, ein Verzahnungssystem zu finden, durch das auftretende Funktionsschwierigkeiten und zugleich beträchtliche Fertigungskosten vermieden werden können. Stellt man die beiden in Frage kommenden Verzahnungsarten – Zykloide und Evolvente – gegenüber, so kann man sagen, daß auf Grund der noch überwiegenden Vorteile der Zykloidenverzahnung diese nach wie vor in verschiedenen Ausführungsarten in der Kleinuhrenfertigung zum Einsatz kommt.

In der Uhrenindustrie der DDR wird die Pseudozykloide nach TGL 36-165, Blatt 1 bis 3, angewendet. Diese Pseudozykloidenverzahnung ist eine Verzahnung, bei der die Kopfflanken der Zähne durch Kreisbogen der Epizykloide angenähert und die Fußflanken der Zähne durch Hypozykloiden gebildet werden.

### 3. Der Regler

Zunächst unterscheidet man zwei große Reglergruppen:

- Regler, die lediglich auf dem Prinzip der überschüssigen Energievernichtung beruhen. Sie gestatten den kontinuierlichen Ablauf des Werkes (Fliehkraftregler).
- Regler, die die Bewegung des Laufwerkes mittels eines Ankers wechselseitig hemmen und wieder freigeben, die sogenannten Hemmregler.

Diese Gruppe der Hemmregler soll hier in den markantesten Punkten kurz erwähnt werden. Die Hemmregler teilt man nochmals ein in:

- Hemmregler ohne Eigenschwinger und
- Hemmregler mit Eigenschwinger.

Diese unterteilt man nochmals in:

- Hemmregler mit starrer Kopplung,
- Hemmregler mit halbstarrer Kopplung und
- Hemmregler mit loser Kopplung.

Der Hemmregler mit loser Kopplung ist unter der Bezeichnung „Unruhregler“ bekannt. Der Eigenschwinger ist in diesem Fall eine drehbar gelagerte ausgewuchtete Masse (Unruhring), die mit einer Feder (Spirale) als lageunabhängiges Drehpendel aufzufassen ist, wobei dieses Drehpendel nur innerhalb eines kleinen Winkels mit dem Anker in Verbindung steht.

Diese beiden Bauteile – Unruh und Spirale – wurden in den letzten Jahren ständig weiterentwickelt. Wissenschaftlern und Technikern ist es gelungen, die physikalischen Wechselbeziehungen zwischen Unruh und Spirale sowie die damit verbundenen metallurgischen Probleme zu klären und für die Praxis die entsprechenden Schlüsse zu ziehen. Die Versuche, den Einfluß der Temperatur auf die Spiralfeder mit Hilfe eines bimetalischen Reifens der Unruh zu kompensieren, den Temperatureinfluß also gewissermaßen durch temperaturgesteuerte Beeinflussung des Unruhträgheitsmomentes zu beseitigen, sind hinreichend bekannt. Das Problem der Temperaturkompensation schien erst dann erfolgversprechend gelöst zu sein, als der Komplex von der Werkstoffseite her aufgerollt wurde.

Die Anforderungen an ein Schwingsystem werden somit weitgehendst der Spirale übertragen. Die Kompensationsunruh ist deshalb auch heute bei Serieuhren noch anzutreffen. Die Unruh wird in den meisten Fällen aus Neusilber oder Beryllium hergestellt, um einmal eine gute mechanische Bearbeitung zu ermöglichen und zum anderen Material zu verwenden mit einem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Diese Schwerpunktverlagerung auf die Entwicklung einer guten Spirale ist auch damit begründet, daß die Gangabweichungen bei Taschen- und Armbanduhren nur mit 17 Prozent durch eine variable Un-

ruh, aber mit 83 Prozent durch eine variable Spiralfeder kompensiert werden können.

Welche Forderungen werden heute an eine gute Spiralfeder gestellt?

Einmal soll sie durch isochrone Schwingungen den Ablauf des Räderwerkes regulieren, zum anderen muß sie gegen Temperatureinflüsse, magnetische Felder und Korrosion beständig sein. Sie muß vorzügliche elastische und Festigkeitseigenschaften bei geringer innerer Dämpfung besitzen. Den Forderungen nach Einhaltung eines bestimmten Durchmesser, nach gleichem Windungsabstand, gutem Rund- und Flachlauf wird hauptsächlich mit mechanischen Mitteln nachgekommen. So entstanden in Laboratorien in zeitlicher Reihenfolge die Legierungen Invar, Elinvar und Nivarox. Trotz außerordentlich bedeutsamer Erfolge schließt die Spiralfeder noch eine Reihe von Problemen in sich, die man als noch immer unbefriedigend gelöst ansehen muß.

Die Formel für das Direktionsmoment einer Spiralfeder lautet:

$$D = \frac{E \cdot J}{L}$$

Dabei bedeutet:

E = Elastizitätsmodul,

J = axiales Flächenträgheitsmoment des Federquerschnittes,

L = Länge der Feder.

In der Serienproduktion ist es nur mit einer gewissen Unsicherheit möglich, ein bestimmtes Richtmoment zu reproduzieren. Dies läßt sich folgendermaßen erklären:

$$J = \frac{b \cdot d^3}{12}$$

Dabei bedeutet:

b = Breite der Klinge,

d = Dicke der Klinge.

Aus der Formel geht hervor, daß die Dicke der Klinge in der dritten Potenz eingeht, so daß sich der Fehler in der Dicke stärker auf das Direktionsmoment der Spirale auswirkt als eine Abweichung in der Breite. So bewirkt eine Änderung der Wanddicke von 0,001 mm bei einer Armbanduhrenspiralfeder eine Gangänderung von etwa 31 Minuten in 24 Stunden. Es kommt also in der Zukunft darauf an, in der Praxis Mittel zu schaffen, um die Dicke der Spiralfeder reproduzierbar zu beherrschen.

Die Befestigung der Spirale an der Spiralarolle sowie am Werkgestell wirft einen weiteren Problemkreis auf. Diese Befestigung der Spirale erfolgt in den meisten Fällen durch Verstiften, Vernieten oder Verstemmen. Damit büßt die Spirale ihre ursprünglich erhaltene Form ein, und es treten somit innere Spannungen im Gefüge auf. Diese Einspannbedingungen haben einen gewissen Einfluß auf die Feder-Charakteristik und damit auf das Isochronismusverhalten der Uhr. Auch hier erhebt sich die Forderung nach Reproduzierbarkeit der Spirale. Eine ganze Reihe der heute üblichen Befestigungen der Spiralfederenden kommt dieser Forderung noch nicht nach.

Diese und ähnliche Probleme hemmen heute noch weitgehend den wirtschaftlichen Austausch dieses Bauteiles.

### 4. Schlußbetrachtungen

Mit der Andeutung der Probleme sollte lediglich ein Gesamtüberblick über die bei der mechanischen Armbanduhren bestehenden Probleme und Aufgaben gegeben werden.

Die Perspektive der mechanischen Armbanduhren liegt im wesentlichen darin, die Serienproduktion noch zielstrebig und rationeller zu organisieren und damit noch wirtschaftlicher zu fertigen und somit die Voraussetzung zu schaffen, billige und gute Gebrauchsuhren auf den Markt zu bringen.

#### Literatur

- Technische Laufwerke von Dipl.-Ing. Friedrich Assmus