

# Der sekundäre Fehler

Von Dr. K. Giebel

Wenn man vom sekundären Fehler der Uhr schlechthin spricht, so meint man damit den restlichen Gangfehler, der seine Ursache in der Unvollkommenheit des Temperaturausgleiches hat.

Der Temperaturfehler ist bei den mit Unruh und Spiralfeder ausgerüsteten Uhren sehr groß. Erwärmt man eine Taschenuhr normaler Größe, die eine einmetallische Unruh und eine Stahlspiralfeder hat, um 1° C, so geht sie rund 11 bis 12" im Tage nach. Zur Erklärung dieser Erscheinung ist man zunächst geneigt, die Ausdehnung durch die Wärme heranzuziehen. Wenn sich die Unruh ausdehnt, so wird ihr Trägheitsmoment größer, und die Schwingungen erfolgen langsamer. Diese Ausdehnung der Unruh verursacht aber nur einen Fehler von 1½ bis 2" im Tage.

Woher rühren die übrigen mehr als 80 % des Temperaturfehlers? Jedenfalls nicht — wie oft fälschlich angenommen wird — von der Längenausdehnung der Spiralfeder. Zwar wird durch die Längenausdehnung das Elastizitätsmoment verringert, aber gleichzeitig wird es durch die Ausdehnung in Breite und Dicke vergrößert, und dieser letzte Einfluß ist größer als der erste. Es läßt sich leicht nachweisen, daß durch die räumliche Ausdehnung der Spiralfeder bei der Erwärmung nicht ein Nachgehen, sondern sogar ein Vorgehen von rund ½" im Tage für 1° C hervorgerufen wird.

Der große Fehler von mehr als 9" im Tage für 1° C wird verursacht durch die Erschlaffung der Spiralfeder. Es ist uns ja eine ganz geläufige Vorstellung, daß die Metalle bei Erwärmung weich werden. Das drückt man in der Mechanik so aus, daß der Elastizitätsmodul bei Erwärmung geringer wird und mit ihm das Elastizitätsmoment der Feder. Auf diese Begriffe kommen wir später eingehender zu sprechen.

Ein Übel bekämpft man am erfolgreichsten an seiner Wurzel. Das würde hier heißen, daß man für die Feder einen Stoff sucht, der bei Erwärmung nicht oder möglichst wenig erschlafft. Die vor wenigen Jahren von Guillaume erfundene Elinvarlegierung, auf die wir am Schlusse zurückkommen werden, bedeutet auf diesem Wege einen bedeutenden Fortschritt.

Als man in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts begann, dem Temperaturfehler zu Leibe zu gehen, war man in der Metallkunde noch nicht weit genug, um an eine solche Lösung der Frage denken zu können. Es boten sich zwei Wege für den Temperatureausgleich:

1. Veränderung der Länge der Spiralfeder;
2. Veränderung des Trägheitsmomentes der Unruh.

Man beschritt zunächst den ersten Weg. J. Harrison befestigte in seiner zweiten Längenuhr (beendet 1737) die Rückerstifte an den Enden eines zweimetallischen Streifens, durch dessen Biegung in der Wärme die Rückerstifte einander näherrückten und so die Spiralfeder verkürzten. Später hat man auch die Rückerstifte in festem Abstände zueinander gelassen und sie durch ein Metallthermometer längs der Spiralfeder verschoben. So einfach, wie dieses Mittel erscheint, war es indessen nicht, und in der Folgezeit wandte man sich der anderen Methode zu, das Trägheitsmoment der Unruh zu verändern (Julien Le Roy, Arnold, Earnshaw).

So kam man zu der bekannten zweimetallischen aufgeschnittenen Unruh. Auf den stählernen Unruhreifen ist Messing aufgeschweißt, und der Reifen ist an zwei gegenüberliegenden Stellen aufgeschnitten, so daß er aus zwei symmetrisch gelegenen Metallthermometern besteht. Da das Messing mit dem größeren Ausdehnungskoeffizienten

außen liegt, werden bei der Erwärmung die freien Enden der Reifenstücke nach innen gedrückt; und die geschwächte Spiralfeder hat nun eine Unruh von kleinerem Trägheitsmomente zu bewegen, wodurch bei günstiger Abstimmung der Elemente ein Ausgleich des Temperaturfehlers erzielt werden kann.

Aber dieser Ausgleich kann nur für zwei verschiedene Temperaturen erreicht werden, z. B. kann man auf diese Weise die Unruh zwingen, bei 0° und 30° dieselbe Anzahl Schwingungen im Tage zu machen. Damit ist aber noch nicht erreicht, daß sie auch in den Zwischentemperaturen zwischen 0° und 30° oder gar unterhalb 0° oder oberhalb 30° dieselbe Zahl Schwingungen im Tage macht. Tatsächlich weicht bei diesem Ausgleich die Schwingungszahl in den anderen Temperaturen etwas von der gewünschten Zahl ab, und diese Abweichung ist eben der sekundäre Fehler. Bei der Messing-Stahl-Unruh mit Stahlspiralfeder, die für 0° und 30° ausgeglichen ist, beträgt er bei 15° etwa 2" Vorgehen\*) (Abb. 1, ausgezogene Kurve). Hat man für 15° und

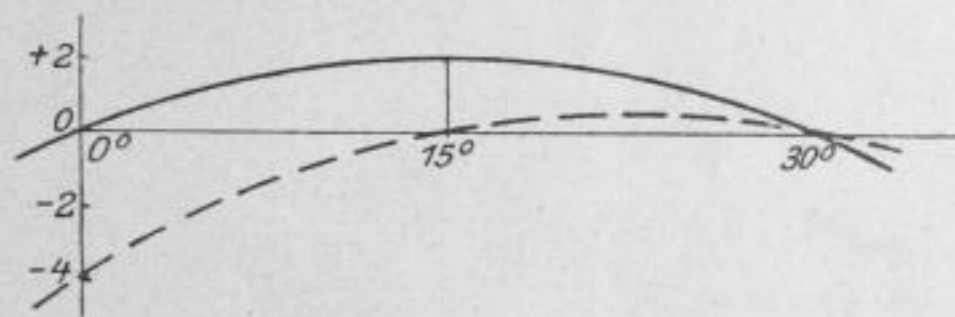


Abb. 1

30° ausgeglichen, so ist entsprechend bei 0° ein Nachgehen von 4" im Tage zu erwarten (gestrichelte Kurve). Wenn also auch der Fehler beträchtlich kleiner geworden ist, statt  $15 \times 11 = 165''$  nur noch 2 oder 4", so ist er doch noch groß genug, um bei der Feinstellung von Präzisionsuhren ernste Schwierigkeiten zu machen.

Als erster dürfte F. Berthoud (um 1775) auf diesen Fehler hingewiesen haben; klarer scheint ihn J. Leroux (1785) erkannt zu haben. Erst 1833 gab Dent im Nautical Magazine eine ausreichende Erklärung, und 1845 trat Poole mit seinen Hilfskompensationen auf.

Der Fehler besteht — praktisch gesprochen — darin, daß in der Kälte die freien Reifenden zu weit nach außen gehen. Deshalb versuchte man, dieses Hinausgehen durch Bremsen oder Zügeln zu vermeiden. Dabei tritt aber Reibung auf, und es besteht die Gefahr, daß die Änderung sprungweise erfolgt. Deshalb gingen andere dazu über, räumliche Verwindungen der zweimetallischen Reifen hervorzurufen; andere wiederum setzten auf die Unruh Hilfsstreifen, die entgegengesetzt wirken, usw. Aber keine dieser Vorrichtungen konnte voll befriedigen, entweder war sie zu zart, oder die Ausführung machte Schwierigkeiten, oder die Justierung war zu langwierig; kurz, an jeder dieser geistvollen Lösungen war etwas auszusetzen. Die Abbildung 2 zeigt uns eine Reihe solcher Hilfskompensationen.

\*) Zur Abbildung 1 sei bemerkt, daß die Kurve in Wirklichkeit nicht einen so glatten Verlauf hat. Um aber ein klares Bild zu bekommen, nähert man sie durch eine Parabel an. Das Verfahren ist folgendes: Man möge beobachtet haben: bei 0° und bei 30° 0", bei 15° 2" und bei den Zwischentemperaturen 7,5° 2,6", 22,5° 1". Dann bildet man zuerst den Mittelwert aus den beiden letzten Beobachtungen:  $\frac{2,6 + 1}{2} = 1,8''$ ; man multipliziert diesen Wert mit  $\frac{4}{3}$ , was 2,4" ergibt, und nun bildet man den Mittelwert aus diesem Wert und dem bei 15° erhaltenen, also  $\frac{2,4 + 2}{2} = 2,2''$ . Das ist dann der sekundäre Fehler, und unsere Annäherungsparabel zeigt bei den fünf beobachteten Temperaturen 0; 1,65; 2,2; 1,65; 0".