

Temperaturkompensation mittels Nickel-Eisenlegierungen

## Einfluss der Temperatur auf die Ganggenauigkeit mechanischer Uhrwerke

BURDE&CO \*), Hartmut Mossig, 2004

Mechanische Räderuhren mit Stundenzeiger sind seit dem 13. Jh. bekannt, die Ganggenauigkeit war jedoch sehr schlecht, bei Abweichungen von 30 bis 40 Minuten pro Tag war der Einfluss von Temperaturschwankungen nicht erkennbar. Erst mit dem holländische Astronom, Mathematiker und Physiker **Huygens** aus Den Haag, beginnt die Epoche der genauen Zeitmessung. Huygens erfand im Jahre 1656 unabhängig von Galilei das Pendel zum zweiten Mal und machte es 1657 durch eine Veröffentlichung allgemein bekannt. Die durch die Einführung des Pendels mögliche Ganggenauigkeit führte zur Anbringung des Minutenzeigers.

Huygens verdankt die Uhrmacherei noch weitere Impulse. So ist die 1675 vorgeschlagene Kombination Unruhe - Spirale bis auf den heutigen Tag das Regulierorgan aller mechanischen, tragbaren Uhren.



Christiaan  
Huygens  
(1629-1695)

Ein mechanisches Uhrwerk besteht aus drei Baugruppen:

Dem Antrieb, normalerweise ein Gewicht oder eine Feder; dem Gangregler, dies ist ein Schwingungssystem, etwa ein Pendel oder eine Radunruh mit Spiralfeder, und ein Getriebe für die Zeitanzeige. Der Gangregler ist für den Gang des Uhrwerkes von zentraler Bedeutung. Als Gang einer Uhr bezeichnet man die Stetigkeit des Ablaufens. Eine Uhr, die auf grund von Primärfehlern am Tag 1 Sekunde vorgeht, wird in 60 Tagen 60 Sekunden vorgehen.

Sekundärfehler, wie der Temperatureinfluss sind unregelmäßig und daher nicht einrechenbar.

### Das Temperaturproblem.

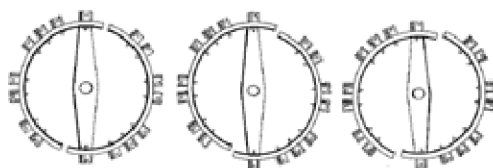
Der Effekt der Temperatur auf Radunruh mit Spiralfeder aus Stahl, ist eine Abweichung von 11 Sekunden pro Grad Celsius und Tag.

Der Fehler eines Pendel aus Stahl beträgt ca. 0,5 Sekunden pro Grad Celsius und Tag.

Andere, nicht lineare Einflüsse, wie z.B. Viskosität der Schmiermittel, waren vergleichsweise gering.

### Das Longitudinalproblem.

Die geographische Breite lässt sich durch Peilung auf Sonne oder Sterne feststellen, die geographische Länge ist jedoch nur über Zeitmessung in Relation zum Ausgangspunkt und Ortszeit zu ermitteln. Um nach einer 6-wöchigen Seereise die Position auf 100 km genau anzugeben, musste die Uhr auf 6 Sekunden in 24 Stunden genau gehen. Diese Genauigkeit war jedoch mit Pendeluhren auf hoher See, auch mit verbesserter kardanischer Aufhängung, nicht erreichbar.



### Die Temperaturkompensation.

Die grundsätzliche Wirkung von Thermobimetall wurde schon 1766 vom französischen Uhrmacher Pierre **Le Roy** (1717-1785) entdeckt und zur Temperatur-Kompensation von Radunruh mit Spiralfeder genützt. Le Roy verlötete einen Messing- und Stahlstreifen und formte daraus die Unruhe (links). Durch den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der beiden Metalle krümmt sich das Bimetall, bei Temperaturerhöhung nach innen (mitte), sinkt die Temperatur, nach außen (rechts). Damit ändert sich das Trägheitsmoment der Unruh und beeinflusst die Ganggenauigkeit. Die Kompensation war bei zwei Temperaturen, z.B. bei 4°C und 36°C perfekt, bei dazwischen liegenden Temperaturen war wieder eine Abweichung (Sekundärfehler) festzustellen, so geht die Uhr bei 20°C um ca. 3 bis 4 Sekunden pro Tag vor. Wie auch immer, die Uhr von Le Roy zeigte in 46 Tagen nur eine Fehlweisung von 7½ Sekunden, das entspricht einer Abweichung von 3 km am Äquator.

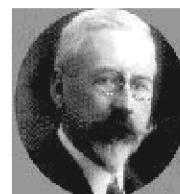
Die Kompensationsunruh (Ausgleichsunruh) wurde von John **Harrison** (1693-1776) zuerst angewandt. Sie soll den Fehler, der durch Temperaturänderung entsteht, ausgleichen. Dieser Fehler entsteht nicht nur durch die Ausdehnung der Unruh bei Temperaturzunahme, sondern in weit größerem Maße durch das Entspannen der Stahlspiralfeder bei Temperaturerhöhung.

Ein Bimetallstreifen ändert die Einspannlänge der Spiralfeder und erhöht oder senkt damit die Federkraft. Die legendäre Schiffsuhr H4 von Harrison löste das Longitudinalproblem. Nach 156 Tagen und Einrechnung der Primärfehler, verlor die Uhr 15 Sekunden, dies ist ein Fehler von 5 Meilen.



### Die **Ausdehnungslegierungen**

1895 erhielt **Guillaume**, Assistent der Direktion am Bureau International des Poids et Mesures in Sèvres/F, zwei Metallproben vom Service Technique de l'Artillerie zur Untersuchung. Diese bei **IMPHY** (vormals Societe Commentry - Fourchambout - Decazeville) hergestellten Legierungen zeigten ein erstaunliches Verhalten: der tatsächliche Ausdehnungskoeffizient war wesentlich geringer, als es die Legierungsanteile von Fe und Ni vermuten ließen. In der Tat war die Ausdehnung nur 1/10 des Basismaterials Eisen (Fe). Im Bereich der Raumtemperatur bis ca. 100°C zeigt **FeNi36** den kleinsten Temperaturkoeffizienten aller Metalle. Dieses Phänomen -FeNi-Anomalie- zeigte sich in der Folge auch bei weiteren Eisen-Nickel-Legierungen.



Charles-Eduard  
**Guillaume**  
(1861-1938)

Ein Antrieb, 1895 von Wiener Uhrmacher **Riefler** gebaut, hat einen Pendelstab aus einer Nickel-Eisenlegierung. Diese Legierung wurde von Guillaume als **Invar** (unveränderlich = *invariable*) benannt. Verlängert durch ein Stück Stahlrohr reicht es bis zur Mitte der aufgebohrten Pendellinse, deren Schwerpunkt somit immer in gleicher Höhe bleibt. Die Herstellung der hochreinen Legierung ist jedoch teuer, weil ein langes Alterungsverfahren zur Lösung der Werkstoffspannungen notwendig ist.

### Die **Neuzeit**

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde Invar auch für die Herstellung von Radunruh mit Spiralfeder eingesetzt, um den Einfluss der Temperatur auf die Ganggenauigkeit zu vermeiden.

Invar hat jedoch mehrere entscheidende Nachteile, denn die Legierung hat im Vergleich zu Federstahl eine nur geringe Festigkeit, ist weiteres schlecht zu bearbeiten, ist nicht korrosionsfest und ist magnetisierbar.

In Zusammenarbeit mit Pierre **Chevenard** (1888-1960), Direktor des Stahlwerkes IMPHY, entwickelte 1919 Guillaume ein Eisen-Nickel-Chrom Legierung (FeNi34Cr12), die ebenfalls einen sehr kleinen Ausdehnungskoeffizienten hat, dies jedoch bei guter Festigkeit und einem über weiten Temperaturbereich konstanten Elastizitätsmodul. Durch die Zulegierung von Chrom ist das Metall zudem rostbeständig. Die Legierung wurde **Elinvar** (Elasticité Invariable) genannt. Sämtliche Einrichtungen aus Bimetall zur Temperaturkompensation wurden durch den Einsatz von Elinvar damit hinfällig.

1920 erhielt Guillaume für die Entdeckung der Anomalien der FeNi Legierungen den Nobelpreis der Physik.

\*) BURDE&CO ist Vertretung in Österreich für IMPHY ALLOYS S.A.

Literaturhinweise:

Uhren, RVG, 1982, ISBN 3 8810 2056 X

The Iron-Nickel-Alloys, Technique and Documentation, 1996, ISBN 2 7430 0113-5, Seite 433, ff