



**Elektronisch gesteuerte
TN-Pendelhauptuhr**

KARL GUNDLFINGER, DIETER NEZIK

Elektronisch gesteuerte TN-Pendelhauptuhr

Karl Gundlfinger, Dieter Nezik

Wie in allen Bereichen der Nachrichtentechnik, gewinnt die Elektronik auch in der Uhrentechnik immer mehr an Bedeutung. Bei Großuhren, wie sie in Wohn- und Arbeitsräumen verwendet werden, sind elektronisch gesteuerte Unruh-Schwinger bereits weit verbreitet. Das gleiche gilt für transistorgesteuerte Quarzuhren für wissenschaftliche Zwecke.

Als Hauptuhren für Uhrenanlagen werden hauptsächlich elektrische Pendeluhren verwendet, wenn die gebotene Ganggenauigkeit im Bereich von 10^{-5} für den Anwendungszweck ausreicht [1]. Bei höheren Genauigkeitsansprüchen, z. B. 10^{-6} oder 10^{-7} im spezifizierten Temperaturbereich von 4°C bis 36°C werden quarzgesteuerte Hauptuhren eingesetzt, deren allgemeine Anwendung nur noch von der Kostenseite verhindert wird. Ein Schwingquarz erfordert neben einer vielstufigen Teilerkette Maßnahmen, um den Einfluß der Umgebungstemperatur auszugleichen [2,3].

Theoretische Überlegungen und Laborversuche haben gezeigt, daß sich durch den Einsatz eines Pendels in Verbindung mit elektronischen Bauelementen ein technisch-wirtschaftliches Optimum in der Herstellung elektrischer Hauptuhren erzielen läßt.

Das Pendel ist im Schwerfeld der Erde bei kleinen Amplituden durch eine nahezu isochrone Schwingung gekennzeichnet – also durch zeitgleiche Schwingungen auch bei ungleichen Schwingungsweiten [4]. Somit liefert die Natur ein kostenloses Maß der Zeit in der Schwingungsdauer. Die Genauigkeit wird allerdings durch verschiedene Faktoren beeinträchtigt, zu denen besonders die Rückwirkungen aus dem Uhrwerk, Erschütterungen, die Reibung des Pendels in seinem Aufhängepunkt, der Luftwiderstand und Temperaturschwankungen zählen. Entlastete oder freischwingende Pendel sollten hier Abhilfe bringen, doch verfügt keiner der als Short-, Riefler-, Schuler- und Atouhr bekannt gewordenen Lösungsversuche über ein Pendel, das den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an die Belastungsfreiheit genügt [5,6].

Mit einer elektronischen Steuerung ist es TN nunmehr gelungen, einen den wirtschaftlichen Gesichtspunkten entsprechenden Nachfolgetyp der herkömmlichen elektromechanischen Pendelhauptuhr mit erheblich verbesserten Eigenschaften zu schaffen. Um das Verständnis dieser elektronisch gesteuerten Pendelhauptuhr zu erleichtern, sei hier zunächst die Funktionsweise der herkömmlichen Pendelhauptuhr kurz erläutert.

Funktionsweise der elektromechanischen Pendelhauptuhr

Als Antriebsquelle (A) der elektromechanischen Pendelhauptuhr dient ein Gewicht, das periodisch in Abständen

von etwa drei Minuten angehoben wird (Bild 1). Hierzu dient ein Elektromagnet (M), der je nach Spannung der Uhrenbatterie (UB) ein Schwungrad mehr oder weniger weiterdreht und dadurch das Gewicht entsprechend hochhebt. Über ein Differential (D) teilt sich die Kraft der Antriebswelle in die Energie für die Bewegung des Uhrwerkes (UW) und für den Antrieb des Impulswerkes (IW) auf. Die im Uhrwerk vorhandenen Übersetzungsräder leiten jeweils die richtige Geschwindigkeit für die Stunden-, Minuten- und Sekundenwelle ab. Die Geschwindigkeit, mit der das Räderwerk abläuft, wird durch die Hemmung kontrolliert – einen mit dem Pendel starr verbundenen ankerförmigen Doppelhebelarm (PH). Die Hemmung bewirkt, daß beispielsweise bei einem Ein-Sekunden-Pendel bei jedem Ausschlag des Pendels nach links oder rechts der Sekundenzeiger nur um einen Teilstrich weiterrückt.

Durch die besondere Formgebung von Anker und Ankerrad wird von der Antriebsseite her über das Ankerrad dem Pendel etwas Energie zugeführt. Die Hemmung erfüllt also eine doppelte Funktion: Sie verhindert einerseits das freie und nicht normalzeitgebundene Ablaufen des Uhrwerkes und hält andererseits die Pendelschwingungen durch Kraftzufuhr aufrecht.

Zwischen dem Antriebsgewicht und dem Pendel besteht im Uhrwerk eine kraft- und formschlüssige Funktionskette. Selbst wenn die Pendellänge durch Kompensationsmittel konstant gehalten wird, wirken sich Reibungseinflüsse und Laständerungen auf dieser Strecke zwangsläufig auf die Ganggenauigkeit der Uhr aus.

Bei der hier beschriebenen elektromechanischen Pendeluhr handelt es sich um eine Hauptuhr für eine Uhrenanlage, die jede Minute einen Stromimpuls auf die Uhrenlinie geben muß. Diesem Zweck dient vom Differential her eine zweite kraftschlüssige und praktisch rückwirkungsfreie Verbindung zu einem kleinen Impulswerk, das vom Uhrwerk jede Minute ausgelöst wird. Zum Nachstellen der Nebenuhren kann das Auslösen aber auch von Hand geschehen. Ein Windfang sorgt dafür, daß die Geschwindigkeit weitgehend konstant bleibt. Ferner steuern Nocken das Schließen und Öffnen einer Kontaktanordnung (K), die polwendende Impulse mit einer Dauer von 2 s von der Uhrenbatterie auf die Linie sendet. Die Elektrizität wird demnach bei dieser elektromechanischen Pendelhauptuhr lediglich zum Aufziehen des Gewichts und zum Fortstellen der Nebenuhren entlang der Nebenuhrenlinie benutzt.

Bei der neuen elektronisch gesteuerten TN-Pendelhauptuhr sind mit Ausnahme des Pendels die für die elektro-

BILD 3 Die elektronisch gesteuerte TN-Pendelhauptuhr
BILD 4 Innenansicht der elektronisch gesteuerten TN-Pendelhauptuhr
BILD 5 Impuls- und Nachstellwerk auf der Innenseite der Gehäusetür

Grobreguliermutter auf und läßt sich damit heben und senken, jedoch nicht um seine Längsachse drehen. In Verbindung mit der Invar-Stange wird eine Temperatur-Kompensation erzielt, so daß die Schwingungsdauer bei Temperaturänderungen nahezu unverändert bleibt. Die Pendellänge wurde so gewählt, daß jede Halbschwingung eine halbe Sekunde dauert. Auf diese Weise benötigt man nur ein Viertel der Pendellänge eines Ein-Sekunden-Pendels. Ein Ein-Sekundentakt, der bei einem Dreiviertel-Sekunden-Pendel praktisch nicht möglich wäre, läßt sich mit diesem Pendel leicht ableiten. Außerdem wird die Temperatur-Kompensation nicht von einer Temperaturschichtung beeinflusst, wie es bei längeren Pendeln in geschlossenen Gehäusen vorkommt.

Die bekannte Regel, ein langes und schweres Pendel führe zu besseren Gangleistungen als ein kurzes Pendel, gilt also nur für Pendel mit Hemmung, weil dafür ein möglichst großer Energieinhalt erforderlich ist. Ein freies Pendel – wie es für die elektronisch gesteuerte TN-Pendelhauptuhr gewählt wurde – kann dagegen ohne Nachteil als kurzes Pendel ausgeführt werden.

Das schwingende Pendel verlangt ein ortsfestes, starres Gegengewicht als Aufhängepunkt. Der Pendelhalter, der während der Schwingung nicht nachgeben darf, im Verhältnis zum Pendel aber eine viel zu kleine Masse hat, wird durch Spannschrauben an der Wand befestigt.

Das frei schwingende Kreispendel schwingt nicht isochron, d. h. die Schwingungsdauer ändert sich mit der Schwingungsweite: Ändert sich z. B. die Schwingungsweite von 110 Winkelminuten um 10 Prozent, dann beträgt die Gangabweichung etwa $1 \cdot 10^{-5}$. Bei der elektronisch gesteuerten TN-Pendelhauptuhr verhält sich dagegen die Schwingungsweite direkt proportional zur Betriebsspannung. Bei konstanter Betriebsspannung muß also auch die Schwingungsweite stabil bleiben, weil die Reibungskräfte – im Gegensatz zu einem mechanischen Gehwerk – über lange Zeit konstant bleiben. Die innere Reibung der Pendelfeder unterliegt praktisch keinen Änderungen. Der Luftwiderstand ist zwar vom Luftdruck abhängig, bleibt – über einen längeren Zeitraum gemittelt – jedoch ebenfalls konstant. Es bedarf somit keiner aufwendigen elektronischen Regelung der Schwingungsweite. Vielmehr genügt eine gleichbleibende Betriebsspannung, die allerdings wegen der elektromagnetischen Feinregulierung ohnehin notwendig ist. Das Pendel erfährt in der umgebenden Luft einen Auftrieb, welcher der Schwerkraft entgegenwirkt. So verlangsamt sich der Gang der Uhr bei einer Erhöhung des Luftdruckes von 1 mb um etwa 10^{-7} . Bei den üblichen Luftdruckschwankungen ist deshalb mit Gangabweichungen

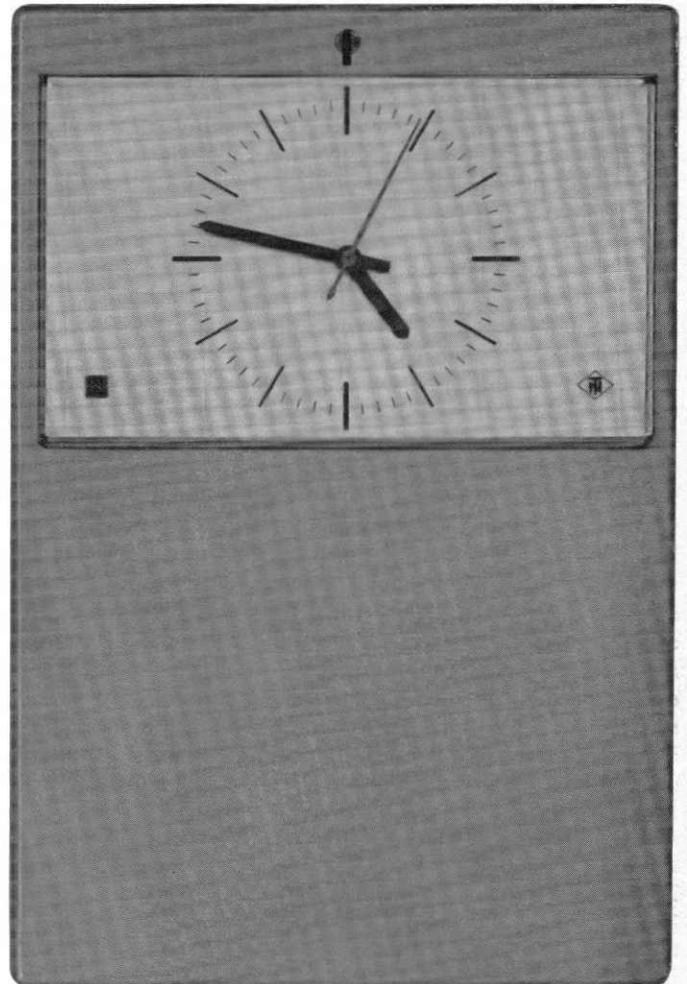


BILD 3

von einigen 10^{-6} zu rechnen. Eine höhere Präzision läßt sich nur über einen Luftdruckausgleich erreichen.

Die Impulse zum Steuern der Nebenuhren erzeugt ein Impuls- und Nachstellwerk. Der polwendende Halbsekunden-Impuls treibt einen Schrittmotor an, der über ein Getriebe die Zeiger der Kontrolluhr fortschaltet und jede Minute einen Polwende-Kontakt betätigt. Der Polwender besteht aus hart-vergoldeten Leiterbahnen in gedruckter Schaltung, auf denen mit 0,5 A belastbare Bürstenbrücken gleiten. Der Polwender kann auch kontinuierlich umlaufen, wobei 20 Nachstellimpulse je Minute an die Nebenuhren abgegeben werden.

BILD 1 Blockscha einer elektromechanischen Pendelhauptuhr
 BILD 2 Blockscha der elektronisch gesteuerten TN-Pendelhauptuhr

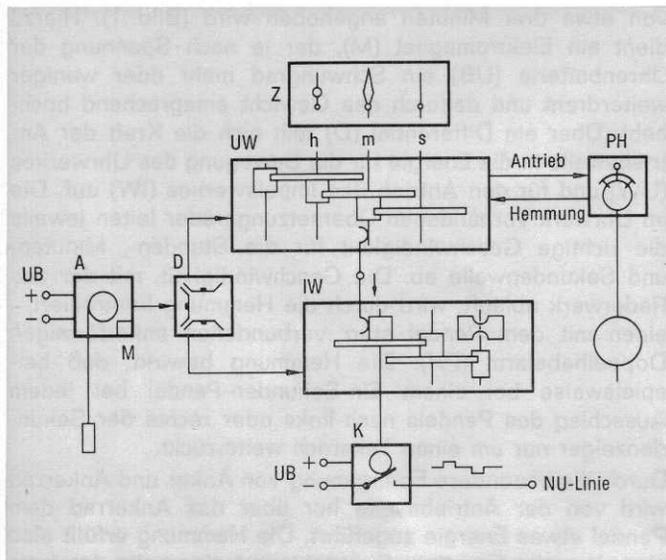


BILD 1

mechanische Pendelhauptuhr charakteristischen Bau-
 gruppen, insbesondere die mechanische Hemmung und
 jegliche mechanische Last weggefallen. Das Pendel
 schwingt nach einmaligem Anstoßen völlig frei, und ein
 Energieverlust kann lediglich noch durch die innere Reibung
 in der Pendelfeder und durch den Luftwiderstand
 auftreten.

**Funktionsweise der elektronisch gesteuerten
 TN-Pendelhauptuhr**

Das Pendel (P) dieser Hauptuhr ist mit einer Steuerfahne
 (S) ausgerüstet, die im Rhythmus der Pendelschwingungen
 ein Hilfsoszillator (H) berührungsfrei ein- und ausschaltet
 (Bild 2). Das auf diese Weise abgegebene Signal wird
 gleichgerichtet (G) und einem Schaltverstärker (SV)
 zugeführt, der das Zähl- und Anzeigewerk (A) fortschaltet.
 Durch Differenzieren des von dem Schaltverstärker abge-
 gebenen Rechteck-Signals im Differenzierglied (D)
 entstehen Nadelimpulse, welche die Antriebsspule (AS)
 im Zeitpunkt des Pendel-Nulldurchgangs symmetrisch
 erregen. Die Schwingungsdauer wird durch dieses Antriebs-
 verfahren nicht beeinflusst. Sie ist gleich der eines frei
 schwingenden Pendels. Die durch den berührungsfreien
 Abgriff über die Steuerfahne auf das Pendel wirkenden
 elektromagnetischen Kräfte sind so gering, daß sie
 nicht nachteilig ins Gewicht fallen. Somit ist dieses Ver-
 fahren einer lichtelektrischen Abtastung nicht nur gleich-

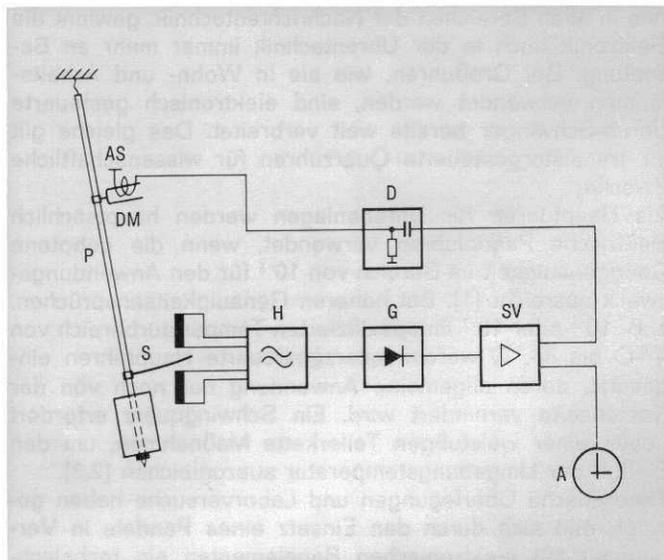


BILD 2

wertig, sondern durch den erheblich besseren Wirkungs-
 grad in bezug auf die Stromaufnahme und wegen der
 hohen Lebensdauer der elektronischen Bauelemente sogar
 überlegen.

Das Antriebssystem besteht aus einer eisenlosen Rahmen-
 spule, in die der am Pendel befestigte Dauermagnet (DM)
 eintaucht. Neben dem Antrieb läßt sich damit auch eine
 elektromagnetische Feinregulierung vornehmen. Dabei wird
 die Schwingungsdauer so geändert, daß sich tägliche Ab-
 weichungen bis zu ± 4 s ausgleichen lassen. Das An-
 triebssystem ist der Pendelstange in einem spitzen Winkel
 zugeordnet. Dadurch tritt über ein magnetisches Gleichfeld
 eine Kraftkomponente in Richtung der Schwerkraft hinzu.
 Je nach Polarität des Gleichfeldes unterstützt diese Kraft-
 komponente die Schwerkraft oder wirkt ihr entgegen. Bei
 diesem elektromagnetischen Feinreguliersystem braucht am
 Pendel selbst nichts verändert zu werden, wenn man seine
 Schwingungsdauer regulieren will. Zur Fremdbeeinflussung
 ist die Antriebsspule noch mit einer zusätzlichen galvanisch
 getrennten Wicklung versehen. Sie sorgt als Stellglied –
 in Verbindung mit einem Regler – für den Gleichlauf der
 Pendelhauptuhr mit einem übergeordneten Zeitnormal.
 Das an einer Pendelfeder aufgehängte Pendel besteht aus
 einer Invar-Stange und einem zylindrischen Pendelkörper
 aus Stahl, der durch einen am unteren Ende der Pendel-
 stange befestigten Gewindestift in einer exzentrischen
 Bohrung geführt wird. Der Pendelkörper sitzt auf einer

Ganggenauigkeit

Intensive Messungen haben gezeigt, daß diese elektronisch gesteuerte Pendelhauptuhr gemessen am Preis-/Leistungsverhältnis über eine hervorragende Ganggenauigkeit verfügt. An keiner der Versuchsuhrn wurden tägliche Zeitfehler von mehr als einer halben Sekunde festgestellt. Berücksichtigt man alle Störgrößen, so beträgt die Ganggenauigkeit $5 \cdot 10^{-6}$. Noch erheblich bessere Ergebnisse erbrachten Langzeit-Messungen: Luftdruck- und Spannungsschwankungen hatten sich hierbei ausgeglichen.

Stöße größerer Intensität können bei entsprechender Phasenlage dem Pendel vorübergehend soviel Energie entziehen, daß es fast zum Stillstand kommt. Die elektronische Steuerung ist jedoch in der Lage, aus einer kleinen Restamplitude heraus das Pendel wieder auf die Sollamplitude zu bringen. Wird bei dem Stoß die Lage der Pendelfeder nicht verändert, erreicht das Pendel auch wieder seine frühere Schwingungsdauer. Mechanisch durch eine Hemmung angetriebene Pendel bleiben dagegen in solchen Fällen stehen.

Insgesamt erklärt sich die gute Langzeitkonstanz daraus, daß die auf das Pendel einwirkenden Kräfte – im Gegensatz zur elektromechanischen Uhr – praktisch keinen Änderungen im Zeitablauf unterliegen. Das gleiche gilt für die elektronischen Bauelemente, deren kaum meßbare Änderungen im Leistungsverhalten außerdem keinen unmittelbaren Einfluß auf die Schwingungsdauer haben, sondern sich lediglich über den Umweg einer Amplitudenänderung geringfügig auswirken können.

Zusatzeinrichtungen

Ein Stromversorgungsgerät, ein Frequenzteiler, ein Sekundenimpuls-Verstärker und ein Gleichlaufregler stehen als Zusatzeinrichtungen zur Verfügung.

Stromversorgungsgerät

Die hier beschriebene Pendelhauptuhr kann unmittelbar an eine Gleichspannung von 12 V oder 24 bis 60 V angeschlossen werden. Für den Anschluß an das Wechselstromnetz wurde ein besonderes Stromversorgungsgerät entwickelt. Es besteht aus einem schutzisolierten Transformator, einem Silizium-Gleichrichtersatz sowie Glättungs- und Regelorganen. Das Gerät ist im Gehäuse der Pendelhauptuhr untergebracht und kann für Ausgangsspannungen von 12 V und 24 V geschaltet werden. Es arbeitet im Bereitschafts-Parallelbetrieb mit einer ebenfalls eingebauten wartungsfreien elektrolytdichten Bleibatterie. Die Batterie hat eine Kapazität von 0,5 Ah und gibt der Hauptuhr eine Gangreserve von etwa 48 Stunden, die sich allerdings

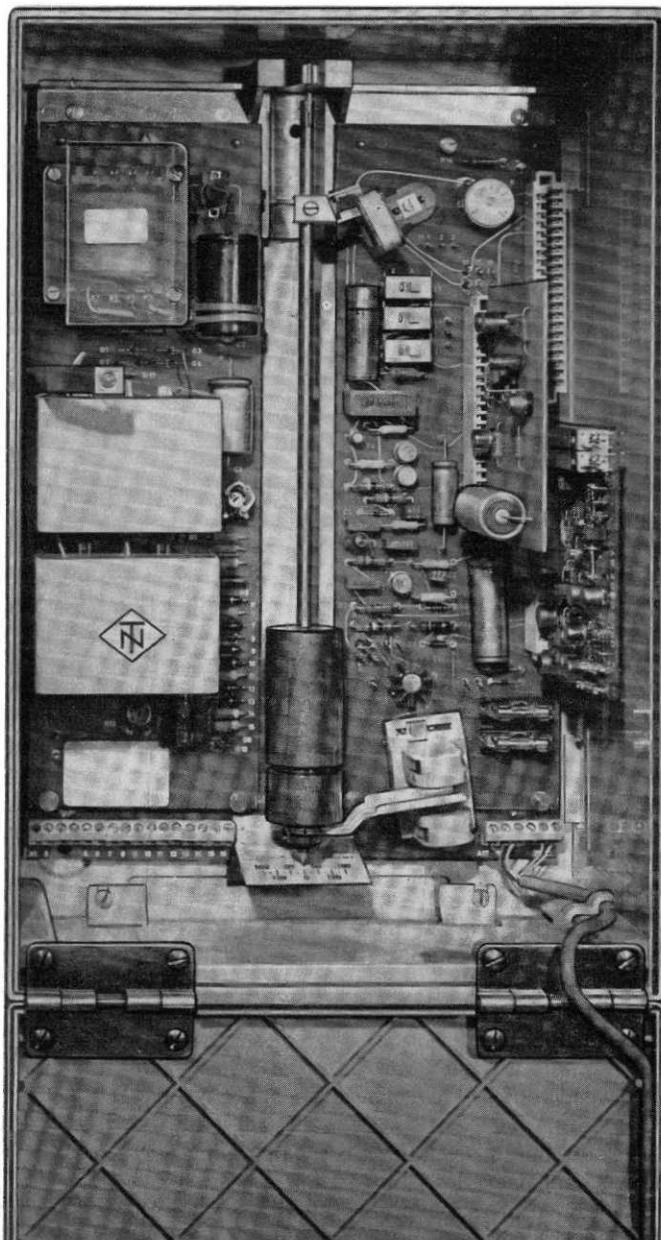


BILD 4



BILD 5