

Der polarisierte elektromechanische Wandler des Großuhrwerkes „elektrochron“

Ing. E. Frankenstein, Glashütte

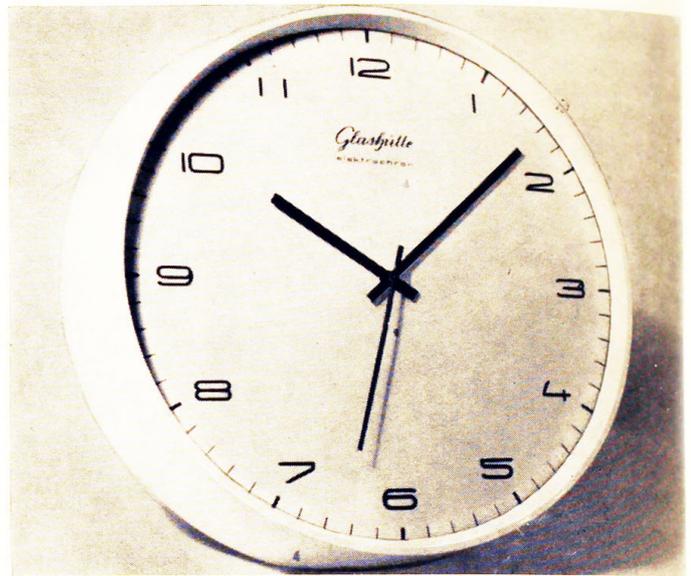


Bild 1. Großuhr „elektrochron“

Das Großuhrwerk „elektrochron“ (Bilder 1 und 2), das im Werk Glashütte des VEB Uhrenkombinat Ruhla erzeugt wird, erfreut sich seit vielen Jahren in einem großen Abnehmerkreis steigender Beliebtheit. Seine hervorstechendste Eigenschaft ist die auf seiner konstruktiven Ausführung beruhende hohe, von der Batteriespannung unabhängige und auf lange Zeit konstante Ganggenauigkeit. Es wird aus drei Baugruppen, dem Regler, dem Zeigerwerk und dem Wandler (Bild 3), gebildet. Dabei hat der Wandler die Aufgabe, einen elektrischen Impuls in eine mechanische Bewegung zum Spannen eines Federkraftspeichers zu verwandeln.

Dieses Element wurde zusammen mit dem übrigen Uhrwerk im Heft 7/1968 der Zeitschrift „Uhren und Schmuck“ allgemein beschrieben. Es konnte aber im Zusammenhang mit jenem Artikel

nicht auf die interessanten Details dieser, einem polarisierten Relais ähnlichen, aber in der Uhrentechnik erstmals verwendeten Baugruppe eingegangen werden.

Dieser Beitrag soll klären:

1. warum eine polarisierte Baugruppe in einem derartigen Uhrwerk notwendig ist und warum diese Bauform gewählt wurde,
2. wie die Funktion erfolgt,
3. wie der Wandler ausgeführt ist und wie er justiert werden kann.

Notwendigkeit der Verwendung polarisierter Baugruppen

Zum Antrieb elektrischer Uhren werden nur in seltensten Fällen Antriebsysteme verwendet, die nicht durch Dauermagnete polarisiert sind. Die Ur-

sache ist in deren geringen Wirkungsgrad zu suchen.

Im Arbeitsluftspalt eines neutralen Wändlers, beispielsweise eines nicht polarisierten Relais, muß bei jeder Funktion ein elektromagnetisches Feld mit einem Energieinhalt

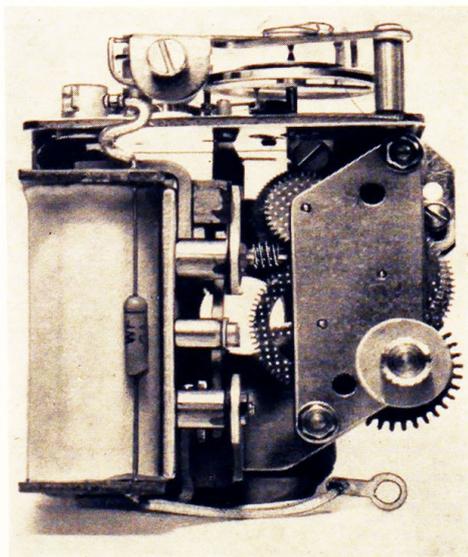
$$W_E = - \int_0^{\Phi} \Theta \, d\Phi = - V \int_0^{B_{\max}} H \, dB$$

aufgebaut werden. Beim Anziehen des Relais verkleinert sich der Luftspalt und damit der Energieinhalt

$$\Delta W_E = \frac{\Theta}{2} (\Phi_2 - \Phi_1)$$

Dieser Energieanteil verwandelt sich in mechanische Arbeit, der verbleibende wird beim Öffnen des Kontaktes in einen Funken umgesetzt.

Beim polarisierten System bleibt die Induktivität des Magnetkreises und da-



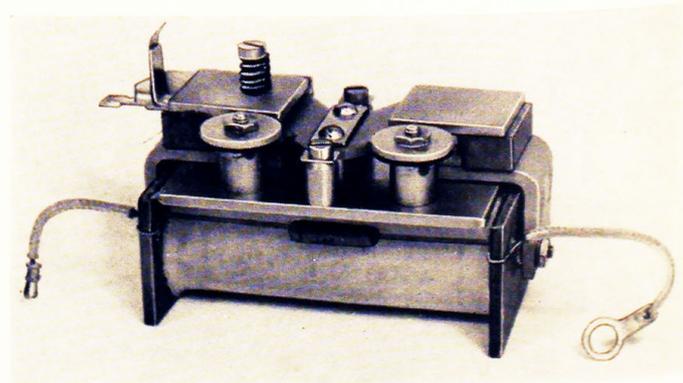
2

Bild 2. Uhrwerk der „elektrochron“

Bild 3. Polarisierte elektromechanischer Wandler

Bild 4. Prinzipien polarisierter elektromechanischer Wandler

Bild 5. Prinzipielle Funktion eines elektromechanischen Wändlers mit bewegtem Eisenweg



3

mit der Energieinhalt während der Funktion unverändert. Es resultiert daraus eine wesentliche Stromeinsparung, auf die bei einem Uhrenantriebssystem mit mechanischem Zwischenspeicher nicht verzichtet werden kann.

Auswahl des polarisierten Systems

Bei den polarisierten elektromechanischen Wandlern kann man unter solchen mit

- bewegten Magneten (Galvanometerprinzip – z. B. kleine Synchronmotoren, Unruhen elektronischer Uhren)
- bewegten Spulen (Drehspulprinzip – z. B. Drehspulmeßgerät, Motoren, Drehspulrelais) und
- bewegtem Eisenweg (z. B. polarisiertes Relais)

unterscheiden (Bild 4).

Allen genannten Systemen ist gemeinsam, daß zur Erreichung hohen Wirkungsgrades kräftige, von Dauermagneten zu erzeugende Felder und Spulen mit großer Windungszahl, aber nicht zu großen Widerstandes benötigt werden. Bewegte Dauermagneten sind wegen ihres notwendigerweise hohen Trägheitsmomentes nur selten zu verwenden. Bewegte Tauch- oder Drehspulen haben den Nachteil, daß ihre Abmessungen und damit die Anzahl der Windungen beschränkt sein müssen, weil das Trägheitsmoment sonst zu groß wird. Im übrigen ist die Größe des vom Dauerfluß durchsetzten Luftspaltes, in dem sich die Spule bewegt, aus praktischen Gründen begrenzt. Der Wirkungsgrad ist aber vom Spulenvolumen abhängig.

Als polarisierte Wandler mit bewegtem Eisenweg seien Systeme mit stationären Spulen und Dauermagneten definiert, bei denen sich ein Eisenanker in einem Luftspalt bewegt, in dem sich ein in der Spule erregter Steuerfluß mit einem Dauerfluß überlagert.

Diese im vorliegenden Fall gewählten Systeme haben also den Vorteil, daß die Spulen und Dauermagneten groß sein können und keine empfindlichen Dreh- oder Tauchspulen herzustellen sind.

Prinzipielle Funktion eines polarisierten Wandlers mit bewegtem Eisenweg

Ein Eisenanker 3 (Bild 5) bewege sich in den Luftspalten 1, 2 eines Dauermagnetkreises 4. Die Feldlinien in beiden Luftspalten 1 und 2 wollen sich verkürzen, so daß der Eisenanker unabhängig von der Flußrichtung nach beiden Seiten gezogen wird. Die Kräfte errechnen sich nach der Maxwellschen Zugkraftformel zu

$$F_1 = F_2 = \frac{1}{2\mu_0 A} \Phi_0^2$$

Wird mit Hilfe der Spule 6 in dem Eisenkreis 7 ein Fluß Φ_S erregt, so könnte angenommen werden, daß die daraus resultierende Kraft F_S im Luftspalt 1 vom Dauerfluß unabhängig sei. Die mathematische Ableitung im Bild 5 beweist jedoch, daß durch die Überlagerung eines Steuerflusses mit einem Dauerfluß sich der Wirkungsgrad eines elektromechanischen Wandlers erhöht.

Weitere Voraussetzung ist die Kom-

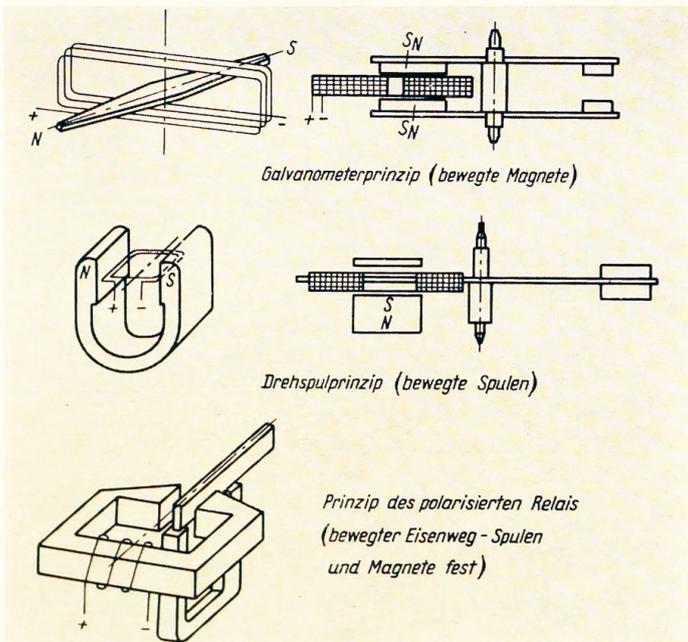
pensation der vom Dauermagnetfluß ausgehenden Kräfte durch annähernd gleiche Federkräfte. Im idealen, elektromagnetisch nicht erregten System müßte der Anker in jeder Lage stehenbleiben, indem sich in jeder Position die auf den Anker wirkenden Dauermagnet- und Federkräfte gegenseitig aufheben.

Grundsätze für die Entwicklung polarisierter Wandler mit bewegtem Eisenweg und hohem Wirkungsgrad

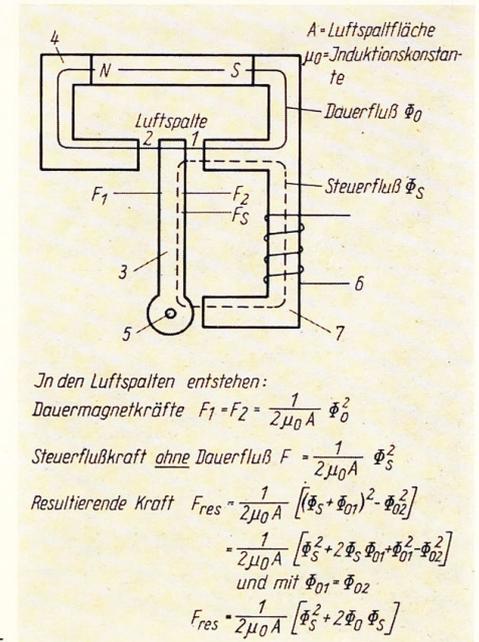
Aus den Darlegungen ergibt sich, daß der Wirkungsgrad mit der Erhöhung des Dauermagnetflusses gesteigert werden kann. Deshalb sind kräftige Magnete nötig. Bariumferrit eignet sich wegen des hohen reversiblen Temperaturganges ($-0,2\%$ je $^\circ\text{C}$) nur beschränkt, denn die Dauermagnetkräfte ändern sich mit dem Quadrat des Flusses. AlNi-Magnete sind vorzuziehen.

Der Größe des Dauerflusses sind schon aus ökonomischen Gründen Grenzen gesetzt, denn außer dem Aufwand für die Magnete steigt auch der für den gesamten Eisenweg des Kreises. Schließlich gilt es, wie beschrieben, die Dauermagnetkräfte durch Federkräfte zu kompensieren, was auch nur in begrenztem Maße möglich ist.

Was die konstruktive Ausführung betrifft, so müssen die bei manchen Konstruktionen auftretenden Nebenschlüsse des Steuerflusses vermieden werden. Besonderes Augenmerk ist auf stabile Bauweise zu legen, da Veränderungen die Kompensation und damit die Funktion gefährden.



4



5

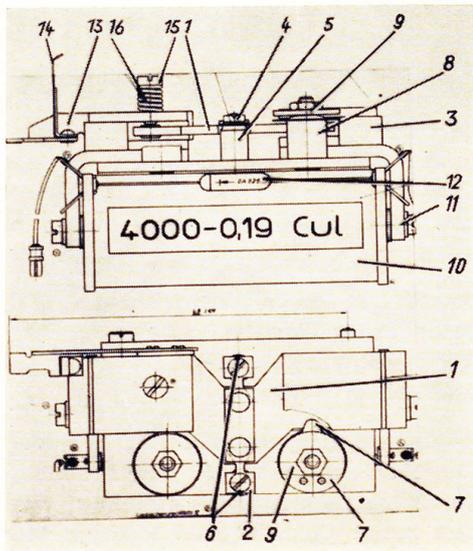


Bild 6 ◀
Elektromechanischer Wandler des Großuhrwerkes „elektrochron“ in Seitenansicht und Draufsicht

Die Bauform des polarisierten elektromechanischen Wandlers

Die geschilderten Systeme haben bei polarisierten Relais größte Verbreitung gefunden. Die Vielzahl der bekannten Bauformen und die noch wesentlich größere Zahl der technisch realisierbaren Möglichkeiten kann im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht dargestellt werden.

Da sich die üblichen polarisierten Relais der Ausführung der „elektrochron“ schlecht anpaßten, wurde eine neue Form entwickelt, die im Bild 6 dargestellt ist.

Der Anker ist an einem Spannband 2 gelagert, das den größten Teil der von dem Fluß der Dauermagnete 3 herrührenden Kräfte ausgleicht. Das Spannband ist mit den Schrauben 4 auf 2 Röhren 5 befestigt und mit Lack 6 gesichert. Ein Justieren ermöglichen die beiden Kompensationsfedern 7, die auf dem Bolzen 8, auf dem sie befestigt sind, gedreht werden können. Sie wirken dadurch mit unterschiedlichem Hebelarm und folglich mit verschiedener Kraft auf den Anker.

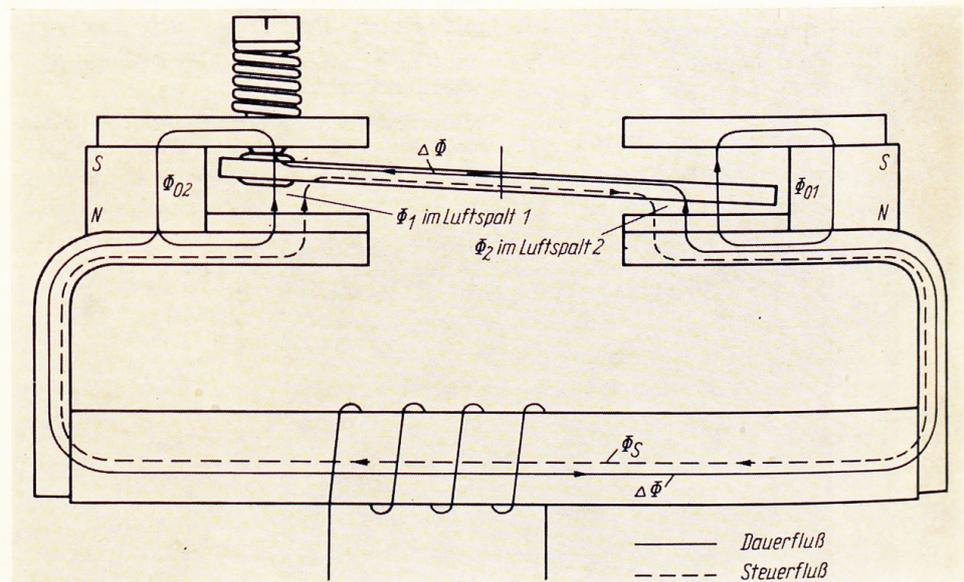
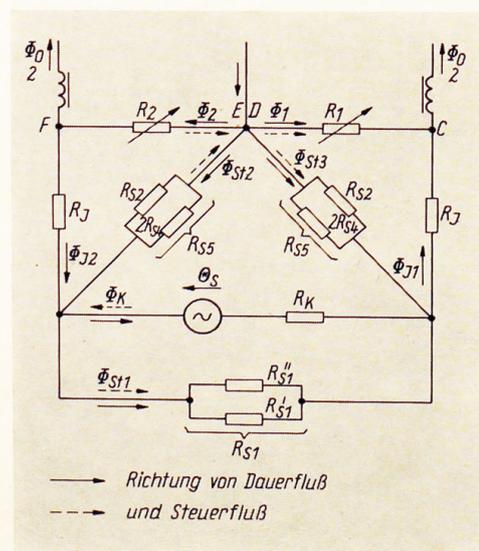
In der Spule 10, die auf dem Joch 11 sitzt, wird der notwendige Steuerfluß

induziert. Eine Diode 12 dient der Unterdrückung eines Schaltfunken am Kontakt.

Zur Betätigung des Uhrwerkes dient der Wandlerarm 13, an dessen Ende ein Goldkontakt nach dem Dublee-Verfahren aufgebracht ist. Das Ende dieses Armes dient als Bezugspunkt bei der Messung der in dem System wirkenden Kräfte. Am Arm 13 ist die federnde Schubklinke 14 befestigt, die beim Rückfall des Ankers das Zeigerwerk der Uhr betätigt. Die Klebschraube 15 dient zur Einstellung des Abstandes des Ankers vom Joch. Die Schraubenfeder 16

Bild 8 ▼
Dem Flußverlauf analoges Widerstandsnetzwerk

Bild 9 ▶
Vereinfachter Flußverlauf des elektromechanischen Wandlers



$$\Phi_1 = \Phi_0 - \Delta\Phi + \Phi_S$$

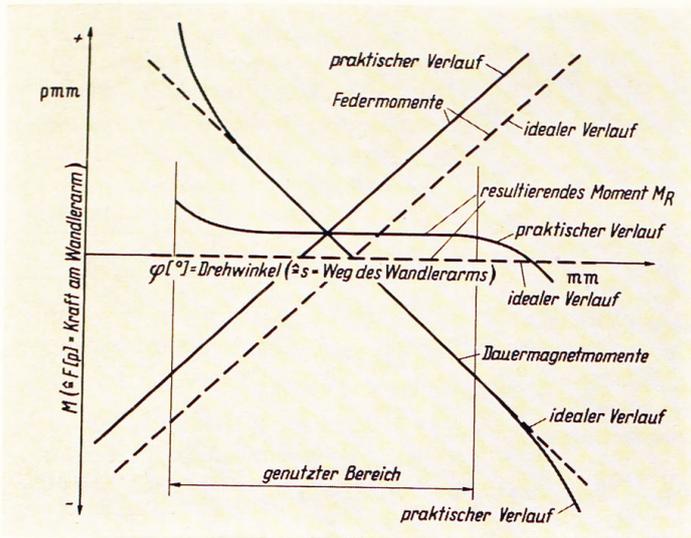
$$\Phi_2 = \Phi_0 + \Delta\Phi - \Phi_S$$

Relais zieht an, sobald $\Phi_1^2 > \Phi_2^2$

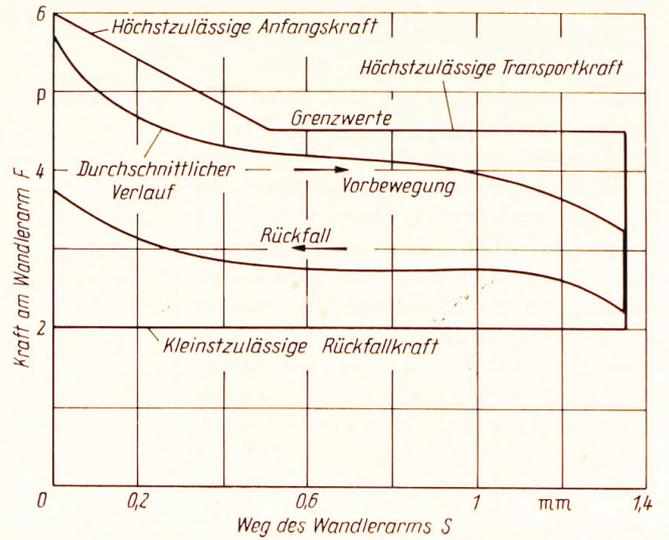
Zugkraft im Luftspalt:

$$F = \frac{1}{2\mu_0 A} \left[\Phi_0 \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2 + R_{Fe}} - \Phi_S \right] \text{ wobei } \Phi_S = \frac{\theta_S}{R_1 + R_2 + R_{Fe}}$$

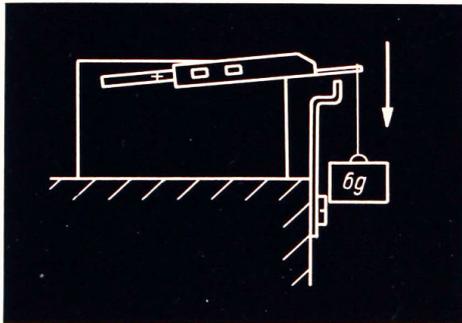
R_1, R_2 = Magnetische Luftspaltwiderstände
 R_{Fe} = Magnetischer Widerstand des Eisenweges
 θ_S = Steurdurchflutung



10



11

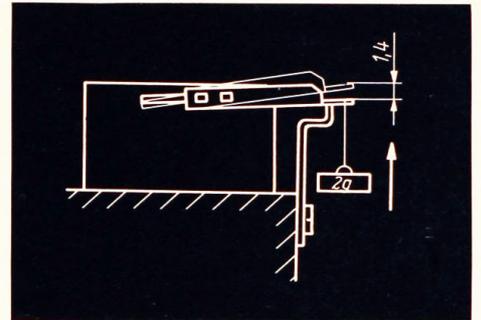


12

Bild 10
Momente in Abhängigkeit des Winkelweges im nicht elektrisch erregten SystemBild 11
Durchschnittliche Kräfte am Wandlerarm in Abhängigkeit des Weges und Grenzwerte

Bild 12. Überprüfung der Anfangskraft

Bild 13. Überprüfung der Rückfallkraft

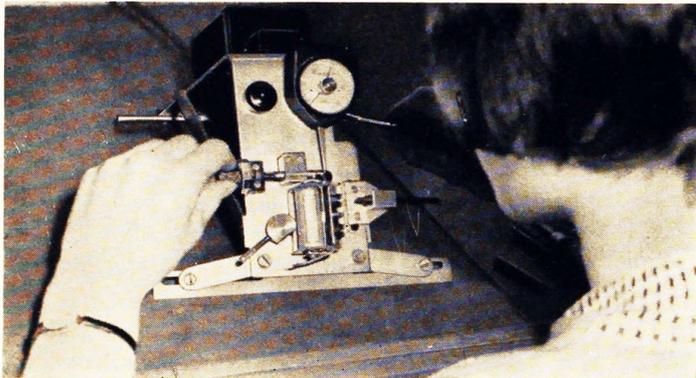
Bild 14
Mefvorrichtung für die Kompensation von Wandlern

13

Bild 15
Vorrichtung zum Messen des Dauermagnetflusses und zum teilweisen Entmagnetisieren

14

15



verhindert ein ungewolltes Verstellen der Schraube.

Flußverlauf

Im Bild 7 ist der Aufbau des Wandlers schematisch gezeigt und der Verlauf von Dauer- und Steuerfluß sowie der wesentlichsten Streuflüsse wiedergegeben. Im Bild 8 ist gezeigt, wie zum Zwecke der Berechnung die Verhältnisse in ein Netzwerk magnetischer Widerstände aufgelöst werden können. Im Bild 9 sind die Verhältnisse vereinfacht dargestellt. Der Wandler befindet sich in Ruhelage.

Der Dauerfluß Φ_{01} durchsetzt fast nur

den Luftspalt 2. Wegen des hohen Widerstandes im großen Luftspalt 1 teilt sich der Dauerfluß Φ_{02} , und ein Teilfluß Φ läuft über Anker und Magnetjoch.

Durchläuft ein Steuerstrom die Spule, so entsteht der gestrichelt dargestellte Steuerfluß Φ_s , der im Luftspalt 1 die Zugkraft verstärkt und sie im Luftspalt 2 vermindert, so daß der Anker ausgelenkt wird.

Die Überlagerung der Dauermagnet- und Federkräfte

Voraussetzung dafür, daß die geschilderte Funktion mit hohem Wirkungs-

grad abläuft, ist eine gute Kompensation der Dauermagnetkräfte durch Federn.

Werden die auf den Anker wirkenden Momente in Abhängigkeit vom Winkelweg dargestellt, so ergibt sich das im Bild 10 dargestellte Diagramm. Die gestrichelten Linien kennzeichnen ideale Kompensationsverhältnisse, bei denen jedes Magnetmoment durch ein gleichgroßes Federmoment kompensiert wird. In der Praxis verläuft aber das Dauermagnetmoment in Abhängigkeit vom Weg nicht genau linear, sondern etwa so, wie es die voll ausgezogene Linie zeigt. Ein völliger Ausgleich der

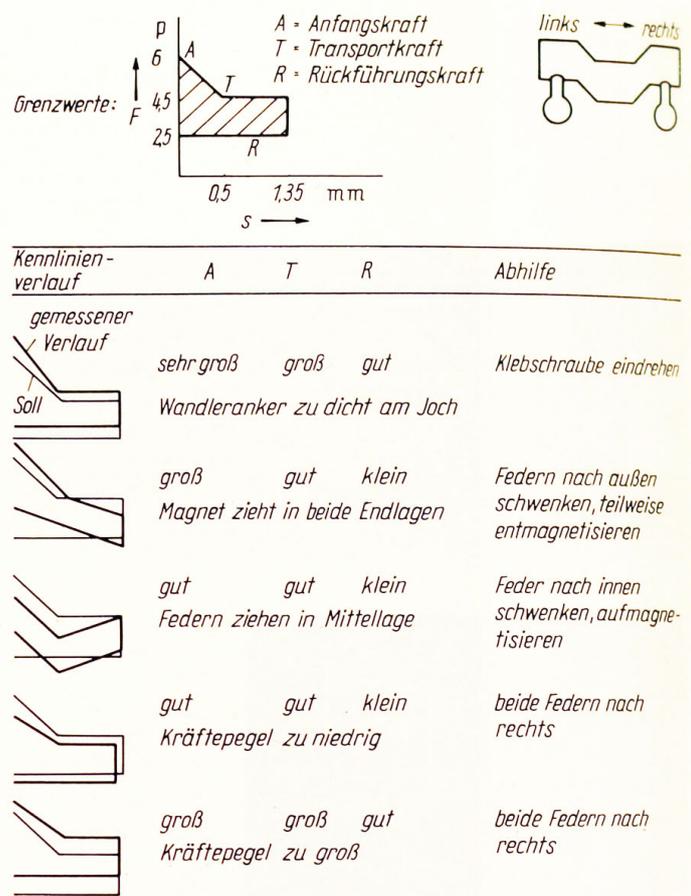
Wandlerkräfte ist überdies nicht erwünscht, denn der Anker soll in seine Endstellung zurückfallen, sobald der Strom ausgeschaltet ist und dabei das Zeigerwerk transportieren. Die Federkräfte erhalten deshalb, wie dargestellt, einen etwas abweichenden Verlauf, so daß das resultierende Moment M_R den Anker zurückführt. Der Einfluß der Unlinearitäten wird begrenzt, indem nur der mittlere Weg des Ankers ausgenutzt wird. Das geschieht nicht völlig symmetrisch, sondern so, daß der Anker mit einer etwas größeren „Anfangskraft“ in seine Ruhelage gezogen wird. Auf diese Weise wird erreicht, daß der Wandler erst bei größerer Steuererregung anspricht und dann seinen Arbeitshub schnell ausführt.

Infolge der unvermeidlichen Reibung und der Ummagnetisierungsverluste sind die Momente bei der Vorwärtsbewegung nicht denen der Rückwärtsbewegung gleich. Es ergibt sich in der Praxis eine Hysterese, und der üblicherweise am Wandlerarm gemessene Kräfteverlauf in Abhängigkeit des Weges entspricht den im Bild 11 gezeigten Kurven.

Kompensation

Bei der Fertigung muß, wie bereits angedeutet, das sich einstellende Kräfteverhältnis, das aus Dauermagnetfluß und Federwirkung (ohne Erregung des elektromagnetischen Flusses) resultiert, ausgeglichen werden, so daß es in den im Bild 11 angedeuteten Grenzen liegt. Eine informative Messung kann in der Uhrmacherwerkstatt nach dem Prinzip vorgenommen werden, das in den Bildern 12 und 13 angedeutet ist. Wird ein Gewicht von 6 p an den Wandlerarm gehängt, so muß er sich bis zu seiner Endlage bewegen. Werden in der unteren Stellung 2 p angehängt, so muß er zurückgehen. Der letzte Test muß in der Uhr ausgeführt werden, in der der

Bild 16
Richtlinien
für das
Kompensieren
des Wandlers



Weg des Wandlerarms auf 1,35 bis 1,4 mm begrenzt ist. Soll der Test am ausgebauten Wandler vorgenommen werden, so ist ein Anschlag vorzusehen, so ist ein Anschlag vorzusehen oder der Arm entsprechend anzuheben (Bild 13).

Im Bild 14 ist eine dazu in der Fertigung verwendete Meßvorrichtung gezeigt. Der Kräfteverlauf wird durch Drehen der Kompensationsfedern angeglichen. Voraussetzung für die Kompensierbarkeit ist eine geeignete Größe des Magnetflusses. Angesichts der wesentlichen Schwankungen im Verhalten der Dauermagnete ist es notwendig, den Fluß mit einer Hallsonde zu messen und durch teilweises Entmagnetisieren auf geeignete Werte einzustel-

len. Die hierzu entwickelte Vorrichtung ist im Bild 15 gezeigt.

Im Bild 16 wird eine Übersicht gegeben, wie der Kräfteverlauf in gewünschter Weise beeinflusst werden kann. Es sei zu diesem Kapitel betont, daß von seiten des Herstellers der Austausch der defekten Wandler empfohlen wird. Sie können durch geeignete Kompensation regeneriert werden. Eine Reparatur in der Uhrmacherwerkstatt sollte nur erfolgen, wenn brauchbare Meßgeräte zur Verfügung stehen.

Kontrolle mit dem Oszillographen

Mit einem Stromversorgungsgerät, wie dem Electrotest oder dem Multiscop,

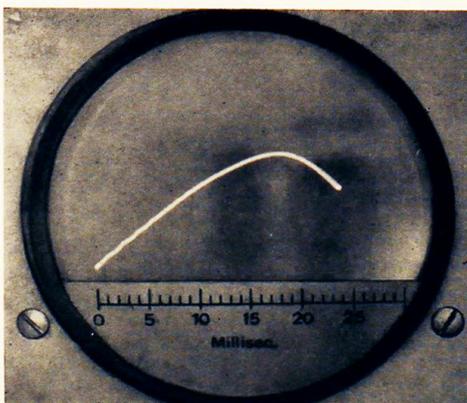


Bild 17 ◀
Aufnahme des Stromes in Abhängigkeit von der Zeit; einwandfreie Funktion

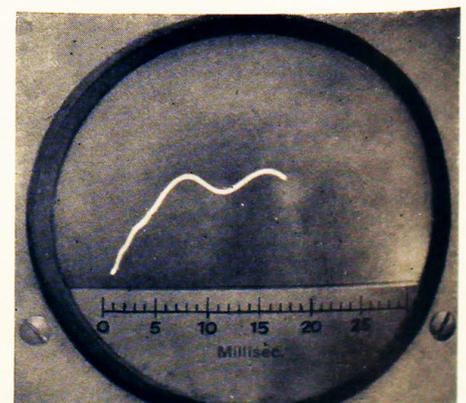


Bild 18 ▶
Aufnahme des Stromes in Abhängigkeit von der Zeit; mangelhafte Funktion

kann auf dem eingebauten Oszilloskop die Stromaufnahme in Abhängigkeit von der Zeit verfolgt werden. Das ist auch mit einem üblichen Oszilloskop oder einem Oszillographen möglich, wenn er parallel zu einem Widerstand von etwa 5Ω , der zwischen Uhrwerk und Batterie liegt, geschaltet wird.

Der Strom steigt nach der Funktion

$$i = I \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

an, bis der Wandleranker sich in Bewegung setzt (Bild 17).

Durch die nach der Lenzschen Regel entstehende Ankerrückwirkung sinkt er dann nach der Funktion

$$i = \frac{E - e_a}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

um am Ende der Bewegung, wo der Kontakt abschaltet, auf Null zu fallen. Der danach noch laufende Selbstinduktionsstrom der Spule wird durch die Diode kurz geschlossen.

Oszillogramme wie im Bild 18 deuten ein fehlerhaftes Verhalten an. Der Wandler bewegt sich nicht schnell in seine Endlage, sondern verlangsamt sich in der Mitte der Bewegung. Der Strom steigt danach nochmals weiter an, bis der Anker erneut anzieht, wobei der Strom wieder abnimmt. Es kann daraus auch resultieren, daß der Uhranker sich vom Wandlerarm vorzeitig abhebt, beide in ihre Ausgangsstellung zurückfallen und auf diese Weise Doppelimpulse entstehen, die zu einem starken Vorgehen der Uhr führen.

Transistorisierung

Abschließend sei darauf verwiesen, daß die Transistorisierung des geschilderten Systems, das jetzt in einer Kontaktuhr betrieben wird, grundsätzlich möglich ist. Eine von den üblichen Prinzipien weitaus abweichende und zum Patent angemeldete Ausführung wurde erprobt. Weil die Ganggenauigkeit dieser Uhr im Gegensatz zu anderen von Kontaktmängeln völlig unabhängig ist, sich außerdem die von uns nach umfangreichen Erprobungen gewählte Kontaktpaarung überraschend gut bewährte und die Transistorisierung zu Kostenerhöhungen führt, wurde von der Rationalisierung Abstand genommen.

Diese Ausführungen sollen dem Interessenten einen Einblick in das elektromechanische System eines Uhrwerkes geben, dessen Bauart von den herkömmlichen abweicht, das sich aber gut bewährte und deshalb Beachtung verdient.

US 1097