

SCHWEIZERISCHE Eidgenossenschaft
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 703 052 B1

(51) Int. Cl.: G04B 17/06 (2006.01)
H01L 41/08 (2006.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 00707/11

(22) Anmeldedatum: 21.04.2011

(43) Anmeldung veröffentlicht: 31.10.2011

(30) Priorität:
21.04.2010 CH 580/10
06.05.2010 CH 692/10
12.08.2010 CH 1298/10
07.09.2010 CH 1440/10
10.09.2010 CH 1454/10
23.09.2010 CH 1537/10
02.11.2010 CH 1824/10
18.11.2010 CH 1931/10
21.12.2010 CH 2132/10
24.02.2011 CH 322/11

(24) Patent erteilt: 13.03.2015

(45) Patentschrift veröffentlicht: 13.03.2015

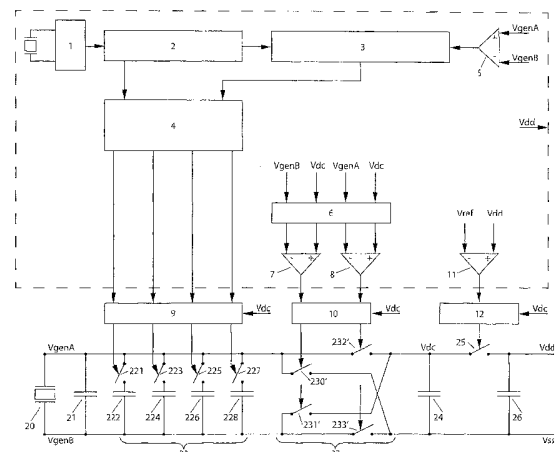
(73) Inhaber:
Team SmartFish GmbH, Obere Spichermatt 17
6371 Stans (CH)

(72) Erfinder:
Konrad Schafroth, 3011 Bern (CH)

(74) Vertreter:
P&TS SA, Av. J.-J. Rousseau 4 P.O. Box 2848
2001 Neuchâtel (CH)

(54) Regelorgan für ein Uhrwerk.

(57) Regelorgan für ein Uhrwerk, mit folgenden Komponenten:
eine Unruh;
eine piezoelektrische Spiralfeder (20);
eine elektronische Schaltung (40) zur Anpassung der Steifigkeit der piezoelektrischen Spiralfeder (20);
wobei die elektronische Schaltung (40) einen Gleichrichter (23) und eine Schaltung (2, 3, 4) zur Anpassung einer parallel zur benannten Spiralfeder geschalteten Impedanz (22) umfasst, wobei der benannte Gleichrichter und/oder die benannte Schaltung (2, 3, 4) Transistoren (230', 231', 232', 233'; 221, 223, 225, 227) umfasst, die mit einer höheren Spannung (V_{dc}) als andere digitale Komponenten der elektronischen Schaltung gesteuert werden.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine mechanische Uhr, deren Regelorgan eine Unruh, eine Spiralfeder und eine elektronische Schaltung mit einem Quarzoszillator umfasst.

Stand der Technik

[0002] Mechanische Uhren werden von einer Aufzugsfeder angetrieben. Diese Feder ist der Motor der mechanischen Uhr. Sie wird entweder manuell oder durch das Tragen über den automatischen Aufzugsmechanismus der Uhr am Handgelenk aufgezogen und speichert so die Energie. Diese wird dann kontinuierlich an das Räderwerk abgegeben.

[0003] Das Räderwerk ist eine Art Getriebe, das die grosse Energie des Federhauses an kleine Räder (Minuten-, Kleinboden-, Sekunden- und Ankerrad) abgibt und übersetzt. Die Hemmung sorgt als Verbindungsglied zwischen Räderwerk und Unruh für die Taktweitergabe und gibt über das Ankerrad und den Anker die Antriebsenergie vom Federhaus an die Unruh ab und hält diese am Schwingen. Die Hemmung, gesteuert durch das Regelorgan, befreit und stoppt das Räderwerk in sehr präzisen Intervallen.

[0004] Das Regelorgan umfasst eine Spiralfeder und eine Unruh. Die Unruh verhält sich ähnlich wie ein Pendel, das immer mit Hilfe der Spiralfeder in die Ruhelage zurückgeführt wird, und sorgt so für den gleichmässigen Takt der Uhr. Bei den meisten modernen Uhren schwingt die Unruh mit 8800 A/h, also acht Mal pro Sekunde oder fast 700 000 Mal pro Tag. Diese Intervalle bringen die Zeiger dazu, die «richtige Zeit» auf dem Zifferblatt anzuzeigen.

[0005] Ein Nachteil der mechanischen Uhr im Vergleich zur elektronischen Uhr ist, dass der Gang der Armbanduhr durch Lagenveränderungen, schwankende Temperatur, Magnetismus, Staub, durch unregelmässiges Aufziehen und Ölen nachteilig beeinflusst wird.

[0006] Aus EP 848 842 ist ein Uhrwerk bekannt, dessen Feder über ein Räderwerk eine Zeitanzeige und einen einen Wechselliefernden Generator antreibt. Der Generator speist eine Spannungswandlerschaltung, die Spannungswandlerschaltung speist ein kapazitives Bauelement, und das kapazitive Bauelement speist eine elektronische Referenzschaltung mit einem stabilen Oszillator sowie eine elektronische Regelschaltung. Die elektronische Regelschaltung weist eine Komparator-Logik-Schaltung und eine mit einem Ausgang der Komparator-Logik-Schaltung verbundene und durch die Komparator-Logik-Schaltung in ihrer Leistungsaufnahme steuerbare Energiedissipationsschaltung auf. Ein Eingang der Komparator-Logik-Schaltung ist mit der elektronischen Referenzschaltung und ein anderer Eingang der Komparator-Logik-Schaltung mit dem Generator über eine Komparatorstufe und eine Antikoinzidenzschaltung verbunden. Die Komparator-Logik-Schaltung ist so ausgelegt, dass sie ein von der elektronischen Referenzschaltung kommendes Taktsignal mit einem vom Generator stammenden Taktsignal vergleicht, in Abhängigkeit vom Ergebnis dieses Vergleichs die Grösse der Leistungsaufnahme der elektronischen Regelschaltung über die Grösse der Leistungsaufnahme der Energiedissipationsschaltung steuert und auf diese Weise über die Steuerung der Regelschaltungsleistungsaufnahme den Gang des Generators und damit den Gang der Zeitanzeige regelt.

[0007] Das Uhrwerk aus EP 848 842 benötigt aber eine relativ komplizierte Elektronik, einen Generator, der die notwendige Energie für den Betrieb der Elektronik liefert, sowie relativ viel Platz, um die Systeme einzubauen. Ein weiterer Nachteil eines solchen Uhrwerks ist, dass die Kräfte und Momente anders als bei einem mechanischen Uhrwerk sind, so dass das gesamte Uhrwerk angepasst werden muss.

Darstellung der Erfindung

[0008] Es ist ein Ziel der Erfindung, ein verbessertes Regelorgan für eine mechanische Uhr vorzuschlagen.

[0009] Es ist ein weiteres Ziel der Erfindung, ein genaueres Regelorgan für eine mechanische Uhr vorzuschlagen.

[0010] Es ist ein weiteres Ziel der Erfindung, ein elektronisches Regelorgan für eine mechanische Uhr vorzuschlagen, wobei das elektronische Regelorgan vom mechanischen Uhrwerk und ohne Batterie gespeist wird.

[0011] Eine andere Aufgabe ist es, ein neues Regelorgan oder Hilfs-Regelorgan für ein mechanisches Uhrwerk bereitzustellen, das in einem bestehenden mechanischen Uhrwerk mit minimalen Änderungen eingebracht werden kann.

[0012] Diese Ziele werden mit einem Regelorgan erreicht, das eine Unruh, eine Spiralfeder, mindestens teilweise aus piezoelektrischem Material, und eine den Gang der Unruh regelnde Elektronik umfasst.

[0013] Gemäss einem Aspekt wird ein Regelorgan für ein mechanisches Uhrwerk bereitgestellt, das die Ganggenauigkeit des mechanischen Regelorgans wesentlich verbessert, indem die Schwingfrequenz der Unruh elektronisch stabilisiert wird, wobei die Energie für die Elektronik des Regelorgans durch die Spiralfeder zur Verfügung gestellt wird.

[0014] Gemäss einem Aspekt wird die Spiralfeder einer konventionellen mechanischen Uhr durch eine piezoelektrische Spiralfeder ersetzt. Die Piezospiralfeder erzeugt eine von den Schwingungen der Unruh und/oder der Spiralfeder abhängige Wechselliefernde Spannung.

[0015] Die Wechselspannung wird zur Regelung der Schwingfrequenz der Unruh über eine elektrische Verbindung an eine elektronische Schaltung übertragen, welche die Steifigkeit der Spiralfeder und somit die Frequenz des Schwingensystems Unruh/Spiralfeder verändern und somit regeln kann. Gleichzeitig kann die elektronische Schaltung ausschliesslich von der benannten Piezospiralfeder elektrisch gespeist sein, so dass eine zusätzliche Batterie nicht benötigt wird. Obwohl eine Batterie nicht notwendig ist, kann man sich vorstellen, dass die elektronische Schaltung durch eine Solarzelle und einen kleinen Akku oder eine Kapazität gespeist wird.

[0016] Wenn also die Unruh in Schwingung versetzt wird, wird durch die auf der Spiralfeder angebrachten piezoelektrischen Materialien eine Wechselspannung erzeugt. Die Spiralfeder funktioniert also wie ein kleiner Generator. Die Wechselspannung am Ausgang der Spiralfeder wird gleichgerichtet, um die elektronische Schaltung zu speisen.

[0017] Die Steifigkeit der Spiralfeder wird durch Verändern der Impedanz am Ausgang der Piezospiralfeder angepasst. In einer bevorzugten Variante wird dies durch Anpassung des Werts einer Kapazität parallel zur Piezospiralfeder erreicht. Je grösser der Wert der parallel zur Piezospiralfeder geschalteten Kapazität ist, umso kleiner ist die Steifigkeit der Spiralfeder. In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst die einstellbare Kapazität eine Anzahl von mit Schaltern zu- und wegschaltbaren Kapazitäten.

[0018] Ein Beispiel von piezoelektrischer Spiralfeder wurde von Tao Dong et al. in «Proceedings of PowerMEMS 2008+micro EMS 2008», Sendai, Japan, November 9–12, «A Mems-based spiral piezoelectric energy harvester» beschrieben; diese Spiralfeder wird jedoch nicht als Regelorgan für ein Uhrwerk verwendet, und die Schwingfrequenz wird nicht elektronisch eingestellt.

[0019] US 4 435 667 beschreibt einen Aktuator mit einer piezoelektrischen Spirale; dieser Aktuator wird nicht für ein Uhrwerk verwendet.

[0020] JP 200 222 877 (Seiko Epson Corp) beschreibt ein Verfahren zur Einstellung der Schwingfrequenz einer piezoelektrischen Spiralfeder, in welchem das Piezoelement entweder mit einer elektrischen Schaltung verbunden wird, oder von dieser Schaltung ganz getrennt wird. Dies führt jedoch zu sprungartigen Änderungen der mit der Spiralfeder verbundenen Impedanz, jedes Mal, wenn die elektrische Schaltung mit dem Piezoelement verbunden wird, oder von dieser Schaltung getrennt wird. Solche schnellen Impedanzänderungen mit einer grossen Amplitude modifizieren schlagartig die elektrische Spannung am Eingang der elektronischen Schaltung. Je grösser die parallel zur Piezospiralfeder geschaltete Kapazität ist, desto kleiner ist die induzierte Wechselspannung am Eingang des Gleichrichters. Dies kann dazu führen, dass die Spannung am Eingang der Elektronik nicht mehr hoch genug ist, um ein sicheres Funktionieren der Elektronik zu gewährleisten. Ein anderes Problem ist, dass bei dieser Ausführungsform die Unruh entweder zu schnell oder zu langsam schwingt, nie aber mit der richtigen Frequenz. Auch dies kann zu Problemen mit der Regelung und sogar zu unerwünschten Schwingungen führen. Dies erweist sich als nachteilig für die Ganggenauigkeit.

[0021] In einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird die Kapazität am Ausgang der piezoelektrischen Spiralfeder in mehreren Stufen eingestellt, um einerseits die Steifigkeit der Spiralfeder in kleinen Schritten ändern zu können, und um andererseits nur die minimal notwendige Kapazität parallel zur Piezospiralfeder zu schalten, so dass die Spannung am Eingang des Gleichrichters nicht unnötig herabgesetzt wird. In einer bevorzugten Ausführungsform wird ständig mindestens eine fixe kleine Kapazität in der elektronischen Schaltung mit der piezoelektrischen Spiralfeder verbunden. Dies hat den Vorteil, dass die Spannung am Eingang des Gleichrichters so eingestellt werden kann, dass der Gleichrichter sicher funktioniert und einen hohen Wirkungsgrad aufweist.

[0022] Gemäss einem anderen unabhängigen Aspekt der Erfindung umfasst die elektronische Schaltung zur Anpassung der Impedanz am Ausgang der Spiralfeder einen aktiven Gleichrichter, in welchem Dioden durch Transistoren ersetzt werden, und/oder eine Schaltung mit mehreren Transistoren zur Anpassung der Impedanz am Ausgang der Spiralfeder; mindestens gewisse dieser Transistoren werden mit einer erhöhten Spannung angesteuert, zum Beispiel mit einer Spannung, die höher als die Spannung des grösseren Teils der digitalen Komponenten der elektronischen Schaltung ist. Die Ansteuerung der Schalter kann beispielsweise mit Pegelumsetzern (auch Levelshifter genannt) realisiert werden; dadurch wird der ohmsche Widerstand in diesen Schaltern reduziert.

[0023] Die Spannung zur Ansteuerung der Transistoren im Gleichrichter und/oder in der Impedanzanpassungsschaltung ist somit höher als die Speisespannung V_{dd} der elektronischen Schaltung, mit welcher die oder die meisten digitalen Komponenten der elektronischen Schaltung angesteuert sind. Dadurch wird der Stromverbrauch der elektronischen Schaltung reduziert, und die Transistoren haben einen kleinen ohmschen Widerstand.

[0024] Die Transistoren zur Anpassung der Impedanz am Ausgang der Spiralfeder werden erst dann ein- oder zu-geschaltet, wenn die von der Spiralfeder induzierte Spannung niedriger als eine vorbestimmte Schwelle ist, oder wenn der von der Spiralfeder erzeugte Strom niedriger als eine vorbestimmte Schwelle ist. Dadurch können Energieverluste reduziert werden.

[0025] Weitere vorteilhafte Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Kurze Beschreibung der Figuren

[0026] Die Erfindung wird anhand der beigefügten Figuren näher erläutert, wobei:

- Fig. 1 eine schematische Ansicht der Regelung darstellt mit den Kapazitäten, den die Kapazitäten zu- und weg-schaltenden Schaltern sowie der Komparator-Logik Schaltung, welche die Schalter ansteuern;
- Fig. 2 eine schematische Ansicht darstellt der Regelung der Spannung des Kondensators, der die elektronische Schaltung mit Energie versorgt;
- Fig. 3a eine schematische Ansicht der gedruckten Schaltung mit den aufgelöteten Bauteilen zeigt, wobei neben der elektronischen Schaltung grosse Flächen vorhanden sind, auf denen Testpunkte (auch Testpads genannt) oder Testkontakte aufgebracht sind;
- Fig. 3b eine schematische Ansicht der gedruckten Schaltung mit den aufgelöteten Bauteilen zeigt, wobei die Test-flächen abgetrennt sind;
- Fig. 4 eine schematische Ansicht einer Spiralfeder darstellt;
- Fig. 5a eine schematische Ansicht des Querschnitts einer erfindungsgemässen Spiralfeder darstellt;
- Fig. 5b ein Detail des Querschnitts der Spiralfeder mit den verschiedenen Schichten darstellt;
- Fig. 6 eine schematische Ansicht der Unruh, der Piezospiralfeder und der elektronischen Schaltung zeigt;
- Fig. 7 eine schematische Ansicht der elektronischen Schaltung darstellt, wobei die Schalter für die Frequenzre-gelung und den aktiven Gleichrichter sowie der Schalter für die Spannungsregelung der zweiten Kapazität über Pegelumsetzer angesteuert werden;
- Fig. 8 eine schematische Ansicht der elektronischen Schaltung darstellt, wobei nur die Schalter für die Frequenz-regelung sowie der Schalter für die Spannungsregelung der zweiten Kapazität über Pegelumsetzer ange-steuert werden.

Wege zur Ausführung der Erfindung

[0027] Ein Regelorgan gemäss der Erfindung umfasst eine konventionelle Unruh (30), eine piezoelektrische Spiralfeder 20 (Fig. 4, 5a und 5b) und eine elektronische Schaltung 40 zur Steuerung der Ganggenauigkeit eines mechanischen Uhrwerks mit einer piezoelektrischen Spiralfeder. Dieses Regelorgan wird konventionell über eine nicht dargestellte Hemmung mit dem Räderwerk eines mechanischen Uhrwerks verbunden, das die benötigte Energie versorgt, und deren Gang somit geregelt wird.

[0028] Die piezoelektrische Spiralfeder 20 besteht ganz aus einem piezoelektrischen Material, oder aus einem mit min-destens einer piezoelektrischen Schicht überzogenen Material, vorzugsweise aus einem Halbleiter-Material (zum Beispiel Silizium) 200, das mindestens teilweise (Fig. 5a und Fig. 5b) mit einem piezoelektrischen Material 202–207 und einer Elektrode 208 beschichtet wird. 202 ist eine Keimschicht, 203 und 204 sind Zwischenschichten aus AlGaIn bzw. AlN, 205 ist die Halbleiterschicht (beispielsweise aus GaN), 206 ist eine Zwischenschicht aus AlN, 207 ist eine weitere Piezoelektri-sche Schicht aus GaN zum Beispiel, und 208 ist eine Elektrode. Die Piezospiralfeder wird vorteilhafterweise als Bimorphes Piezoelement gestaltet, es sind aber auch andere Ausführungen denkbar.

[0029] Die piezoelektrische Spiralfeder kann beispielsweise aus einem Wafer hergestellt werden, beispielsweise aus ei-nem Wafer aus Silizium. Indem entsprechend n- oder p-dotiertes Silizium 200 verwendet wird, ist der Wafer gut leitend, und der Kern der Piezospiralfeder aus Silizium kann direkt als Elektrode verwendet werden.

[0030] Die Spiralfedern werden auf dem Wafer strukturiert. Mit reaktivem Ionentiefätzen (auch Deep Reactive Ion Etching DRIE Verfahren genannt) können vertikale Strukturen auf einfache Art und Weise in Silizium realisiert werden.

[0031] Nach dem Strukturieren der Spiralfedern auf dem Wafer wird durch kontrolliertes Oxidieren des Wafers eine dünne Oxydschicht in der Grössenordnung von 1–3 µm auf der Oberfläche der Spiralfedern gebildet. Damit werden die Kanten gerundet, und die Unebenheiten in den vertikal geätzten Oberflächen werden geglättet.

[0032] Diese Oxydschicht wird dann weggeätzt, um einerseits einen guten elektrischen Kontakt zwischen dem leitfähigen Kern 200 der Spiralfeder und der piezoelektrischen Schicht 205, 207 sicherzustellen, und andererseits um eine gute Qualität der piezoelektrischen Beschichtung zu erreichen.

[0033] Anschliessend wird auf eine Ankeimschicht 202 aus AlN mindestens eine piezoelektrische Schicht 205, 207 mit der gewünschten Schichtdicke auf den Wafer und somit auf die von einer Oxydschicht befreiten Spiralfedern aufgebracht, beispielsweise eine Schicht Aluminiumnitrid. Diese Schicht 205, 207 hat idealerweise überall auf der Spiralfeder eine iden-tische Dicke. So kann verhindert werden, dass sich die Spiralfeder durch die unterschiedlichen Temperatúrausdehnungs-koeffizienten des Siliziums und des Piezomaterials in unerwünschter Art und Weise verformt.

[0034] Nach dem Aufbringen der piezoelektrischen Schicht(en) werden noch die Elektroden 208 aufgebracht. Eine Mög-lichkeit besteht darin, zuerst den gesamten Wafer mit einer dünnen Haftschrift mit einer Dicke von wenigen nm aus Chrom oder Titan zu überziehen, um anschliessend daran eine Schicht 208 aus beispielsweise Nickel oder Nickel/Gold in einer

Dicke von 100–500 nm aufzubringen. Somit sind der gesamte Wafer und auch die Spiralfedern auf der gesamten Oberfläche überall mit einer elektrisch leitenden Schicht versehen.

[0035] Nach dem Aufbringen der Elektroden 208 wird mit einem gerichteten Ätzprozess das Elektrodenmaterial auf der Ober- und Unterseite des Wafers entfernt, so dass nur noch Elektroden 208 auf den vertikalen Seitenwänden der Spiralfeder übrig bleiben. Nach dem Zerschneiden einer Sollbruchstelle an der Spiralfeder und einer Sollbruchstelle an Klötzchen sind dann die Elektroden 208 auf der Innen- und Aussenseite der Spiralfeder voneinander getrennt, und die Spiralfeder ist bereit zum Einbau in das Uhrwerk.

[0036] Diese piezoelektrische Spiralfeder wird dann anstelle einer konventionellen Spiralfeder in einem mechanischen Uhrwerk montiert. Wenn die piezoelektrische Spiralfeder 20 schwingt, erzeugt das Piezomaterial ein elektrisches Ausgangssignal $V_{\text{genA}}-V_{\text{genB}}$, mit welchem eine elektronische Schaltung 40 auf einer Leiterplatte 400 gespeist wird. Durch Verändern einer Impedanz, die parallel zur Spiralfeder 20 geschaltet wird, kann die Steifigkeit der Piezospiralfeder verändert werden, und somit kann die Schwingfrequenz der piezoelektrischen Spiralfeder und der Unruh durch die elektronische Schaltung 40 geregelt werden.

[0037] Ein Beispiel einer elektronischen Schaltung 40 zur Steuerung der Schwingfrequenz einer piezoelektrischen Spiralfeder 20 wird auf Fig. 2, und detailliert auf Fig. 7,8 dargestellt. Zwei Elektroden werden mit dem Piezomaterial auf der Piezospiralfeder 20 verbunden und liefern eine Wechselspannung $V_{\text{genA}}-V_{\text{genB}}$. Die Spiralfeder funktioniert also wie ein kleiner Generator.

[0038] Die Frequenz des Ausgangssignals $V_{\text{genA}}-V_{\text{genB}}$ wird von einer Frequenzregelschaltung 22 geregelt, damit der Gang des mechanischen Uhrwerks geregelt wird.

[0039] Eine Gleichrichterschaltung 23 konvertiert die Wechselspannung in eine Gleichspannung V_{dc} , und eine Spannungsregelungsschaltung mit dem Transistor 25 regelt die Spannung V_{dd} einer Kapazität, durch welche dann die elektronische Schaltung 40 gespeist wird. Ein erstes kapazitives Bauelement 24 wird vorzugsweise als Energiespeicher oder Energiezwischenspeicher verwendet. Das erste kapazitive Bauelement 24 speist entweder direkt oder über ein zweites kapazitives Bauelement 26, welches auf einer geregelten Spannung gehalten wird, die elektronische Referenzschaltung mit einem stabilen Quarzoszillator 1 und einem Frequenzteiler 2. Der stabile Oszillator weist einen Schwingquarz auf, dessen Schwingung eine Referenzfrequenz definiert. Alle Komponenten ausser dem Schwingquarz und den externen Kapazitäten können als ein IC 40 aufgebaut werden; die meisten digitalen Komponenten im IC können mit einer niedrigen Speisespannung V_{dd} gespeist werden.

[0040] Da die Wechselspannung, die mit einem Piezoelement 20 erzeugt werden kann, relativ hoch sein kann, wird zur Speisung des ICs 40 kein Spannungsvervielfacher benötigt.

[0041] Die elektronische Schaltung 40 kann die Frequenz der Unruh nur zusätzlich verringern.

Einstellen/Regeln der Frequenz

[0042] Einerseits kann die Schwingfrequenz von Unruh und Piezospiralfeder 20 beeinflusst werden, indem die Piezospiralfeder 20 viel elektrische Leistung abgeben muss. Dies könnte beispielsweise geschehen, indem ein ohmscher Widerstand parallel zur Piezospiralfeder geschaltet wird, oder indem ein ohmscher Widerstand parallel zum ersten Kondensator 24, welcher von der Piezospiralfeder über den Gleichrichter 23 gespeist wird, geschaltet wird. Der Nachteil dieser Lösung ist allerdings, dass die Frequenzänderung einerseits nur klein ist, in der Grössenordnung von 0.5% oder weniger, und dass andererseits die Schwingungsamplitude der Unruh dadurch sehr klein wird, da durch den ohmschen Widerstand dauernd Energie vernichtet wird.

[0043] Eine wesentlich grössere Frequenzänderung an der Kombination Unruh und Piezospiralfeder kann erreicht werden, indem die Impedanzveränderungsschaltung 22 die Kapazität variiert, die parallel zur Piezospiralfeder 20 geschaltet wird. Je grösser die Kapazität, desto kleiner ist die Steifigkeit der Piezospiralfeder 20 und somit die Schwingfrequenz des Systems. Frequenzänderungen in der Grössenordnung von 1–2% können so erreicht werden. Dies entspricht einer Korrekturmöglichkeit von 10–20 Minuten pro Tag.

[0044] In einer nicht dargestellten Variante werden beide elektrischen Anschlüsse der Piezospiralfeder 20 je über eine Kapazität an die Masse angeschlossen, wobei mindestens eine Kapazität variiert wird.

[0045] In einem Ausführungsbeispiel weist die elektronische Steuerschaltung 40 eine Komparator-Logik-Schaltung 4 auf, deren einer Eingang mit der elektronischen Referenzschaltung 1, 2 und deren anderer Eingang über eine den Nulldurchgang der Wechselspannung $V_{\text{genA}}-V_{\text{genB}}$ erfassende Komparatorstufe 5 und eine Antikoinzidenzschaltung 3 verbunden ist. Die Antikoinzidenzschaltung 3 ist im Wesentlichen ein Zwischenspeicher, der ein gleichzeitiges Einlaufen von Impulsen auf beiden Eingängen der Komparator-Logik-Schaltung 4 verhindert. Ein Ausgang der Komparator-Logik-Schaltung 4 steuert das Zu- und Wegschalten der Kapazitäten in der Impedanzveränderungsschaltung 22.

[0046] Die Impedanzveränderungsschaltung 22 ist in diesem Beispiel aus einer Vielzahl gleicher kleiner Kapazitäten 21, 222, 223, 224, 226, 228 (Kondensatoren) aufgebaut. Die Kapazitäten können aber auch verschiedene Werte haben, beispielsweise können die Kapazitätswerte so gewählt werden, dass die kleinste Kapazität einen Wert von 1 nF aufweist, die zweite Kapazität einen Wert von 2 nF, die dritte Kapazität einen Wert von 4 nF und die vierte Kapazität einen Wert

von 8 nF. Die Komparator-Logik-Schaltung 4 steuert die Impedanz der Impedanzveränderungsschaltung 22, indem sie die Anzahl oder die Kombination von den parallel zur Piezospiralfeder 20 geschalteten Kapazitäten verändert. Auf diese Weise ist die Impedanz der elektronischen Steuerschaltung 40 in einem durch die Anzahl und den Wert der Kapazitäten vorbestimmten Grössenbereich in kleinen Stufen steuerbar.

[0047] Die Komparator-Logik-Schaltung 4 vergleicht ein von der elektronischen Referenzschaltung 1, 2 kommendes Taktsignal A mit einem vom Piezogenerator stammenden Taktsignal B. In Abhängigkeit vom Ergebnis dieses Vergleichs steuert die Komparator-Logik-Schaltung 4 die Grösse der Impedanz der elektronischen Steuerschaltung über die Anzahl oder die Kombination der parallel zur Piezospiralfeder 20 geschalteten Kapazitäten 21, 222, 224, 226, 228. Auf diese Weise wird über die Steuerung der Impedanz der Gang der Piezospiralfeder 20 und Unruh und damit der Gang der Zeitanzeige geregelt. Die Steuerung ist so ausgelegt, dass der Gang der Zeitanzeige in gewünschter Weise mit der vom Schwingquarz 1 gelieferten Referenzfrequenz synchronisiert wird.

[0048] Um eine energetisch möglichst günstige Regelschaltung zu realisieren, bietet es sich an, die Komparator-Logik-Schaltung 4 mit Hilfe von nicht dargestellten Zählern zu realisieren.

[0049] Eine Möglichkeit besteht darin, den einen Eingang eines Up-Down-Zählers mit dem Ausgang des Komparators 5, der die Phase V_{genA} , V_{genB} der induzierten Spannung der Piezospiralfeder 20, beispielsweise den Nulldurchgang der Wechsellspannung, detektiert, zu verbinden; und den anderen Eingang des Up-Down-Zählers mit der Referenzschaltung 1, 2 zu verbinden. Die Signale aus dem Komparator 5 werden zum Zählerstand addiert, und die Signale aus der Referenzschaltung 1, 2 werden subtrahiert. Der vom Zähler gezählte Wert entspricht somit dem Unterschied zwischen der Anzahl von Impulsen aus der Piezospiralfeder 20 und der Anzahl von Impulsen aus Referenzschaltung 1, 2.

[0050] Die eintreffenden Signale, die vom Zähler in der Komparator-Logik Schaltung 5 erhalten werden, werden mit der Antikoinzidentschaltung 3 so synchronisiert, dass nie gleichzeitig ein UP-Impuls vom Komparator 5 und ein DOWN-Impuls aus der Referenzschaltung 1, 2 beim Zähler eintreffen.

[0051] Wenn beide Frequenzen identisch sind, wird der Zählerstand sich immer nur um einen Schritt erhöhen, sobald das Signal UP vom Komparator (der beispielsweise den Nulldurchgang der von der Piezospiralfeder induzierten Spannung misst) beim Zähler eintrifft, und wiederum um einen Schritt verringern, sobald das Referenzsignal DOWN aus der Referenzschaltung 1, 2 eintrifft. Wenn nun die Unruh zu schnell schwingt, werden mit der Zeit mehr UP-Impulse als DOWN-Impulse eintreffen, und der Zählerstand wird steigen. In einer einfachen Ausführung können nun direkt vom Ausgang des Zählers Schalter 221, 223, 225, 227 (Transistoren) angesteuert werden, welche die Kapazitäten 222, 224, 226, 228 parallel zur Piezospiralfeder 20 zu- oder wegschalten. Je grösser die Phasenverschiebung ist, umso grösser ist der Zählerstand, und umso mehr Kapazitäten werden parallel zur Piezospiralfeder 20 geschaltet. Je grösser aber die parallel zur Piezospiralfeder 20 geschaltete Impedanz ist, umso mehr wird die Schwingfrequenz der Unruh verlangsamt.

[0052] Damit bei kurzfristigen Störungen, wenn beispielsweise die Schwingfrequenz der Unruh durch einen Schlag kurzfristig zu niedrig ist, die Regelung sicher funktionieren kann, wird unterhalb eines bestimmten Zählerstandes keine der abschaltbaren Kapazitäten 222, 224, 226, 228 parallel zur Piezospiralfeder 20 geschaltet. Dies kann realisiert werden, indem beispielsweise von Zählerstufe 0–7 keine Kapazität (oder nur die feste Kapazität 21) parallel zur Piezospiralfeder 20 geschaltet wird, aber von Zählerstand 8–15 die entsprechende Anzahl oder Kombination von Kapazitäten parallel geschaltet wird, d.h., bei Zählerstand 8 wird eine zusätzliche Kapazität parallel zur Piezospiralfeder geschaltet, bei Zählerstand 9 werden zwei zusätzliche Kapazitäten parallel geschaltet, bei Zählerstand 10 drei usw., wenn Kapazitäten mit gleich grossen Kapazitätswerten verwendet werden.

[0053] Wenn Kapazitäten mit binären Kapazitätswerten verwendet werden, können die Schalter 221, 223, 225, 227 für das Zu- und Wegschalten der Kapazitäten 222, 224, 226, 228 direkt aus dem binären Zähler in der Komparator-Logik-Schaltung 4 angesteuert werden. Mit diesem Prinzip lässt sich eine einfache Variante einer Regelung realisieren, die zudem sehr wenig Strom verbraucht. Allerdings kann es sein, dass dann der Sekundenzeiger eine Abweichung von bis zu 1 s haben kann, da die maximale Anzahl der Kapazitäten in diesem Beispiel erst eingeschaltet ist, wenn der Zähler 7 UP-Impulse mehr erhalten hat, als Down-Impulse. 8 UP-Impulse entsprechen aber einer Sekunde auf dem Zifferblatt, wenn eine Unruh mit 4 Hz verwendet wird.

[0054] Die Grösse des Zählers in der Komparator-Logik-Schaltung 4 kann frei gewählt werden, vernünftigerweise wird aber ein Zähler verwendet, mit dem ein Bereich von +/- 2–4 Sekunden abgedeckt werden kann.

Verlustfreies Schalten der Kapazitäten

[0055] Idealerweise werden die Kapazitäten 222, 224, 226, 228 nur dann zu- oder weggeschaltet, wenn die induzierte Spannung am Ausgang der Piezospiralfeder 20 sehr klein oder 0 ist. Dies hat einerseits den Vorteil, dass damit die elektrischen Verluste minimiert werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Polarität der Kapazitäten nicht festgestellt und/oder vorher abgespeichert werden muss. Noch ein weiterer Vorteil ist, dass so pro Kapazität 222, 224, 226 bzw. 228 nur ein Schalter 221, 223, 225 bzw. 227, bestehend aus einem P-Kanal- und einem N-Kanal-Transistor, die parallel geschaltet sind, benötigt wird. Die Kapazitäten können mit dem einen elektrischen Anschluss alle zusammengeschaltet werden, nur für den jeweiligen anderen Anschluss wird je ein Schalter pro Kapazität benötigt. So kann einerseits der elektrische Widerstand minimiert werden, und andererseits müssen weniger Ausgänge für die Schalttransistoren 221, 223,

225, 227 vorgesehen werden. Dies ermöglicht die Konstruktion einer kleineren gedruckten Schaltung 400, und auch die Verwendung eines Chips 40 mit weniger Anschluss pads.

[0056] Das Umschalten der Kapazitäten beim Nulldurchgang (wenn die von der Piezospiralfeder 20 induzierte Spannung 0 ist oder nur wenige mV beträgt) kann realisiert werden, indem der Schaltvorgang auf den Nulldurchgangskomparator 5, der den Nulldurchgang der Spannung am Ausgang der Spiralfeder detektiert, synchronisiert wird. Aus der Komparator-Logik-Schaltung 4 wird die Information über die Kombination der zuzuschaltenden Kapazitäten geliefert, und beim nächsten Vorzeichenwechsel der Generatorspannung werden die Schalter 221–227 für das Zuschalten der Kapazitäten 222–228 mit dieser Information angesteuert, bis zum nächsten Vorzeichenwechsel der vom Piezogenerator 20 gelieferten Spannung, bei der dann die Schalter für den nächsten Zyklus mit den Informationen aus der Komparator-Logik-Schaltung angesteuert werden.

[0057] Das Zu- oder Wegschalten der Kapazitäten 222–228 kann auch während dem Laden einer ersten Kapazität 24 am Ausgang des Gleichrichters 23 erfolgen. Dann ist die vom Piezogenerator 20 abgegebene Spannung $V_{\text{genA}} - V_{\text{genB}}$ über eine bestimmte Zeitspanne praktisch konstant, da die Ladekapazität 24 geladen wird und der interne Widerstand der Piezospiralfeder 20 sehr hoch ist. Wenn da eine kleine Kapazität 222 bis 228 mit der richtigen Polarität zugeschaltet wird, ändert dies die induzierte Spannung nicht. Also wird auch kein Strom fließen, und dem System wird damit keine Energie entnommen.

[0058] Das Schalten der Kapazitäten 222 bis 228 muss in diesem Falle auf den Ladevorgang synchronisiert werden. Die Komparator-Logik-Schaltung 4 bestimmt die Kombination der zuzuschaltenden Kapazitäten, und beim nächsten Ladevorgang wird diese Kombination von Kapazitäten zur Piezospiralfeder zugeschaltet.

[0059] Damit die Umladeverluste vermieden oder minimiert werden können, müssen aber die Kapazitäten 222 bis 228 bei dieser Variante mit der richtigen Polarität zugeschaltet werden. Die angewendete Polarität kann entweder gespeichert werden oder aber mit zusätzlichen Komparatoren festgestellt werden. Ein Nachteil dieser Lösung ist allerdings, dass dann pro Kapazität 222 bis 228 je 2 Schalter verwendet werden müssen. Dies bedeutet, dass pro Kapazität 2 Ausgänge am IC 40 benötigt werden, und auch die Anzahl der Leiterbahnen auf der gedruckten Schaltung 400 wird dementsprechend grösser sein.

[0060] Vereinfacht gesagt werden die Kapazitäten 222 bis 228 idealerweise dann parallel zur Piezospiralfeder 20 zu- oder weggeschaltet, wenn die Spannung an der Piezospiralfeder 20 und die Spannung an der entsprechenden Kapazität 24 in etwa gleich gross ist, und falls diese Spannung mehr als einige bis einige Dutzend mV beträgt, muss auch noch die Polarität dieselbe sein.

Regelung mit 2 Zählern

[0061] Eine noch elegantere Lösung für die Regelung kann realisiert werden, indem einerseits ein Zähler in der Komparator-Logik-Schaltung 4, wie oben beschrieben, mit einem zweiten kleinen Zähler kombiniert wird. Wenn beim grossen Zähler der Zählerstand zwischen 0 und 7 ist, werden keine Kapazitäten 222 bis 228 zusätzlich parallel geschaltet. Bei Zählerstand zwischen 7 und 8 wird die Anzahl der parallel geschalteten Kapazitäten durch den kleinen Zähler bestimmt. Und wenn der Zählerstand des grossen Zählers grösser als 8 ist, werden alle verfügbaren Kapazitäten parallel zur Piezospiralfeder 20 geschaltet.

[0062] In dieser Variante wird also mit dem kleinen Zähler die Phasenverschiebung zwischen dem UP-Impuls von der Piezospiralfeder 20 und dem nachfolgenden DOWN-Impuls aus der Referenzschaltung gemessen. Je grösser die Phasenverschiebung ist, d.h., je grösser die Zeitspanne ist zwischen dem UP-Impuls und dem DOWN-Impuls, umso grösser ist dann der Wert der Kombination der Kapazitäten, die parallel zur Piezospiralfeder geschaltet werden.

[0063] Der kleine Zähler wird beispielsweise mit 64 Hz betrieben. Durch jeden UP-Impuls wird der Zähler bei 0 gestartet, und durch den nachfolgenden DOWN-Impuls wird der Zähler gestoppt. Der Wert am Ausgang des kleinen Zählers wird nach dem Eingang des DOWN-Impulses zwischengespeichert, und beim nächsten Nulldurchgang der Wechselspannung, wenn wieder ein UP-Impuls generiert wird, wird mit dem zwischengespeicherten Wert aus dem kleinen Zähler die entsprechende Kombination von Kapazitäten parallel zur Piezospiralfeder geschaltet. Bei Zählerstand 1–7 wird keine Kapazität (oder nur die feste Kapazität 21) zugeschaltet, bei Zählerstand 8–15 wird eine zusätzliche Kapazität zugeschaltet, bei Zählerstand 16–23 wird eine zweite zusätzliche Kapazität zugeschaltet etc. (wenn die Kapazitäten alle dieselbe Grösse haben). Die Regelung findet in diesem Falle also im Bereich von 1/8 s statt, was durch den Benutzer der Uhr kaum bemerkt wird, für den Benutzer wird die Uhr immer die genaue Zeit anzeigen.

[0064] Der kleine Zähler kann aber auch mit einer wesentlich höheren Frequenz betrieben werden, beispielsweise mit 1024 Hz. Mit jedem UP-Impuls wird der Zähler bei 0 gestartet, und mit dem DOWN-Impuls wird der Zähler gestoppt und der Wert des Zählerstandes zwischengespeichert, um beim nächsten UP-Impuls die entsprechende Kombination von Kapazitäten parallel zur Piezospiralfeder 20 zu schalten.

Einstellen der induzierten Spannung

[0065] Wird eine Kapazität 21, 222, 224, 226 oder 228 parallel zur Piezofeder geschaltet, wird, wie weiter oben beschrieben, die induzierte Spannung am Ausgang der Piezospiralfeder 20 beeinflusst. Eine grosse Kapazität ergibt eine kleine in-

duzierte Spannung, eine kleine Kapazität oder keine Kapazität parallel zur Piezospiralfeder 20 geschaltet gibt eine grosse Spannung am Eingang des Gleichrichters 23. So kann die von der Piezospiralfeder 20 induzierte Spannung V_{genA} , V_{genB} eingestellt werden mittels einer parallel zur Piezospiralfeder 20 geschalteten Kapazität 21. Dies kann einerseits notwendig sein, damit die induzierte Spannung in einem für die Elektronik 40 günstigen Bereich liegt. Die induzierte Spannung darf nicht zu hoch sein, da sonst Schutzdioden an den Eingängen auf dem IC 40 eingeschaltet werden und dadurch ein Verlust an Energie entsteht. Andererseits sollte die induzierte Spannung höher sein als die minimale Betriebsspannung, welche für ein sicheres Funktionieren der elektronischen Schaltung notwendig ist.

[0066] Mit einer Kapazität 21 parallel zur Piezospiralfeder 20 geschaltet, kann die gewünschte induzierte Spannung eingestellt werden. Eine erste kleine Kapazität 21 im Wert von 1–10 nF kann fix parallel zur Piezospiralfeder geschaltet werden, damit die Spannung am Eingang des Gleichrichters 23 sich im gewünschten Bereich befindet und einen Maximalwert nicht überschreitet.

[0067] Es ist auch denkbar, nur eine, dafür eine grosse Kapazität für das Regeln der Frequenz der Unruh zu verwenden. Diese Kapazität muss so gross sein, dass die Frequenz der Unruh/Spiralfeder mit zugeschalteter Kapazität auf jeden Fall kleiner ist als die Sollfrequenz. Da hier aber nicht genau bekannt ist, wie gross die Kapazität sein muss, wird diese Kapazität eher zu gross gewählt werden müssen. Dies hat aber den Nachteil, dass die induzierte Spannung der Piezospiralfeder beim Zuschalten der Kapazität deutlich kleiner wird, je nach Piezospiralfeder und verwendeter Kapazität, und dadurch wird die Sicherstellung der Energieversorgung der elektronischen Schaltung erschwert. Die Spannung am Eingang des Gleichrichters kann sogar so tief werden, dass ein sicheres Funktionieren der elektronischen Schaltung nicht mehr gewährleistet werden kann.

[0068] Daher ist es vorteilhaft, mehr als nur eine Kapazität für die Regelung zu verwenden. Dann wird nur gerade der Kapazitätswert zugeschaltet, der notwendig ist, um die richtige Schwingfrequenz der Unruh/Spiralfeder zu erhalten, und die induzierte Spannung am Eingang der elektronischen Regelschaltung wird nicht unnötig herabgesetzt.

Aktiver Gleichrichter

[0069] Die elektronische Schaltung 40 muss mit minimalem Energieverbrauch betrieben werden können. Dies wird erreicht, indem mindestens ein passives Bauelement (zum Beispiel eine Diode für den Gleichrichter) der Gleichrichterschaltung 23 wenigstens zeitweise durch eine aktive Baueinheit (zum Beispiel einen mittels eines Komparators 7 oder 8 gesteuerten Schalter) 230', 231', 232', 233' mit einem in Durchlassrichtung kleineren elektrischen Widerstand ersetzt wird.

[0070] Der Schalter 230', 231', 232', 233' kann ein Feldeffekttransistor sein und so geschaltet sein, dass in seinem gesperrten Zustand ein Teil seiner Struktur als Diode wirkt. Auf diese Weise werden alle vier Dioden des Gleichrichters 23 durch aktive Schalter ersetzt. Spannungsverluste über dem Schalter sind um mindestens eine Grössenordnung geringer als Spannungsverluste über der Diode. Der Spannungsabfall über eine Diode kann mehrere hundert mV betragen. Der Spannungsabfall über den Kanal eines Feldeffekttransistors beträgt jedoch nur wenige mV.

[0071] Das Aufladen der ersten Kapazität 24 erfolgt in der Anlaufphase des Uhrwerks über die mit einem hohen Spannungsverlust behafteten Dioden. Im weiteren Verlauf, sobald die Komparatoren 7, 8 funktionieren, werden dann die Dioden ersetzt durch die aktiven Bauelemente, so dass der Spannungsverlust minimiert werden kann, was energetisch wesentlich günstiger als ein Laden über die Dioden ist. Auf diese Weise wird die Energiereserve des Uhrwerks sparsamer genutzt und die Gangreserve erhöht.

[0072] Das Aufladen des ersten kapazitiven Bauelements 24 erfolgt also nur in der Anlaufphase des Uhrwerks über die mit einem hohen Spannungsverlust behafteten Dioden.

[0073] Der erste Komparator 7 vergleicht das elektrische Potential V_{dc} an dem nicht auf Massepotenzial liegenden Anschluss des ersten kapazitiven Bauelements 24 mit dem elektrischen Potenzial V_{genB} des nicht auf Massepotenzial liegenden lastseitigen Anschlusses des Gleichrichters 23. Der erste Schalter 230' wird durch den ersten Komparator 7 nur dann geschlossen, wenn die Spannung des ersten kapazitiven Bauelements 24 zum Betreiben des ersten Komparators 7 ausreicht und das elektrische Potenzial V_{dc} an dem massefreien lastseitigen Anschluss des Gleichrichters 23 zum weiteren Aufladen des ersten kapazitiven Bauelements hoch genug ist.

[0074] Der Spannungswert des ersten kapazitiven Bauelements 24, der zum Betreiben des ersten Komparators 7 und zum Betreiben eines in dem Gleichrichter 23 vorhandenen zweiten Komparators 8 ausreicht, ist in diesem Ausführungsbeispiel 0.7 V. Sobald das erste kapazitive Bauelement 23 über die passiven Bauelemente (Dioden) auf mindestens 0.7 V aufgeladen ist, funktioniert die Stromquelle und somit auch die Komparatoren 7, 8. Der erste Komparator 7 schliesst, sobald die von der Piezospiralfeder gelieferte Spannung V_{genB} höher ist als die Spannung V_{dc} des ersten kapazitiven Bauelements 24, d.h., er schliesst den ersten Schalter 230' bzw. öffnet den ersten Feldeffekttransistor. Sobald die von der Piezospiralfeder 20 gelieferte Spannung V_{genB} wieder unter die Spannung V_{dc} des ersten kapazitiven Bauelements 24 absinkt, schliesst der erste Komparator 7 den ersten Feldeffekttransistor 230'. Steigt die von der Piezospiralfeder 20 gelieferte Spannung V_{genB} abermals auf einen genügend grossen Wert, so öffnet der erste Komparator 7 den ersten Feldeffekttransistor 230' wieder und so weiter. Der Spannungsabfall über dem Kanal des ersten Feldeffekttransistors 230' beträgt jedoch im Vergleich zu den Dioden nur wenige mV. Der Wirkungsgrad des Gleichrichters mit den aktiven Elementen ist somit wesentlich höher

als der eines Gleichrichters 23 mit passiven Elementen. Der Spannungsverlust wird durch die Verwendung eines aktiven Gleichrichters also erheblich herabgesetzt.

[0075] Wenn aber nur kleine Spannungen und Ströme geschaltet werden, kann es sein, dass ein Schwingen oder Pellen der Kombination Komparator/Schalter entsteht. Der Komparator 7 (oder 8) misst einen Spannungsunterschied, aber sobald der Schalter 230' geschlossen wird, ist der Spannungsabfall über den Schalter 230' so klein, dass der Komparator 7 den Schalter wieder aufmacht. Sobald der Schalter geöffnet ist, detektiert der Komparator wieder eine Spannungsdifferenz, und der Schalter wird wieder geschlossen. So kann das System Schalter/Komparator schwingen, was im Extremfall dazu führen kann, dass das kapazitive Bauelement nicht mit genügend Spannung geladen ist, um das Funktionieren der elektronischen Schaltung sicherzustellen. Auf jeden Fall wird sich der Wirkungsgrad des Gleichrichters 23 verschlechtern, wenn das System Komparator/Schalter zu pellen oder schwingen beginnt.

[0076] Dies kann einerseits verhindert werden, indem Komparatoren 7, 8 mit einem genügend grossen Offset und einer genügend grossen Hysterese verwendet werden. Dies hat auch den Vorteil, dass der Piezogenerator 20 immer auf die eine oder andere Weise mit der ersten Kapazität über einen Schalter mit einem mehr oder weniger grossen Innenwiderstand verbunden ist, sobald die induzierte Spannung der Piezospiralfeder 20 grösser ist als die Spannung an der ersten Kapazität.

[0077] Eine andere Möglichkeit, diesen Effekt zu vermeiden, ist während der Zeit T1 mit dem Komparator 7, 8 zu messen (Messphase), ob der Schalter 230' (bzw. 231', 232', 233') geschlossen werden muss oder geöffnet bleiben kann. Wenn der Komparator 7 (oder 8) eine Spannungsdifferenz festgestellt hat, bei welcher die vom Piezogenerator erzeugte Spannung vor dem Transistor grösser ist als die Spannung des kapazitiven Elements, wird der Schalter während der Zeit T2 geschlossen (Schaltphase).

[0078] Anschliessend wird der Schalter 230' (bzw. 231', 232', 233') wieder geöffnet und während der Zeit T1 mit dem Komparator 7, 8 wieder gemessen, ob der Schalter während der nächsten Zeit T2 geschlossen werden muss oder geöffnet bleiben kann. Auf diese Art und Weise kann ein Pellen oder Schwingen der aktiven Dioden vermieden werden.

[0079] Die genannte Steuerschaltung enthält mindestens ein Speichermittel, welches in der ersten Phase (T1, Messphase) bei gesperrtem Schalter mindestens ein Steuersignal speichert, welches auf den genannten Schalter anzuwenden ist, wobei weiter in der zweiten Phase (T2, Schaltphase) der genannte Schalter mit dem genannten Steuersignal angesteuert wird.

[0080] Falls die vom Piezogenerator 20 gelieferte Spannung nicht hoch genug ist, um nach erfolgter Gleichrichtung mit dem aktiven Gleichrichter 23 die elektronische Schaltung 40 mit genügend hoher Spannung zu versorgen, kann anstelle des einfachen Gleichrichters 23 eine Spannungswandlerschaltung mit einem Gleichrichter verwendet werden, beispielsweise eine Spannungsverdopplerschaltung. Dies bringt aber den kleinen Nachteil mit sich, dass dann mehr als ein externes kapazitives Element benötigt wird, was zu einem erhöhten Raumbedarf für die elektronische Schaltung führt.

[0081] Der Gleichrichter 23 könnte aber auch nur aus passiven Dioden bestehen.

Minimaler Stromverbrauch/Maximale Amplitudenunabhängigkeit

[0082] Die Schwingungsamplitude der Unruh einer mechanischen Uhr kann relativ stark variieren. Wenn die Aufzugsfeder ganz aufgezogen ist, wird vom Ankerrad über den Anker ein grosses Antriebsmoment auf die Unruh übertragen. In diesem Falle hat die Unruh eine grosse Schwingungsamplitude. Durch die Piezofeder wird in diesem Falle eine relativ hohe Spannung erzeugt. Wenn nur noch wenig Antriebsmoment auf die Unruh übertragen wird, beispielsweise wenn die Antriebsfeder nur noch wenig aufgezogen ist, wird dementsprechend die Schwingungsamplitude der Unruh und somit auch die von der Piezofeder erzeugte Spannung relativ klein.

[0083] Die Elektronik muss aber auch bei unterschiedlich hohen Wechselspannungen aus der Piezospiralfeder 20 mit einer möglichst geringen Leistungsaufnahme betrieben werden können.

[0084] Eine erste Möglichkeit besteht darin, dass zumindest ein wesentlicher Teil der Elektronik 40 auf der integrierten Schaltung 400 mit einer geregelten Spannung betrieben wird, beispielsweise der Quarzoszillator 1 und der Frequenzteiler 2, die Antikoinzidenzschaltung 3 und die Komparator-Logik-Schaltung 4, die Komparatoren 5 und 11, eventuell auch die Komparatoren 7, 8. So ist sichergestellt, dass auch bei einer hohen Spannung an der ersten Kapazität 24 das IC 40 mit einer minimalen Leistungsaufnahme betrieben werden kann. Das hat den Vorteil, dass auch bei grosser Amplitude der Unruh und somit einer grossen induzierten Spannung aus dem Piezogenerator 20 und somit einer hohen Spannung am Ausgang des Gleichrichters 23 die Leistungsaufnahme des IC nicht deutlich ansteigen wird.

[0085] Eine zweite Möglichkeit besteht darin, die Speisespannung für die integrierte Schaltung 40 zu regeln. Am einfachsten geschieht dies, indem die Spannung der Kapazität 26, welche die Elektronik speist, geregelt wird. Durch den (aktiven) Gleichrichter 23 wird die von der Piezofeder 20 erzeugte elektrische Spannung V_{gen} gleichgerichtet und die Kapazität geladen. Die Spannung von V_{dd} kann geregelt werden, indem ab einer bestimmten Höhe von V_{dd} der Gleichrichter ausgeschaltet wird und die Kapazität nicht mehr lädt, obschon die Spannung aus dem Piezogenerator höher ist in dem Moment als die Spannung an V_{dd} . Eine mögliche Obergrenze für das V_{dd} könnte beispielsweise 1.2 V sein.

[0086] Eine dritte Möglichkeit besteht darin, dass eine erste Kapazität 24 durch den Gleichrichter 23 gespeist wird. Dabei wird diese erste Kapazität 24 über den Gleichrichter 23 immer aufgeladen von der durch die Piezospiralfeder 20 gelieferten elektrischen Leistung. Es ist eine zweite Kapazität 26 vorhanden, welche die elektronische Schaltung 40 speist. Diese zweite Kapazität 26 wird nun auf eine bestimmte Spannung V_{dd} geregelt. Dies kann beispielsweise gemacht werden, indem in bestimmten Abständen, beispielsweise 8x pro Sekunde, ein Schalter 25 eine elektrische Verbindung zwischen der ersten Kapazität 24, welche eine Spannung zwischen 1.2 und 5 V aufweist, und der zweiten Kapazität 26 herstellt, wenn nach dem letzten Ladevorgang die Spannung an der zweiten Kapazität 26 unter den gewünschten Wert V_{dd} gesunken ist. Sobald an der zweiten Kapazität die gewünschte Spannung, beispielsweise 1.2 V erreicht ist, wird der Ladevorgang unterbrochen. Oder es kann eine untere V_{low} und eine obere Spannung V_{high} definiert werden. Wenn die Spannung an der zweiten Kapazität tiefer ist als V_{low} , wird der Schalter zwischen der ersten und der zweiten Kapazität geschlossen, und die zweite Kapazität wird von der ersten Kapazität aufgeladen. Wenn die Spannung an der zweiten Kapazität 26 dann über den Wert von V_{high} steigt, wird der Schalter 25 wieder geöffnet.

[0087] Eine vierte Möglichkeit besteht darin, die Länge des Ladefensters, das heisst die Zeit, während der die Kapazität 26, welche die Speisespannung V_{dd} für die integrierte Schaltung liefert, überhaupt geladen werden kann, zu variieren. Je höher das V_{dd} ist, umso kürzer wird das Ladefenster. Ein kleines Ladefenster gibt auch bei hohen Eingangsspannungen vom Piezogenerator ein relativ kleines V_{dd} . Auf diese Weise kann die Höhe der Spannung an der Kapazität 26 auch limitiert werden.

[0088] Ein weiterer Vorteil der Regelung der Speisespannung für die integrierte Schaltung 40 ist, dass die Piezospiralfeder 20 nicht mehr so genau an die Elektronik 40 angepasst sein muss. Die Piezospiralfeder 20 muss im Betrieb nur eine minimale Spannung V_{gen} liefern, die ausreicht, um die Elektronik 40 sicher betreiben zu können und um den Gang der Unruh zu regeln oder steuern. Wenn der Piezogenerator 20 eine Spannung liefert, die grösser ist, als für den sicheren Betrieb notwendig, wird die Leistungsaufnahme der Elektronik deshalb nicht höher werden.

Ansteuerung der Schalttransistoren 230', 231', 232', 233' für den Gleichrichter 23 mit höherer Spannung als die Speisespannung V_{dd} des ICs 40

[0089] Damit die Steuersignale für die Steuerung der elektronischen Schaltelemente/Transistoren 230', 231', 232', 233' auf dem Teil der elektronischen Schaltung mit der höheren Spannung verwendet werden können, müssen diese Signale aus dem Teil der elektronischen Schaltung 40 mit der niederen Spannung mittels Pegelumsetzern 10 auf eine höhere Spannung V_{dc} gebracht werden.

[0090] Die Analogschaltung mit Stromquellen und Oszillator 1 sowie Komparatoren 5, 7, 8, 11 und der Logikschaltung 4 sowie dem Frequenzteiler 2 und der Antikoinzidenzschaltung 3 wird mit einer tiefen Spannung V_{dd} , beispielsweise 200 mV über der Minimalspannung, bei der die elektronische Schaltung 40 noch sicher funktioniert, gespeisen.

[0091] Die Schalter 230', 231', 232', 233' im Gleichrichter 23, die Schalter 221, 223, 225, 227 für die Änderung der Impedanz (durch Zu- oder Wegschalten von Kapazitäten 222–228), die Speisung der Pegelumsetzer 9, 10, 12 sowie der Schalter 25, der benötigt wird, um den Niederspannungsteil der Schaltung zu versorgen, werden mit einer höheren Spannung V_{dc} betrieben, typischerweise zwischen 1.2 und 5 V.

[0092] Wenn die Speisespannung für die integrierte elektronische Schaltung 40 geregelt wird, beispielsweise auf 1.0 V, indem die zweite Kapazität 26 auf diese Spannung geregelt wird, die induzierte Spannung an der Piezospiralfeder 20 aber höher als die 1.0 V ist, und die erste Kapazität 24 auf beispielsweise 5 V aufgeladen ist, müssen die Schalttransistoren 230', 231', 232', 233' im Gleichrichter 23 auch mit 5 V angesteuert werden. Dies kann gemacht werden, indem das Steuersignal für die Schalttransistoren 230', 231', 232', 233' mit Hilfe von Pegelumsetzern 10 auf in etwa dieselbe Spannung gebracht wird wie die zu schaltende Spannung. Die Pegelumsetzer werden dabei von der ersten Kapazität 24 gespeisen, die vom Piezogenerator 20 geladen wird.

[0093] Falls die erste Kapazität 24, welche direkt von der Piezospiralfeder 20 über den aktiven Gleichrichter 23 aufgeladen wird, auf ca. 1 V gehalten wird, indem der Ladevorgang abgebrochen wird, sobald die gewünschte Spannung V_{dc} erreicht ist, müssen die Transistoren 230', 231', 232', 233' im Gleichrichter trotzdem mit einer Spannung angesteuert werden, die in etwa gleich gross ist wie die zu schaltende Spannung vom Piezogenerator. Dies kann so gemacht werden, indem intern eine Spannungserhöhungsschaltung vorgesehen wird, beispielsweise ein Spannungsverdoppler oder Spannungsvervierfacher. Dann werden die logischen Signale, welche die Schalter/Transistoren ansteuern, mittels Pegelumsetzern 9, 10, 12, die von der internen Spannungserhöhungsschaltung gespeisen werden, auf ein erhöhtes Spannungsniveau V_{dc} angehoben.

[0094] Es gibt aber auch die Möglichkeit, die Komparatoren 13, 14 für den Gleichrichter mit der höheren Spannung V_{dc} aus der ersten Kapazität 24 nach dem Gleichrichter 23 (Siehe Fig. 8) zu betreiben. Dann können die Schalter 230' bis 233' für den Gleichrichter 23 direkt über die Komparatoren 13, 14 gesteuert werden, in diesem Fall sind dann für den Gleichrichter auch keine Pegelumsetzer notwendig.

Ansteuerung der Schalttransistoren für die Impedanzveränderung mit höherer Spannung als die Speisespannung V_{dd} des ICs 40

[0095] Wenn der Widerstand über die Schalter 221, 223, 225, 227, welche die Kapazitäten 222, 224, 226, 228 zu- oder wegschalten, zu gross wird, beispielsweise 1 MOhm oder grösser, werden die elektrischen Verluste gross, und die Schwingungsamplitude der Unruh wird dann viel zu klein. Ein sicheres Funktionieren des Uhrwerks ist dann nicht mehr gewährleistet.

[0096] Damit ein möglichst geringer elektrischer Widerstand über die Schalttransistoren 221, 223, 225, 227 sichergestellt werden kann, werden pro Schalter mindestens ein P-Kanal-Transistor und ein N-Kanal-Transistor parallel geschaltet. Über Pegelumsetzer 9, die, wie weiter oben beschrieben, mit einer genügend hohen Spannung V_{dc} gespiesen werden, werden diese Transistoren für das Zu- und Wegschalten der Kapazitäten 222 bis 228 angesteuert. Die logischen Signale aus der Komparator-Logik-Schaltung 4, welche die Schalter/Transistoren ansteuern, werden also mittels den Pegelumsetzern 9, die entweder von der höheren Spannung V_{dc} am Ausgang der ersten Kapazität oder von einer internen Spannungserhöhungsschaltung gespiesen werden, auf ein erhöhtes Spannungsniveau angehoben.

Beschränkung der maximalen Amplitude

[0097] Bei Uhrwerken mit einem automatischen Aufzug kann es vorkommen, dass die Aufzugsfeder zu stark aufgezogen wird und dementsprechend ein zu hohes Drehmoment an das Uhrwerk abgegeben wird. Ein hohes Drehmoment an der Aufzugsfeder erzeugt an der Unruh eine grosse Amplitude. Eine zu grosse Amplitude ist aber nicht gewünscht. Im Falle des mit einer Piezospiralfeder 40 ausgerüsteten Uhrwerks führt eine grosse Amplitude zu einer grossen induzierten Spannung, und somit zu einer relativ grossen Spannung an der Kapazität 24, welche vom Gleichrichter 23 gespiesen wird. Sobald aber diese Kapazität belastet wird, indem beispielsweise ein Widerstand parallel zur Kapazität geschaltet wird, wird die Spannung an der Kapazität sinken, und die Piezospiralfeder wird mehr belastet. Dies führt dazu, dass die Schwingungsamplitude der Unruh kleiner wird, was in diesem Falle ja gewünscht ist. Es genügt also, die Spannung an der ersten Kapazität 24 nach dem Gleichrichter 23 zu messen, und bei Überschreiten einer bestimmten Spannung einen nicht dargestellten Widerstand parallel zur Kapazität 24 zu schalten, um so die Amplitude zu begrenzen.

Minimierung Stromverbrauch Komparatoren

[0098] Komparatoren werden für die Messung von verschiedenen Signalen verwendet. Da das System durch den mechanischen Schwinger schon weitgehend stabilisiert ist, sind die Zeiten bekannt, an denen die verschiedenen Werte benötigt werden. So ist es möglich, mit einer reduzierten Anzahl von Komparatoren zu arbeiten. Die Ein- und Ausgänge der Komparatoren werden dann je nach Phase verschieden geschaltet.

[0099] Eine weitere Möglichkeit besteht darin, gewisse Komparatoren abzuschalten, wenn sie nicht benötigt werden. Auch so kann Strom gespart werden. Wenn beispielsweise der Komparator 5 für die Messung des Vorzeichenwechsels der induzierten Spannung des Piezogenerators (Nulldurchgang) nach dem Schaltvorgang für 1/16 Sekunden abgeschaltet wird, da der nächste Nulldurchgang erst nach 1/8 Sekunde erfolgt (Unruh mit 4 Hz), kann also Strom gespart werden. Das Funktionieren des Uhrwerks ist dennoch sichergestellt, da durch die Unruh/Spiralfeder die Schwingfrequenz schon weitgehend stabilisiert ist.

[0100] Nach dem Einschalten der Komparatoren benötigen diese eine bestimmte Zeit, bis dass der gewünschte Arbeitspunkt erreicht ist. Um zu verhindern, dass während dieser Zeitspanne die Komparatoren falsche Signale liefern, wird der Ausgang des jeweiligen Komparators erst freigeschaltet, wenn der Arbeitspunkt des entsprechenden Komparators erreicht worden ist. Dies kann realisiert werden, indem erst nach einer vordefinierten Zeitspanne nach dem Einschalten des Komparators der Ausgang des Komparators freigeschaltet wird.

Power-on-Reset (POR)

[0101] Mit einer nicht dargestellten POR-Schaltung (im kurzen: POR) wird sichergestellt, dass die elektronische Regelschaltung 40 sicher anlaufen kann, nicht einen zu grossen Anlaufstrom benötigt, und auch nicht im Anlaufprozess hängenbleibt. Dabei werden nach und nach diejenigen Elemente aktiviert, die für die jeweilige Phase des Startvorgangs benötigt werden, oder diejenigen Elemente deaktiviert, die in diesem Moment nicht benötigt werden, oder auch einige Elemente in einen Anlaufmodus versetzt.

[0102] Damit die elektronische Regelschaltung 40 sicher anlaufen kann, muss sichergestellt werden, dass beim Anlaufen der Schaltung der aktive Gleichrichter 23 in einen Anlaufmodus versetzt wird, solange der Quarzoszillator 1 noch nicht funktioniert. Das POR dient dazu, den Gleichrichter 23 mit den Komparatoren und den Schaltern (beispielsweise Feldefekttransistoren) zu betreiben, auch ohne dass der Oszillator 1 funktioniert.

[0103] Ganz zu Beginn der Anlaufphase funktioniert ein Teil der Schalter 230' bis 233' als einfache Dioden, und in dieser Phase wird mindestens eine Kapazität 24 über diese verlustbehafteten Dioden geladen. Sobald die interne Stromquelle auf dem IC funktioniert, beginnen auch die Komparatoren zu funktionieren. In dieser Phase werden dann die Schalter direkt von den Komparatoren angesteuert.

[0104] Damit ein für das Anlaufen der elektronischen Schaltung günstige Wechselspannung vorliegt, kann das POR auch dazu verwendet werden, um während der Anlaufphase einen oder mehrere Kondensatoren 222 bis 228 parallel zur Piezospiralfeder 20 zu schalten. So kann die induzierte Spannung auf einen bestimmten, für das Anlaufen der elektronischen Schaltung 40 günstigen Wert eingestellt werden. Sobald der Quarzoszillator 1 funktioniert und das POR verschwindet, wird das Zu- und Wegschalten der Kapazitäten 222 bis 228 wieder dazu verwendet, um die Schwingfrequenz der Unruh zu regeln.

[0105] Das POR dient des Weiteren dazu, ein sicheres Anlaufen des Quarzoszillators 1 zu gewährleisten und dafür zu sorgen, dass beim Anlaufen des Quarzoszillators 1 nicht zu viel Strom benötigt wird. Dies kann realisiert werden, indem zuerst mindestens eine Kapazität 24 mit Hilfe des Gleichrichters geladen wird, zuerst mit den passiven Elementen (Dioden), und sobald die Stromquelle aufgestartet ist, mit den aktiven Elementen (Komparatoren und Schalter). Erst wenn die Kapazität, welche den Quarzoszillator speist, auf eine Mindestspannung, beispielsweise 1 V, aufgeladen ist, wird der Quarzoszillator 1 gestartet. Dabei kann der Strom 200 nA während einer Sekunde erreichen. Dies ist aber kein Problem, da der grösste Teil der elektrischen Leistung von der schon aufgeladenen Kapazität geliefert wird. Bei einer Kapazität von 1 µF und 1 V ergibt das dann ungefähr einen Spannungsabfall von 0.2 V. So kann ein sicheres Anlaufen des Quarzoszillators sichergestellt werden, ohne dass das System Unruh/Spiralfeder durch einen hohen Anlaufstrom zu stark belastet wird.

[0106] Durch das POR wird auch sichergestellt, dass die zweite Kapazität 26 während des Anlaufvorgangs durch die erste Kapazität 24 mit genügend elektrischer Energie versorgt wird. Es ist auch möglich, den Quarzoszillator 1 ausschliesslich durch die zweite Kapazität 26 zu speisen und den Oszillator 1 erst zu starten, sobald die zweite Kapazität 26 eine gewisse Mindestspannung erreicht hat.

[0107] Das POR dient weiter dazu, die Regelung der Schwingfrequenz der Unruh in einem bestimmten Regelzustand zu starten. Wenn die Regelung mit Hilfe eines Zählers in der Komparator-Logik-Schaltung 4 funktioniert, kann beispielsweise durch das POR der oder die Zähler zuerst in einen bestimmten Zustand A versetzt werden, um dann beim Verschwinden des POR in den Zustand B gesetzt und freigegeben werden.

[0108] Mit dem POR werden des Weiteren die Komparatoren 7, 8 (13, 14) für den Gleichrichter 23 so geschaltet, dass während des Anlaufvorganges die Komparatoren 7, 8 (13, 14) immer eingeschaltet sind und funktionieren, und erst mit dem Verschwinden des POR werden die Komparatoren zu gewissen Zeiten ein- und ausgeschaltet, um Strom zu sparen. Es ist auch möglich, in der Anlaufphase nur die Komparatoren für den Gleichrichter 23 zu betreiben, und erst im weiteren Verlauf des Anlaufvorganges dann die weiteren Komparatoren 5, 11 einzuschalten, sobald sie benötigt werden.

[0109] Das Signal POR hängt von der internen Stromquelle und dem Quarzoszillator 1, sowie falls gewünscht auch von der Spannung an mindestens einer Kapazität ab. Solange die Stromquelle nicht genügend Strom liefert, beträgt ein Signal eines PORA eins, und solange die Frequenz des Quarzoszillators nicht einen vorbestimmten Wert erreicht, beträgt das Signal eines PORB auch eins. Und solange die Spannung an einer Kapazität einen gewünschten Wert nicht erreicht, beträgt das Signal des PORC auch eins. Das Signal-POR kann aus PORA, PORB, PORC und Signalen aus dem Frequenzteiler und dem Logikteil der elektronischen Schaltung gebildet werden; zusätzlich dazu können auch noch Signale aus dem analogen Teil der elektronischen Schaltung verwendet werden. Es können aber auch verschiedene POR gebildet werden aus den oben beschriebenen Signalen.

Miniaturisierung der elektronischen Schaltung

[0110] Die elektronische Schaltung wird vorzugsweise so klein gestaltet, dass sie sich ohne Weiteres im Uhrwerk unter einer Brücke anordnen und verstecken lässt.

[0111] Idealerweise geschieht dies, indem die Unruhbrücke eines konventionellen mechanischen Uhrwerks mitsamt der Unruh und der Spiralfeder ausgetauscht wird. Nun muss zusätzlich noch die Elektronik 40 im Uhrwerk platziert werden. Es kann vorteilhaft sein, die Elektronik so zu platzieren, dass sie nicht mehr sichtbar ist, beispielsweise unter der Unruhbrücke. Damit dies machbar ist, muss die Elektronik so klein wie möglich gestaltet werden. Im Idealfall lässt sich die elektronische Regelschaltung sogar direkt in die Unruhbrücke integrieren.

[0112] Dies kann realisiert werden, indem die gesamte elektrische Schaltung 40 mit Ausnahme der externen Kapazitäten und des externen Schwingquarzes 1 als eine integrierte elektronische Schaltung 400 realisiert wird. Um weiter Platz zu sparen, wird mit der Wende-Montagetechnik (auch Flip-Chip-Montagetechnik genannt) der Chip 40 direkt, ohne weitere Anschlussdrähte, mit der aktiven Kontaktierungsseite nach unten – zum Substrat/Schaltungsträger hin – montiert. Dies führt zu besonders geringen Abmessungen des Gehäuses und kurzen Leiterlängen. So kann die gesamte Fläche des Die (des Chips) zur Kontaktierung genutzt werden.

[0113] Die Dimensionen der einzelnen, handelsüblichen Bauelemente haben dann beispielsweise folgende Abmessungen:

IC/Chip 40	1x	1.52 x 1.03 x 0.4 mm
Quarz 1	1x	2.0 x 0 x 0.6 mm

Kondensator 2x 1.0 x 0.5 x 0.5 mm

Kondensator 3x 0.4 x 0.2 x 0.2 mm

[0114] Die Elemente sind so klein, dass sie sich auf einer gedruckten Schaltung 400 von ca. 3.35 x 2.3 mm unterbringen lassen, und dies auch, wenn die Elemente nur auf einer Seite montiert sind. Es wäre allerdings möglich, die Elemente auch auf beiden Seiten der gedruckten Schaltung anzubringen. Oder es gibt auch die Möglichkeit, eine flexible gedruckte Schaltung zu verwenden und die gedruckte Schaltung dann zu biegen, so dass Kondensatoren aufeinander zu liegen kommen.

[0115] Auf so einem kleinen Modul ist aber der Platz sehr begrenzt, es hat praktisch nur genügend Platz für die elektronischen Bauteile. Testpunkte für das Austesten der elektronischen Schaltung können auf so einer kleinen Leiterplatte nicht angebracht werden. Auch das Anordnen der Leiterbahnen zum Verbinden der Elemente untereinander ist so kaum möglich. Dieses Problem kann gelöst werden, indem einerseits die Leiterplatte beidseitig Leiterbahnen aufweist, die auch durchgehend durch die Leiterplatte miteinander verbunden sein können. So ist es möglich, auf der Oberseite der Leiterplatte eine Anzahl von sehr kleinen Kondensatoren aufzulöten, die elektrischen Verbindungen zu den anderen Elementen aber auf der Unterseite der Leiterplatte anzuordnen. Damit ist aber das Problem der Testpunkte noch nicht gelöst. Dies kann gelöst werden, indem die Testpunkte 401 auf einem zusätzlichen Teil der Leiterplatte 400 angeordnet werden (Fig. 3a, 3b). Dieser Teil der Leiterplatte 400 wird nach erfolgreichem Testen der Elektronik abgetrennt. So können die Testpunkte 401 grosszügig gestaltet werden, was später das Testen erleichtert. Da aber ja dieser Teil nach dem erfolgreichen Testen abgetrennt wird, hat die finale Leiterplatte 400 nur sehr kleine Abmessungen.

[0116] Eine weitere Möglichkeit, Platz zu sparen, besteht darin, die Leiterplatte 400 mindestens teilweise aus flexiblem Material zu fertigen. So können die Anschlüsse 300 für die Piezospiralfeder 20 als eine dünne lange Verlängerung 402 der Leiterplatte 400 gestaltet werden. So ist es nicht mehr notwendig, auf der Leiterplatte Drähte anzulöten, welche dann die elektrische Verbindung zur Piezospiralfeder 20 herstellen. Die Funktion der Drähte übernimmt die dünne, lange Verlängerung der flexiblen Leiterplatte. Dies hat den weiteren Vorteil, dass nach dem Anbringen der elektronischen Bauteile auf der Leiterplatte und dem anschliessenden Testen nur noch die Verbindung zur Piezospiralfeder 20 gemacht werden muss. Dies sind nur noch zwei elektrische Verbindungen, die mit Löten oder mit elektrisch leitfähigem Leim hergestellt werden können. Die elektrische Verbindung könnte aber auch durch Bonden hergestellt werden.

[0117] Auf der gedruckten Schaltung 400 ist unter dem IC 40 auf beiden Seiten der gedruckten Schaltung Kupfer vorzusehen. So kann kein Licht durch die gedruckte Schaltung dringen und die Funktionsfähigkeit des IC beeinträchtigen.

[0118] Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung einer mehrlagigen, flexiblen Leiterplatte 400, beispielsweise mit 3 Layern. Die elektrische Verbindung zwischen den einzelnen Layern wird durch vertikale Kontaktierungen hergestellt. Auf dem obersten Layer sind die Kontakte zum IC, den Kapazitäten, dem Quarz und der Piezospiralfeder aufgebracht. Im Zwischenlayer werden die Verbindungen zwischen den Kontaktstellen von IC, Quarz, Kapazitäten und dem Piezogenerator hergestellt, und der dritte Layer kann dazu verwendet werden, unter dem IC eine lichtundurchlässige Barriere zu realisieren. Somit kann auf Lötstoplack verzichtet werden, und der erste und der dritte vollflächige Layer kann zuerst vernickelt und anschliessend vergoldet werden.

[0119] Um ein sicheres Funktionieren der elektronischen Schaltung zu gewährleisten, wird die elektronische Schaltung nach dem Abtrennen der Testpunkte mit einer dünnen elektrisch isolierenden Schutzschicht überzogen, beispielsweise mit einem Lack, der unter UV-Licht aushärtet. Damit kann verhindert werden, dass das Elektronikmodul einen unerwünschten elektrischen Kontakt mit dem Uhrwerk oder Teilen des Uhrwerks herstellt und damit in der Funktion beeinträchtigt.

[0120] Auf diese Art und Weise kann ein Elektronikmodul mit möglichst geringer Grundfläche, aber auch mit einem möglichst geringen Volumen realisiert werden.

[0121] Es ist aber auch denkbar, die Testpunkte 401 nicht abzutrennen nach dem Austesten der Elektronik, sondern die Testpunkte so zu falten, dass sie nur wenig Platz unter der elektronischen Schaltung 400 einnehmen.

[0122] Wenn die elektronische Schaltung gebogen wird, dann sollte an dieser Stelle nicht mit Nickel beschichtet werden. Nickel ist zu hart, und der Print könnte an dieser Stelle brechen. Mit einer dreilagigen flexiblen gedruckten Schaltung lässt sich dieses Problem lösen, indem die elektrische Verbindung zur Piezospiralfeder durch die mittlere Lage oder Layer realisiert wird.

[0123] Das gesamte Elektronikmodul wird somit sehr klein und lässt sich problemlos unter einer Brücke oder einem ähnlichen Bauteil verstecken. Dies hat den weiteren Vorteil, dass dann die Elektronik vor Licht, vor elektrischen Feldern und vor Magnetfeldern geschützt ist. Erfindungsgemäss wäre es vorteilhaft, die Elektronik unter der Unruhbrücke zu platzieren. So sieht ein erfindungsgemässes Uhrwerk praktisch wie ein rein mechanisches Uhrwerk aus, hat aber den Vorteil der wesentlich besseren Ganggenauigkeit.

Feststellen des Regelbereichs

[0124] Für den Uhrmacher hilfreich sein kann die Möglichkeit, mit der Regelektronik anzuzeigen, wenn die Frequenz der Unruh nicht mehr im Regelbereich der Elektronik liegt. Wenn die Unruh zu langsam schwingt, kann die Elektronik

beispielsweise anzeigen, dass der Regelbereich ausgeschöpft ist, indem die Schwingfrequenz des Quarzes geändert wird. Dies kann geschehen, indem interne Kapazitäten der integrierten Schaltung 40 hinzu- oder weggeschaltet werden an die Anschlüsse des Quarzoszillators 1. Genau dasselbe kann geschehen, wenn die Unruh zu schnell schwingt und nicht mehr innerhalb des Regelbereichs liegt. Beispielsweise kann die Frequenz des Quarzoszillators erhöht werden, wenn die Unruh zu langsam und ausserhalb des Regelbereichs der Elektronik schwingt. Umgekehrt kann die Frequenz des Quarzoszillators verlangsamt werden, wenn die Unruh zu schnell und ausserhalb des Regelbereichs der Elektronik schwingt. So kann der Uhrmacher durch einfaches Messen der Frequenz des Quarzoszillators feststellen, ob Elektronik die Schwingfrequenz der Unruh korrekt regeln kann.

Anschluss der Piezospiralfeder 20 an elektronische Schaltung 40

[0125] Die elektrische Verbindung 300 von der Piezospiralfeder 20 zur elektronischen Schaltung 40 muss so gestaltet werden, dass diese Verbindung durch das Schwingen der Unruh nicht mechanisch belastet wird.

[0126] Dies kann beispielsweise gemacht werden, indem das Ende 30 der Spiralfeder 20 mit einer Verdickung 280 versehen wird. Diese Verdickung ist dann keinen Verformungen mehr unterworfen, wenn die Unruh hin- und herschwingt und die Spiralfeder verformt wird. Die mechanische Fixierung der Spiralfeder kann auch an dieser Verdickung 280 realisiert werden, sei es durch Schrauben, Klemmen oder Kleben. Und die elektrische Verbindung zur elektronischen Schaltung kann durch Löten, Kleben mit einem elektrisch leitfähigen Leim (Adhesive Conducting Glue oder Adhesive Conduction Paste) oder durch Bonden realisiert werden; es ist aber auch eine elektrische Verbindung denkbar, die mit mechanischen Mitteln realisiert wird, beispielsweise durch Klemmen.

[0127] Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Spiralfeder 20 so zu verlängern, dass das Ende 280 der Piezospiralfeder über das Klötzchen hinausragt, so dass die elektrische Verbindung 300 zwischen der Piezospiralfeder 20 und der elektronischen Schaltung 40 am mechanisch unbelasteten Ende hergestellt werden kann. Dies kann beispielsweise mit Löten geschehen, wenn dabei die Curie-Temperatur des piezoelektrischen Materials nicht überschritten wird.

[0128] Eine andere Variante ist, das Klötzchen so zu gestalten, dass im vorderen Bereich die Piezospiralfeder 20 mechanisch gehalten wird und die Schwingungen aufnimmt, und im hinteren Bereich der elektrische Kontakt zwischen den Elektroden des Piezomaterials und der elektronischen Schaltung 40 hergestellt wird. Die Elektroden können mit chemischer Gasphasenabscheidung (auch CVD oder Chemical-Vapor-Deposition-Prozess genannt) auf dem Piezomaterial aufgebracht werden. Alternativ können die Elektroden mit Sputtering oder mit einem galvanischen Verfahren aufgebracht werden.

[0129] Bei einem erfindungsgemässen Uhrwerk können sämtliche für mechanische Uhren schon bekannten Komplikationen wie automatischer Aufzug, Datum, Mondphase, Chronograph usw. realisiert werden. Der Unterschied zum herkömmlichen mechanischen Uhrwerk ist nur in der Realisierung der Regelung. Alle anderen Bauteile sind zu einer mechanischen Uhr identisch.

[0130] Das erfindungsgemässe Uhrwerk kann so konstruiert werden, dass der Endkunde wählen kann, ob er eine konventionelle, mechanische Unruh haben will, oder eine zusätzlich noch elektronisch geregelte Unruh. In diesem Fall werden die Unruh und die Spiralfeder des erfindungsgemässen Uhrwerks anders gestaltet sein, Anker, Ankerrad können gleich bleiben, obwohl diese eventuell auch verändert werden. Die Lagerstellen sind dagegen dieselben. Die Elektronik kann beispielsweise in der Unruhbrücke integriert werden. So ist sichergestellt, dass die Platine des Uhrwerks für beide Arten von Uhren, sei es rein mechanisch oder noch zusätzlich elektronisch geregelt, dieselbe ist. Auf diese Weise wird sich eine höhere Wertschöpfung bei gleichem Kapitaleinsatz generieren lassen.

Zusammenführen von Unruh und Piezospiralfeder

[0131] Da sie getrennt hergestellt werden, müssen Unruh und Spiralfeder aneinander angepasst werden. Es ist sehr wichtig, Spirale und Unruh präzise herzustellen, damit das Trägheitsmoment der Unruh und das Moment der Spiralfeder aufeinander abgestimmt werden können.

[0132] Diese Methode besteht darin, eine Unruh mit der passenden Spiralfeder zusammenzuführen. Die Unruhn, bereits ausgewuchtet, werden in mehreren, zum Beispiel zwanzig, Klassen entsprechend ihrem Trägheitsmoment eingeteilt.

[0133] Die Piezospiralfedern werden auch anhand ihres jeweiligen Momentes ebenfalls in mehrere, zum Beispiel zwanzig, Klassen eingeteilt.

[0134] Die derart eingeteilten Unruhn und Spiralfedern können einander nun ihren Klassen entsprechend zugeordnet werden.

[0135] Da die Schwingfrequenz der Unruh mit Hilfe der Regelelektronik in einem Bereich von ca. 1% verändert werden kann, ist es bei der sorgfältigen Vermessung von Unruh und Piezospiralfeder und der anschliessenden Montage möglich, die genaue Schwingfrequenz der Unruh nur mit der kleinen Hilfeelektronik zu regeln. Der Uhrmacher hat also im Idealfall mit der Reglage nichts mehr zu tun.

[0136] Es ist auch sinnvoll, nicht nur die mechanischen Eigenschaften der Piezospiralfeder zu vermessen, sondern auch die elektrischen Eigenschaften wie beispielsweise die induzierte Spannung in Abhängigkeit von der Amplitude der Unruh,

den inneren Widerstand der Piezospiralfeder und die elektrische Kapazität der Piezospiralfeder. So können mechanisch einwandfreie, elektrisch aber defekte Spiralfedern aussortiert werden.

Patentansprüche

1. Regelorgan für ein Uhrwerk, mit folgenden Komponenten:
eine Unruh;
eine piezoelektrische Spiralfeder (20);
eine elektronische Schaltung (40) mit digitalen Komponenten zur Anpassung der Steifigkeit der piezoelektrischen Spiralfeder (20);
wobei die elektronische Schaltung (40) einen Gleichrichter (23) und eine Schaltung (221, 223, 225, 227, 2, 3, 4) zur Anpassung einer parallel zur benannten Spiralfeder geschalteten Impedanz (22) umfasst,
wobei der benannte Gleichrichter und/oder die benannte Schaltung (221, 223, 225, 227, 2, 3, 4) Transistoren (230', 231', 232', 233'; 221, 223, 225, 227) umfasst, die mit einer höheren Spannung (V_{dc}) als mindestens gewisse benannte digitale Komponenten der elektronischen Schaltung angesteuert werden.
2. Regelorgan gemäss Anspruch 1, mit mindestens einem ersten Level-Shifter (9), um die Spannung zu erhöhen, mit welcher ein oder mehrere der Transistoren (221, 223, 225, 227) für die benannte Impedanzanpassung angesteuert werden.
3. Regelorgan gemäss Anspruch 2, mit einer Mehrzahl von individuell einschaltbaren (222, 224, 226, 228) Kapazitäten, wobei jede Kapazität (222, 224, 226, 228) individuell über einen der Transistoren (221, 223, 225, 227) geschaltet wird, wobei jeder der benannten Transistoren (221, 223, 225, 227) der Kapazitäten (222, 224, 226, 228) mit der höheren Spannung (V_{dc}) angesteuert wird.
4. Regelorgan gemäss einem der Ansprüche 1 bis 3, mit mindestens einem zweiten Level-Shifter (10), um die Spannung zu erhöhen, mit welcher ein oder mehrere Transistoren (230', 231', 232', 233') im benannten Gleichrichter (23) angesteuert werden.
5. Regelorgan gemäss einem der Ansprüche 1 bis 3, in welchem der Gleichrichter (23) Komparatoren (13, 14) umfasst, die mit der benannten höheren Spannung (V_{dc}) gespeist werden.
6. Regelorgan gemäss Anspruch 5, in welchem die benannten Komparatoren (13, 14) die Transistoren (230', 231', 232', 233') im Gleichrichter (23) direkt ansteuern.
7. Regelorgan gemäss einem der Ansprüche 1 bis 6, mit einer ersten Kapazität (24) am Ausgang des benannten Gleichrichters, und einer zweiten Kapazität (26), die über einen Schalter (25) parallel mit der ersten Kapazität derart verbunden ist, dass die Spannung (V_{dd}) an der zweiten Kapazität (26) kleiner als die Spannung (V_{dc}) an der ersten Kapazität (24) ist, wobei der Schalter (25) derart gesteuert wird, dass die Spannung (V_{dd}) an der zweiten Kapazität (26) in einem vorbestimmten Bereich liegt,
wobei die erste Spannung (V_{dc}) zur Steuerung der Transistoren (230', 231', 232', 233'; 221, 223, 225, 227) im benannten Gleichrichter (23) und/oder in der benannten Schaltung (221, 223, 225, 227, 2, 3, 42) verwendet wird,
wobei die zweite Spannung (V_{dd}) zur Speisung von mindestens gewissen benannten digitalen Komponenten der elektronischen Schaltung (40) verwendet wird.
8. Regelorgan gemäss Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der benannte Schalter (25), der die erste Kapazität mit der zweiten Kapazität verbindet, selber mit einer erhöhten Spannung gesteuert wird.
9. Regelorgan gemäss einem der Ansprüche 1 bis 8, gekennzeichnet durch ein Power-on-Reset-System, um ein sicheres Anlaufen des Regelorgans zu gewährleisten.
10. Regelorgan gemäss Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass ein Quarzoszillator zur Anpassung der parallel zur benannten Spiralfeder geschalteten Impedanz (22) erst gestartet wird, wenn eine Kapazität nach dem Anlaufen auf eine gewisse Mindestspannung aufgeladen ist.
11. Regelorgan gemäss einem der Ansprüche 1 bis 10, gekennzeichnet durch eine flexible Leiterplatte, um die piezoelektrische Spiralfeder (20) mit der elektronischen Schaltung (40) zu verbinden.
12. Regelorgan gemäss einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass eine Kapazität (21) parallel mit der piezoelektrischen Spiralfeder (20) permanent verbunden ist, damit die Ausgangsspannung der piezoelektrischen Spiralfeder (20) in einem vorbestimmten Bereich liegt.
13. Regelorgan gemäss einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die von der Spiralfeder (20) induzierte Spannung mit einem Gleichrichter (23) gleichgerichtet wird, dass der benannte Gleichrichter Dioden umfasst, die nach dem Anlaufen durch Schalter (230' bis 233') ersetzt werden, und dass die Steuerspannung der benannten Schalter des Gleichrichters ungefähr gleich wie die gleichgerichtete Spannung ist.

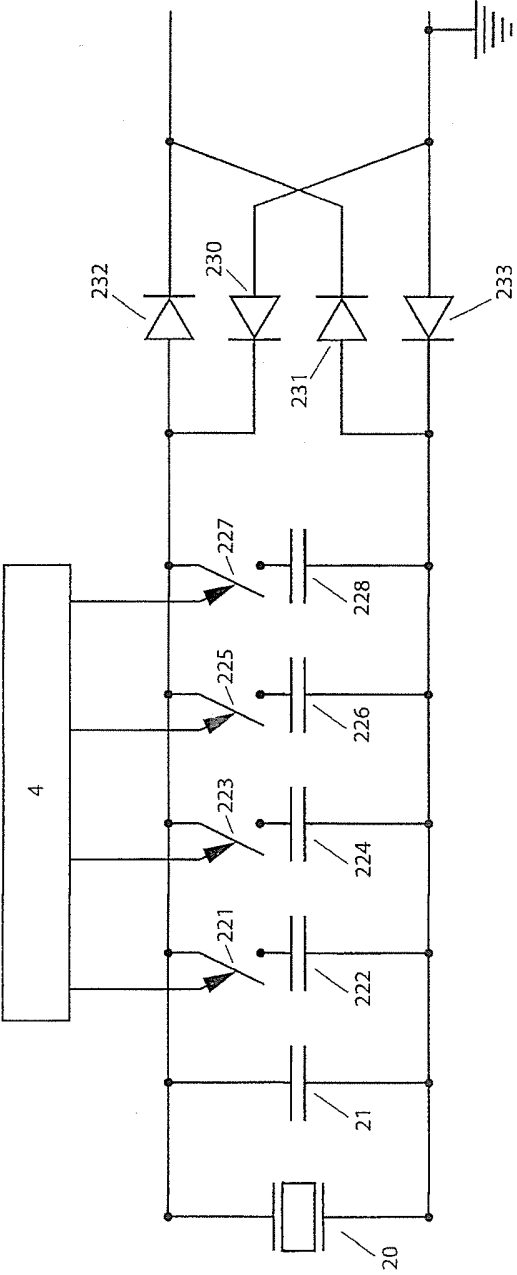


FIG 1

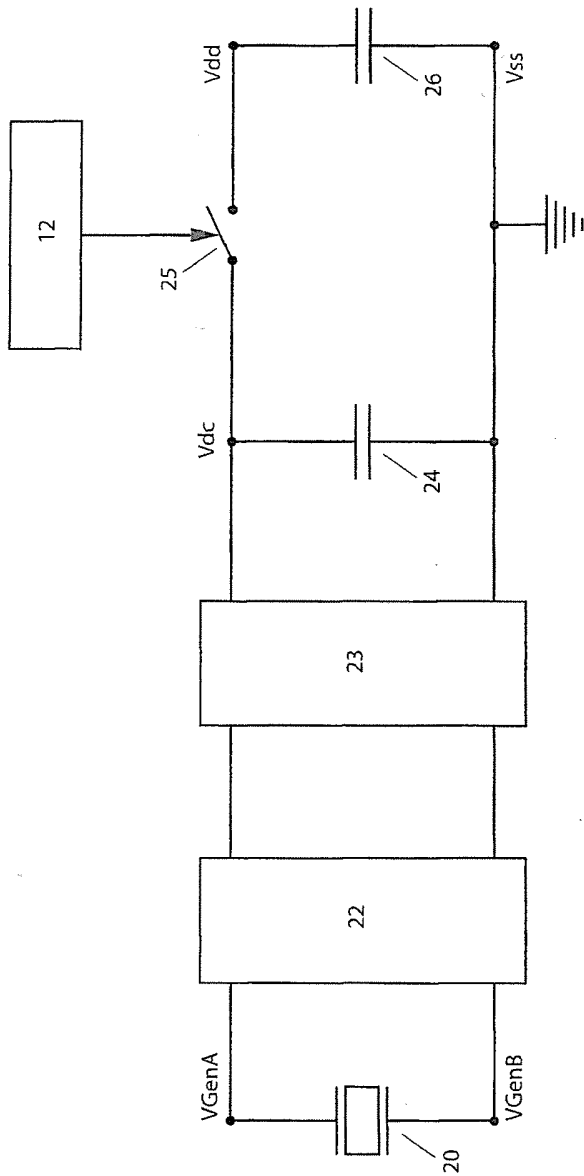


FIG 2

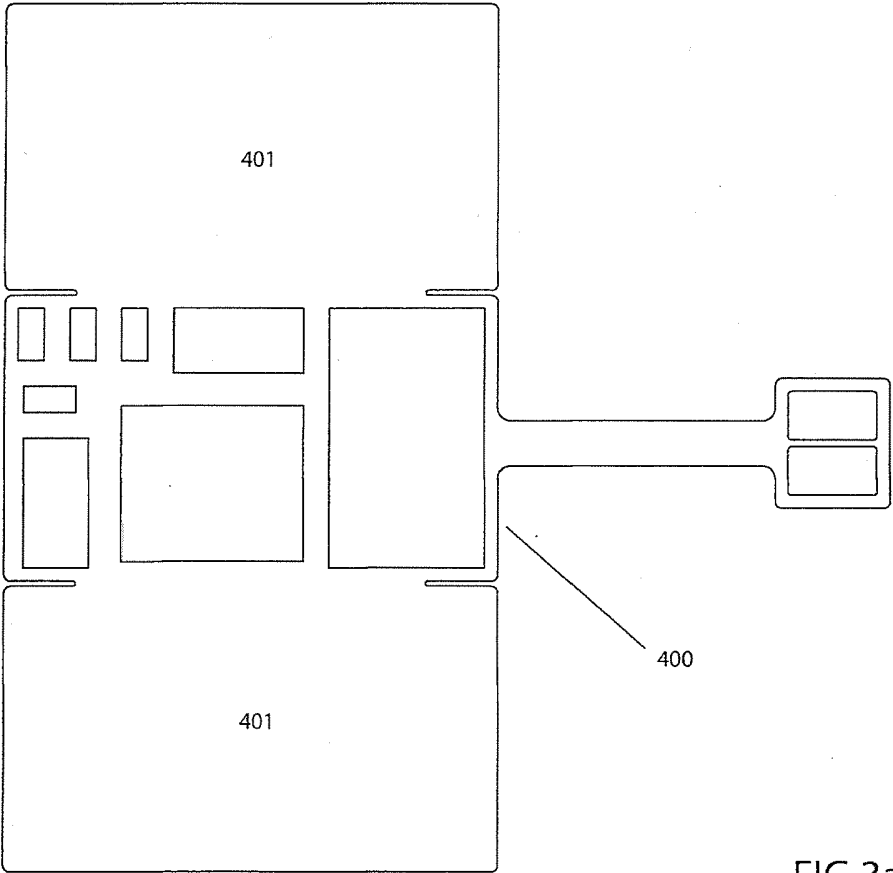


FIG 3a

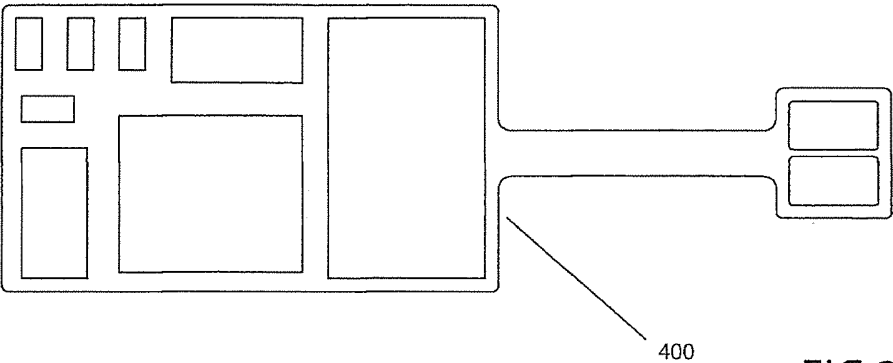


FIG 3b

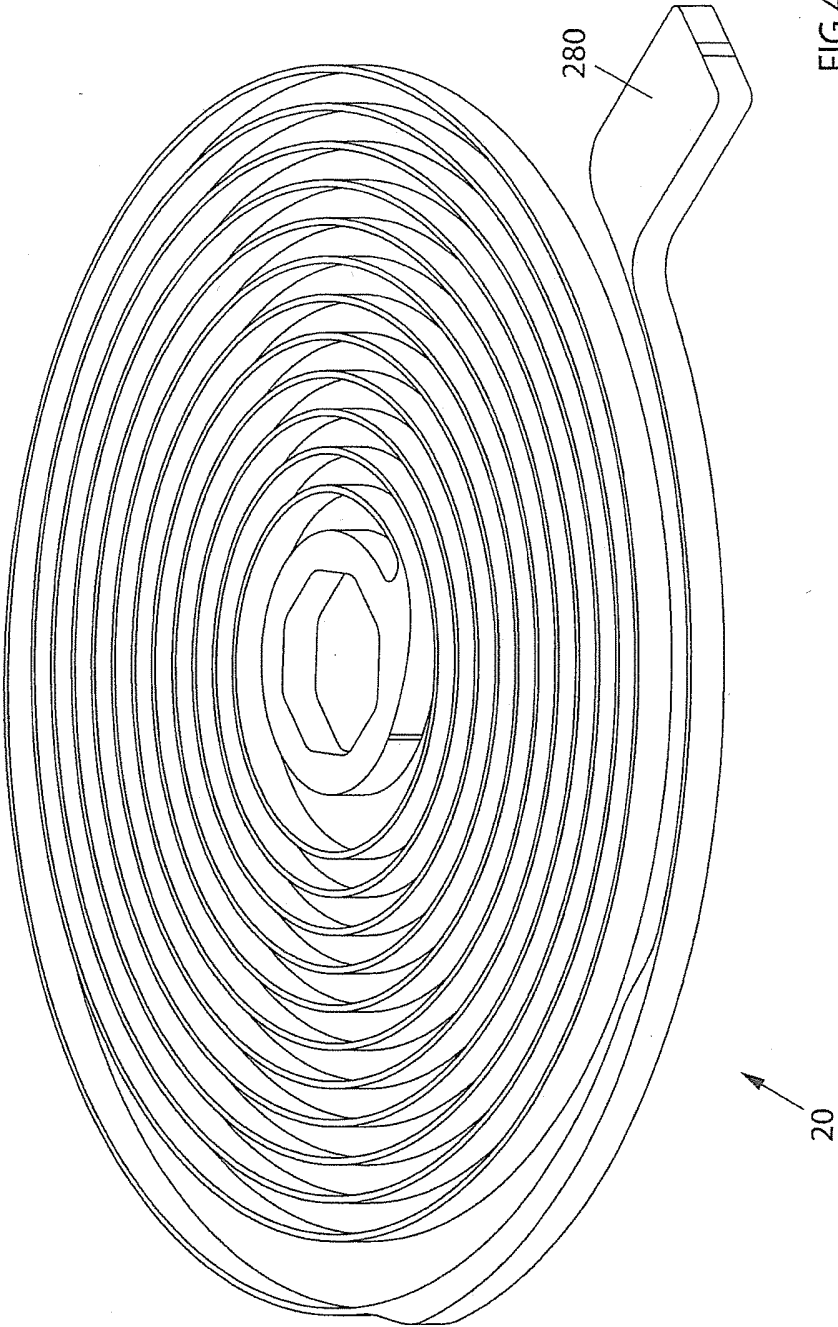


FIG 5a

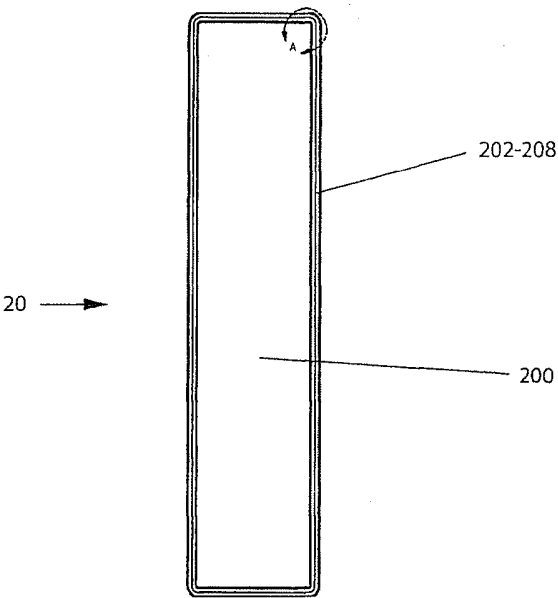
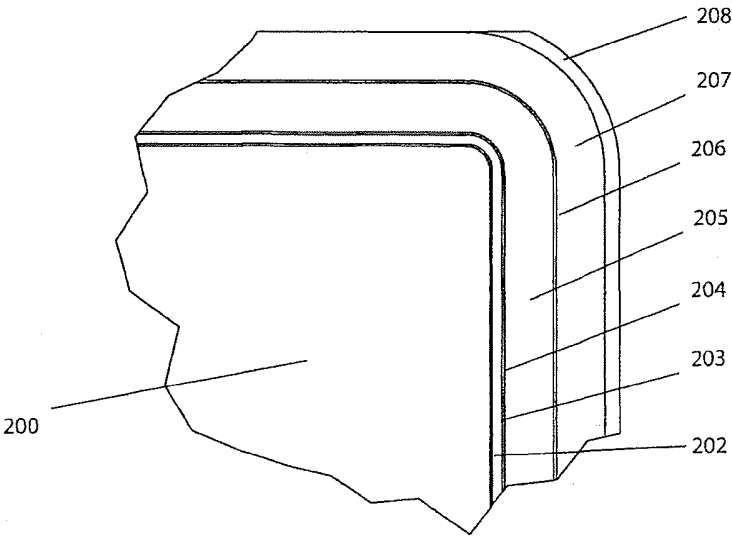


FIG 5b



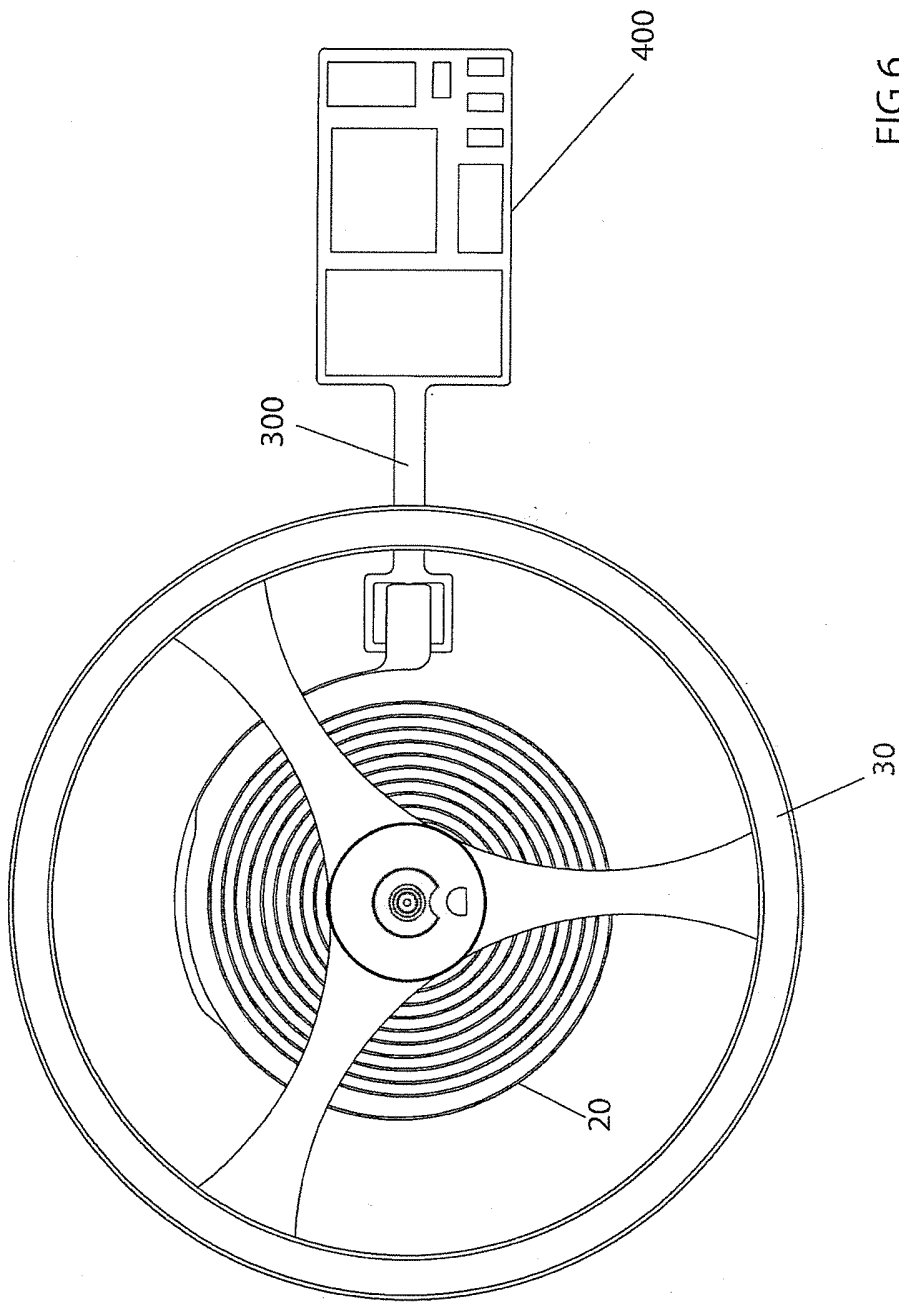


FIG 6

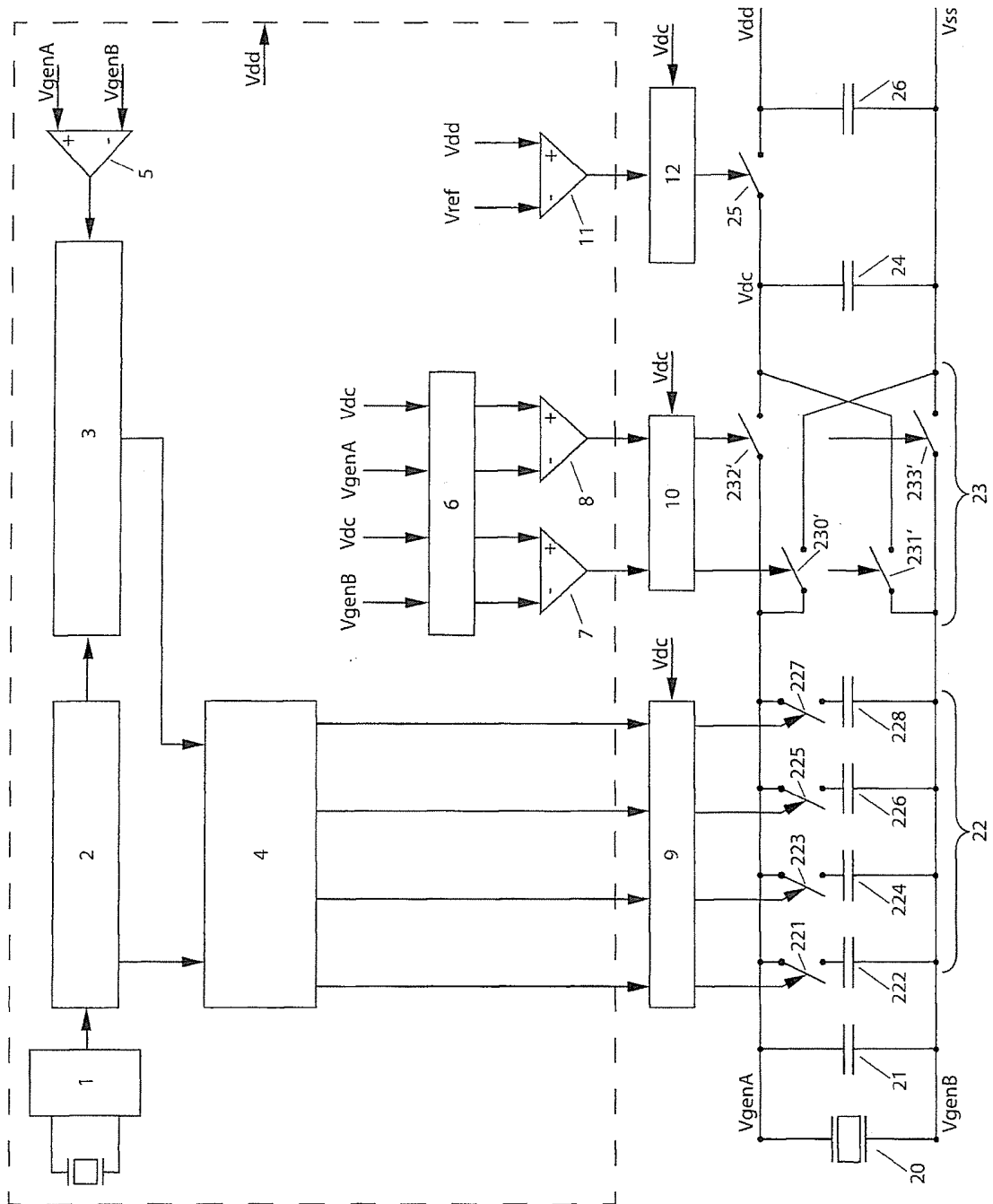


FIG 7

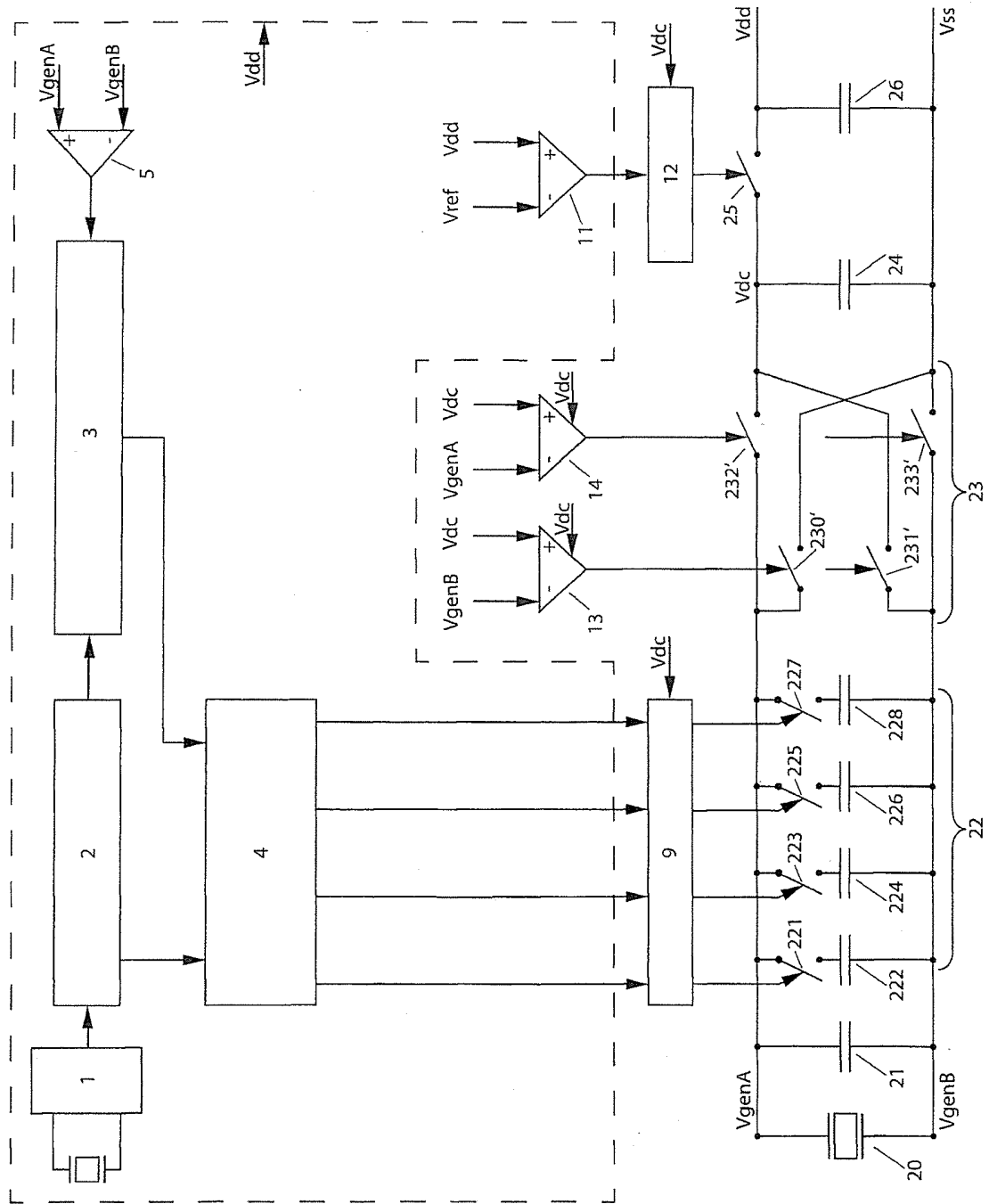


FIG 8