(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) EP 1 526 503 A2

(12) EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
27.04.2005 Patentblatt 2005/17

(51) Int Cl.[7]: **G10K 9/12**, G10K 15/04, B06B 1/02

(21) Anmeldenummer: **04022727.4**

(22) Anmeldetag: **23.09.2004**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LI LU MC NL PL PT RO SE SI SK TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL HR LT LV MK

(30) Priorität: **23.10.2003 DE 10349461**

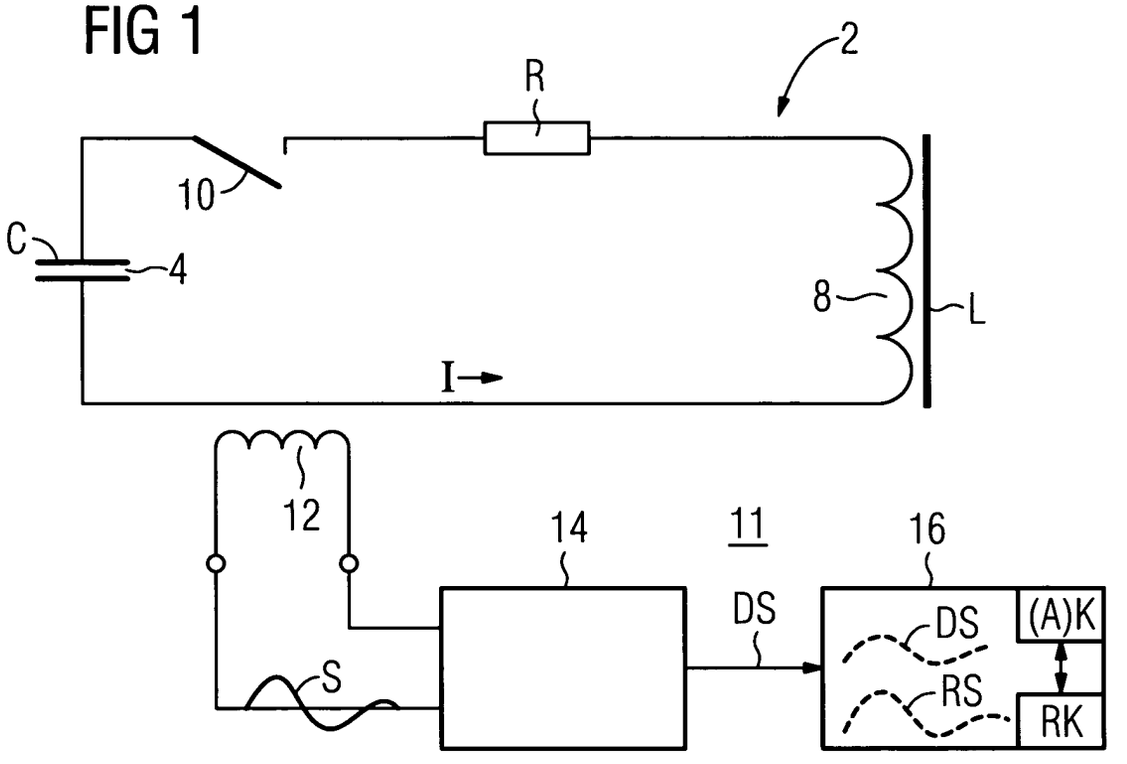
(71) Anmelder: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**
80333 München (DE)

(72) Erfinder:
- **Haumann, Hans-Jürgen**
  91054 Erlangen (DE)
- **Meinert, Christian**
  91080 Marloffstein (DE)
- **Rohwedder, Arnim**
  90766 Fürth (DE)

(54) Verfahren zum Betreiben einer elektromagnetischen Stosswellenquelle und nach diesem Verfahren betriebene elektromagnetische Stosswellenquelle

(57) Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Betreiben einer elektromagnetischen Stoßwellenquelle (2) sowie auf eine nach diesem Verfahren betriebene elektromagnetische Stoßwellenquelle (2), bei der eine akustische Stoßwelle durch Entladung eines Ladekondensators (4) über eine Spule (8) erzeugt wird. Gemäß der Erfindung wird zum Überprüfen des Zustandes der Stoßwellenquelle (2) während einer Entladung der elektrische Entladevorgang erfasst und ausgewertet.

FIG 1



EP 1 526 503 A2

Beschreibung

[0001] Verfahren zum Betreiben einer elektromagnetischen Stoßwellenquelle und nach diesem Verfahren betriebene elektromagnetische Stoßwellenquelle

[0002] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Betreiben einer elektromagnetischen Stoßwellenquelle. Außerdem bezieht sich die Erfindung auf eine nach diesem Verfahren betriebene elektromagnetische Stoßwellenquelle.

[0003] Eine elektromagnetische Stoßwellenquelle, wie sie beispielsweise aus der DE 41 25 375 C1 bekannt ist, wird beispielsweise bei der extrakorporalen Lithotripsie, insbesondere bei der Zertrümmerung von Konkrementen im Inneren einer Niere, eingesetzt. Bei einer solchen elektromagnetischen Stoßwellenquelle wird die Stoßwelle dadurch erzeugt, dass ein Hochspannungskondensator schlagartig über eine Flachspule entladen wird, vor der als Sekundärspule eine metallische Membran, in der Regel eine Aluminiummembran, angeordnet ist. Flachspule und metallische Membran sind durch eine zwischengelegte Isolierfolie voneinander elektrisch isoliert. Durch die gegenseitige magnetische Abstoßung der beiden Spulen wird die Membran stoßartig bewegt und erzeugt in einem angrenzenden Koppelmedium eine ebene Stoßwelle, die mit einer akustischen Linse in einen Fokus gebündelt wird.

[0004] Eine solche Stoßwellenquelle unterliegt aufgrund der hohen mechanischen und elektrischen Belastung einem Verschleiß, der zu einer fortschreitenden Verschlechterung der Qualität der Stoßwelle führen kann. Diese Verschlechterung ist vom Anwender nicht unmittelbar erkennbar und kann ein unzureichendes Therapieergebnis zur Folge haben. Darüber hinaus kann es auch zu einem Totalausfall der Stoßwellenquelle zu einem nicht vorhersehbaren Zeitpunkt kommen.

[0005] Der Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Betreiben einer Stoßwellenquelle anzugeben, mit dem eine Verschlechterung ihrer Eigenschaften infolge eines Verschleißes oder eines anderen Defektes einfach erkannt werden kann. Außerdem liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine nach diesem Verfahren betriebene elektromagnetische Stoßwellenquelle anzugeben.

[0006] Bezüglich des Verfahrens wird die Aufgabe gemäß der Erfindung gelöst mit einem Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1. Bei dem Verfahren zum Betreiben einer elektromagnetischen Stoßwellenquelle, die eine akustische Stoßwelle durch Entladung eines Ladekondensators über eine Spule erzeugt, wird zum Überprüfen des Zustandes der Stoßwellenquelle während einer Entladung der elektrische Entladevorgang erfasst und ausgewertet.

[0007] Die Erfindung beruht dabei auf der Überlegung, dass der Entladevorgang, d. h. der zeitliche Ablauf der Entladung, die Eigenschaften der Stoßwellenquelle widerspiegelt, so dass dessen Auswertung eine Aussage über deren Zustand ermöglicht.

[0008] Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens gemäß der Erfindung besteht darin, dass es problemlos während jeder Benutzung der Stoßwellenquelle durchgeführt werden kann, so dass eine praktisch permanente Überwachung möglich ist.

[0009] Vorzugsweise wird während einer Entladung zumindest eine Kenngröße des Entladevorgangs ermittelt und mit einem gespeicherten Referenzwert verglichen. Aus dem Ergebnis dieses Vergleiches, d. h. einer Abweichung zwischen der ermittelten Kenngröße und dem gespeicherten Referenzwert kann dann auf den Zustand der Stoßwellenquelle geschlossen werden.

[0010] In einer vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens werden aus dieser zumindest einen ermittelten Kenngröße des Entladevorgangs zumindest eine Kenngröße des Entladestromkreises abgeleitet und die abgeleitete Kenngröße mit einem gespeicherten Referenzwert verglichen. Diese Maßnahme ermöglicht eine unmittelbare Aussage über die Eigenschaften der Stoßwellenquelle, da diese durch die Kenngrößen des die Stoßwellenquelle bildenden Entladestromkreises bestimmt sind.

[0011] Insbesondere wird als Kenngröße des Entladevorganges dessen Periodendauer gemessen. Diese ist einfach zu messen, und deren Abweichung von einem gespeicherten Referenzwert ist ein signifikantes Indiz für eine verschleißbedingte Änderung der Eigenschaften der Stoßwellenquelle.

[0012] In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird als abgeleitete Kenngröße des Entladestromkreises dessen Induktivität ermittelt. Diese hat eine besonders hohe Aussagekraft hinsichtlich des Zustandes der Stoßwellenquelle.

[0013] In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung werden als weitere Kenngrößen des Entladevorganges die Amplituden einer Schwingungsperiode ermittelt. Auch diese können mit einer einfachen elektronischen Schaltung unmittelbar gemessen werden und erlauben verlässliche Aussagen über den Zustand der Stoßwellenquelle. Sie ermöglichen insbesondere in Verbindung mit der ermittelten Periodendauer die genaue Berechnung der Induktivität, der Kapazität und des ohmschen Widerstand und damit aller relevanten elektrischen Kenngrößen des Entladestromkreises.

[0014] Eine Erhöhung der Genauigkeit bei der Überprüfung des Zustandes der Stoßwellenquelle wird vorzugsweise dadurch erzielt, dass aus einer Mehrzahl von ermittelten oder abgeleiteten Kenngrößen jeweils eine statistische Kenn-

größe gebildet wird. Durch eine mittels einer statistischen Auswertung gewonnene statistische Kenngröße, beispielsweise ein arithmetischer Mittelwert, werden statistische Schwankungen bei der Messung ausgeglichen.

[0015] In einer vorteilhaften Ausgestaltung wird der gespeicherte Referenzwert als gemessene oder abgeleitete Kenngröße bei der erstmaligen Inbetriebnahme ermittelt. Dadurch sind die Abweichungen der nachfolgend gemessenen oder ermittelten Kenngröße nur durch Veränderung des Zustandes der Stoßwellenquelle, beispielsweise durch Verschleiß, verursacht. Fertigungsbedingte Streuungen haben damit keinen Einfluss.

[0016] Insbesondere wird zur Ermittlung der Kenngröße des Entladevorganges die Entladespannung über dem Ladekondensator erfasst. Dies ist schaltungstechnisch besonders einfach durch eine dem Ladekondensator parallel geschaltete Spannungsteilerschaltung zu realisieren.

[0017] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform wird zur Messung oder Ermittlung der Kenngröße des Entladevorganges der Entladestrom gemessen. Dies erfolgt vorzugsweise berührungslos, so dass der Aufbau der hierzu erforderlichen Schaltungen vereinfacht ist, da diese vom Potential des Hochspannungskreises der Stoßwellenquelle getrennt sind.

[0018] Bezüglich der Stoßwellenquelle wird die Aufgabe gelöst mit einer Stoßwellenquelle mit den Merkmalen des Patentanspruches 12, deren Vorteile sich ebenso wie die Vorteile der ihm untergeordneten Patentansprüche sinngemäß aus den Vorteilen der ihnen jeweils zugeordneten Verfahrensansprüche ergeben.

[0019] Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird auf die Ausführungsbeispiele der Zeichnung verwiesen. Es zeigen:

Fig. 1 eine Stoßwellenquelle gemäß der Erfindung in einem Prinzipschaltbild,

Fig. 2 ein Diagramm, in dem der Entladestrom gegen die Zeit aufgetragen ist,

Fig. 3 eine weitere Ausführungsform einer Stoßwellenquelle gemäß der Erfindung ebenfalls in einem Prinzipschaltbild,

Fig. 4 ein Ausführungsbeispiel einer Auswerteeinrichtung wie sie in Fig. 3 Verwendung findet,

Fig. 5 ein Ablaufdiagramm, zur Erläuterung der Funktionsweise der Auswerteeinrichtung gemäß Fig. 4,

Fig. 6 eine besonders einfache Ausführungsform einer für eine Stoßwellenquelle gemäß der Erfindung geeigneten Auswerteeinrichtung,

Fig. 7 eine alternative Stoßwellenquelle gemäß der Erfindung ebenfalls in einem Prinzipschaltbild,

Fig. 8 ein Diagramm, in dem die Entladespannung gegen die Zeit aufgetragen ist,

Fig. 9 eine Ausführungsform einer Vergleichseinrichtung, wie sie im Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 7 Verwendung findet, und

Fig. 10 ein Ablaufdiagramm zur Erläuterung der Funktionsweise der in Fig. 9 dargestellten Vergleichseinrichtung.

[0020] In Fig. 1 ist der Entladestromkreis einer elektromagnetischen Stoßwellenquelle 2 in einem elektrischen Ersatzschaltbild durch die Reihenschaltung einer Kapazität C, eines ohmschen Widerstandes R und einer Induktivität L wiedergegeben. Die Kapazität C ist im wesentlichen durch die Kapazität eines Ladekondensators 4 bestimmt, dem eine Spule 8 parallelgeschaltet ist. Die Induktivität L des Entladestromkreises ist im wesentlichen bestimmt durch die Induktivität des aus der Spule 8 (in der Regel eine Flachspule) und einer dieser gegenüberliegenden Membran 6 gebildeten Aktuators, wie er beispielsweise in der DE 41 25 375 C1 näher beschrieben ist. Der ohmsche Widerstand R berücksichtigt sowohl den ohmschen Widerstand der Hochspannungskabel als auch den der Flachspule 8 und den induzierten Widerstand der Membran 6.

[0021] Durch Schließen eines Schalters 10 wird der Ladekondensator 4 entladen und der im Entladestromkreis fließende Entladestrom I klingt in einer gedämpften periodischen Schwingung ab, bis sich der Ladekondensator 4 vollständig entladen hat. Der Entladevorgang wird mit einer Einrichtung 11 erfasst und ausgewertet. Diese enthält als Messwertaufnehmer eine galvanisch entkoppelte, d.h. vom Hochspannungspotential des Entladestromkreises getrennte Rogowski-Spule 12, die ein dem Entladestrom I proportionales elektrisches Messsignal S, im Ausführungsbeispiel die in der Rogowski-Spule 12 induzierte Spannung, bereitstellt. Dieses Messsignal S wird einem Analog/Digitalwandler 14 zugeführt und als digitalisiertes Messsignal DS an eine Auswerteeinrichtung 16, im Beispiel ein Computer, weitergeleitet. Dort wird das digitalisierte Messsignal DS entweder unmittelbar punktweise mit den Referenzwerten

einer gespeicherten Reverenzkurve RS verglichen oder alternativ hierzu einer vorhergehenden Auswertung unterzogen, bei der eine oder mehrere Kenngrößen K des Signalverlaufes des den Entladevorgang wiedergebenden Messsignals DS, beispielsweise die Periodendauer T der gedämpften Schwingung, ermittelt werden, die anschließend mit einem dazu jeweils korrespondierenden gespeicherten Referenzwert RK verglichen werden. Die Abweichung der Messsignale DS oder der Kenngröße K vom gespeicherten Referenzsignal RS bzw. vom Referenzwert RK ist dann ein Maß für den Verschleißzustand der Stoßwellenquelle 2.

[0022] Die zum Vergleich herangezogene digitalisierte Messsignal DS bzw. die Kenngröße K werden durch eine gleitende Mittelwertbildung über mehrere aufeinanderfolgende Entladevorgänge von statistischen Schwankungen befreit. Da die Komponenten des Entladestromkreises (Ladekondensator, Hochspannungskabel und eigentlicher Stoßwellenkopf (Aktuator)) Exemplarstreuungen aufweisen können, wird bei Inbetriebnahme einer neuen Anlage oder bei Tausch einer der Komponenten vor Ort ein Anlernvorgang durchgeführt. Dabei werden das Messsignal DS bzw. die Kenngröße K durch Messung eines oder mehrerer Entladevorgänge in einem Initialisierungs- oder Anlernmodus für diese spezielle Konfiguration erfasst und als Referenzsignal RS bzw. Referenzwert RK gespeichert.

[0023] In Fig. 2 ist der Entladestrom I gegen die Zeit t aufgetragen. Nach dem Schließen des Schalters 10 verläuft die Entladung in Form einer gedämpften Schwingung. Aus dem Kurvenverlauf des dem Entladestrom I proportionalen Messsignals S oder DS werden Kenngrößen K entweder durch Auswertung der digitalen Daten oder durch unmittelbare Messung ermittelt, die signifikant für den Entladevorgang und damit für den Zustand der Stoßwellenquelle sind. Dies sind beispielsweise die Anstiegsgeschwindigkeit $(I_2 - I_1)/\Delta t$, die Dauer T der ersten Periode und die erste und zweite Amplitude I_{max} bzw. Imin des Stromes I. Diese können in der Auswerteeinrichtung 16 (Fig. 1) unmittelbar mit entsprechenden gespeicherten Referenz- oder Sollwerten verglichen werden.

[0024] Im Ausführungsbeispiel erfolgt kein derartiger unmittelbarer Vergleich sondern es werden in der Auswerteinrichtung 16 aus den Kenngrößen K abgeleitete Kenngrößen AK = R,C,L berechnet, die unmittelbar die elektrische Größe (ohmscher Widerstand, Kapazität, Induktivität) der Komponenten des Ersatzschaltbildes angeben. Hierzu ist in der Auswerteeinrichtung 16 der folgende Algorithmus implementiert:

Induktivität

$$L = \frac{U_0}{I_{max} \cdot \omega_0} \cdot \exp\left(-\delta \cdot \frac{\arctan\left(\frac{\omega}{\delta}\right)}{\omega} \right)$$

Kapazität

$$C = \frac{1}{L \cdot \omega_0^{\,2}}$$

Ohmscher Widerstand

$$R = 2 \cdot \delta \cdot L$$

mit den Parametern

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

$$\delta = -\ln \cdot \left(\frac{-I_{min}}{I_{max}} \right) \cdot \frac{\omega}{\pi}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \delta^2}$$

[0025] Dabei ist U_0 die Ladespannung des Ladekondensators 4, die für jeden Entladevorgang bekannt ist.

[0026] Diese abgeleiteten Kenngrößen AK = L, C, R werden mit den jeweils zugehörigen gespeicherten Referenzwerten RK verglichen. Wesentlich für eine solche Zustandsüberwachung ist dabei nicht die absolute Genauigkeit, mit der der berechnete Wert für die Induktivität L mit dem wahren Wert der Induktivität des Entladestromkreises übereinstimmt, sondern die Reproduzierbarkeit dieses berechneten Wertes.

[0027] Die größte Aussagekraft für den Zustand des Stoßwellenkopfes hat die Induktivität L. Wenn die Werte von C

und R vereinfachend als bekannt und konstant angesehen werden können, genügt die Messung der Periodendauer T, um daraus L zu berechnen.

[0028] Im Ausführungsbeispiel der Fig. 3 ist der Rogowski-Spule 12 eine Signalverarbeitungseinheit 20 nachgeschaltet, die aus dem von der Rogowskispule 12 bereitgestellten Messsignal S unmittelbar, d. h. ohne vorherige Analog/Digitalwandlung und ohne Zuhilfenahme eines Rechners, die zur Berechnung gemäß vorstehenden Algorithmus erforderlichen Kenngrößen K = I_{max}, I_{min}, und T ermittelt und als analoge oder digitale Signale bereitstellt. Diese gemessenen Kenngrößen K werden einer Auswerteeinrichtung 22 zugeführt, die in einer Analog/Digitalwandlerstufe 22a die analogen Signale in digitale Signale umwandelt und in einer Rechenstufe 22b aus diesen gemessenen Kenngrößen abgeleitete Kenngrößen AK = L,R,C berechnet. Diese werden in einer Vergleichseinrichtung 22c mit gespeicherten Referenzwerten RK verglichen.

[0029] Gemäß Fig. 4 wird in der Signalverarbeitungseinheit 20 das von der Rogowski-Spule 12 bereitgestellte und als Spannung U anliegende Messsignal S mit Hilfe eines ersten Operationsverstärkers 102 und eines zweiten Operationsverstärkers 104 invertiert (-U_v) bzw. nicht-invertiert (U_v) verstärkt und niederohmig jeweils an Sample-and-Hold-Schaltungen 106 bzw. 108 weitergegeben. Diese speichern den Maximalwert der zweiten (Minimum -$U_{v,min}$~ Imin des Entladestroms) bzw. ersten Halbwelle (Maximum $U_{v,max}$~ I_{max} des Entladestroms) .

[0030] Ein erster Komparator 112 mit einer Referenzspannung von 0 V detektiert die Nulldurchgänge des nichtinvertierten verstärkten Messsignals U_v und ist mit seinem Ausgang an eine Ablaufsteuerschaltung 110 angeschlossen. Da die erste Flanke der Entladekurve erfahrungsgemäß mit Störungen belegt ist, wird im Ausführungsbeispiel zur Bestimmung der Periodendauer T der zweite und vierte Nulldurchgang der Kurve herangezogen. Ein zweiter, mit seinem Ausgang ebenfalls an die Ablaufsteuerschaltung 110 angeschlossener Komparator 114 mit einer deutlich von 0 verschiedenen Referenzspannung U_T setzt die Ablaufsteuerschaltung 110 erst dann in Gang, wenn mit Sicherheit eine Entladung stattfindet.

[0031] Die Periodendauer T wird mit einem Zähler 116 ermittelt, dessen Start- und Stopeingang an Steuerausgänge der Ablaufsteuerschaltung 110 angeschlossen ist. Beim zweiten Nulldurchgang der Entladekurve (von positiven Werten zu negativen) wird der Zähler 116 gestartet, beim vierten Nulldurchgang (in der gleichen Orientierung) wieder gestoppt. Der Zählerstand ist somit ein Maß für die Periodendauer T. Alternativ kann statt eines Zählers auch ein analog aufgebauter Integrator verwendet werden, der die gemessene Zeitdauer als Spannungswert zur Verfügung stellt.

[0032] Um sicherzustellen dass die Sample-and-Hold-Schaltungen 106 und 108 nur die Maxima in einem definierten Zeitabschnitt bestimmen, werden diese durch von der Ablaufsteuerschaltung 110 bereitgestellte Freigabesignale EN1 bzw. EN2 nur in diesen Intervallen freigeschaltet. Prinzipiell ist eine solche Freischaltung nicht erforderlich.

[0033] Nach Bereitstellung der Kenngrößen K = I_{min}, I_{max}, T bleibt die Ablaufsteuerschaltung 110 inaktiv, d. h. gibt keine weiteren Steuersignale aus, bis ein Reset der gesamten Ablaufsteuerschaltung 110 erfolgt. Das Reset-Signal R kann vom Signal "HV-on" abgeleitet werden. Dieses Signal "HV-on" steht in einer Schnittstelle zu einem Ladeteil zur Verfügung, mit dem der Ladekondensator aufgeladen wird. Bei Reset werden die Speicherkondensatoren der Sample-and-Hold-Schaltungen 106 und 108 entladen, der Zähler 116 bzw. Integrator wird auf 0 gesetzt und die Ablaufsteuerschaltung 110 wird in den Anfangszustand gesetzt.

[0034] Der zeitliche Ablauf der in der Ablaufsteuerschaltung 110 verarbeiteten Signale ist in Figur 5 veranschaulicht und anhand nachfolgender Tabelle erläutert:

Zeitpunkt	Bedingung	Ereignis
t1	HV-on = 1	hält die gesamte Schaltung im Reset-Zustand (R=1)
t2	HV-on = 1 => 0	Die Ablaufsteuerung wird freigegeben. (Aufladung des Ladekondensators 4 beendet, der Puls steht unmittelbar bevor)
t3	$U_v > U_T$	Die Ablaufsteuerung wird gestartet. Die S+H-Schaltung 108 wird freigegeben (EN1=1)
t4	$U_v < U_T$	Die S+H Schaltung 106 wird wieder gesperrt, Der Maximalwert U_{vmax} (proportional dem maximalen Entladestrom I_{max}) ist gespeichert (EN1=0)
t5	$U_v < 0$	Dieser Nulldurchgang startet den Zähler 116, gleichzeitig Freigabe von S+H-Schaltung 108 (EN2=1)
t6	$U_v > 0$	Die S+H-Schaltung 108 wird wieder gesperrt, der Maximalwert dieser Halbwelle (proportional dem minimalen Entladestrom Imin) ist gespeichert (EN2=0)
t7	$U_v < 0$	Dieser Nulldurchgang stoppt den Zähler 116. Der Zählerstand ist proportional zur Periodendauer. Von nun an werden keine weiteren Steuersignale ausgegeben.

[0035] Für U_T wird ein Spannungswert gewählt, der deutlich größer ist als das Rauschen in dem Messsignal, aber mit Sicherheit geringer als das erwartete Maximum bei der kleinsten Energiestufe, z.B. die Hälfte des erwarteten Maximums bei der kleinsten Energiestufe.

[0036] Der Wert der Induktivität L kann auch aus der Anfangssteigung des Messsignals S~I berechnet werden. Hierzu ist nur eine wesentlich vereinfachte Auswerteschaltung mit zwei Komparatoren mit unterschiedlichen Referenzwerten I1 und I2 erforderlich. Diese Komparatoren starten und stoppen eine Zählerschaltung zur Ermittlung der Zeitdauer Δt zwischen diesen beiden Ereignissen. Daraus wird die Anfangssteigung des Messsignales S bzw. des Entladestromes I ermittelt. Diese ist umgekehrt proportional zur Induktivität L ($L = U_0 \Delta t/(I2-I1)$), wenn das Zeitintervall, innerhalb dem die Messung erfolgt, in einem Zeitfenster liegt, dessen obere Grenze sehr viel kleiner als die Periodendauer T ist (siehe hierzu auch Fig. 2).

[0037] Wird der Widerstand R als konstant und bekannt angenommen, genügt zur Berechnung der Induktivität L auch eine Messung des Strommaximums I_{max} und des Maximums $(dI/dt)_{max}$ der zeitlichen Ableitung davon, die durch eine sehr einfache Schaltung gemäß Fig. 6 ermittelt werden können. Das gegebenenfalls verstärkte Messsignal U_v wird hierzu unmittelbar einer ersten Sample-and-Hold-Schaltung 120 und über einen Hochpass 122 einer zweiten Sample-and-Hold-Schaltung 124 zugeführt, an deren Ausgängen dem Strommaximum I_{max} bzw. dem Maximum der zeitlichen Ableitung $(dI/dt)_{max}$ proportionale Messsignale anstehen.

[0038] Ist die Kapazität C des Ladekondensators bekannt und wird der ohmsche Widerstand des Entladestromkreises als konstant angenommen, ist es ausreichend, bei der Entladung das Strommaximum I_{max} zu messen, um Änderungen der Induktivität L zu detektieren. Die Kapazität C des Ladekondensators kann anhand des (bekannten) Ladestroms und des Spannungsanstiegs während der Aufladung ermittelt werden.

[0039] In der alternativen Ausgestaltung gemäß Fig. 7 ist als Messwertaufnehmer ein parallel zum Ladekondensator 4 geschalteter Spannungsteiler 40 vorgesehen, mit dem Ladespannung U über den Ladekondensator 4 erfasst wird. Diese wird in der nachfolgenden Einrichtung 11 weiterverarbeitet, die ebenso wie beim Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1 aus einem Analog/Digitalwandler und einem nachgeschalteten Rechner bestehen kann. Auch in diesem Fall können aus dem Kurvenverlauf des Messsignals S entweder durch Auswertung der digitalen Messwerte oder durch unmittelbare Messung Kenngrößen erfasst werden, die signifikant für den Entladevorgang und damit für den Zustand der Stoßwellenquelle sind.

[0040] Im Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 7 ist analog zum Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 3 eine Signalverarbeitungseinheit 200 vorgesehen, die an ihrem Ausgang als Kenngrößen des Signalverlaufs der Spannung U die Periodendauer T und das erste Minimum U_{min} der Spannung bereitstellt, aus denen in einem Rechner 202 abgeleitete Kenngrößen AK ermittelt werden.

[0041] Im Diagramm gemäß Fig. 8 sind als für den Zustand der Stoßwellenquelle signifikante Kenngrößen der Entladekurve das Maximum und das Minimum U_{max} ($=U_0$ (durch die Hochspannungsquelle vorgegeben)) bzw. U_{min} der Entladespannung und die Periodendauer T eingetragen. Diese Kenngrößen können im Rechner 202 (Fig.7) unmittelbar mit entsprechenden gespeicherten Referenzwerten verglichen werden.

[0042] Auch in diesem Ausführungsbeispiel werden in der Auswerteinrichtung aus den Kenngrößen $K = U_{min}$, T, U_{max} abgeleitete Kenngrößen AK = R,C,L berechnet, die unmittelbar die elektrische Größe (ohmscher Widerstand, Kapazität, Induktivität) der Komponenten des Ersatzschaltbildes angeben. Hierzu ist in der Auswerteeinrichtung der folgende Algorithmus implementiert:

Induktivität

$$L = \frac{1}{C \cdot \omega_0^2}$$

Ohmscher Widerstand

$$R = 2 \cdot \delta \cdot L$$

mit den Parametern

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

$$\delta = -\ln \cdot \left(\frac{-U_{min}}{U_{max}} \right) \cdot \frac{\omega}{\pi}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \delta^2}$$

[0043] Die Aufladung des Ladekondensators 4 erfolgt mit einem konstanten Ladestrom i. Spannung U und Ladestrom i werden gemessen. Aus dem Spannungsanstieg ΔU im Zeitintervall Δt kann die Kapazität C wie folgt berechnet werden:

$$C = i \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U}$$

[0044] Gemäß Fig. 9 wird das Signal vom Spannungsteiler (proportional zur Spannung am Ladekondensator) mit Hilfe eines ersten und eines zweiten Operationsverstärkers 206 bzw. 208 invertiert bzw. nicht-invertiert verstärkt und niederohmig an nachfolgende Verarbeitungsstufen weitergegeben. Das invertierte Signal wird einer Sample-and-Hold-Schaltung 210 zugeführt. Diese speichert den Maximalwert U_{min} der zweiten Halbwelle (Minimum der Spannung). Das nicht-invertierte Signal wird an zwei Komparatoren 212, 214 ausgegeben.

[0045] Der erste Komparator 212 mit einer deutlich von 0 verschiedenen Referenzspannung (U_T) setzt die Ablaufsteuerung erst dann in Gang, wenn mit Sicherheit eine Entladung stattfindet.

[0046] Der zweite Komparator 214(Referenz 0 V) detektiert die Nulldurchgänge des Signals. Die Periodendauer T wird analog zum Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 4 ebenfalls mit einem Zähler 216 ermittelt. Alternativ kann statt eines Zählers auch in diesem Beispiel ein analog aufgebauter Integrator verwendet werden, der die gemessene Zeitdauer als Spannungswert zur Verfügung stellt.

[0047] Um sicherzustellen dass die Sample-and-Hold-Schaltung 210 nur das Maximum in einem definierten Zeitabschnitt bestimmt, wird diese durch von einer Ablaufsteuerschaltung 218 bereitgestellte Freigabesignale nur in diesem Intervall freigeschaltet. Prinzipiell ist eine solche Freischaltung auch hier nicht erforderlich.

[0048] Nach Bereitstellung der Kenngrößen U_{min} und T bleibt die Ablaufsteuerschaltung 218 inaktiv, d. h. gibt keine weiteren Steuersignale aus, bis ein Reset der gesamten Auswerteschaltung 202 erfolgt. Das Reset-Signal wird vom Signal "HV-on" abgeleitet. Dieses Signal "HV-on" ist Bestandteil der vorhandenen Schnittstelle zum Ladeteil, mit dem der Ladekondensator aufgeladen wird. Bei Reset wird der Speicherkondensator der Sample+Hold-Schaltung 210 entladen, der Zähler 216 bzw. Integrator wird auf 0 gesetzt und die Ablaufsteuerschaltung 218 wird in den Anfangszustand gesetzt.

[0049] Der zeitliche Ablauf der in der Ablaufsteuerschaltung 218 verarbeiteten Signale ist in Figur 10 veranschaulicht und anhand nachfolgender Tabelle erläutert:

Zeitpunkt	Bedingung	Folge
t1 < t2	HV-on = 1	hält die gesamte Schaltung im Reset-Zustand (R=1)
t2	HV-on = 1 => 0	Die Ablaufsteuerung wird freigegeben. (Aufladung des Ladekondensators beendet, der Puls steht unmittelbar bevor)
t3	$U < U_T$	Die Ablaufsteuerung wird gestartet.
t4	U < 0	Dieser Nulldurchgang startet den Zähler 216, gleichzeitig Freigabe der S+H-Schaltung 210 (EN=1)
t5	U > 0	Die S+H-Schaltung 210 wird wieder gesperrt, der Maximalwert dieser Halbwelle (proportional dem Spannungsminimum) ist gespeichert.
t6	U < 0	Dieser Nulldurchgang stoppt den Zähler 216. Der Zählerstand ist proportional zur Periodendauer. Von nun an werden keine weiteren Steuersignale ausgegeben.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben einer elektromagnetischen Stoßwellenquelle (2), die eine akustische Stoßwelle durch Entladung eines Ladekondensators (4) über eine Spule (8) erzeugt, bei dem zum Überprüfen des Zustandes der Stoßwellenquelle (2) während einer Entladung der elektrische Entladevorgang erfasst und ausgewertet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zumindest eine Kenngröße (K) des Entladevorganges ermittelt und mit einem gespeicherten Referenzwert (RK) verglichen wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem aus dieser zumindest einen gemessenen Kenngröße (K) des Entladevorgangs zumindest eine Kenngröße (AK) des Entladestromkreises abgeleitet wird, und bei dem die abgeleitete Kenngröße (AK) mit einem gespeicherten Referenzwert (RK) verglichen wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, bei dem als Kenngröße (K) des Entladevorganges die Periodendauer (T) einer Schwingungsperiode ermittelt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem als abgeleitete Kenngröße (AK) die Induktivität (L) des Entladestromkreises ermittelt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als Kenngröße (K) des Entladevorganges die Amplituden einer Schwingungsperiode gemessen werden.

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem als weitere abgeleitete Kenngrößen (AK) des Entladestromkreises dessen Kapazität (C) und ohmscher Widerstand (R) ermittelt werden.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem aus einer Mehrzahl von gemessenen oder abgeleiteten Kenngrößen (K, AK) eine statistische Kenngröße gebildet wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der gespeicherte Referenzwert (RK) als gemessene oder abgeleitete Kenngröße (K, AK) bei der erstmaligen Inbetriebnahme ermittelt wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Entladevorgang durch Messung des Entladestroms (I) erfasst wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Entladevorgang durch Messung der Entladespannung (U) über dem Ladekondensator (4) erfasst wird.

12. Elektromagnetische Stoßwellenquelle (2), bei der eine akustische Stoßwelle durch Entladung eines Ladekondensators (4) über eine Spule (8) erzeugt wird, mit einer Einrichtung (11) zum Erfassen und Auswerten des elektrischen Entladevorganges für die Überprüfung des Zustandes der Stoßwellenquelle (2).

13. Elektromagnetische Stoßwellenquelle (2) nach Anspruch 12, mit einer Einrichtung (16;20;202) zum Ermitteln zumindest einer Kenngröße (K) des Entladevorganges und mit einer Auswerteeinrichtung (16;22;204) zum Vergleichen der erfassten Kenngröße (K) mit einem gespeicherten Referenzwert (RW).

14. Elektromagnetische Stoßwellenquelle (2) nach Anspruch 12 oder 13, bei der die Einrichtung (11) zum Erfassen und Auswerten des elektrischen Entladevorganges als Messwertaufnehmer eine Spannungsteilerschaltung (40) zum Erfassen der Entladespannung (U) umfasst.

15. Elektromagnetische Stoßwellenquelle (2) nach einem der Ansprüche 12, 13 oder 14, bei der die Einrichtung (11) zum Erfassen und Auswerten des elektrischen Entladevorganges als Messwertaufnehmer eine Rogowskispule (12) zum Erfassen des Entladestromes (I) umfasst.

16. Elektromagnetische Stoßwellenquelle (2) nach Anspruch 14 oder 15, bei der dem Messwertaufnehmer eine Signalverarbeitungseinheit (20;200) nachgeschaltet ist, an deren wenigstens einem Ausgang die wenigstens eine Kenngröße (K) als elektrisches Signal ausgegeben wird.

17. Elektromagnetische Stoßwellenquelle (2) nach einem der Ansprüche 12 bis 16, bei der die Einrichtung (11) zum Erfassen und Auswerten des elektrischen Entladevorganges einen Computer (16;22;202) zur Berechnung einer abgeleiteten Kenngröße (AK) umfasst.

FIG 1

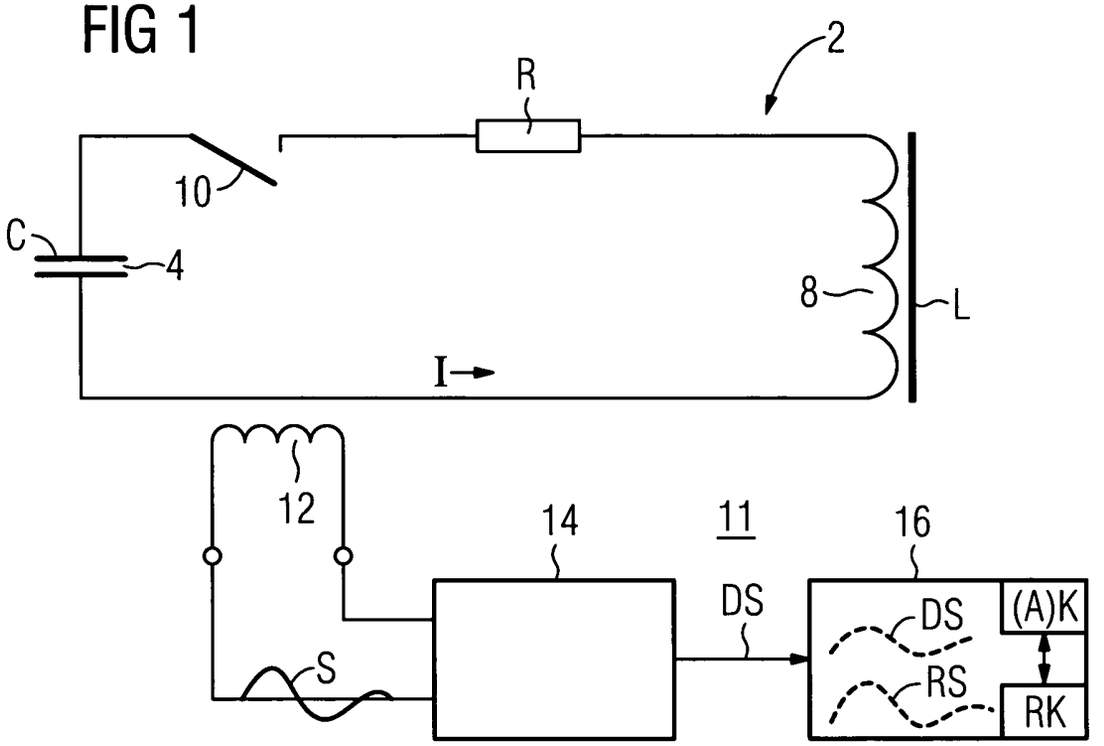

R
2
10
C
4
8
L
I
12
14
11
16
DS
S
DS
(A)K
RS
RK

FIG 2

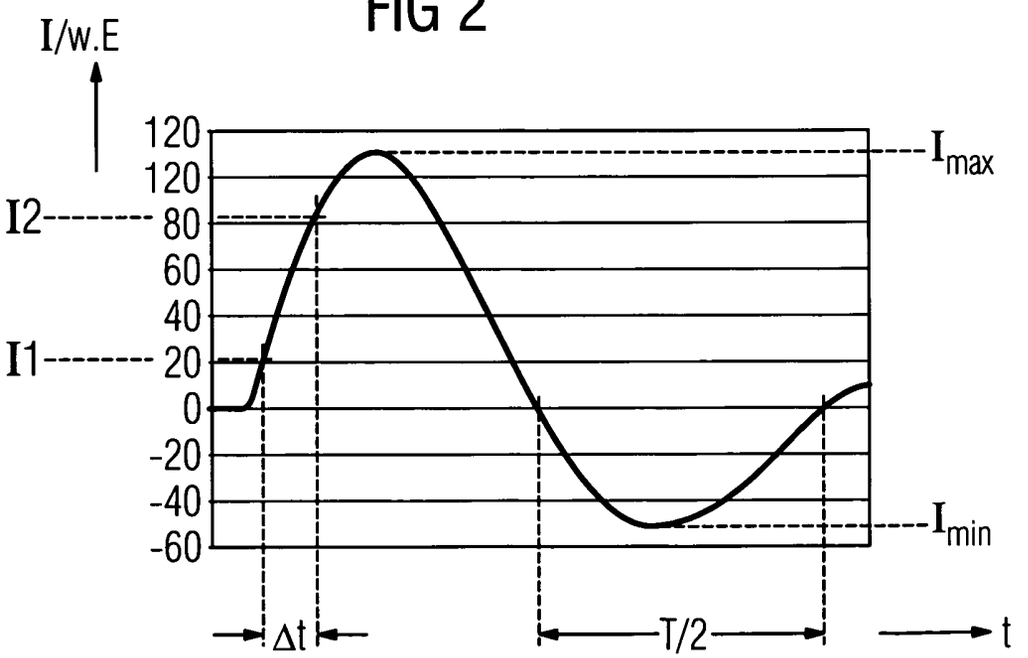

I/w.E
120
120
I2
80
60
40
I1
20
0
-20
-40
-60
Imax
Imin
Δt
T/2
t

FIG 3

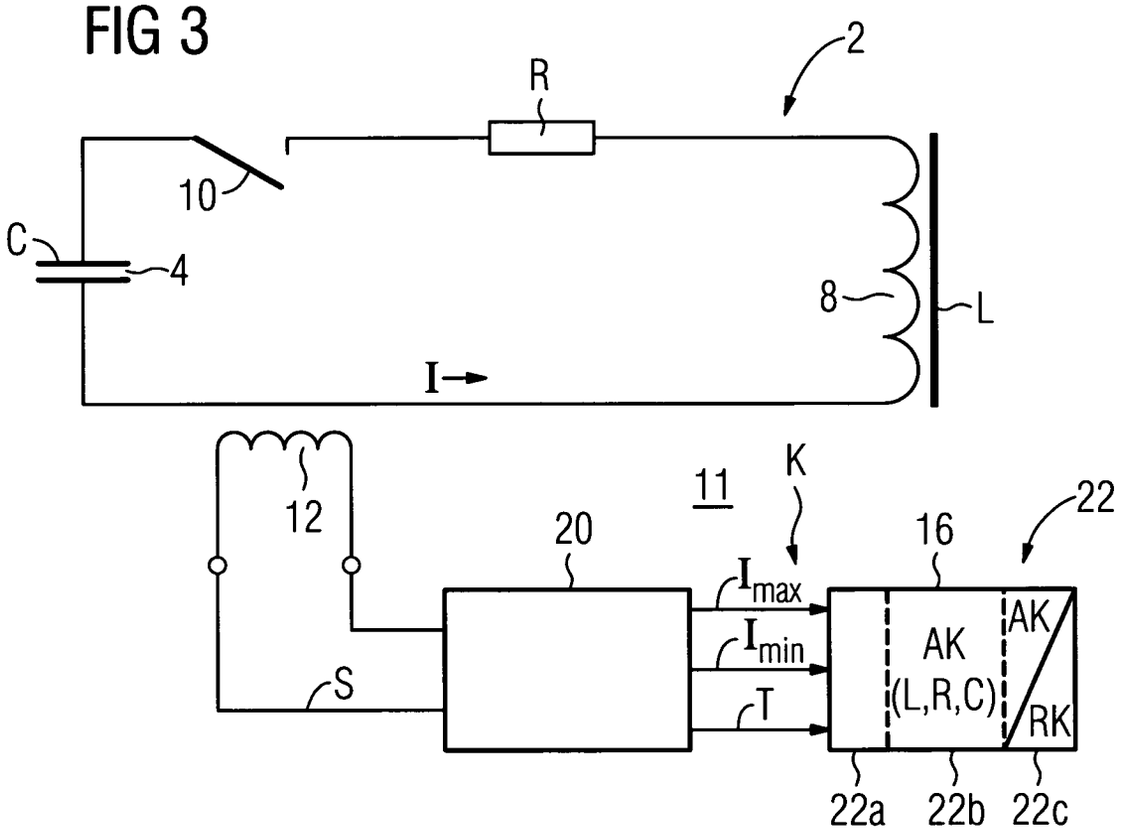
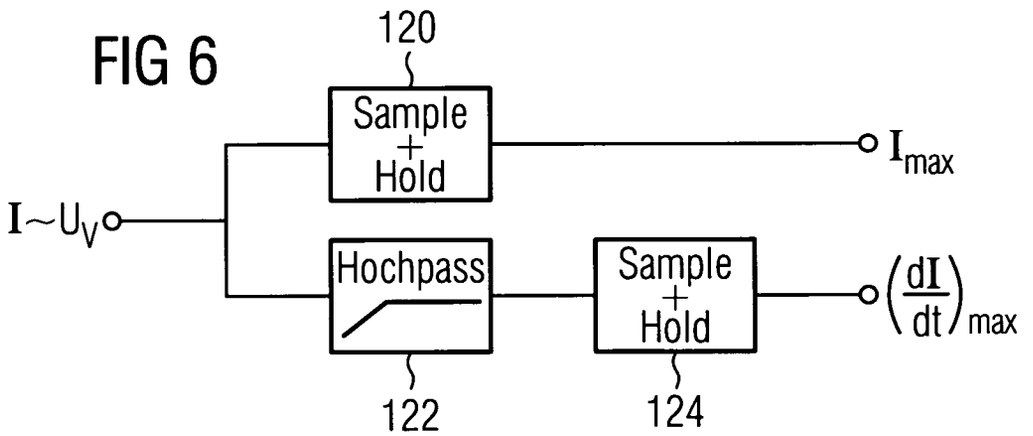

R
2
10
C
4
8
L
I
12
11
K
20
16
22
I_{max}
I_{min}
T
S
AK
(L,R,C)
AK
RK
22a
22b
22c

FIG 6


120
Sample
+
Hold
I_{max}
I~U_V
Hochpass
Sample
+
Hold
$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{max}$
122
124

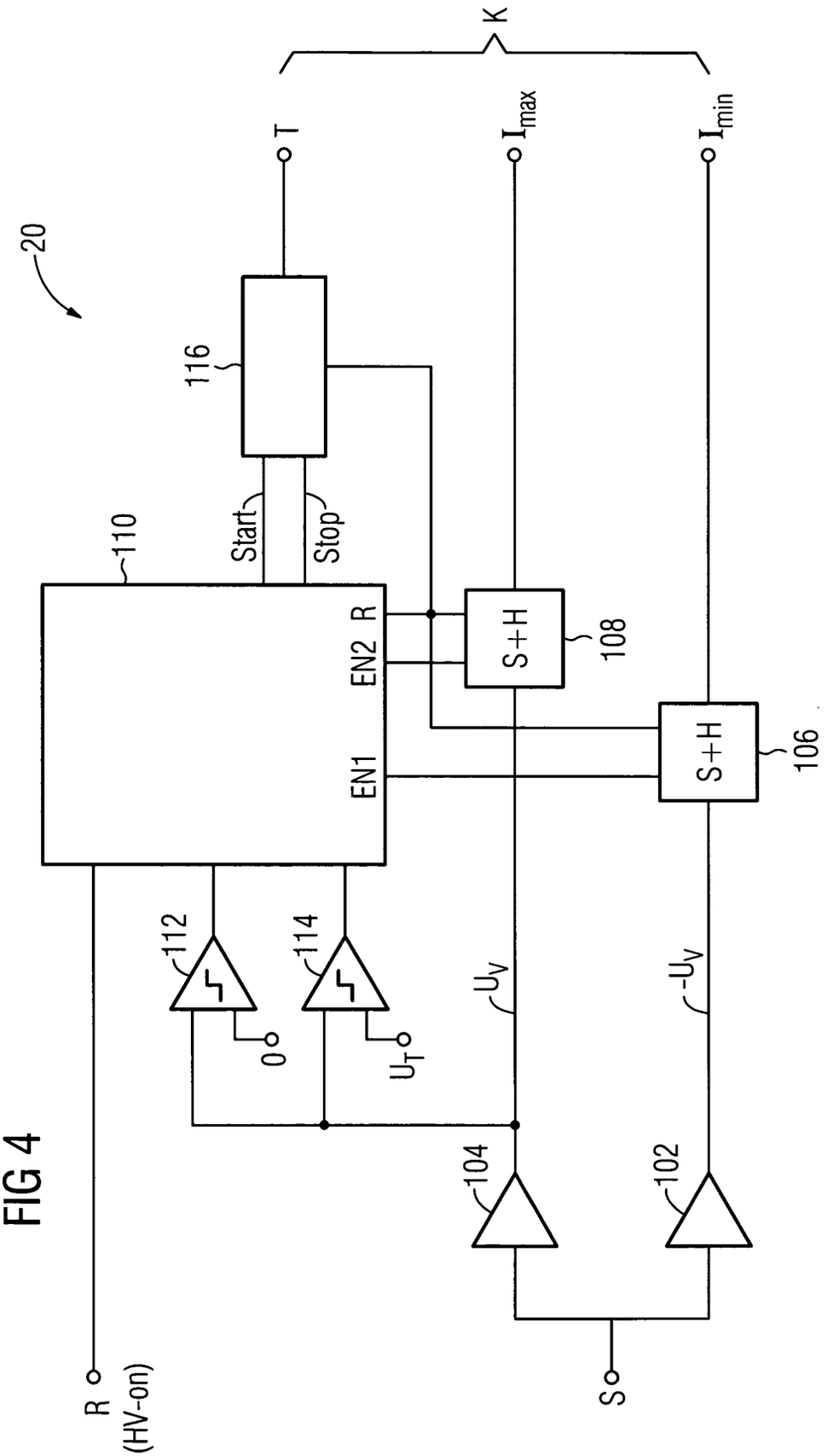

K
T
I_{max}
I_{min}
20
116
110
Start
Stop
EN2
R
EN1
S+H
108
S+H
106
112
114
0
U_T
U_V
$-U_V$
104
102
R
(HV-on)
S

FIG 4

FIG 5

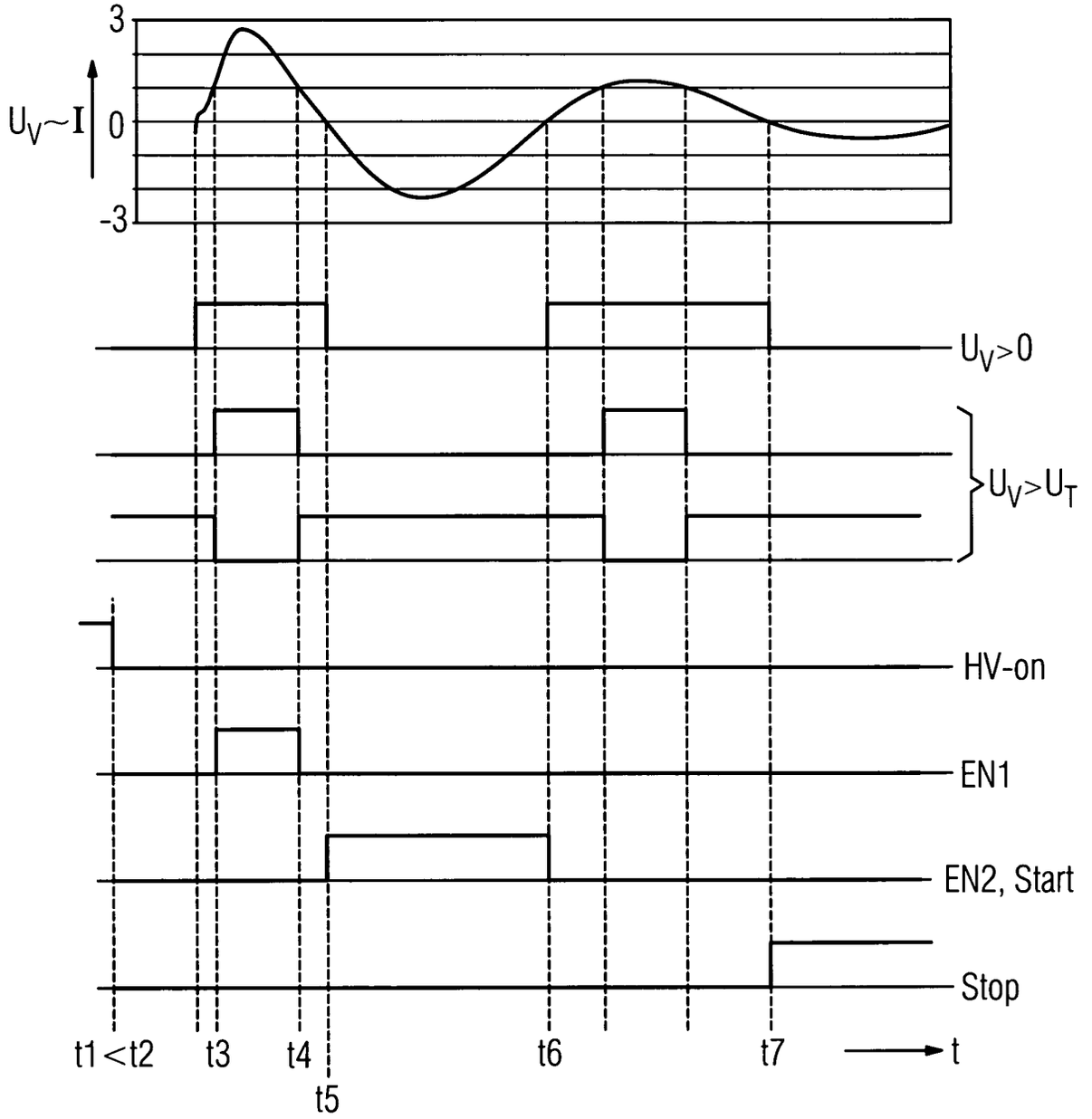

3
0
-3
$U_V \sim I$
$U_V > 0$
$U_V > U_T$
HV-on
EN1
EN2, Start
Stop
t1 < t2
t3
t4
t5
t6
t7
t

FIG 7

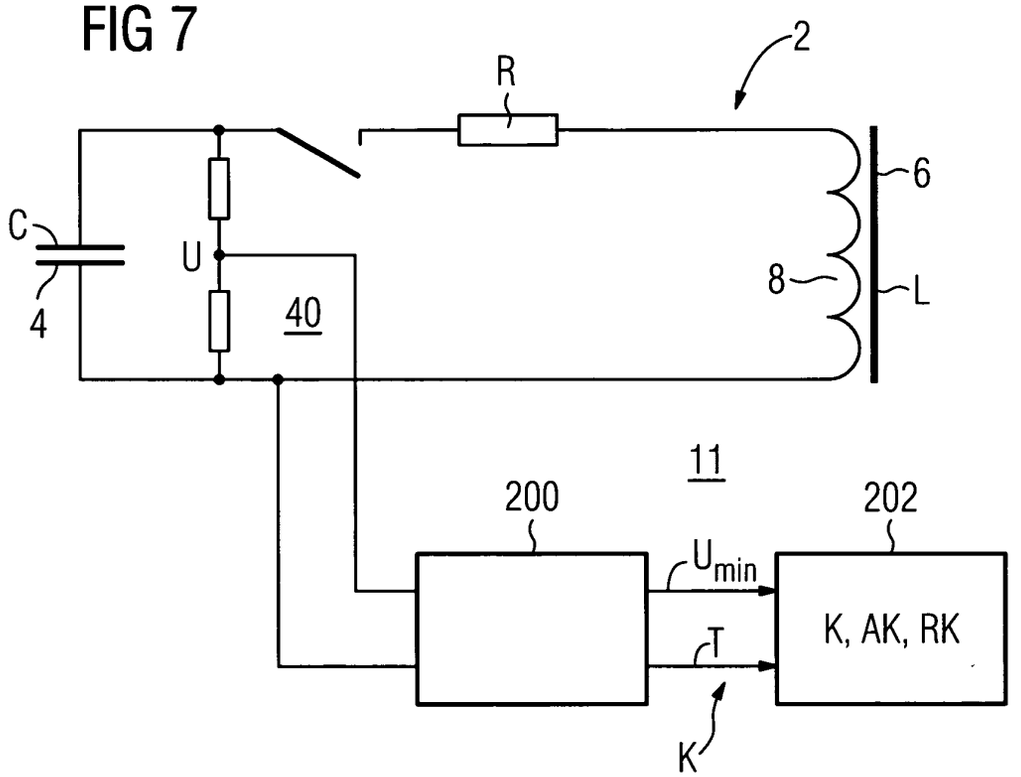
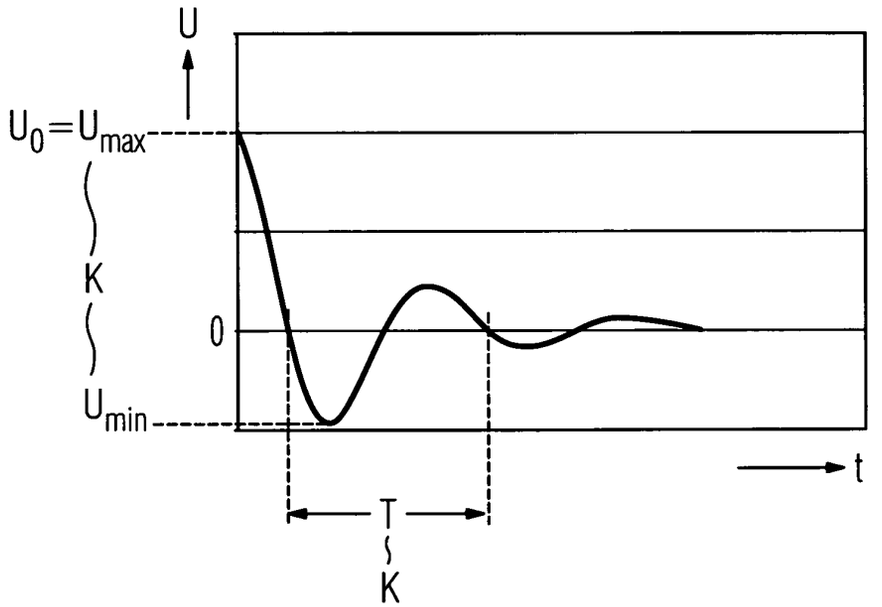


FIG 8



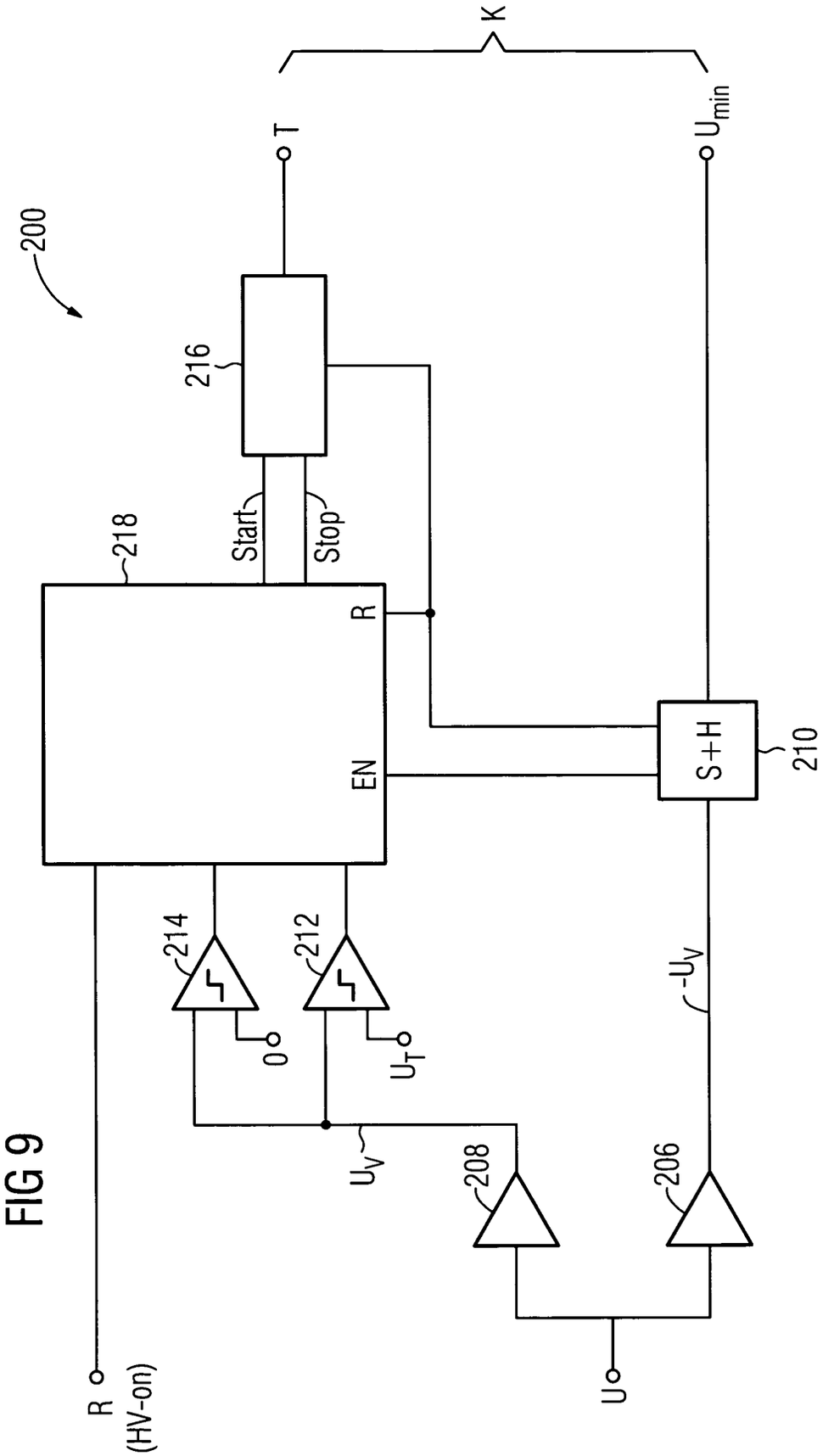

K
T
U_{min}
200
216
Start
Stop
218
R
EN
S+H
210
214
212
0
U_T
$-U_V$
U_V
208
206
R
(HV-on)
U

FIG 9

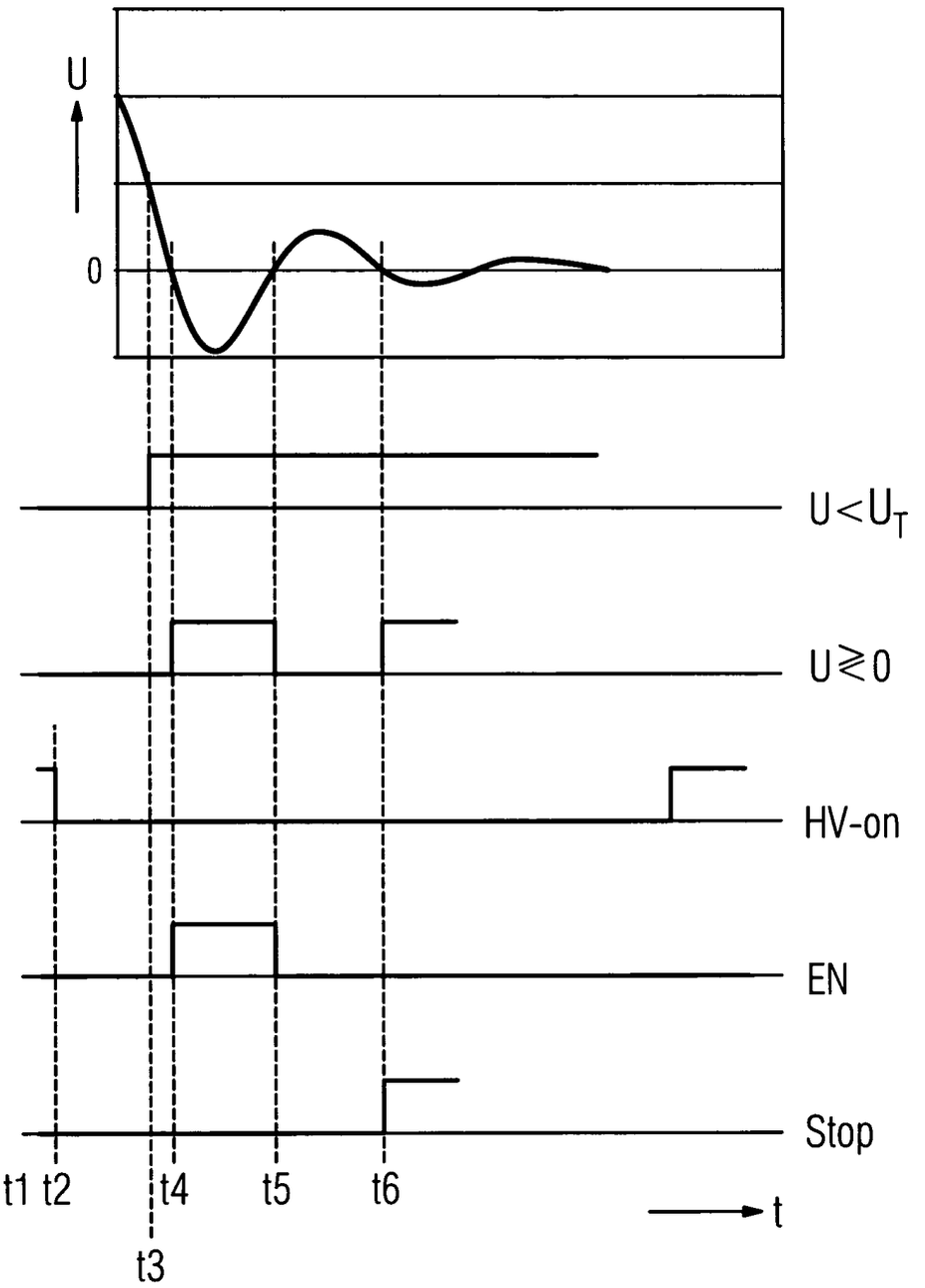



FIG 10