



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
12.03.2014 Patentblatt 2014/11

(51) Int Cl.:
B06B 1/02 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **13181693.6**

(22) Anmeldetag: **26.08.2013**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME

(30) Priorität: **10.09.2012 DE 102012215993**

(71) Anmelder: **Weber Ultrasonics GmbH**
76307 Karlsbad-Ittersbach (DE)

(72) Erfinder:
• **Brühn, M. Sc., Xenia**
76228 Karlsruhe (DE)
• **Broszeit, Ralf**
75181 Pforzheim (DE)

(74) Vertreter: **Lemcke, Brommer & Partner**
Patentanwälte
Bismarckstrasse 16
76133 Karlsruhe (DE)

(54) **Ultraschallsystem, Ultraschallgenerator und Verfahren zum Betreiben eines solchen**

(57) Vorgeschlagen wird ein Verfahren zum Betreiben eines Ultraschallgenerators (2) zur HF-Energieversorgung eines Ultraschallwandlers (3), insbesondere zum Ultraschallschweißen oder zur Ultraschallreinigung, welcher Ultraschallgenerator wenigstens einen elektrisch mittels eines Erregersignals mit einer Erregungsfrequenz (f) erregbaren Schwingkreis (2e) aufweist, der in elektrischer Wirkverbindung mit wenigstens einem elektro-mechanischen Schwingssystem des Ultraschallwandlers steht, dessen Impedanz (f) bei einer Parallelresonanz des Schwingensystems ein Betragsmaximum (PR) und bei einer Serienresonanz des Schwingensystems ein Betragsminimum (SR) aufweist, welches Verfahren sich dadurch auszeichnet, dass a) in dem Schwingkreis (2e), vorzugsweise vor einer darin enthaltenen Paralldrossel (2f), zumindest beim Anschwingen des Schwingensystems mit einer anfänglichen Erregungsfrequenz (f) die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung des Erregersignals bestimmt und zur Frequenzregelung des Ultraschallgenerators (2) verwendet wird; b) in Abhängigkeit von der bestimmten Phasendifferenz bei einer Phasendifferenz $< 0^\circ$ die anfängliche Erregungsfrequenz (f) derart in ihrer Frequenz geregelt wird, dass bei Erreichen einer Startfrequenz des Erregungssignals die Phasendifferenz im Wesentlichen Null wird und die Impedanz des Schwingensystems sich ihrem Betragsminimum (SR) oder ihrem Betragsmaximum (PR) annähert; c) das Schwingensystem bei der Startfrequenz zu Ultraschallschwingungen angeregt wird und d) die Erregungsfrequenz zur Amplituden- oder Leistungsanpassung des Schwingensystems derart geregelt wird, dass die Phase der Impedanz des Schwingensystems $> 0^\circ$ ist. Weiterhin vorgeschlagen wird ein entsprechend betreibbarer Ultra-

schallgenerator (2) sowie ein Ultraschallschwingensystem (1) mit einem Ultraschallgenerator (2) und einem Ultraschallwandler (3).

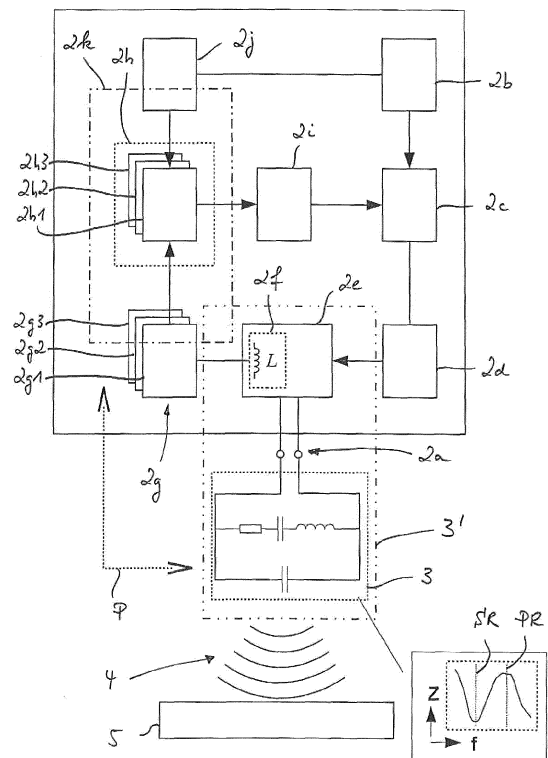


Fig. 2

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 zum Betreiben eines Ultraschallgenerators zur HF-Energieversorgung eines Ultraschallwandlers, insbesondere zum Ultraschallschweißen oder zur Ultraschallreinigung, welcher Ultraschallgenerator wenigstens einen mittels eines Erregersignals mit einer Erregungsfrequenz elektrisch erregbaren Schwingkreis aufweist, der in elektrischer Wirkverbindung mit wenigstens einem elektro-mechanischen Schwingssystem des Ultraschallwandlers steht, dessen Impedanz bei einer Parallelresonanz des Schwingensystems ein Betragsmaximum und bei einer Serienresonanz des Schwingensystems ein Betragsminimum aufweist.

[0002] Weiterhin betrifft die Erfindung einen Ultraschallgenerator nach dem Oberbegriff des Anspruchs 10 zur HF-Energieversorgung eines Ultraschallwandlers, insbesondere zum Ultraschallschweißen oder zur Ultraschallreinigung, mit wenigstens einem mittels eines Erregersignals mit einer Erregungsfrequenz elektrisch erregbaren Schwingkreis, der mit wenigstens einem elektro-mechanischen Schwingssystem eines Ultraschallwandlers in elektrischer Wirkverbindung koppelbar ist, dessen Impedanz bei einer Parallelresonanz des Schwingensystems ein Betragsmaximum und bei einer Serienresonanz des Schwingensystems ein Betragsminimum aufweist.

[0003] Außerdem betrifft die Erfindung ein Ultraschallsystem, welches Ultraschallsystem wenigstens einen Ultraschallgenerator der genannten Art in Wirkverbindung mit wenigstens einem Ultraschallwandler aufweist.

[0004] Gattungsgemäße Gegenstände sind beispielsweise aus der EP 0 662 356 B1 bekannt. Die genannte Druckschrift offenbart insbesondere ein Verfahren zum Betrieb eines Generators zur HF-Energieversorgung eines Ultraschallwandlers sowie dessen Betrieb in einem bestimmten Resonanzzustand. Dabei wird der Phasenwinkel zwischen dem Strom und der Spannung am Ausgang des Generators gemessen und zur Frequenzregelung des Generators verwendet, indem eine dem Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung proportionale Spannung erzeugt wird, wobei zusätzlich zum Phasenwinkel der Strom, die Spannung und/oder die Schein- oder Wirkleistung am HF-Ausgang des Generators als zusätzliche Regelgröße digital verarbeitet und mit dem Phasenwinkel verknüpft wird, um die gewünschte Resonanzfrequenz des Generators zu bestimmen. Bei der genannten Resonanzfrequenz handelt es sich um die Frequenz der Parallelresonanz des Ultraschallwandlers, zu deren Auffindung eine Startfrequenz oberhalb der Parallelresonanz gewählt und anschließend auf das Stromminimum geregelt wird, um danach den Ultraschallwandler in der Parallelresonanz der Impedanzkurve zu betreiben.

[0005] Ähnliche Gegenstände sind aus der US 7,475,801 B2 und der DE 10 2010 004 468 A1 bekannt.

[0006] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein alternatives Verfahren zum Betreiben eines Ultraschallgenerators und einen entsprechend ausgebildeten Ultraschallgenerator anzugeben, welche auf einfachere und kostengünstigere Weise einen Betrieb in einem vorgegebenen oder vorgebbaren Arbeitspunkt mit entsprechender Ausgangsleistung und Schwingungsamplitude gewährleisten.

[0007] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1, durch einen Ultraschallgenerator mit den Merkmalen des Anspruchs 10 sowie durch ein Ultraschallsystem mit den Merkmalen des Anspruchs 16. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindungsgegenstände sind Gegenstand von Unteransprüchen, deren Wortlaut hiermit durch ausdrückliche Bezugnahme in die Beschreibung aufgenommen wird, um Textwiederholungen zu vermeiden.

[0008] Erfindungsgemäß ist ein Verfahren zum Betreiben eines Ultraschallgenerators zur HF-Energieversorgung eines Ultraschallwandlers, insbesondere zum Ultraschallschweißen oder zur Ultraschallreinigung, welcher Ultraschallgenerator wenigstens einen mittels eines Erregersignals mit einer Erregungsfrequenz elektrisch erregbaren Schwingkreis aufweist, der mit wenigstens einem elektro-mechanischen Schwingssystem des Ultraschallwandlers in elektrischer Wirkverbindung steht, welches Schwingssystem bei einer ersten (Erregungs-)Frequenz eine Parallelresonanz und bei einer zweiten (Erregungs-)Frequenz eine Serienresonanz aufweist, was sich anhand eines Maximums bzw. eines Minimums des Betrags der Impedanz des Schwingensystems ausdrückt, dadurch gekennzeichnet, dass a) in dem Schwingkreis, vorzugsweise vor einer darin enthaltenen Paralleldrossel, zumindest beim Anschwingen des Schwingensystems mit einer anfänglichen Erregungsfrequenz die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung des Erregersignals bestimmt und zur Frequenzregelung des Ultraschallgenerators verwendet wird; b) in Abhängigkeit von der bestimmten Phasendifferenz bei einer Phasendifferenz $< 0^\circ$ die anfängliche Erregungsfrequenz derart in ihrer Frequenz geregelt wird, dass bei Erreichen einer Startfrequenz des Erregungssignals die Phasendifferenz im Wesentlichen Null wird und die Impedanz des Schwingensystems sich ihrem Betragsminimum oder ihrem Betragsmaximum annähert; c) das Schwingssystem bei der Startfrequenz zu Ultraschallschwingungen angeregt wird und d) die Erregungsfrequenz derart geregelt wird, dass die Phase der Impedanz des Schwingensystems $> 0^\circ$ ist. Schritt b) ist gleichbedeutend damit, dass das Schwingssystem sich einer seiner Resonanzstellen (Serien- oder Parallelresonanz) annähert.

[0009] Ein erfindungsgemäßer Ultraschallgenerator zur HF-Energieversorgung eines Ultraschallwandlers, insbesondere zum Ultraschallschweißen oder zur Ultraschallreinigung, mit wenigstens einem mittels eines Erregersignals mit einer Erregungsfrequenz elektrisch erregbaren Schwingkreis, der mit wenigstens einem elektro-mechanischen Schwingssystem eines Ultraschall-

wandlers in elektrischer Wirkverbindung koppelbar ist, welches Schwingssystem bei einer ersten (Erregungs-) Frequenz eine Parallelresonanz und bei einer zweiten (Erregungs-)Frequenz eine Serienresonanz aufweist, was sich anhand eines Maximums bzw. eines Minimums des Betrags der Impedanz des Schwingssystems ausdrückt, ist gekennzeichnet durch a) in dem Schwingkreis, vorzugsweise vor einer darin enthaltenen Paralleldrossel, angeordnete erste Messmittel, die dazu ausgebildet sind, die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung des Erregersignals zu bestimmen und die dazu vorgesehen sind, entsprechende Messsignale, vorzugsweise ein entsprechendes Phasendifferenzsignal, an einer Frequenzregelungseinheit des Ultraschallgenerators bereitzustellen; b) in der Frequenzregelungseinheit vorgesehene Frequenzregelmittel, die dazu ausgebildet sind, in Abhängigkeit von der bestimmten Phasendifferenz bei einer Phasendifferenz $< 0^\circ$ die Erregungsfrequenz derart in ihrer Frequenz zu regeln, dass bei Erreichen einer Startfrequenz des Erregungssignals die Phasendifferenz im Wesentlichen Null wird und die Impedanz des Schwingssystems sich ihrem Betragsminimum oder ihrem Betragsmaximum annähert; wobei c) die Frequenzregelmittel weiterhin dazu ausgebildet sind, die Erregungsfrequenz derart zu regeln, dass die Phase der Impedanz des Schwingssystems im Betrieb des Ultraschallwandlers $> 0^\circ$ ist.

[0010] Es ist im Rahmen der vorliegenden Erfindung nicht erforderlich, dass die genannten ersten Messmittel unmittelbar zum Erzeugen und Bereitstellen eines (analogen) Phasendifferenzsignals ausgebildet sind. Vielmehr ist es alternativ möglich, die Phasendifferenz aus den Messwerten für Strom und Spannung (digital) zu berechnen.

[0011] Ein erfindungsgemäßes Ultraschallsystem weist wenigstens einen erfindungsgemäßen Ultraschallgenerator in Wirkverbindung mit wenigstens einem Ultraschallwandler auf, welcher Ultraschallwandler oder dessen elektro-mechanisches Schwingssystem in seiner Impedanz in Abhängigkeit von der Erregungsfrequenz eine Parallelresonanz und eine Serienresonanz aufweist.

[0012] Die Impedanz eines Ultraschallwandlers ist eine komplexwertige Größe und in Figur 1 in Abhängigkeit von der Frequenz f getrennt nach Betrag Z (eigentlich $|Z|$) und Phase $\Delta\varphi$ zeichnerisch dargestellt. Die Impedanz ist der Quotient aus komplexer Wechselspannung und komplexem Wechselstrom und beinhaltet für den Fachmann die Zusammenfassung von zwei Aussagen: Sie gibt das Verhältnis der Amplitude von sinusförmiger Wechselspannung zu sinusförmigem Wechselstrom an, und sie gibt die Phasenverschiebung zwischen diesen beiden Größen an. Diese Phasenverschiebung wird vorliegend als "Phase der Impedanz" ($\Delta\varphi$) bezeichnet. Die Impedanz weist, in Figur 1 von tieferen Frequenzen kommend, zunächst ein Betragsminimum auf, welches Impedanzminimum einer so genannten Serienresonanz SR des Schwingssystems entspricht. Zu höheren Frequen-

zen f hin steigt die Impedanz Z bzw. deren Betrag stark an, bis zu einem Betragsmaximum bei der sogenannten Parallelresonanz PR des Schwingssystems.

[0013] Weiterhin dargestellt ist in Figur 1 die Phase der komplexen Impedanz bzw. der Phasenunterschied $\Delta\varphi$ zwischen der Spannung und dem Strom im Schwingkreis des Ultraschallgenerators, über welchen Schwingkreis der Ultraschallwandler mit elektrischer Energie versorgt wird.

[0014] Die Phase der Impedanz bzw. die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ zwischen (HF-)Strom und (HF-)Spannung des Schwingkreises ändert sich bei Anschluss einer Spannungsquelle beim Erreichen der Serienresonanz SR, von niedrigen Frequenzen kommend, von Negativ (-90°) auf Positiv ($+90^\circ$), und bei Erreichen der Parallelresonanz PR wieder auf -90° . Bei der Frequenz der jeweiligen Resonanz SR, PR ist der Phasenwinkel Null. Im Rahmen der vorliegenden Erfindung bzw. deren Weiterbildungen gemäß den Unteransprüchen regelt der Ultraschallgenerator die Erregungsfrequenz innerhalb eines Frequenzbandes, welches zwischen den beiden Nulldurchgängen ND1 und ND2 der Phasendifferenz definiert ist. Die genannten Nulldurchgänge ND1, ND2 fallen bezüglich der zugehörigen Frequenz mit der Serienresonanz SR und der Parallelresonanz PR des Ultraschallwandlers zusammen. In dem genannten Frequenzband, in welchen der Ultraschallgenerator regelt, ist der Phasenwinkel zwischen (HF-)Strom und (HF-)Spannung positiv.

[0015] Im Rahmen der vorliegenden Erfindung wird nun in einem ersten Verfahrensschritt in dem Schwingkreis des Ultraschallgenerators, und zwar vorzugsweise vor einer in dem Schwingkreis enthaltenen Paralleldrossel oder -induktivität, zumindest beim Anschwingen des Schwingssystems mit einer anfänglichen Erregungsfrequenz die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung des Erregersignals bestimmt und - ggf. in Form eines resultierenden Phasendifferenzsignals - zur Frequenzregelung des Ultraschallgenerators als Regelgröße verwendet. Zu diesem Zweck werden vorzugsweise in dem Schwingkreis der Strom und die Spannung gemessen, aus deren zeitlichen Verläufen sich die genannte Phasendifferenz ermitteln lässt, beispielsweise digital mittels eines geeigneten Prozessors. In Abhängigkeit von der bestimmten Phasendifferenz wird dann, wenn gilt $\Delta\varphi < 0^\circ$, im Rahmen der vorliegenden Erfindung die anfängliche Erregungsfrequenz derart in ihrer Frequenz geregelt, dass die Phasendifferenz im Wesentlichen Null wird, wobei das Schwingssystem sich seiner Parallelresonanz annähert, was mit einem Betragsmaximum der Impedanz einhergeht. Die entsprechende Frequenz des Erregungssignals wird vorliegend auch als "Startfrequenz" bezeichnet. Das Schwingssystem bzw. der Ultraschallwandler wird dann erfindungsgemäß bei der Startfrequenz zu Ultraschallschwingungen angeregt. Anschließend wird die Erregungsfrequenz derart geregelt, dass die Phase der Impedanz $> 0^\circ$ ist. Bezogen auf die Figur 1 hießt das konkret, dass für Frequenzen oberhalb

der Parallelresonanz zum Aufsuchen der Startfrequenz die Frequenz erniedrigt wird, bis $\Delta\varphi = 0^\circ$ (PR). Für Frequenzen unterhalb der Serienresonanz wird die Frequenz erhöht, bis $\Delta\varphi = 0^\circ$ (SR). Für Frequenzen mit $\Delta\varphi > 0^\circ$ ist grundsätzlich keine Veränderung der Frequenz erforderlich. Allerdings kann durch Veränderung der Frequenz eine Amplituden- oder Leistungsanpassung bezüglich des Schwingensystems vorgenommen werden.

[0016] Der besondere Vorteil, der sich ergibt, wenn bei Leistungsabgabe bzw. hoher Amplitude auf die Serienresonanz SR geregelt wird, ist darin zu sehen, dass die Regelung des Ultraschallgenerators nur die Frequenz regeln muss und aufgrund der relativ niederohmigen Impedanz eine hohe Leistung mit weniger Spannung abgegeben werden kann als bei vorbekannten Systemen, welche auf die Parallelresonanz regeln und zusätzlich zur Regelung der kompletten Leistungsabgabe bzw. der Schwingungsamplitude des Ultraschall-Schwingensystems eine Pulsweitenmodulation (PWM) verwenden, wie beispielsweise in EP 0 662 356 B1 beschrieben.

[0017] Im Rahmen der vorliegenden Erfindung ist in diesem Zusammenhang vorgesehen, dass das Schwingensystem im Anschluss an den Verfahrensschritt d) in einem Arbeitspunkt zwischen Parallelresonanz und Serienresonanz des Schwingensystems betrieben wird ($\Delta\varphi > 0^\circ$). Dabei ist es möglich, dass der Arbeitspunkt in Abhängigkeit von einer Benutzervorgabe oder -eingabe verschoben wird, und zwar vorzugsweise in Richtung der Serienresonanz für größere Schwingungsamplituden und/oder für größere Schwingungsleistung.

[0018] Im Zuge einer anderen Weiterbildung der vorliegenden Erfindung ermittelt der Ultraschallgenerator bereits beim Start bzw. beim Anschwingen des Ultraschall-Schwingensystems die Phase zwischen (HF-)Strom und (HF-)Spannung im Schwingkreis und ist somit in der Lage festzustellen, ob die eingestellte anfängliche Erregungsfrequenz im richtigen Frequenzbereich liegt. Unter dem Begriff "richtiger Frequenzbereich" ist vorliegend insbesondere das weiter oben definierte Frequenzband ($\Delta\varphi > 0^\circ$) zu verstehen. Dies ermöglicht es, die sogenannte Startfrequenz, welche durch die Resonanzeigenschaft des Ultraschallwandlers bzw. des Schwingensystems vorgegeben ist, zu erkennen, automatisch nachzuregeln und zu optimieren.

[0019] In diesem Zusammenhang kann im Zuge einer wieder anderen Weiterbildung der vorliegenden Erfindung vorgesehen sein, dass die Startfrequenz vorzugsweise durch Ermitteln desjenigen Frequenzwerts bestimmt wird, bei dem die Phasendifferenz bzw. die Phase der Impedanz bei der Parallelresonanz oder bei der Serienresonanz verschwindet, d.h. den Wert Null annimmt. Dies geschieht höchst vorzugsweise mittels eines Vorab-Scans bei relativ niedriger Leistung, wobei die anfängliche Erregungsfrequenz anschließend im Wesentlichen auf die vorab bestimmte Startfrequenz des Erregungssignals eingestellt wird. Im Optimum entspricht also die genannte Startfrequenz, bei welcher der Ultraschallgenerator anzuschwingen versucht, gerade der Frequenz

der Parallelresonanz PR oder der Serienresonanz SR (vgl. Figur 1). Sie kann anschließend je nach Leistungs- bzw. Amplitudenvorgabe an die Frequenz der Serienresonanz SR bzw. der Parallelresonanz PR (vgl. Figur 1) angenähert werden. Grundsätzlich ist es jedoch auch möglich, im Rahmen einer bestimmten Leistungs- oder Amplitudenvorgabe eine entsprechende, an die Frequenz der Serienresonanz oder Parallelresonanz angenäherte Arbeitspunkt-Frequenz unmittelbar schon beim Anschwingen einzustellen.

[0020] Eine äußerst bevorzugte Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht vor, dass, vorzugsweise schon vor dem Anregen des Schwingensystems, der Abstand zwischen Parallelresonanz und Serienresonanz des Schwingensystems durch Frequenzänderung des Erregersignals und durch Ermitteln der beiden Frequenzwerte bestimmt wird, bei denen die Phasendifferenz (vgl. Figur 1) verschwindet. Dies kann wiederum mittels eines Vorab-Scans bei relativ niedriger Leistung geschehen. Der genannte (Frequenz-)Abstand zwischen Parallelresonanz und Serienresonanz kann beim Anregen des Schwingensystems als Regelgrundlage für die Frequenzregelung des Ultraschallgenerators verwendet werden. Der Ultraschallgenerator kann auf diese Weise erkennen, ob es sich bei dem Ultraschall-Schwingensystem um ein eher schmalbandiges oder um ein relativ breitbandiges System handelt, was ein Maß für die Güte des Systems darstellt. Der Ultraschallgenerator ist entsprechend in der Lage, seine Regelcharakteristik optimal an das System anzupassen. In diesem Zusammenhang sieht eine entsprechende Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens vor, dass der Abstand zwischen Parallelresonanz und Serienresonanz als Einflussgröße bei der Einstellung einer Regelfeinheit der Frequenzregelung des Ultraschallgenerators verwendet wird. Unter "Regelfeinheit" wird vorliegend die frequenzmäßige Auflösung zwischen Serienresonanzstelle und Parallelresonanzstelle verstanden. Durch die angepasste Regelcharakteristik kann der Ultraschallgenerator die gewünschte Arbeitspunkt-Frequenz in dem genannten Frequenzband optimal auffinden und einregeln, wobei das zu vermeidende Anregen unerwünschter Nebenresonanzen des Ultraschall-Schwingensystems sicher vermieden wird.

[0021] Eine wieder andere Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht zu diesem Zweck vor, dass die Erregungsfrequenz festgehalten wird, sobald die Frequenz der Serienresonanz des Schwingensystems erreicht wurde. Dies entspricht einer Beschränkung der Erregungsfrequenz auf das bereits mehrfach erwähnte Frequenzband, um das Anregen von Nebenresonanzen zu vermeiden.

[0022] Um die Regelungsgenauigkeit weiter zu verbessern, können zusätzlich zu der angesprochenen Phasendifferenz noch weitere physikalische Größen in dem Schwingkreis gemessen und als Regelgrößen für die Frequenzregelung verwendet werden. Ohne Beschränkung seien in diesem Zusammenhang beispielhaft die

Größen HF-Stromstärke, Blindleistung und Wirkleistung im Schwingkreis erwähnt.

[0023] Als besonders vorteilhaft hat sich herausgestellt, wenn im Zuge einer anderen Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens zusätzlich noch wenigstens eine weitere Eigenschaft, beispielsweise Spannung und/oder Stromstärke eines primären, zur Erzeugung des Erregersignals dienenden elektrischen Energieversorgungssignals gemessen und als Regelgröße für die Frequenzregelung und/oder für eine Schutzfunktion zum Schützen von Komponenten des Ultraschallgenerators verwendet wird. Beispielsweise können zusätzliche Messdaten einer primären Energieversorgungseinheit (Stromversorgung), welche eine in dem Ultraschallgenerator enthaltene Endstufe mit elektrischer Energie versorgt, zur Regelung hinzugefügt werden, um ein etwaiges Schwanken der Primärspannung der Stromversorgung auszuregulieren oder um die Endstufe bei zu hohem Primärstrom vor Überlast zu schützen (Schutzfunktion).

[0024] Eine entsprechende Weiterbildung des erfindungsgemäßen Ultraschallgenerators sieht in diesem Zusammenhang vor, dass neben den ersten Messmitteln, welche dazu ausgebildet sind, die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung des Erregersignals im Schwingkreis zu bestimmen, zusätzlich noch zweite Messmittel vorgesehen sind, die in elektrischer Wirkverbindung mit der primären elektrischen Energieversorgungseinheit zur Erzeugung des Erregersignals stehen. Die genannten zweiten Messmittel sind dazu ausgebildet, wenigstens eine Eigenschaft, vorzugsweise Spannung und/oder Stromstärke, eines von der Energieversorgungseinheit erzeugten primären elektrischen Energieversorgungssignals zu bestimmen und zu der Frequenzregelungseinheit des Ultraschallgenerators rückzukoppeln. Zusätzlich oder alternativ können die von den zweiten Messmitteln bereitgestellten Messwerte auch für die bereits erwähnte Schutzfunktion verwendet werden, welche Schutzfunktion dazu dient, Komponenten des Ultraschallgenerators vor Beschädigung zu schützen, beispielsweise die Endstufe.

[0025] Die Frequenzregelungseinheit des erfindungsgemäßen Ultraschallgenerators kann im Zuge einer anderen Weiterbildung als "intelligente" Einheit im Sinne eines Mikroprozessors, Mikrocontrollers, eines digitalen Signalprozessors oder eines FPGA (Field Programmable Gate Array) oder in Form einer anderen digitalen Rechneinheit ausgebildet sein. Im Rahmen einer solchen Ausgestaltung kann die Frequenzregelungseinheit weiterhin eine Art "künstlicher Intelligenz" beinhalten, beispielsweise ein neuronales Netz oder ein Expertensystem, welches vorzugsweise dazu dient, im Zuge einer Modellbildung Vorhersagen betreffend das Schwingverhalten des Ultraschallwandlers bzw. des Ultraschall-Schwingsystems zu liefern, um so das Regelungsverhalten positiv zu beeinflussen, insbesondere zu beschleunigen.

[0026] Insbesondere wenn die Frequenzregelungseinheit im Zuge der vorgenannten Weiterbildung pro-

grammgesteuerte Abläufe durchführen kann, ist im Zuge einer wieder anderen Weiterbildung des erfindungsgemäßen Ultraschallgenerators vorgesehen, dass dieser eine erste Einrichtung, vorzugsweise eine softwarebasierte oder firmwarebasierte Einrichtung, zum insbesondere automatischen Ermitteln des Abstands zwischen Parallelresonanz und Serienresonanz des Schwingsystems durch Frequenzänderung des Erregersignals aufweist. Wie bereits beschrieben, geschieht dies vorzugsweise anhand der Frequenzwerte mit verschwindender Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung des Erregersignals und höchst vorzugsweise vor dem Anregen des Schwingsystems mittels eines Vorab-Scans bei relativ niedriger Leistung. Der genannte Abstand ist anschließend als Regelgrundlage für die Frequenzregelung des Ultraschallgenerators verwendbar, insbesondere als Einflussgröße bei der Einstellung einer Feinheit der Frequenzregelung (Regelfeinheit, s.o.) des Ultraschallgenerators.

[0027] Zusätzlich oder alternativ kann eine vergleichbar ausgebildete zweite Einrichtung zum insbesondere automatischen Ermitteln der Startfrequenz vorgesehen sein. Vorzugsweise geschieht auch dies anhand des Frequenzwerts mit verschwindender Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung des Erregersignals bei der Parallelresonanz und höchst vorzugsweise mittels eines Vorab-Scans bei relativ niedriger Leistung. Auf diese Weise ist die anfängliche Erregungsfrequenz anschließend im Wesentlichen auf die vorab bestimmte Startfrequenz des Erregungssignals einstellbar.

[0028] Im Zuge einer wieder anderen Weiterbildung des erfindungsgemäßen Ultraschallgenerators weist dieser weitere Messmittel zur Bestimmung wenigstens einer der Größen HF-Stromstärke, Blindleistung und Wirkleistung im Schwingkreis auf, welche Messmittel in elektrischer und signaltechnischer Wirkverbindung mit der Frequenzregelungseinheit des Ultraschallgenerators stehen, um die genannten Größen als weitere Regelgrößen für die Frequenzregelung zu verwenden.

[0029] Insbesondere wenn die genannten weiteren Messmittel vorhanden sind und somit zusätzliche Messgrößen als weitere Regelgrößen für die Frequenzregelung zur Verfügung stehen, sieht eine andere bevorzugte Weiterbildung des erfindungsgemäßen Ultraschallgenerators vor, dass die Frequenzregelungseinheit kaskadiert aufgebaut ist.

[0030] Im Zuge einer äußerst bevorzugten Weiterbildung der vorliegenden Erfindung ist vorgesehen, dass für die Regelung des Ultraschallgenerators nicht nur der (HF-)Strom und die Wirkleistung sondern zusätzliche Regelgrößen, wie Phasenwinkel, Spannung, Blind- und Scheinleistung herangezogen werden. Die Verarbeitung und Verknüpfung dieser Werte kann digital von einem Mikroprozessor oder einer anderen digitalen Recheneinheit erfolgen, die durch ihre Leistungsfähigkeit in der Lage ist, zusätzlich zum (HF-)Strom und zur Wirkleistung nähere weitere Messdaten auszuwerten, beispielsweise über eine Kaskadenregelung, und hieraus die richtige

Regelgröße für die Ansteuerung des Ultraschallgenerators zu bilden. Bei einfacheren Systemen ist alternativ eine Realisierung in analoger Bauform möglich.

[0031] Eine wieder andere Weiterbildung der vorliegenden Erfindung sieht vor, dass dann, wenn der Arbeitspunkt durch äußere Einflüsse (verursacht beispielsweise durch eine Bedienperson und/oder durch Umgebungseinflüsse) die Frequenz der Parallelresonanz erreicht, zusätzlich eine Pulsweitenmodulation (PWM) zur weiteren Minimierung des Stroms bzw. der Leistung zugeschaltet wird. Eine solche Pulsweitenmodulation (oder Pulsbreitenmodulation, PBM) ist dem Fachmann grundsätzlich bekannt. Im Rahmen der vorliegenden Erfindung ist der Einsatz von PWM/PBM jedoch nur als Ergänzung zu der bereits mehrfach beschriebenen Regelung der Erregungsfrequenz auf einen Arbeitspunkt im Frequenzband zwischen Serienresonanz und Parallelresonanz zu verstehen, welche erfindungsgemäß vorrangig zum Einstellen des Stroms bzw. der Leistung eingesetzt wird.

[0032] Weitere Eigenschaften und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnung.

- Figur 1 zeigt die Impedanz des Schwingensystems eines Ultraschallwandlers und den sich einstellenden Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung an einem mit dem Ultraschallwandler zusammenwirkenden Schwingkreis eines Ultraschallgenerators, jeweils in Abhängigkeit von der Frequenz;
- Figur 2 zeigt schematisch anhand eines Blockschaltbilds den Aufbau eines erfindungsgemäßen Ultraschallsystems mit einem Ultraschallgenerator und einem Ultraschallwandler;
- Figur 3 zeigt schematisch ein Detailschaltbild einer ersten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Ultraschallsystems;
- Figur 4 zeigt schematisch ein Detailschaltbild einer anderen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Ultraschallsystems;
- Figur 5 zeigt schematisch ein Detailschaltbild einer wieder anderen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Ultraschallsystems;
- Figur 6 zeigt in einem erfindungsgemäßen Wechselstromgenerator gemessene Signalverläufe für Strom und Spannung zur Ermittlung der Phasendifferenz;
- Figur 7 zeigt anhand eines Ablaufdiagramms eine Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben eines Ultraschallgenerators, insbesondere des Ultraschallgenerators gemäß Figur 2; und
- Figur 8 zeigt anhand eines Ablaufdiagramms eine weitere Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0033] Figur 2 zeigt schematisch anhand eines Blockschaltbilds ein erfindungsgemäßes Ultraschallsystem,

welches in seiner Gesamtheit mit dem Bezugszeichen 1 bezeichnet ist. Das Ultraschallsystem 1 umfasst einen Ultraschallgenerator 2, an den in elektrischer Wirkverbindung ein Ultraschallwandler 3 mit einem elektro-mechanischen Schwingensystem angeschlossen ist, welches vorliegend in Form eines Ersatzschaltbilds dargestellt ist. Der Ultraschallwandler 3 erzeugt nach Maßgabe des Ultraschallgenerators Ultraschallwellen 4, welche zur Bearbeitung eines Werkstücks 5 verwendet werden können, beispielsweise zum Ultraschallschweißen oder zur Ultraschallreinigung, ohne dass die vorliegende Erfindung hierauf beschränkt wäre. Der Ultraschallwandler 3 bzw. das Schwingensystem weist ein frequenzabhängiges Impedanzverhalten $Z(f)$ auf, welches hier nur symbolisch dargestellt ist (vgl. Figur 1). Mit zunehmender (Erregungs-)Frequenz f weist der Ultraschallwandler 3 zunächst ein Minimum der Impedanz Z auf, gefolgt von einem Impedanzmaximum. Das Impedanzminimum fällt mit der sogenannten Serienresonanz SR des Ultraschallwandlers 3 zusammen, während das Impedanzmaximum mit der sogenannten Parallelresonanz PR des Ultraschallwandlers 3 zusammenfällt; worauf weiter oben anhand von Figur 1 bereits hingewiesen wurde.

[0034] Die elektrische bzw. signaltechnische Kopplung von Ultraschallwandler 3 und Ultraschallgenerator 2 erfolgt bei Bezugszeichen 2a, welches einen Ausgang oder Anschluss des Ultraschallgenerators bezeichnet. Weiterhin umfasst der Ultraschallgenerator 2 folgende Bestandteile: eine (Primär-)Energieversorgungseinheit 2b; eine Verstärker-Endstufe 2c, welche von der Energieversorgungseinheit 2b mit elektrischer Energie versorgt wird; einen Transformator 2d zum Transformieren einer von der Energieversorgungseinheit 2b gelieferten Spannung auf die benötigte Höhe; ein Anpassnetzwerk 2e mit wenigstens einer Induktivität (L) oder Drossel 2f als Bestandteil eines (Gesamt-)Schwingkreises 3' in elektrischer bzw. signaltechnischer Wirkverbindung mit dem Transformator 2d und erste Messmittel 2g, die zum Messen physikalischer Größen in dem Anpassnetzwerk 2e bzw. dem Schwingkreis ausgebildet sind, wobei wenigstens ein erstes Messmittel 2g1 zum Messen des Stroms und der Spannung im Anpassnetzwerk 2e, d.h. im Schwingkreis 3' vor der Induktivität 2f ausgebildet ist, um hieraus die Phasendifferenz zwischen (Erregungs-) Spannung und Strom zu bestimmen, beispielsweise analog durch Erzeugen eines entsprechenden Phasendifferenzsignals oder digital mittels eines geeigneten Prozessors. Hierauf wird weiter unten noch genauer eingegangen. Der (Gesamt-)Schwingkreis 3' setzt sich demnach zusammen aus dem Anpassnetzwerk 2e und dem Ultraschallwandler 3 und ist entsprechend teilweise innerhalb und teilweise außerhalb des Generators 2 angeordnet.

[0035] Weitere erste Messmittel 2g2, 2g3 dienen zum Messen zusätzlicher physikalischer Größen innerhalb des Anpassnetzwerks 2e bzw. des Schwingkreises 3', wie Blindleistung oder Wirkleistung, worauf weiter unten ebenfalls noch genauer eingegangen wird. Eine Frequenzregelungseinheit 2h weist vorzugsweise kaska-

diert angeordneten Regelmitteln 2h1-2h3, welche jeweils die Messsignale der ersten Messmittel 2g1-2g3 als Regelgröße für die Frequenzregelung verwenden. Ansteuerungseinheit 2i wirken nach Maßgabe der Frequenzregelungseinheit 2h auf die Endstufe 2c ein, damit diese dem Transformator 2d die elektrische Energie der Versorgungseinheit 2b in Form einer bestimmten, geregelten Frequenz liefert. Zusätzlich umfasst der Ultraschallgenerator 2 bei Bezugszeichen 2j noch weitere, zweite Messmittel in signaltechnischer Wirkverbindung mit der Energieversorgungseinheit 2b, welche zweiten Messmittel 2j wie die ersten Messmittel 2g in signaltechnischer Wirkverbindung mit der Frequenzregelungseinheit 2h stehen. Die zweiten Messmittel 2j dienen zur Bestimmung bestimmter Eigenschaften, wie Spannung oder Stromstärke, der Energieversorgungseinheit 2b, so dass diese ebenfalls als Regelgröße für die Frequenzregelung verwendet werden können. Alternativ oder zusätzlich können die gemessenen Eigenschaften der Energieversorgungseinheit 2b auch im Sinne einer Schutzfunktion für Komponenten des Ultraschallgenerators 2 verwendet werden, beispielsweise um die Endstufe 2c bei zu hohem Primärstrom (zu hoher Stromstärke an der Energieversorgungseinheit 2b) vor Überlast zu schützen.

[0036] Wie die strichpunktierte Box in Figur 2 symbolisch andeutet, kann zumindest die Frequenzregelungseinheit 2h zusammen mit (funktionalen Bestand-)Teilen der ersten 2g und der zweiten Messmittel 2j in Form einer programmgesteuerten oder programmierbaren digitalen Prozessoreinheit 2k ausgebildet sein, welche durch eine Bedienperson des Ultraschallsystems 1 mittels Benutzereingaben von außen bedienbar ist, wobei letzteres in Figur 2 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht explizit dargestellt wurde. Eine derartige Benutzereingabe umfasst beispielsweise das Eingeben einer gewünschten Schwingungsamplitude oder einer gewünschten Ultraschalleistung.

[0037] Die Messwerte, welche durch die ersten Messmittel 2g am Anpassnetzwerk 2e bzw. am Schwingkreis 3' gemessen werden, geben der Frequenzregelungseinheit 2h alle Messdaten, die zur Bestimmung und Korrektur der auszugebenden Arbeitsfrequenz erforderlich sind. Wie bereits erwähnt, können außerdem noch von den zweiten Messmitteln 2j gelieferte Messdaten der primären Strom- oder Energieversorgungseinheit 2b herangezogen werden, welche primäre Energieversorgungseinheit die Endstufe 2c mit elektrischer Energie versorgt. Wenn derartige weitere Messwerte der Frequenzregelungseinheit 2h zugeführt werden, kann ein etwaiges Schwanken der Primärspannung der Energieversorgungseinheit 2b ausgeregelt werden. Wie ebenfalls bereits erwähnt wurde, ist es zusätzlich möglich, die Endstufe 2c bei zu hohem Primärstrom vor Überlast zu schützen. Die Endstufe 2c, welche von der Ansteuerungseinheit 2i getrieben wird, gibt dem Transformator 2d die elektrische Energie der Primärversorgungseinheit 2b in Form einer bestimmten Frequenz (Erregungsfrequenz). Der Transformator 2d transformiert die von der

Energieversorgungseinheit 2b gelieferte Spannung auf die benötigte Höhe und gibt diese Spannung auf den Schwingkreis 3'. Währenddessen werden am Anpassnetzwerk 2e / dem Schwingkreis 3' bzw. an der dort enthaltenen Induktivität oder Paralleldrossel 2f wieder neue Messdaten aufgenommen (durch die ersten Messmittel 2g), welche die Frequenzregelungseinheit 2h benötigt, um die Erregungsfrequenz den Gegebenheiten nachzuregeln. Zu den genannten Gegebenheiten zählen insbesondere der tatsächliche Last- bzw. Schwingungszustand des Ultraschallwandlers 3 bzw. des Schwingensystems, die genannten Betriebsvorgaben durch eine Bedienperson sowie weitere (physikalische) Parameter des Ultraschallsystems, beispielsweise dessen Erwärmung im laufenden Betrieb. Vom Anpassnetzwerk 2e gelangt die elektrische Energie über den Ausgang oder Anschluss 2a in Form der ausgegebenen Erregungsfrequenz in das mit dem Ultraschallgenerator 2 verbundene Ultraschallschwingensystem (Ultraschallwandler 3), welches die elektrische Anregungsenergie in mechanische Schwingungen umwandelt, was dem Fachmann grundsätzlich bekannt ist. Die Kombination aus Anpassnetzwerk 2e und Ultraschallwandler 3 fungiert dabei als Schwingkreis 3', worauf bereits mehrfach hingewiesen wurde. Das Anpassnetzwerk kann zusätzlich zu der exemplarisch eingezeichneten Induktivität 2f (L) noch zumindest eine Kapazität (C) aufweisen, was dem Fachmann bekannt und in Figur 2 nicht dargestellt ist.

[0038] Bezug nehmend auf die Figuren 3 bis 5 werden nun bevorzugte Ausgestaltungen des Ultraschallgenerators 2 im Bereich des Transformators 2d, des Anpassnetzwerks 2e und der hiermit verbundenen ersten Messmittel 2g näher erläutert. Hierbei und in allen anderen Figuren bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche oder gleichwirkende Elemente.

[0039] Figur 3 zeigt anhand eines Blockschaltbilds eine Ausgestaltung, bei der in dem Anpassnetzwerk 2e des Ultraschallgenerators 2 vor der Induktivität 2f ein Stromwandler oder Stromsensor 2g1 angeordnet ist, welcher ein entsprechendes (Strom-)Messsignal SM1 generiert und an der in Figur 3 nicht explizit eingezeichnete Frequenzregelungseinheit 2h zur Verfügung stellt (gestrichelter Pfeil in Figur 3). Da die Induktivität 2f gemäß Figur 3 parallel zum Ausgang oder Abschluss 2a des Ultraschallgenerators 2 geschaltet ist, wird sie auch als Paralleldrossel bezeichnet.

[0040] Figur 4 zeigt eine Weiterbildung der Schaltungsanordnung aus Figur 3, bei der jeweils ein Stromwandler oder Stromsensor 2g1 vor der Paralleldrossel 2f und ein anderer 2g2 hinter der Paralleldrossel 2f angeordnet ist. Wie der Fachmann erkennt, misst der hinter der Induktivität 2f angeordnete Stromwandler oder Stromsensor 2g2 nur den Stromanteil durch die Induktivität 2f. Durch gemeinsame Auswertung der entsprechenden Messsignale SM1 und SM2 lässt sich der Strom durch den Ultraschallwandler 3 berechnen, beispielsweise durch die Prozessoreinheit 2k, so dass in der Frequenzregelungseinheit 2h (vgl. Figur 2) in vorteilhafter-

weise anschließend ein reines Wirkstromsignal zu Regelungszwecken zur Verfügung steht.

[0041] Gemäß Figur 5 ist es in leichter Abwandlung der Schaltungsanordnung aus Figur 3 grundsätzlich auch möglich, den Strom vor dem Transformator 2d mittels eines entsprechend angeordneten Stromwandlers oder Stromsensors 2g' zu messen, welcher ein entsprechendes Messsignal SM' an der Frequenzregelungseinheit 2h (vgl. Figur 2) bereitstellt. Im Gegensatz zu den Schaltungsanordnungen gemäß Figur 3 und Figur 4 ergibt sich allerdings ein sehr viel höherer Strommesswert.

[0042] Figur 6 zeigt Signalverläufe für das Phasensignal der Spannung φ_U bzw. f_U und für das Phasensignale des Stroms φ_I bzw. f_I über der Zeit t . Die beiden Signale φ_U/f_U und φ_I/f_I werden durch eine entsprechende analoge Aufbereitung aus den Messungen von Strom und Spannung gewonnen. Die genannte Aufbereitung erfolgt durch den Prozessor 2k (vgl. Figur 2) anhand der entsprechenden Messsignale, insbesondere der Strommesssignale SM1, SM2 oder SM' (Figuren 3 bis 5). Aus dem zeitlichen Abstand Δt bzw. Dt der Phasensignale φ_U/f_U und φ_I/f_I (Abstand zwischen zwei steigenden Flanken) kann der Prozessor 2k die Phase bzw. die Phasendifferenz berechnen und ein entsprechendes Phasendifferenzsignal erzeugen. Die genannte Phasendifferenz wird Null, wenn der Ultraschallwandler 3 (vgl. Figuren 2 bis 5) bei seiner Parallelresonanz oder bei seiner Serienresonanz angeregt wird. Durch Auswertung der Phasensignale φ_I , φ_U (f_U , f_I) kann der Prozessor 2k beispielsweise anhand der Flankenabfolge bzw. des Flankenverlaufs bestimmen, bei welchem Arbeitspunkt entlang der Impedanzkurve gemäß Figur 1 sich das Ultraschallsystem gerade befindet.

[0043] Wie der Fachmann erkennt, ist es auch möglich, aus den Phasensignalen gemäß Figur 6 eine zu den Phasensignalen proportionale Gleichspannung zu generieren und diese dem Prozessor 2k (vgl. Figur 2) an einem ADC-Pin zur Verfügung zu stellen. Dies wäre jedoch in nachteiliger Weise mit einer verringerten Messgeschwindigkeit, einer verringerten Messgenauigkeit und einer erhöhten Störungsanfälligkeit verbunden.

[0044] Figur 7 zeigt anhand eines Ablaufdiagramms eine Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben eines Ultraschallgenerators, insbesondere des Ultraschallgenerators 2 gemäß Figur 2, zur Hochfrequenz (HF)-Energieversorgung eines Ultraschallwandlers, insbesondere des Ultraschallwandlers 3 gemäß Figur 2, wobei das Verfahren vorzugsweise in dem bzw. auf Veranlassung des Prozessors 2k abläuft.

[0045] Das Verfahren beginnt mit Schritt S100, beispielsweise indem eine Bedienperson das Ultraschallsystem 1 bzw. den Ultraschallgenerator 2 gemäß Figur 2 in Betrieb nimmt. Anschließend erfolgt in einem Verfahrensschritt S102 eine Bestimmung der Bandbreite des Ultraschallsystems. Hierunter ist im Rahmen der vorliegenden Beschreibung zu verstehen, dass der (Frequenz-)Abstand zwischen Parallelresonanz PR und Serienresonanz SR (vgl. Figur 1, Figur 2) des angeschlos-

senen Ultraschallwandlers bzw. Schwingensystems ermittelt wird. Das System bleibt im späteren Betrieb auf diesen Bereich beschränkt, um keine unerwünschten Nebenresonanzen des Schwingensystems anzuregen. Vorteilhafterweise erfolgt die Bestimmung der Bandbreite dergestalt, dass der Abstand zwischen Parallelresonanz und Serienresonanz des Schwingensystems durch Frequenzänderung des Erregersignals und Ermitteln der Nulldurchgänge des Phasendifferenzsignals bestimmt wird, insbesondere mittels eines Vorab-Scans mit relativ niedriger Leistung. Die Nulldurchgänge ND1, ND2 (vgl. Figur 1) der Phasendifferenz bzw. des zugehörigen Phasendifferenzsignals lassen sich bestimmen, wie weiter oben anhand von Figur 6 bereits grundsätzlich besprochen. Die Frequenzen der genannten Nulldurchgänge hängen von der Art des angeschlossenen Ultraschallwandlers bzw. Schwingensystems ab und sind im Anschluss an Schritt S102 beim Betrieb des Ultraschallgenerators im Wesentlichen bekannt.

[0046] Anschließend erfolgt in Schritt S104 die Einstellung der Regelungsfeinheit der Frequenzregelungseinheit. Hierunter wird verstanden, dass bei einem relativ geringen Abstand der Nulldurchgänge bzw. Resonanzpunkte, d.h. einem relativ steilen Verlauf der Impedanzkurve im Bereich zwischen ND1 und ND2 (vgl. Figur 1) ein relativ feiner Regler benötigt wird, so dass im Rahmen der vorliegenden Erfindung eine entsprechende Einstellung der Frequenzregelungseinheit 2h (vgl. Figur 2) erfolgt. Wenn dagegen die Resonanzpunkte relativ weit auseinanderliegen, was einem flachen Verlauf der Impedanzkurve in dem genannten Bereich entspricht, kann ein entsprechend gröberer Regler zum Einsatz kommen.

[0047] Danach wird in Schritt S106 die Startfrequenz zum Anregen des Schwingensystems aufgesucht. Diese Startfrequenz wird vorzugsweise derart eingestellt, dass auf die ermittelte Frequenz der Parallelresonanz des Schwingensystems geregelt wird, bei der die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung Null wird. Gemäß der Darstellung in Figur 6 lässt sich dieser Punkt anhand der Phasensignale für $\Delta t=0$ ($Dt=0$) ermitteln. Damit das Aufsuchen der Startfrequenz möglichst wenig Zeit beansprucht, ist es weiterhin vorteilhaft, wenn bekannte (elektrische oder elektro-mechanische) Eigenschaften des Ultraschallwandlers oder des Schwingensystems mitberücksichtigt werden, so dass die Startfrequenz bereits grob voreingestellt werden kann.

[0048] In Schritt S108 erfolgt eine Abfrage dahingehend, ob die gewünschte Startfrequenz bereits gefunden wurde. Wird die Abfrage in Schritt S108 verneint (-), wird das Verfahren mit Schritt S106 fortgeführt. Wird die Abfragen in Schritt 108 bejaht (+), so erfolgt anschließend die Beaufschlagung des Schwingensystems in Schritt S110 mit der Startfrequenz. Da die Startfrequenz - wie ausgeführt - im Wesentlichen mit der Frequenz der Parallelresonanz des Schwingensystems übereinstimmt, ist die Impedanz des Schwingensystems gemäß Figur 1 relativ hochohmig, so dass nur wenig Leistung abgegeben wird und die Amplitude der mechanischen Schwingung klein ist.

Es ist aus Gründen der Betriebssicherheit und der Haltbarkeit des Systems wünschenswert, wenn die erste Beaufschlagung des Schwingensystems bei dessen Parallelresonanz erfolgt. Anschließend wird in Schritt S112 die Leistung gemäß Benutzervorgabe angepasst bzw. erhöht, insbesondere durch Erhöhung der angelegten Spannung und/oder Stromstärke. Danach wird in Schritt S114 im Zuge eines so genannten Frequency Shifting die Erregungsfrequenz an die Frequenz der Serienresonanz SR (vgl. Figur 1) angenähert, was ausgehend von der Parallelresonanz PR regelmäßig mit einer Verringerung der Erregungsfrequenz verbunden ist. Dies geschieht solange, bis der gewünschte Arbeitspunkt des Ultraschallsystems erreicht ist. Dies ist gleichbedeutend damit, dass das Ultraschallsystem in dem Arbeitspunkt die gewünschte Ausgangsleistung bzw. Schwingungsamplitude liefert. Die entsprechenden Werte können von einer Bedienperson an dem Ultraschallgenerator 2 (vgl. Figur 2) vorgegeben werden und bilden entsprechende Soll-Werte bzw. Soll-Größen für die Frequenzregelungseinheit 2h.

[0049] Entsprechend erfolgt in Schritt S116 eine Abfrage dahingehend, ob der gewünschte Arbeitspunkt (Regelungssollwert) bereits erreicht ist. Wird diese Abfrage verneint (-), kehrt das Verfahren nach Schritt S114 zurück. Falls die Abfrage in Schritt S116 bejaht wird (+), wird die eingestellte Frequenz gemäß Schritt S118 beibehalten, und das Ultraschallgerät wird an dem ausgewählten Arbeitspunkt betrieben.

[0050] Wie der Fachmann erkennt, kann im Zusammenhang mit Schritt S118 selbstverständlich vorgesehen sein, dass bei Veränderung sonstiger Systemparameter eine Nachregelung der Frequenz erfolgt, beispielsweise wenn bei auftretenden Erwärmungen des Systems nachgeregelt wird, was in der Regel eine Verschiebung des Arbeitspunktes hin zu niedrigeren Frequenzen (nach links in Figur 1) zur Folge hat.

[0051] Das Absenken der Frequenz im Zusammenhang mit Verfahrensschritt S114 beinhaltet, dass die Frequenz nicht auf Werte unterhalb der Serienresonanzfrequenz abgesenkt wird, damit keine unerwünschten Nebenresonanzen des Schwingensystems angeregt werden.

[0052] Das Verfahren endet im Anschluss an Schritt S118 mit Schritt S120. Wie bereits ausgeführt wurde, besteht grundsätzlich und abweichend vom Vorstehenden auch die Möglichkeit, die Startfrequenz auf die ermittelte Frequenz der Serienresonanz einzustellen und dann die Frequenz zu erhöhen, oder direkt eine Frequenz im Arbeitsbereich (Phase größer Null) aufzuschalten.

[0053] Unter erneuter Bezugnahme auf Figur 2 soll nun noch auf den gestrichelten Doppelpfeil im unteren linken Bereich der Darstellung eingegangen werden. Dieser mit dem Bezugszeichen P bezeichnete Doppelpfeil symbolisiert eine bevorzugte weitere Ausgestaltung des Prozessors oder der Prozessoreinheit 2k, welche als "intelligente" Einheit (künstliche Intelligenz) oder in Form eines Expertensystems ausgebildet sein kann, um durch

eine Modellbildung zusätzliche Informationen betreffend das Schwingungs- bzw. Impedanzverhalten des Ultraschallwandlers 3 bzw. des Schwingensystems bereitzustellen. Insbesondere kann die Prozessoreinheit 2k in diesem Zusammenhang dazu ausgebildet sein, bestimmte gemessene Verhaltensparameter des Ultraschallwandlers aufzuzeichnen und auszuwerten und daraus Annahmen für einen späteren erneuten Betrieb des Ultraschallsystems 1 abzuleiten. Insbesondere können solche Voraussagen dazu dienen, die weiter oben erwähnte Startfrequenz möglichst genau vorzugeben, um das anfängliche Einregeln des Ultraschallgenerators 3 abzukürzen.

[0054] Figur 8 zeigt anhand eines Ablaufdiagramms eine andere Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben eines Ultraschallgenerators, insbesondere des Ultraschallgenerators 2 gemäß Figur 2, zur Hochfrequenz (HF)-Energieversorgung eines Ultraschallwandlers, insbesondere des Ultraschallwandlers 3 gemäß Figur 2, wobei das Verfahren vorzugsweise in dem bzw. auf Veranlassung des Prozessors 2k abläuft.

[0055] Das Verfahren beginnt mit Schritt S200, beispielsweise indem eine Bedienperson das Ultraschallsystem 1 bzw. den Ultraschallgenerator 2 gemäß Figur 2 in Betrieb nimmt. Anschließend folgt bei Bezugszeichen S202 ein Messschritt, um die für die Regelung des Systems benötigten physikalischen bzw. elektrischen Kenngrößen zu bestimmen, insbesondere unter Verwendung der bereits anhand von Figur 2 erläuterten Messmittel 2g, 2j. Gemessen werden in diesem Zusammenhang insbesondere die HF-Stromstärke und die HF-Spannung, woraus sich die HF-Leistung (durch Produktbildung) und die Phase, d.h. die relative Phasenlage bzw. Phasendifferenz zwischen HF-Strom und HF-Spannung ermittelbar sind.

[0056] In Figur 8 bezeichnet der dort aufgeführte Begriff "Phase" wiederum die Phase der Impedanz. Die "Frequenzänderung" erfolgt fallspezifisch, wie weiter oben bereits detailliert erläutert, ebenso die "Frequenzregelung". Unter "Leistungsbegrenzung" wird eine Vorgabe der maximal zulässigen Leistung durch das Gerät oder durch den Anwender verstanden. "Istwert" und "Sollwert" stehen für entsprechende Werte für Leistung oder Amplitude - je nach Anwendungsfall. Beispielsweise kann für Ultraschallreinigungsanwendungen die Leistung der entscheidende Parameter sein, während Schweißanwendungen eher auf die Amplitude der Schwingung abstellen.

[0057] Im nachfolgenden Verfahrensschritt S204 erfolgt eine Abfrage dahingehend, ob der gemessene HF-Strom über einem vorgegebenen Schwellwert "Überschwellenwert" liegt. Wird die Abfrage in S204 bejaht, wird zum Schützen des Systems im Zuge einer Schutzfunktion der Generator abgeschaltet (Schritt S206).

[0058] Wird die Abfrage in Schritt S204 verneint, so erfolgt in einem nachfolgenden Schritt S208 eine Abfrage dahingehend, ob die in dem Schwingensystem wirksame Leistung größer als eine vorgegebene maximale Leistung ist. Wird die Abfrage in Schritt S208 bejaht, so er-

folgt in Schritt S210 eine weitere Abfrage dahingehend, ob der Phasenunterschied zwischen HF-Strom und HF-Spannung kleiner Null ist. Wird die Abfrage in Schritt S210 verneint, erfolgt in Schritt S212 eine Regelung über die Frequenz in Verbindung mit einer Leistungsbegrenzung zum Auffinden der Parallelresonanz, und das Verfahren kehrt nach Schritt S202 zurück. Wird die Abfrage in Schritt S210 bejaht, erfolgt in Schritt S214 eine PWM-Regelung zur Leistungsreduzierung und einer Phasenregelung zum Erreichen einer Phasendifferenz von 0° (Parallelresonanz). Bei der Parallelresonanz ist das System besonders hochohmig, weshalb die erforderliche Leistungsreduzierung über die Pulsbreitenanpassung des Erregersignals erfolgt (vor der Anpassung kann das Erregersignal ein An-aus-Verhältnis von 1-zu-1 aufweisen, nach Leistungsreduzierung entsprechend weniger. Das Verfahren kehrt anschließend ebenfalls nach Schritt S202 zurück.

[0059] Wird die Abfrage in Schritt S208 verneint, erfolgt in Schritt S216 eine weitere Abfrage dahingehend, ob die Phasendifferenz zwischen HF-Strom und HF-Spannung kleiner Null ist. Wird diese Abfrage bejaht, erfolgt in Schritt S218 eine Frequenzänderung. Anschließend kehrt das Verfahren nach Schritt S202 zurück.

[0060] Wird die Abfrage in Schritt S216 verneint, erfolgt in Schritt S220 eine weitere Abfrage dahingehend, ob die Phasendifferenz zwischen HF-Strom und HF-Spannung gleich Null ist und ob ein Istwert der Leistung/Amplitude kleiner als ein entsprechender Sollwert ist. Diese Werte kann der Anwender vorgeben, oder sie sind im Gerät fest eingestellt. Wird die Abfrage in Schritt S220 bejaht, erfolgt in Schritt S222 eine Frequenzregelung auf eine Phasendifferenz von Null, und das Verfahren kehrt nach Schritt S202 zurück.

[0061] Wird die Abfrage in Schritt S220 verneint, erfolgt in Schritt S224 eine Frequenzregelung auf einen Sollwert für Leistung/Amplitude, und das Verfahren kehrt nach Schritt S202 zurück.

[0062] Die Betrachtung der vorstehend erwähnten Phasendifferenz zwischen HF-Strom und HF-Spannung ist gleichbedeutend mit einer Betrachtung der Phase der komplexen Impedanz des mehrfach angesprochenen Schwingkreises, der sich aus dem generatoreigenen Anpassnetzwerk und dem angeschlossenen Ultraschallwandler ergibt.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Ultraschallgenerators (2) zur HF-Energieversorgung eines Ultraschallwandlers (3), insbesondere zum Ultraschallschweißen oder zur Ultraschallreinigung, welcher Ultraschallgenerator wenigstens einen elektrisch mittels eines Erregersignals mit einer Erregungsfrequenz (f) erregbaren Schwingkreis (2e) aufweist, der in elektrischer Wirkverbindung mit wenigstens einem elektro-mechanischen Schwingssystem des Ultra-

schallwandlers steht, dessen Impedanz bei einer Parallelresonanz des Schwingensystems ein Betragsmaximum (PR) und bei einer Serienresonanz des Schwingensystems ein Betragsminimum (SR) aufweist,

dadurch gekennzeichnet, dass

a) in dem Schwingkreis (2e), vorzugsweise vor einer darin enthaltenen Paralleldrossel (2f), zumindest beim Anschwingen des Schwingensystems mit einer anfänglichen Erregungsfrequenz (f) die Phasendifferenz ($\Delta\phi$) zwischen Strom und Spannung des Erregersignals bestimmt und zur Frequenzregelung des Ultraschallgenerators (2) verwendet wird;

b) in Abhängigkeit von der bestimmten Phasendifferenz ($\Delta\phi$) bei einer Phasendifferenz $< 0^\circ$ die anfängliche Erregungsfrequenz (f) derart in ihrer Frequenz geregelt wird, dass bei Erreichen einer Startfrequenz des Erregersignals die Phasendifferenz ($\Delta\phi$) im Wesentlichen Null wird und die Impedanz des Schwingensystems sich ihrem Betragsminimum (SR) oder ihrem Betragsmaximum (PR) annähert;

c) das Schwingensystem bei der Startfrequenz zu Ultraschallschwingungen angeregt wird und

d) die Erregungsfrequenz zur Amplituden- oder Leistungsanpassung des Schwingensystems derart geregelt wird, dass die Phase ($\Delta\phi$) der Impedanz des Schwingensystems $> 0^\circ$ ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet, dass

das Schwingensystem im Anschluss an Schritt d) in einem Arbeitspunkt zwischen Parallelresonanz (PR) und Serienresonanz (SR) des Schwingensystems betrieben wird, wobei vorzugsweise der Arbeitspunkt in Abhängigkeit von einer Benutzervorgabe verschoben wird, höchst vorzugsweise in Richtung der Serienresonanz (SR) für größere Schwingungsamplitude und/oder für größere Schwingungsleistung oder in Richtung der Parallelresonanz (PR) für kleinere Schwingungsamplitude und/oder für kleinere Schwingungsleistung.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,

dadurch gekennzeichnet, dass,

vorzugsweise vor dem Anregen des Schwingensystems in Schritt c), der Abstand zwischen Parallelresonanz (PR) und Serienresonanz (SR) des Schwingensystems durch Frequenzänderung des Erregersignals und Ermitteln von Frequenzwerten (ND1, ND2) mit verschwindender Phasendifferenz ($\Delta\phi$) zwischen Strom und Spannung des Erregersignals bestimmt wird, vorzugsweise mittels eines Vorab-Scans bei relativ niedriger Leistung, und beim Anregen des Schwingensystems während Schritt c) und Schritt d) als Regelgrundlage für die Frequenz-

regelung des Ultraschallgenerators (2) verwendet wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3,
dadurch gekennzeichnet, dass 5
der Abstand als Einflussgröße bei der Einstellung einer Feinheit der Frequenzregelung des Ultraschallgenerators (2) verwendet wird.
5. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 4, 10
dadurch gekennzeichnet, dass
die anfängliche Erregungsfrequenz (f), vorzugsweise in Schritt a), anhand bekannter, vorzugsweise elektrischer oder mechanischer Parameter des Schwingensystems im Wesentlichen auf die Startfrequenz des Erregungssignals eingestellt wird. 15
6. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 5, 20
dadurch gekennzeichnet, dass
die Startfrequenz vorab vorzugsweise durch Ermitteln des Frequenzwerts (ND2) mit verschwindender Phasendifferenz ($\Delta\varphi$) zwischen Strom und Spannung des Erregersignals bei der Parallelresonanz (PR) bestimmt wird, höchst vorzugsweise mittels eines Vorab-Scans bei relativ niedriger Leistung, und die anfängliche Erregungsfrequenz anschließend im Wesentlichen auf die vorab bestimmte Startfrequenz des Erregungssignals eingestellt wird. 25 30
7. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 6, 35
dadurch gekennzeichnet, dass,
vorzugsweise nach vorheriger Verringerung der Erregungsfrequenz, die Erregungsfrequenz festgehalten wird, sobald das Minimum (SR) der Impedanz bei der Serienresonanz des Schwingensystems erreicht wurde, oder dass, 40
vorzugsweise nach vorheriger Erhöhung der Erregungsfrequenz, die Erregungsfrequenz festgehalten wird, sobald das Maximum (PR) der Impedanz bei der Parallelresonanz des Schwingensystems erreicht wurde. 45
8. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 7, 50
dadurch gekennzeichnet, dass
zusätzlich zu der Phasendifferenz ($\Delta\varphi$) wenigstens eine der Größen HF-Stromstärke, Blindleistung und Wirkleistung im Schwingkreis (2e) gemessen und als Regelgröße für die Frequenzregelung verwendet wird.
9. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 8, 55
dadurch gekennzeichnet, dass
zusätzlich noch wenigstens eine Eigenschaft, vor-

zugsweise Spannung und/oder Stromstärke, eines primären elektrischen Energieversorgungssignals zur Erzeugung des Erregersignals gemessen und als Regelgröße für die Frequenzregelung und/oder für eine Schutzfunktion für Komponenten (2c) des Ultraschallgenerators (2) verwendet wird.

10. Ultraschallgenerator (2) zur HF-Energieversorgung eines Ultraschallwandlers (3), insbesondere zum Ultraschallschweißen oder zur Ultraschallreinigung, mit wenigstens einem mittels eines Erregersignals mit einer Erregungsfrequenz (f) elektrisch erregbaren Schwingkreis (2e), der mit wenigstens einem elektro-mechanischen Schwingensystem eines Ultraschallwandlers in elektrischer Wirkverbindung kopplbar ist, dessen Impedanz bei einer Parallelresonanz des Schwingensystems ein Betragsmaximum (PR) und bei einer Serienresonanz des Schwingensystems ein Betragsminimum (SR) aufweist, **gekennzeichnet durch**

a) in dem Schwingkreis (2e), vorzugsweise vor einer darin enthaltenen Paralleldrossel (2f), angeordnete erste Messmittel (2g), die dazu ausgebildet sind, die Phasendifferenz ($\Delta\varphi$) zwischen Strom und Spannung des Erregersignals zu bestimmen und die dazu vorgesehen sind, entsprechende Messsignale, vorzugsweise ein entsprechendes Phasendifferenzsignal, an einer Frequenzregelungseinheit (2h) des Ultraschallgenerators (2) bereitzustellen;

b) in der Frequenzregelungseinheit (2h) vorgesehene Frequenzregelmittel (2h1-2h3), die dazu ausgebildet sind, in Abhängigkeit von der bestimmten Phasendifferenz ($\Delta\varphi$) bei einer Phasendifferenz $< 0^\circ$ die Erregungsfrequenz derart in ihrer Frequenz (f) zu regeln, dass bei Erreichen einer Startfrequenz des Erregungssignals die Phasendifferenz ($\Delta\varphi$) im Wesentlichen Null wird und die Impedanz des Schwingensystems sich ihrem Betragsminimum (SR) oder ihrem Betragsmaximum (PR) annähert; wobei

c) die Frequenzregelmittel (2h1-2h3) weiterhin dazu ausgebildet sind, zur Amplituden- oder Leistungsanpassung des Schwingensystems die Erregungsfrequenz (f) derart zu regeln, dass die Phase ($\Delta\varphi$) der Impedanz des Schwingensystems im Betrieb des Ultraschallwandlers (3) $> 0^\circ$ ist.

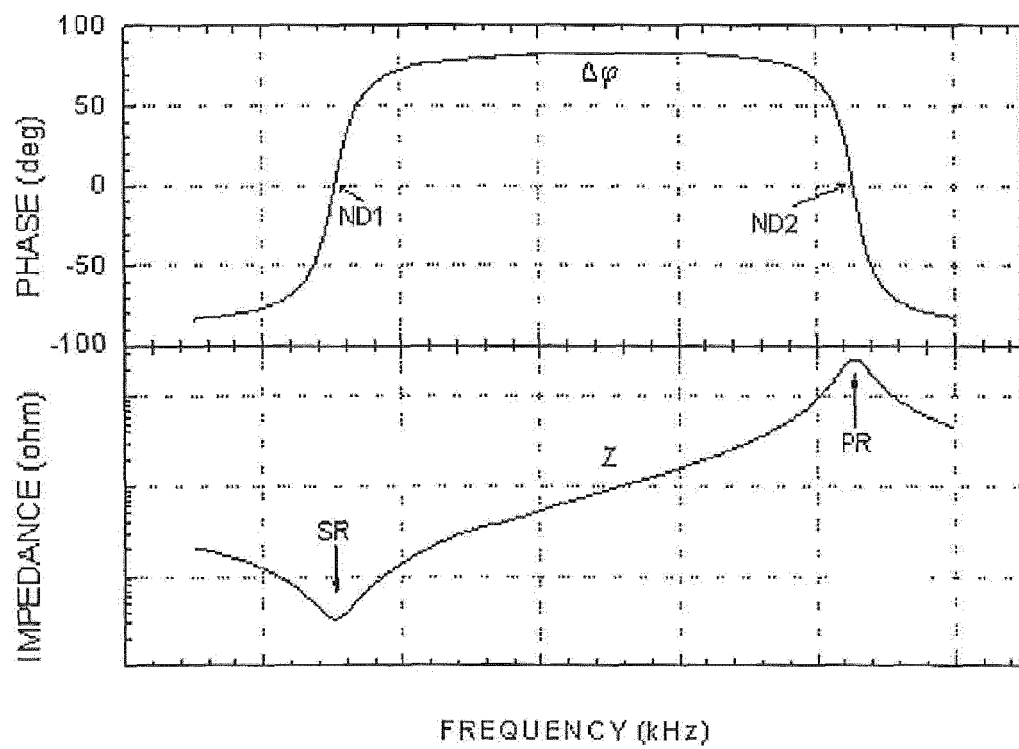
11. Ultraschallgenerator (2) nach Anspruch 10, **gekennzeichnet durch**
zweite Messmittel (2j) in elektrischer Wirkverbindung mit einer primären elektrischen Energieversorgungseinheit (2b) zur Erzeugung des Erregersignals, welche zweite Messmittel dazu ausgebildet sind, wenigstens eine Eigenschaft, vorzugsweise Spannung und/oder Stromstärke, eines von der Energieversorgungseinheit erzeugten primären elektri-

schen Energieversorgungssignals zu bestimmen und zu der Frequenzregelungseinheit (2h) des Ultraschallgenerators (2) rückzukoppeln und/oder für eine Schutzfunktion zum Schützen von Komponenten (2c) des Ultraschallgenerators (2) zu verwenden.

12. Ultraschallgenerator (2) nach Anspruch 10 oder 11, **gekennzeichnet durch** eine erste Einrichtung zum insbesondere automatischen Ermitteln des Abstands zwischen Parallelresonanz (PR) und Serienresonanz (SR) des Schwingensystems **durch** Frequenzänderung des Erregersignals, vorzugsweise anhand von Frequenzwerten (ND1, ND2) mit verschwindender Phasendifferenz ($\Delta\phi$) zwischen Strom und Spannung des Erregersignals und höchst vorzugsweise vor dem Anregen des Schwingensystems mittels eines Vorab-Scans bei relativ niedriger Leistung, welcher Abstand als Regelgrundlage für die Frequenzregelung des Ultraschallgenerators (2) verwendbar ist, insbesondere als Einflussgröße bei der Einstellung der Frequenzregelungseinheit (2h) des Ultraschallgenerators (2); und/oder eine zweite Einrichtung zum insbesondere automatischen Ermitteln der Startfrequenz, vorzugsweise anhand des Frequenzwerts (ND2) mit verschwindender Phasendifferenz ($\Delta\phi$) zwischen Strom und Spannung des Erregersignals bei der Parallelresonanz (PR) und höchst vorzugsweise mittels eines Vorab-Scans bei relativ niedriger Leistung, so dass die anfängliche Erregungsfrequenz anschließend im Wesentlichen auf die vorab bestimmte Startfrequenz des Erregungssignals einstellbar ist.
13. Ultraschallgenerator (2) nach mindestens einem der Ansprüche 10 bis 12, **gekennzeichnet durch** weitere Messmittel (2j2-2j3) zur Bestimmung wenigstens einer der Größen HF-Stromstärke, Blindleistung und Wirkleistung im Schwingkreis, welche Messmittel in elektrischer Wirkverbindung mit der Frequenzregelungseinheit (2h) des Ultraschallgenerators (3) stehen, um die genannten Größen als weitere Regelgrößen für die Frequenzregelung zu verwenden.
14. Ultraschallgenerator (2) nach mindestens einem der Ansprüche 10 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Frequenzregelungseinheit (2h) kaskadiert (2h1-2h3) aufgebaut ist.
15. Ultraschallgenerator (2) nach mindestens einem der Ansprüche 10 bis 14, **gekennzeichnet durch** eine Intelligenzeinheit (2k) oder ein Expertensystem in signaltechnischer Wirkverbindung mit der Frequenzregelungseinheit (2h) oder als zu der Fre-

quenzregelungseinheit übergeordnete Einheit.

16. Ultraschallsystem (1), aufweisend wenigstens einen Ultraschallgenerator (2) nach mindestens einem der Ansprüche 10 bis 15 in Wirkverbindung mit wenigstens einem Ultraschallwandler (3), welcher Ultraschallwandler (3) oder dessen elektro-mechanisches Schwingensystem in seiner Impedanz (Z) in Abhängigkeit von der Erregungsfrequenz (f) eine Parallelresonanz (PR) und eine Serienresonanz (SR) aufweist.

**Fig. 1**

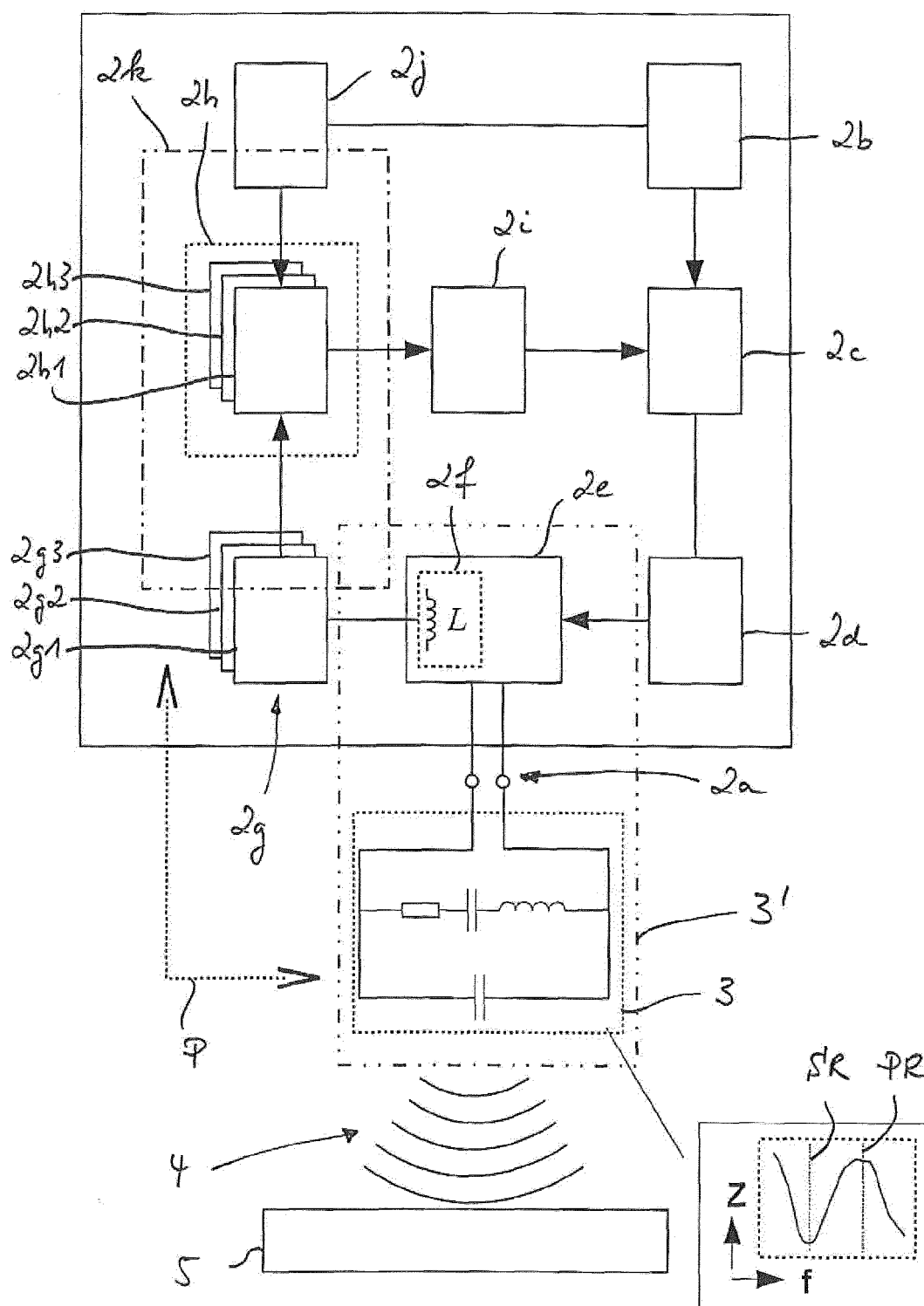


Fig. 2

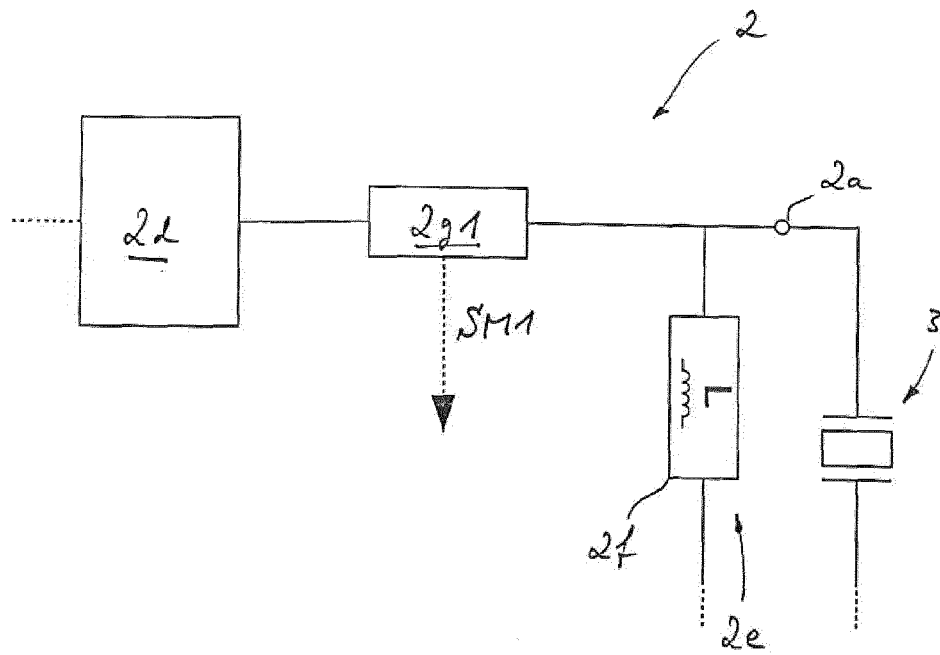


Fig. 3

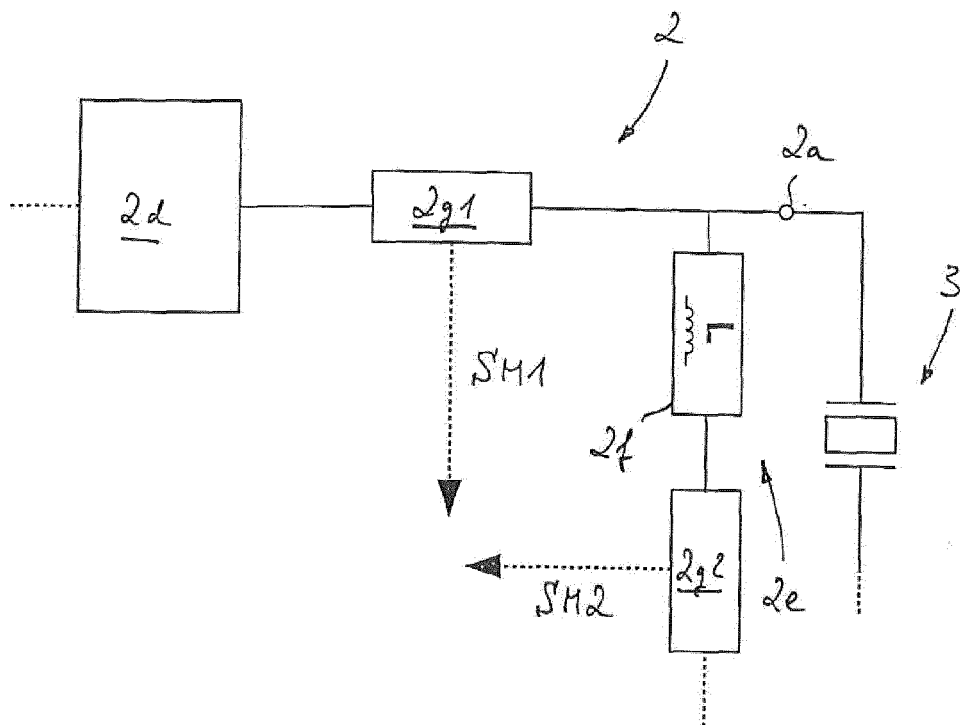


Fig. 4

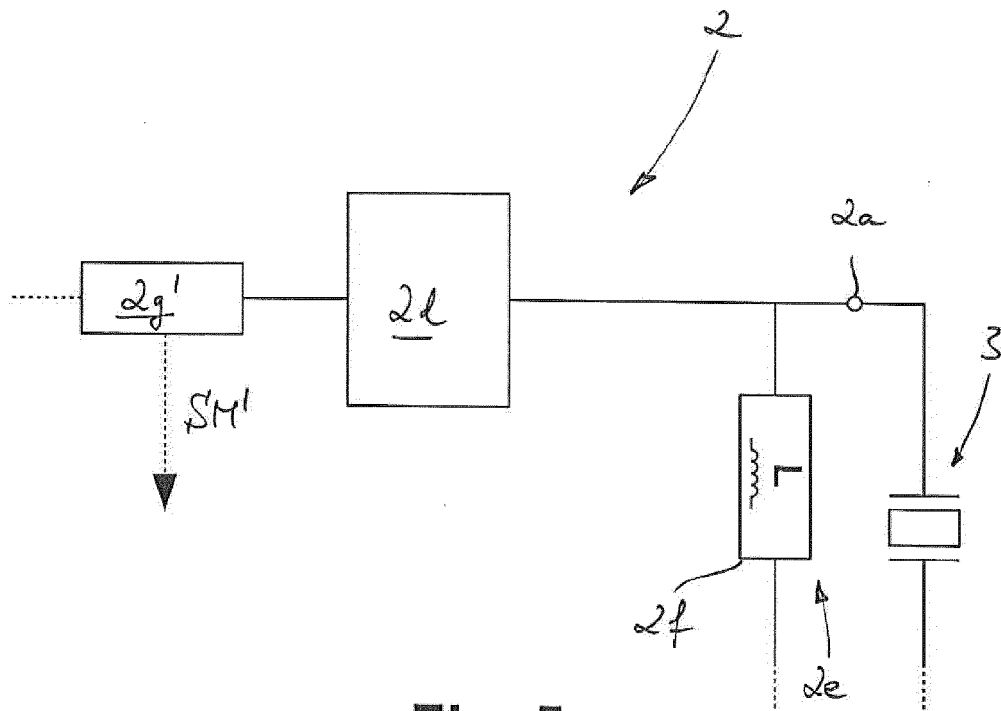


Fig. 5

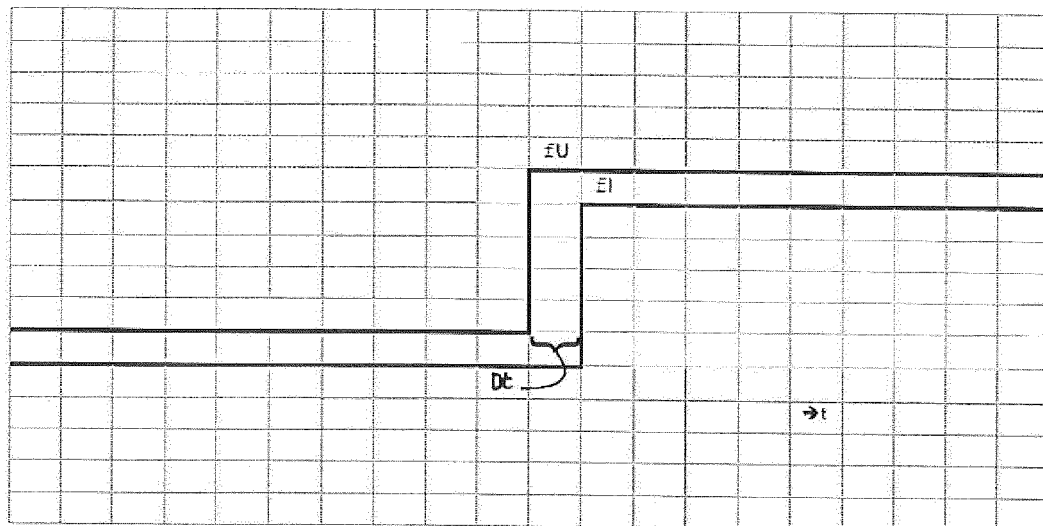


Fig. 6

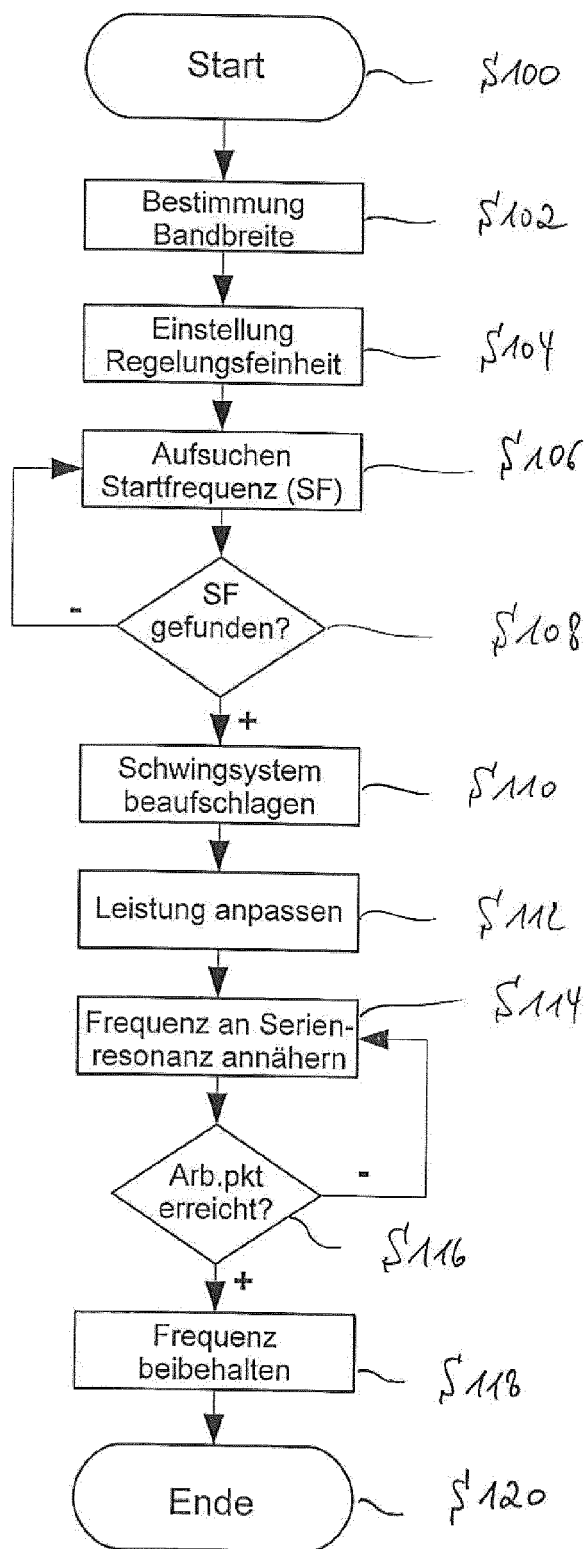


Fig. 7

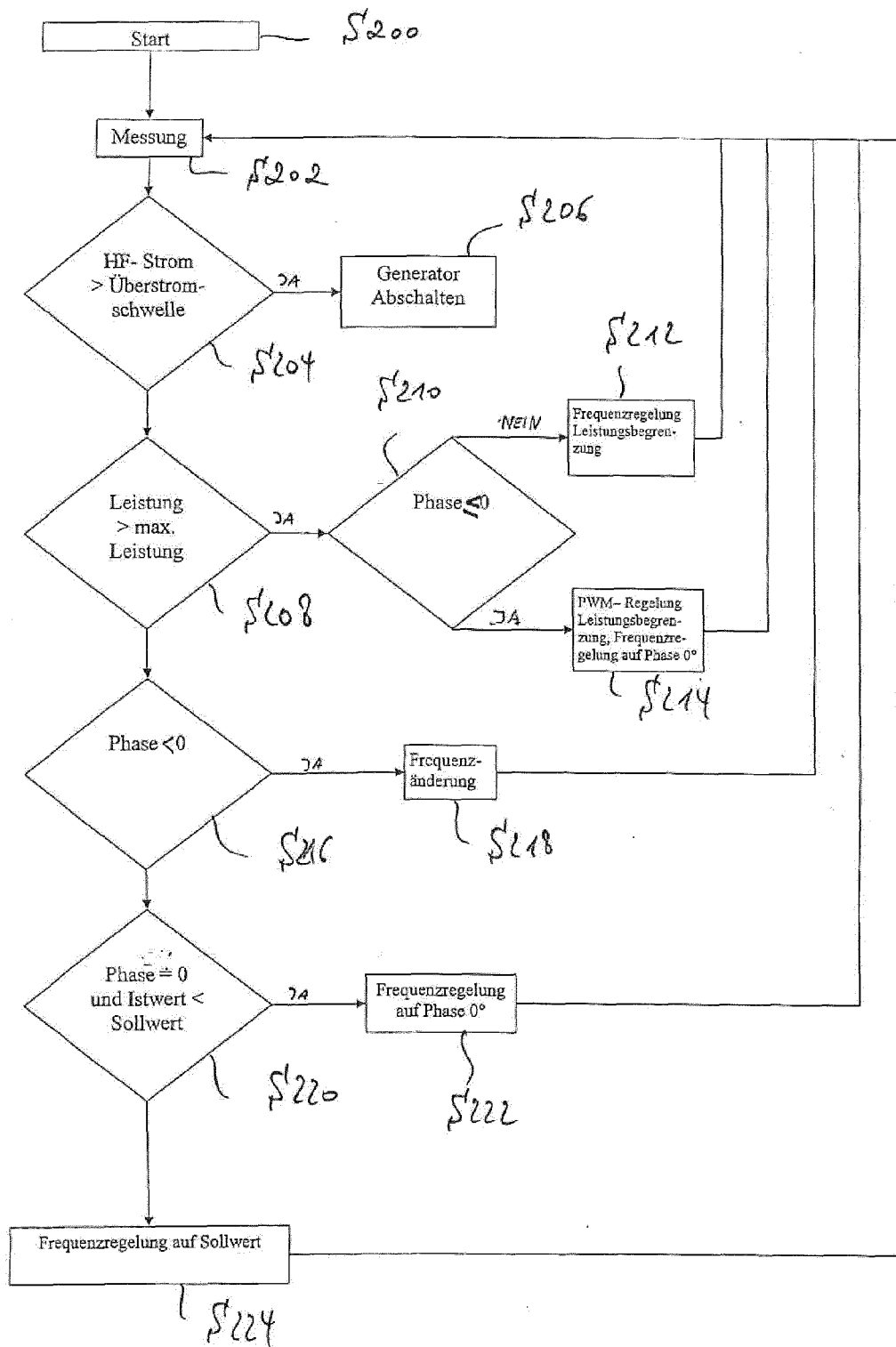


Fig. 8

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 0662356 B1 [0004] [0016]
- US 7475801 B2 [0005]
- DE 102010004468 A1 [0005]