



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
24.01.2007 Patentblatt 2007/04

(51) Int Cl.:
F23M 13/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **06117462.9**

(22) Anmeldetag: **19.07.2006**

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

(71) Anmelder: **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**
51147 Köln (DE)

(72) Erfinder: **Faragó, Zoltán**
74747, Ravenstein (DE)

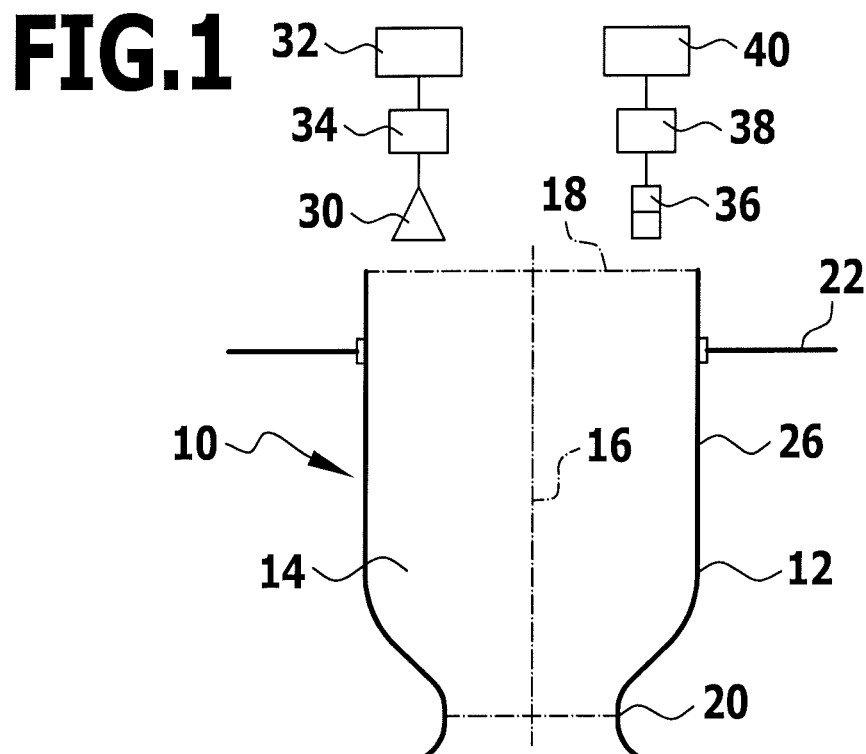
(30) Priorität: **20.07.2005 DE 102005035085**

(74) Vertreter: **Hoeger, Stellrecht & Partner**
Patentanwälte
Uhlandstrasse 14 c
70182 Stuttgart (DE)

(54) **Verfahren zur Einstellung der akustischen Eigenschaften einer Brennkammer**

(57) Um ein Verfahren zur Einstellung der akustischen Eigenschaften einer Brennkammer, bei dem die Brennkammer mit mindestens einem akustischen Resonator als Dämpfungselement versehen wird, bereitzustellen, wird vorgeschlagen, eine erste Eigenmode einer

Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination unterhalb der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer und einer zweiten Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination oberhalb der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer bezüglich Intensität und/oder Halbwertsbreite zu vergleichen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Einstellung der akustischen Eigenschaften einer Brennkammer, bei dem die Brennkammer mit mindestens einem akustischen Resonator als Dämpfungselement versehen wird.

[0002] In oder an Brennkammer, insbesondere für Flugkörper wie Raketen, können oszillierende Teilvorgänge der Verbrennung stattfinden. Die Brennstoffzufuhr kann oszillieren, die Mischungsbildung von Brennstoff und Oxidator kann oszillieren und die chemischen Reaktionen in der Brennkammer können oszillieren. Bei Flüssigbrennstoff oder bei einem gelförmigen Treibstoff kann die Zerstäubung und Verdampfung Oszillationen aufweisen.

[0003] Die Brennkammer selbst ist ein Hohlkörper, welcher akustische Eigenmoden aufweist. Es ist grundsätzlich möglich, dass eine akustische Kopplung der beschriebenen oszillierenden Vorgänge mit Eigenmoden der Brennkammer erfolgen kann. Dadurch können Druckpulsationen entstehen, die beispielsweise zur Beschädigung der Brennkammer führen können oder die Verbrennung stören können. Es ist dabei sogar möglich, dass die Verbrennung erlischt.

[0004] Bei einer Störung der Verbrennung tritt üblicherweise eine Leistungsminderung auf. Es besteht auch die Gefahr, dass die Betriebssicherheit erniedrigt wird und die Lebensdauer erniedrigt wird. Es kann auch eine Erhöhung der Schadstoffbelastung und der Schallbelastung auftreten.

[0005] Die akustischen Eigenschaften einer Brennkammer lassen sich durch das Vorsehen von einem oder mehreren akustischen Resonatoren als Dämpfungselemente beeinflussen. Diese akustischen Resonatoren können an Eigenmoden der Brennkammer koppeln, um so Eigenmoden in unkritische Frequenzbereiche verschieben zu können bzw. störende Eigenmoden dämpfen zu können.

[0006] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art bereitzustellen, mit dem sich auf schnelle und einfache Weise akustische Eigenschaften einer Brennkammer einstellen lassen.

[0007] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass eine akustische Eigenmode einer Ausgangs-Brennkammer bestimmt wird, der akustische Resonator derart gewählt oder eingestellt wird, dass er eine Resonanz im Bereich der Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer aufweist, aus der Ausgangs-Brennkammer und dem akustischen Resonator eine Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination gebildet wird, welche akustisch angeregt wird und das resultierende Frequenzspektrum aufgenommen wird, eine erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination unterhalb der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer mit einer zweiten Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination oberhalb der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer bezüglich Intensität und/oder Halbwertsbreite verglichen wird, und der Resonator modifiziert wird, sofern notwendig, und zwar derart, dass die erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination und die zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination mindestens näherungsweise die gleiche Intensität und/oder Halbwertsbreite im Frequenzspektrum aufweisen.

[0008] Der Erfindung liegt die Beobachtung zugrunde, dass bei einer optimalen Resonatorlänge besondere Symmetrien vorliegen. Das Vorliegen dieser Symmetrien wird dazu genutzt, den akustischen Resonator derart einzustellen, dass die erste Eigenmode und die zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination mit gleicher Intensität und/oder Halbwertsbreite liegen. Dadurch lässt sich mit wenigen Messungen eine gezielte Resonatoreinstellung erreichen.

[0009] Die Ausgangs-Brennkammer kann eine Brennkammer sein, welche bereits mit einem oder mehreren definiert eingestellten oder gewählten Resonatoren versehen ist. Die Einstellung lässt sich für eine vorgegebene akustische Eigenmode durchführen. Insbesondere lässt es sich für eine Mehrzahl von unterschiedlichen akustischen Eigenmoden durchführen.

[0010] Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass üblicherweise zwei oder drei Modifikationsvorgänge des akustischen Resonators genügen, um eine optimale Resonatoreinstellung bzw. Resonatorwahl zu erreichen. Das erfindungsgemäße Verfahren lässt sich deshalb auf einfache Weise mit verringertem Zeitaufwand durchführen. Es lässt sich eine definierte Einstellung der akustischen Eigenschaften der Brennkammer mit verringertem Zeitaufwand und verringertem Messaufwand durchführen.

[0011] Das erfindungsgemäße Verfahren beruht auf dem Effekt der "vermiedenen Kreuzung" bei bestimmten Anregungen der Ausgangs-Brennkammer und des akustischen Resonators. Wenn eine vermiedene Kreuzung vorliegt, dann liegen zwei Eigenmoden vor, die dicht beieinander liegen und gleiche Resonanzeigenschaften aufweisen; sie weisen insbesondere eine im Wesentlichen gleiche Intensität und Halbwertsbreite auf.

[0012] Eine vermiedene Kreuzung entsteht dann, wenn zwar die Resonanzbedingung bezüglich der Frequenz erfüllt ist, jedoch die Druckverteilung und die Geschwindigkeitsverteilung im Resonator und in der Brennkammer nicht zusammenpassen. So können beispielsweise die Resonanzfrequenzbedingungen für eine radiale Mode der Brennkammer und eine $\lambda/4$ -Oszillation eines angekoppelten Resonators erfüllt sein. Jedoch erfordert die $\lambda/4$ -Oszillation des Resonators einen Druckknoten an einer Resonatoröffnung in einem Innenraum der Brennkammer. Für die Radialmode ist dagegen ein Druckantiknoten an der Zylinderwand erforderlich.

[0013] Für eine tangentielle Mode erfordert die $\lambda/4$ -Oszillation des Resonators eine radiale Geschwindigkeitsfluktuation an der Mündung des Resonators in die Brennkammer, während die tangentielle Eigenmode der Brennkammer eine

azimutale Oszillation an der gleichen Stelle erfordert.

[0014] Durch die vermiedene Kreuzung entstehen zwei Eigenmoden, von denen die eine eine leicht niedrigere Frequenz hat als die Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer, und die andere eine leicht höhere Frequenz als die entsprechende Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer.

[0015] Insbesondere wird nach Modifikation der Resonators die Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination angeregt und das Frequenzspektrum aufgenommen. Darauf aufbauend kann, sofern nötig, eine weitere Modifikation des Resonators erfolgen. Insbesondere lässt sich diese Modifikation des Resonators derart gezielt durchführen, dass die Unterschiede in der Intensität und/oder in der Halbwertsbreite der ersten Eigenmode und der zweiten Eigenmode berücksichtigt werden.

[0016] Insbesondere wird die Resonatormodifikation und nachfolgende Frequenzspektrumsaufnahmen iterativ durchgeführt und zwar solange, bis die erste Eigenmode und die zweite Eigenmode mindestens näherungsweise die gleiche Intensität und/oder die gleiche Halbwertsbreite aufweisen. Es ist eine optimale Resonatoreinstellung erreicht.

[0017] Insbesondere wird als erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination diejenige gewählt, welche in der Eigenfrequenz unmittelbar unterhalb der Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer liegt.

[0018] Ebenfalls wird als zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination diejenige gewählt, welche in der Eigenfrequenz unmittelbar oberhalb der Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer liegt. Es lässt sich dadurch durch Anregung der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination auf der Eigenfrequenz der Ausgangs-Brennkammer eine Anregung der ersten Eigenmode und der zweiten Eigenmode erreichen.

[0019] Bei einer vorteilhaften Ausführungsform erfolgt die Anregung der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination auf der Eigenfrequenz oder in einem Bereich um die Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer. Dadurch lassen sich Eigenmoden der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination in der Nähe der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer anregen.

[0020] Es ist grundsätzlich möglich, dass die Anregung der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination breitbandig erfolgt, beispielsweise durch ein Rauschspektrum oder ein Sweep-Spektrum. Dadurch lassen sich Eigenmoden der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination um die Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer anregen.

[0021] Bei einer Ausführungsform wird zur Bestimmung der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer ein theoretischer Wert für die Eigenfrequenz ermittelt. Diese wird durch Lösung der entsprechenden Gleichungen mit Vorgabe der Randbedingungen bestimmt.

[0022] Günstig ist es, wenn die Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer durch Messung bestimmt wird. Dadurch lassen sich durch die Gleichungen nicht berücksichtigte Effekte wie beispielsweise auch nicht-lineare Effekte erfassen.

[0023] Es kann dabei vorgesehen sein, dass die Messung in einem Bereich um eine zuvor theoretisch bestimmten Wert durchgeführt wird. Dadurch lässt sich eine Bestimmung der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer mit weniger Aufwand durchführen.

[0024] Wenn die erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination eine höhere Intensität als die zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination aufweist, dann wird der Resonator so modifiziert (beispielsweise durch Einstellung oder Wahl eines anderen Resonators), dass er eine niedrigere Resonanzfrequenz aufweist. Dadurch lassen sich die Unterschiede in der Intensität und/oder in der Halbwertsbreite verringern. Es wird eine gezielte Modifikation durchgeführt; dadurch wiederum lässt sich der Messaufwand verringern.

[0025] Aus dem gleichen Grund ist es günstig, wenn der Resonator so modifiziert wird, dass er eine höhere Resonanzfrequenz aufweist, wenn die erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination eine niedrigere Intensität als die zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination aufweist.

[0026] Insbesondere erfolgt die Modifikation des Resonators durch Modifikation mindestens eines geometrischen Parameters. Der geometrische Parameter ist insbesondere eine Länge eines Resonatorraums. Die Länge des Resonatorraums kann dabei variabel einstellbar sein und/oder es werden fest eingestellte Resonatoren verwendet, wobei dann entsprechende Resonatoren gewählt werden.

[0027] Beispiele für einsetzbare akustische Resonatoren sind Lambda-Viertel-Resonatoren oder Helmholtz-Resonatoren. Ein Lambda-Viertel-Resonator ist über eine Röhre gebildet, welche zu dem Innenraum hin offen ist und zur anderen Seite hin abgeschlossen ist.

[0028] Ein Helmholtz-Resonator weist einen Halsbereich auf, auf den ein Fortsetzungsbereich mit größerem Durchmesser folgt.

[0029] Es kann insbesondere vorgesehen sein, dass eine Länge eines Resonatorraums einstellbar ist, beispielsweise über eine verschiebbliche Wand, welche insbesondere in der Art eines Kolbens an einer Spindel angeordnet sein kann. Es ist aber auch grundsätzlich möglich, dass ein Resonator eine feste Begrenzungswand aufweist.

[0030] Insbesondere weist der mindestens eine Resonator einen Resonatorraum auf, welcher in Verbindung mit einem Innenraum der Brennkammer steht. Dadurch kann eine Kopplung von Eigenmoden des Resonators mit Eigenmoden der Brennkammer erfolgen, um beispielsweise Eigenmoden der Brennkammer wegdämpfen zu können.

[0031] Insbesondere wird der mindestens eine Resonator an einer Außenseite der Ausgangs-Brennkammer positio-

niert. Dadurch ist eine Anordnung erreicht, über welche das akustische Verhalten der Brennkammer über den mindestens einen Resonator beeinflussbar ist, wobei die Störung der Verbrennung durch den akustischen Resonator minimiert ist.

[0032] Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn die anfängliche Wahl oder anfängliche Einstellung des Resonators derart erfolgt, dass ein oder mehrere Parameter so gewählt oder eingestellt werden, dass die Resonanzfrequenz des Resonators der Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer mindestens näherungsweise entspricht. Es hat sich gezeigt, dass bei dieser Wahl oder Einstellung nur wenige Modifikationsschritte des akustischen Resonators notwendig werden. Insbesondere kann sich die erste Eigenmode unterhalb und die zweite Eigenmode oberhalb der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer ausbilden.

[0033] Günstigerweise wird ein erstes Frequenzspektrum ermittelt, der Resonator modifiziert, mit modifiziertem Resonator ein zweites Frequenzspektrum ermittelt, und die nächste Resonatormodifikation erfolgt über Intrapolation oder Extrapolation. Aus den Intensitätsunterschieden der ersten Eigenmode und der zweiten Eigenmode im ersten Frequenzspektrum und im zweiten Frequenzspektrum lässt sich eine Resonatoreinstellung interpolieren oder extrapolieren. Dadurch lässt sich die Zahl der notwendigen Resonatormodifikationen minimieren.

[0034] Insbesondere wird ein drittes Frequenzspektrum mit der durch Intrapolation oder Extrapolation ermittelten Resonatormodifikation aufgenommen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass üblicherweise kein weiteres Frequenzspektrum mehr benötigt wird.

[0035] Günstigerweise weist die Brennkammer einen mindestens näherungsweise rotationssymmetrischen Innenraum auf. Dadurch liegen Symmetrien vor, die günstig für die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens sind.

[0036] Insbesondere werden der oder die Resonatoren außerhalb eines Innenraums der Brennkammer angeordnet, um die Verbrennungsvorgänge so wenig wie möglich zu beeinflussen.

[0037] Das Endergebnis des erfindungsgemäßen Verfahrens ist ein definiert gewählter oder definiert eingestellter Resonator, mit dem die vorgegebene Eigenmode wegdämpfbar ist bzw. so modifizierbar ist, dass sie Verbrennungsvorgänge nicht mehr stört.

[0038] Das erfindungsgemäße Verfahren lässt sich für eine Mehrzahl von Eigenmoden der Brennkammer oder der Ausgangs-Brennkammer durchführen, um eine optimierte akustische Einstellung zu erhalten.

[0039] Die Ausgangs-Brennkammer kann mit einem oder mehreren Resonatoren versehen sein, die entsprechend die Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer beeinflussen.

[0040] Es kann vorgesehen sein, dass die Brennkammer mit einer Mehrzahl von Resonatoren versehen wird. Dadurch können unterschiedliche Eigenmoden der Brennkammer beeinflusst werden. Es ist auch möglich, die zeitliche Variabilität von Eigenmoden zu berücksichtigen. Aufgrund von Temperaturänderungen in der Brennkammer und/oder in einem Resonatorraum können Eigenmoden insbesondere bezüglich ihrer Frequenz zeitlich variieren. Durch das Vorsehen einer Mehrzahl von entsprechend angepassten Resonatoren kann diese zeitliche Variation berücksichtigt werden.

[0041] Es ist günstig, wenn die Resonatoren auf einer Umfangsline der Brennkammer angeordnet werden. Dadurch ergibt sich eine leichte Positionierbarkeit an der Brennkammer mit minimaler Beeinflussung der Brennkammer.

[0042] Die nachfolgende Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen dient im Zusammenhang mit der Zeichnung der näheren Erläuterung der Erfindung. Es zeigen:

Figur 1 eine schematische Darstellung einer Brennkammer mit einer Messanordnung zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften der Brennkammer sowie mit an der Brennkammer angeordneten Resonatoren;

Figur 2 eine Draufsicht auf die Brennkammer gemäß Figur 1;

Figur 3 eine erste schematische Schnittdarstellung eines ersten Ausführungsbeispiels eines Resonators (Lambda-Viertel-Resonator);

Figur 4 eine schematische Schnittdarstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels eines Resonators (Helmholtz-Resonator);

Figuren 5(a), (b), (c) Beispiele für das Frequenzspektrum eines Ausführungsbeispiels einer Brennkammer um eine 1T-Eigenmode bei einer Frequenz von 1005 Hz bei verschiedenen Resonatorlängen;

Figuren 6(a), (b), (c) Beispiele für das Frequenzspektrum um die 2T-Eigenmode einer Ausführungsform einer Brennkammer bei einer Eigenfrequenz von 1666 Hz für verschiedene Resonatorlängen;

Figur 7 ein Diagramm für die Resonanzfrequenzen verschiedener Eigenmoden einer zylindrischen Brennkammer mit Durchmesser R, eines $\lambda/4$ -Resonators mit Länge L und eines gekoppelten Systems von zylindrischer Brennkammer und $\lambda/4$ -Resonator in Abhängigkeit von L/R; und

Figur 8 ein Diagramm der 3dB-Linienbreite der Resonanzfrequenzen des gekoppelten Systems gemäß Figur 7 multipliziert mit 20 in Abhängigkeit von L/R.

[0043] Ein Ausführungsbeispiel einer Brennkammer, welches in Figur 1 schematisch gezeigt und dort mit 10 bezeichnet ist, umfasst eine Brennkammerwand 12 und einen Innenraum 14. Der Innenraum 14 ist üblicherweise rotationssymmetrisch um eine Achse 16 ausgebildet.

[0044] Die Brennkammer 10 weist ein Ende 18 auf, an welchem eine Einblaseeinrichtung zum Einblasen von Brennstoff und Oxidator angeordnet ist (in Figur 1 nicht gezeigt).

[0045] Brenngase treten aus der Brennkammer 10 über einen Halsbereich 20 aus.

[0046] Eine Brennkammer 10 weist akustische Eigenmoden auf. Kenntnis und Einstellung der akustischen Eigenschaften einer Brennkammer 10 kann für Verbrennungsvorgänge wichtig sein. Teilvorgänge der Verbrennung eines Treibstoffs in der Brennkammer 10 wie Brennstoffzufuhr, Mischungsbildung und chemische Reaktion sowie bei Flüssigbrennstoff Zerstäubung und Verdampfung können periodische bzw. pulsierende Vorgänge sein. Wenn die entsprechende Oszillationsfrequenz irgend eines dieser Teilvorgänge eine akustische Eigenmode der Brennkammer 10 zur Schwingung anregt, können in der Brennkammer aufgrund akustischer Kopplung starke Druckpulsationen entstehen, die wiederum zu einer Beschädigung der Brennkammer 10 führen können bzw. zu Störungen der Verbrennung führen können.

[0047] Durch gezielte Einstellungen der akustischen Eigenschaften der Brennkammer 10 kann man die geschilderten Probleme vermeiden.

[0048] Es ist vorgesehen, dass an der Brennkammer 10 ein oder mehrere akustische Resonatoren 22 als Dämpfungselemente angeordnet werden. Wenn ein solcher akustischer Resonator 22 (oder eine Mehrzahl von akustischen Resonatoren 22) mit einer akustischen Eigenmode der Brennkammer 10 koppelt, dann kann bei geeigneter Wahl die Eigenmode in einen Frequenzbereich geschoben werden, in dem sie für den Verbrennungsvorgang nicht mehr störend ist, bzw. weitgehend unterdrückt werden.

[0049] Es kann beispielsweise ein Ringflansch 24 an einer Außenseite 26 der Brennkammer 10 fixiert sein, an welchem sich akustische Resonatoren 22 insbesondere um eine Umfangslinie an der Außenseite 26 der Brennkammer 10 positionieren lassen.

[0050] Ein akustischer Resonator 22 weist dabei einen Resonatorraum 28 (Resonanzraum) auf, welcher in Verbindung mit dem Innenraum 14 der Brennkammer 10 steht.

[0051] Zur akustischen Untersuchung der Brennkammer 10 erfolgt eine akustisch Anregung der Brennkammer 10 über einen Lautsprecher 30. Zur Signalerzeugung ist ein Signalgenerator 32 vorgesehen, dessen Signale von einem Verstärker 34 verstärkt werden. Der Verstärker 34 ist an den Lautsprecher 30 gekoppelt.

[0052] Zur Signaldetektion ist ein Mikrofon 36 vorgesehen, welches an einen Verstärker 38 gekoppelt ist. Der Verstärker 38 liefert die verstärkten Signale an eine Auswerteeinrichtung 40, durch welche insbesondere das Frequenzspektrum der Brennkammer 10 ermittelbar ist.

[0053] Als akustischer Resonator lässt sich beispielsweise ein Lambda-Viertel-Resonator 42 einsetzen (Figur 3). Dieser umfasst eine Röhre 44, in welcher der Resonatorraum 28 gebildet ist. Die Röhre 44 mündet über ein offenes Ende 46 in den Innenraum 14 der Brennkammer 10.

[0054] Der Resonatorraum 28 ist an dem dem Ende 46 gegenüberliegenden Ende 48 durch eine Wand 50 abgeschlossen. Diese Wand 50 kann festliegen oder sie kann, wie in Figur 3 gezeigt, einstellbar sein, so dass die Länge des Resonatorraums zwischen dem Ende 46 und dem Ende 48 einstellbar ist.

[0055] In dem gezeigten Ausführungsbeispiel sitzt die Wand 50 an einer Spindel 52, wobei die Spindel 52 zur Einstellung des Resonatorraums 28 in eine Richtung 54, welche quer und insbesondere senkrecht zur Achse 16 liegt, feststellbar verschieblich ist. Bei Vergrößerung des Volumens des Resonatorraums 28 (welches das Produkt von Länge und Querschnittsfläche ist) wird die Resonatorfrequenz verringert.

[0056] Ein weiteres Beispiel für einen akustischen Resonator ist ein Helmholtz-Resonator, welcher in Figur 4 schematisch gezeigt und dort mit 56 bezeichnet ist. Ein Helmholtz-Resonator umfasst einen Resonatorraum 58, welcher beispielsweise teilweise in einer Röhre 60 gebildet ist. Die Röhre 60 ist über einen Hals 62 mit dem Innenraum 14 der Brennkammer 10 verbunden. Ein Innenraum 64 im Hals 62 ist auch Teil des Resonatorraums 58. Der Resonatorraum ist über eine Wand 65 geschlossen.

[0057] Der Hals 62 weist eine kleinere Querschnittsfläche als die Röhre 60 auf.

[0058] Durch gezielte Wahl bzw. Einstellung von einem oder mehreren akustischen Resonatoren 22 lassen sich die akustischen Eigenschaften der Brennkammer 10 einstellen. Die Einstellung erfolgt insbesondere derart, dass für pulsierende Vorgänge bei der Verbrennung in der Brennkammer 10 keine Kopplung mit Eigenmoden der Brennkammer 10 erfolgen kann.

[0059] Die Eigenmoden der Brennkammer 10 (ohne akustische Resonatoren 22) und die entsprechenden Eigenfrequenzen hängen von der geometrischen Form der Brennkammer 10 ab. Für eine ideale zylindrische Brennkammer 10 sind die Eigenfunktionen beispielsweise zylindrische Besselfunktionen.

[0060] Bei einer rotationssymmetrischen Brennkammer 10 gibt es als Eigenmoden Tangentialmoden, Radialmoden und Axialmoden.

[0061] Es wird ein Verfahren bereitgestellt, mit welchem die akustischen Eigenschaften der Brennkammer 10 durch einen oder mehrere akustische Resonatoren 22 gezielt eingestellt werden können. Der Ausgangspunkt ist dabei die Beobachtung, dass das Modenspektrum der Brennkammer 10 mit einem akustischen Resonator bei optimierter Resonatorlänge besondere Symmetrien aufweist.

[0062] Das erfindungsgemäße Verfahren funktioniert wie folgt:

[0063] Für eine Ausgangs-Brennkammer wird die relevante akustische Eigenmode bestimmt, die unterdrückt bzw. auf einen anderen Frequenzbereich verschoben werden soll. Die Ausgangs-Brennkammer kann dabei die nackte Brennkammer 10 ohne akustische Resonatoren 22 sein oder es kann sich um eine Brennkammer handeln, an welcher bereits ein oder mehrere akustische Resonatoren 22 angeordnet sind. Die akustische Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer kann berechnet werden, das heißt theoretisch bestimmt werden, indem die entsprechenden akustischen Gleichungen für die spezielle Brennkammerform gelöst werden.

[0064] Vorzugsweise wird die akustische Eigenmode durch Messung bestimmt, wobei vorzugsweise zur Abkürzung der Messung in einem Messbereich um eine zuvor theoretisch bestimmte Eigenmode gemessen wird. Zur Messung erfolgt eine akustische Anregung der Brennkammer 10 über das Mikrofon 36, wobei die Anregungsfrequenz variiert wird, um die Eigenmode aufzufinden.

[0065] Nach Auffinden der Eigenmode und Ermittlung der entsprechenden Eigenfrequenz wird ein akustischer Resonator 22 an der Brennkammerwand 12 so eingestellt, dass er eine Resonanz bei der Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer hat oder zumindest eine Resonanz im näheren Bereich um diese Eigenfrequenz hat. Der Resonator wird mit seinen geometrischen Parametern so gewählt bzw. eingestellt, das heißt mit seinem Resonatorraum 28 bzw. 58 so gewählt bzw. eingestellt, dass eine Resonanzfrequenz auf oder mindestens im Bereich um die ermittelte Eigenfrequenz der Ausgangs-Brennkammer liegt.

[0066] Durch die Ausgangs-Brennkammer und den entsprechend gewählten oder eingestellten akustischen Resonator ist eine Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination gebildet. Diese wird akustisch angeregt und dabei das resultierende Frequenzspektrum aufgenommen. Die akustische Anregung erfolgt auf der Eigenfrequenz der ermittelten Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer.

[0067] Es kann auch vorgesehen sein, dass eine breitbandige Anregung erfolgt, wobei die ermittelte Eigenfrequenz in dem Breitbandbereich liegt.

[0068] Beispielsweise erfolgt eine Anregung mit einem Rauschspektrum. Es kann auch ein Sweep-Signal zur Anregung eingesetzt werden.

[0069] Die Anregung mit der Anregungsfrequenz bzw. dem Breitbandbereich erfolgt beispielsweise über eine Zeitdauer von einigen Millisekunden.

[0070] Zur Ermittlung des Frequenzspektrums werden die resultierenden akustischen Signale beispielsweise über Fast-Fourier-Transformation (FFT) analysiert.

[0071] Die Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination weist Eigenmoden mit Eigenfrequenzen um die Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer auf. Es werden dabei die Eigenmoden näher analysiert, welche bezüglich der Frequenz direkt unterhalb der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer und direkt oberhalb der Ausgangs-Brennkammer liegen. Die untere Eigenmode wird im folgenden als erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination bezeichnet und die direkt oberhalb liegende Eigenmode als zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination bezeichnet. Der Vergleich erfolgt bezüglich Intensität und/oder Halbwertsbreite.

[0072] Wenn die erste Eigenmode und die zweite Eigenmode die gleiche Intensität und/oder Halbwertsbreite aufweisen, dann wird davon ausgegangen, dass die richtige Resonatoreinstellung gefunden wurde. Diese wird beibehalten.

[0073] Das Verfahren kann dann fortgesetzt werden mit einem weiteren akustischen Resonator bezüglich einer weiteren Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer (welche jetzt die ursprüngliche Ausgangs-Brennkammer mit zusätzlichem Resonator ist).

[0074] Wenn die Intensität der ersten Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination höher ist als die Intensität der zweiten Eigenmode, dann wird der akustische Resonator 22 so modifiziert, dass er eine niedrigere Resonanzfrequenz aufweist. Bei einem einstellbaren akustischen Resonator (wie beispielsweise dem Lambda-Viertel-Resonator 42 oder einem Helmholtz-Resonator 56 mit verstellbarer Wand 65) erfolgt eine Einstellung (Stimmung) auf eine niedrigere Resonanzfrequenz. Bei einem nicht einstellbaren Resonator wird statt dessen ein Resonator austausch durchgeführt.

[0075] Ist entsprechend die Intensität der ersten Eigenmode kleiner als die Intensität der zweiten Eigenmode, dann wird der akustische Resonator 22 so modifiziert, dass er eine höhere Resonanzfrequenz aufweist.

[0076] Nach der Modifikation des Resonators wird eine erneute Anregung auf der Eigenfrequenz der Ausgangs-Brennkammer bzw. breitbandig durchgeführt und wiederum der Frequenzspektrum aufgenommen und die erste Eigenmode und die zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination werden miteinander verglichen und entsprechend diesem Vergleich wird eine weitere Resonatormodifikation durchgeführt.

[0077] Nach der zweiten Resonatormodifikation kann eine weitere Resonatormodifikation auch durch Intrapolation bzw. Extrapolation von den vorliegenden Werten durchgeführt werden.

[0078] Es hat sich gezeigt, dass in der Regel nach zwei bis drei Resonatormodifikationen die optimale Resonanzfrequenz für den akustischen Resonator 22 gefunden wurde, das heißt eine optimale Entkopplung bzw. Wegdämpfung der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer gefunden wurde.

[0079] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren lässt sich mit relativ geringem Messaufwand das akustische Verhalten der Brennkammer 10 einstellen. Dadurch lässt sich die akustische Einstellung relativ schnell und mit verringertem Aufwand durchführen.

[0080] Die Einstellung lässt sich für unterschiedliche Eigenmoden durchführen, wobei die Eigenmoden solche der nackten Brennkammer oder solche der Brennkammer sein können, die bereits mit einem oder mehreren akustischen Resonatoren versehen ist.

[0081] Es ist beispielsweise auch grundsätzlich möglich, über das erfindungsgemäße Verfahren eine Vereinfachung bezüglich der Resonatoranordnung zu erreichen. Beispielsweise lassen sich mehrere Resonatoren durch einen einzigen ersetzen.

[0082] In den Figuren 5(a), (b), (c) sind Frequenzspektren bei der Durchführung des Verfahrens an einer Brennkammer zur Dämpfung der 1T-Eigenmode (erste Tangentialmode) gezeigt. Die Eigenfrequenz dieser Eigenmode für die Ausgangs-Brennkammer wurde als 1005 Hz ermittelt. Für einen Lambda-Viertel-Resonator als akustischen Resonator 22 wurde eine Resonatorlänge von 81,6 mm ermittelt. Der akustische Resonator 22 wurde dann entsprechend an der Brennkammer 10 eingestellt.

[0083] Anschließend wurde die Brennkammer mit einer Frequenz von 1005 Hz, das heißt mit der Eigenfrequenz der zu dämpfenden Eigenmode, angeregt. (In den Diagrammen ist diese Eigenfrequenz f_A jeweils eingezeichnet.)

[0084] Es wurde zunächst das Frequenzspektrum gemäß Figur 5(a) ermittelt mit einer ersten Eigenmode 66 der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination direkt unterhalb der Frequenz f_A und einer zweiten Eigenmode 68 der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination direkt oberhalb der Frequenz f_A . Die erste Eigenmode 66 liegt bei einer Eigenfrequenz von 960 Hz und die zweite Eigenmode 68 liegt bei einer Eigenfrequenz von 1066 Hz.

[0085] Wie man aus Figur 5(a) erkennen kann, ist die Intensität der ersten Eigenmode 66 kleiner als die Intensität der zweiten Eigenmode 68.

[0086] Daraufhin wurde der akustische Resonator so verändert, dass er eine höhere Resonanzfrequenz aufweist. Dies wurde durch eine Längenverkürzung am Resonator auf 80,6 mm erreicht. Mit diesem modifizierten Resonator wurde erneut eine Anregung bei 1005 Hz durchgeführt.

[0087] Das resultierende Frequenzspektrum in Figur 5(b) gezeigt.

[0088] In diesem Frequenzspektrum weist die erste Eigenmode 66' eine höhere Intensität auf als die zweite Eigenmode 68'.

[0089] Davon ausgehend wurde der akustische Resonator 22 neu modifiziert, wobei eine Längeneinstellung auf 81,0 mm durchgeführt wurde. Diese Längeneinstellung wurde durch Intrapolation ausgehend von den Frequenzspektren der Figuren 5(a), 5(b) ermittelt; der Abstand der Intensität zwischen den Eigenmoden 66' und 68' ist kleiner als zwischen den Eigenmoden 66 und 68. Die entsprechende Resonatorlänge sollte dabei dichter bei 80,6 mm liegen als bei 81,6 mm.

[0090] Es wurde für diese neue Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination (mit modifiziertem Resonator) erneut das Frequenzspektrum aufgenommen, welches in Figur 5(c) gezeigt ist. Die Eigenmoden 66'' und 68'' weisen näherungsweise die gleiche Intensität und auch die gleiche Halbwertsbreite auf.

[0091] Durch den so gewählten bzw. eingestellten Resonator lässt sich dann die 1T-Eigenmode wegdamphen.

[0092] In den Figuren 6(a), (b), (c) sind Frequenzspektren für die Dämpfung der 2T-Eigenmode (zweite Tangentialmode) gezeigt.

[0093] Es wurde dabei von einer Ausgangs-Brennkammer ausgegangen, an welcher beispielsweise das Messdiagramm gemäß Figur 5(c) ermittelt wurde.

[0094] Als Eigenfrequenz für die 2T-Eigenmode ergab sich $f_A = 1666$ Hz. Es wurde dazu eine Resonatorlänge von 47,7 mm ermittelt.

[0095] Ausgehend von dieser Resonatorwahl bzw. -einstellung wurde eine Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination gebildet, welche mit der Frequenz von 1666 Hz angeregt wurde. Aus dieser Anregung resultiert das Frequenzspektrum gemäß Figur 6(a).

[0096] Man erkennt, dass die erste Eigenmode 70 eine kleinere Intensität aufweist als die zweite Eigenmode 72 (jeweils der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination).

[0097] Der akustische Resonator 22 wurde dann höher gestimmt, indem dessen Länge verkürzt wurde auf 47,0 mm.

[0098] Es wurde erneut eine Anregung mit der Frequenz 1666 Hz durchgeführt. Das resultierende Frequenzspektrum ist in Figur 6(b) gezeigt. Die erste Eigenmode 70' weist weiterhin eine niedrigere Intensität als die zweite Eigenmode 72' auf. Daher wurde die Resonatorfrequenz weiter erhöht, indem die Länge erniedrigt wurde auf 46,8 mm. Dieser Wert wurde insbesondere durch Intrapolation bezogen auf den Abstand der Intensitäten der Eigenmoden 72, 70 und 72', 70' ermittelt.

[0099] Anschließend wurde das Frequenzspektrum neu aufgenommen; dieses ist in Figur 6(c) gezeigt. Wie man sieht, liegen die Eigenmoden 70" und 72" annähernd bei der gleichen Intensität. Es wurde dadurch die optimale Resonatoreinstellung zur Wegdämpfung der zwei T-Eigenmode gefunden.

[0100] Das Verfahren lässt sich für weitere Eigenmoden durchführen.

[0101] Es kann auch berücksichtigt werden, dass sich Eigenmoden zeitlich verändern können. Innerhalb einer Brennkammer 10 kann sich die Brennkammertemperatur mit der Zeit verändern. Ebenso kann sich die Temperatur in einem akustischen Resonator 22 mit der Zeit ändern. Dies führt zu einer zeitlichen Änderung in der Schallgeschwindigkeit. Es kann auch die Differenz der Schallgeschwindigkeiten zwischen Brennkammer 10 und akustischem Resonator 22 entstehen. Es ist deshalb beispielsweise möglich, dass innerhalb einer bestimmten Zeit nach der Brennstoffzündung unterschiedliche Resonatorlängen benötigt werden, um eine bestimmte Eigenmode aufgrund einer zeitlich variierenden Eigenfrequenz effektiv dämpfen zu können.

[0102] Über das erfindungsgemäße Verfahren lassen sich auch unterschiedliche akustische Resonatoren einstellen bzw. wählen, um die zeitliche Variation von Eigenmoden zu berücksichtigen.

[0103] Insbesondere ist deshalb eine Mehrzahl von akustischen Resonatoren 22 vorgesehen.

[0104] Es ist möglich, dass es keine ausgezeichnete optimale Resonatorlänge gibt, bei der die erste Eigenmode und die zweite Eigenmode sowohl gleiche Intensität als auch gleiche Halbwertsbreite aufweisen. In solchen Fällen kann es einen Bereich von Resonatorlängen geben, innerhalb dem man gleiche Intensität erreicht oder gleiche Halbwertsbreite erreicht.

[0105] Der Resonanzfrequenzverlauf und das erfindungsgemäße Verfahren wird anhand der Diagramme gemäß Figur 7 und 8 erläutert:

Die Resonanzfrequenz einer Brennkammer mit zylindrischem Brennraum ergibt sich aus der Gleichung:

$$f_{n,m} = \frac{\alpha_{n,m} \cdot c}{2\pi R}$$

mit $m = 1, 2, 3 \dots$ und $n = 0, 1, 2 \dots$

Dabei sind $\alpha_{n,m}$ Eigenwerte der Bessel-Funktion, $m-1$ und n sind die Ordnung der radialen bzw. tangentialen Eigenmoden, c ist die Schallgeschwindigkeit und R ist der Radius des Brennraums der zylindrischen Brennkammer.

[0106] In Figur 7 sind die Eigenfrequenzen für eine Ausgangs-Brennkammer mit $R = 0,1 \text{ m}$ und einer Schallgeschwindigkeit $c = 344 \text{ m/s}$ als durchgezogene Linien gezeigt.

[0107] Die Eigenfrequenz der ersten Tangentialmode 80 (1T) liegt bei ca. 1.005 Hz. Die Eigenfrequenz der 2T-Eigenmode 82 liegt bei ca. 1.660 Hz. Die Eigenfrequenz der ersten Radialmode 84 (1R) liegt bei ca. 2.095 Hz. Die Eigenfrequenz der 3T-Eigenmode 86 liegt bei ca. 2.300 Hz. Da die entsprechenden Eigenfrequenzen gemäß obiger Gleichung abhängig von R^{-1} sind, sind die Eigenfrequenzen in Figur 7 horizontale Linien.

[0108] Ein $\lambda/4$ -Resonator weist mindestens in erster Näherung die Eigenfrequenzen

$$f_l = \frac{(2l-1) c}{4 L}$$

mit $l = 1, 2, 3, \dots$ auf. L ist die Resonatorlänge. l ist die Ordnung der axialen Eigenmode des $\lambda/4$ -Resonators.

[0109] In besserer Näherung kann anstelle L eine äquivalente Resonatorlänge L_{eq} verwendet werden, welche abhängig ist von einem Durchmesser D des Resonators. Die äquivalente Resonatorlänge liegt im Bereich zwischen $L + 0,2 \cdot D$ und $L + 0,4 \cdot D$.

[0110] In Figur 7 sind die Eigenfrequenzen eines $\lambda/4$ -Resonators in der Auftragung L über R Hyperbeln. Die Hyperbel 88 entspricht $l = 1$, die Hyperbel 90 $l = 2$ und die Hyperbel 92 $l = 3$.

[0111] Die Hyperbeln 88, 90, 92 zeigen den Eigenfrequenzverlauf des $\lambda/4$ -Resonators ohne Ankopplung an die Brennkammer.

[0112] Bei Ankopplung des $\lambda/4$ -Resonators an die Brennkammer (Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination) ergibt sich ein Resonanzfrequenzverlauf, welcher von dem Resonanzfrequenzverlauf der Ausgangs-Brennkammer und

des $\lambda/4$ -Resonators abweicht. Der tatsächliche Eigenfrequenzverlauf ist in Figur 7 durch die offenen Symbole, welche gemessen worden sind, gezeigt. Die offenen Kreise beziehen sich auf die 1T-Eigenmode, die offenen Dreiecke mit der Spitze nach oben auf die 2T-Eigenmode, die offenen Dreiecke mit der Spitze nach unten auf die 1R-Eigenmode und die Rauten auf die 3T-Eigenmode.

[0113] In Figur 8 ist für die Eigenmoden des gekoppelten Systems die Linienbreite gezeigt. Die ausgefüllten Kreise sind die gemessenen Werte für die 1T-Eigenmode, die ausgefüllten Dreiecke mit der Spitze nach oben sind die gemessenen Werte für die 2T-Eigenmode und die gefüllten Dreiecke mit der Spitze nach unten geben die Linienbreite für die 1R-Eigenmode an.

[0114] Beispielsweise ergibt sich für die 2T-Eigenmode des gekoppelten Systems aus Brennkammer und $\lambda/4$ -Resonator (Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination) der Frequenzverlauf 94 gemäß Figur 7. Bei $L = 0$ ist die Eigenfrequenz des Systems die Eigenfrequenz der Ausgangs-Brennkammer. Für eine Resonatorlänge im Bereich $0 < L/R < 0,4$ fällt die Eigenfrequenz der 2T-Eigenmode gering.

[0115] Die Dämpfung der 2T-Eigenmode steigt schwach mit steigender Resonatorlänge L (Figur 8); bei steigender Dämpfung nimmt die Linienbreite zu.

[0116] Bei L/R ungefähr 0,5 ist der Abstand der Eigenfrequenz des gekoppelten Systems zu der Eigenfrequenz der Ausgangs-Brennkammer (ohne Ankopplung) und der Eigenfrequenz des $\lambda/4$ -Resonators (ohne Ankopplung) etwa gleich groß. Die Eigenfrequenz der aus der 1R-Eigenmode der Brennkammer ausgehenden Resonanz des gekoppelten Systems weist näherungsweise den gleichen Abstand zu der 2T-Eigenmode der Brennkammer (ungekoppelte Brennkammer) auf wie die 2T-Eigenmode zu der 1T-Eigenmode.

[0117] Bei einer weiteren Erhöhung der Resonatorlänge ($L/R > 0,5$) ist die Eigenmode, welche aus der 2T-Eigenmode der "reinen" Brennkammer ausgeht, keine 2T-Eigenmode mehr. Die Eigenmode, welche aus der 1R-Eigenmode der ungekoppelten Brennkammer ausgeht, nimmt die Eigenschaft der 2T-Eigenmode an.

[0118] Bei der Resonatorlänge $0,5 \leq L/R \leq 0,53$ wird die aus der 2T-Eigenmode hervorgehende akustische Eigenmode als (2T⁻)-Eigenmode bezeichnet und die aus der 1R-Eigenmode ausgehende Eigenmode wird als (2T⁺)-Eigenmode bezeichnet.

[0119] Die Intensität der 2T-Eigenmode ist am stärksten reduziert bei einer Resonatorlänge L , bei der die Eigenfrequenzen (2T⁺) und (2T⁻) von der Eigenfrequenz der ungekoppelten Brennkammer etwa gleich weit entfernt sind. Bei entsprechend gewählter Resonatorlänge L sind die Intensitäten der (2T⁺)-Eigenmode und der (2T⁻)-Eigenmode etwa gleich. Man erhält dadurch maximale Dämpfung einer entsprechenden akustischen Eigenmode, wie aus Figur 8 ersichtlich ist.

[0120] Dies ist der Effekt der "vermiedenen Kreuzung" bei bestimmten Anregungen der Ausgangs-Brennkammer mit angekoppeltem akustischen Resonator.

[0121] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird die Resonatorlänge so eingestellt, dass man für die Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination näherungsweise die gleiche Intensität und/oder Halbwertsbreite im Frequenzspektrum erhält. Dies ergibt sich dadurch, dass die erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination und die zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination die Plus-Eigenmode und die Minus-Eigenmode sind.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Einstellung der akustischen Eigenschaften einer Brennkammer, bei dem die Brennkammer mit mindestens einem akustischen Resonator als Dämpfungselement versehen wird, umfassend die Schritte:

- Bestimmung einer akustischen Eigenmode einer Ausgangs-Brennkammer;
- Wahl oder Einstellung des akustischen Resonators derart, dass er eine Resonanz im Bereich der Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer aufweist;
- akustische Anregung der Ausgangs-Brennkammer mit akustischem Resonator als Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination und Aufnahme des resultierenden Frequenzspektrums;
- Vergleich einer ersten Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination unterhalb der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer und einer zweiten Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination oberhalb der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer bezüglich Intensität und/oder Halbwertsbreite; und
- Modifikation des Resonators, sofern notwendig, derart, dass die erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination und die zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination mindestens näherungsweise die gleiche Intensität und/oder Halbwertsbreite im Frequenzspektrum aufweisen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** nach Modifikation des Resonators die Ausgangs-

Brennkammer-Resonator-Kombination angeregt wird und das Frequenzspektrum aufgenommen wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Resonatormodifikation und nachfolgende Frequenzspektrumsaufnahme iterativ durchgeführt werden.
- 5 4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** als erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination diejenige gewählt wird, welche in der Eigenfrequenz unmittelbar unterhalb der Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer liegt.
- 10 5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** als zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination diejenige gewählt wird, welche in der Eigenfrequenz unmittelbar oberhalb der Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer liegt.
- 15 6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anregung der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination auf der Eigenfrequenz oder in einem Bereich um die Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer erfolgt.
- 20 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anregung der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination breitbandig erfolgt.
8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Bestimmung der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer ein theoretischer Wert für die Eigenfrequenz ermittelt wird.
- 25 9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer durch Messung bestimmt wird.
- 30 10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Messung in einem Bereich um einen zuvor theoretisch bestimmten Wert durchgeführt wird.
- 35 11. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**, wenn die erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination eine höhere Intensität als die zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination aufweist, der Resonator so modifiziert wird, dass er eine niedrigere Resonanzfrequenz aufweist.
- 40 12. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**, wenn die erste Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination eine niedrigere Intensität als die zweite Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination aufweist, der Resonator so modifiziert wird, dass er eine höhere Resonanzfrequenz aufweist.
- 45 13. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Modifikation des Resonators durch Modifikation mindestens eines geometrischen Parameters erfolgt.
14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die geometrischen Abmessungen eines Resonatorraums eingestellt werden.
- 50 15. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der mindestens eine Resonator ein Lambda-Viertel-Resonator ist.
16. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der mindestens eine Resonator ein Helmholtz-Resonator ist.
- 55 17. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Länge eines Resonatorraums einstellbar ist.
18. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der mindestens eine Resonator einen Resonatorraum aufweist, welcher in Verbindung mit einem Innenraum der Brennkammer steht.
19. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der mindestens eine Re-

sonator an einer Außenseite der Ausgangs-Brennkammer positioniert wird.

- 5 20. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die anfängliche Wahl oder anfängliche Einstellung des Resonators derart erfolgt, dass ein oder mehrere Parameter so gewählt oder eingestellt werden, dass die Resonanzfrequenz des Resonators der Eigenfrequenz der Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer mindestens näherungsweise entspricht.
- 10 21. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein erstes Frequenzspektrum ermittelt wird, der Resonator modifiziert wird, mit modifiziertem Resonator ein zweites Frequenzspektrum ermittelt wird, und die nächste Resonatormodifikation über Intrapolation oder Extrapolation erfolgt.
- 15 22. Verfahren nach Anspruch 21, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein drittes Frequenzspektrum mit der durch Intrapolation oder Extrapolation ermittelten Resonatormodifikation aufgenommen wird.
- 20 23. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Brennkammer einen mindestens näherungsweise rotationssymmetrischen Innenraum aufweist.
- 25 24. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der oder die Resonatoren außerhalb eines Innenraums der Brennkammer angeordnet werden.
- 30 25. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Endergebnis ein definiert gewählter oder definiert eingestellter Resonator bereitgestellt wird.
- 35 26. Verfahren nach Anspruch 25, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei dem definiert gewählten oder definiert eingestellten Resonator für die Ausgangs-Brennkammer-Resonator-Kombination die Eigenmode der Ausgangs-Brennkammer nicht auftritt oder zumindest stark gedämpft ist.
- 40 27. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Durchführung für eine Mehrzahl von Eigenmoden der Brennkammer oder der Ausgangs-Brennkammer.
- 45 28. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ausgangs-Brennkammer mit einem oder mehreren Resonatoren versehen ist.
- 50 29. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Brennkammer mit einer Mehrzahl von Resonatoren versehen sind.
- 55 30. Verfahren nach Anspruch 29, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Resonatoren auf einer Umfangslinie der Brennkammer angeordnet werden.
31. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Einstellung und/oder Anordnung von Resonatoren die zeitliche Variabilität von Eigenmoden der Brennkammer-Resonator-Kombination berücksichtigt wird.

FIG.1

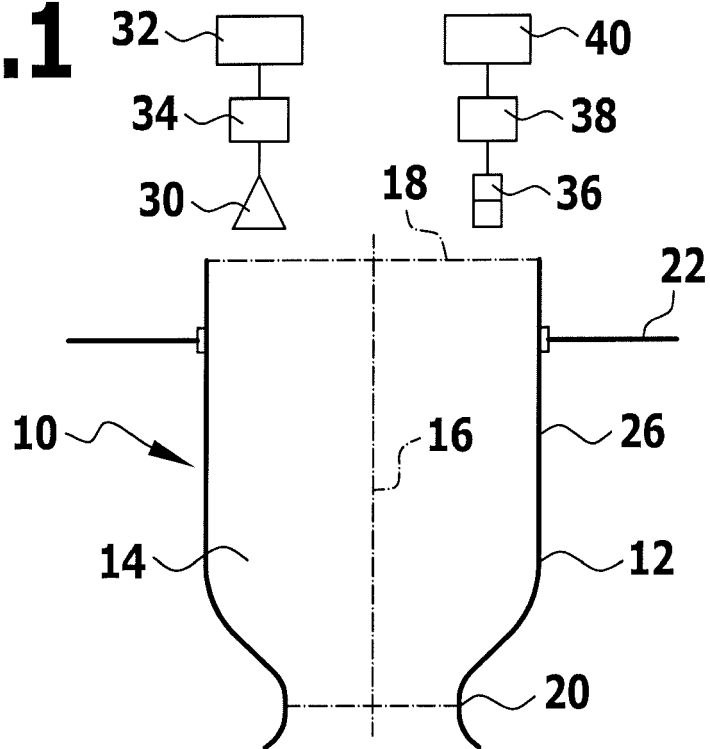


FIG.2

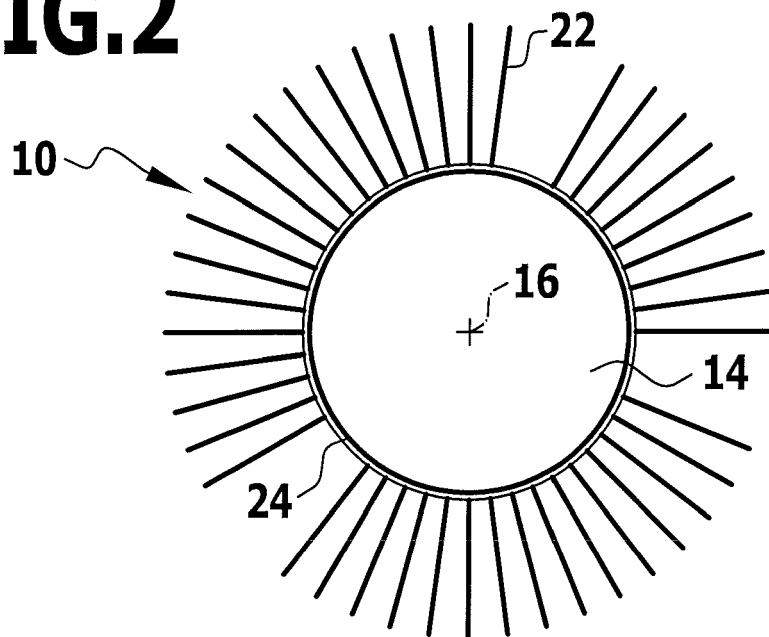


FIG.3

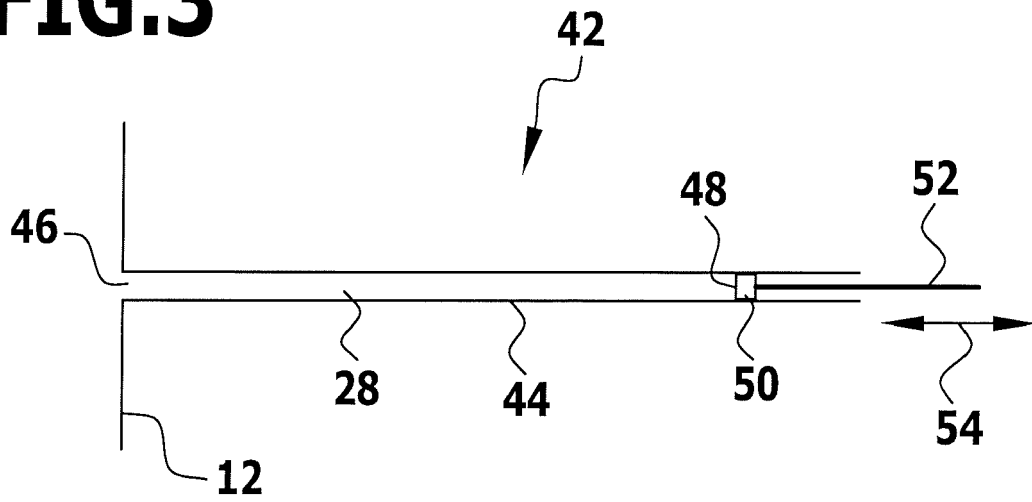


FIG.4

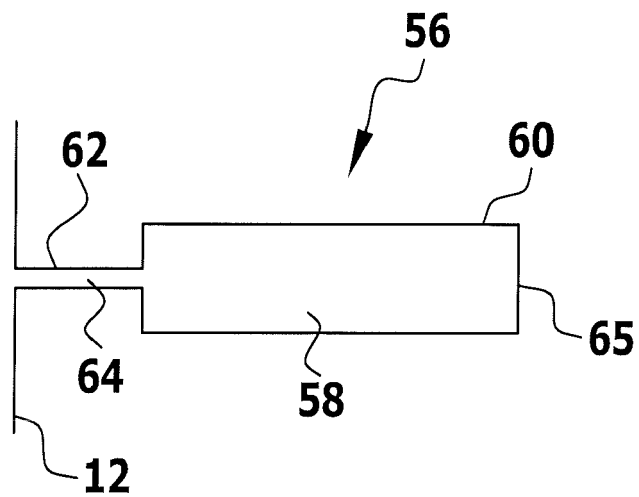


FIG.5a

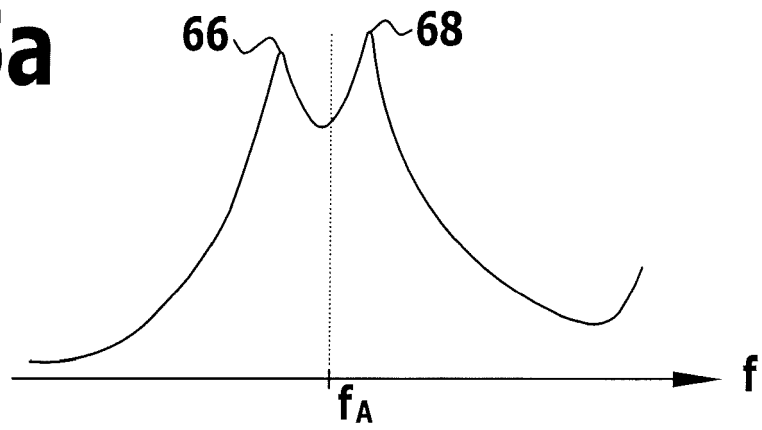


FIG.5b

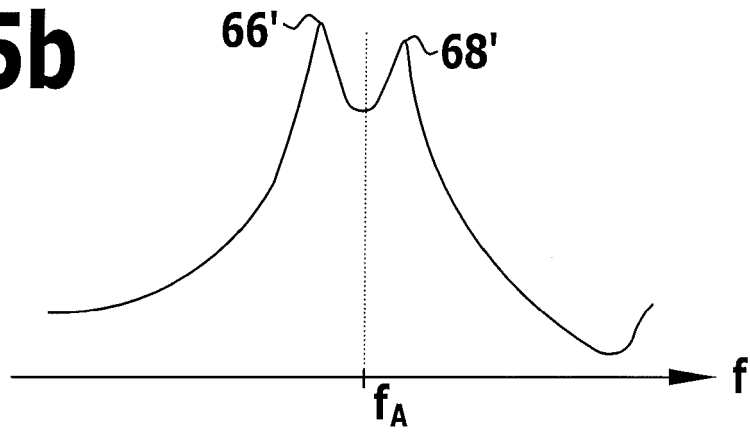


FIG.5c

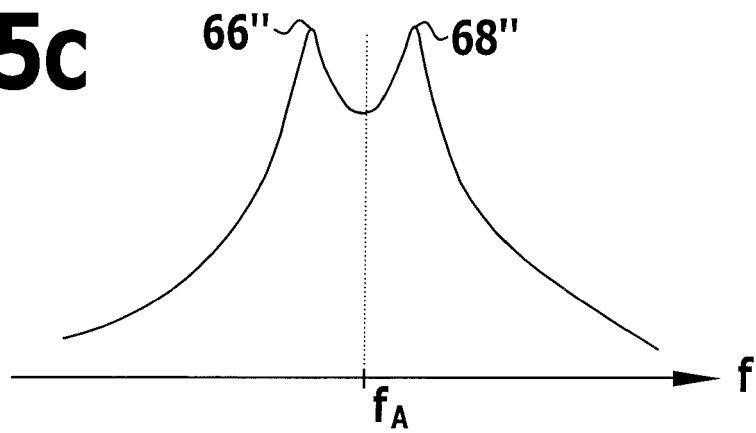


FIG.6a

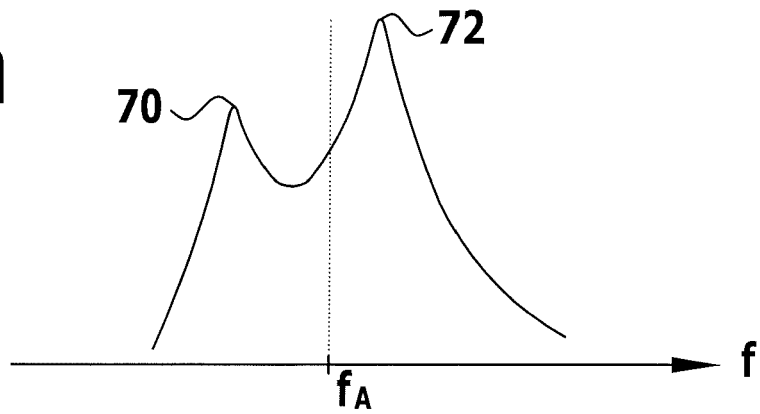


FIG.6b

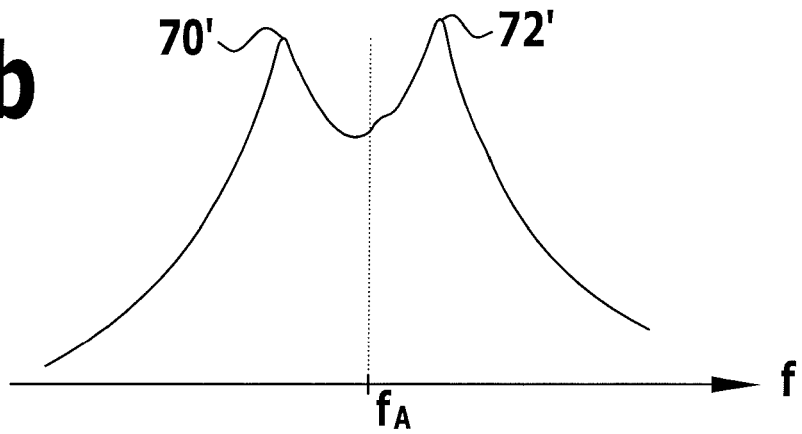


FIG.6c

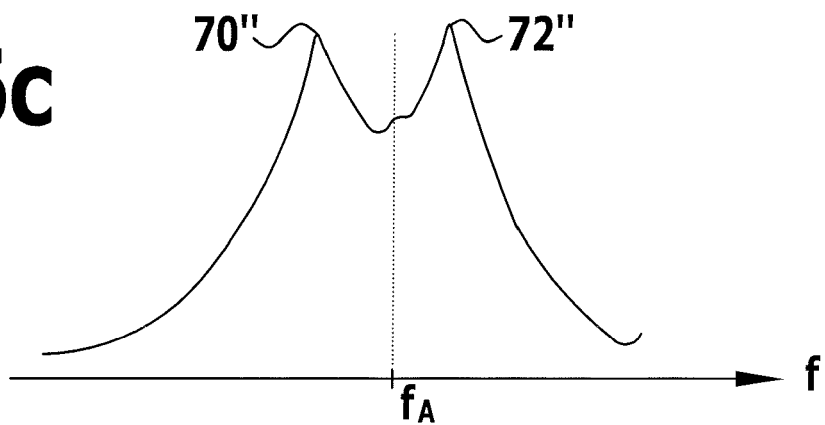


FIG. 7

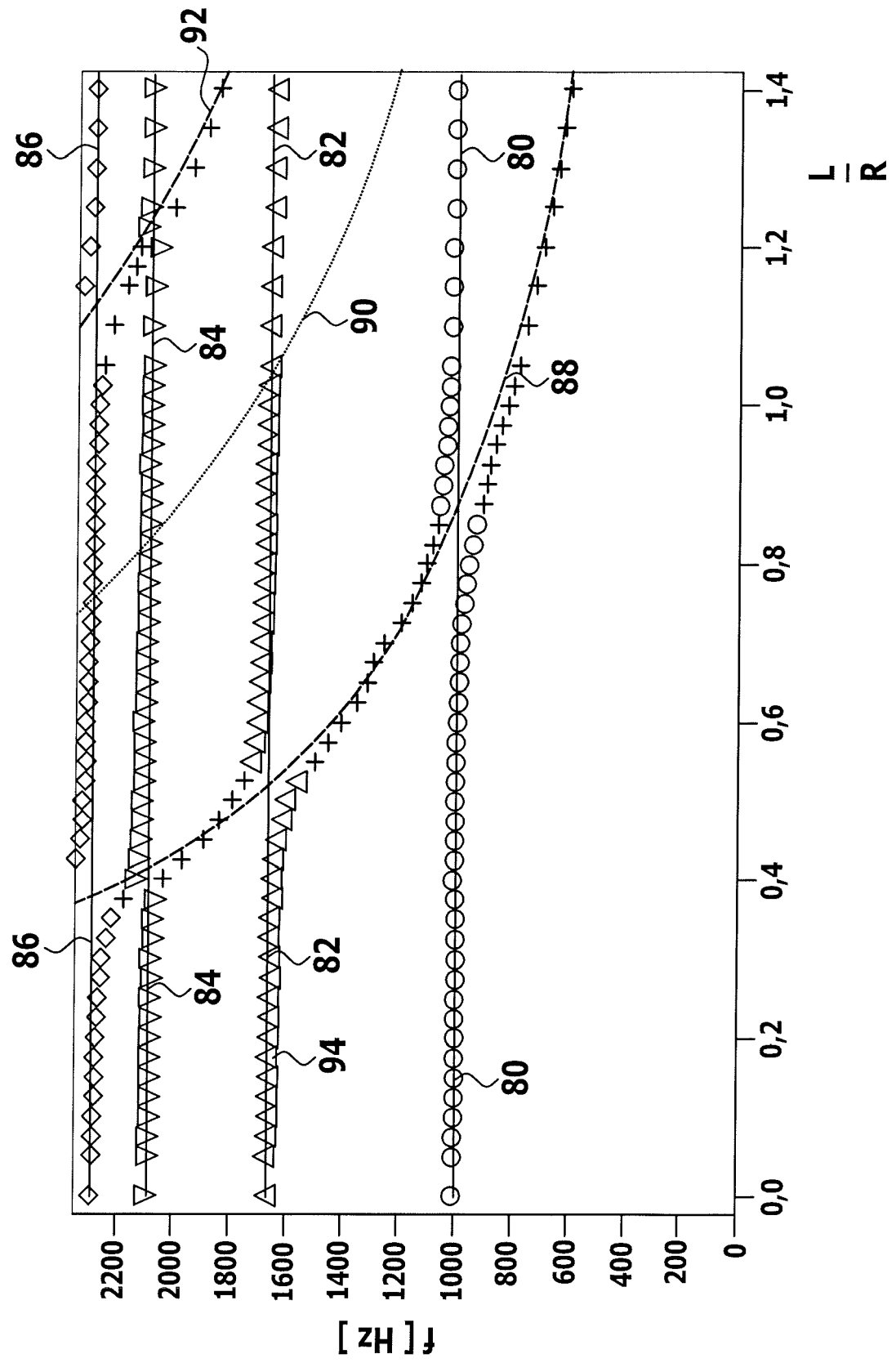


FIG.8

