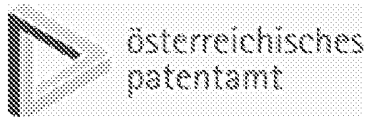


(19)



(10)

**AT 515077 A4 2015-06-15**

(12)

# Österreichische Patentanmeldung

(21) Anmeldenummer: A 50085/2014  
 (22) Anmeldetag: 04.02.2014  
 (43) Veröffentlicht am: 15.06.2015

(51) Int. Cl.: **G01N 11/10** (2006.01)  
**G01N 11/16** (2006.01)  
**G01N 33/30** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:  
 JP H0566188 A  
 JP S59221639 A  
 US 2011036150 A1  
 US 5394739 A  
 DE 29716475 U1  
 AT 406425 B  
 US 2003126914 A1  
 EP 0180514 A2

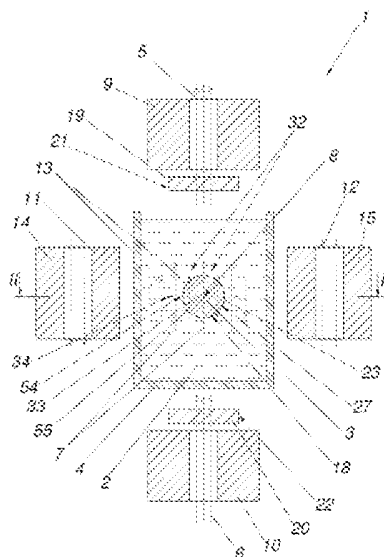
(71) Patentanmelder:  
 JOHANNES KEPLER UNIVERSITAET LINZ  
 4040 LINZ (AT)

(72) Erfinder:  
 Stefan Clara Dipl.Ing.  
 4040 Linz (AT)  
 Antlinger Hannes Dipl.Ing.  
 4710 Grieskirchen (AT)  
 Hilber Wolfgang Dipl.Ing. Dr.  
 4293 Gutau (AT)  
 Jakoby Bernhard Dr.  
 4040 Linz (AT)

(74) Vertreter:  
 JELL FRIEDRICH DIPL.ING.  
 4020 LINZ (AT)

## (54) Verfahren zur Bestimmung der Viskosität einer Flüssigkeit

(57) Es wird ein Verfahren zur Bestimmung der Viskosität einer Flüssigkeit (2, 200), bei dem ein von der Flüssigkeit (2, 200) vollständig umgebener magnetischer Körper (3) mit Hilfe mindestens eines ersten Magnetfelds (5, 6), insbesondere eines magnetischen Gleichfelds (7), in einer levitierten Ruhelage (8) gehalten wird und mit Hilfe mindestens eines zweiten Magnetfelds (11, 12, 38, 39, 51, 52), das dem ersten Magnetfeld (5, 6) zumindest bereichsweise überlagert ist und ein magnetisches Wechselfeld (13, 37) aufweist, ausgehend von der levitierten Ruhelage (8) in Bewegung versetzt wird, von der Bewegung des magnetischen Körpers (3) abhängige Messdaten (21, 22) erfasst werden und anhand dieser die Viskosität der Flüssigkeit (2, 200) bestimmt wird, gezeigt. Um eine Scherung der Flüssigkeit während der Ermittlung der Messwerte zu erreichen, wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, dass der magnetische Körper (3) zumindest in eine erzwungene Drehschwingung (34, 28) oder in eine erzwungene Rotation (17) versetzt wird.



### Zusammenfassung:

Es wird ein Verfahren zur Bestimmung der Viskosität einer Flüssigkeit (2, 200), bei dem ein von der Flüssigkeit (2, 200) vollständig umgebener magnetischer Körper (3) mit Hilfe mindestens eines ersten Magnetfelds (5, 6), insbesondere eines magnetischen Gleichfelds (7), in einer levitierten Ruhelage (8) gehalten wird und mit Hilfe mindestens eines zweiten Magnetfelds (11, 12, 38, 39, 51, 52), das dem ersten Magnetfeld (5, 6) zumindest bereichsweise überlagert ist und ein magnetisches Wechselfeld (13, 37) aufweist, ausgehend von der levitierten Ruhelage (8) in Bewegung versetzt wird, von der Bewegung des magnetischen Körpers (3) abhängige Messdaten (21, 22) erfasst werden und anhand dieser die Viskosität der Flüssigkeit (2, 200) bestimmt wird, gezeigt. Um eine Scherung der Flüssigkeit während der Ermittlung der Messwerte zu erreichen, wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, dass der magnetische Körper (3) zumindest in eine erzwungene Drehschwingung (34, 28) oder in eine erzwungene Rotation (17) versetzt wird.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Viskosität einer Flüssigkeit, bei dem ein von der Flüssigkeit vollständig umgebener magnetischer Körper mit Hilfe mindestens eines ersten Magnetfelds, insbesondere eines anhand der Position des magnetischen Körpers geregelten magnetischen Gleichfelds, in einer levitierten Ruhelage gehalten wird und mit Hilfe mindestens eines zweiten Magnetfelds, das dem ersten Magnetfeld zumindest bereichsweise überlagert ist und ein magnetisches Wechselfeld aufweist, ausgehend von der levitierten Ruhelage in Bewegung versetzt wird, von der Bewegung des magnetischen Körpers abhängige Messdaten erfasst werden und anhand dieser die Viskosität der Flüssigkeit bestimmt wird.

Um die Viskosität einer Flüssigkeit bestimmen zu können, zeigt die DE102004009089A1 ein Verfahren, bei dem kleine magnetische Körper bzw. Partikel einer Flüssigkeit mit einem magnetischen Gleichfeld levitiert werden. Zudem werden die magnetischen Körper mit Hilfe eines magnetischen Wechselfelds in Bewegung versetzt und aus der gemessenen Amplitude und/oder Phase der Schwingung die Viskosität ermittelt. Nachteilig hat sich herausgestellt, dass bei diesem Verfahren nur ein allgemeiner Wert für die Viskosität ermittelt werden kann, der sich aus der Viskosität in Scherung und der Dehnviskosität zusammensetzt. Die Viskosität in Scherung kann dadurch nicht genau bestimmt werden.

Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, ausgehend vom eingangs geschilderten Stand der Technik, ein Verfahren zu schaffen, mit dem die Viskosität in Scherung genau und reproduzierbar ermittelt werden kann.

Die Erfindung löst die gestellte Aufgabe dadurch, dass der magnetische Körper zumindest in eine erzwungene Drehschwingung oder in eine erzwungene Rotation versetzt wird.

Wird der magnetische Körper zumindest in eine erzwungene Drehschwingung oder in eine erzwungene Rotation versetzt, kann dadurch die Viskosität in Scherung besonders vorteilhaft ermittelt werden. Drehschwingungen oder Rotationen bewirken einen Bewegungsverlauf des magnetischen Körpers in der Flüssigkeit, der beinahe zu einer reinen Scherbewegung zwischen Körperoberfläche und Flüssigkeit führen kann. Somit kann dezidiert die Schergeschwindigkeit der Flüssigkeit und damit die Viskosität in Scherung mit Hilfe der aufgenommenen Messwerte ermittelt werden. Zudem fallen aufgrund der Levitation des magnetischen Körpers unerwünschte Einflüsse von mechanischen Verbindungen weg, d. h. das Messsystem selbst verfälscht nicht die Ergebnisse der Messung und damit die Ermittlung der Viskosität. Ein genaues, aussagekräftiges und reproduzierbares Ergebnis der Bestimmung der Scherviskosität der Flüssigkeit kann so ermöglicht werden.

Im Allgemeinen wird festgehalten, dass unter Drehschwingungen im Zusammenhang mit dieser Anwendung ein Oberbegriff für Pendelschwingungen und Rotationsschwingungen verstanden wird. Unter Rotation wird nicht nur die Drehung um eine Achse des magnetischen Körpers, sondern auch die Bewegung auf einer Kreisbahn um eine nicht durch den Massenmittelpunkt des magnetischen Körpers gehende Achse verstanden. Die aufgenommenen Messwerte entsprechen der zeitlichen Veränderung der räumlichen Lage des magnetischen Körpers in der Flüssigkeit. Diese Messwerte können mit Hilfe von Hallsensoren oder Auslesespulen ermittelt werden, aber auch andere Verfahren zur Positionsmessung von Körpern, wie mit Hilfe von Laser oder Mikrowellen, sind denkbar.

Hat der magnetische Körper die Form einer Kugel oder eines Kreiszylinders, kann dies zur einfach handhabbaren Ermittlung der Viskosität in Scherung beitragen. Aufgrund der speziellen Oberflächenformen dieser Körper kann die Flüssigkeit bei

Bewegungen des magnetischen Körpers reinen Scherbewegungen unterworfen sein.

Das Verfahren kann weiter verbessert werden, falls der magnetische Körper ein Permanentmagnet ist. Durch das Bestreben eines Permanentmagneten, sich im magnetischen Feld räumlich auszurichten, kann die räumliche Lage des magnetischen Körpers in der Flüssigkeit definiert werden.

Wird der magnetische Körper in eine resonante Drehschwingung versetzt, kann damit die Amplitude der Bewegung einen Maximalwert erreichen und zu besonders aussagekräftigen Ausgangsdaten für Vergleichsmessungen unterschiedlicher Flüssigkeiten genutzt werden.

Wird der magnetische Körper in eine Pendelschwingung versetzt, kann damit eine einfache und kostengünstige Möglichkeit geschaffen werden, die Viskosität der Flüssigkeit zu ermitteln. Um eine Pendelschwingung normal zur Richtung des magnetischen Gleichfelds zu erzeugen, kann nämlich ein Sekundärspulenpaar ausreichen, ein gegengleiches Wechselfeld in Richtung des magnetischen Gleichfelds zu generieren. Des Weiteren kann bei dieser Pendelschwingung die Bewegung und damit die zu messende Positionsänderung relativ groß ausfallen, wodurch die Anforderungen hinsichtlich der Positionsmessgenauigkeit reduziert werden können. Konstruktive Einfachheit bei gleichzeitig einfacher Handhabbarkeit können das erfindungsgemäße Verfahren somit auszeichnen.

Besonders vorteilhaft lässt sich die Schergeschwindigkeit und in weiterer Folge die Viskosität in Scherung ermitteln, wenn der Permanentmagnet in eine Rotationschwingung versetzt wird. Dabei kann dem Permanentmagneten eine Rotationschwingung um eine horizontale Achse durch ein magnetisches Wechselfeld, welches senkrecht zur Richtung des magnetischen Gleichfelds gerichtet ist, aufgezungen werden. Somit kann ein einfach handhabbares Verfahren zur Ermittlung der Viskosität geschaffen werden, indem einem Permanentmagneten, der zugleich

der Messkörper ist, Schwingungen um die eigene Achse, sogenannte Rotationsschwingungen, aufgezwungen werden.

Dies kann weiter verbessert werden, wenn der Permanentmagnet die Form eines diametral magnetisierten Kreiszylinders hat und um seine Längsachse in eine Rotationsschwingung versetzt wird. Gerade ein Kreiszylinder, dem um seine Längsachse Rotationsschwingungen aufgezwungen werden, kann sich besonders beim Ermitteln der Viskosität in Scherung auszeichnen. Überraschender Weise können erst durch die permanente diametrale Magnetisierung des Kreiszylinders die magnetische Levitation und die magnetisch aufgezwungene Rotationsschwingung um die Längsachse des Kreiszylinders ermöglicht werden.

Werden die Amplitude und/oder Phase der Drehschwingung des magnetischen Körpers aus den Messdaten ermittelt und zur Bestimmung der Viskosität der Flüssigkeit herangezogen, kann sich ein besonders einfach durchzuführendes Verfahren ergeben, da Amplitude und/oder Phase der Schwingung direkt aus der zeitlichen Änderung der räumlichen Lage des magnetischen Körpers bestimmt werden können.

Wird der magnetische Körper in Rotation versetzt, ergibt sich ein weiteres vorteilhaftes Verfahren um die Viskosität in Scherung zu ermitteln. Insbesondere wenn die Rotation nicht um die eigene Achse, sondern entlang einer Kreisbahn erfolgt, kann über eine einfach durchzuführende, zeitliche Positionsermittlung auf die Viskosität der Flüssigkeit rückgeschlossen werden. Um dem magnetischen Körper eine Rotation auf einer Kreisbahn aufzuzwingen, können zwei Sekundärspulenpaare genutzt werden, bei denen je zwei gegenüberliegende Spulen ein gegengleiches Wechselfeld in Richtung des magnetischen Gleichfelds generieren. Durch Versetzung der magnetischen Wechselfelder der Spulenpaare gegeneinander um 90 Grad bzw.  $\pi/2$ , kann eine Kreisbahn des resultierenden magnetischen Wechselfelds erreicht werden. Mit der Kreisbewegung des magnetischen Körpers, die dem magnetischen Wechselfeld folgt, kann sich die Viskosität in Scherung ähnlich vorteilhaft wie bei

einer aufgezwungenen Rotationsschwingung ermitteln lassen, da bei der Kreisbewegung die den magnetischen Körper berührende Flüssigkeit hauptsächlich einer Scherbewegung ausgesetzt ist.

Werden die Phasenverschiebungen der Rotation des magnetischen Körpers zum magnetischen Wechselfeld und/oder die Abweichung des Massenmittelpunkts des magnetischen Körpers zu seiner levitierten Ruhelage aus den Messdaten ermittelt und zur Bestimmung der Viskosität der Flüssigkeit herangezogen, kann das Verfahren in der Genauigkeit verbessert werden. Die Abweichung des Massenmittelpunkts des magnetischen Körpers zu seiner levitierten Ruhelage kann nämlich so direkt aus der räumlichen Lage des magnetischen Körpers ermittelt werden. Zudem kann die Phasenverschiebung aus der räumlichen Lage des magnetischen Körpers relativ zum magnetischen Wechselfeld bestimmt und zur Auswertung herangezogen werden.

Im Allgemeinen wird erwähnt, dass unter Phasenverschiebung in diesem Zusammenhang der Winkel zwischen der Position des magnetischen Körpers auf der Kreisbahn und der Position des tatsächlichen aktuellen Maximums des überlagerten magnetischen Wechselfeldes, welches sich durch die gewählte Anordnung und Ansteuerung der Sekundärspulen auch auf einer Kreisbahn bewegt, verstanden wird.

Eine weitere Verbesserung des Verfahrens kann sich ergeben, falls die Abweichung des Massenmittelpunkts des magnetischen Körpers zu seiner levitierten Ruhelage aus den Messdaten ermittelt wird und in Abhängigkeit der Höhe der Abweichung die, die levitierte Ruhelage bestimmenden und auf den magnetischen Körper einwirkenden Levitationskräfte verändert werden. Die Rückstellkräfte in Richtung levitierter Ruhelage nehmen nämlich mit zunehmendem Abstand des magnetischen Körpers von der Ruhelage nichtlinear ab – durch Anpassung des magnetischen Gleichfelds, das die levitierte Ruhelage bestimmt, kann diese Nichtlinearität kompensiert werden. Durch diese Linearisierung der auf den magnetischen Körper ein-

wirkenden Kräfte wird die Ermittlung der Viskosität aus dem Bewegungsverlauf deutlich vereinfacht.

Die vorgenannten Vorteile können weiter erhöht werden, wenn die Frequenz der resonanten Drehschwingung verändert wird, indem die, die levitierte Ruhelage bestimmenden und auf den magnetischen Körper einwirkenden Levitationskräfte verändert werden. Da die auf den magnetischen Körper einwirkenden Levitationskräfte bei jeder Bewegung des magnetischen Körpers als Rückstellkraft in Richtung der levitierten Ruhelage wirken, beeinflussen diese Levitationskräfte zugleich die Resonanzfrequenz der Drehschwingung. Die Veränderung der Levitationskräfte kann durch Anpassung des magnetischen Gleichfelds, das die levitierte Ruhelage bestimmt oder durch Überlagerung eines zusätzlichen Gleichfelds erfolgen. Dieses zusätzliche Gleichfeld kann bei einer Ausrichtung der Sekundärspulen parallel zum ersten Magnetfeld durch die Sekundärspulen erzeugt werden, aber auch die Verwendung einer zusätzlichen Spulenordnung ist denkbar. Durch die Änderung der Resonanzfrequenz der Drehschwingung, der Frequenz an der das Verfahren seine höchste Sensitivität hat, können genaue und aussagekräftige Messungen reproduzierbar durchgeführt werden.

In den Figuren ist beispielsweise das erfindungsgemäße Verfahren anhand von Ausführungsvarianten näher dargestellt. Es zeigen

- Fig. 1 eine Schnittansicht einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens für Pendelschwingungen und Rotationen des magnetischen Körpers,
- Fig. 2 eine Schnittansicht nach Fig. 1,
- Fig. 3 eine Schnittansicht einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens mittels Rotationsschwingungen eines Permanentmagneten,
- Fig. 4 eine Schnittansicht nach Fig. 3,
- Fig. 5 theoretische Resonanzkurven mit verschiedener Dämpfung für nichtlineare Rückstellkräfte,
- Fig. 6 die Resonanzkurven mit verschiedenen Flüssigkeiten für lineare Rückstellkräfte,

- Fig. 7 Radial- und Tangentialkraft die auf den Körper bei einer Bewegung auf einer Kreisbahn wirken, dargestellt über der Phasenverschiebung zwischen magnetischen Wechselfeld und der Position des Messkörpers,
- Fig. 8 Beispiel einer Stromvorgabekennlinie in Abhängigkeit der Messkörperposition zum Linearisieren der Rückstellkräfte,
- Fig. 9 die Resonanzkurven verschiedener Flüssigkeiten mit angepasster Resonanzfrequenz und
- Fig. 10 eine beispielhafte Anordnung von Hallsensoren.

Gemäß Fig. 1 wird beispielsweise ein Schnitt durch eine Vorderansicht einer Vorrichtung 1 gezeigt, die zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bestimmung der Viskosität einer Flüssigkeit 2 geeignet ist. Die Flüssigkeit 2, von der die Viskosität bestimmt werden soll, und der von ihr umgebene magnetische Körper 3 sind gemeinsam in einem Probengefäß 4 gelagert. Dabei wird der magnetische Körper 3 mit Hilfe eines ersten Magnetfelds 5, 6, nämlich eines anhand der Position des magnetischen Körpers 3 geregelten magnetischen Gleichfelds 7, in einer levitierten Ruhelage 8 gehalten. In der beispielhaften Vorrichtung 1 wird das magnetische Gleichfeld 7 von den Primärspulen 9, 10 erzeugt. Ausgehend von der levitierten Ruhelage 8 wird der magnetische Körper 3 mit Hilfe eines zweiten Magnetfelds 11, 12 in Bewegung, und zwar in diesem Ausführungsbeispiel in eine Pendelschwingung 34 versetzt. Dabei ist das zweite Magnetfeld 11, 12 ein magnetisches Wechselfeld 13, das von den Sekundärspulen 14, 15 erzeugt wird und sich mit dem ersten Magnetfeld 5, 6 bereichsweise überlagert. Besonders geeignet zur Bestimmung der Schergeschwindigkeit der Flüssigkeit 2 und damit der Viskosität in Scherung sind Bewegungen des magnetischen Körpers 3, die eine erzwungene Drehschwingung 34, 28 - siehe Fig. 3 - oder eine Rotation 17 - siehe Fig. 2 - enthalten. Nämlich gerade diese Formen der Bewegung bewirken hauptsächlich eine Scherbeanspruchung zwischen Körperoberfläche 18 und Flüssigkeit 2. Von dieser Bewegung abhängige, über die Hallsensoren 19, 20 erfasste Messdaten 21, 22 werden dann zur Bestimmung der Viskosität der Flüssigkeit 2 herangezogen. Zudem fallen aufgrund der Levitation des magnetischen Körpers 3, der zugleich der

Messkörper 23 ist, unerwünschte Einflüsse von mechanischen Verbindungen weg, d. h. das Messsystem selbst verfälscht nicht die Ergebnisse der Messung und damit die Ermittlung der Viskosität. Ein robustes, flexibles und störungsunempfindliches Verfahren ist somit geschaffen.

Wie in Fig. 3 dargestellt, ist in einer vorzugsweisen Ausführung des Verfahrens der magnetische Körper 3 ein Permanentmagnet 24. Durch die Bestrebungen des Permanentmagneten 24 seine Pole 25, 26 im magnetischen Feld 32 auszurichten, levitieren permanentmagnetische Körper 24 in einer durch das resultierende Magnetfeld 32 vorgegebenen Lage in der Flüssigkeit 200. Dementsprechend sind für das Verfahren, sobald die Körperform keine Kugel 27 ist oder die Bewegung Rotationschwingungen 28 um die eigene Achse beinhalten, permanentmagnetische Körper 24 vorzuziehen.

Entsprechend dem Schnitt durch die Fig. 1 zeigt Fig. 2 eine Anordnung von Sekundärspulen 14, 15 die ein magnetisches Wechselfeld zur Erzeugung von Pendelschwingungen generieren. Dazu erzeugen zwei gegenüberliegende Sekundärspulen 14, 15 ein gegengleiches Wechselfeld 13 - wie in Fig. 1 angedeutet -, das dem magnetischen Gleichfeld 7 überlagert wird und so ein resultierendes magnetisches Feld 32 erzeugt, dessen Maximum der in Fig. 1 und Fig. 2 eingezeichneten Hilfslinie 33 folgt. Dementsprechend folgt auch der magnetische Körper 3 diesem Maximalwert des resultierenden magnetischen Felds 32. Durch die zur Verdrängung der Flüssigkeit 2 bzw. der zur Beschleunigung des magnetischen Körpers 3 notwendigen Energie folgt der Körper 3 jedoch mit einer Verzögerung. Wird nun die Frequenz des zweiten magnetischen Feldes 11, 12, dem überlagerten Wechselfeld 13 geändert, erreicht bei einer bestimmten Frequenz - der Resonanzfrequenz 48 - die Bewegung des magnetischen Körpers 3 einen maximalen Abstand zur levitierten Ruhelage 8. Messungen bei dieser Resonanzfrequenz 48 zeichnen sich zur Bestimmung der von der Flüssigkeit 2 verursachten Dämpfung und mit der damit unmittelbar zusammenhängenden Viskosität besonders aus. Auch Vergleichsmessungen zweier verschiedener Flüssigkeiten 2 können durch Bestimmung der Reso-

nanzfrequenz und des maximalen Abstands des magnetischen Körpers zur levitierten Ruhelage 8 durchgeführt werden. Somit ist ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zur Ermittlung der Viskosität geschaffen worden, da nur zwei Sekundärspulen 14, 15 benötigt werden, um dem magnetischen Körper 3 eine Pendelschwingung 34 normal zur Richtung des magnetischen Gleichfelds 7 aufzuzwingen.

Fig. 3 zeigt einen Schnitt durch eine Vorderansicht einer Vorrichtung 100 als anderes Ausführungsbeispiel zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Dabei wird der Permanentmagnet 24 mittels Sekundärspulen 35, 36, deren magnetisches Wechselfeld 37 senkrecht zum ersten magnetischen Gleichfeld 7 gerichtet ist, aus seiner levitierten Ruhelage 8 gedreht. Aufgrund der wechselnden Stärke und Richtung dieses zweiten magnetischen Feldes 38, 39 wird dem Permanentmagneten 24 eine Rotationsschwingung 28 aufgezwungen. Das magnetische Wechselfeld 37 wird bei diesem Beispiel von einem Sekundärspulenpaar 35, 36, bei dem die beiden Spulen 35, 36 ein Wechselfeld 37 gleicher Richtung generieren, verursacht. Natürlich kann die Rotationsschwingung 28 auch mit nur einer, den Permanentmagnet 24 umschließenden Sekundärspule aufgezwungen werden, was hier nicht näher dargestellt ist. Vorteilhaft erzeugen Rotationsschwingungen 28 Bewegungen, die eine Scherung einer Flüssigkeit 200 bewirken und sich somit bei der Ermittlung der Schergeschwindigkeit und damit der Viskosität in Scherung besonders auszeichnen können.

Eine besonders günstige Konfiguration zur Ermittlung der Schergeschwindigkeit ist, wie in Fig. 3 bzw. dem zugehörigen Schnitt in Fig. 4 dargestellt, ein diametral magnetisierter, kreiszylinderförmiger Permanentmagnet 24 in einem kreiszylindrischen Probengefäß 42, das mit einer Flüssigkeit 200 gefüllt ist. Aufgrund der permanenten diametralen Magnetisierung des Kreiszylinders 43 sind die magnetische Levitation und die magnetisch aufgezwungene Rotationsschwingung 28 um die Längsachse 44 des Kreiszylinders 43 realisierbar. Somit ist ein einfaches Verfahren geschaffen, bei dem dem Messkörper 23 ohne mechanische Verbindung zum Messsystem, um

seine Längsachse 44 Rotationsschwingungen 28 zur Ermittlung der Viskosität in Scherung aufgezwungen werden.

Amplitude 45 und Phase 46 der Schwingung des magnetischen Körpers 3 können zur Bestimmung der Viskosität der Flüssigkeit 2 bzw. 200 herangezogen werden. Dabei werden Amplitude 45 und Phase 46 der Schwingung aus den Messdaten 21, 22 bestimmt und über die sich ändernde Frequenz des zweiten magnetischen Wechselfelds 13 bzw. 37 aufgezeichnet. Dabei entsprechen die in Fig. 5 dargestellten, auf die Resonanzfrequenz normierten theoretischen Resonanzkurven 47 des magnetischen Körpers 3 Pendelschwingungen 34 in verschiedenen Flüssigkeiten 2, 200, 201, 202, und 203. Die nichtlineare Rückstellkraft des magnetischen Gleichfelds 7 bei zunehmender Auslenkung des magnetischen Körpers 3 aus seiner Ruhelage 8 bewirkt, dass die maximale Amplitude unterhalb die Resonanzfrequenz des Systems verschoben wird.

Fig. 6 stellt hingegen das Resonanzverhalten für Rotationsschwingungen 28 von verschiedenen Flüssigkeiten 2, 200, 201, 202, und 203 bei kleinen Amplituden dar. Hier kommt es zu keiner Verzerrung der Resonanzkurven, da aufgrund der geringen Auslenkungen keine nichtlinearen Rückstellkräfte auftreten. Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeiten 2, 200, weisen diese auch verschiedene Resonanzfrequenzen 48, 49 auf.

Ein weiteres vorteilhaftes Beispiel für das erfindungsgemäße Verfahren, um die Viskosität in Scherung zu ermitteln, kann anhand Fig. 2 erläutert werden. Mit Hilfe der vier Sekundärspulen 14, 15, 30, 31 wird der magnetische Körper 3 in eine Rotation 17 um die levitierte Ruhelage 8 auf einer Kreisbahn 50 versetzt. Dazu werden je zwei Sekundärspulenpaare 14, 15 und 30, 31, bei denen je zwei gegenüberliegende Spulen 14 und 15 bzw. 30 und 31 ein gegengleiches Wechselfeld 13 parallel zur Richtung des magnetischen Gleichfelds 7 generieren, um 90 Grad versetzt angeordnet. Zudem sind auch die Magnetfelder 11, 12, 51, 52 der Spulenpaare 14, 15 und 30, 31 gegeneinander um 90 Grad bzw.  $\pi/2$  versetzt. Durch die Überlagerung

des magnetischen Wechselfelds 13 der Sekundärspulen 14, 15, 30, 31 mit dem magnetischen Gleichfeld 7 der Primärspulen 9, 10 entsteht ein magnetisches Feld 32, dessen Bereich maximaler Stärke sich auf einer Kreisbahn 50 bewegt. Dementsprechend folgt auch der magnetische Körper 3 diesem Maximalwert des resultierenden magnetischen Felds 32 mit einer gewissen Verzögerung auf einer Kreisbahn 50 – ähnlich einer Synchronmaschine. Diese Kreisbewegung des magnetischen Körpers 3 ist besonders interessant, um Messergebnisse zu erzielen, die mit dem Kugelfallviskosimeter vergleichbar sind.

Die Phasenverschiebungen 53 der Rotation 17 des magnetischen Körpers 3 zum magnetischen Wechselfeld 13 und/oder die Abweichung 54 des Massenmittelpunkts 55 des magnetischen Körpers 3 zu seiner levitierten Ruhelage 8 können zur Bestimmung der Viskosität der Flüssigkeit 2 herangezogen werden. Dabei kann der gemäß Fig. 7 dargestellte Zusammenhang zwischen Phasenverschiebungen 53 der Rotation 17 - entsprechend dem Lastwinkel einer Synchronmaschine – und den auf den magnetischen Körper 3 wirkenden Radial- 59 und Tangentialkräften 60 genutzt werden, um die Viskosität der Flüssigkeit 2 zu ermitteln. Dabei können nur Werte bis zu einer Phasenverschiebungen 53 von 90 Grad ( $\pi/2$ ) praktisch ermittelt werden, da größere Phasenverschiebungen 53 in der Praxis nicht eingehalten werden können. Dieses Verhalten bei größeren Phasenverschiebungen 53 als 90 Grad ( $\pi/2$ ) entspricht dem außer Tritt fallen einer Synchronmaschine.

Für eine Pendelschwingung 34 entsprechend Fig. 5 kann die Nichtlinearität kompensiert werden. Dazu wird die Abweichung 54 des Massenmittelpunkts 55 des magnetischen Körpers 3 zu seiner levitierten Ruhelage 8 aus den Messdaten 21, 22 ermittelt und in Abhängigkeit der Höhe der Abweichung 54 das magnetische Gleichfeld 7 zur Erzeugung der levitierten Ruhelage 8 angepasst. Die Rückstellkräfte des magnetischen Körpers 3 in Richtung der levitierten Ruhelage 8 nehmen nämlich nichtlinear mit der Abweichung 54 von der levitierten Ruhelage 8 ab. Wird nun bei größerer Abweichung 54 die Rückstellkraft – bewirkt durch das magnetische Gleichfeld 7 – erhöht, kann dieser Effekt kompensiert werden. Dies kann durch Erhöhung

des Spulenstroms 63 gegenüber einem linearen Spulenstrom 64 in Abhängigkeit der Abweichung 54 des Massenmittelpunkts 55 des magnetischen Körpers 3 zu seiner levitierten Ruhelage 8 gemäß Fig. 8 erfolgen. Dementsprechend ergibt sich eine kompensierte Resonanzkurve für Pendelschwingungen 34, die die Bestimmung der Viskosität vereinfacht. Der nichtlineare Verlauf der Rückstellkräfte muss nämlich nicht mehr berücksichtigt werden.

Eine weitere Verbesserung des erfindungsgemäßen Verfahrens ergibt sich, indem dem ersten magnetischen Gleichfeld 7 ein zweites magnetisches Gleichfeld 56, wie in Fig. 4 gezeigt, überlagert wird. Dies kann durch Erhöhung des Stroms durch die Primärspulen 9, 10 erfolgen, oder aber auch durch eine zusätzliche nicht näher dargestellte Spulenordnung. Die Überlagerung eines zweiten magnetischen Gleichfelds 56 bewirkt eine Veränderung der Rückstellkraft in die levitierte Ruhelage und somit auch eine Veränderung der Resonanzfrequenz 48, 49 des Messsystems. Dies erlaubt, für verschiedene Flüssigkeiten gleiche Resonanzfrequenzen 58 einzustellen. So kann ein Verfahren geschaffen werden, das relativ einfach aussagekräftige Vergleichsmessungen für verschiedene Flüssigkeiten 2, 200 bei einer gemeinsamen Resonanzfrequenz 58 erlaubt. Ein Diagramm verschiedener Flüssigkeiten 2, 200, 201, 202 und 203 mit angepasster Resonanzfrequenz 58 ist in Figur 9 dargestellt.

Im Allgemeinen wird festgehalten, dass es neben den in den Ausführungsbeispielen beispielhaft gezeigten Anordnungen der Spulen noch andere Anordnungen vorstellbar sind, die vergleichbare magnetische Felder bewirken und damit genauso für das erfindungsgemäße Verfahren genutzt werden können.

Im Allgemeinen wird festgehalten, dass es neben der in den Ausführungsbeispielen beispielhaft gezeigten aktiven magnetischen Levitation mit zwei Primärspulen auch noch weitere Möglichkeiten der passiven magnetischen Levitation gibt. Diese weiteren Möglichkeiten, wie zum Beispiel ein passiver Aufbau mit Permanentmagnet und

diamagnetischem Material anstelle der zwei Primärspulen, sind für dieses Verfahren ebenso denkbar, aber nicht näher dargestellt.

Zudem wird festgehalten, dass die Positionserfassung des magnetischen Körpers über Hallsensoren oder Messspulen möglich ist. Diese Positionserfassung ist in den Ausführungsbeispielen nur schematisch dargestellt. Für eine entsprechend genaue Auflösung der Messergebnisse werden Messdaten 22 von mehreren Hallsensoren 20 benötigt, die zum Beispiel wie in Fig. 10 gezeigt, zwischen Primärspule 10 und magnetischem Körper 3 angeordnet sind.

### P a t e n t a n s p r ü c h e :

1. Verfahren zur Bestimmung der Viskosität einer Flüssigkeit (2, 200), bei dem ein von der Flüssigkeit (2, 200) vollständig umgebener magnetischer Körper (3) mit Hilfe mindestens eines ersten Magnetfelds (5, 6), insbesondere eines anhand der Position des magnetischen Körpers geregelten magnetischen Gleichfelds (7), in einer levitierten Ruhelage (8) gehalten wird und mit Hilfe mindestens eines zweiten Magnetfelds (11, 12, 38, 39, 51, 52), das dem ersten Magnetfeld (5, 6) zumindest bereichsweise überlagert ist und ein magnetisches Wechselfeld (13, 37) aufweist, ausgehend von der levitierten Ruhelage (8) in Bewegung versetzt wird, von der Bewegung des magnetischen Körpers (3) abhängige Messdaten (21, 22) erfasst werden und anhand dieser die Viskosität der Flüssigkeit (2, 200) bestimmt wird, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) zumindest in eine erzwungene Drehschwingung (34, 28) oder in eine erzwungene Rotation (17) versetzt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) die Form einer Kugel (27) oder eines Kreiszylinders (43) hat.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) ein Permanentmagnet (24) ist.
4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) in eine resonante Drehschwingung (34, 28) versetzt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) in eine Pendelschwingung (34) versetzt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Permanentmagnet (24) in eine Rotationsschwingung (28) versetzt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Permanentmagnet (24) die Form eines diametral magnetisierten Kreiszylinders (43) hat und um seine Längsachse (44) in eine Rotationsschwingung (28) versetzt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Amplitude (45) und/oder Phase (46) der Drehschwingung (34, 28) des magnetischen Körpers (3) aus den Messdaten (21, 22) ermittelt und zur Bestimmung der Viskosität der Flüssigkeit (2, 200) herangezogen werden.
9. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) in Rotation (17) versetzt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Phasenverschiebungen (53) der Rotation (17) des magnetischen Körpers (3) zum magnetischen Wechselfeld (13, 37) und/oder die Abweichung (54) des Massenmittelpunkts (55) des magnetischen Körpers (3) zu seiner levitierten Ruhelage (8) aus den Messdaten (21, 22) ermittelt und zur Bestimmung der Viskosität der Flüssigkeit (2, 200) herangezogen werden.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Abweichung (54) des Massenmittelpunkts (55) des magnetischen Körpers (3) zu seiner levitierten Ruhelage (8) aus den Messdaten (21, 22) ermittelt wird und in Abhängigkeit der Höhe der Abweichung (54) die, die levitierte Ruhelage (8) bestimmenden und auf den magnetischen Körper (3) einwirkenden Levitationskräfte verändert werden.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenz der resonanten Drehschwingung (34, 28) verändert wird, indem die, die levitierte Ruhelage (8) bestimmenden und auf den magnetischen Körper (3) einwirkenden Levitationskräfte verändert werden.

FIG.1

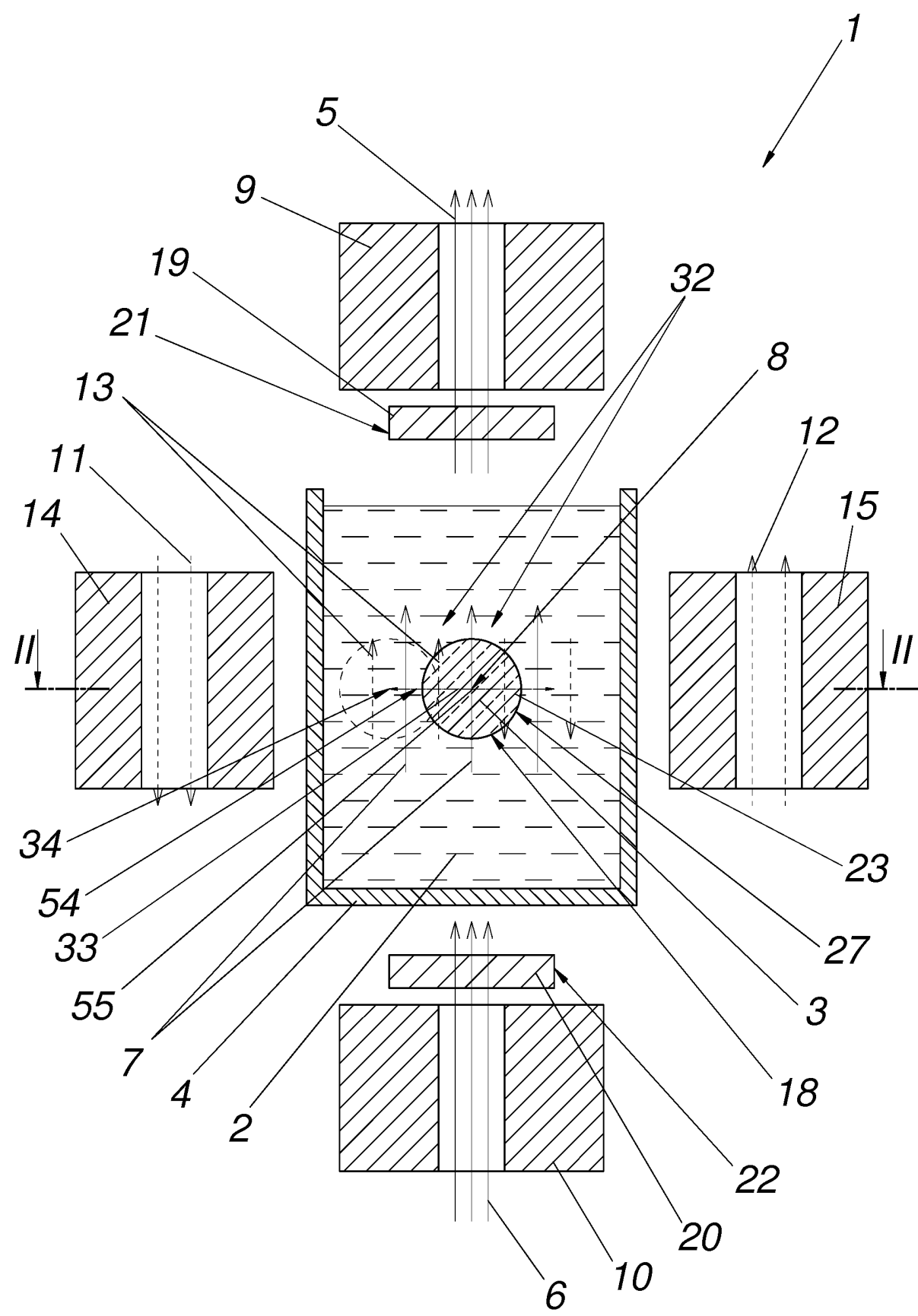


FIG.2

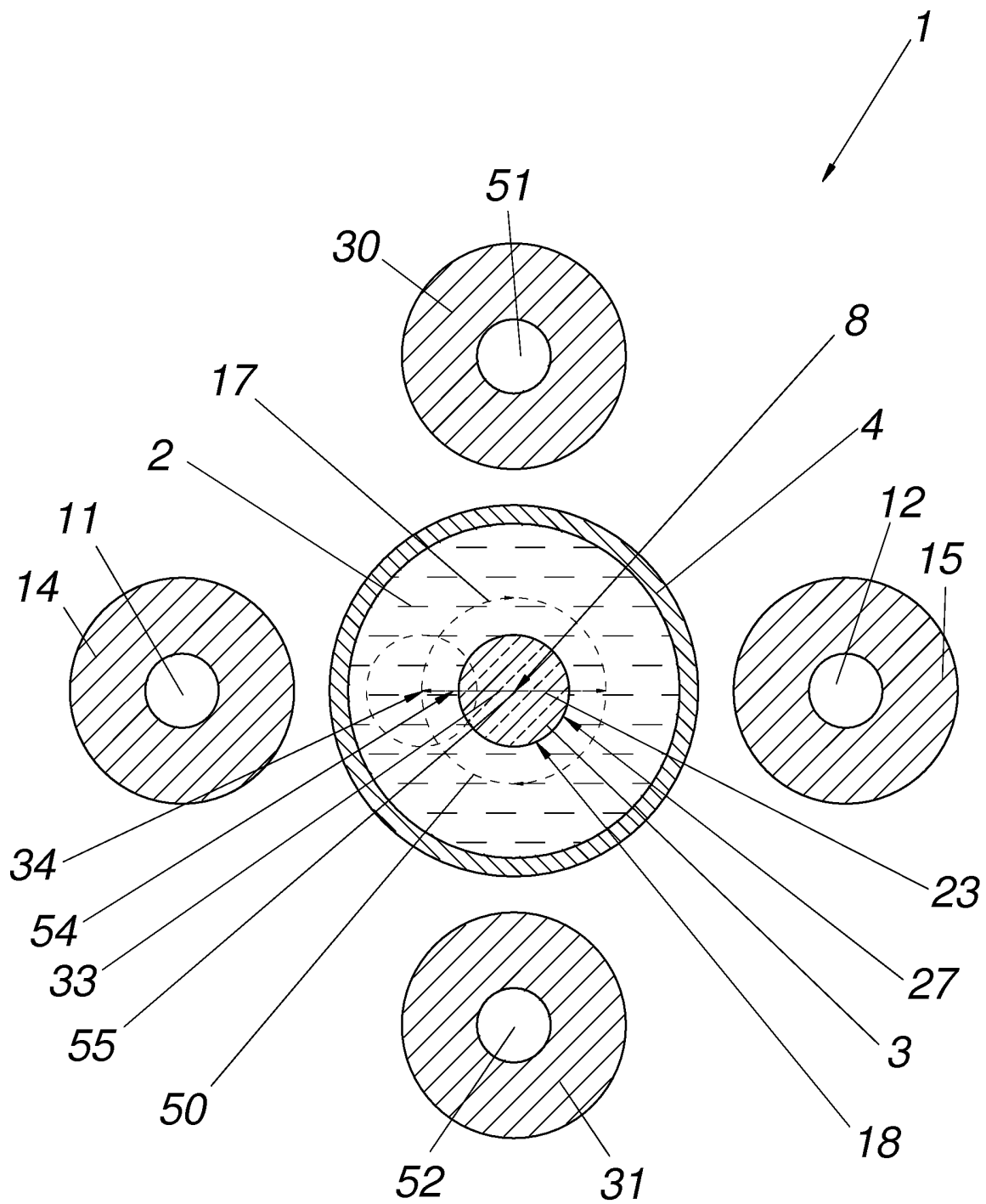


FIG.3

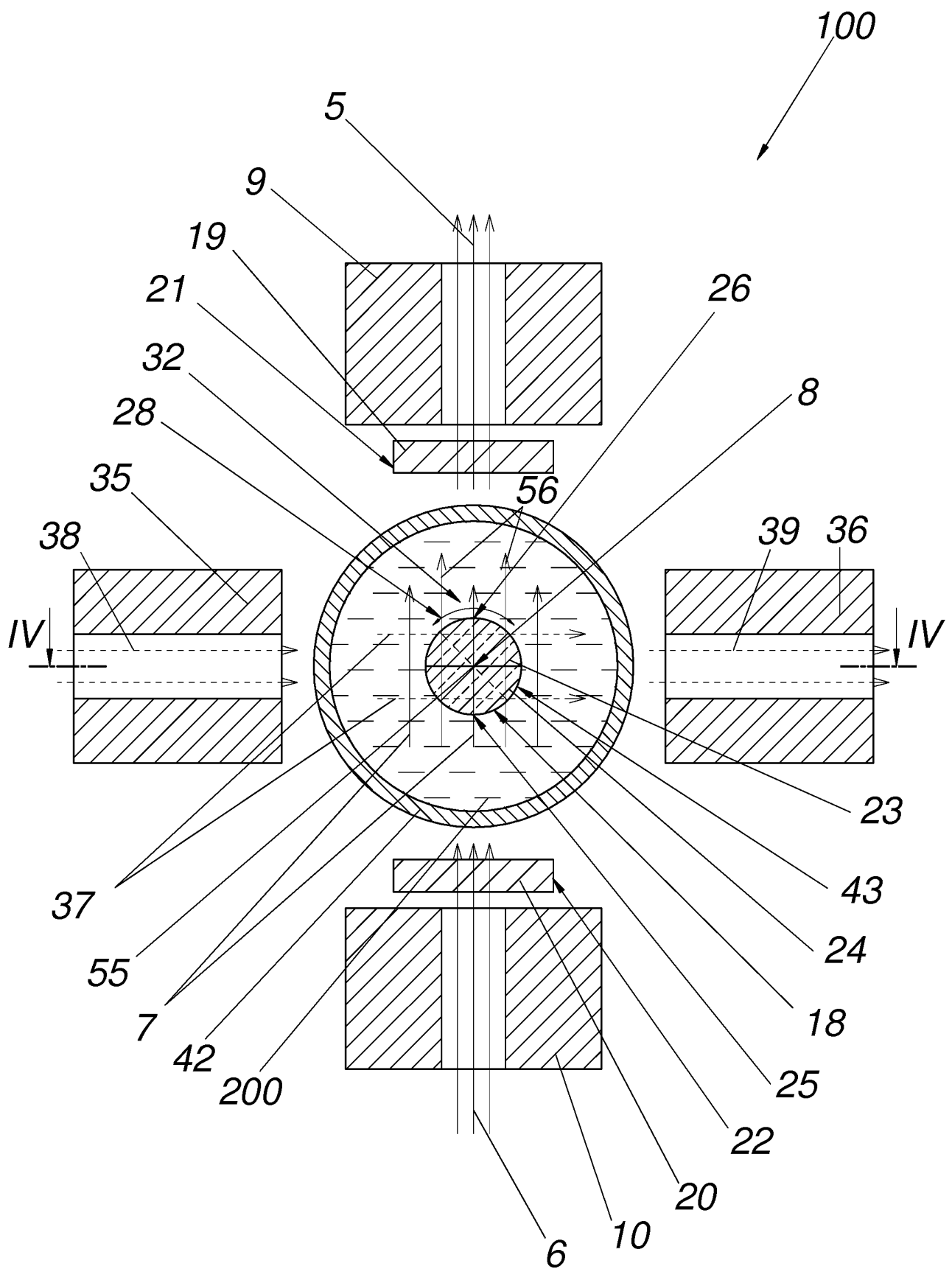


FIG.4

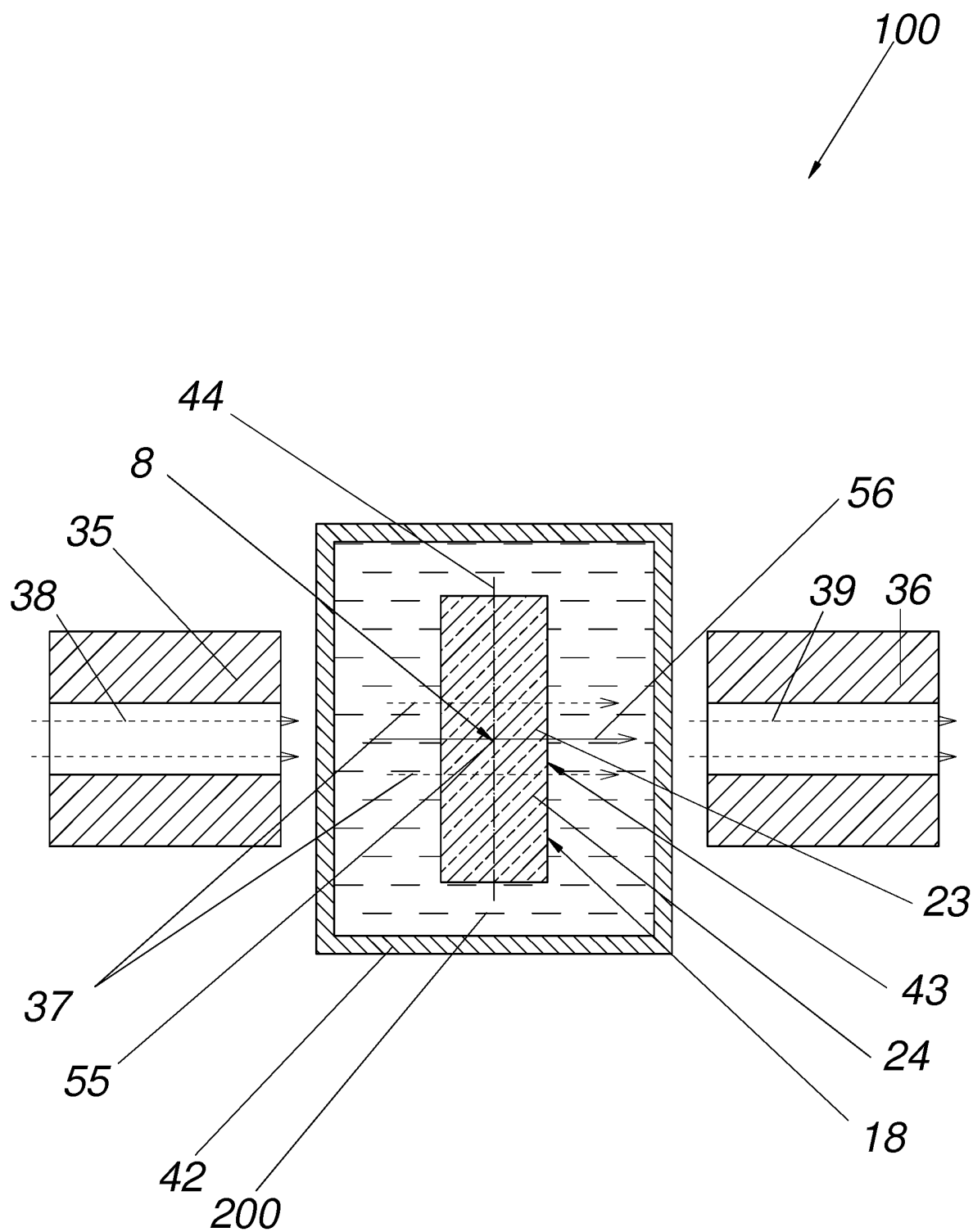


FIG.5

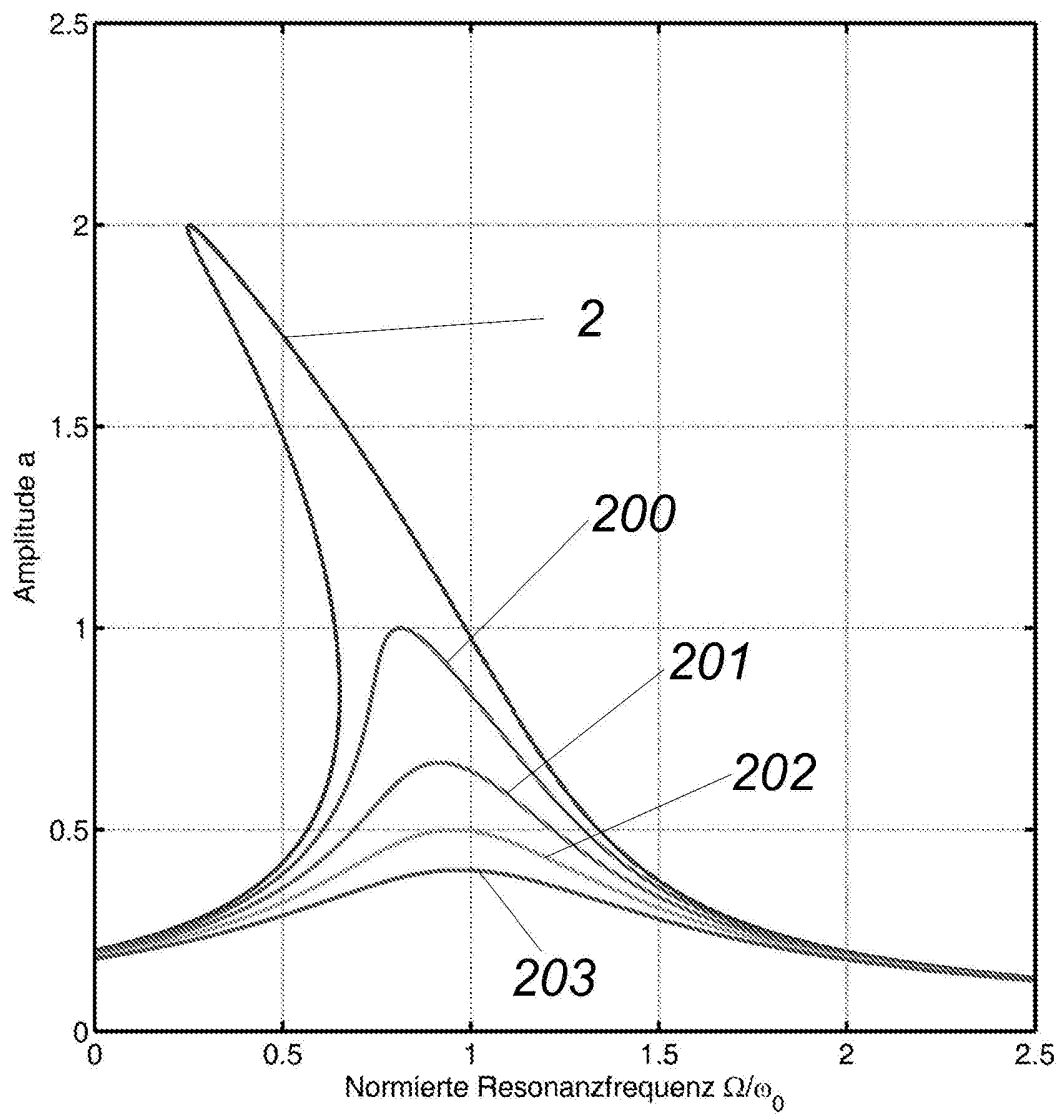


FIG.6

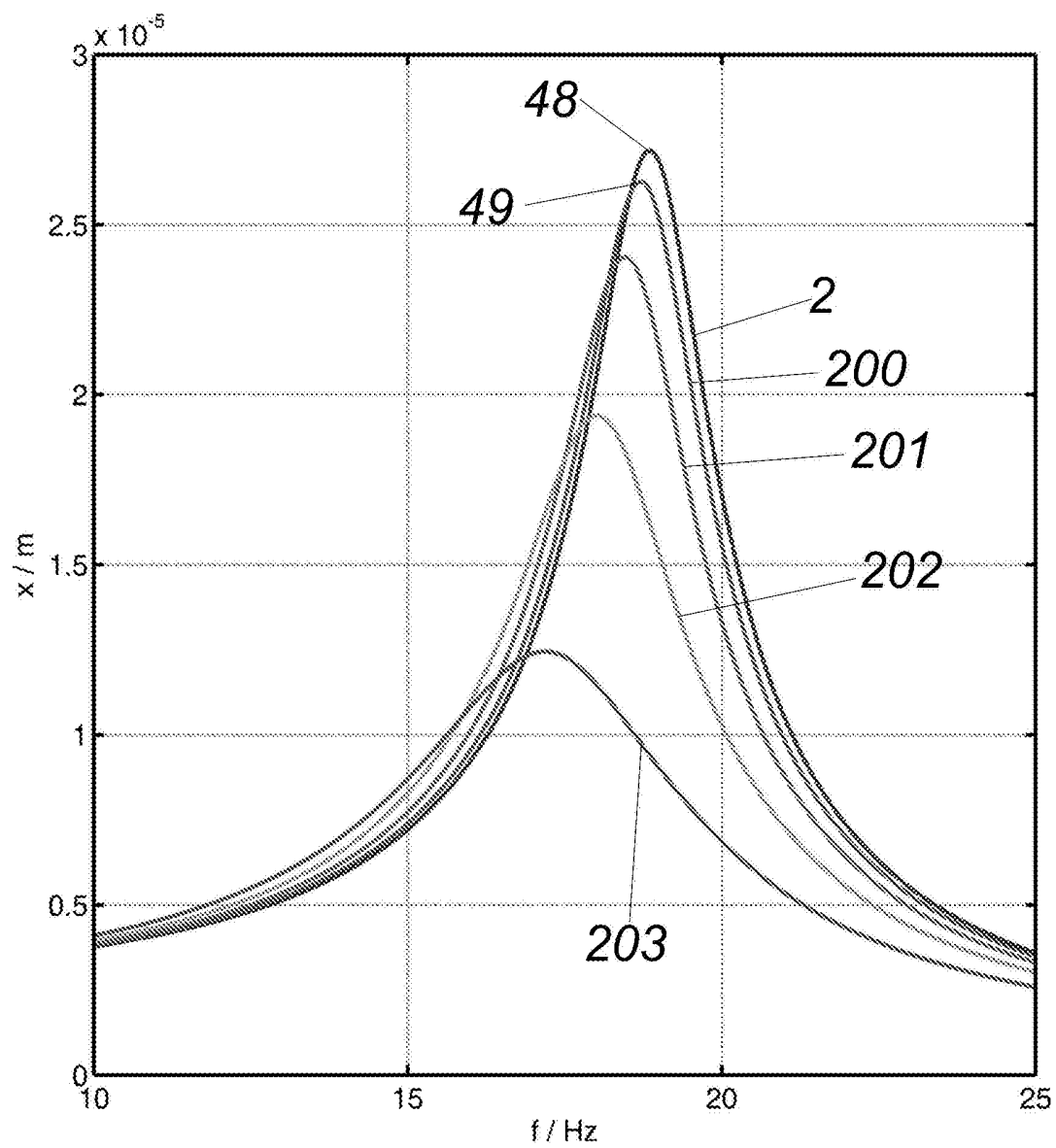


FIG.7

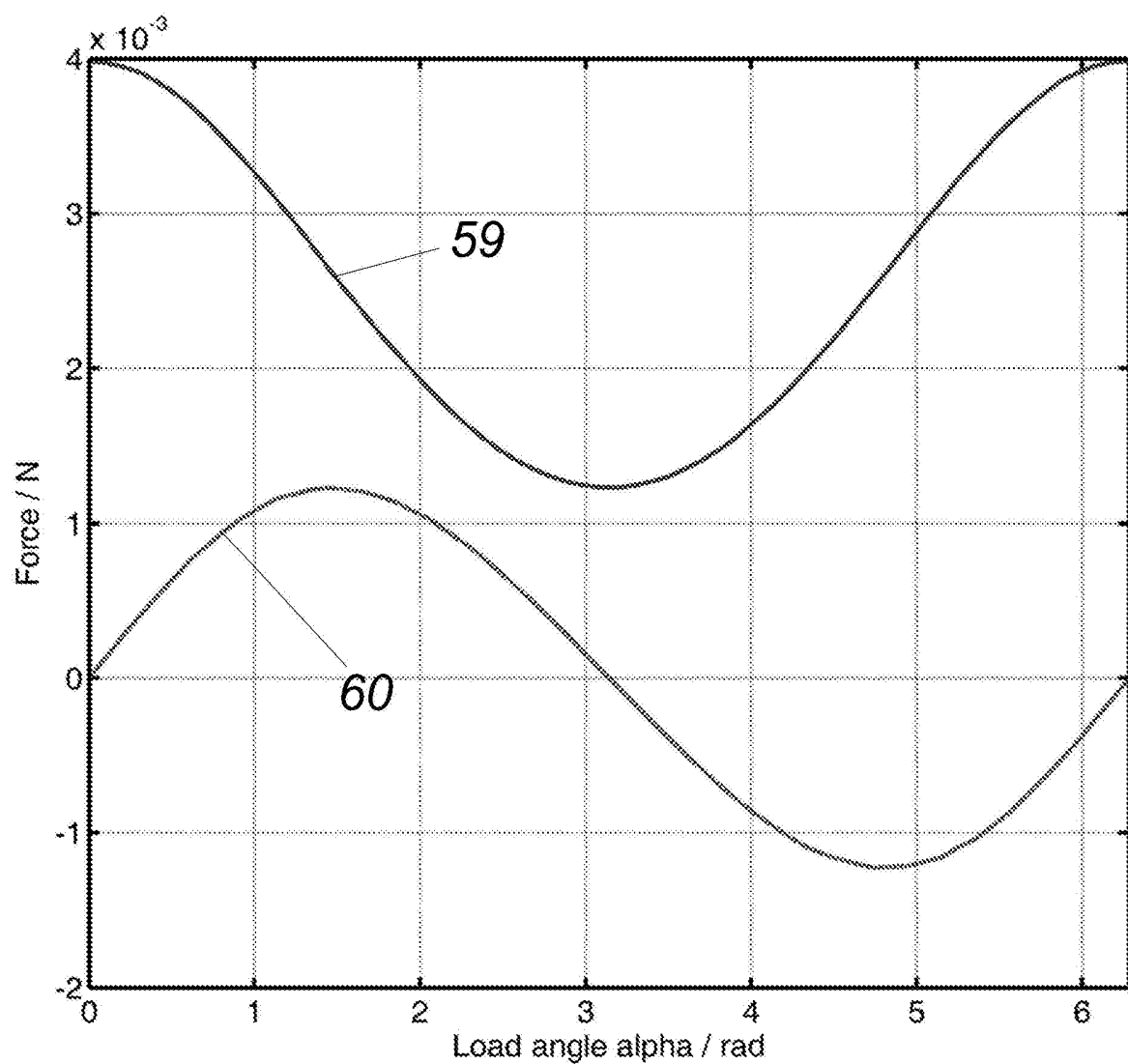


FIG.8

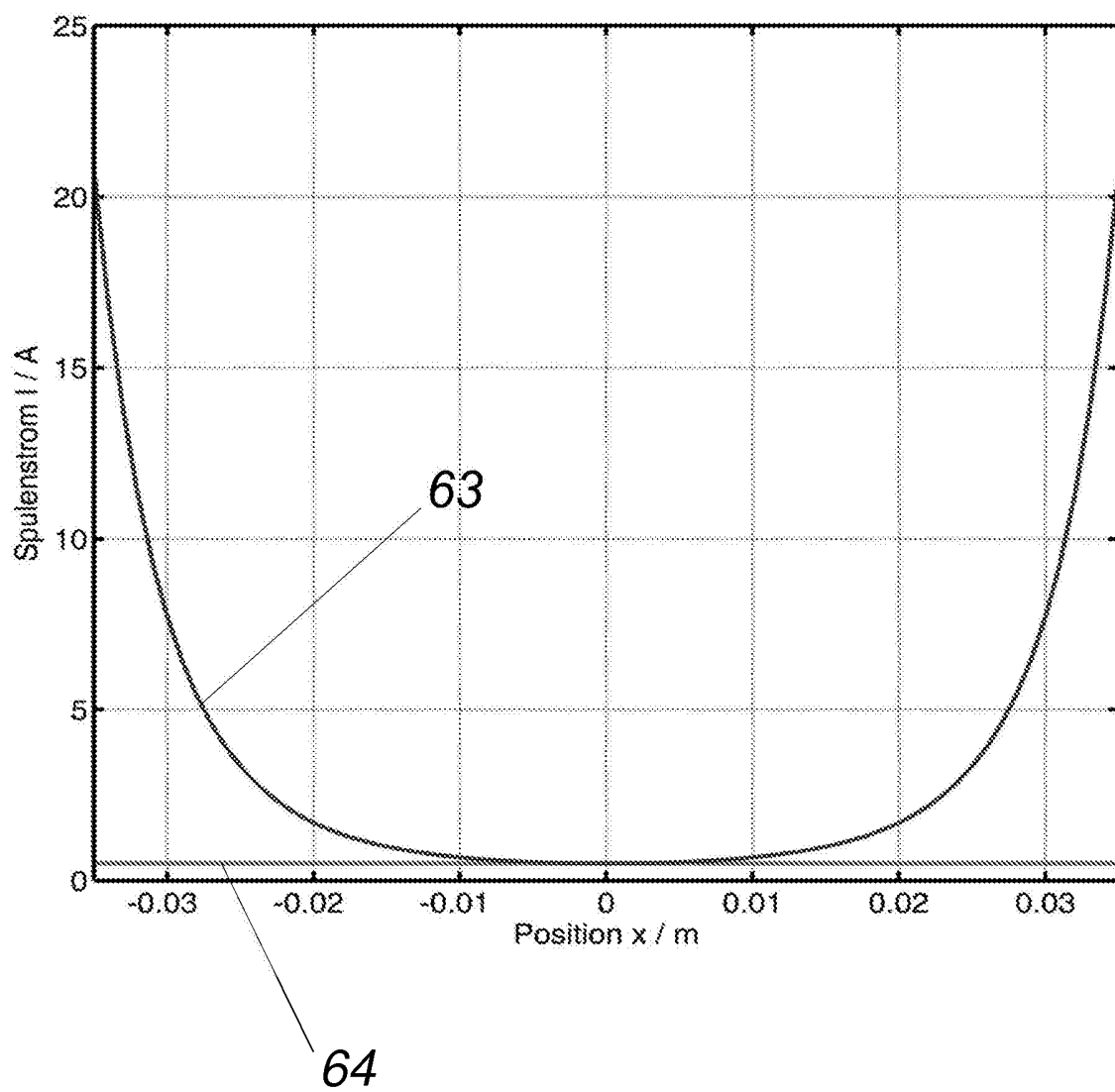
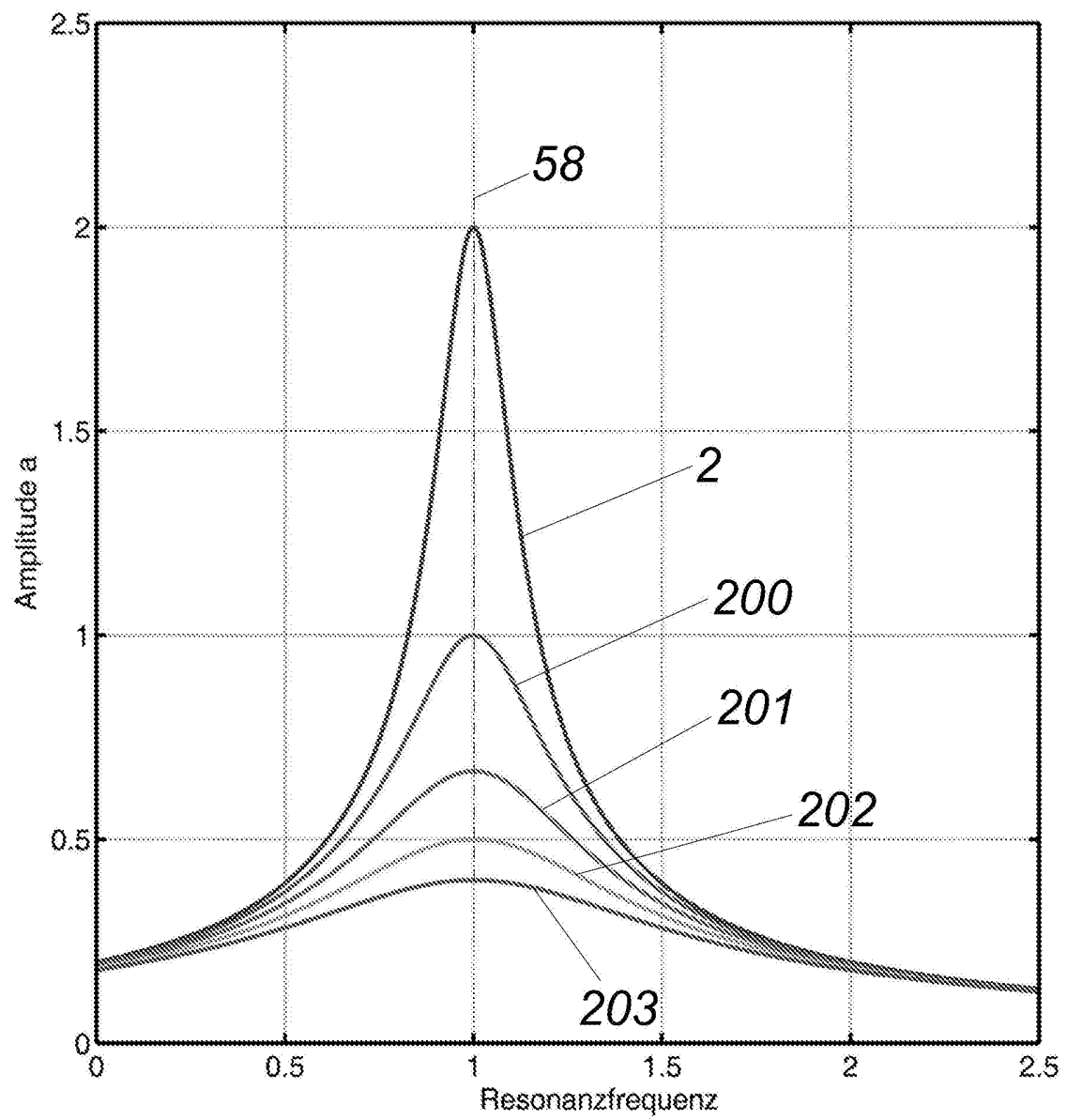
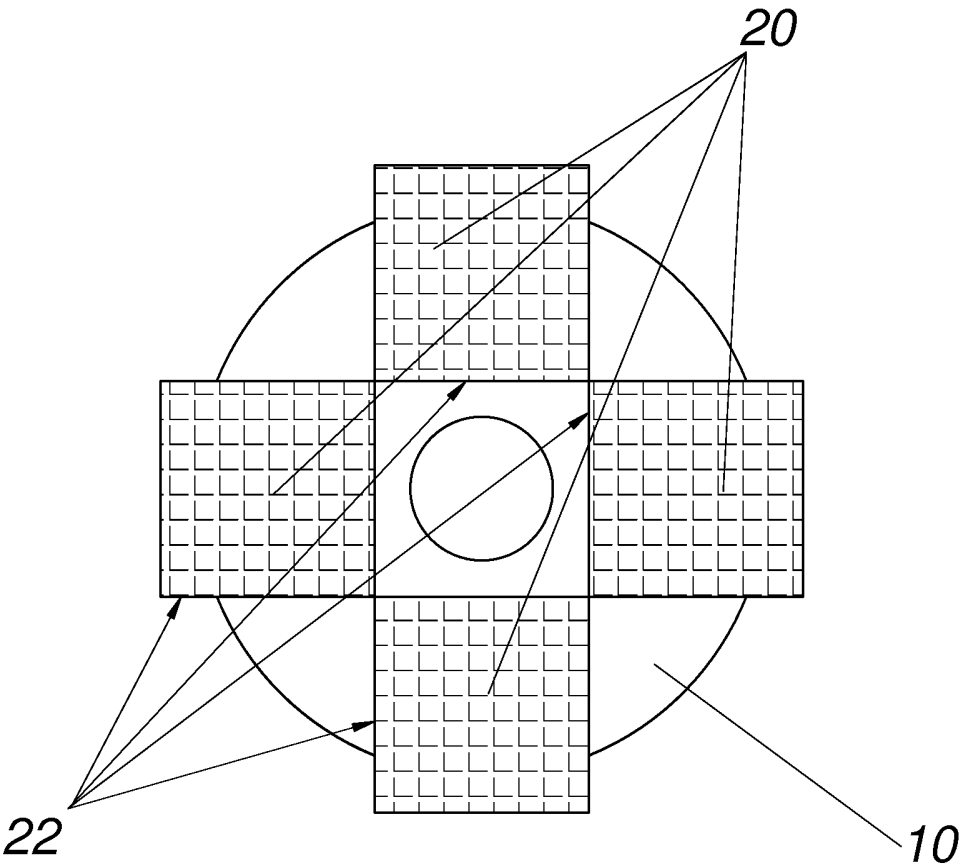


FIG.9



*FIG.10*



**P a t e n t a n s p r ü c h e :**

1. Verfahren zur Bestimmung der Viskosität einer Flüssigkeit (2, 200), bei dem ein von der Flüssigkeit (2, 200) vollständig umgebener magnetischer Körper (3) mit Hilfe mindestens eines ersten Magnetfelds (5, 6), insbesondere eines anhand der Position des magnetischen Körpers geregelten magnetischen Gleichfelds (7), in einer levitierten Ruhelage (8) gehalten wird und mit Hilfe mindestens eines zweiten Magnetfelds, das dem ersten Magnetfeld (5, 6) zumindest bereichsweise überlagert ist und ein magnetisches Wechselfeld (13, 37) aufweist, ausgehend von der levitierten Ruhelage (8) in Bewegung versetzt wird, von der Bewegung des magnetischen Körpers (3) abhängige Messdaten (21, 22) erfasst werden und anhand dieser die Viskosität der Flüssigkeit (2, 200) bestimmt wird, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) zumindest in eine erzwungene Drehschwingung (34, 28) oder in eine erzwungene Rotation (17) versetzt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) in der Form als Kugel (27) oder als Kreiszylinder (43) ausgebildet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) durch einen Permanentmagneten (24) ausgebildet wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) in eine resonante Drehschwingung (34, 28) versetzt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) in eine Pendelschwingung (34) versetzt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Permanentmagnet (24) in eine Rotationsschwingung (28) versetzt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Permanentmagnet (24) in der Form als diametral magnetisierter Kreiszylinder (43) ausgebildet und um seine Längsachse (44) in eine Rotationsschwingung (28) versetzt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Amplitude (45) und/oder Phase (46) der Drehschwingung (34, 28) des magnetischen Körpers (3) aus den Messdaten (21, 22) ermittelt und zur Bestimmung der Viskosität der Flüssigkeit (2, 200) herangezogen werden.

9. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der magnetische Körper (3) in Rotation (17) versetzt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Phasenverschiebungen (53) der Rotation (17) des magnetischen Körpers (3) zum magnetischen Wechselfeld (13, 37) und/oder die Abweichung (54) des Massenmittelpunkts (55) des magnetischen Körpers (3) zu seiner levitierten Ruhelage (8) aus den Messdaten (21, 22) ermittelt und zur Bestimmung der Viskosität der Flüssigkeit (2, 200) herangezogen werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Abweichung (54) des Massenmittelpunkts (55) des magnetischen Körpers (3) zu seiner levitierten Ruhelage (8) aus den Messdaten (21, 22) ermittelt wird und in Abhängigkeit der Höhe der Abweichung (54) die, die levitierte Ruhelage (8) bestimmenden und auf den magnetischen Körper (3) einwirkenden Levitationskräfte verändert werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenz der resonanten Drehschwingung (34, 28) verändert wird, indem die, die levitierte Ruhelage (8) bestimmenden und auf den magnetischen Körper (3) einwirkenden Levitationskräfte verändert werden.