



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 602 18 050 T2 2007.10.25

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) EP 1 421 348 B1

(21) Deutsches Aktenzeichen: 602 18 050.3

(86) PCT-Aktenzeichen: PCT/US02/27488

(96) Europäisches Aktenzeichen: 02 766 159.4

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: WO 2003/021206

(86) PCT-Anmeldetag: 28.08.2002

(87) Veröffentlichungstag

der PCT-Anmeldung: 13.03.2003

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: 26.05.2004

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: 07.02.2007

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: 25.10.2007

(51) Int Cl.⁸: G01F 1/84 (2006.01)

G01F 25/00 (2006.01)

G01N 9/00 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

941332 29.08.2001 US

(84) Benannte Vertragsstaaten:

CH, DE, GB, LI

(73) Patentinhaber:

Micro Motion Inc., Boulder, Col., US

(72) Erfinder:

NORMEN, F., David, Louisville, CO 80027, US

(74) Vertreter:

Grünecker, Kinkeldey, Stockmair &
Schwanhäusser, 80538 München

(54) Bezeichnung: BESTIMMUNG DER EIGENSCHAFTEN EINES STRÖMUNGSROHRES UND EINER FLÜSSIGKEIT
IN EINEM CORIOLISDURCHFLUSSMESSER

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelebt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung**GEBIET DER ERFINDUNG**

[0001] Die Erfindung betrifft Coriolis-Durchflussmesser und insbesondere Verfahren und Systeme zum Messen von Eigenschaften eines Strömungsrohrs und eines Materials, das durch das Strömungsrohr strömt.

BESCHREIBUNG DES PROBLEMS

[0002] Coriolis-Durchflussmesser messen den Massendurchfluss und andere Informationen für Fluide, die durch ein Strömungsrohr in dem Durchflussmesser strömen. Coriolis-Durchflussmesser bestehen aus einem Coriolis-Sensor und dazugehöriger Mess-Elektronik. Beispielhafte Coriolis-Durchflussmesser sind im U.S.-Patent Nr. 4,109,524 vom 29. August 1978, U.S.-Patent Nr. 4,491,025 vom 1. Januar 1985 und Re. 31,450 vom 11. Februar 1982 offenbart, alle für J. E. Smith und andere. Diese Durchflussmesser weisen ein oder mehrere Strömungsrohre mit einer geraden oder einer gekrümmten Auslegung auf. Jede Strömungsrohr-Auslegung in einem Coriolis-Durchflussmesser weist eine Gruppe von natürlichen Schwingungsmoden auf, die vom Typ einer einfachen Krümmung, Verdrehung, Windung oder Kopplung sein können. Jedes Strömungsrohr wird angetrieben, mit einer Resonanz in einer dieser natürlichen Schwingungsmoden zu schwingen. Fluid strömt von einer an die Einlassseite des Durchflussmessers angeschlossenen Rohrleitung in den Durchflussmesser, wird durch das Strömungsrohr bzw. die Strömungsrohre hindurchgeleitet und verlässt den Durchflussmesser durch die Auslassseite des Durchflussmessers. Die natürlichen Schwingungsmoden des in Schwingung versetzten, mit Fluid gefüllten Systems werden zum Teil durch die kombinierte Masse der Strömungsrohre und des durch die Strömungsrohre strömenden Fluids definiert.

[0003] Wenn kein Durchfluss durch den Durchflussmesser vorhanden ist, schwingen alle Punkte entlang des Strömungsrohrs auf Grund einer angewendeten Antriebseinrichtungskraft mit im wesentlichen identischer Phase oder kleiner anfänglicher fester Phasenversetzung, die korrigiert werden kann. Wenn Fluid zu strömen beginnt, verursachen Coriolis-Kräfte, dass Punkte entlang des Strömungsrohrs eine unterschiedliche Phase aufweisen. Die Phase an der Einlassseite des Strömungsrohrs befindet sich zur Antriebseinrichtung normalerweise im Nachlauf (lag), wogegen die Phase an der Auslassseite des Strömungsrohrs sich zur Antriebseinrichtung im Vorlauf (lead) befindet. Messglieder sind an dem Strömungsrohr befestigt, um die Bewegung des Strömungsrohrs zu messen und sinusförmige Messgliedsignale zu erzeugen, die für die Bewegung des Strömungsrohrs repräsentativ sind. Die Mess-Elektronik verarbeitet Messgliedsignale, um den Phasenunterschied zwischen den Messgliedsignalen zu ermitteln. Der Phasenunterschied zwischen zwei Messgliedsignalen ist proportional zum Massendurchfluss von Fluid durch das Strömungsrohr.

[0004] Eine wichtige Komponente von Coriolis-Durchflussmessern und Strömungsrohr-Dichtemessgeräten ist das Antriebs- oder Anregungssystem. Das Antriebssystem arbeitet, um eine periodische Kraft auf das Strömungsrohr anzuwenden, wodurch verursacht wird, dass das Strömungsrohr schwingt. Das Antriebssystem umfasst einen Antriebseinrichtungs-Mechanismus, der an dem Strömungsrohr des Durchflussmessers angebracht ist, und eine Treiberschaltung zum Erzeugen eines Antriebssignals zum Betreiben des Antriebseinrichtungs-Mechanismus. Der Antriebseinrichtungs-Mechanismus enthält typischerweise eine von vielen bekannten Anordnungen, wie beispielsweise einen Magnet, der an einem Strömungsrohr angebracht ist, und eine Drahtspule, die an dem anderen Strömungsrohr oder Verstrebungssteg (brace bar) in einer zum Magnet entgegengesetzten Beziehung angebracht ist.

[0005] Eine Treiberschaltung legt kontinuierlich eine periodische Treiberspannung an den Antriebseinrichtungs-Mechanismus an. Die Treiberspannung ist typischerweise sinusförmig oder rechteckig ausgebildet. In einem typischen Magnetspulenantriebs-Mechanismus verursacht die periodische Antriebsspannung, dass die Spule ein kontinuierliches alternierendes Magnetfeld produziert. Das alternierende Magnetfeld der Spule und das konstante Magnetfeld, das von der Magnetkraft des Strömungsrohrs produziert wird, zwingen das Strömungsrohr, in einem sinusförmigen Muster zu schwingen. Der Fachmann wird erkennen, dass jede Vorrichtung, die in der Lage ist, ein elektrisches Signal in mechanische Kraft umzuwandeln, zur Anwendung als Antriebseinrichtung geeignet ist. (Siehe U.S.-Patent 4,777,833, erteilt an Carpenter und im Wortlaut übertragen an Micro Motion, Inc.). Außerdem muss kein sinusförmiges Signal verwendet werden, sondern jedes periodische Signal kann stattdessen als das Treibersignal zweckdienlich sein. (Siehe U.S.-Patent 5,009,109, erteilt an Kalotay und andere und im Wortlaut übertragen an Micro Motion, Inc.).

[0006] Für einen Doppelrohr-Durchflussmesser ist ein typischer Modus, in dem Coriolis-Durchflussmesser typischerweise zum Schwingen angetrieben werden, ein erster gegenphasiger Krümmungsmodus (out-of-phase

bending mode). Der erste gegenphasige Krümmungsmodus ist der grundlegende Krümmungsmodus, bei dem die zwei Strömungsrohre eines Doppelrohr-Coriolis-Durchflussmessers zueinander entgegengesetzt schwingen. Dies ist jedoch nicht der einzige Schwingungsmodus, der in der Schwingstruktur eines Coriolis-Durchflussmessers vorhanden ist, der in dem ersten gegenphasigen Krümmungsmodus angetrieben wird. Höhere Schwingungsmoden können auch in den Strömungsrohren angeregt werden. Zum Beispiel kann ein erster gegenphasiger Verdrehungsmodus als Ergebnis dessen, dass ein Fluid durch das in Schwingung versetzte Strömungsrohr strömt, und durch die Coriolis-Kräfte, die durch das strömende Fluid verursacht werden, angeregt werden. Andere höhere Schwingungsmoden, die angeregt werden können, umfassen gleichphasige und laterale Schwindungsmoden. Es kann Hunderte von Schwingungsmoden geben, die tatsächlich in einem Coriolis-Durchflussmesser angeregt werden, der so angetrieben wird, dass er in dem ersten gegenphasigen Krümmungsmodus schwingt. Selbst innerhalb eines relativ engen Bereichs von Frequenzen in der Nähe des ersten gegenphasigen Krümmungsmodus gibt es wenigstens einige zusätzliche Schwingungsmoden, die von der Schwingung des Strömungsrohrs durch das Antriebssystem angeregt werden. Neben mehreren Moden, die durch die Antriebseinrichtung angeregt werden, können zusätzliche unerwünschte Schwingungsmoden auch durch Schwingungen angeregt werden, die auf zum Durchflussmesser externe Schwingungen zurückzuführen sind. Zum Beispiel könnte eine Pumpe, die sich an anderer Stelle in einer Prozesslinie befindet, eine Schwingung entlang einer Rohrleitung erzeugen, die einen Schwingungsmodus in einem Coriolis-Durchflussmesser anregt.

[0007] Wie oben erläutert, versetzt die Antriebseinrichtung das Strömungsrohr mit einer Resonanzfrequenz in Schwingung. Wenn sich die Dichte des Fluids in dem Strömungsrohr ändert, ändert sich die Resonanzfrequenz. Die Änderung der Resonanzfrequenz zum Quadrat ist umgekehrt proportional zur Änderung in der Dichte, wie in der folgenden Gleichung beschrieben:

$$\Delta f^2 = \frac{K}{\Delta \rho}$$

wobei f die Resonanzfrequenz darstellt, K eine proportionale Konstante darstellt und ρ Dichte darstellt. Die Periode (τ) der Resonanzfrequenz kann ebenfalls verwendet werden, wie in der folgenden Gleichung beschrieben:

$$\Delta \rho = K \Delta \tau^2$$

wobei (τ) die Periode der Resonanzfrequenz darstellt. Benutzer von Coriolis-Durchflussmessern möchten gegebenenfalls lieber die absolute Dichte als die relative Änderung in der Fluide dichte messen. Eine Kalibrierung des Coriolis-Durchflussmessers kann erforderlich sein, um eine Proportionalitätskonstante K und eine Referenz-Fluide dichte zu bestimmen. Die Kalibrierung des Coriolis-Durchflussmessers erfolgt, indem die Resonanz-Frequenz/Periode mit zwei bekannten Fluiden gemessen wird. Die absolute Fluide dichte kann unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\rho_{\text{gemessen}} = \left[\frac{\rho_2 - \rho_1}{\tau_2^2 - \tau_1^2} \right] (\tau_{\text{gemessen}}^2 C(T) - \tau_1^2) + \rho_1$$

wobei τ_1 und τ_2 die Rohrperiode darstellen, die zwei bekannte Fluide verwendet, und ρ_1 und ρ_2 die Dichten der zwei bekannten Fluide darstellen. $C(T)$ ist ein Temperaturausgleich für Änderungen in dem Material des Coriolis-Durchflussmesser auf Grund von Temperatur.

[0008] Leider unterscheidet sich die Temperatur des Fluids oft von der Umgebungstemperatur um den Durchflussmesser. Das Strömungsrohr des Coriolis-Durchflussmessers kann sich auf Grund von thermischer Ausdehnung ausdehnen oder schrumpfen. Für einen Durchflussmesser mit gekrümmtem Rohr ist die thermische Ausdehnung unter Umständen kein Problem, weil das Strömungsrohr sich frei ausdehnen oder zusammenziehen kann. Für einen Durchflussmesser mit geradem Rohr kann die thermische Ausdehnung ein Problem sein, weil das Strömungsrohr hinsichtlich der Ausdehnung entlang seiner Achse durch ein Gehäuse, einen Verstrebungssteg oder andere Mittel eingeschränkt ist. Die thermische Ausdehnung kann zu einer Änderung in der Resonanzfrequenz auf Grund von Temperatur führen, selbst wenn die Fluide dichte unverändert sein kann. Die Mess-Elektronik kann die thermische Ausdehnung unter Verwendung einer Temperaturkorrektur ausgleichen, doch ist die Mess-Elektronik nicht effektiv angepasst worden, um thermische Ausdehnung durch ein zuverlässigeres Mittel zu bewältigen. Diese Temperaturkorrektur ist eine indirekte Schätzung der Spannung/Komprimierung, weil ein thermischer Ausdehnungskoeffizient vorausgesetzt wird.

[0009] Durchflussmesser mit geradem Rohr sind im Allgemeinen empfindlicher für Änderungen der Grenzbedingungen als Durchflussmesser mit gekrümmtem Rohr. Grenzbedingungen sind die Kräfte und Momente, welche die Bewegung eines in Schwingung versetzten Strömungsrohrs einschränken. Umgekehrt sind Durchflussmesser mit doppelten gekrümmten Rohren natürlich ausgeglichen, so dass sich die Kräfte und Momente, die von den zwei Strömungsrohren ausgeübt werden, zu Null summieren. Einige Durchflussmesser mit geraden Rohren verwenden Gegengewichtssysteme, um sich den Grenzkräften und -momenten, die von einem einzelnen Strömungsrohr ausgeübt werden, passiv oder aktiv entgegenzustellen. Passive Gegengewichtssysteme arbeiten leider nur über einen begrenzten Bereich von Fluideigenschaften gut. Aktive Gegengewichtssysteme bringen zusätzliche Komplexität in den Durchflussmesser ein. Daher sind Probleme, die durch Temperaturänderungen und Änderungen der Grenzbedingungen verursacht werden, in Durchflussmessern mit geradem Rohr besonders offensichtlich.

[0010] Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, sind nützliche Informationen, die von einem Durchflussmesser erhalten werden. Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, umfassen die Fluideigenschaften, die Spannung/Komprimierung in dem Strömungsrohr und die Materialdichte des Strömungsrohrs, den Druck in dem Strömungsrohr und weitere Eigenschaften. Leider ist eine genaue Messung der Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, schwierig zu erhalten, ohne Bedingungen auszugleichen, wie beispielsweise Temperaturänderungen und Änderungen der Grenzbedingungen.

[0011] Das U.S.-Patent 6,249,752 offenbart eine Vielzahl von Bewegungssignalen, die eine Bewegung an einer Vielzahl von Stellen eines in Schwingung versetzen, ein Leitungsrohr enthaltenden (conduit containing) Materials darstellen. Die Vielzahl von Bewegungssignalen wird verarbeitet, um die Bewegung in eine Vielzahl von realen normalen modalen Komponenten aufzulösen. Ein Prozessparameter wird aus einer realen normalen modalen Komponente der Vielzahl von realen normalen modalen Komponenten geschätzt. Gemäß einem Gesichtspunkt können die Bewegungssignale verarbeitet werden, indem ein Modenpassfilter angelegt wird, um einen Ausgang zu produzieren, der vorzugsweise eine Komponente der Bewegung darstellt, die einem realen normalen Modus des in Schwingung versetzten Leitungsrohrs zugehörig ist. Ein Prozessparameter kann aus dem gefilterten Ausgang geschätzt werden, indem zum Beispiel herkömmliche Phasendifferenz-Techniken verwendet werden. Gemäß einem anderen Gesichtspunkt wird eine reale normale modale Bewegung aus der empfangenen Vielzahl von Bewegungssignalen geschätzt, und ein Prozessparameter wird aus der geschätzten realen normalen modalen Bewegung geschätzt. Zum Beispiel kann Bewegung in entsprechenden ersten und zweiten realen normalen Moden geschätzt werden, wobei der zweite reale normale Modus vorzugsweise mit einer Coriolis-Kraft korreliert ist. Ein Prozessparameter kann geschätzt werden, indem die geschätzte Bewegung in dem zweiten realen normalen Modus in Bezug auf die geschätzte Bewegung in dem ersten realen normalen Modus normalisiert wird, um eine normalisierte Schätzung von Bewegung in dem zweiten realen normalen Modus zu produzieren, und indem ein Prozessparameter aus der normalisierten Schätzung von Bewegung in dem zweiten realen normalen Modus geschätzt wird.

[0012] Ein Papier von Stack C.P. und anderen: AIAA Paper 93-1552, 'A finite element for the vibration analysis of a fluid-conveying Timoshenko beam', AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC STRUCTURES, STRUCTURAL DYNAMICS AND MATERIALS CONFERENCE AND EXHIBIT AND AIAA/ASME/AHS ADAPTIVE STRUCTURES FORM, XX, XX, 19. April 1993, Seite 2120-2129, XP002096659 offenbart ein Beispiel von Schwingungsanalyse von Fluid transportierenden Rohren auf Basis eines Timoshenko-Balkens. Ein finites Element, das für die Schwingungsanalyse verwendet wird, stellt Daten bereit, die für Coriolis-Durchflussmesser nützlich sind.

BESCHREIBUNG DER LÖSUNG

[0013] Die oben genannten und weitere Probleme werden gelöst und ein Fortschritt in der Technik erzielt durch ein System und Verfahren zum Bestimmen von Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt. Die vorliegende Erfindung bestimmt die Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, ohne Temperaturänderungen und Änderungen der Grenzbedingungen in einem Durchflussmesser mit geradem Rohr direkt ausgleichen zu müssen.

[0014] In Übereinstimmung mit dieser Erfindung führt die Mess-Elektronik Anweisungen aus, die einen Prozess zum Bestimmen von Eigenschaften eines Strömungsrohrs und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, bereitstellen. Der Prozess beginnt, wenn die Mess-Elektronik Messgliedsignale von einer Vielzahl von Messgliedern empfängt. Die Mess-Elektronik bestimmt eine gemessene Modenform des Strömungsrohrs auf Basis der Messgliedsignale. Die Mess-Elektronik wählt dann Werte für Strömungsrohr- und Fluid-Parameter. Die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter sind beliebige Parameter, die physikalische Eigenschaften eines

Strömungsrohrs oder eines Fluids darstellen, das durch das Strömungsrohr strömt. Dann bestimmt die Mess-Elektronik eine geschätzte Modenform des Strömungsrohrs auf Basis der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter. Die Mess-Elektronik vergleicht die geschätzte Modenform mit der gemessenen Modenform, um einen Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter zu bestimmen. Die Mess-Elektronik bestimmt, ob der Fehler für die Werte der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter innerhalb eines Fehlerbereichs liegt. Wenn der Fehler für die Werte innerhalb des Fehlerbereichs liegt, dann bestimmt die Mess-Elektronik die Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis von wenigstens einem der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter.

[0015] Wenn der Fehler für die Werte nicht innerhalb des Fehlerbereichs liegt, dann wählt die Mess-Elektronik in einigen Beispielen neue Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter. Die Mess-Elektronik wiederholt dann den oben genannten Prozess unter Verwendung der neuen Werte.

[0016] In einigen Beispielen ist eine der Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, die bestimmt werden, die Dichte des Fluids. Zum Bestimmen der Dichte muss die Mess-Elektronik unter Umständen einen oder mehrere Dichte-Kalibrierungsfaktoren bestimmen. Die Bestimmung der Dichte-Kalibrierungsfaktoren kann umfassen, ein erstes Fluid mit einer bekannten Dichte durch das Strömungsrohr strömen zu lassen. Die Mess-Elektronik empfängt Messgliedsignale, die eine Bewegung des Strömungsrohrs angeben, wenn das erste Fluid durch das Strömungsrohr strömt. Die Bestimmung umfasst des Weiteren, ein zweites Fluid mit einer bekannten Dichte durch das Strömungsrohr strömen zu lassen. Die Mess-Elektronik empfängt Messgliedsignale, die eine Bewegung des Strömungsrohrs angeben, wenn das zweite Fluid durch das Strömungsrohr strömt. Die Mess-Elektronik bestimmt die Dichte-Kalibrierungsfaktoren aus den Messgliedsignalen, die in Reaktion auf das erste und das zweite Fluid, die durch das Strömungsrohr strömen, empfangen worden sind.

[0017] Gemäß einem Gesichtspunkt der Erfindung wird ein Verfahren bereitgestellt, um Eigenschaften eines Strömungsrohrs und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, in Reaktion auf das Empfangen von Messgliedsignalen von einer Vielzahl von Messgliedern, die mit dem Strömungsrohr verbunden sind, zu bestimmen, wobei die Messgliedsignale Schwingungen des Strömungsrohrs angeben, das durch eine Antriebsseinrichtung, die mit dem Strömungsrohr verbunden ist, in Schwingung versetzt wird, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- Empfangen der Messgliedsignale von der Vielzahl von Messgliedern; und
- Bestimmen einer gemessenen Modenform des Strömungsrohrs auf Basis der Messgliedsignale: wobei das Verfahren durch die folgenden Schritte gekennzeichnet ist:
- Auswählen von Werten oder Bestimmen geschätzter Werte für Strömungsrohr- und Fluid-Parameter;
- Bestimmen einer geschätzten Modenform des Strömungsrohrs auf Basis der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter,
- Vergleichen der geschätzten Modenform mit der gemessenen Modenform, um einen Fehler für die Werte der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter zu bestimmen; und
- wenn der Fehler für die Werte der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter innerhalb eines Fehlerbereichs liegt, Bestimmen der Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis der Werte der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter.

[0018] Vorzugsweise umfasst das Verfahren des Weiteren die folgenden Schritte:

- wenn der Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter nicht innerhalb des Fehlerbereichs liegt, Auswählen oder Bestimmen neuer Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter; und Wiederholen der Schritte (d)–(g).

[0019] Vorzugsweise umfasst das Verfahren des Weiteren die folgenden Schritte:

Bestimmen einer Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter

[0020] Vorzugsweise umfasst das Verfahren des Weiteren die folgenden Schritte:

Leiten eines ersten Fluids einer bekannten Dichte durch die Strömungsrohre und Empfangen der Messgliedsignale, die Bewegung der Strömungsrohre anzeigen, wenn das erste Fluid durch die Strömungsrohre strömt, um erste Faktoren zu erzeugen;

Leiten eines zweiten Fluids einer bekannten Dichte durch die Strömungsrohre und Empfangen der Messgliedsignale, die Bewegung der Strömungsrohre anzeigen, wenn das zweite Fluid durch die Strömungsrohre strömt, um zweite Faktoren zu erzeugen; und

Bestimmen von Dichte-Kalibrierungsfaktoren auf Basis des ersten und des zweiten Faktors;

wobei der Schritt des Bestimmens der Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, des Weiteren

Bestimmen der Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter und der Dichte-Kalibrierungsfaktoren umfasst.

[0021] Vorzugsweise umfasst ein erster der Dichte-Kalibrierungsfaktoren ein Verhältnis von Fläche pro Längeneinheit des Fluids zu einer Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs.

[0022] Vorzugsweise umfasst ein zweiter der Dichte-Kalibrierungsfaktoren ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit des Strömungsrohrs zu der Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs.

[0023] Vorzugsweise umfasst das Verfahren des Weiteren einen ersten der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter, der ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit des Fluids und des Strömungsrohrs zu der Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs umfasst, und
der Schritt des Bestimmens der Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, umfasst:
Subtrahieren des zweiten der Dichte-Kalibrierungsfaktoren von dem ersten der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter, um ein erstes Ergebnis zu ermitteln; und
Multiplizieren des ersten Ergebnisses mit einem Reziproken des ersten der Dichte-Kalibrierungsfaktoren, um die Dichte des Fluids zu bestimmen, das durch das Strömungsrohr strömt.

[0024] Vorzugsweise umfasst die Vielzahl von Messgliedern wenigstens vier Grenzbedingungs-Messglieder, die an dem Strömungsrohr befestigt und so konfiguriert sind, dass sie die Messgliedsignale erzeugen.

[0025] Vorzugsweise umfasst die Vielzahl von Messgliedern des Weiteren wenigstens ein Bezugs-Messglied, das an dem Strömungsrohr befestigt und so konfiguriert ist, dass es ein Bezugssignal erzeugt.

[0026] Vorzugsweise umfasst das Auswählen oder Bestimmen von neuen Werten für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter Vergleichen der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter von wenigstens zwei Schwingungsmoden des Strömungsrohrs zum Bestimmen der neuen Werte.

[0027] Gemäß einem weiteren Gesichtspunkt der Erfindung wird eine Mess-Elektronik bereitgestellt, die so ausgelegt ist, dass sie Eigenschaften eines Strömungsrohrs und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, in Reaktion auf das Empfangen von Messgliedsignalen von einer Vielzahl von Messgliedern, die mit dem Strömungsrohr verbunden sind, bestimmt, wobei die Messgliedsignale Schwingungen des Strömungsrohrs angeben, die durch eine Antriebseinrichtung, die mit dem Strömungsrohr verbunden ist, in Schwingung versetzt wird, wobei die Mess-Elektronik umfasst: eine Verarbeitungseinheit, die so konfiguriert ist, dass sie Befehle von einem Speichermedium liest, wobei die Befehle so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit zu Folgendem anweisen:

- a) Empfangen der Messgliedsignale von der Vielzahl von Messgliedern; und
- b) Bestimmen einer gemessenen Modenform des Strömungsrohrs auf Basis der Messgliedsignale:
wobei die Mess-Elektronik dadurch gekennzeichnet ist, dass die Befehle des Weiteren so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit zu Folgendem anweisen:
- c) Auswählen von Werten oder Bestimmen von Schätzwerten für Strömungsrohr- und Fluid-Parameter,
- d) Bestimmen einer geschätzten Modenform des Strömungsrohrs auf Basis der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter;
- e) Vergleichen der geschätzten Modenform mit der gemessenen Modenform, um einen Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter zu bestimmen; und
- f) wenn der Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter innerhalb eines Fehlerbereichs liegt, Bestimmen der Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter.

[0028] Vorzugsweise sind die Befehle des Weiteren so konfiguriert, dass sie die Verarbeitungseinheit zu Folgendem anweisen:

- g) Auswählen oder Bestimmen neuer Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter; und
Wiederholen der Schritte (d)–(g), wenn der Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter nicht innerhalb des Fehlerbereichs liegt.

[0029] Vorzugsweise sind die Befehle des Weiteren so konfiguriert, dass sie die Verarbeitungseinheit zu Folgendem anweisen:

Bestimmen einer Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter.

[0030] Vorzugsweise sind die Befehle des Weiteren so konfiguriert, dass sie die Verarbeitungseinheit zu Folgendem anweisen:

Erzeugen erster Faktoren in Reaktion auf das Empfangen der Messgliedsignale, die Bewegung des Strömungsrohrs anzeigen, wenn ein erstes Fluid einer bekannten Dichte durch das Strömungsrohr strömt; Erzeugen zweiter Faktoren in Reaktion auf das Empfangen der Messgliedsignale, die Bewegung des Strömungsrohrs anzeigen, wenn ein zweites Fluid einer bekannten Dichte durch das Strömungsrohr strömt; Bestimmen von Dichte-Kalibrierungsfaktoren auf Basis des ersten und des zweiten Faktors; und Bestimmen der Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis der Dichte-Kalibrierungsfaktoren und der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter.

[0031] Vorzugsweise umfasst ein erster der Dichte-Kalibrierungsfaktoren ein Verhältnis von Fläche pro Längeneinheit des Fluids zu einer Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs.

[0032] Vorzugsweise umfasst ein zweiter der Dichte-Kalibrierungsfaktoren ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit des Strömungsrohrs zu einer Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs.

[0033] Vorzugsweise umfasst ein erster der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit des Fluids und des Strömungsrohrs zu der Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs; und

die Befehle, die so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit anweisen, die Dichte des Fluids zu bestimmen, sind des Weiteren so konfiguriert, dass sie die Verarbeitungseinheit zu Folgendem anweisen: Subtrahieren des zweiten der Dichte-Kalibrierungsfaktoren von dem ersten der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter, um ein erstes Ergebnis zu erzielen; und Multiplizieren des ersten Ergebnisses mit einem Reziproken des ersten der Dichte-Kalibrierungsfaktoren, um die Dichte des Fluids zu bestimmen, das durch das Strömungsrohr strömt.

[0034] Vorzugsweise sind die Befehle, die so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit anweisen, die neuen Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter auszuwählen oder zu bestimmen, des Weiteren so konfiguriert, dass sie die Verarbeitungseinheit anweisen, die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter von wenigstens zwei Schwingungsmoden des Strömungsrohrs zu vergleichen, um die neuen Werte zu bestimmen.

BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0035] Die oben genannten und weitere Merkmale der Erfindung lassen sich durch Lesen der ausführlichen Beschreibung und der folgenden Zeichnungen verstehen:

[0036] [Fig. 1](#) stellt einen Coriolis-Durchflussmesser mit doppeltem Strömungsrohr dar, in den ein System zum Bestimmen von Eigenschaften des Strömungsrohrs und eines Fluids integriert ist, das durch das Strömungsrohr strömt;

[0037] [Fig. 2](#) stellt einen Coriolis-Durchflussmesser mit einem einzelnen geraden Strömungsrohr dar, in den ein System zum Bestimmen von Eigenschaften des Strömungsrohrs und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, in Übereinstimmung mit der Erfindung integriert ist;

[0038] [Fig. 3](#) stellt eine Mess-Elektronik dar, in die ein System zum Bestimmen von Eigenschaften des Strömungsrohrs und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, in Übereinstimmung mit der Erfindung integriert ist;

[0039] [Fig. 4](#) stellt eine gemessene Modenform eines Strömungsrohrs im Vergleich mit einer geschätzten Modenform in Übereinstimmung mit der Erfindung dar;

[0040] [Fig. 5](#) stellt eine Fehlerfläche eines ersten Krümmungsmodus aus einer modalen Analyse in Übereinstimmung mit der Erfindung dar;

[0041] [Fig. 6](#) stellt eine Fehlerfläche eines Verdrehungsmodus aus einer modalen Analyse in Übereinstimmung mit der Erfindung dar;

[0042] [Fig. 7](#) stellt ein Ablaufdiagramm eines Prozesses zum Bestimmen von Eigenschaften des Strömungsrohrs und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, in Übereinstimmung mit der Erfindung dar;

[0043] [Fig. 8](#) stellt ein Ablaufdiagramm eines Prozesses zum Bestimmen von Grenzbedingungen und geschätzten Werten der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter in Übereinstimmung mit der Erfindung dar;

[0044] [Fig. 9](#) stellt ein Ablaufdiagramm eines Prozesses zum Bestimmen von Eigenwerten für einen Schwingungsmodus eines Strömungsrohrs in Übereinstimmung mit der Erfindung dar;

[0045] [Fig. 10](#) stellt ein Ablaufdiagramm eines Prozesses zum Bestimmen von Grenzbedingungs-Funktionen in Übereinstimmung mit der Erfindung dar; und

[0046] [Fig. 11](#) stellt ein Ablaufdiagramm eines Prozesses zum Erzeugen von neuen geschätzten Werten für Strömungsrohr- und Fluid-Parameter in Übereinstimmung mit der Erfindung dar.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

[0047] [Fig. 1–Fig. 3](#) stellen eine Umgebung dar, in welche die Erfindung zu implementieren ist. Die Erfindung ist nicht auf die Ausführungsformen in [Fig. 1–Fig. 3](#) begrenzt, sondern wird durch die Ansprüche definiert.

Doppelrohr-Coriolis-Durchflussmesser – [Fig. 1](#)

[0048] [Fig. 1](#) zeigt einen Doppelrohr-Coriolis-Durchflussmesser **5**, der einen Coriolis-Sensor **10** und eine dazugehörige Mess-Elektronik **20** umfasst. Die Mess-Elektronik **20** ist mit dem Coriolis-Sensor **10** über Leitungen **100** verbunden, um Dichte-, Massendurchfluss-, Volumendurchfluss-, Gesamtmassendurchfluss- und andere Informationen über den Pfad **26** bereitzustellen. Der Durchflussmesser **5** wird beschrieben, obwohl für den Fachmann offenkundig ist, dass die vorliegende Erfindung in Verbindung mit jeder Vorrichtung, die ein in Schwingung versetztes Strömungsrohr aufweist, ausgeübt werden kann, um Eigenschaften von Fluid zu messen. Ein zweites Beispiel einer derartigen Vorrichtung ist ein Dichtemessgerät mit in Schwingung versetztem Rohr, das nicht die zusätzliche Messfähigkeit aufweist, die von einem Coriolis-Massendurchflussmesser bereitgestellt wird.

[0049] Der Coriolis-Sensor **10** enthält ein Paar Flansche **101** und **101'**, einen Mehrfachverteiler (manifold) **102** und Strömungsrohre **103A** und **103B**. Antriebseinrichtung **104**, Messglied **105** und Messglied **105'** sind mit den Strömungsrohren **103A** und **103B** verbunden. Verstrebungsstege **106** und **106'** dienen zum Definieren der Achse **W** und **W'**, um welche jedes Strömungsrohr schwingt. Dem Fachmann ist klar, dass zusätzliche Messglieder zum Implementieren der Erfindung benötigt werden können. Die Erfindung ist nicht auf die Konfiguration in [Fig. 1](#) begrenzt, da [Fig. 1](#) nur eine Beispielumgebung zum Implementieren der Erfindung zeigt.

[0050] Der Coriolis-Sensor **10** ist in ein (nicht gezeigtes) Rohrleitungssystem eingesetzt, welches ein Prozess-Fluid trägt, das gemessen wird. Das Fluid tritt durch den Flansch **101** in den Sensor **10** ein. Das Fluid durchquert den Mehrfachverteiler **102**, wo das Fluid so geleitet wird, dass es in die Strömungsrohre **103A** und **103B** eintritt. Das Fluid strömt durch die Strömungsrohre **103A** und **103B** und wieder zurück in den Mehrfachverteiler **102**, von wo es aus dem Sensor **10** durch den Flansch **101'** austritt.

[0051] Die Strömungsrohre **103A** und **103B** werden so ausgewählt und an dem Mehrfachverteiler **102** angebracht, dass sie im Wesentlichen jeweils die gleiche Massenverteilung, Trägheitsmomente und elastischen Module um die Krümmungssachsen **W-W** und **W'-W'** aufweisen. Die Strömungsrohre **103A–103B** erstrecken sich vom Mehrfachverteiler **102** in einer im Wesentlichen parallelen Weise nach außen.

[0052] Die Strömungsrohre **103A–103B** werden von der Antriebseinrichtung **104** in entgegengesetzten Richtungen um ihre jeweiligen Krümmungssachsen **W** und **W'** in einem Modus angetrieben, der als erster gegenphasiger Krümmungsmodus bezeichnet wird. Die Antriebseinrichtung **104** kann eine beliebige von vielen bekannten Anordnungen umfassen, wie beispielsweise einen Magnet, der am Strömungsrohr **103A** angebracht ist, und eine gegenüberliegende Spule, die am Strömungsrohr **103B** angebracht ist und durch welche ein Wechselstrom geleitet wird, um beide Strömungsrohre **103A–103B** in Schwingung zu versetzen. Die Mess-Elektronik **20** führt der Antriebseinrichtung **104** über die Leitung **110** ein Antriebssignal zu.

[0053] Die Mess-Elektronik **20** empfängt das linke und das rechte Geschwindigkeitssignal, die auf den Leitungen **111** und **111'** auftreten, jeweils von den Messgliedern **105** und **105'**. Die Mess-Elektronik **20** produziert das Antriebssignal, das auf der Leitung **110** auftritt und verursacht, dass die Antriebseinrichtung **104** die Rohre **103A** und **103B** in Schwingung versetzt. Die Mess-Elektronik **20** verarbeitet das linke und das rechte Antriebsignal, um den Massendurchfluss und die Dichte des Fluids zu berechnen, das den Sensor **10** durchquert. Die

Mess-Elektronik **20** überträgt diese Informationen zu einer (nicht gezeigten) Hilfs-Elektronik über den Pfad **26**.

[0054] Dem Fachmann ist bekannt, dass der Durchflussmesser **5** von der Struktur her einem Dichtemessgerät mit in Schwingung versetztem Rohr recht ähnlich ist. Dichtemessgeräte mit in Schwingung versetztem Rohr verwenden ebenfalls ein in Schwingung versetztes Rohr, durch welches Fluid strömt oder in dem im Fall eines Proben-Dichtemessgeräts Fluid gehalten wird. Dichtemessgeräte mit in Schwingung versetztem Rohr verwenden ebenfalls ein Antriebssystem, um das Strömungsrohr zum Schwingen anzuregen. Dichtemessgeräte mit in Schwingung versetztem Rohr verwenden typischerweise nur ein einzelnes Rückkopplungssignal, da eine Dichtemessung nur die Messung von Frequenz erfordert und eine Phasenmessung nicht notwendig ist. Die Beschreibungen der vorliegenden Erfindung hierin gelten gleichermaßen für Dichtemessgeräte mit in Schwingung versetztem Rohr.

Coriolis-Durchflussmesser mit geradem Rohr – [Fig. 2](#)

[0055] [Fig. 2](#) offenbart einen Coriolis-Durchflussmesser mit geradem Rohr **25**. Der Coriolis-Durchflussmesser mit geradem Rohr **25** besteht aus dem Coriolis-Sensor **200** und der dazugehörigen Mess-Elektronik **20**. Der Coriolis-Sensor **200** besteht aus einem einzelnen Strömungsrohr **201**. Das Strömungsrohr **201** umfasst ein linkes Endteil, das mit **201L** bezeichnet ist, und ein rechtes Endteil, das mit **201R** bezeichnet ist. Das Strömungsrohr **201** und seine Endteile erstrecken sich über die gesamte Länge des Durchflussmessers **25** vom Eingangsende des Strömungsrohrs **201** zum Ausgangsende des Strömungsrohrs **201**. Eine Gleichgewichtsstrebe (balance bar) **220** ist an ihren Enden mit dem Strömungsrohr **201** durch einen Verstrebungssteg **221** verbunden.

[0056] Der linke Endteil **201L** des Strömungsrohrs **201** ist an einem Einlassflansch **202** befestigt. Der rechte Endteil **201R** ist an einem Auslassflansch **202'** befestigt. Der Einlassflansch **202** und der Auslassflansch **202'** sind so ausgelegt, dass sie den Coriolis-Sensor **200** mit einer (nicht gezeigten) Rohrleitung verbinden.

[0057] In einer bekannten herkömmlichen Weise sind eine Antriebseinrichtung **204**, ein linkes Messglied **205** und ein rechtes Messglied **205'** an das Strömungsrohr **201** und die Gleichgewichtsstrebe **220** gekoppelt. Die Antriebseinrichtung **204** empfängt Signale über den Pfad **210** von der Mess-Elektronik **20**, um zu verursachen, dass die Antriebseinrichtung **204** das Strömungsrohr **201** und die Gleichgewichtsstrebe **220** in Gegenphase mit der Resonanzfrequenz des mit Fluid gefüllten Strömungsrohrs **201** in Schwingung versetzt. Die Schwingung des in Schwingung versetzten Strömungsrohrs **201** zusammen mit dem Fluidstrom darin induziert Coriolis-Ablenkungen in dem Strömungsrohr **201** in einer bekannten Weise. Die Messglieder **205** und **205'** erfassen Coriolis-Ablenkungen und übertragen Signale, welche die Coriolis-Ablenkungen darstellen, über Aderleitungen (conductors) **211** und **211'** zur Mess-Elektronik **20**. Die Mess-Elektronik **20** überträgt Informationen, wie beispielsweise den Massendurchfluss und die Dichte des Fluids, zu einer (nicht gezeigten) Hilfs-Elektronik über den Pfad **26**.

[0058] Dem Fachmann ist klar, dass ein gerades Doppelrohr ebenfalls ähnlich wie in [Fig. 2](#) verwendet werden könnte.

Mess-Elektronik – [Fig. 3](#)

[0059] [Fig. 3](#) stellt Komponenten der Mess-Elektronik **20** dar. Die Mess-Elektronik **20** ist in [Fig. 2](#) mit dem Sensor **200** verbunden gezeigt. Die Pfade **211–211'** übertragen das linke und das rechte Geschwindigkeitssignal vom Sensor **200** zur Mess-Elektronik **20**. Die Geschwindigkeitssignale werden vom Analog-Digital- (A/D) Wandler **303** in der Mess-Elektronik **20** empfangen. Der A/D-Wandler **303** wandelt das linke und das rechte Geschwindigkeitssignal in digitale Signale um, die von der Verarbeitungseinheit **301** verwendet werden können, und überträgt die digitalen Signale über die Pfade **310–310'**. Obwohl als getrennte Komponenten gezeigt, kann der A/D-Wandler **303** ein Signalwandler sein, wie beispielsweise ein CS4218 Stereo 16-Bit-Codec-Chip, der von Crystal Semi, Inc. hergestellt wird. Die digitalen Signale werden über die Pfade **310–310'** zur Verarbeitungseinheit **301** getragen. Der Fachmann erkennt, dass jede Anzahl von Messgliedern und anderen Sensoren, wie beispielsweise ein RTD-Sensor zum Bestimmen der Temperatur des Strömungsrohrs mit der Verarbeitungseinheit **301** verbunden werden kann.

[0060] Die Treibersignale werden über den Pfad **312** übertragen, der die Signale an den Digital-Analog-(D/A) Wandler **302** anlegt. Der D/A-Wandler **302** empfängt auch Spannung von einem der Messglieder **205–205'** über den Pfad **340**. Die Antriebssignale enthalten Anweisungen zum Modifizieren der über den Pfad **340** empfangenen Spannung, um ein analoges Antriebssignal zu erzeugen. Der D/A-Wandler **302** ist ein allgemeiner

D/A-Wandler, wie beispielsweise der AD7932-Chip, der von Analog Devices hergestellt wird. Die Analogsignale vom D/A-Wandler **302** werden zum Verstärker **305** über den Pfad **391** übertragen. Der Verstärker **305** erzeugt ein Antriebssignal mit der richtigen Amplitude und überträgt das Antriebssignal über den Pfad **210** zur Antriebseinrichtung **204**. Der Verstärker **305** kann ein Stromverstärker oder ein Spannungsverstärker sein. Der Pfad trägt Signale zur (nicht gezeigten) Hilfs-Elektronik, die es der Mess-Elektronik **20** gestattet, Daten von einem Betreiber zu empfangen und Daten zu diesem zu übertragen.

[0061] Die Verarbeitungseinheit **301** ist ein Mikroprozessor, ein Prozessor oder eine Gruppe von Prozessoren, die Anweisungen aus dem Speicher ausliest und die Anweisungen ausführt, um die verschiedenen Funktionen des Durchflussmessers durchzuführen. In einer bevorzugten Ausführungsform ist der Prozessor **301** ein ADSP-2185L-Mikroprozessor, der von Analog Devices hergestellt wird. Die durchgeführten Funktionen umfassen Berechnen des Massendurchflusses eines Fluids, Berechnen des Volumendurchflusses eines Fluids und Berechnen der Dichte eines Fluids aus einem Festwertspeicher (ROM) über den Pfad **321**, sind aber nicht darauf beschränkt. Die Daten sowie die Anweisungen zum Durchführen der verschiedenen Funktionen sind in einem Direktzugriffspeicher (RAM) **330** gespeichert. Der Prozessor **301** führt Lese- und Schreib-Operationen im RAM-Speicher **330** über den Pfad **331** durch.

Allgemeine Übersicht

[0062] Die Erfindung betrifft das Bestimmen von Eigenschaften eines Strömungsrohrs und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt. Nach der allgemeinen Übersicht werden die Prozesse, die zum Bestimmen von Eigenschaften eines Strömungsrohrs und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, verwendet werden, beschrieben.

[0063] Ein Verfahren, ein Strömungsrohr, durch das ein Fluid strömt, zu betrachten, ist ein Euler-Bernoulli-Balken unter Spannung. Dem Fachmann ist klar, dass andere Modelle verwendet werden können, wie beispielsweise ein Timoshenko-Balken-Modell. Eine homogene Differenzialgleichung für einen Balken, wie beispielweise ein Strömungsrohr eines Coriolis-Durchflussmessers, lautet:

$$EI_{Rohr} \frac{\delta^4 y(x,t)}{\delta x^4} + \rho A \frac{\delta^4 y(x,t)}{\delta t^2} - S \frac{\delta^2 y(x,t)}{\delta x^2} = 0 \quad (1)$$

wobei:

- EI_{Rohr} = Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs;
- S = Spannung des Strömungsrohrs; und
- ρA = kombinierte Masse/Längeneinheit des Strömungsrohrs und Fluids.

[0064] Der dritte Ausdruck auf der linken Seite der Gleichung (1) ist ein Spannung/Komprimierungs-Ausdruck des Strömungsrohrs. Per Vereinbarung ist S positiv für Spannung und negativ für Komprimierung. Die Trennung von Variablen kann auf $y(x,t)$ angewendet werden, um eine Lösung in der folgenden Form zu erhalten:

$$y(x,t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r(t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) e^{j\omega_r t} \quad (2)$$

wobei:

- Φ_r = eine Funktion, welche die Modenform mit räumlichen Koordinaten beschreibt; und
- $\eta_r(t)$ = die modale Antwort als Funktion von Zeit.

[0065] Für die Zwecke dieser Erörterung wird die Zusammenfassung der modalen Analyse weggelassen. Daher lautet die Differenzialgleichung für eine "Pro-Modus"-Basis:

$$\Phi_r(x) = e^{\lambda_r x} \quad \eta_r(t) = e^{j\omega_r t} \quad (3)$$

wobei:

- $\Phi_r(x)$ = der Eigenvektor des r -ten Modus;
- λ_r = Eigenwert des r -ten Modus; und
- ω_r = gedämpfte natürliche Frequenz des r -ten Modus.

[0066] Die Substitution von Gleichung (2) und (3) in Gleichung (1) ergibt:

$$\left(\lambda_r^4 - \frac{S}{EI_{Rohr}} \lambda_r^2 - \frac{\rho A}{EI_{Rohr}} \omega_r^2 \right) e^{\lambda_r x} e^{j\omega_r t} = 0 \quad (4)$$

[0067] Es ist möglich, nach der Wurzel von λ_r aufzulösen und eine Gleichung für jede Modenform zu erhalten:
Die Auflösung nach λ_r ergibt:

$$\lambda_r = \pm \sqrt{\frac{-b_r \pm \sqrt{b_r^2 - 4c_r}}{2}}$$

wobei:

$$\begin{aligned} b_r &= -\frac{S}{EI_{Rohr}}; \text{ und} \\ c_r &= -\frac{\rho A}{EI_{Rohr}} \omega_r^2. \end{aligned} \quad (5)$$

[0068] Aus den obigen Gleichungen ist bekannt, dass λ_r zwei reale und zwei imaginäre Wurzeln auf folgende Weise aufweist:

$$\begin{aligned} \lambda_{1,r} &= \pm \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2}}; \text{ und} \\ \lambda_{2,r} &= \pm \sqrt{\frac{b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2}}. \end{aligned} \quad (6), (7)$$

[0069] Da S/EI , $\rho A/EI$ und ω_r zum Bestimmen der Eigenwerte verwendet werden, können diese Ausdrücke als Eigenwert-Parameter bezeichnet werden. S/EI und $\rho A/EI$ können auch als Strömungsrohr- und Fluid-Parameter bezeichnet werden.

[0070] Die Funktion zum Bestimmen der Modenform oder des Eigenvektors jedes Modus wird in der folgenden Gleichung angegeben:

$$\Phi_r(x) = C1_r e^{\lambda_{1,r} x} + C2_r e^{-\lambda_{1,r} x} + C3_r e^{j\lambda_{2,r} x} + C4_r e^{-j\lambda_{2,r} x} \quad (8)$$

wobei:

$C1_r$, $C2_r$, $C3_r$ und $C4_r$, Grenzbedingungs-Koeffizienten für den r -ten-Modus darstellen.

[0071] Alternativ kann die Gleichung (8) in Form eines Skalarprodukts auf folgende Weise ausgedrückt werden:

$$\Phi_r(x) = \begin{bmatrix} e^{\lambda_{1,r} x} & e^{-\lambda_{1,r} x} & e^{j\lambda_{2,r} x} & e^{-j\lambda_{2,r} x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \end{Bmatrix} = \exp([\lambda_{1,r} x - \lambda_{1,r} x \ j\lambda_{2,r} x - j\lambda_{2,r} x]) \begin{Bmatrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

[0072] Diese Formel wird später zum Bestimmen von Grenzbedingungen verwendet. Typischerweise erfordert die Lösung für modale Frequenzen, dass vier Grenzbedingungen an zwei Enden des Strömungsrohrs bekannt sind. Diese Grenzbedingungen werden aufgelöst aus der Gleichung für modale Frequenzen, d.h. den Gleichungen (8) und (9).

[0073] Zum Bestimmen der Grenzbedingungen werden die Frequenzen der Moden an "p" diskreten Stellen gemessen, vorausgesetzt, die Nennwerte sind für die physikalischen Eigenschaften und die Fluid-Eigenschaf-

ten des Strömungsrohrs bekannt. Zum Auflösen der Grenzbedingungen werden vier oder mehr Messglieder verwendet, um die Modenformen zu messen, und werden als Grenzbedingungs-Messglieder bezeichnet. Ein oder mehrere Messglieder, die als Bezugs-Messglieder bezeichnet werden, werden dann zum Messen eines Bezugswerts verwendet. Der Bezugswert wird mit der geschätzten Modenform verglichen, um einen Fehler in den Modenformen zu bestimmen. Diese Bezugs-Messglieder können sich überall befinden, ausgenommen an Stellen, die mit den Grenzbedingungs-Messgliedern zusammenfallen. Angenommen, $\{x\}$ sind die Stellen der Grenzbedingungs-Messgliederpositionen entlang des Strömungsrohrs. Somit:

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_p \end{Bmatrix} \quad (10)$$

wobei:

$p \geq 4$.

[0074] Aus der obigen Beschreibung von $\{x\}$ kann die Gleichung (9) in Matrix-Form erweitert werden und ergibt:

$$\begin{Bmatrix} \Phi_r(x_1) \\ \vdots \\ \Phi_r(x_p) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} e^{\lambda_1 r, x_1} & e^{-\lambda_1 r, x_1} & e^{j\lambda_2 r, x_1} & e^{-j\lambda_2 r, x_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{\lambda_1 r, x_p} & e^{-\lambda_1 r, x_p} & e^{j\lambda_2 r, x_p} & e^{-j\lambda_2 r, x_p} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} C_{1r} \\ C_{2r} \\ C_{3r} \\ C_{4r} \end{Bmatrix} = [B], [C], \quad (11)$$

[0075] Wenn die Eigenwerte λ_1 , und λ_2 , bekannt sind, können die Grenzbedingungen quantifiziert werden, indem eine Pseudo-Inverse von $[B]$, genommen wird, wobei eine Technik des kleinsten passenden Quadrats (least squares fit technique) verwendet wird, so dass:

$$\{C\}_r = [B]_r^+ \{\Phi_r(x)\} \quad (12)$$

[0076] Gemäß dem Euler/Bernoulli-Modell setzt sich ein Eigenwert jedes Modus aus den folgenden drei Variablen S/EI , pA/EI und ω_r zusammen. S/EI ist das Verhältnis der Spannung zur Biegesteifigkeit, pA/EI ist das Verhältnis von Masse pro Längeneinheit zur Biegesteifigkeit und ω_r ist die modale Frequenz. Modale Frequenzen können unter Verwendung der Grenzbedingungs-Messgliedsignalanalyse sehr genau gemessen werden. Des Weiteren sind S/EI und pA/EI nominell bekannt. Mit anderen Worten, geschätzte Werte dieser zwei Variablen können aus veröffentlichten Nennwerten bestimmt werden, die in Textbüchern oder anderen veröffentlichten Standards gefunden werden.

[0077] Eine Optimierungstechnik kann dann verwendet werden, um optimale Werte für diese Variablen mit einem akzeptablen Fehlerbereich zu finden. Sobald nach S/EI und pA/EI aufgelöst worden ist, können die Eigenschaften eines Strömungsrohrs und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, wie im Folgenden dargelegt bestimmt werden.

[0078] Die Beziehung zwischen den geschätzten Werten von S/EI und pA/EI ist in der grafischen Darstellung **400** von [Fig. 4](#) gezeigt. Die Linie **402** ist eine gemessene Modenform eines r -ten Schwingungsmodus. Die gemessene Modenform wird aus Messgliedsignalen erzeugt. In der grafischen Darstellung **400** ist der Modus der erste Krümmungsmodus des Strömungsrohrs. Die Linie **401** ist eine geschätzte Modenform auf Basis der geschätzten Werte der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter S/EI und pA/EI . Die Punkte **403** sind Messgliedwerte von Grenzbedingungs-Messgliedern, die verwendet werden, um Grenzbedingungen $\{C\}$ unter Verwendung der Gleichung (12) zu bestimmen. Der Punkt **404** ist ein tatsächlicher gemessener Bezugs-Messgliedwert. Der Punkt **405** ist der geschätzte Bezugs-Messgliedwert auf Basis der geschätzten Werte für S/EI und pA/EI .

[0079] [Fig. 5](#) stellt eine dreidimensionale grafische Darstellung **500** dar, die eine Fehlerebene **502** von Fehlerflächen für einen Bereich von geschätzten Werten für den ersten Krümmungsmodus eines Strömungsrohrs zeigt. Die grafische Darstellung **500** ist für den ersten Krümmungsmodus des Strömungsrohrs. Die Ebene **501** ist eine Null-Fehlerebene. Die Überschneidung der Fehlerebene **502** und der Null-Fehlerebene **501** ist eine Fehlerkurve. Jeder Wert für S/EI und pA/EI auf der Fehlerkurve könnte ein gültiger Schätzwert sein, weil der

Bezugs-Messgliedfehler für diese Lösungen ungefähr Null ist. Um die potenziellen geschätzten Werte weiter einzugrenzen und den optimalen Wert von S/EI und pA/EI zu finden, können Informationen für einen anderen Schwingungsmodus des Strömungsrohrs verwendet werden. Auch wenn die gültigen geschätzten Werte auf die Werte auf der Fehlerkurve eingegrenzt worden sind, ist immer noch eine infinite Anzahl von Werten auf der Fehlerkurve vorhanden.

[0080] [Fig. 6](#) stellt eine grafische Darstellung **600** einer Fehlerebene **602** für den zweiten Krümmungsmodus des Strömungsrohrs dar, der als der "Verdrehungs"-Modus bezeichnet wird. Die Ebene **601** ist eine Null-Fehlerebene. Durch Vergleichen der grafischen Darstellung **500** und **600** wird ersichtlich, dass die Fehlerkurve der Überschneidung mit der Null-Fehlerebene unterschiedlich ist. Daher minimieren die geschätzten Werte von S/EI und pA/EI der zwei Fehlerkurven den Fehler in beiden Modenformen. Wenn sich die Fehlerkurve minimiert und gegen Null läuft, werden die geschätzten Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter optimiert.

[0081] Mathematisch betrachtet ist die Überschneidung von zwei Fehlerebenen und der Null-Fehler ebene ein Punkt. Daher können korrekte Werte für S/EI und pA/EI aus einer Berechnung der Überschneidung der drei Ebenen bestimmt werden. Nach der Durchführung jeder Schätzung für S/EI und pA/EI wird wahrscheinlich immer noch ein Fehler vorhanden sein. Allerdings ist der Fehler reduziert worden. Eine weitere Verbesserung hinsichtlich des Fehlers lässt sich erzielen, indem die Werte für S/EI und pA/EI in dem Bereich der neuen Schätzung erneut geschätzt werden und eine bessere Schätzung als die letzte erhalten wird. Ein Durchschleifen auf diese Weise führt zu einem besseren Schätzwert, bis sich der Fehler auf einem akzeptablen Niveau befindet. Sobald die optimalen Werte für S/EI und pA/EI bestimmt sind, werden die Eigenwerte für die Schwingungsmoden bestimmt, und die Grenzbedingungen werden bestimmt. Sobald diese Werte bestimmt sind, können die Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, bestimmt werden.

Verfahren zum Bestimmen von Eigenschaften eines Strömungsrohrs und eines Fluids – [Fig. 7–Fig. 11](#)

[0082] [Fig. 7](#) stellt einen Prozess **700** zum Bestimmen von Eigenschaften eines Strömungsrohrs und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis der oben genannten Theorie dar. Der Prozess **700** könnte beispielsweise von der Mess-Elektronik **20** durchgeführt werden. In diesem Beispiel bezieht sich das Strömungsrohr auf das Strömungsrohr **201** in [Fig. 2](#). In Schritt **701** empfängt der Prozess **700** Messgliedsignale von der Vielzahl von Messgliedern **205, 205'**. In einigen Beispielen empfängt der Prozess **700** auch eine bekannte Anregung von einer Antriebseinrichtung, die mit dem bzw. den Strömungsrohren verbunden ist. In Schritt **702** bestimmt der Prozess **700** eine gemessene Modenform des Strömungsrohrs **201** auf Basis der Messgliedsignale. In Schritt **703** wählt der Prozess **700** Werte für Strömungsrohr- und Fluid-Parameter aus. Die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter sind beliebige Parameter, die physikalische Eigenschaften eines Strömungsrohrs oder eines Fluids darstellen, das durch das Strömungsrohr strömt. Zum Beispiel könnten die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter ein Verhältnis von Spannung zur Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs und/oder ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit zur Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs sein. In Schritt **704** bestimmt der Prozess **700** eine geschätzte Modenform des Strömungsrohrs **201** auf Basis der Werte der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter. In Schritt **705** vergleicht der Prozess **700** die geschätzte Modenform mit der gemessenen Modenform, um einen Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter zu bestimmen. In Schritt **706** bestimmt der Prozess **700**, ob der Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter innerhalb eines Fehlerbereichs liegt. Ein Beispiel für den Fehlerbereich ist ungefähr $\pm 0,1\%$.

[0083] Wenn der Fehler für die Werte innerhalb des Fehlerbereichs liegt, dann bestimmt der Prozess **700** die Eigenschaften des Strömungsrohrs und des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis von wenigstens einem der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter in Schritt **707**.

[0084] In einigen Beispielen, wenn der Fehler für die Werte nicht innerhalb des Fehlerbereichs liegt, wählt der Prozess **700** dann neue Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter in Schritt **708** aus. Der Prozess **700** wiederholt dann die Schritte **704** und **706** unter Verwendung der neuen Werte.

[0085] In einigen Beispielen bestimmt die Mess-Elektronik **20** eine Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr **201** strömt, auf Basis der Strömungsrohr- und Fluid-Parameter. Zum Bestimmen der Dichte bestimmt die Mess-Elektronik **20** Dichte-Kalibrierungsfaktoren. Zum Bestimmen der Dichte-Kalibrierungsfaktoren empfängt die Mess-Elektronik **20** die Messgliedsignale von den Messgliedern **205, 205'**, die Bewegung des Strömungsrohrs **201** angeben, wenn ein erstes Fluid durch das Strömungsrohr **201** strömt. Das erste Fluid weist eine bekannte Dichte auf. Die Mess-Elektronik **20** erzeugt erste Faktoren auf Basis der Messgliedsignale. Dann empfängt die Mess-Elektronik **20** Messgliedsignale von den Messgliedern **205, 205'**, die Bewegung des

Strömungsrohrs **201** angeben, wenn ein zweites Fluid durch das Strömungsrohr **201** strömt. Das zweite Fluid weist ebenfalls eine bekannte Dichte auf. Die Mess-Elektronik **20** erzeugt zweite Faktoren auf Basis der Messgliedsignale. Die Mess-Elektronik **20** bestimmt die Dichte-Kalibrierungsfaktoren auf Basis der ersten und der zweiten Faktoren. Die Mess-Elektronik **20** verwendet die Dichte-Kalibrierungsfaktoren zum Bestimmen einer Dichte eines Fluids, das durch das Strömungsrohr **201** strömt.

[0086] In einigen Beispiel umfasst ein erster der Dichte-Kalibrierungsfaktoren ein Verhältnis von Fläche pro Längeneinheit des Fluids zu einer Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs. Und ein zweiter der Dichte-Kalibrierungsfaktoren umfasst ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit des Strömungsrohrs zu der Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs. Und ein erster der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter umfasst ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit des Fluids und des Strömungsrohrs zu der Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs. In solch einem Fall bestimmt die Mess-Elektronik **20** die Dichte des Fluids, indem der zweite der Dichte-Kalibrierungsfaktoren von dem ersten der Werte für die Strömungsrohr- und Fluid-Parameter subtrahiert wird, um ein erstes Ergebnis zu ermitteln. Dann multipliziert die Mess-Elektronik **20** das erste Ergebnis mit einer Reziproken des ersten der Dichte-Kalibrierungsfaktoren, um die Dichte des Fluids zu bestimmen, das durch das Strömungsrohr **201** strömt. Mathematische Gleichungen, die den obigen Prozess veranschaulichen, folgen.

[0087] [Fig. 8](#) stellt einen Prozess **800** zum Bestimmen von Grenzbedingungen und der Dichte eines Fluids dar, indem geschätzte Werte mit einem akzeptablen Fehler bestimmt werden. Der Prozess **800** beginnt damit, das Fluid in Schritt **801** durch das Strömungsrohr **201** strömen zu lassen. In Schritt **802** empfängt der Prozess **800** Messgliedsignale von den Messgliedern **205, 205'**. In Schritt **803** bestimmt der Prozess **800** geschätzte Werte für die $S, I, G, A_{Rohr}, A_{Fluid}, E, I, \rho_{Rohr}, \rho_{Fluid}$, wobei:

- S = die Spannung, die auf das Strömungsrohr wirkt;
- I = Fläche Trägheitsmoment des Strömungsrohrs;
- A_{Rohr} = Fläche des Fluids, welche der Innendurchmesser des Strömungsrohrs ist;
- E = der Elastizitätsmodulus des Strömungsrohrs;
- ρ_{Rohr} = Dichte des Strömungsrohrs; und
- ρ_{Fluid} = Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt.

[0088] [Fig. 9](#) stellt einen Prozess zum Bestimmen der geschätzten Werte in Schritt **803** dar. Der Prozess **900** beginnt in Schritt **901** mit dem Einfügen von S, E und I in die Gleichung S/EI . In den meisten Fällen werden drei Werte von S vorgegeben, was zu drei verschiedenen geschätzten Werten führt. In Schritt **902** fügt der Prozess **900** $S, G, A_{Fluid}, A_{Rohr}, E, I, \rho_{Rohr}$ und ρ_{Fluid} in die Gleichung ein:

$$\frac{\rho_{Rohr} A_{Rohr} + SG\rho_{Wasser} A_{Fluid}}{EI} \quad (13)$$

[0089] Diese Gleichung erzeugt Eigenwerte für die geschätzten Werte. In Schritt **903** speichert der Prozess **900** die Eigenwerte.

[0090] Unter erneuter Bezugnahme auf [Fig. 8](#) fährt der Prozess **800** in Schritt **804** fort, unter Verwendung der modalen Parameter, die durch die Signale gemessen werden, die von den Messgliedern empfangen werden, die Grenzbedingungen zu bestimmen. Grenzbedingungen werden auf die folgende, in [Fig. 10](#) gezeigte Weise bestimmt. Der Prozess **1000** beginnt in Schritt **1001**, indem die Eigenvektoren für jeden Schwingungsmodus aus den Signalen bestimmt werden, die von den Messgliedern **205, 205'** gemessen werden. In Schritt **1002** bestimmt der Prozess **1000** eine Matrix $[B]$ von Eigenwerten, die aus den geschätzten Werten erzeugt werden. Die Eigenwert-Matrix $[B]$ ist in der Gleichung (11) gezeigt. Die Pseudo-Inverse der Eigenwert-Matrix $[B]$ wird dann in Schritt **1003** bestimmt. Dann berechnet der Prozess **1000** in Übereinstimmung mit der Gleichung (12) eine Matrix von Grenzbedingungen $\{C\}$, indem die Eigenvektoren des r -ten Schwingungsmodus mit der Pseudo-Inversen der Eigenwert-Matrix $[B]^{-1}$ in Schritt **1004** multipliziert wird. In Schritt **1005** speichert der Prozess **1000** die Grenzbedingungen und der Prozess **1000** endet.

[0091] Unter erneuter Bezugnahme auf [Fig. 8](#) fährt der Prozess **800** in Schritt **805** damit fort, eine Modenform für den r -ten Schwingungsmodus zu berechnen. Die folgende Gleichung wird verwendet, um die Modenform oder den Eigenvektor für den r -ten Modus zu bestimmen, wobei die bestimmten Eigenwerte verwendet werden.

$$\Phi_r(x_{ref})_{est} = \exp(-\lambda_1 \cdot x_{ref} - \lambda_1 \cdot x_{ref} j \lambda_2 \cdot x_{ref} - j \lambda_2 \cdot x_{ref}) \{C\}_r \quad (14)$$

[0092] In Schritt 806 vergleicht der Prozess 800 die geschätzte Modenform mit der gemessenen Modenform aus Schritt 1001, um zu bestimmen, ob der Fehler akzeptabel ist. Wenn der Fehler in Schritt 807 akzeptabel ist, speichert der Prozess 800 die geschätzten Werte in Schritt 808. Wenn der Fehler nicht akzeptabel ist, bestimmt der Prozess 800 neue Schätzungswerte in Schritt 809 und kehrt zu Schritt 804 zurück.

[0093] FIG. zeigt einen Prozess 1100 zum Bestimmen neuer geschätzter Werte in einem Beispiel der Erfindung. Der Prozess 1100 beginnt in Schritt 1101, indem eine Fehler-Matrix bestimmt wird. Die Fehler-Matrix ist eine Matrix von Fehlerwerten, die mit der folgenden Gleichung ausgedrückt werden:

$$\varepsilon_r = \Phi_r(x_{ref})_{\text{gemessen}} - \Phi_r(x_{ref})_{\text{est}} \quad (15)$$

[0094] Die Fehler-Matrix nimmt folgende Form an:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 & \dots & \varepsilon_r \\ \varepsilon_2 & \dots & \varepsilon_r \\ \varepsilon_3 & \dots & \varepsilon_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\rho_{Rohr} A_{Rohr} + SG_1 \rho_{Fluid} A_{Fluid}}{EI} & S_1 & 1 \\ \frac{\rho_{Rohr} A_{Rohr} + SG_2 \rho_{Fluid} A_{Fluid}}{EI} & S_2 & 1 \\ \frac{\rho_{Rohr} A_{Rohr} + SG_3 \rho_{Fluid} A_{Fluid}}{EI} & S_3 & 1 \end{bmatrix}_{g,3} \begin{bmatrix} a_1 & \dots & a_r \\ b_1 & \dots & b_r \\ c_1 & \dots & c_r \end{bmatrix}_{3,r} \quad (16)$$

[0095] Alternativ kann die Gleichung (16) ausgedrückt werden als:

$$[\varepsilon] = [G][A] \quad (17)$$

wobei [A] die Matrix von Koeffizienten der Fehlerebene ist. Der Index "g" stellt die Anzahl der geschätzten Werte dar und "r" stellt die Anzahl der Schwingungsmoden dar.

[0096] In Schritt 1102 berechnet der Prozess 1100 die Koeffizienten-Matrix der Fehlerebene [A]. [A] wird berechnet, indem man die Pseudo-Inverse der Schätzungs-Matrix (guess matrix) [G] nimmt und mit der Fehler-Matrix [\varepsilon] multipliziert.

[0097] Zum Bestimmen der neuen geschätzten Werte löst der Prozess 1100 nach der Überschneidung der ungefähren Fehlerebene und der Null-Fehlerebene in Schritt 1103 auf, dargestellt durch die folgende Gleichung:

$$\{0\} = [A]^T \begin{bmatrix} \frac{\rho A}{EI} \\ \frac{S}{EI} \\ 1 \end{bmatrix}_{est} \quad (18)$$

[0098] Der letzte Ausdruck der Gleichung (18) ist eine bessere Schätzung für die geschätzten Werte. Dies erfolgt durch Partitionieren von [A]^T, um die letzte Spalte in Schritt 1104 zu isolieren, so dass:

$$\{0\} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & | D_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_r & B_r & | D_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\rho A}{EI} \\ \frac{S}{EI} \\ 1 \end{bmatrix}_{est} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots \\ A_r & B_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\rho A}{EI} \\ \frac{S}{EI} \end{bmatrix}_{est} + \begin{bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_r \end{bmatrix} \quad (19)$$

[0099] Die neuen geschätzten Werte werden dann in Schritt 1105 berechnet, und der Prozess 1100 endet. Der Prozess 1100 berechnet die neuen geschätzten Wert durch Multiplizieren der Pseudo-Inversen der restlichen Ausdrücke mit der partitionierten letzten Spalte, was dargestellt wird als:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\rho A}{EI} \\ \frac{S}{EI} \end{Bmatrix}_{est} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots \\ A_r & B_r \end{bmatrix}^+ + \begin{Bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_r \end{Bmatrix} \quad (20)$$

[0100] Die Dichte des Fluids wird berechnet, sobald akzeptable geschätzte Werte auf Basis der folgenden Prämissen bestimmt werden. Zuerst sei daran erinnert, dass in einem Euler/Bernoulli-Balken:

$$\frac{\rho A}{EI_{Rohr}} = \frac{\rho_{Rohr} A_{Rohr} + \rho_{Fluid} A_{Fluid}}{EI_{Rohr}} \quad (21)$$

[0101] Die Masse pro Längeneinheit des Strömungsrohrs ist nominell bekannt. Die physikalischen und Fluid-Eigenschaften sind ebenfalls nominell bekannt. Wenn daher das Strömungsrohr unter Verwendung von zwei Fluiden von bekannter Dichte, wie beispielsweise Luft und Wasser, kalibriert wird, dann kann die Dichte eines anderen Fluids bestimmt werden, da:

$$\frac{\rho A}{EI_{Rohr}} = [\rho_{Fluid} \ 1] \begin{Bmatrix} \frac{A_{Rohr}}{EI_{Rohr}} \\ \frac{\rho_{Rohr} A_{Rohr}}{EI_{Rohr}} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

[0102] Aus dem Vorgenannten ist ersichtlich, dass eine Kalibrierung unter Verwendung von zwei Fluiden mit bekannter Dichte erfolgt, um A_{Fluid}/EI_{Rohr} und $\rho_{Rohr}A/EI_{Rohr}$ zu messen, die als Dichte-Kalibrierungsfaktoren bezeichnet werden. Wenn daher $\rho A/EI_{Rohr}$ für zwei Fluide von bekannter Dichte bestimmt wird, können Dichte-Kalibrierungsfaktoren bestimmt werden, weil:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\rho A}{EI_{Rohr}}|_{Fluid\ 1} \\ \frac{\rho A}{EI_{Rohr}}|_{Fluid\ 2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{Fluid\ 1} & 1 \\ \rho_{Fluid\ 2} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{A_{Fluid}}{EI_{Rohr}} \\ \frac{\rho_{Rohr} A_{Rohr}}{EI_{Rohr}} \end{Bmatrix} \quad (23)$$

[0103] Sobald die Dichte-Kalibrierungsfaktoren bestimmt sind, kann davon ausgegangen werden, dass sich die physikalischen Eigenschaften der Bedingungen nicht ändern. Somit kann die Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, aus folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\rho_{Fluid} = \left(\frac{\rho A}{EI_{Rohr}} - \frac{\rho_{Rohr} A_{Rohr}}{EI_{Rohr}} \right) \frac{EI_{Rohr}}{A_{Fluid}} \quad (24)$$

[0104] Somit, sobald ein akzeptabler Wert aus $\rho_{Rohr}A/EI_{Rohr}$ bestimmt ist, kann die Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, mit der gleichen Gewissheit gefunden werden.

Patentansprüche

1. Verfahren (**700**) zum Bestimmen von Eigenschaften eines Strömungsrohrs (**201**) und eines Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, in Reaktion auf das Empfangen von Messgliedsignalen von einer Vielzahl von Messgliedern (**205-205'**), die mit dem Strömungsrohr verbunden sind, wobei die Messgliedsignale Schwingungen des Strömungsrohrs anzeigen, das durch eine Antriebseinrichtung (**204**), die mit dem Strömungsrohr verbunden ist, in Schwingung versetzt wird, und das Verfahren (**700**) die folgenden Schritte umfasst:

- a) Empfangen (**701**) der Messgliedsignale von der Vielzahl von Messgliedern; und
- b) Bestimmen (**702**) einer gemessenen Modenform der Strömungsrohrs auf Basis der Messgliedsignale; wobei das Verfahren durch die folgenden Schritte gekennzeichnet ist:
- c) Auswählen (**703**) von Werten oder Bestimmen (**803**) geschätzter Werte für Strömungsrohr- und Fluidparameter;
- d) Bestimmen (**704**) einer geschätzten Modenform des Strömungsrohrs auf Basis der Strömungsrohr- und Fluidparameter;
- e) Vergleichen (**705**) der geschätzten Modenform mit der gemessenen Modenform, um einen Fehler für die

Werte der Strömungsrohr- und Fluidparameter zu bestimmen; und

f) wenn der Fehler für die Werte der Strömungsrohr- und Fluidparameter innerhalb eines Fehlerbereiches liegt, Bestimmen (707) der Eigenschaften des Strömungsrohrs und des durch die Strömungsrohre strömenden Fluids auf Basis der Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter.

2. Verfahren (700) nach Anspruch 1, das des Weiteren die folgenden Schritte umfasst:

g) wenn der Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter nicht innerhalb des Fehlerbereiches liegt, Auswählen (708) oder Bestimmen (803) neuer Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter; und

Wiederholen der Schritte (d)–(g).

3. Verfahren (700) nach Anspruch 1, das des Weiteren den folgenden Schritt umfasst:

Bestimmen einer Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis der Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter.

4. Verfahren (700) nach Anspruch 3, das des Weiteren die folgenden Schritte umfasst:

Leiten eines ersten Fluids einer bekannten Dichte durch die Strömungsrohre und Empfangen der Messgliedsignale, die Bewegung der Strömungsrohre anzeigen, wenn das erste Fluid durch die Strömungsrohre strömt, um erste Faktoren zu erzeugen;

Leiten eines zweiten Fluids einer bekannten Dichte durch die Strömungsrohre und Empfangen der Messgliedsignale, die Bewegung der Strömungsrohre anzeigen, wenn das zweite Fluid durch die Strömungsrohre strömt, um zweite Faktoren zu erzeugen; und

Bestimmen von Dichte-Kalibrierungsfaktoren auf Basis des ersten und des zweiten Faktors;

wobei der Schritt des Bestimmens der Dichte des Fluids, das durch die Strömungsrohre strömt, des Weiteren Bestimmen der Dichte des Fluids, das durch die Strömungsrohre strömt, auf Basis der Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter sowie der Dichte-Kalibrierungsfaktoren umfasst.

5. Verfahren (700) nach Anspruch 4, wobei ein erster der Dichte-Kalibrierungsfaktoren ein Verhältnis von Fläche pro Längeneinheit des Fluids zu einer Biegesteifigkeit der Strömungsrohre umfasst.

6. Verfahren (700) nach Anspruch 5, wobei ein zweiter der Dichte-Kalibrierungsfaktoren ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit der Strömungsrohre zu der Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs umfasst.

7. Verfahren (700) nach Anspruch 6, wobei:

ein erster der Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit des Fluids und des Strömungsrohrs zu der Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs umfasst; und

der Schritt des Bestimmens der Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, umfasst:

Subtrahieren des zweiten der Dichte-Kalibrierungsfaktoren von dem ersten der Werte für die Strömungsrohr- und die Fluidparameter, um ein erstes Ergebnis zu ermitteln; und

Multiplizieren des ersten Ergebnisses mit einem Reziproken des ersten der Dichte-Kalibrierungsfaktoren, um die Dichte des Fluids zu bestimmen, das durch das Strömungsrohr strömt.

8. Verfahren (700) nach Anspruch 1, wobei die Vielzahl von Messgliedern wenigstens vier Grenzbedingungs-Messglieder umfasst, die an dem Strömungsrohr befestigt und so konfiguriert sind, dass sie die Messgliedsignale erzeugen.

9. Verfahren (700) nach Anspruch 8, wobei die Vielzahl von Messgliedern des Weiteren wenigstens ein Bezugs-Messglied umfasst, das an dem Strömungsrohr befestigt und so konfiguriert ist, dass es ein Bezugssignal erzeugt.

10. Verfahren (700) nach Anspruch 2, wobei der Schritt des Auswählens (703) oder Bestimmens (803) der neuen Werte für die Strömungsrohr- und die Fluidparameter Vergleichen der Strömungsrohr- und der Fluidparameter von wenigstens zwei Schwingungsmoden des Strömungsrohrs zum Bestimmen der neuen Werte umfasst.

11. Messelektronik (20), die so konfiguriert ist, dass sie Eigenschaften eines Strömungsrohrs (201) und eines durch das Strömungsrohr strömenden Fluids in Reaktion auf das Empfangen von Messgliedsignalen von einer Vielzahl von Messgliedern (205–205'), die mit dem Strömungsrohr verbunden sind, bestimmt, wobei die Messgliedsignale Schwingungen des Strömungsrohrs anzeigen, die durch eine Antriebseinrichtung (204), die mit dem Strömungsrohr verbunden ist, in Schwingung versetzt wird, und wobei die Messelektronik umfasst:

eine Verarbeitungseinheit (301), die so konfiguriert ist, dass sie Befehle von einem Speichermedium liest, wobei die Befehle so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit anweisen, folgende Schritte durchzuführen:

- a) Empfangen der Messgliedsignale von der Vielzahl von Messgliedern; und
- b) Bestimmen einer gemessenen Modenform des Strömungsrohrs auf Basis der Messgliedsignale; wobei die Messelektronik dadurch gekennzeichnet ist, dass die Befehle des Weiteren so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit anweisen, die folgenden Schritte durchzuführen:
- c) Auswählen von Werten oder Bestimmen von Schätzwerten für Strömungsrohr- und Fluidparameter;
- d) Bestimmen einer geschätzten Modenform des Strömungsrohrs auf Basis der Strömungsrohr- und Fluidparameter;
- e) Vergleichen der geschätzten Modenform mit der gemessenen Modenform, um einen Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter zu bestimmen; und
- f) wenn der Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter innerhalb eines Fehlerbereiches liegt, Bestimmen der Eigenschaften des Strömungsrohrs und des durch das Strömungsrohr strömenden Fluids auf Basis der Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter.

12. Messelektronik (20) nach Anspruch 11, wobei die Befehle des Weiteren so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit (301) anweisen, die folgenden Schritte durchzuführen:

- g) Auswählen oder Bestimmen neuer Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter; und Wiederholen der Schritte d)–g), wenn der Fehler für die Werte für die Strömungsrohr- und die Fluidparameter nicht innerhalb des Fehlerbereiches liegt.

13. Messelektronik (20) nach Anspruch 12, wobei die Befehle des Weiteren so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit (301) anweisen, folgenden Schritt durchzuführen:

Bestimmen einer Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis der Werte für die Strömungsrohr- und die Fluidparameter.

14. Messelektronik (20) nach Anspruch 13, wobei die Befehle des Weiteren so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit (301) anweisen, die folgenden Schritte durchzuführen:

Erzeugen erster Faktoren in Reaktion auf das Empfangen der Messgliedsignale, die Bewegung des Strömungsrohrs anzeigen, wenn ein erstes Fluid einer bekannten Dichte durch das Strömungsrohr strömt; Erzeugen zweiter Faktoren in Reaktion auf das Empfangen der Messgliedsignale, die Bewegung des Strömungsrohrs anzeigen, wenn ein zweites Fluid einer bekannten Dichte durch das Strömungsrohr strömt; Bestimmen von Dichte-Kalibrierungsfaktoren auf Basis des ersten und des zweiten Faktors; und Bestimmen der Dichte des Fluids, das durch das Strömungsrohr strömt, auf Basis der Dichte-Kalibrierungsfaktoren und der Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter.

15. Messelektronik (20) nach Anspruch 14, wobei ein erster der Dichte-Kalibrierungsfaktoren ein Verhältnis von Fläche pro Längeneinheit des Fluids zu einer Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs umfasst.

16. Messelektronik (20) nach Anspruch 15, wobei ein zweiter der Dichte-Kalibrierungsfaktoren ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit des Strömungsrohrs zu der Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs umfasst.

17. Messelektronik (20) nach Anspruch 16, wobei:
ein erster der Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter ein Verhältnis von Masse pro Längeneinheit des Fluids und des Strömungsrohrs zu der Biegesteifigkeit des Strömungsrohrs umfasst; und
die Befehle, die so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit anweisen, die Dichte des Fluids zu bestimmen, des Weiteren so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit anweisen, die folgenden Schritte durchzuführen:

Subtrahieren des zweiten der Dichte-Kalibrierungsfaktoren von dem ersten der Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter, um ein erstes Ergebnis zu erzielen; und
Multiplizieren des ersten Ergebnisses mit einem Reziproken des ersten der Dichte-Kalibrierungsfaktoren, um die Dichte des Fluids zu bestimmen, das durch das Strömungsrohr strömt.

18. Messelektronik (20) nach Anspruch 12, wobei die Befehle, die so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit anweisen, die neuen Werte für die Strömungsrohr- und Fluidparameter auszuwählen oder zu bestimmen, des Weiteren so konfiguriert sind, dass sie die Verarbeitungseinheit anweisen, die Strömungsrohr- und Fluidparameter von wenigstens zwei Schwingungsmoden des Strömungsrohrs zu vergleichen, um die neuen Werte zu bestimmen.

Es folgen 11 Blatt Zeichnungen

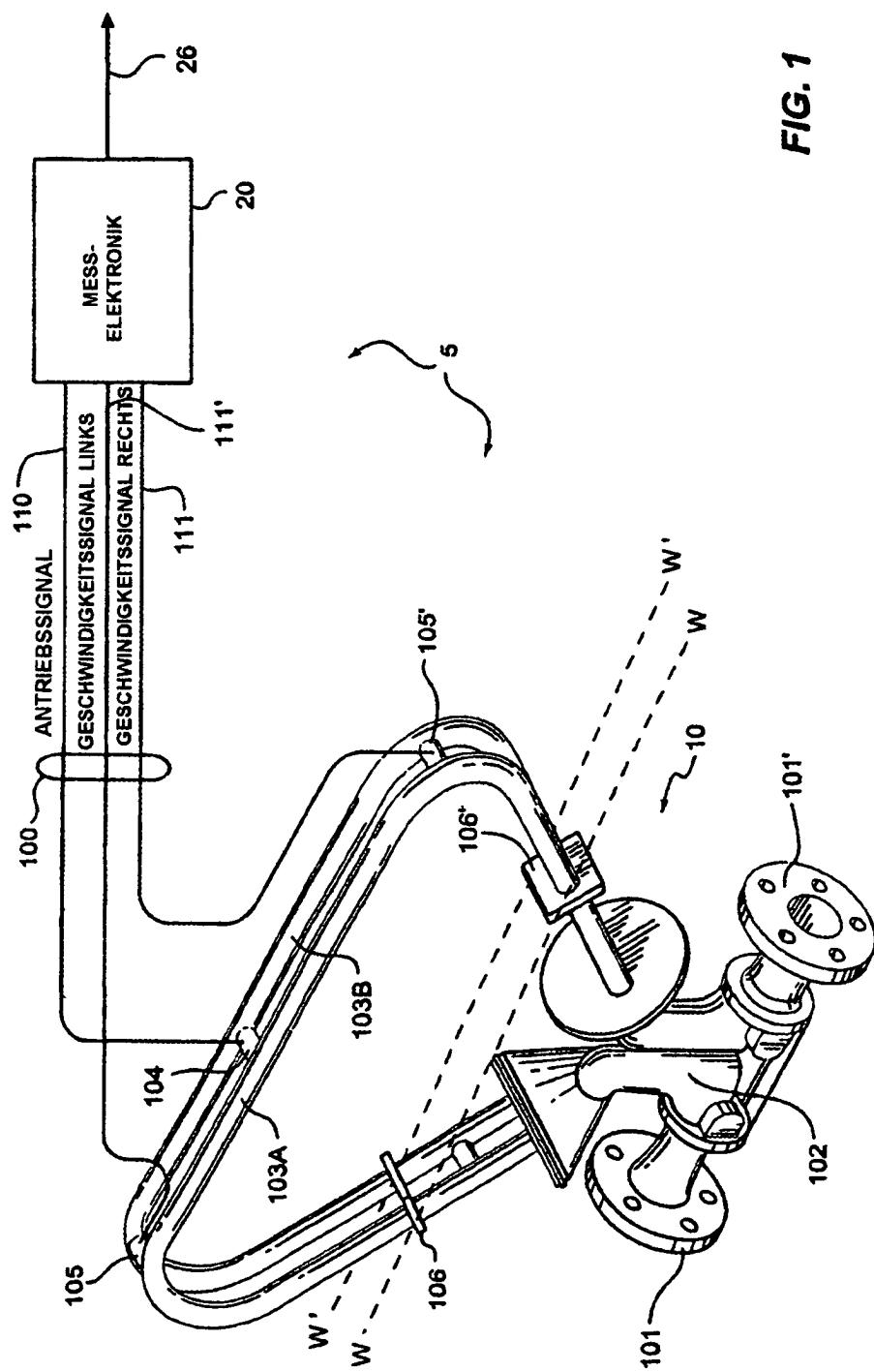


FIG. 1

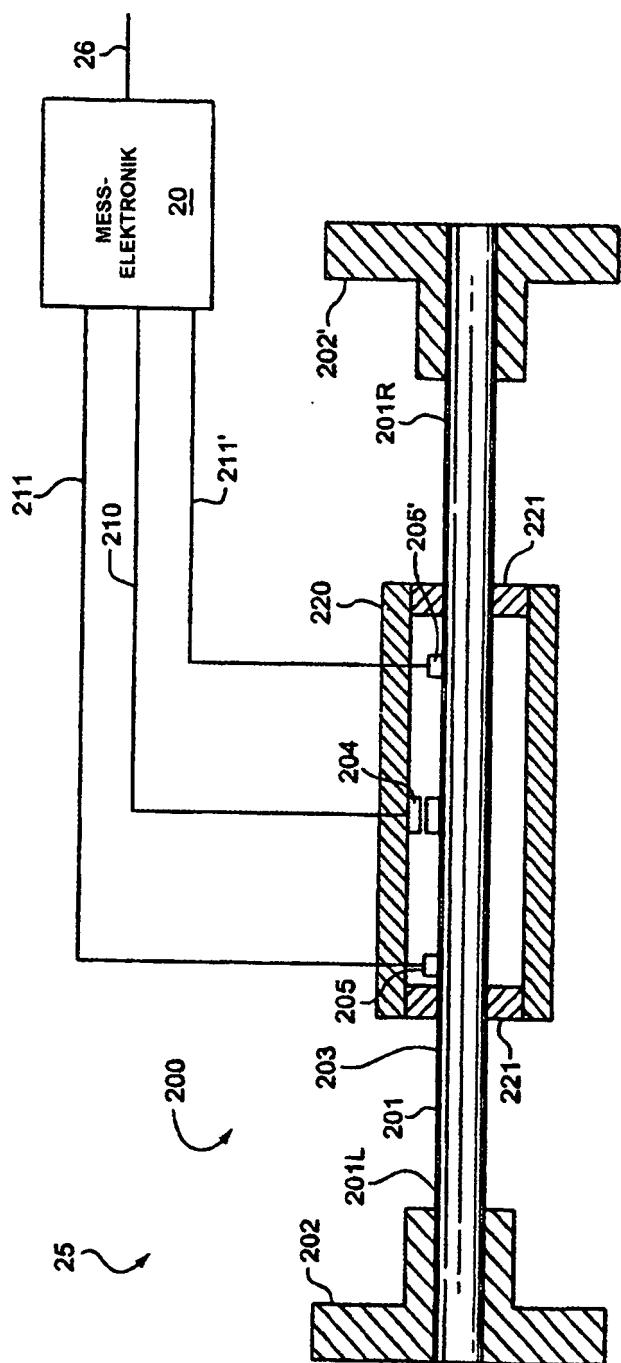


FIG. 2

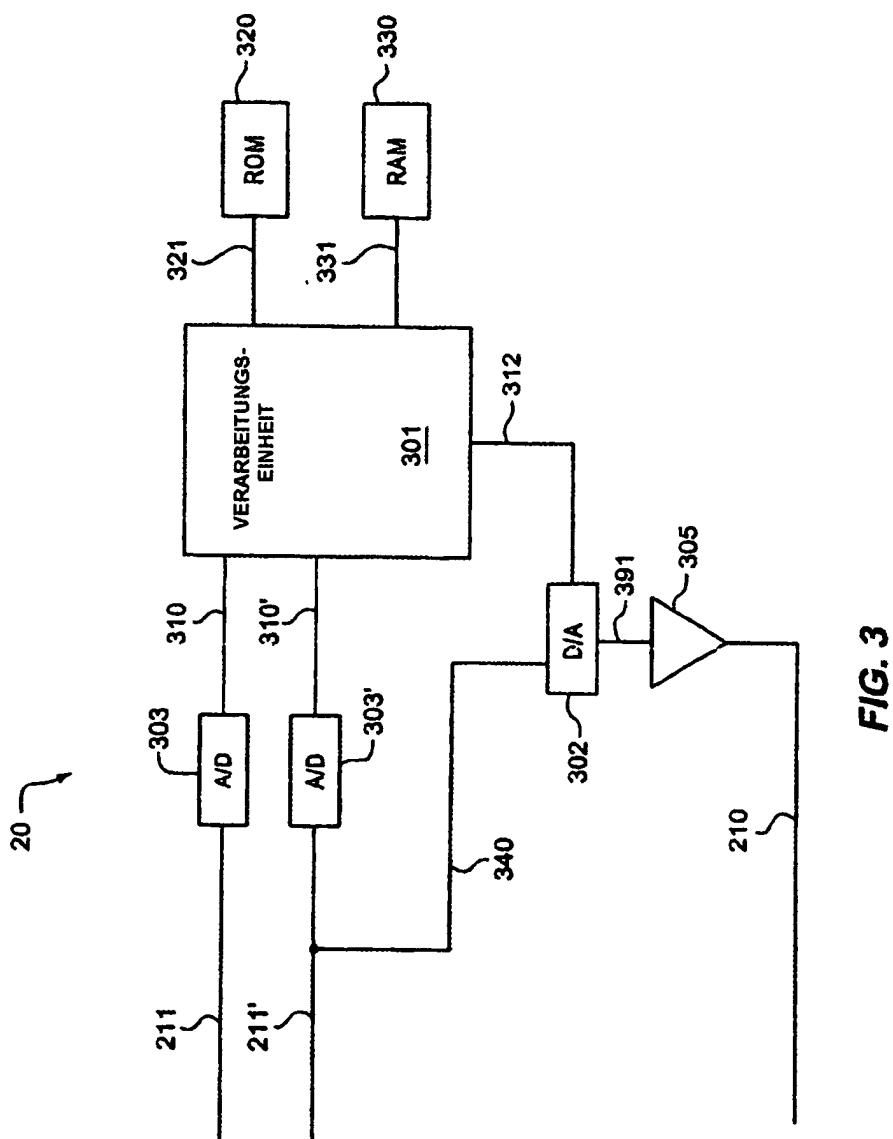


FIG. 3

FIG. 4

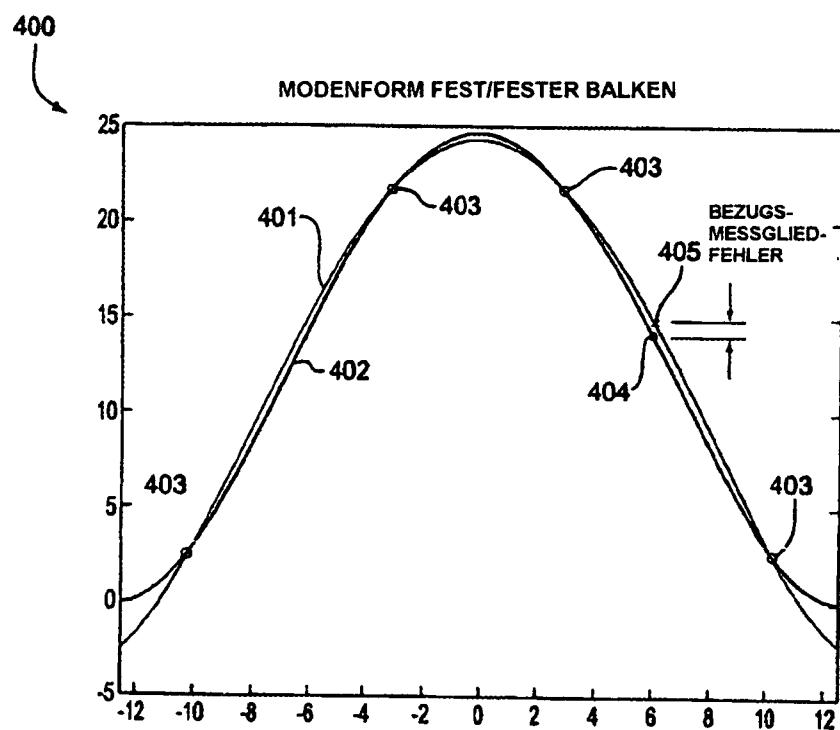


FIG. 5

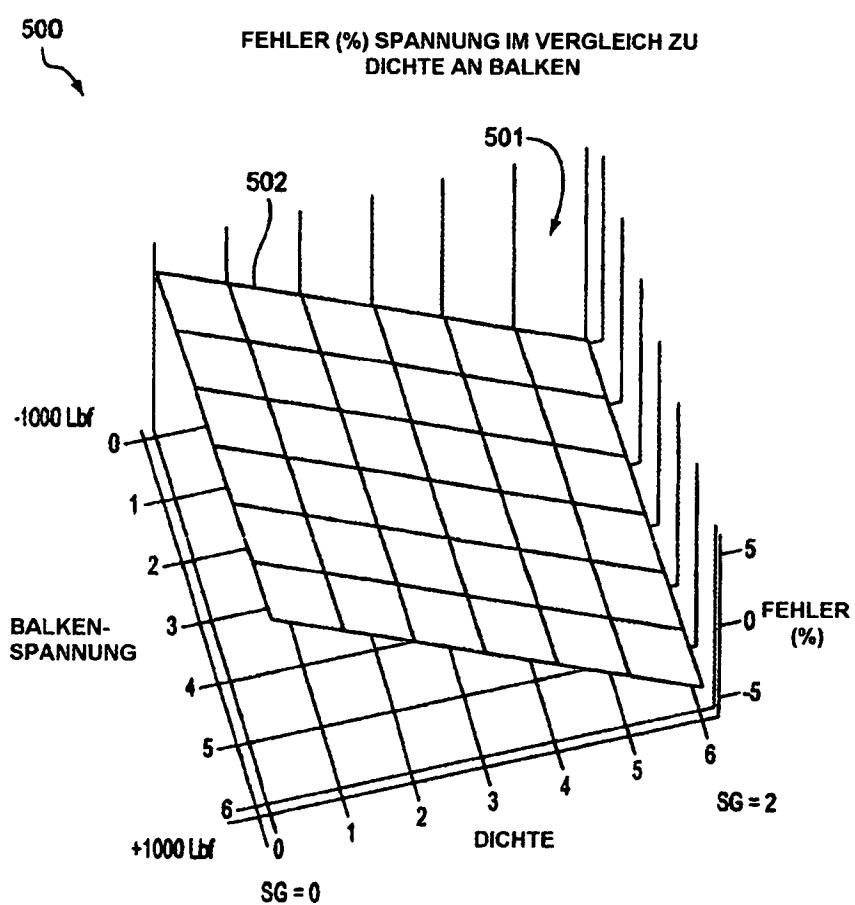


FIG. 6

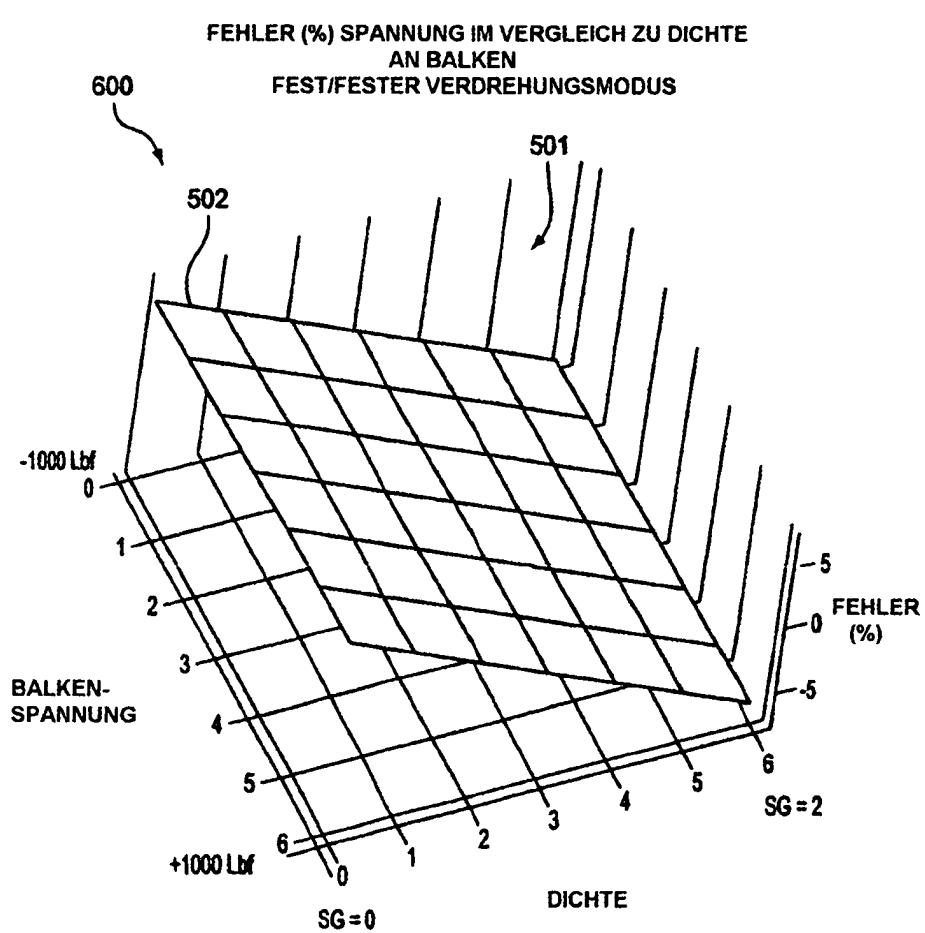


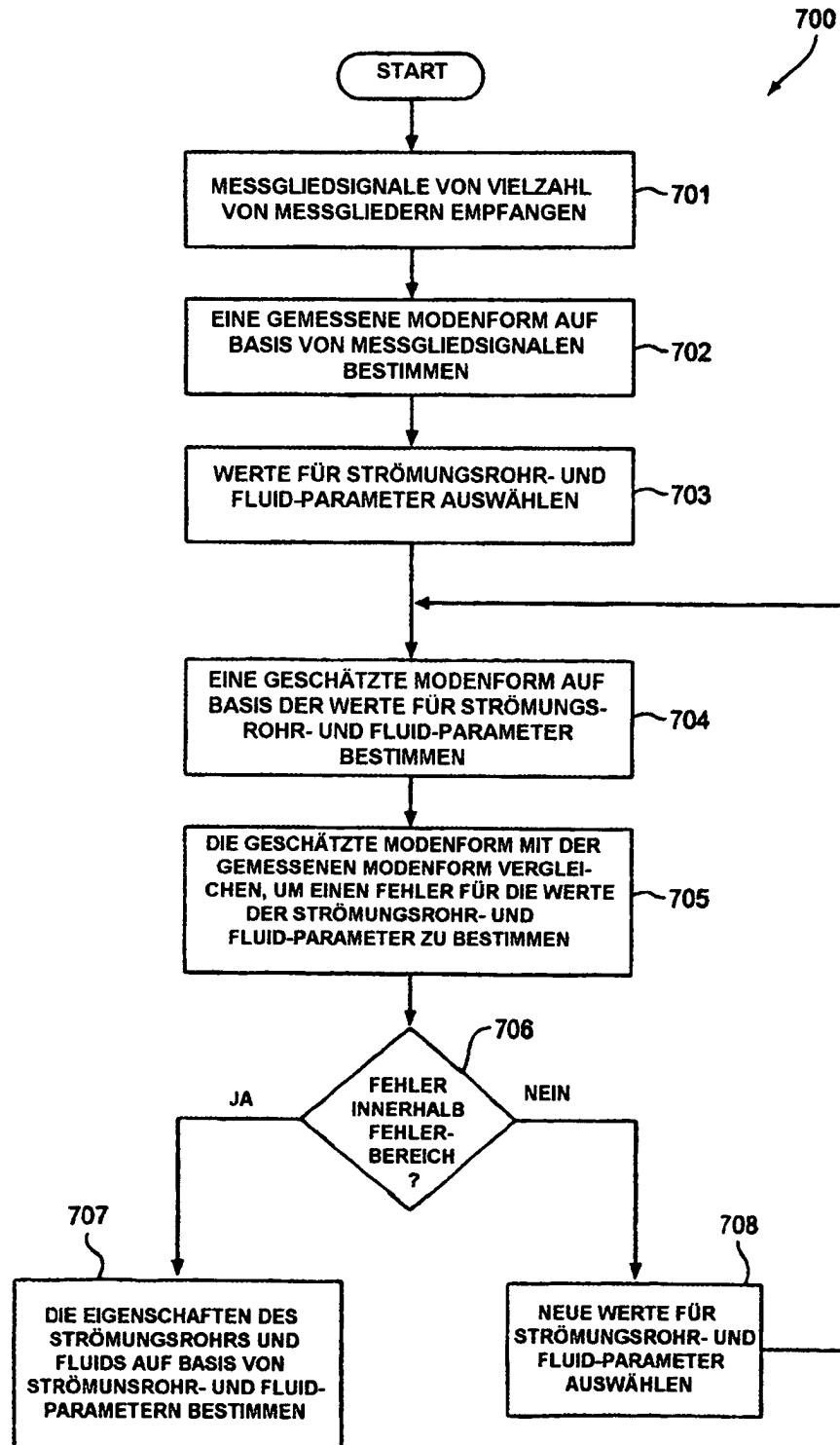
FIG. 7

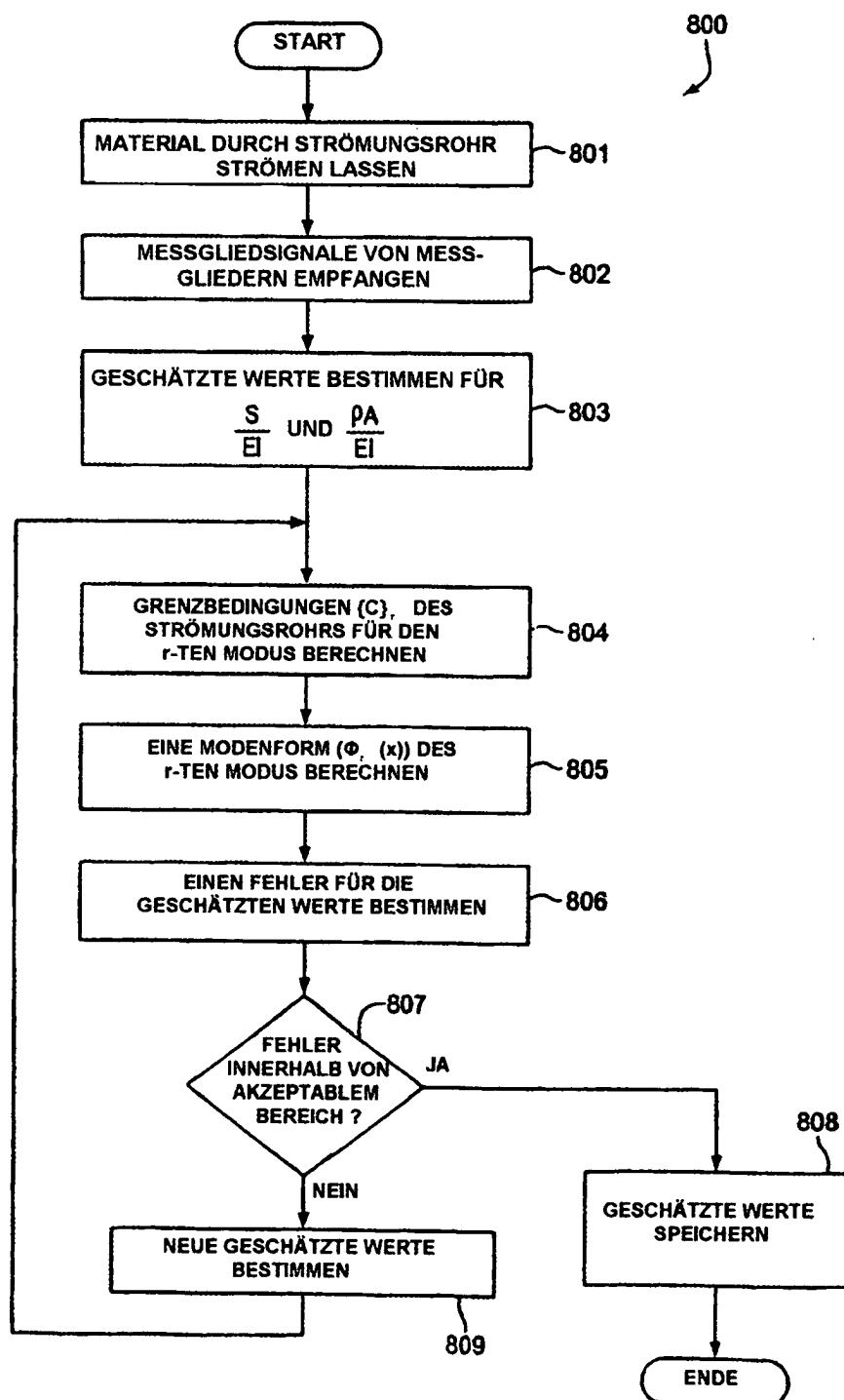
FIG. 8

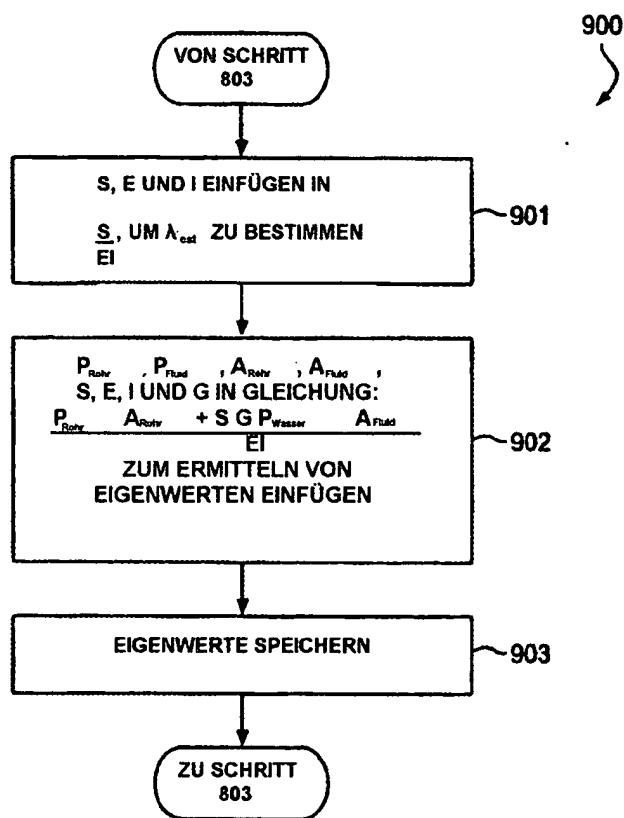
FIG. 9

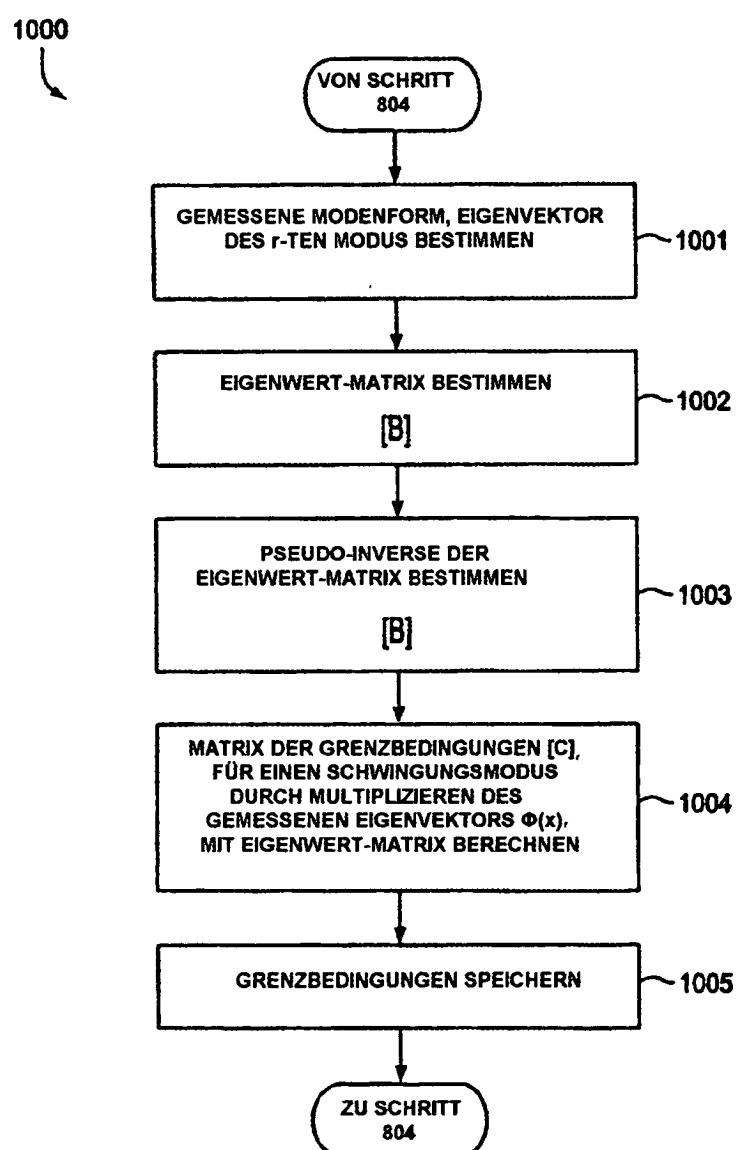
FIG. 10

FIG. 11