



# Patentschrift

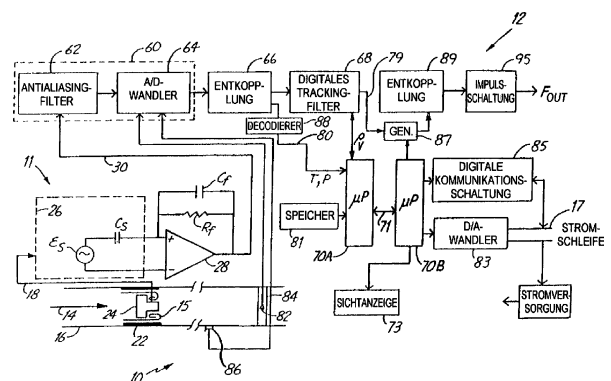
(51) Int Cl.: **G01F 1/32** (2006.01)

(72) Erfinder:  
**Kleven, Lowell A., Eden Prairie, Minn., US;**  
**Hedtke, Robert C., Hamburg, Minn., US; Wiklund,**  
**David, Eden Prairie, Minn., US**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DD	2 87 995	A5
US	5 429 001	A
US	4 010 645	A
EP	0 666 468	A2

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Betreiben eines Durchflussmessers zum Messen eines Massendurchflusses eines Fluids mit den Schritten:  
Erzeugen von Wirbeln im Fluid;  
Überwachen (105) einer Frequenz und einer Amplitude, die mit den Wirbeln in Beziehung stehen;  
Berechnen (109) der Durchflussrate mindestens aus der überwachten Frequenz;  
Bereitstellen (107) eines ersten Dichtewertes als Funktion mindestens der überwachten Amplitude;  
Überwachen (102) mindestens einer Temperatur des Fluids;  
Überwachen (102) eines Drucks des Fluids;  
Bereitstellen (106) eines zweiten Dichtewertes als Funktion mindestens der überwachten Temperatur und des überwachten Drucks; und  
Vergleichen des ersten Dichtewertes mit dem zweiten Dichtewert zum Berechnen (110) eines Kalibrierungsfaktors;  
Korrigieren der berechneten Durchflussrate und Bestimmen des Massendurchflusses.



**Beschreibung****Hintergrund der Erfindung**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft Durchflußmesser, z. B. Wirbelablösungsmeßgeräte oder Wirbelmeßgeräte, die auf eine Fluidströmung ansprechen.

**[0002]** Durchflußmesser erfassen den Durchfluß von Flüssigkeiten oder Gasen in Leitungen und erzeugen ein den Durchfluß oder die Durchflußrate anzeigendes Signal. Unter bestimmten Umständen wird durch das Vorhandensein eines Hindernisses, das alternativ als Ablösungsbock, stumpfer Körper bzw. Störkörper oder Wirbelgenerator bekannt ist, in einer Strömungsleitung periodisch Wirbel in der Strömung erzeugt. Die Frequenz dieser Wirbel ist der Strömungsgeschwindigkeit im Durchflußmesser direkt proportional. Die sich ablösenden Wirbel erzeugen mit der Wirbelablösungsfrequenz einen alternierenden Differenzdruck über den Störkörper. Diese Druckdifferenz wird durch Piezokristalle oder andere Differenzdruckvorrichtungen in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Größe der Druckdifferenz oder des elektrischen Signals ist proportional zu  $\rho V^2$ , wobei  $\rho$  die Fluidichte und  $V$  die Fluidgeschwindigkeit bezeichnen. Wenn das Verhältnis des Rohrdurchmessers zur Größe des Störkörpers konstant gehalten wird, ist die Signalgröße proportional zu  $\rho D^2 F^2$ , wobei  $D$  den Innendurchmesser des Meßgerätrohrs und  $F$  die Wirbelablösungsfrequenz bezeichnen. Der Wirbel-Durchflußmesser erzeugt Impulse mit einer der Durchflußrate proportionalen Frequenz. In einem Wirbelmeßgerät wird das Fluid, dessen Durchflußrate gemessen werden soll, durch Wirbelblätter oder -flügel gezwungen, eine Wirbelkomponente anzunehmen, wobei die Anordnung derart ist, daß die Wirbelbewegung in eine Präzessionsbewegung umgewandelt wird, um Fluidimpulse zu erzeugen, die erfaßt werden, um ein Signal zu erhalten, dessen Frequenz einer Durchflußrate proportional ist. Vergl. US-Patente Nr. 3616693 und 3719080, in denen Beispiele von Wirbelmeßgeräten dargestellt sind und auf die hierin durch Verweis Bezug genommen wird. Der hierin verwendete Ausdruck "Wirbel-Durchflußmesser" soll sowohl Wirbelablösungsmeßgeräte als auch Wirbelmeßgeräte einschließen.

**[0003]** Ein Wirbel-Durchflußmesser ist ein Meßwertgeber oder Transmitter, der typischerweise im Bereich einer industriellen Prozeßsteuerungsanlage angeordnet wird, wo der Leistungsverbrauch berücksichtigt werden muß. Durch einen Wirbel-Durchflußmesser kann ein den Durchfluß oder die Durchflußrate darstellendes Stromausgangssignal bereitgestellt werden, wobei die Größe des Stroms zwischen 4 und 20 mA einer Stromschleife oder 20 mA-Schnittstelle variiert. Außerdem ist es wünschenswert, daß der Wirbel-Durchflußmesser durch die Stromschleife vollständig mit Strom versorgt wird, so daß keine zusätzlichen Stromquellen erforderlich sind. Daher sollte der Transmitter des Wirbel-Durchflußmessers bei einem Strom von weniger als 4 mA betreibbar sein, damit der Transmitter mit dieser industriellen Prozeßsteuerungskommunikationsnorm kompatibel ist.

**[0004]** Es ist bekannt, einen Mikroprozessor in einem Wirbel-Durchflußmesser einzufügen. Der Mikroprozessor empfängt digitale Darstellungen des Ausgangssignals vom Wirbelsensor und berechnet gewünschte Ausgangsgrößen basierend auf Parametern der digitalen Darstellung. Beispielsweise kann ein Wirbel-Durchflußmesser den Massendurchsatz oder -durchfluß durch das Rohr oder die Leitung berechnen. Außerdem ist es wünschenswert, den berechneten Massendurchfluß etwa zehnmal pro Sekunde bereitzustellen. Für jede neue Berechnung des Massendurchsatzes muß der Mikroprozessor viele mathematische Schritte ausführen, wobei für jeden mathematischen Schritt mehrere Taktzyklen erforderlich sind, wodurch die Rate oder Frequenz begrenzt wird, mit der die berechneten Massendurchsatzwerte bereitgestellt werden können. Obwohl es wünschenswert wäre, einen leistungsstärkeren Mikroprozessor zu verwenden, der weitere Berechnungen ausführen könnte, um die Genauigkeit zu verbessern, würde der Mikroprozessor eine höhere Leistung benötigen, als von der vorstehend beschriebenen 4~20 mA-Industrienorm verfügbar ist.

**[0005]** Die EP 666 468 A2 betrifft einen Sensor, der in einem Wirbelmesser eingesetzt werden kann und der in der Lage ist, verschiedene physikalische Charakteristika einer allgemeinen Quelle in einem einmaligen Durchfluß zu messen. Ein Störungsbalken in dem Wirbelmesser erzeugt dabei alternierende Wirbel. Der Sensor, der in Fluidverbindung mit dem Wirbelmesser steht, umfasst ein oder mehrere Druck und Temperatur messende Diaphragmen, die Piezo-Widerstandselemente aufweisen, die in einer Wheatstone-Brückenordnung angeordnet sind. Der Sensor erzeugt dabei elektrische Signale, die der Flussgeschwindigkeit, dem Fluiddruck und der Temperatur entsprechen. Diese Signale werden an ein Prozesselement übertragen, das weitere Flussparameter berechnet.

**[0006]** Die DD 287 995 A5 betrifft einen Wirbelzähler mit Temperatursensor, der, als Betriebsmessgerät ausgeführt, zur Volumenstromerfassung gasförmiger und flüssiger Medien seinen Einsatz findet. Der

DD 287 995 A5 liegt die Aufgabe zugrunde, einen Wirbelzähler mit Temperatursensoren zu schaffen, der wartungsarm und zuverlässig sowie mit hoher Genauigkeit arbeitend, zur Erfassung von Stoffströmen hoher bzw. niedriger Temperatur einsetzbar ist. Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, dass in einer inneren Ausnehmung des Wirbelprofilkörpers in der Nähe seiner Anströmseite oder günstigerweise direkt in der Wirbelablastplatte selbst ein Temperatursensor zur Korrektursignalgewinnung für die Eliminierung temperaturbedingter geometrischer Effekte am Messwertgeber mit Auswirkung auf die Messgenauigkeit des Wirbelzählers angeordnet ist.

**[0007]** Die US 5,429,001 beschreibt einen Messwertgeber für einen Wirbeldurchfluss, der eine Filterschaltung zum Empfangen eines verrauschten Eingangssignals aufweist, das einen Durchfluss darstellt und das eine Grundfrequenz hat, die sich mit der Änderung des Durchflusses ändert. Der Filter filtert das Eingangssignal, wobei eine von einer Gruppe von Hochpass- und Niederpass-Filtereigenschaften genutzt wird, um ein gefiltertes Signal zu erzeugen. Die Amplitude des gefilterten Signals ist proportional zu der Dichte des Fluids. Die Schaltung berechnet den Massendurchfluss des Fluids auf Basis der Amplitude und der Grundfrequenz des Filterausgangssignals. Die Schaltung umfasst eine Gleichrichterschaltung, eine Summierschaltung, eine Periodenzählschaltung und einen Mikroprozessor.

**[0008]** Die US 4,010,645 beschreibt ein System zum Messen eines Massendurchflusses eines Fluidstromes, wobei Gas mit einem Liquid vermischt ist. Das System stellt getrennte Massendurchflussraten für das Gas und das Liquid bereit. Das System umfasst einen Massendurchflussmesser des Wirbeltypes bereit, wobei der Massendurchflussmesser ein Strömungsrohr, durch das der Strom geleitet wird, aufweist, und das ein Ausgangssignal erzeugt, dessen Frequenz den Volumenfluss darstellt und dessen Amplitude den Massendurchfluss darstellt.

**[0009]** Trotzdem besteht ein anhaltender Bedarf für einen Wirbel-Durchflußmesser mit verbesserter Genauigkeit. Dabei sollten weder Einschränkungen hinsichtlich der Aktualisierungsrate gemacht werden, noch sollte der Leistungsbedarf die von der Stromschleife verfügbare Leistung überschreiten.

#### Zusammenfassung der Erfindung

**[0010]** Die Erfindung ist in den unabhängigen Ansprüchen 1 und 14 definiert. Weitere bevorzugte Ausführungsformen sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

**[0011]** Nachstehend werden verschiedene Aspekte der vorliegenden Erfindung beschrieben oder beispielhafte Aspekte beschrieben, die für das Verständnis der Erfindung hilfreich sind.

**[0012]** Ein beispielhaftes Verfahren zum Berechnen eines Durchflußrates eines strömenden Fluids darstellenden Ausgangswertes weist die Schritte auf: Bereitstellen eines Wirbelgenerators, der Wirbel im Fluid erzeugt; Bereitstellen einer ersten Beziehung zwischen dem Fluiddurchfluß und einem ersten Satz von Fluidparametern; Bereitstellen einer zweiten Beziehung zwischen dem Fluiddurchfluß und einem zweiten Satz von Fluidparametern; Überwachen des ersten und des zweiten Satzes von Fluidparametern; Berechnen eines ersten Durchflußwertes aus dem ersten Satz der überwachten Fluidparameter und der ersten Beziehung; Anpassen der zweiten Beziehung basierend auf dem ersten Durchflußwert; und Berechnen des Ausgangswertes aus dem zweiten Satz der überwachten Fluidparameter und der angepassten zweiten Beziehung.

**[0013]** Ein beispielhaftes Verfahren zum Berechnen eines Massendurchsatzes eines strömenden Fluids darstellenden Ausgangswertes weist die Schritte auf: Bereitstellen eines Wirbelgenerators, der Wirbel im Fluid erzeugt, eines Wirbelsensors, der mindestens ein Merkmal der Wirbel mißt, eines Temperatursensors, der eine Temperatur des Fluids mißt, und eines Drucksensors zum Messen eines Drucks des Fluids; Berechnen eines ersten Durchflußwertes aus den vom Temperatursensor und vom Drucksensor erhaltenen Werten; Berechnen eines zweiten Durchflußwertes aus den vom Wirbelsensor erhaltenen Werten; Berechnen eines Kalibrierungsfaktors als Funktion des ersten Durchflußwertes und des zweiten Durchflußwertes; und Berechnen eines Massendurchsatzausgangswertes als Funktion des Kalibrierungsfaktors und der vom Wirbelsensor erhaltenen Werte.

**[0014]** Durch einen beispielhaften Wirbel-Durchflußmesser wird ein Durchflußrate eines Fluids darstellender Ausgangswert bereitgestellt. Der Wirbel-Durchflußmesser weist einen im Fluid positionierbaren Wirbelgenerator und einen Wirbelsensor auf, durch den ein Wirbelsignal als Funktion der erzeugten Wirbel bereitgestellt wird. Eine Filterschaltung ist mit dem Wirbelsensor verbunden, um das Wirbelsignal zu empfangen und ein den Fluiddurchfluß darstellendes Filterausgangssignal bereitzustellen. Ein Temperatursensor erfaßt eine Temperatur des Fluids und erzeugt einen Temperaturwert. Ein Prozessor ist mit der Filterschaltung und

mit dem Temperatursensor betrieblich gekoppelt, um das Filterausgangssignal bzw. den Temperaturwert zu empfangen. Der Prozessor berechnet einen Kalibrierungsfaktor als Funktion des Filterausgangssignals und des Temperaturwertes und berechnet den Ausgangswert als Funktion des Kalibrierungsfaktors.

**[0015]** Ein erfindungsgemäßer Wirbel-Durchflußmesser stellt einen Massendurchfluß eines Fluids bereit. Der Wirbel-Durchflußmesser weist einen im Fluid positionierbaren Wirbelgenerator und einen Wirbelsensor auf, der ein Wirbelsignal als Funktion erzeugter Wirbel bereitstellt. Eine Schaltung ist mit dem Wirbelsensor gekoppelt, um das Wirbelsignal zu empfangen, und erzeugt ein eine Durchflußrate anzeigendes Ausgangssignal. Ein Temperatursensor erfaßt eine Temperatur des Fluids und erzeugt einen Temperaturwert. Ein Drucksensor erfaßt einen Druck des Fluids und erzeugt einen Druckwert. Ein Prozessor ist mit der Schaltung, dem Temperatursensor und dem Drucksensor betrieblich gekoppelt, um das Ausgangssignal, den Temperaturwert und den Druckwert zu empfangen.

**[0016]** Der Prozessor stellt einen ersten Dichtewert als Funktion einer Amplitude des Ausgangssignals und einen zweiten Dichtewert als Funktion mindestens des erzeugten Temperaturwertes und Druckwertes, den ersten Dichtewert mit dem zweiten Dichtewert vergleicht und daraus einen Kalibrierungsfaktor berechnet, das die Durchflußrate darstellende Ausgangssignal korrigiert und den Massendurchfluß bestimmt.

**[0017]** Ein beispielhafter Wirbel-Durchflußmesser weist ein Strömungsrohr mit einem Wirbelgenerator und einem darin angeordneten Stromlinienkörper auf. Ein Wirbelsensor erfaßt durch den Wirbelgenerator erzeugte Wirbel, während ein am Stromlinienkörper angeordneter Temperatursensor eine Temperatur eines durch das Strömungsrohr strömenden oder transportierten Fluids mißt. Eine Schaltung ist mit dem Wirbelsensor und mit dem Temperatursensor verbunden, um einen den Fluiddurchfluß anzeigenden Ausgangswert zu erzeugen.

**[0018]** Ein beispielhafter Durchflußmesser, der einen Massendurchfluß eines Fluids mißt, weist einen Volumendurchflußsensor auf, der ein Volumenausgangssignal erzeugt, das als Funktion eines Volumendurchflusses des Fluids variiert, und einen im Fluid angeordneten Stromlinienkörper. Ein Temperatursensor ist am Stromlinienkörper angeordnet und erzeugt ein Temperatursignalsignal. Eine Schaltung empfängt das Volumenausgangssignal und das Temperatursignalsignal und erzeugt als Funktion dieser Signale einen den Massendurchfluß des Fluids darstellenden Durchflußmesserausgangswert.

**[0019]** Ein Verfahren zum Betreiben eines Durchflußmessers zum Messen einer Durchflußrate eines Fluids weist die Schritte auf: Bereitstellen eines Störkörpers, der Wirbel im Fluid erzeugt; Überwachen einer Frequenz und einer Amplitude, die mit den Wirbeln in Beziehung stehen; Berechnen einer Durchflußrate mindestens aus der Frequenz; und Erzeugen eines Alarmsignals, wenn die Amplitude einen Amplitudenschwellenwert überschreitet.

**[0020]** Das erfindungsgemäße Verfahren zum Betreiben eines Durchflußmessers zum Messen eines Massendurchflusses eines Fluids weist die folgenden Schritte auf: Erzeugen von Wirbeln im Fluid; Überwachen einer Frequenz und einer Amplitude, die mit den Wirbeln in Beziehung stehen; Berechnen der Durchflußrate mindestens aus der überwachten Frequenz; Bereitstellen eines ersten Dichtewertes als Funktion mindestens der überwachten Amplitude; Überwachen mindestens einer Temperatur des Fluids; Überwachen eines Drucks des Fluids; Bereitstellen eines zweiten Dichtewertes als Funktion mindestens der überwachten Temperatur und des Drucks; und Vergleichen des ersten Dichtewertes mit dem zweiten Dichtewert zum Berechnen eines Kalibrierungsfaktors; Korrigieren der berechneten Durchflußrate und Bestimmen des Massendurchflusses.

**[0021]** Ein beispielhaftes Verfahren zum Betreiben eines Durchflußmessers zum Messen der Durchflußrate eines Gases weist die Schritte auf: Erzeugen von Wirbeln im Fluid; Überwachen einer mit den Wirbeln in Beziehung stehenden Frequenz; Berechnen der Durchflußrate mindestens aus der überwachten Frequenz; Überwachen mindestens einer Temperatur und eines Drucks des Gases; Berechnen eines die Kondensation des Gases anzeigenden Wertes als Funktion mindestens der überwachten Temperatur und des überwachten Drucks; und Bereitstellen eines Alarmsignals als Funktion des Wertes.

**[0022]** Ein beispielhaftes Verfahren zum Betreiben eines Durchflußmessers in einem definierten Bereich weist auf: Bereitstellen eines Strömungsrohrs zum Transportieren eines Fluids; Bereitstellen eines Volumendurchflußsensors im Strömungsrohr, der ein Volumenausgangssignal erzeugt; Bereitstellen eines ersten Sensors im Strömungsrohr, der einen ersten Parameter mißt, der aus einer Parametergruppe ausgewählt wird, die aus einer Temperatur und einem Druck des Fluids besteht; Berechnen einer Durchflußrate des Fluids mindestens aus dem Volumenausgangssignal; und Erzeugen eines Alarmsignals, wenn das erste Sensorausgangssignal außerhalb eines ersten vorgegebenen Bereichs liegt.

**[0023]** Ein beispielhaftes Verfahren zum Betreiben eines Durchflußmessers zum Messen einer Durchflußrate eines Fluids weist die Schritte auf: Bereitstellen eines Strömungsrohrs zum Transportieren eines Fluids; Erzeugen von Wirbeln im Fluid; Überwachen einer mit den Wirbeln in Beziehung stehenden Frequenz; Berechnen der Durchflußrate mindestens aus der überwachten Frequenz; und Überwachen einer beginnenden Kavitation oder Blasenbildung im Fluid.

**[0024]** Ein beispielhafter Durchflußmesser, der einen einen Massendurchfluß eines Fluids anzeigenden Durchflußmesserausgangswert als Funktion einer gemessenen Fluidtemperatur oder eines gemessenen Fluid-drucks bereitstellt, weist ein Strömungsrohr und einen im Strömungsrohr angeordneten Volumendurchflußsensor auf, der ein als Funktion eines Volumendurchflusses des Fluids variierendes Volumenausgangssignal erzeugt. Ein Temperatur- oder Drucksensor ist an einer ersten Position im Strömungsrohr angeordnet, um einen Parameter des Fluids an der ersten Position zu messen. Eine Durchflußmesserschaltung empfängt den Parameterwert vom Sensor und erzeugt den Durchflußmesserausgangswert als Funktion dieses Parameterwertes. Die Durchflußmesserschaltung ist außerdem so konfiguriert, daß sie den Parameterwert korrigiert, wodurch ein angepaßter Wert erhalten wird, der den Parameter des Fluids an einer zweiten Position darstellt, wobei der angepaßte Temperaturwert durch die Durchflußmesserschaltung verwendet wird, um den Durchflußmesserausgangswert zu berechnen.

**[0025]** Ein beispielhafter Durchflußmesser, der einen einen Massendurchfluß eines Fluids anzeigendes Durchflußmesserausgangswert als Funktion einer gemessenen Fluidtemperatur und eines gemessenen Fluid-drucks bereitstellt, weist ein Strömungsrohr und einen im Strömungsrohr angeordneten Volumendurchflußsensor auf, der ein als Funktion eines Volumendurchflusses des Fluids variierendes Volumenausgangssignal erzeugt. Ein Temperatursensor ist an einer ersten Temperaturposition im Strömungsrohr angeordnet, um eine Temperatur des Fluids an der ersten Temperaturposition zu messen. Ein Drucksensor ist an einer ersten Druckposition im Strömungsrohr angeordnet, um einen Druck des Fluids an der ersten Druckposition zu messen. Eine Durchflußmesserschaltung empfängt einen Temperaturwert vom Temperatursensor und einen Druckwert vom Drucksensor und erzeugt den Durchflußmesserausgangswert als Funktion dieser Werte. Die Durchflußmesserschaltung ist außerdem so konfiguriert, daß sie den Temperaturwert korrigiert, um einen angepaßten Temperaturwert zu erhalten, der eine Temperatur des Fluids an einer zweiten Temperaturposition darstellt, und den Druckwert korrigiert, um einen angepaßten Druckwert zu erhalten, der einen Druck des Fluids an einer zweiten Druckposition darstellt, wobei der angepaßte Temperaturwert und der angepaßte Druckwert durch die Durchflußmesserschaltung verwendet werden, um den Durchflußmesserausgangswert zu erzeugen.

**[0026]** Ein beispielhaftes Verfahren zum Betreiben eines Durchflußmessers, der eine Durchflußrate eines Fluids mißt, weist die Schritte auf: Bereitstellen eines Strömungsrohrs zum Transportieren eines Fluids; Erzeugen von Wirbeln im Fluid durch einen Störkörper; Überwachen einer mit den Wirbeln in Beziehung stehenden Frequenz; Überwachen eines Parameters; Berechnen eines Kalibrierungsfaktors aus dem Parameter; und Berechnen der Durchflußrate mindestens aus der überwachten Frequenz und dem Kalibrierungsfaktor.

#### Kurzbeschreibung der Zeichnungen

**[0027]** Fig. 1 zeigt ein Blockdiagramm eines erfindungsgemäßen Wirbel-Durchflußmessers;

**[0028]** Fig. 1A zeigt ein Blockdiagramm einer zweiten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Wirbel-Durchflußmessers;

**[0029]** Fig. 2 zeigt ein Ablaufdiagramm zum Darstellen der Arbeits- oder Funktionsweise des erfindungsgemäßen Wirbel-Durchflußmessers;

**[0030]** Fig. 3A und Fig. 3B zeigen Kurven des Kompressibilitätsfaktors als Funktion des Drucks bei verschiedenen Temperaturen für zwei Fluida;

**[0031]** Fig. 4 zeigt eine Seitenansicht des Wirbel-Durchflußmessers, wobei Abschnitte entfernt sind;

**[0032]** Fig. 5 zeigt eine Querschnittansicht des Wirbel-Durchflußmessers entlang den Linien 5-5 von Fig. 4;

**[0033]** Fig. 6 zeigt eine vergrößerte Ansicht eines Teils von Fig. 4;

**[0034]** Fig. 7 zeigt eine Querschnittansicht entlang den Linien 7-7 in Fig. 6;

**[0035]** Fig. 8 zeigt eine Seitenansicht einer zweiten Ausführungsform des Wirbel-Durchflußmessers, wobei Abschnitte entfernt sind; und

**[0036]** Fig. 9 zeigt eine Querschnittansicht des Wirbel-Durchflußmessers entlang den Linien 9-9 in Fig. 8.

#### Ausführliche Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen

**[0037]** Fig. 1 zeigt eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Wirbel-Durchflußmessers **10**. Der Wirbel-Durchflußmesser **10** weist allgemein eine Wirbelsensoreinheit **11** auf, die geeignete mechanische und elektrische Elemente zum Erfassen von Wirbeln **15** in einem durch eine Leitung bzw. durch ein Rohr **16** strömenden Fluid **14** aufweist. Der Wirbelsensor **11** ist mit einer elektronischen Schaltung **12** betrieblich verbunden. Die elektronische Schaltung **12** erzeugt sowohl einen einen Durchfluß anzeigenden 4~20-mA-Strom auf einer Stromschleife **17** als auch ein Rechteckwellen-Ausgangssignal  $F_{out}$  mit einer dem Fluiddurchfluß proportionalen Frequenz.

**[0038]** Der Wirbel-Durchflußmesser **10** weist ein Wirbel-Durchflußmessergehäuse **22** mit einem darin angeordneten Störkörper **24** auf. Wenn das Fluid **14** am Störkörper **24** vorbeiströmt, werden sich ablösende Wirbel **15** mit einer die Durchflußrate anzeigenden Frequenz erzeugt. Ein vorzugsweise am Störkörper **24** angeordneter Meßaufnehmer oder Meßumformer **26** der Wirbelsensoreinheit **11** erfaßt eine mit den sich ablösenden Wirbeln **15** in Beziehung stehende Druckdifferenz. Der Wirbelsensor **26** kann beispielsweise einen piezoelektrischen Sensor aufweisen. Der Sensor **26** weist Kenngrößen oder -linien auf, die näherungsweise durch eine Spannungsquelle  $E_s$  und einen Reihen- oder Serienkondensator  $C_s$  darstellbar sind. Die Größe des Ausgangssignals vom piezoelektrischen Sensor **26** ist der Druckdifferenz proportional, die zu  $pV^2$  proportional ist, wobei  $p$  die Fluidichte und  $V$  die Geschwindigkeit des Fluids **14** darstellen, und außerdem proportional zu  $pD^2F^2$ , wobei  $D$  den Innendurchmesser des Meßgerätgehäuses **22** und  $F$  die Ablösungsfrequenz der Wirbel **15** darstellen.

**[0039]** Der Ausgang des Meßumformers **26** ist mit einem Verstärker **28** verbunden, der einen Kondensator  $C_F$  und einen Widerstand  $R_F$  aufweist. Der Verstärker **28** erzeugt ein analoges Ausgangssignal auf einer Leitung **30**. Das Signal auf der Leitung **30** wird einer Eingangsschaltung **60** zugeführt, die ein Antialiasing-Filter **62** und einen Analog/Digital-(Sigma-Delta-)Wandler **64** aufweist. Das Antialiasing-Filter **62** filtert das Signal von der Leitung **30**, um unerwünschtes Hochfrequenzrauschen zu entfernen und führt eine Antialiasing-Filterfunktion aus.

**[0040]** Der Analog/Digital-Wandler **64** tastet das Signal vom Filter **62** mit einer Frequenz von etwa 307,2 kHz ab und gibt einen Ein-Bit-Datenstrom mit einer Frequenz von 307,2 kHz aus, der die Amplitude und die Frequenz der Wirbel **15** anzeigt. Im Datenstrom sind "kein Wort"-Grenzen vorhanden. Die relative Anzahl von Einsen und Nullen, die manchmal als Bitdichte bezeichnet wird, stellt das Signal auf der Leitung **30** dar. Der Analog/Digital-Wandler **64**, der vorzugsweise durch eine anwendungsspezifische integrierte CMOS-Schaltung implementiert wird, um die Leistungsaufnahme, die Kosten und die Größe zu minimieren, ist besonders geeignet, um Analogsignale im Bereich von 1 bis 10 kHz zu digitalisieren, was ein typischer Frequenzbereich für Wirbel-Durchflußmesser ist. Der digitale Datenstrom wird über eine elektrische Trenn- oder Entkopplungsbarriere **66** übertragen, die für Sensoren erforderlich ist, die geerdet sind oder einen Verluststrom zur Erde aufweisen. Solche Sensoren werden typischerweise in Wirbel-Durchflußmessern verwendet, um Kosten zu reduzieren und Verbindungen zu vereinfachen. Durch den Ein-Bit-Datenstrom kann ein kostengünstiger, kompakter Transformator oder Kondensator in der Trenn- oder Entkopplungsbarriere **66** verwendet werden. Andere Trenn- oder Entkopplungseinrichtungen sind ebenfalls geeignet, z. B. optische, piezoelektrisch/akustische und magnetostriktive Trenn- oder Entkopplungseinrichtungen.

**[0041]** Der Ein-Bit-Datenstrom wird über die Trenn- oder Entkopplungsbarriere **66** einem digitalen Tracking-Filter **68** zugeführt. Das Tracking-Filter **68** minimiert das im Analog/Digital-Wandler **64** vorhandene Frequenzquantisierungsrauschen und wandelt außerdem die Amplituden- und das Frequenz-Wirbelsensorsignal auf der Leitung **30** in ein einen Massendurchfluß darstellendes Durchflußmesserausgangssignal um. Das digitale Filter **68** empfängt ein mit der Durchflußrate in Beziehung stehendes rausch-kontaminiertes Eingangssignal mit einer in Antwort auf die Durchflußrate variierenden Grundfrequenz. Das digitale Filter **68** filtert das Eingangssignal mit vorgegebenen Hochpaß (HP) und Tiefpaß (TP)-filtercharakteristika, um ein einen Durchfluß darstellendes, gefiltertes Signal zu erzeugen. Die Frequenzcharakteristik des HP-Filters wird aus einer Familie vorausgewählter HP-Filter mit verschiedenen Eckfrequenzen ausgewählt. In einer bevorzugten Ausführungsform werden mehrere HP-Filter verwendet. Ein Mikroprozessor **70** wählt geeignete Eckfrequenzen des digitalen Filters **68** aus, oder es wird eine geeignete Steuerung im digitalen Filter **68** bereitgestellt, um die Eckfrequenzen auszuwählen. Das digitale Filter **68** erzeugt ein mit der Amplitude des Signals auf der Leitung **30** in

Beziehung stehendes Signal, das der Dichte  $\rho_V$  des Fluids grob proportional ist. Das Signal  $\rho_V$  wird verwendet, um den Massendurchsatz  $M$  zu berechnen. Das  $\rho_V$ -Signal ist gegenüber einem anderen Signal  $\rho_V$  bevorzugt, das ebenfalls vom digitalen Filter **68** verfügbar ist, weil das digitale Filter **68** vom  $\rho_V$ -Signal mehr Rauschen entfernt hat. Im US-Patent Nr. 5429001, auf das hierin durch Verweis Bezug genommen wird, wird die Operation des digitalen Filters **68** zum Bereitstellen des  $\rho_V$ -Signals ausführlich beschrieben. In der mitanhängigen Patentanmeldung mit dem Titel "RAPID TRANSFER FUNCTION DETERMINATION FOR A TRACKING FILTER", die am gleichen Datum wie die vorliegende Anmeldung eingereicht wurde, und auf die ebenfalls hierin durch Verweis Bezug genommen wird, wird ein alternatives digitales Tracking-Filter beschrieben. Im von einem dieser digitalen Tracking-Filter erhaltenen  $\rho_V$ -Signal kann jedoch ein Fehler von etwa 5% im Vergleich zur tatsächlichen Fluidichte vorhanden sein. Dieser Fehler kann auf den Störkörper **24** ausgeübten Fluideffekten zugeordnet werden.

**[0042]** Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird durch den Wirbel-Durchflußmesser **10** die Genauigkeit des die Durchflußrate, typischerweise eines Massendurchflusses  $M$ , anzeigenden Ausgangswertes durch Überwachen zusätzlicher Parameter des in der Leitung **16** strömenden Fluids **16** und unter Verwendung der zusätzlichen Parameter zum Berechnen des die Durchflußrate anzeigenden gewünschten Ausgangswertes verbessert. In der dargestellten Ausführungsform werden die Temperatur und der Druck des in der Leitung **16** strömenden Fluids **14** gemessen und dem Mikroprozessor **70** als Eingangssignal **80** zugeführt. Die Temperatur wird durch einen geeigneten Temperatursensor **82** gemessen, z. B. durch eine RTD-Vorrichtung (Widerstandstemperaturvorrichtung) oder ein Thermoelement, das die Temperatur des Fluids **14**, vorzugsweise strömungsabwärts vom Störkörper **24**, erfaßt. In der dargestellten Ausführungsform ist der Temperatursensor **82** in einem Stromlinienkörper **84** angeordnet, z. B. in einem Flügelprofilelement, um eine robuste Struktur zu erhalten und den Druckabfall entlang der Leitung **16** zu minimieren. Ein geeigneter Drucksensor **86** erfaßt den Leitungsdruck des Fluids in der Leitung **16**. Der Temperatursensor **82** und der Drucksensor **86** erzeugen Ausgangssignale für geeignete Analog/Digital-Wandler **64** (wobei gegebenenfalls eine Filterfunktion vorgesehen sein kann). Die Digital/Analog-Wandler **64** übertragen entsprechende Digitalsignale über die Trenn- oder Entkopplungsbarriere **66** an einen Decodierer **88**, der das Signal **80** dem Mikroprozessor **70** zuführt. In der dargestellten Ausführungsform ist sowohl der Temperatursensor **82** als auch der Drucksensor **86** strömungsabwärts vom Störkörper **24** angeordnet, um eine Störung der Erzeugung von Wirbeln **15** zu vermeiden. In einer bevorzugten Ausführungsform ist der Temperatursensor **84** in einem etwa dem sechsfachen Innendurchmesser des Meßgerätgehäuses **22** entsprechenden Abstand vom Störkörper **24** angeordnet, während der Drucksensor in einem etwa dem vierfachen Innendurchmesser des Meßgerätgehäuses **22** entsprechenden Abstand vom Störkörper **24** angeordnet ist. An diesen Positionen weisen die vom Temperatursensor **82** und vom Drucksensor **86** erhaltenen Ausgangswerte vernachlässigbare Fehler auf und können zum Berechnen der Fluidichte  $\rho_V$  verwendet werden.

**[0043]** Fig. 2 zeigt ein Ablaufdiagramm zum Darstellen der Gesamtoperation des Wirbel-Durchflußmessers **10**. Das Ablaufdiagramm beginnt bei Schritt **100**. Von Schritt **100** ausgehend kann der Programmablauf als Verarbeitung entlang parallelen Pfaden **101** und **103** betrachtet werden. In der Praxis führt der Wirbel-Durchflußmesser **10** Arbeitsschritte im Pfad **101** und aufeinanderfolgende Iterationen über den Pfad **101** aus, bevor eine Einzeliteration über den Pfad **103** abgeschlossen wird. Insbesondere wird der Mikroprozessor **70** Arbeitsschritte im Pfad **103** im "Hintergrund" ausführen, wobei diese Schritte, oder Teile davon, abgeschlossen werden, wenn die Zeit während oder beim Abschluß der Arbeitsschritte von Pfad **101** verfügbar ist. Wie nachstehend beschrieben wird, wird durch die Arbeitsschritte des Pfades **101** als Ergebnis der den Durchfluß, hierin den Massendurchsatz  $M$  des Fluids **14** in der Leitung **16**, anzeigende, gewünschte Ausgangswert bereitgestellt. Während eines Normalbetriebs des Wirbel-Durchflußmessers **10** wird die Genauigkeit des berechneten Massendurchsatzes  $M$  durch Korrigieren der Temperatur und des Drucks des Fluids **14** durch die Arbeitsschritte in Pfad **103** verbessert.

**[0044]** Nachstehend wird zunächst Pfad **101** betrachtet, in dem der Wirbel-Durchflußmesser in Schritt **105** zunächst die Frequenz- und Amplitudendaten vom Wirbelsensor **11** erhält und diese Daten dem digitalen Tracking-Filter **68** zuführt, wie vorstehend beschrieben wurde. Das digitale Tracking-Filter **68** erzeugt dann in Schritt **107** die Dichte  $\rho_V$ , die den Durchfluß des Fluids **14** in der Leitung **16** anzeigt. Die in Schritt **107** ausgeführten Berechnungen weisen das Anwenden einer gespeicherten Skalierungskonstanten  $\beta$  auf, um Differenzen in der Empfindlichkeit des Wirbelsensors **11** und in der Elektronik **12** zu berücksichtigen, die für eine vorgegebene Leitungsgröße von Element zu Element, z. B. um  $\pm 30\%$  des Nennwertes, variieren können. Der Wert  $\beta$  wird vorzugsweise so eingestellt, daß  $\rho_V$  im wesentlichen dem vom nachstehend beschriebenen Schritt **110** erhaltenen Wert  $\rho_G$  oder  $\rho_L$  entspricht (d. h.  $C$  hat ungefähr den Wert eins). Der Dichtewert  $\rho_V$  wird dann durch den Mikroprozessor **70** gemäß bekannten Gleichungen verwendet, um den Massendurchfluß  $M$  in Schritt **109** (auf ähnliche Weise wie im US-Patent Nr. 5429001 beschrieben) zu berechnen. Bei dieser Aus-

föhrungsform eines erfindungsgemäßen Wirbel-Durchflußmessers **10** wird der Dichtewert  $\rho_V$  jedoch mit einem Kalibrierungsfaktor C korrigiert, der in den Arbeitsschritten des Pfades **103** berechnet wird. Weil der Kalibrierungsfaktor C von mindestens einem Wert der Dichte  $\rho_V$  abhängen kann, und weil der Kalibrierungsfaktor C möglicherweise nicht für die erste Iteration entlang des Pfades **101** berechnet wurde, kann der Kalibrierungsfaktor C anfangs auf eins gesetzt werden.

**[0045]** Nachstehend wird nun auf Pfad **102** Bezug genommen, in dem der Mikroprozessor **70** in Schritt **102** Fluidparameter liest, z. B. den Temperatur- und den Druckwert von der Leitung **80**, und einen Wert  $\rho_V$  erhält, der in Schritt **107** berechnet wurde und zeitlich dem Temperatur- und dem Druckwert entspricht. An diesem Punkt wird der Programmablauf in Abhängigkeit davon, ob das Fluid ein Gas oder eine Flüssigkeit ist, oder ob wenige oder irgendwelche Eigenschaften des Fluids bekannt sind, zu Unterpfaden **103A**, **103B** oder **103C** verzweigen.

**[0046]** Wenn das Fluid ein Gas ist, schreitet der Programmablauf entlang Pfad **103A** fort. In Schritt **104** berechnet der Mikroprozessor **70** einen Kompressibilitätsfaktor Z des in der Leitung **16** strömenden Fluids. Es existieren zahlreiche Standards zum Berechnen von Kompressibilitätsfaktoren, die durch zahlreiche Organisationen, z. B. American Gas Association, veröffentlicht wurden. Die **Fig. 3A** und **Fig. 3B** zeigen die Änderung des Kompressibilitätsfaktors als Funktion des Drucks bei verschiedenen Temperaturen für Gase mit verschiedenen Bestandteilen. Der Mikroprozessor **70** berechnet vorzugsweise den Kompressibilitätsfaktor unter Verwendung von einem bestimmten Fluid zugeordneten, gespeicherten Koeffizienten. Weil für jeden von mehreren zu betrachtenden Fluida ein Koeffizientensatz erforderlich ist, und weil die Größe des Kompressibilitätsfaktors wesentlich variiert, ist es bevorzugt, Polynome der Form:

$$\frac{1}{Z} = \sum_i \sum_j A_{ij} \frac{P^i}{T^j} \quad (1)$$

zu verwenden, wobei  $A_{ij}$  eine in einem Speicher (EEPROM) **81** gespeicherte, durch Kurvenanpassung erhaltene Konstante, T die absolute Prozeßtemperatur und P den absoluten Druck bezeichnen, und wobei i und j vorzugsweise ganze Zahlen zwischen 0 und 9 annehmen, die von der zum Berechnen des Kompressibilitätsfaktors erforderlichen Genauigkeit abhängen. Ein Polynom mit 63 Termen ( $i = 0$  bis 8,  $j = 0$  bis 6) ist für die meisten Anwendungen ausreichend. Durch Polynome dieser Form und mit dieser Anzahl von Termen wird der Rechenaufwand im Vergleich zu direkten Berechnungsverfahren reduziert, wodurch die Zeit zwischen Aktualisierungen des Kalibrierungsfaktors C und die Betriebsspannungs- oder -leistungsanforderungen des Wirbel-Durchflußmessers **10** reduziert werden. Außerdem ist für eine solche Technik kein großer Speicher zum Speichern einer großen Anzahl von Hilfskonstanten erforderlich, was ebenfalls zur Leistungseinsparung beiträgt.

**[0047]** Nachdem der Kompressibilitätsfaktor in Schritt **104** berechnet wurde, wird dieser Wert in Schritt **106** zum Berechnen eines Dichtewertes  $\rho_G$  gemäß dem idealen Gasgesetz verwendet.

**[0048]** Wenn das Fluid **14** eine Flüssigkeit ist, schreitet der Programmablauf nach Schritt **102** entlang des Pfades **103B** fort. Der Pfad **103B** weist einen Schritt **108** auf, in dem die Dichte  $\rho_L$  für die Flüssigkeit berechnet wird. Der Mikroprozessor **70** berechnet  $\rho_L$  vorzugsweise unter Verwendung gespeicherter Polynome der Form:

$$\rho_L = \sum_k \sum_l B_{kl} \frac{P^k}{T^l} \quad (2)$$

wobei  $B_{ij}$  eine im Speicher **81** gespeicherte, durch Kurvenanpassung erhaltene Konstante, T die absolute Prozeßtemperatur und P den absoluten Druck bezeichnen, und wobei k und l geeignete ganze Zahlen zwischen 0 und 9 annehmen können, die von der gewünschten Genauigkeit abhängen. Gegebenenfalls kann, weil Flüssigkeiten im wesentlichen inkompressibel sind, der Term  $P^k$  weggelassen werden.

**[0049]** In Schritt **110** wird ein Kalibrierungsfaktor C als Funktion von  $\rho_G$  oder  $\rho_L$  und  $\rho_V$  berechnet. Der Kalibrierungsfaktor C kann ein einfaches Verhältnis sein, das aus diesen Werten erhalten wird, oder alternativ ein laufender Mittelwert oder ein zeitlich gewichteter Mittelwert.



**[0050]** Der Unterpfad **103C** stellt die Berechnung eines Kalibrierungsfaktors  $C$  dar, wobei, falls überhaupt, nur wenig über die Fluideigenschaften des durch die Leitung **16** strömenden Fluids bekannt ist. Allgemein kann der Kalibrierungsfaktor dargestellt werden durch:

$$C = C_{\text{ref}} + \Delta C \quad (3)$$

wobei  $C_{\text{ref}}$  einen Mittelwert des Kalibrierungsfaktors und  $\Delta C$  einen kleinen Wert bezeichnen, der als Funktion der verfügbaren Parameter berechnet wird, z. B. als Funktion des Drucks vom Drucksensor **86**, der durch den Temperatursensor **82** gemessenen Temperatur, des in Schritt **107** berechneten Wertes  $\rho_V$  oder anderer bekannter Parameter des Fluids, z. B. der dynamischen Viskosität. Beispielsweise kann der Mikroprozessor **70** einen Kalibrierungsfaktor für Änderungen des Ausgangswertes oder der Steifigkeit oder der Elastizität der Wirbelsensoreinheit **11** als Funktion des Drucks und der Temperatur berechnen. Bei einer weiteren Ausführungsform kann der Mikroprozessor **70** eine Reynoldszahl unter Verwendung des Wertes  $\rho_V$ , der Geschwindigkeit  $V$  des strömenden Fluids (die aus der Ablösungsfrequenz berechnet wird), des Durchmessers des Meßgeräts und der dynamischen Viskosität  $\mu$  berechnen, die eine Funktion der Temperatur und des Fluidtyps ist. Obwohl für die Berechnung der Reynoldszahl die dynamische Viskosität des Fluids bekannt sein muß, kann eine Näherung verwendet werden. Die dynamische Viskosität kann einfach eine Konstante sein (wobei jegliche Temperatureffekte ignoriert sind), oder kann auch eine Funktion der Temperatur sein, in der Form:

$$\frac{1}{\mu} = \sum_n \frac{D_n}{T^n} \quad (4)$$

die vom Umfang der Kenntnis der Fluideigenschaften abhängt, wobei  $D_n$  eine durch Kurvenanpassung erhaltene Konstante bezeichnet,  $T$  die absolute Prozeßtemperatur ist und  $n$  einen geeigneten ganzzahligen Wert annehmen kann, der in Abhängigkeit von der Genauigkeit variiert. Wenn die Reynoldszahl bekannt ist, kann der Mikroprozessor **70** den "K-Faktor" und/oder einen Koeffizienten des auf den Störkörper **24** ausgeübten Drucks korrigieren, der die Druckdifferenz ( $\Delta P = C_p \rho V^2$ ) bestimmt. Gegebenenfalls berechnet der Mikroprozessor **70** den Kalibrierungsfaktor  $C$  unter Verwendung gespeicherter Polynome der Form:

$$C = \sum_r \sum_s C_{rs} \Delta P^r T^s \quad (5)$$

wobei  $C_{rs}$  eine im Speicher **81** gespeicherte, durch Kurvenanpassung erhaltene Konstante,  $\Delta T$  die Differenz zwischen der tatsächlichen Temperatur und einer Referenztemperatur und  $\Delta P$  die Differenz zwischen dem aktuellen Druck und einem Referenzdruck bezeichnen, und wobei  $r$  und  $s$  geeignete ganzzahlige Werte annehmen können, die von der gewünschten Genauigkeit abhängen. Gegebenenfalls können die Werte für  $\rho_V$ ,  $\mu$ , die Machzahl oder andere bekannte Kenngrößen oder gemessene Fluidparameter ebenfalls in dieser Gleichung enthalten sein.

**[0051]** Wenn der Kalibrierungsfaktor  $C$  einmal berechnet wurde, wird er in Schritt **109** für nachfolgende Iterationen des Pfades **101** verwendet, bis während aufeinanderfolgender Iterationen wieder ein neuer Kalibrierungsfaktor im Hintergrund berechnet wird. Der Mikroprozessor **70** führt den letzten Ausgangswert einem Digital/Analog-Wandler **83** zu, um den digitalen Wert in einen den Durchfluß darstellenden 4~20-mA-Strom umzuwandeln. Eine digitale Kommunikationsschaltung **85** kann ebenfalls den letzten Ausgangswert empfangen, um ihn unter Verwendung bekannter Formate auf der Stromschleife **17** zu übertragen. Gegebenenfalls kann auch ein Generator **87** den letzten Ausgangswert des Massendurchflusses empfangen und über eine Entkopplungseinrichtung **89** ein Frequenzausgangssignal  $F_{\text{out}}$  von einer Impulsschaltung **95** bereitstellen. Ansonsten kann der Generator **87** ein den Volumendurchfluß anzeigendes Signal **79** vom digitalen Tracking-Filter **68** empfangen. Der Mikroprozessor **70** führt dem Generator **87** geeignete Skalierungskonstanten zu, wenn  $F_{\text{out}}$  einen Volumendurchfluß anzeigt. Durch eine Sichtanzeige **73** wird eine Benutzerschnittstelle für den Wirbel-Durchflußmesser **10** bereitgestellt.

**[0052]** Auf diese Weise kann der einzelne Mikroprozessor **70** für alle Verarbeitungen verwendet werden, wodurch die durch den Wirbel-Durchflußmesser **10** aufgenommene Leistung minimiert wird, so daß er durch die Stromschleife **17** vollständig versorgt werden kann. Obwohl für die Schritte in Pfad **103** zusätzliche Verarbeitungszeit erforderlich ist, können diese Berechnungen durch den Mikroprozessor **70** ausgeführt werden, während noch immer die gewünschte Aktualisierungsrate für den Massendurchsatzwert  $M$  bereitgestellt wird. Dies wäre nicht möglich, wenn der Mikroprozessor den Massendurchsatzwert  $M$  nur aus dem Dichtewert  $\rho_L$  oder

$\rho_G$  berechnen müßte. Unter diesen Umständen müßte entweder die Aktualisierungsrate des Mikroprozessors **70** reduziert werden, um die Leistungsaufnahme innerhalb der durch die Stromschleife **17** verfügbaren Leistungsgrenzen zu halten, oder es müßte zusätzliche Leistung bereitgestellt werden. In der bevorzugten Ausführungsform wird die Aktualisierungsrate aufrechterhalten, ohne daß die verfügbare Leistung überschritten wird, weil Schritte in Pfad **103** mit einer Rate ausgeführt werden, die kleiner ist als die Aktualisierungsrate des Massendurchsatzwertes **M**.

**[0053]** Fig. 1A zeigt eine beispielhafte Ausführungsform mit zwei Mikroprozessoren **70A** und **70B**. Der Mikroprozessor **70A** berechnet den Massendurchsatz **M** gemäß dem Ablaufdiagramm von Fig. 2, wie vorstehend beschrieben. Der Mikroprozessor **70B** kommuniziert über einen Datenbus **71** mit dem Mikroprozessor **70A**. Der Mikroprozessor **70B** steuert den Generator **87** und die Sichtanzeige **73** und kommuniziert über die Stromschleife **17** und über den Digital/Analog-Wandler **83** und die digitale Kommunikationsschaltung **85** mit einer entfernten Stelle (nicht dargestellt). Fig. 1A zeigt eine Ausführungsform, in der mehrere Mikroprozessoren **70A** und **70B** verwendet werden, um Betriebsprogrammteile auszuführen. Ausführungsformen mit mehr als zwei Mikroprozessoren, oder in denen die Betriebsprogrammteile anders delegiert sind, sind ebenfalls im Umfang der vorliegenden Erfindung eingeschlossen.

**[0054]** Ein anderer Aspekt der vorliegenden Erfindung weist das Berechnen zusätzlicher Korrekturen oder das Bereitstellen von Alarmsignalen für den Volumendurchfluß und den Massendurchsatz sowohl für Flüssigkeiten als auch für Gase unter Verwendung des gemessenen Druck- und/oder der gemessenen Temperaturwertes auf. Beispielsweise kann eine Temperaturkompensation für die durch thermische Ausdehnung des Meßgerätgehäuses **22** verursachte Änderung des "K-Faktors" (Verhältnis von Wirbelablösungsfrequenz zum Volumendurchfluß) bereitgestellt werden. Beispielsweise beträgt, wenn das Meßgerätgehäuse **22** aus rostfreiem Stahl hergestellt ist, die aufgrund der thermischen Ausdehnung erforderliche Temperaturkompensation für den K-Faktor etwa 0,3%/100°F. Der Durchflußmesser **10** würde sowohl den nominellen K-Faktor als auch einen Korrekturfaktor speichern, der auf dem thermischen Volumenausdehnungskoeffizienten und der gemessenen Temperatur basiert. Der Mikroprozessor **70** würde dann sowohl den nominellen K-Faktor als auch den Korrekturfaktor verwenden, um den Ausgangedurchflußwert zu berechnen.

**[0055]** Eine andere Korrektur weist das Berechnen von Druck- und Temperaturänderungen in der Viskosität des Fluids **14** auf, um eine Reynoldszahlkorrektur für den K-Faktor zu bestimmen. Diese Korrektur ist insbesondere für Flüssigkeiten mit höherer Viskosität geeignet, die mit geringen Durchflußraten in engen Leitungen strömen. Daher würden sowohl eine nominelle Reynoldszahl als auch ein Korrekturfaktor (der auf der Temperatur, dem Druck und der Fluidart basiert) gespeichert und durch den Durchflußmesser **10** verwendet.

**[0056]** In einer noch anderen Ausführungsform wird ein Alarmsignal bereitgestellt, wenn im Wirbelsensor **11** eine beginnende Kavitation oder Blasenbildung auftritt. Eine beginnende Kavitation oder Blasenbildung tritt auf, wenn der Druck des Fluids **14** etwa dem Dampfdruck des Fluids entspricht oder kleiner als dieser ist. Die folgende Gleichung stellt den minimalen zulässigen Leitungsdruck  $P_L$  an einer fünf Durchmesser vom Meßgerät **22** entfernten Position dar:

$$P_L = A\Delta P + BP_{VAP} \quad (6)$$

wobei  $\Delta P$  den Druckabfall über den Störkörper **24** zwischen dem strömungsaufwärtsseitigen und dem strömungsabwärtsseitigen Druck bezeichnet ( $\Delta P = C_X \rho V^2$ , wobei  $C_X$  eine Proportionalitätskonstante ist),  $A$  eine mit einem lokalisierten minimalen Druckpunkt auf dem Störkörper **24** in Beziehung stehende Konstante und  $P_{VAP}$  den in Form einer Gleichung oder Tabelle im Speicher **81** gespeicherten Dampfdruck des Fluids **14** und  $B$  eine Konstante bezeichnen, die einen Schwellenwert in der Nähe des Dampfdrucks anzeigt. Beispielsweise kann die Konstante  $A$  einen Wert von etwa 2,9 aufweisen (an einer fünf Durchmesser vom Durchflußmesser entfernten Position), während die Konstante  $B$  einen Wert von etwa 1,3 aufweisen kann. Die Konstanten  $A$  und  $B$  können in Abhängigkeit von der tatsächlichen Druckmeßposition variieren. Vorzugsweise führt der Mikroprozessor **70** diese Berechnung aus, wenn das Amplitudensignal vom Wirbelsensor **11** unter Erwartungswerte abfällt. Wenn der Mikroprozessor **70** berechnet, daß der Leitungsdruck des Fluids **14** den Dampfdruck erreicht, kann ein Kavitation oder Blasenbildung anzeigendes Alarmsignal über die Leitung **17** ausgegeben oder auf der Sichtanzeige **73** dargestellt werden. Ansonsten kann ein Fehler im Wirbel-Durchflußmesser **10** anzeigendes Signal bereitgestellt werden.

**[0057]** In einer anderen Ausführungsform verwendet der Mikroprozessor **70** die gemessenen Druck- und Temperaturdaten, um zu berechnen, ob in den durch den Wirbel-Durchflußmesser strömenden Gasen Konden-

sation auftritt. In diesem Fall kann der Mikroprozessor **70** ein Alarmsignal bereitstellen, der einen Betrieb im Gaskondensationsbereich anzeigt.

**[0058]** In einer Ausführungsform für eine Dampfanwendung berechnet der Mikroprozessor **70** die Dampfqualität durch Vergleichen des von den gemessenen Druck- und Temperaturdaten erhaltenen Dichtewertes  $\rho_G$  mit dem von Amplitudenmessungen erhaltenen Dichtewert  $\rho_V$ . Der Mikroprozessor **70** führt der entfernten Stelle über die Stromschleife **17** ein die Dampfqualität anzeigendes Signal zu.

**[0059]** In einer noch anderen Ausführungsform berechnet der Mikroprozessor **70** den auf den Störkörper **24** ausgeübten dynamischen Druck aus der Dichte  $\rho_L$  oder  $\rho_G$  und der Fluiddurchflußrate, oder ein solcher Amplitudenwert kann aus dem Ausgangssignal des Sensors **11** abgeleitet werden. Wenn der dynamische Druck einen vorgegebenen Wert überschreitet, der von einem zulässigen Maximalwert abhängig ist, jenseits dem Ermüdungserscheinungen und/oder strukturelle Beschädigungen am Störkörper **24** oder am Sensor **11** auftreten können, kann der Mikroprozessor ein Alarmsignal auf der Leitung **17** bereitstellen.

**[0060]** In einer anderen Ausführungsform vergleicht der Mikroprozessor **70** die Werte von  $\rho_V$  mit  $\rho_L$  oder  $\rho_G$  und erzeugt ein Alarmsignal, wenn eine Differenz zwischen diesen Werten einen vorgegebenen Schwellenwert überschreitet, um eine Störung oder Beeinträchtigung des Sensors **11** oder der Elektronik **12** anzuzeigen. Außerdem kann der Mikroprozessor **70** die vom Temperatursensor **82** und vom Drucksensor **86** erhaltenen Signale überwachen, um zu bestimmen, ob die Signale außerhalb nutzbarer Bereiche liegen. Wenn eines dieser Signale außerhalb des nutzbaren Bereichs liegt, kann der Mikroprozessor die Berechnung des Kalibrierungsfaktors unterbrechen, weil die erhaltenen Werte fehlerhaft sein können. In diesem Fall kann der Mikroprozessor **70** ein Alarmsignal bereitstellen, das anzeigt, daß der Massendurchsatz nur über den Pfad **101** berechnet wird, in dem der Kalibrierungsfaktor C auf einen Standardwert gesetzt ist, z. B. auf eins oder den letzten nutzbaren Wert. Ähnlicherweise kann der Mikroprozessor **70** das  $\rho_V$ -Signal vom digitalen Filter **68** überwachen und den Massendurchsatz basierend nur auf den Werten von  $\rho_G$  oder  $\rho_L$  berechnen, wenn das Signal von  $\rho_V$  fehlerhaft erscheint. Der Mikroprozessor **70** kann ein anderes Alarmsignal bereitstellen, wenn nur die Werte  $\rho_G$  und  $\rho_L$  verwendet werden.

**[0061]** Für jeden der vorstehend erwähnten Rechenvorgänge wäre zusätzliche Verarbeitungszeit für den Mikroprozessor **70** erforderlich und die Rechenvorgänge könnten aufgrund des Mehrprogrammbetriebs des Mikroprozessors **70** nur mit einer geringeren Aktualisierungsrate für die berechneten Korrekturen und/oder Alarmsignale ausgeführt werden. Im allgemeinen sind diese Korrekturen klein, und für die Korrekturen wäre eine Aktualisierung mit einer Rate von höchstens 10 bis 20 Sekunden erforderlich. Gegebenenfalls kann eine Funktion für eine Multiplikation mit einer ganzen Zahl in der anwendungsspezifischen integrierten Schaltung bereitgestellt werden, um diese Berechnungen zu unterstützen, insbesondere, wenn die Aktualisierungsraten der Korrekturberechnungen **20** bis **30** Sekunden überschreiten. Außerdem können mit der Funktion für eine Multiplikation mit einer ganzen Zahl in der anwendungsspezifischen Schaltung die Druck- und Temperaturwerte hinsichtlich Linearität und der Kompensation von Nullpunktverschiebungen und Temperaturverschiebungen korrigiert werden.

**[0062]** In einer anderen Ausführungsform können Daten vom Temperatursensor **82** und vom Drucksensor **86** verwendet werden, um einen neuen Wirbelsensor **11** zu kalibrieren, wenn der Wirbelsensor **11** ersetzt werden muß. Insbesondere vergleicht, wenn der Wirbelsensor **11** ersetzt wird, der Mikroprozessor **70** den Wert von  $\rho_V$  mit dem Wert von  $\rho_G$  oder  $\rho_L$  und gleicht die Skalierungskonstante  $\beta$  im Speicher **81**, die  $\rho_G$  oder  $\rho_L$  mit  $\rho_V$  gleichsetzt, so ab, daß C im wesentlichen gleich eins bleibt. Der Mikroprozessor **70** hat dann den neuen Wirbelsensor **11** kalibriert und die Verarbeitung wird dann gemäß Fig. 2 fortgesetzt.

**[0063]** In einer in den Fig. 4–Fig. 7 dargestellten alternativen Ausführungsform sind der Temperatursensor **82** und der Drucksensor **86** zwischen Verbindungsflanschen **22A** und **22B** am Meßgerätgehäuse montiert. Der Temperatursensor **82** ist im Stromlinienkörper **84** angeordnet, der strömungsabwärts vom Störkörper **24** angeordnet ist. Der Stromlinienkörper **84** ist auch in den Fig. 6–Fig. 7 dargestellt und weist eine Innenvertiefung **102** zum Aufnehmen des Temperatursensors, z. B. eines darin angeordneten n-dotierten Thermoelements auf. Der Stromlinienkörper **84** ist am Meßgerätgehäuse **22** montiert und erstreckt sich durch eine Vertiefung **103**. Gemäß Fig. 4 verbindet eine Signalleitung **104** den Temperatursensor **82** mit der in einem Transmittergehäuse **106** angeordneten Elektronik **12**

**[0064]** Bei dieser Ausführungsform hält ein Stütz- oder Halterohr **108** das Transmittergehäuse **106** auf dem Meßgerätgehäuse **22**. Der Drucksensor **86** ist in einem Verbindungsmodul **111** zwischen dem Halterohr **108** und dem Transmittergehäuse **106** angeordnet. Dem Drucksensor **86** wird ein Fluiddruck über einen Durchlaß

oder Kanal **110A** zugeführt, der mindestens eine zum Fluid **14** offene Öffnung **112** zwischen den Flanschen **22A** und **22B** aufweist. In der dargestellten Ausführungsform sind die Öffnungen **112** im Stromlinienkörper **84** angeordnet. Der Durchlaß oder Kanal **110A** weist eine innere Öffnung oder Bohrung **113** und ein Rohr **115** auf. Vorzugsweise weist das Rohr **115** eine Schleife **115A** für eine Kondensationsfalle auf. Ein Ventil **117** ist im Durchlaß **110A** angeordnet, um zu ermöglichen, daß der Drucksensor **86** ausgewechselt werden kann.

**[0065]** In einer in den **Fig. 8** und **Fig. 9** dargestellten, noch anderen Ausführungsform sind der Temperatursensor **82** und der Drucksensor **86** zwischen Verbindungsflanschen **22A** und **22B** am Meßgerätgehäuse **22** montiert. Der Temperatursensor **82** ist in einem strömungsabwärts vom Störkörper **24** angeordneten Stromlinienkörper **184** angeordnet. Der Stromlinienkörper **184** ist auch in **Fig. 5** dargestellt und weist eine Innenvertiefung **186** zum Aufnehmen des Temperatursensors **82**, z. B. eines darin angeordneten n-dotierten Thermoelements, auf. Gemäß **Fig. 8** verbindet eine Signalleitung **188** den Temperatursensor **82** mit der in einem Transmittergehäuse **190** angeordneten Elektronik **12**.

**[0066]** Bei dieser Ausführungsform hält ein Stütz- oder Halterohr **192** das Transmittergehäuse **190** auf dem Meßgerätgehäuse **22**. Der Drucksensor **86** ist im Transmittergehäuse **190** angeordnet. Dem Drucksensor **86** wird ein Fluiddruck über einen Durchlaß oder Kanal **194** zugeführt, der eine sich durch das Meßgerätgehäuse **22** erstreckende und zum Fluid **14** offene Öffnung **196** zwischen den Flanschen **22A** und **22B** aufweist. In der dargestellten Ausführungsform ist die Drucköffnung **196** in der Nähe des Störkörpers **24** angeordnet, in der dargestellten Ausführungsform strömungsaufwärts davon.

**[0067]** Der Position der Öffnungen **112** und des Temperatursensors **82** in den **Fig. 4–Fig. 7**, der Öffnung **196** und des Temperatursensors in den **Fig. 8** und **Fig. 9** und anderen geeigneten Positionen im Meßgerätgehäuse **22** zum Bestimmen der Temperatur- und Druckdaten des Fluids, können Korrekturen bezüglich des dynamischen Druckgefälles oder Staudrucks (proportional zu  $pV^2$ ) und eines Temperaturrückgewinnfaktors zugeordnet sein:

$$\Delta T = \frac{rV^2}{2C_s} \quad (7)$$

wobei  $C_s$  die spezifische Wärme oder Wärmekapazität bei konstantem Druck und  $r$  einen Rückgewinnfaktor bezeichnen. Der Mikroprozessor **70** verwendet den gemessenen Druck und die gemessene Temperatur im Meßgerätgehäuse **22**, die gemessene Dichte  $\rho_V$  und die berechnete Dichte  $\rho_G$  oder  $\rho_L$  in geeigneten thermodynamischen, Energie- und Impulsgleichungen, um den Meßpositionen zugeordnete Fehler zu korrigieren. Beispielsweise steht der Druck vor dem Störkörper **24** mit dem Druck in einem dem vierfachen Durchmesser entsprechenden Abstand strömungsabwärts vom Störkörper **24** gemäß folgender Gleichung in Beziehung:

$$P - P_{4D} = C_P \rho V^2 \quad (8)$$

wobei  $P$  den Druck vor dem Störkörper **24**,  $P_{4D}$  den Druck in einem dem vierfachen Durchmesser entsprechenden Abstand strömungsabwärts vom Störkörper **24**,  $C_P$  einen Druckverlustkoeffizienten, der mit der Reynoldszahl variiert,  $\rho$  die Fluidichte und  $V$  die Fluidgeschwindigkeit bezeichnen. Durch Meßpositionen zwischen den Halteflanschen **22A** können bessere mechanische Anordnungen für das Meßgerätgehäuse **22**, eine geringere Empfindlichkeit für Positionsfehler, geringere Leitungsfehler für den Temperatursensor, eine reduzierte Wechselwirkung oder Interferenz mit der Wirbelablösungsfrequenz und eine reduzierte Blockierung oder Verstopfung der Drucköffnungen erhalten werden. Auf diese Weise kann der Wirbel-Durchflußmesser **10** in der Fabrik vollständig zusammengebaut werden, wodurch die Gesamtgröße und die Gesamtkosten des Durchflußmessers **10** reduziert werden und die Installation einfacher ist, weil keine zusätzlichen Durchdringungspunkte in der Rohrleitung erforderlich sind.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Durchflußmessers zum Messen eines Massendurchflusses eines Fluids mit den Schritten:

Erzeugen von Wirbeln im Fluid;

Überwachen (**105**) einer Frequenz und einer Amplitude, die mit den Wirbeln in Beziehung stehen;

Berechnen (**109**) der Durchflußrate mindestens aus der überwachten Frequenz;

Bereitstellen (**107**) eines ersten Dichtewertes als Funktion mindestens der überwachten Amplitude;

Überwachen (**102**) mindestens einer Temperatur des Fluids;

Überwachen (**102**) eines Drucks des Fluids;  
 Bereitstellen (**106**) eines zweiten Dichtewertes als Funktion mindestens der überwachten Temperatur und des überwachten Drucks; und  
 Vergleichen des ersten Dichtewertes mit dem zweiten Dichtewert zum Berechnen (**110**) eines Kalibrierungsfaktors;  
 Korrigieren der berechneten Durchflussrate und Bestimmen des Massendurchflusses.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Bereitstellung des ersten Dichtewerts (**107**) mit einer ersten Abtastrate wiederholt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Bereitstellung (**106**) des zweiten Dichtewerts mit einer zweiten Abtastrate wiederholt wird, die kleiner ist als die erste Abtastrate.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Korrigieren der Durchflussrate als Funktion mindestens einer vorangehenden Durchflussrate erfolgt.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die Funktion der mindestens einen vorangehenden Durchflussrate einen laufenden Mittelwert aufweist.

6. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die Funktion der mindestens einen vorangehenden Durchflussrate einen zeitlich gewichteten Mittelwert aufweist.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner mit dem Schritt des Erzeugens eines Alarmsignals, wenn die Amplitude einen Amplitudenschwellenwert überschreitet.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Fluid ein Dampf ist, und wobei der Vergleichsschritt das Bereitstellen eines die Dampfqualität anzeigenden Signals aufweist.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Fluid ein Gas ist und das Verfahren die Schritte aufweist:  
 Berechnen eines eine Kondensation des Gases anzeigenden Wertes als Funktion mindestens der überwachten Temperatur und des überwachten Drucks; und  
 Bereitstellen eines Alarmsignals als Funktion des Wertes.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit dem Schritt des Bereitstellens eines Alarmsignals, wenn die überwachte Temperatur oder der überwachte Druck außerhalb eines gewählten Bereichs liegt.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner mit dem Schritt des Überwachens einer beginnenden Kavitation im Fluid durch Vergleichen des Fluiddrucks mit einem Dampfdruck.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Kalibrierungsfaktor die thermische Ausdehnung des Strömungsrohrs des Durchflusssensors berücksichtigt.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Kalibrierungsfaktor die Elastizität des die Wirbel erzeugenden Störkörpers berücksichtigt.

14. Wirbel-Durchflusssensor zum Bereitstellen eines Massendurchflusses eines Fluids, wobei der Durchflusssensor aufweist:  
 einen im Fluid positionierbaren Wirbelgenerator;  
 einen Wirbelsensor (**10**) zum Erzeugen eines Wirbelsignals als Funktion erzeugter Wirbel;  
 eine mit dem Wirbelsensor verbundene Schaltung (**68**) zum Empfangen des Wirbelsignals und zum Erzeugen eines eine Durchflussrate darstellenden Ausgangssignals;  
 einen Temperatursensor (**82**) zum Erfassen einer Temperatur des Fluids und zum Erzeugen eines Temperaturwertes;  
 einen Drucksensor (**86**) zum Erfassen eines Drucks des Fluids und zum Erzeugen eines Druckwertes; und  
 einen mit der Schaltung (**68**), dem Temperatursensor (**82**) und dem Drucksensor (**86**) betrieblich verbundenen Prozessor (**70**, **70A**) zum Empfangen des Ausgangssignals, des Temperaturwertes und des Druckwertes, wobei der Prozessor (**70**, **70A**) einen ersten Dichtewert als Funktion einer Amplitude des Ausgangssignals und einen zweiten Dichtewert als Funktion mindestens des erzeugten Temperaturwertes und Druckwertes

bereitstellt, den ersten Dichtewert mit dem zweiten Dichtewert vergleicht und daraus einen Kalibrierungsfaktor berechnet, das die Durchflussrate darstellende Ausgangssignal korrigiert und den Massendurchfluss bestimmt.

15. Wirbel-Durchflussmesser nach Anspruch 14, wobei die Schaltung eine Filterschaltung (68) aufweist.

16. Wirbel-Durchflussmesser nach Anspruch 15, wobei der Prozessor (70, 70A) das die Durchflussrate darstellende Ausgangssignal mit einer ausgewählten Aktualisierungsrate berechnet, und wobei der Prozessor (70, 70A) den Kalibrierungsfaktor mit einer zweiten Rate berechnet, die kleiner ist als die ausgewählte Aktualisierungsrate.

17. Wirbel-Durchflußmesser nach einem der Ansprüche 14 bis 16, wobei der Kalibrierungsfaktor eine Funktion der Kompressibilität des Fluids ist und der Prozessor außerdem die Kompressibilität (Z) gemäß einer Gleichung der allgemeinen Form:

$$\frac{1}{Z} = \sum_i \sum_j A_{ij} \frac{P^i}{T^j} \quad (9)$$

berechnet, wobei  $A_{ij}$  eine durch Kurvenanpassung erhaltene Konstante, T die Fluidtemperatur und P den Druck bezeichnen, und wobei i und j ganze Zahlen annehmen.

18. Wirbel-Durchflussmesser nach einem der Ansprüche 14 bis 17 mit einem Strömungsrohr, in dem der Wirbelgenerator und ein Stromlinienkörper angeordnet sind, wobei der Temperatursensor am Stromlinienkörper angeordnet ist.

19. Wirbel-Durchflussmesser nach Anspruch 18, wobei der Drucksensor mit einer im Strömungsrohr ausgebildeten Drucköffnung gekoppelt ist, und wobei die Schaltung einen Korrekturfaktor als Funktion der Position der Drucköffnung berechnet.

20. Wirbel-Durchflussmesser nach Anspruch 18, wobei der Drucksensor mit einer im Stromlinienkörper ausgebildeten Drucköffnung gekoppelt ist.

21. Wirbel-Durchflussmesser nach einem der Ansprüche 18 bis 20, wobei der Stromlinienkörper strömungsabwärts vom Wirbelgenerator angeordnet ist.

22. Wirbel-Durchflussmesser nach einem der Ansprüche 18 bis 21, wobei der Stromlinienkörper ein Flügelprofil aufweist.

23. Wirbel-Durchflussmesser nach einem der Ansprüche 18 bis 22, wobei der Temperatursensor an einer ersten Temperaturposition im Strömungsrohr angeordnet ist, der Drucksensor an einer ersten Druckposition im Strömungsrohr angeordnet ist, und wobei die Schaltung außerdem dazu geeignet ist, den Temperaturwert zu korrigieren, um einen angepassten Temperaturwert zu erhalten, der eine Temperatur des Fluids an einer zweiten Temperaturposition darstellt, und den Druckwert zu korrigieren, um einen angepassten Druckwert zu erhalten, der einen Druck des Fluids an einer zweiten Druckposition darstellt, wobei der angepasste Temperaturwert und der angepasste Druckwert durch die Schaltung verwendet werden, um den Massendurchfluss zu berechnen.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

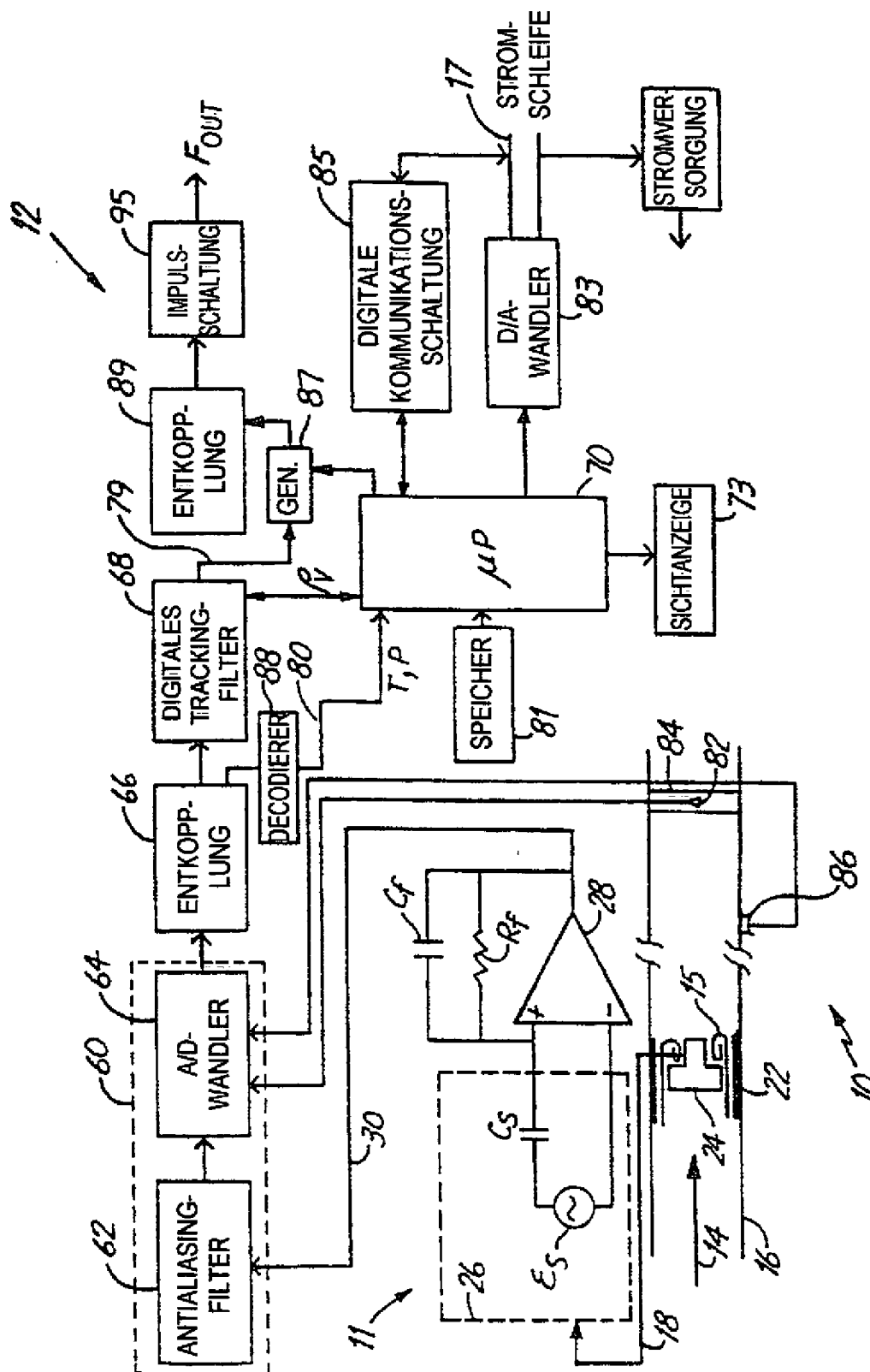


Fig. 1

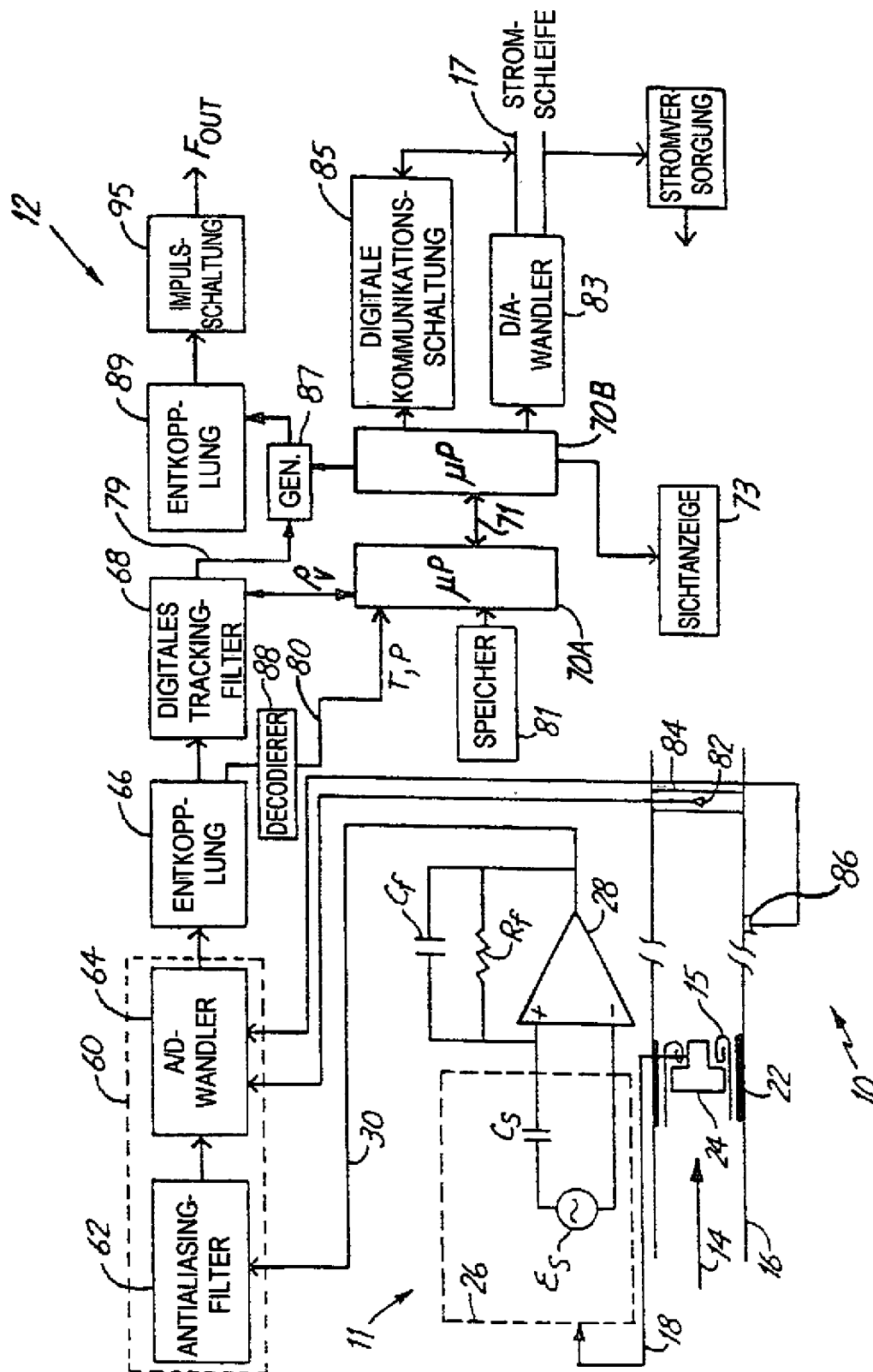


Fig. 1A



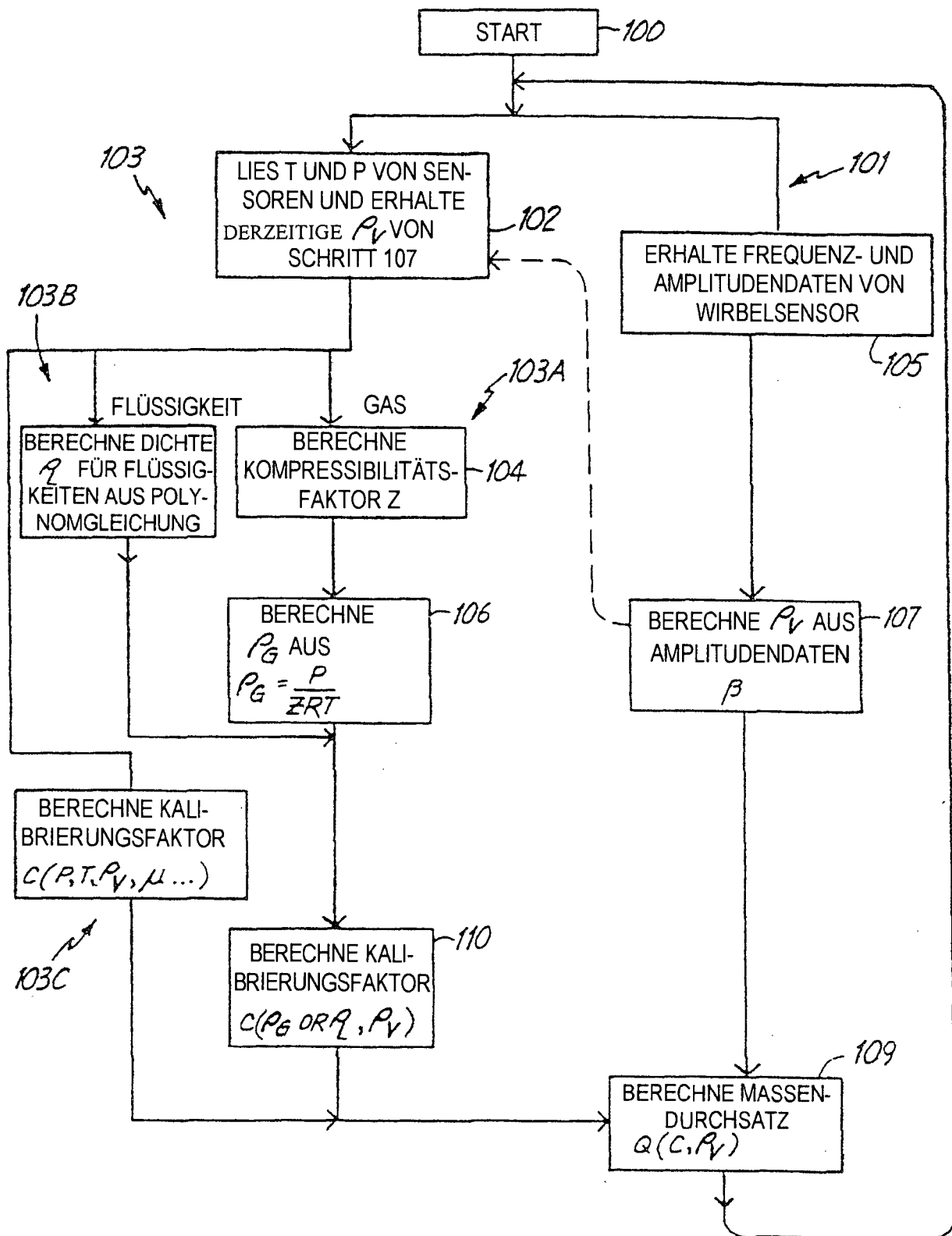
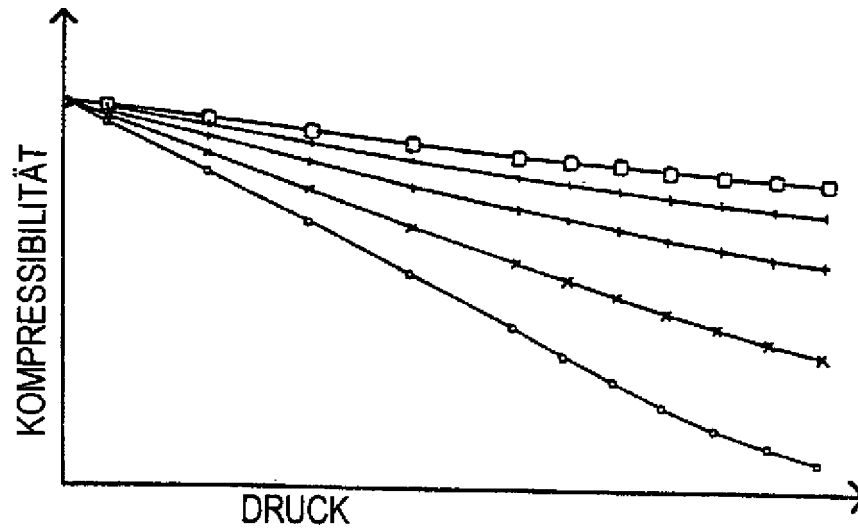
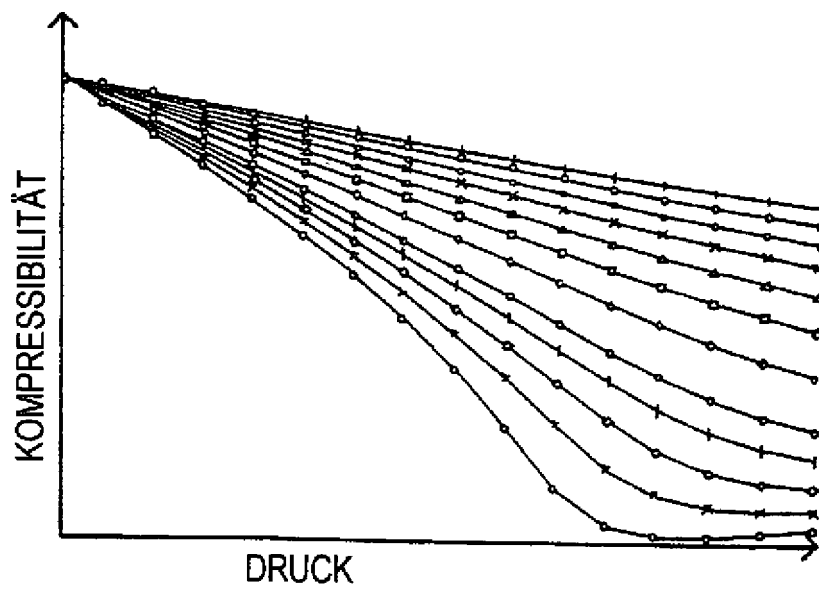


Fig. 2



*Fig. 3A*



*Fig. 3B*

