



(10) **DE 10 2015 102 200 B4** 2022.08.11

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2015 102 200.1**  
(22) Anmeldetag: **16.02.2015**  
(43) Offenlegungstag: **18.08.2016**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **11.08.2022**

(51) Int Cl.: **G01P 5/24 (2006.01)**  
**G01N 29/44 (2006.01)**  
**G01F 1/66 (2022.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Endress+Hauser Flow Deutschland AG, 96450  
Coburg, DE**

(74) Vertreter:  
**Maikowski & Ninnemann Patentanwälte  
Partnerschaft mbB, 10707 Berlin, DE**

(72) Erfinder:  
**Rautenberg, Jens, Dr., 59590 Geseke, DE; Braun,  
Rudolf, 96482 Ahorn, DE; Stark, Achim, 96487  
Dörfles-Esbach, DE; Rüger, Stefan, 96450 Coburg,  
DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

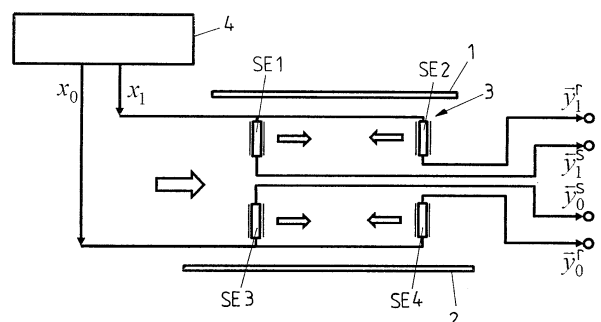
(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Bestimmung von Eigenschaften eines Mediums und Vorrichtung zur Bestimmung von Eigenschaften eines Mediums**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Bestimmung von physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften eines Mediums auf Basis wenigstens zweier erster und zweier zweiter akustischer Wellen, die sich jeweils zumindest teilweise von mindestens einem Sender zu mindestens einem Empfänger durch das Medium ausgebreitet haben, wobei

- die ersten und zweiten akustischen Wellen jeweils durch ein Sendesignal  $(x_0, x_1)$  erzeugt werden,
- sich die ersten akustischen Wellen durch das Medium (M) entlang einer ersten Ausbreitungsrichtung ausbreiten und sich die zweiten akustischen Wellen durch das Medium (M) entlang einer zu der ersten Ausbreitungsrichtung verschiedenen zweiten Ausbreitungsrichtung ausbreiten und
- für eine empfangene erste akustische Welle nach ihrer Ausbreitung durch das Medium (M) entlang der ersten Ausbreitungsrichtung ein erstes Empfangssignal  $(y_0^r, y_1^r)$  und für eine empfangene zweite akustische Welle nach ihrer Ausbreitung durch das Medium (M) entlang der zweiten Ausbreitungsrichtung ein zweites Empfangssignal  $(y_0^s, y_1^s)$  erzeugt wird, wobei aus den Empfangssignalen  $(y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s)$  eine Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) der akustischen Wellen ermittelt wird und mittels einer ermittelten Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) physikalische und/oder chemische Eigenschaften des Mediums (M) bestimmt werden, und wobei
- wenigstens zwei unterschiedliche Sendesignale  $(x_0, x_1)$  im Wesentlichen gleicher Grundfrequenz ( $f$ ) verwendet werden, die einen vorgegebenen Phasenversatz zueinander aufweisen und durch die jeweils eine erste und eine zweite akustische Welle erzeugt werden, so dass für jede

Ausbreitungsrichtung basierend auf beiden Sendesignalen  $(x_0, x_1)$  zwei Empfangssignale  $(y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s)$  erzeugt werden, die auf die unterschiedlichen Sendesignale  $(x_0, x_1)$  zurückgehen, und

- eine Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) der sich entlang der beiden unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen ausbreitenden akustischen Wellen durch die vier Empfangssignale  $(y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s)$  ermittelt wird, von denen zwei Empfangssignale  $(y_0^r, y_0^s)$  durch erste und zweite akustische Wellen erzeugt werden, die auf ein erstes Sendesignal  $(x_0)$  der wenigstens zwei Sendesignale  $(x_0, x_1)$  zurückgehen, und von denen zwei Empfangssignale  $(y_1^r, y_1^s)$  durch erste und zweite akustische Wellen erzeugt werden, die auf ein zweites Sendesignal  $(x_1)$  der wenigstens zwei Sendesignale  $(x_0, x_1)$  zurückgehen.



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	199 57 905	B4
DE	102 06 134	A1
DE	10 2009 003 020	A1
DE	10 2012 212 901	A1
US	6 390 999	B1
US	6 435 037	B1
US	2014 / 0 012 518	A1
WO	2008/ 034 878	A2

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung von physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften eines Mediums anhand wenigstens zweier erster und zweier zweiter akustischen Wellen, die sich jeweils zumindest teilweise von einem Sender zu einem Empfänger durch das Medium ausgebreitet haben, nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 oder des Anspruchs 12 sowie eine Vorrichtung zur Bestimmung von physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften eines Mediums nach dem Oberbegriff des Anspruchs 20.

**[0002]** Das Medium, dessen physikalische und/oder chemische Eigenschaften durch ein gattungsgemäßes Verfahren zu bestimmen sind, ist vorzugsweise eine Flüssigkeit oder ein weiches Material, insbesondere ein hochviskoses, teigartiges oder pastöses Medium. Bei den zur Bestimmung der Eigenschaften genutzten akustischen Wellen handelt es sich beispielsweise um Ultraschallwellen, die von einem entsprechenden Sender durch ein Sendesignal erzeugt werden.

**[0003]** Bei einem gattungsbildenden Verfahren werden üblicherweise wenigstens zwei akustische Wellen durch ein Sendesignal erzeugt, die sich zumindest teilweise durch das Medium entlang identischer oder unterschiedlicher Ausbreitungsrichtungen ausbreiten, bevor jeweils sie an einem in der jeweiligen Ausbreitungsrichtung liegendem Empfänger empfangen werden. Beispielsweise werden akustische Wellen in einem strömenden Medium einerseits in eine erste Ausbreitungsrichtung in Strömungsrichtung des Mediums und andererseits in eine zweite Ausbreitungsrichtung entgegen der Strömungsrichtung des Mediums erzeugt. Aus den an den jeweiligen Empfängern generierten Empfangssignalen kann dann eine Laufzeitdifferenz ermittelt und hieraus z. B. auf die (mittlere) Strömungsgeschwindigkeit des Mediums geschlossen werden. Werden alternativ oder zusätzlich noch absolute Laufzeiten einer akustischen Welle von einem Sender zu einem Empfänger mit Hilfe der Empfangssignale ermittelt, können weitere Rückschlüsse über physikalische und/oder chemische Eigenschaften des Mediums gewonnen werden, wie z. B. dessen Dichte, Temperatur oder Zusammensetzung.

**[0004]** Aus der WO 2008/ 034 878 A2 ist eine gattungsbildende Vorrichtung bekannt, bei der akustische Oberflächenwellen erzeugt werden, die in einem Wellenleiter Volumenschallwellen in das jeweilige Medium einkoppeln. Durch wiederholte Auskopplung von Oberflächenwellen an denjenigen Stellen, an denen die Volumenschallwelle auf eine das Medium berandende Wandung trifft, werden an einem Empfänger wiederum akustische Oberflächenwellen empfangen, deren Laufzeiten und Lauf-

zeitendifferenzen charakteristisch für das Medium sowie dessen physikalische und/oder chemische Eigenschaften sind.

**[0005]** Bei einem aus der WO 2008/ 034 878 A2 beschriebenen Vorrichtung sowie dem damit umgesetzten Verfahren bekommt somit der Verarbeitung der an den jeweiligen Empfängern erzeugten Empfangssignale für eine empfangene akustische Welle - hier eine akustische Oberflächenwelle - eine entscheidende Bedeutung zu. So ist die Ermittlung einer Laufzeitdifferenz oder einer absoluten Laufzeit aus an den Empfängern erzeugten Empfangssignalen keineswegs trivial und unter Umständen mit erheblichem rechnerischem Aufwand verbunden. Je nach aus den Empfangssignalen zu extrahierender Information werden unterschiedlichste Verfahren zur Signalverarbeitung eingesetzt. Beispielsweise ist es bekannt, modulierte Sendesignale zu nutzen, um anhand der gewonnenen Empfangssignale verlässlicher auf die Eigenschaften des Mediums schließen zu können. Beispielsweise wird hierfür eine Quadraturamplitudenmodulation, kurz IQ-Modulation, verwendet, mit der gegenüber nicht modulierten Sendesignalen regelmäßig auch eine deutliche Verbesserung der erzielbaren Auflösung erreichbar ist.

**[0006]** Weitere bekannte Verfahren basieren meist auf abgetasteten und analog zu digital umgesetzten Empfangssignalen, wobei Korrelationsfunktionen, aber auch die Hilbert- und Wavelett-Transformierten gebildet werden.

**[0007]** In der DE 102 06 134 A1 ist weiterhin ein Verfahren zur Bestimmung einer Strömungsgeschwindigkeit eines Mediums mittels Ultraschallwellen offenbart, das gegen Störungen, wie z. B. Rauschen, bei der Signalverarbeitung resistent sein soll. Hierfür werden erzeugte analoge Empfangssignale digitalisiert, eine Kreuzkorrelation durchgeführt und eine Hilbert-Umwandlung vorgenommen, um eine Phasenbeziehung zwischen empfangenen akustischen Wellen und hieraus eine Zeitdifferenz zu berechnen. Eine hierzu geeignete Einrichtung zur Verarbeitung der Empfangssignale (Signalverarbeitungseinrichtung) ist somit aber vergleichsweise komplex und damit mit nicht unerheblichen Kosten verbunden.

**[0008]** Weitere Verfahren zur Bestimmung von physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften eines Mediums mittels akustischer Wellen sind in der US 6 435 037 B1, DE 10 2012 212 901 A1, US 6 390 999 B1, DE 199 57 905 B4, DE 10 2009 003 020 A1 und US 2014 / 0 012 518 A1 beschrieben.

**[0009]** Hiervon ausgehend liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Verfahren zur Bestimmung von physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften eines Mediums

mittels akustischer Wellen bereitzustellen, das hinsichtlich des Berechnungsaufwandes bei der Signalverarbeitung der Empfangssignale verbessert ist und insbesondere eine besonders zuverlässige und robuste sowie wenig aufwändige Bestimmung einer Strömungsgeschwindigkeit eines Mediums mittels akustischer Wellen ermöglicht. Des Weiteren soll eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens bereitgestellt werden.

**[0010]** Diese Aufgabe wird sowohl mit den Verfahren der Ansprüche 1 und 12 als auch mit der Vorrichtung des Anspruchs 20 gelöst.

**[0011]** Die Verfahren der Ansprüche 1 und 12 setzen dabei bei einer Ermittlung einer Laufzeitdifferenz zwischen empfangenen und sich entlang identischer und/oder unterschiedlicher Ausbreitungsrichtungen ausgebreiteter akustischer Wellen und einer Ermittlung einer absoluten Laufzeit einer akustischen Welle von mindestens einem Sender zu mindestens einem Empfänger an, wobei sich eine akustische Welle stets zumindest teilweise durch das Medium zu einem Empfänger ausgebreitet hat. Dabei können die beiden erfindungsgemäßen Verfahren selbstverständlich auch ohne Weiteres miteinander kombiniert werden, so dass z. B. nach der Ermittlung einer absoluten Laufzeit und einem bekannten Abstand von Sender und Empfänger auf die Schallgeschwindigkeit der akustischen Wellen in dem Medium geschlossen wird und hiermit dann ein Proportionalitätsfaktor zur Verfügung steht, der zusammen mit einer ermittelten Laufzeitdifferenz zur Berechnung einer (mittleren) Strömungsgeschwindigkeit des strömenden Mediums genutzt werden kann.

**[0012]** Beide Verfahren gehen hierbei jeweils davon aus, dass

- wenigstens zwei erste und zwei zweite akustische Wellen sich zumindest teilweise von einem Sender zu einem Empfänger durch das Medium ausgebreitet haben und
- die ersten und zweiten akustischen Wellen jeweils durch ein Sendesignal erzeugt werden,
- sich die ersten akustischen Wellen durch das Medium entlang einer ersten Ausbreitungsrichtung ausbreiten und sich die zweiten akustischen Wellen durch das Medium entlang einer zu der ersten Ausbreitungsrichtung vorzugsweise verschiedenen, z.B. entgegengesetzten zweiten Ausbreitungsrichtung ausbreiten und
- für eine empfangene erste akustische Welle nach ihrer Ausbreitung durch das Medium entlang der ersten Ausbreitungsrichtung ein erstes Empfangssignal und für eine empfangene zweite akustische Welle nach ihrer Ausbreitung durch das Medium entlang der zweiten Ausbrei-

tungsrichtung ein zweites Empfangssignal erzeugt wird.

**[0013]** Erfindungsgemäß ist nun vorgesehen, dass zur Ermittlung einer Laufzeitdifferenz der akustischen Wellen und/oder einer absoluten Laufzeit einer akustischen Welle von einem Sender zu einem Empfänger insgesamt wenigstens vier Empfangssignale - zwei erste und zwei zweite Empfangssignale - genutzt werden, die auf wenigstens zwei unterschiedliche Sendesignale zurückgehen. Diese Sendesignale weisen eine im Wesentlichen gleiche Grundfrequenz und einen vorgegebenen Phasenversatz zueinander auf. Unter Verwendung des gleichen - in einer Variante auch desselben - Sendesignals wird somit jeweils eine erste und eine zweite akustische Welle in jeder Ausbreitungsrichtung erzeugt, so dass für jede Ausbreitungsrichtung zwei Empfangssignale vorliegen.

**[0014]** So wird z. B. ein Sendesignal dazu genutzt, gleichzeitig oder nacheinander zwei sich in dem Medium entlang der ersten und zweiten Ausbreitungsrichtung ausbreitende akustische Wellen zu erzeugen, wobei für eine sich entlang der ersten Ausbreitungsrichtung - z.B. stromab einer Strömungsrichtung eines strömenden Mediums - ausbreitende akustische Welle ein erstes Empfangssignal und für eine sich entlang der zweiten Ausbreitungsrichtung - stromauf - ausbreitende akustische Welle ein zweites Empfangssignal erzeugt wird. Ein anderes, phasenverschobenes Sendesignal gleicher Grundfrequenz wird dann erfindungsgemäß dazu benutzt, zwei weitere sich in dem Medium entlang der ersten und zweiten Ausbreitungsrichtung ausbreitende akustische Wellen zu erzeugen, wobei hierbei ebenfalls für eine sich entlang der ersten Ausbreitungsrichtung - stromab - ausbreitende akustische Welle ein weiteres, hiervon abweichendes erstes Empfangssignal und für eine sich entlang der zweiten Ausbreitungsrichtung - stromauf - ausbreitende akustische Welle ein weiteres, hiervon abweichendes zweites Empfangssignal erzeugt wird.

**[0015]** Ein Sendesignal kann hierbei zur Erzeugung der beiden akustischen Wellen von unterschiedlichen, räumlich zueinander beabstandeten Sendern gesendet werden. Alternativ ist grundsätzlich auch denkbar, dass ein einziger zwischen zwei Empfängern sitzender Sender zunächst mit einem Sendesignal oder mit zwei identischen Sendesignalen zwei akustische Wellen in Richtung der zwei Empfänger auslöst und anschließend mit einem zu dem zuvor gesendeten Sendesignal phasenverschobenen Sendesignal gleicher Grundfrequenz oder zwei zu dem zuvor gesendeten Sendesignal phasenverschobenen Sendesignale zwei weitere akustische Wellen in Richtung der Empfänger auslöst. Wesentlich ist lediglich, dass in jeder Ausbreitungsrichtung ein Paar Empfangssignale erzeugt werden, die auf zwei

unterschiedliche, zueinander phasenverschobene Sendesignale gleicher Grundfrequenz zurückgehen.

**[0016]** Hierbei werden unter Sendesignalen im Wesentlichen gleicher Grundfrequenz solche Sendesignale verstanden, die hinsichtlich ihrer Grundfrequenz maximal 1/1000 in Bezug auf eine Mittenfrequenz voneinander abweichen.

**[0017]** Grundgedanke der vorliegenden Erfindung ist dabei, aus den insgesamt vier Empfangssignalen, die auf zwei unterschiedliche Sendesignale gleicher Grundfrequenz und vorgegebenem Phasenversatz zueinander zurückgehen, durch geringen Hardware-Einsatz bei der Signalverarbeitung schnell und mit vergleichsweise geringer Messunsicherheit eine Laufzeitdifferenz und/oder eine absolute Laufzeit zu ermitteln und hierauf physikalische und/oder chemische Eigenschaften des Mediums zu bestimmen. Dabei werden zwei der Empfangssignale durch erste und zweite akustischen Wellen erzeugt, die auf ein erstes Sendesignal der wenigstens zwei Sendesignale zurückgehen, und zwei der Empfangssignale werden durch erste und zweite akustischen Wellen erzeugt, die auf ein zweites Sendesignal der wenigstens zwei Sendesignale zurückgehen. So ist bei der vorliegenden Erfindung durch die erfindungsgemäße Verwendung zweier unterschiedlicher Sendesignale keine aufwändige Differenzsignalerzeugung oder Synchronisierung der Sendesignale notwendig. Auch muss keine aufwändige digitale Signalverarbeitung vorgesehen werden, da insbesondere für eine etwaige Digitalisierung von Empfangssignalen oder eine etwaige Digitalisierung sich hieraus ergebender Signale auf die sonst regelmäßig vorteilhafte Fourier-Transformation verzichtet werden kann.

**[0018]** Vorzugsweise gehen vorliegend die vier analogen oder digitalisierten Empfangssignale unmittelbar in eine Berechnung ein, d.h. insbesondere, als Parameter in eine durch eine Signalverarbeitungseinrichtung umgesetzte Berechnungsgleichung, um eine Laufzeitdifferenz und/oder eine absolute Laufzeit zu berechnen. Es wird folglich z. B. keine einfache Mittelung von aus bereits mit einem Empfangssignalaar berechneten Laufzeitdifferenzen durchgeführt. In einer jeweils bevorzugten Ausführungsvariante geht vielmehr jedes der Empfangssignale unmittelbar in eine Berechnungsvorschrift für eine Laufzeitdifferenz und/oder Berechnungsvorschrift für eine absolute Laufzeit ein, so dass erst mit Vorliegen aller vier Empfangssignale eine Berechnung stattfinden kann.

**[0019]** Beispielsweise ist für die Berechnung einer Laufzeitdifferenz vorgesehen, dass Empfangssignale für empfangene akustische Wellen, die von unterschiedlichen Sendesignalen erzeugt wurden,

miteinander - vorzugsweise kreuzweise - multipliziert werden.

**[0020]** Hier kann beispielsweise, je nach Ausgestaltung einer verwendeten Signalverarbeitungseinrichtung, eine Multiplikation analoger Empfangssignale vorgesehen sein, mit anschließender Berechnung einer Laufzeitdifferenz aus digitalisierten, d. h., sich durch Abtastung (englisch: sampling) ergebenden, Signalen. Eine alternative Variante wäre demgegenüber für eine Berechnung einer Laufzeitdifferenz erst eine Multiplikation bereits digitalisierter Empfangssignale vorzusehen.

**[0021]** Unabhängig hiervon wird für die Ermittlung einer Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  aus Empfangssignalen

$y_0^r(t)$ ,  $y_1^r(t)$ ;  $y_0^s(t)$  und  $y_1^s(t)$  eine Formel der folgenden Form genutzt:

$$\frac{Z(t)}{N(t)} = \frac{\left\{ y_0^s(t) \cdot y_1^r(t) - y_0^r(t) \cdot y_1^s(t) \right\}}{\left\{ y_0^r(t) \cdot y_0^s(t) + y_1^r(t) \cdot y_1^s(t) \right\}}$$

[Gleichung 1]

**[0022]** In der Gleichung 1 stellen die mit einem Index „0“ versehenen Variablen diejenigen Signale dar, die auf ein erstes Sendesignal  $x_0$  zurückgehen, wohingegen die mit einem Index „1“ gekennzeichneten Signale auf ein zweites hierzu phasenverschobenes Sendesignal  $x_1$  gleicher Grundfrequenz zurückgehen. Ein hochgestelltes „r“ kennzeichnet weiterhin diejenigen Signale, die auf in einer ersten Ausbreitungsrichtung, z. B. stromab eines strömenden Mediums, empfangenen ersten akustischen Wellen zurückgehen. Die mit einem hochgestellten „s“ gekennzeichneten Signale wiederum gehen auf in einer zweiten, vorzugsweise entgegengesetzten Ausbreitungsrichtung, z. B. stromauf, empfangene zweite akustische Welle zurück.

**[0023]** Mit den Werten für einen Zähler  $Z(t)$  und einen Nenner  $N(t)$  wird dann eine Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  in einer bevorzugten Ausführungsvariante nach folgender Formel unmittelbar ermittelt:

$$\Delta t = \frac{\arctan \left\{ \frac{Z(t)}{N(t)} \right\}}{4\pi f} \quad [\text{Gleichung 2}]$$

**[0024]** Hierin stellt  $f$  eine Grundfrequenz für beide Sendesignale dar.

**[0025]** Diese Grundfrequenz  $f$  kann bei voneinander geringfügig abweichenden Grundfrequenzen  $f_0$  und  $f_1$  der unterschiedlichen Sendesignale  $x_0$ ,  $x_1$  zum Beispiel auch aus dem arithmetischen Mittel der beiden Grundfrequenzen  $f_0$  und  $f_1$  bestimmt sein:

$$f = \frac{f_0 + f_1}{2} \quad [\text{Gleichung 2.1}]$$

**[0026]** Die einzelnen Empfangssignale

$y_0^r(t)$ ,  $y_1^r(t)$ ;  $y_0^s(t)$ ,  $y_1^s(t)$  müssen somit nicht durch aufwändige Nachverarbeitung in ein analytisches Signal umgesetzt werden, sondern es werden bereits auf der Senderseite bzw. auch als Referenz mindestens zwei verschiedene Signale  $x_0(t)$  und  $x_1(t)$  mit gleicher Grundfrequenz  $f$  und vorgegebenem Phasenversatz, vorzugsweise von  $90^\circ$ , vorgesehen.

**[0027]** Dabei weisen die verwendeten Sendesignale bevorzugt folgende Form auf:

$$\begin{aligned} x_0(t) &= -w(t) \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi) \\ x_1(t) &= w(t) \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \varphi) \end{aligned} \quad [\text{Gleichungen 3}]$$

**[0028]** Worin  $\varphi$  einen frei wählbaren Startwinkel bezeichnet und  $w(t)$  eine Fensterfunktion darstellt, die die vorzugsweise  $90^\circ$  phasenverschobenen Trägersignale der Sendesignale  $x_0$  und  $x_1$  ein- und nach einer bestimmten Dauer wieder ausblendet. Eine solche Fensterfunktion kann beispielsweise auch eine kodierende Modulationsfolge umfassen. Ein auf die Gesamtdauer eines als Sende-Burst gebildeten Sendesignals bezogener besonders großer Bereich für die Auswertung der zu berechnenden Phasen- bzw. Laufzeitdifferenz ergibt sich hier bei der Wahl eines Blackman-Nuttall-Fensters.

**[0029]** Ein Sendesignal  $x_0$ ,  $x_1$  umfasst somit vorzugsweise jeweils einen Schwingungsimpuls bzw. Pulsburst, wobei die Hüllkurven zu den einzelnen Schwingungspulsen der zueinander phasenverschobenen Sendesignale im Wesentlichen zueinander identisch sind. So lassen sich die aus den Sendesignalen gewonnenen Empfangssignale für die sich durch das Medium zumindest teilweise ausgebreiteten akustischen Wellen besonders einfach auf einer gemeinsamen - auch definiert verschobenen - Zeitbasis direkt zu Amplituden- und Phasensignale sowie Laufzeiten und Laufzeitdifferenzen umrechnen, ohne zusätzliche Referenzen wie z. B. bei einer IQ-Modulation erforderlich und ohne Divisionen durch Werte nahe 0, wie nachfolgend noch näher gezeigt werden wird.

**[0030]** Die Ermittlung einer Phasen- bzw. Laufzeitdifferenz für die unterschiedlichen ersten und zweiten akustischen Wellen basieren bei einer Bestimmung einer (mittleren) Strömungsgeschwindigkeit  $v_m$  eines strömenden Mediums auf den unterschiedlichen richtungsabhängigen Laufzeiten in dem Medium.

**[0031]** Hierbei wird ausgenutzt, dass in unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen, z. B. stromab und damit in Strömungsrichtung einerseits und stromauf

und damit entgegen der Strömungsrichtung andererseits, unterschiedliche, von der Strömungsgeschwindigkeit abhängige Schallgeschwindigkeiten auftreten. So ist eine Schallgeschwindigkeit in Strömungsrichtung  $c^r = c_0 + v_m$  und eine Schallgeschwindigkeit entgegen der Strömungsrichtung  $c^s = c_0 - v_m$ , worin  $c_0$  jeweils die Schallgeschwindigkeit in dem ruhenden Medium ist.

**[0032]** Sind nun Sender und Empfänger absolut eine Strecke  $l_0$  und in der Projektion auf die Strömungsrichtung des Mediums eine Strecke  $l$  voneinander entfernt, kommt es entlang dieser Strecke für die einzelnen akustischen Wellen zu den korrespondierenden Schallaufzeiten

$$t^r = t_0 - \Delta t = \frac{l_0 c_0}{(c_0^2 - v_m^2)} - \frac{l v_m}{(c_0^2 - v_m^2)} \quad [\text{Gleichung 4.1}]$$

in Strömungsrichtung bzw.

$$t^s = t_0 + \Delta t = \frac{l_0 c_0}{(c_0^2 - v_m^2)} + \frac{l v_m}{(c_0^2 - v_m^2)} \quad [\text{Gleichung 4.2}]$$

entgegen der Strömungsrichtung.

**[0033]** Für eine Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  der ersten und zweiten akustischen Wellen ergibt sich demnach

$$2 \Delta t = t^s - t^r = \frac{2l v_m}{(c_0^2 - v_m^2)} \approx 2v_m \frac{l}{c_0^2} \quad [\text{Gleichung 5}]$$

**[0034]** Die Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  ist somit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $v_m$  nahezu proportional.

**[0035]** Der entsprechende Proportionalitätsfaktor  $l/(c_0)^2$  lässt sich beispielsweise durch die (einmalige) Ermittlung einer absoluten Laufzeit einer akustischen Welle von einem Sender zu einem Empfänger vorgeben. Hierfür kann ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Ermittlung einer absoluten Laufzeit eingesetzt sein. Bei bekanntem Abstand zwischen Sender und Empfänger einer bestimmten Sender-Empfänger-Anordnung und bekannter Schallgeschwindigkeit in einem bestimmten Medium, dessen Strömungsgeschwindigkeit gemessen und/oder überwacht werden soll, kann der Proportionalitätsfaktor auch fest in der Signalverarbeitungseinrichtung eingestellt sein.

**[0036]** Mittels der zwei phasenverschobenen Sendesignal  $x_0$ ,  $x_1$  werden somit die Empfangssignale

$$y_0^s(t) = x_0(t - (t_0 + \Delta t)), y_1^s(t) = x_1(t - (t_0 + \Delta t))$$

$$y_0^r(t) = x_0(t - (t_0 - \Delta t)), y_1^r(t) = x_1(t - (t_0 - \Delta t))$$

[Gleichungen 6]

erzeugt.

**[0037]** Ein gleichzeitiges Senden aller vier Sendesignale, d. h., ein Senden eines Sendesignals  $x_0$  in Strömungsrichtung und entgegen der Strömungsrichtung sowie ein Senden eines Sendesignals  $x_1$  in Strömungsrichtung und entgegen der Strömungsrichtung, wird hierbei als vorteilhaft erachtet, um beispielsweise die analogen Empfangssignale

$y_0^r(t), y_1^r(t); y_0^s(t), y_1^s(t)$  entsprechend der Gleichung 1 kreuzweise miteinander zu multiplizieren und anschließend eine Abtastung mit kleiner Sampling-Rate zur Digitalisierung der sich hierdurch ergebenden Werte  $Z(t)$  und  $N(t)$  vorzunehmen.

**[0038]** Alternativ können die einzelnen Sendesignale auch nacheinander gesendet und damit akustische Wellen nacheinander erzeugt werden. Die einzelnen Sendesignale werden somit also sequenziell durch den oder die jeweiligen Sender erzeugt und auch die Empfangssignale sequenziell an dem Empfänger oder an den Empfängern erzeugt. Dabei wird vorzugsweise mit einer hohen Sampling-Rate gearbeitet.

**[0039]** Mit vier voneinander unterscheidbaren Empfangssignalen, die auf zwei zueinander phasenverschobene Sendesignale zurückgehen, ist wie eingangs bereits erläutert, nicht nur eine Ermittlung einer Laufzeitdifferenz, sondern auch die Ermittlung einer absoluten Laufzeit möglich. Hierbei wäre es im Übrigen auch nicht zwingend, dass sich die akustischen Wellen durch das Medium entlang wenigstens zwei zueinander unterschiedlicher erster und zweite Ausbreitungsrichtungen ausbreiten. Auch bei identischen Ausbreitungsrichtungen wäre auf Basis der erfindungsgemäßen Lösung eine absolute Laufzeit mittels vier voneinander unterscheidbarer Empfangssignale bestimmbar.

**[0040]** Hierbei wird vorzugsweise mit einem geschätzten Startwert und einem aus den vier Empfangssignalen berechneten Differenzwert gearbeitet. Dabei wird ein präzise aus den vier Empfangssignalen berechneter Differenzwert zu dem (grob) geschätzten Startwert hinzu addiert. Wichtig ist hierbei, die Definition eines robusten Laufzeitkriteriums, beispielsweise der Lage des Kreuzkorrelationsmaximums im Verschiebezeitbereich. Insgesamt ist angestrebt, dass die Messunsicherheit bei dem geschätzten Startwert für die Laufzeit kleiner ist als eine halbe Periodendauer  $1/f$  des verwendeten Trägersignals für die Sendesignale (z. B.  $x_0$  und  $x_1$  entsprechend obiger Gleichungen 3).

**[0041]** Dabei wird generell eine allgemeine Berechnung für eine absolute Laufzeit  $t_0$  aus einem Startwert  $\hat{t}_0$  und einem Differenzwert  $\Delta t'$  derart vorausgesetzt, dass gilt:

$$t_0 = \hat{t}_0 - \Delta t' = \hat{t}_0 - \frac{\Delta \varphi'}{2\pi f} \quad \text{[Gleichung 7]}$$

**[0042]** Es hat sich hierbei beispielsweise als vorteilhaft herausgestellt, wenn zur Berechnung des Differenzwerts  $\Delta t'$  wenigstens einer der folgenden Terme genutzt wird:

$$\alpha = \text{atan2}(y_1^r(t + \hat{t}_0), y_0^r(t + \hat{t}_0)) - 2\pi \hat{f} \cdot (t + t_k)$$

$$\beta = \text{atan2}(y_1^s(t + \hat{t}_0), y_0^s(t + \hat{t}_0)) - 2\pi \hat{f} \cdot (t + t_k)$$

[Gleichungen 8]

**[0043]** Hierin sind  $\hat{f}$  ein geschätzter Wert für die Mittelfrequenz der Empfangssignale  $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$  und  $t_k$  eine vorgegebene Zeitkonstante mit  $t_k \geq 0$ .

**[0044]** Die Funktion „atan2“ stellt dabei in der Programmierung weithin bekannte und mit geringerem Rechneraufwand zu bestimmende Arkustangens-Funktion dar, die sich beispielsweise über die folgende Eigenschaft definieren lässt:

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & x < 0, y \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & x < 0, y < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & x = 0, y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & x = 0, y < 0 \\ NaN & x = y = 0 \end{cases}$$

[Gleichungen 9]

**[0045]** Eine Differenzwert  $\Delta t'$  und damit eine absolute Laufzeit  $t_0$  lassen sich dann beispielsweise entsprechend der obigen Gleichungen 7 und 8 aus dem folgenden Formel-Zusammenhang rechnerisch vergleichsweise einfach durch eine Signalverarbeitungseinrichtung ohne Fourier-Transformierte bestimmen:

$$\Delta \varphi' = \frac{1}{2}(\alpha \bmod 2\pi + \beta \bmod 2\pi) - \pi \quad \text{[Gleichung 10]}$$

**[0046]** Eine alternative Möglichkeit stellt eine Formel der folgenden Art dar:

$$\Delta \varphi' = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\text{atan2}(-\sin\alpha, 1 - \cos\alpha) - \text{atan2}(\sin\alpha, 1 - \cos\alpha) \\ &+ \text{atan2}(-\sin\beta, 1 - \cos\beta) - \text{atan2}(\sin\beta, 1 - \cos\beta) \end{aligned} \right\}$$

[Gleichung 11]

**[0047]** Eine weitere alternative stellt eine Berechnung nach folgender Methode dar:

$$\Delta\varphi' = \gamma \cdot \pi - \arctan\left(\cot\frac{\alpha}{2}\right) - \arctan\left(\cot\frac{\beta}{2}\right)$$

mit  $\gamma = 0,5 \cdot \text{sign}(\sin\alpha) \cdot (\text{sign}(1 - \cos\alpha) + \text{sign}(1 - \cos\beta) - 2)$

[Gleichungen 12]

**[0048]** Darüber hinaus hat sich auch eine Berechnungsvorschrift der folgenden Form als vorteilhaft herausgestellt:

$$\Delta\varphi' = \frac{1}{2}(\alpha' \bmod 2\pi + (\beta' \bmod 2\pi) - \pi)$$

[Gleichung 13.1]

mit

$$\alpha' = \text{atan2}\left(y_0^r(t + \hat{t}_0), -y_1^r(t + \hat{t}_0)\right) - 2\pi\hat{f} \cdot (t + t_k) - \frac{\pi}{2}$$

$$\beta' = \text{atan2}\left(y_0^s(t + \hat{t}_0), -y_1^s(t + \hat{t}_0)\right) - 2\pi\hat{f} \cdot (t + t_k) - \frac{\pi}{2}$$

[Gleichungen 13.2]

**[0049]** Ein Fehler beim Schätzen der Mittenfrequenz  $\hat{f}$  lässt sich dadurch korrigieren, dass die Laufzeiten der betrachteten Signalgruppen durch eine Gerade approximiert werden. Der Funktionswert dieser Geraden bei dem geschätzten Startwert  $\hat{t}_0$  ist dann die beste Approximation für die absolute Laufzeit  $t_0$ , und zwar weitestgehend unabhängig von der zur Rechnung angesetzten Mittenfrequenz  $\hat{f}$ .

**[0050]** Eine Justage (auch Nullpunktkalibrierung) kann beispielsweise durch Einstellen des Startwinkels  $\varphi$  der Sendesignale  $x_0$  und  $x_1$  oder Addition der Zeitkonstante  $t_k$  zum zeitproportionalen Ausgleichsterm erfolgen.

**[0051]** Eine Abschätzung für den Startwert  $t_0$  bei der Berechnung der absoluten Laufzeit  $t_0$  kann ebenfalls anhand der beim Empfang der akustischen Wellen erzeugten vier Empfangssignale

$y_0^r(t), y_1^r(t); y_0^s(t), y_1^s(t)$  erfolgen. Hierbei beispielsweise ein Startwert für die Laufzeitberechnung mittels wenigstens einer Signaleinhüllenden  $y_{\text{huel}}$  vorgegeben sein, die durch die nachfolgende Formel gegeben ist:

$$y_{\text{huel}} = \sqrt{y_0^2 + y_1^2} \quad [\text{Gleichung 14.1}]$$

beziehungsweise genauer

$$y_{\text{huel}}^r = \sqrt{(y_0^r)^2 + (y_1^r)^2} \quad \text{oder} \quad y_{\text{huel}}^s = \sqrt{(y_0^s)^2 + (y_1^s)^2}$$

[Gleichungen 14.2]

**[0052]** Folglich kann beispielsweise durch die Signaleinhüllende zunächst ein Startwert  $\hat{t}_0$  geschätzt und anschließend über einen (nachfolgend berechneten) Differenzwert  $\Delta t'$  eine absolute Laufzeit  $t_0$  ermittelt werden. Mit der absoluten Laufzeit  $t_0$  kann zum Beispiel der Proportionalitätsfaktor  $1/(c_0)^2$  berechnet und nach einer Ermittlung einer Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  eine Strömungsgeschwindigkeit des strömenden Mediums bestimmt werden.

**[0053]** In einer Ausführungsvariante kann zudem vorgesehen sein, dass bei einer Ermittlung von mehreren Werten für Laufzeitdifferenzen und/oder für absolute Laufzeiten einer Mehrzahl von akustischen Wellen eine Mittelung und/oder Aufintegration der ermittelten Laufzeitdifferenzen und/oder Laufzeiten durchgeführt wird, um etwaige Messunsicherheiten zu minimieren.

**[0054]** In an sich bekannter Weise ist es selbstverständlich möglich, mittels ermittelter Laufzeitdifferenz und/oder mittels ermittelter absoluter Laufzeit der ersten und zweiten erzeugten akustischen Wellen eine Schallgeschwindigkeit, eine Konzentration, eine Dichte und/oder eine Temperatur des jeweiligen Mediums ebenso zu bestimmen, wie einen Füllstand des Mediums in einem Innenraum, eine Dicke einer an das Medium angrenzenden Wandung und/oder einen Abstand zweier an das Medium angrenzender Wandungsabschnitte, wie dies z. B. auch in der WO 2008/ 034 878 A2 im Zusammenhang mit akustischen Oberflächenwellen erläutert ist.

**[0055]** Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung ist die Bereitstellung einer Vorrichtung gemäß dem Anspruch 20, die insbesondere zur Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens ausgebildet und vorgesehen ist.

**[0056]** Eine derartige Vorrichtung zur Bestimmung von physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften eines Mediums weist wenigstens das Folgende auf:

- einen akustischen Wellenleiter, der einen mit dem Medium zu füllenden Innenraum aufweist,
- wenigstens zwei Sender, die jeweils zur Erzeugung akustischer Wellen in dem Wellenleiter durch ein Sendesignal des Senders ausgebildet und vorgesehen sind, so dass sich eine erzeugte akustische Welle entlang des Wellenleiters und zumindest teilweise durch das Medium ausbreitet,
- wenigstens zwei Empfänger, die räumlich zueinander entlang des Wellenleiters beabstandet und jeweils zur Erzeugung eines ersten oder zweiten Empfangssignals für den jeweiligen Empfänger erreichender erster oder zweiter akustischer Wellen ausgebildet und vorgesehen sind, wobei sich eine erste akustische Welle



jeweils entlang einer ersten Ausbreitungsrichtung ausbreitet und hierfür an einem Empfänger ein erstes Empfangssignal erzeugt wird und sich eine zweite akustische Welle jeweils entlang einer zu der ersten Ausbreitungsrichtung identischen oder unterschiedlichen zweiten Ausbreitungsrichtung ausbreitet und hierfür an einem Empfänger ein zweites Empfangssignal erzeugt wird, und

- eine Signalverarbeitungseinrichtung, mittels der aus den Empfangssignalen,

- wenn die zweite Ausbreitungsrichtung zu der ersten Ausbreitungsrichtung unterschiedlich ist, eine Laufzeitdifferenz zwischen empfangenen ersten und zweiten akustischen Wellen und/oder,

- wenn die zweite Ausbreitungsrichtung zu der ersten Ausbreitungsrichtung unterschiedlich oder identisch ist, eine absolute Laufzeit einer akustischen Welle von einem Sender zu einem Empfänger

ermittelt wird und die dazu ausgebildet und vorgesehen ist, mit einer ermittelten Laufzeitdifferenz und/oder einer ermittelten absoluten Laufzeit physikalische und/oder chemische Eigenschaften des Mediums zu bestimmen,

**[0057]** In Analogie zu den erfindungsgemäßen Verfahren sind hierbei die Sender der Vorrichtung ferner dazu ausgebildet und vorgesehen, mit zwei unterschiedlichen Sendesignalen gleicher Grundfrequenz und vorgegebenem Phasenversatz zueinander jeweils erste und zweite akustische Wellen zu erzeugen, so dass in der ersten Ausbreitungsrichtung zwei voneinander unterscheidbare erste und in der zweiten Ausbreitungsrichtung zwei voneinander unterscheidbare zweite Empfangssignale von den Empfängern der Vorrichtung erzeugt werden. Die Signalverarbeitungseinrichtung ist dann dazu ausgebildet und vorgesehen, eine Laufzeitdifferenz und/oder eine absolute Laufzeit durch die vier erzeugten Empfangssignale zu ermitteln, von denen zwei Empfangssignale durch erste und zweite akustischen Wellen erzeugt werden, die auf ein erstes Sendesignal der wenigstens zwei Sendesignale zurückgehen, und von denen zwei Empfangssignale durch erste und zweite akustischen Wellen erzeugt werden, die auf ein zweites Sendesignal der wenigstens zwei Sendesignale zurückgehen, wobei vorzugsweise hierfür jeweils die vorgenannten und in die Signalverarbeitungseinrichtung hinterlegten Gleichungen genutzt werden.

**[0058]** Als besonders vorteilhaft hat sich eine Verwendung von Ultraschallwandlern als Sender bzw. Empfänger herausgestellt, die zur Erzeugung von akustischen Oberflächenwellen in einem Wellenleiter der Vorrichtung ausgebildet und vorgesehen sind. In

Analogie zu einer aus der WO 2008/ 034 878 A2 bekannten Vorrichtung zeichnet sich dann eine solche Vorrichtung unter anderem durch einen akustischen Wellenleiter aus, der wenigstens zwei sich gegenüberliegende Leitelemente umfasst, die einen mit einem Medium zu füllenden Innenraum begrenzen und die bei Befüllung des Innenraums mit einem Medium jeweils mit einer inneren Oberfläche eine Grenzfläche mit dem Medium ausbilden. An der jeweiligen inneren Oberfläche wird dann zumindest ein Teil der durch einen Sender erzeugten akustischen Oberflächenwelle in Volumenschallwellen des Mediums umgewandelt und zumindest ein Teil der Volumenschallwellen wird wiederum in akustische Oberflächenwellen des Wellenleiters umgewandelt, die dann an dem jeweiligen Empfänger empfangen werden können.

**[0059]** Gerade bei einer derartigen Vorrichtung lässt sich ein erfindungsgemäßes Verfahren besonders effizient umsetzen, da hier die unterscheidbaren vier Empfangssignale für einen vergleichsweise sehr kleinen Bilanzraum entstehen und bei deutlich verringertem Aufwand für die Signalverarbeitung ausgezeichnete Ergebnisse erzielt werden, die, wie durch entsprechende Simulationen und Experimente bestätigt werden konnte, eine äußerst geringe Messunsicherheit aufweisen. So ist bei deutlich reduziertem Rechenaufwand unter Umständen sogar eine höhere Messgenauigkeit bei der Bestimmung einer Strömungsgeschwindigkeit eines strömenden Mediums zu erzielen.

**[0060]** In einer möglichen Ausführungsvariante einer erfindungsgemäßen Vorrichtung weist die Signalverarbeitungseinrichtung Mittel zur Multiplikation analoger Empfangssignale und Mittel zur anschließenden Berechnung einer Laufzeitdifferenz aus digitalisierten, d.h. sich durch Abtastung (englisch: „sampling“) ergebenden Signalen auf. Die Mittel zur Multiplikation der analogen Empfangssignale umfassen dabei beispielsweise Multiplizierer, Summierer und/oder Invertierer. Zur Digitalisierung wird beispielsweise wenigstens ein Analog-Digital-Wandler der Vorrichtung verwendet.

**[0061]** Alternativ kann die Signalverarbeitungseinrichtung Mittel zur Digitalisierung der Empfangssignale und Mittel zur anschließenden Multiplikation digitalisierter Empfangssignale für die Berechnung einer Laufzeitdifferenz aufweisen. Eine Ausführungsvariante sieht hierbei beispielhaft vor, dass die Empfangssignale einem Analog-Digital-Wandler über einen Multiplexer zugeführt werden und erst die digitalisierten, aus dem Analog-Digital-Wandler kommenden Signale entsprechend z.B. den obigen Gleichungen weiterverarbeitet werden, um hieraus eine Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  und/oder eine absolute Laufzeit  $t_0$  zu berechnen.

**[0062]** Ferner kann grundsätzlich vorgesehen sein, dass die Grundfrequenz der beiden unterschiedlichen, zueinander phasenverschobene Sendesignale ebenso wie deren Phasenversatz variabel und somit einstellbar ist. Entsprechend der obigen Gleichung 3 wird es bevorzugt, wenn der Phasenversatz der beiden Sendesignale ( $x_0$ ,  $x_1$ ) zwischen  $45^\circ$  und  $135^\circ$  liegt und zum Beispiel im Wesentlichen  $90^\circ$  bzw.  $\pi/2$  beträgt.

**[0063]** Für die Erzeugung der vier akustischen Wellen durch die beiden unterschiedlichen Sendesignale und den Empfang der zugehörigen vier Empfangssignale können selbstverständlich einzelne Sender bzw. Empfänger in der Messvorrichtung vorgesehen werden. Es wird jedoch bevorzugt, wenn die Vorrichtung mindestens eine Sender-Empfängereinheit aufweist, die wahlweise als Sender oder als Empfänger betreibbar ist, so dass über eine Sender-Empfängereinheit in einem Sendermodus sowohl ein Sendesignal für eine akustische Welle in die eine Ausbreitungsrichtung erzeugt werden kann, als auch hierüber in einem Empfängermodus eine akustische Welle, die sich in die andere Ausbreitungsrichtung zu der Sender-Empfängereinheit hin ausgebreitet hat, empfangen und ein korrespondierendes Empfangssignal erzeugt werden kann.

**[0064]** In einer möglichen Weiterbildung handelt es sich bei einer Sender-Empfängereinheit um einen Ultraschallwandler, der vorzugsweise auch für ein Puls-Echo-Verfahren geeignet ist, um Sendesignale zu erzeugen und akustische Wellen zu empfangen, auf Basis derer der Ultraschallwandler Empfangssignale generiert.

**[0065]** Weitere mögliche Varianten der vorliegenden Erfindung sind auch durch die Unteransprüche gegeben.

**[0066]** Darüber hinaus werden weitere Vorteile und Merkmale der vorliegenden Erfindung bei der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Figuren deutlich werden.

**[0067]** Hierbei zeigen:

**Fig. 1A** schematisch eine Ausführungsvariante einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, die zur Durchführung der erfindungsgemäßen Verfahren und insbesondere zur Bestimmung einer Strömungsgeschwindigkeit eines strömenden Mediums ausgebildet und vorgesehen ist;

**Fig. 1B** schematisch eine Signalverarbeitungseinrichtung der Vorrichtung der **Fig. 1A**, mittels der analoge Empfangssignale insbesondere miteinander multipliziert und summiert werden, bevor sie digitalisiert und weiterverarbeitet werden, um eine Laufzeitdifferenz zu berechnen;

**Fig. 2A** ein Diagramm, das den normierten Amplitudenverlauf der Empfangssignale bei einer Vorrichtung gemäß den **Fig. 1A** und **Fig. 1B** zeigt, wenn von dieser Sendesignale entsprechend der oben angegebenen Gleichung 3 zur Erzeugung von akustischen Wellen genutzt werden;

**Fig. 2B** ein Diagramm, das den Verlauf aus den Empfangssignalen der **Fig. 2A** entsprechend obiger Gleichung 1 gewonnener Signale  $Z(t)$  und  $N(t)$  zeigt;

**Fig. 2C** übereinandergelegte Laufzeitdifferenzen aus den Signalen der **Fig. 2A** und **Fig. 2B** bei 1000 simulierten, verschieden verrauschten und verrückten Signalverläufen, wobei die tatsächliche Laufzeitdifferenz 10ns betrug;

**Fig. 3** schematisch eine weitere Ausführungsvariante einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, bei der eine Signalverarbeitungseinrichtung einen Demultiplexer und einen Multiplexer sowie einen Analog-Digital-Wandler aufweist, um erzeugte Empfangssignale vor ihrer Weiterverarbeitung und insbesondere ihrer Multiplikation und Addition zu digitalisieren;

**Fig. 4** eine aus dem Stand der Technik bekannte Vorrichtung zur Bestimmung einer Strömungsgeschwindigkeit eines strömenden Mediums mittels akustischer Oberflächenwellen.

**[0068]** In der geschnittenen Ansicht der **Fig. 4** ist teilweise eine an sich bereits bekannte (Mess-)Vorrichtung gezeigt, die zur Bestimmung physikalischer und/oder chemischer Eigenschaften eines Mediums M, insbesondere zur Bestimmung bzw. Messung einer Strömungsgeschwindigkeit des strömenden Mediums M ausgebildet und vorgesehen ist. Ein akustischer Wellenleiter mit zwei Substraten 1, 2 als Leitelementen des Wellenleiters ist Teil der Messvorrichtung ist, wobei das Medium M durch den Wellenleiter strömt. Die Substrate 1, 2, die einander gegenüberliegen und deren aufeinander zuweisende (innere) Oberflächen 11, 21 parallel zueinander entlang einer Haupterstreckungsrichtung des Wellenleiters verlaufen, sind aus einem nicht piezoelektrischen Material hergestellt.

**[0069]** Diese Substrate 1, 2 liegen sich in einem Abstand a gegenüber und sind vorliegend durch zwei sich in diesem Abstand a gegenüberliegende Platten oder sich gegenüberliegenden Wandausschnitten eines Rohres berandet, die einen (kanalförmigen) Innenraum 3 des Wellenleiters bilden. In dem Innenraum 3 ist das zu vermessende Medium M, das durch wellenförmige Linien schematisch dargestellt ist, eingefüllt ist, wobei das Medium M durch den Innenraum 3 hindurchströmen kann. Die Strömungsrichtung des flüssigen, beziehungsweise fließfähigen Mediums M durch den Innenraum 3 ist

grundsätzlich beliebig. Vorliegend erfolgt eine Durchströmung von einer Einlassöffnung zu einer Auslassöffnung entlang der Haupterstreckungsrichtung des Wellenleiters und parallel zu den inneren Oberflächen 11, 21. Die Strömungsrichtung ist in der **Fig. 4** durch Pfeile an der Auslass- beziehungsweise Einlassöffnung angezeigt.

**[0070]** Den beiden (ersten und zweiten) Substraten 1 und 2 des Wellenleiters der Vorrichtung ist eine (erste) Sender-Empfängereinheit SE1 oder eine (zweite) Sender-Empfängereinheit SE2 zugeordnet. Dabei ist jede Sender-Empfängereinheit SE1, SE2 in wenigstens zwei unterschiedlichen Betriebsmodi einerseits als Sender und andererseits als Empfänger betreibbar, um akustische Wellen anzuregen bzw. zu empfangen. Somit kann beispielsweise die erste Sender-Empfängereinheit SE1 des zweiten Substrats 2 (zunächst) als Sender betrieben, während die zweite Sender-Empfängereinheit SE2 des ersten Substrats 1 als Empfänger betrieben wird.

**[0071]** Die Sender-Empfängereinheiten SE1, SE2 sind jeweils an einer äußeren Oberfläche 22 bzw. 12 des jeweiligen Substrats 2 oder 1 angeordnet, die einer jeweils dem Innenraum 5 mit dem Medium M zugewandten, inneren Oberfläche 21 bzw. 11 gegenüberliegt. Bei den beiden Sender-Empfängereinheiten SE1, SE2 handelt sich vorzugsweise um piezoelektrische Wandler mit interdigitalen Elektroden. Vorzugsweise erfolgt die Befestigung einer Sender-Empfängereinheit SE1, SE2 an dem jeweiligen Substrat 2, 1 durch Kleben, sodass diese einfach und zügig zu montieren ist. Alternativ können auch andere Befestigungsarten vorgesehen sein.

**[0072]** Die erste Sender-Empfängereinheit SE1 der **Fig. 4** befindet sich vorliegend im Bereich eines ersten Endes des Wellenleiters, während die zweite Sender-Empfängereinheit SE2 im Bereich eines anderen, zweiten Endes des Wellenleiters angeordnet ist und sich der Wellenleiter in der dargestellten Querschnittsansicht zwischen diesen beiden Enden entlang einer Haupterstreckungsrichtung erstreckt.

**[0073]** Über eine als Sender arbeitende Sender-Empfängereinheit, z. B. SE1, werden mittels eines vorgegebenen vorzugsweise pulsartigen Sendesignals akustische Oberflächenwellen OW2 in dem Substrat 2 erzeugt. Ein Teil der Energie dieser erzeugten akustischen Oberflächenwellen OW2 wird an der Grenzfläche der inneren Oberfläche 21 als Volumenschallwelle VW1 in das Medium M eingekoppelt. Die Ausbreitung einer Volumenschallwelle VW1 und die Ausbreitungsrichtung der Volumenschallwelle VW1 sind dabei in der **Fig. 4** schematisch durch eine gestrichelte Linie und durch einen Pfeil neben dieser gestrichelten Linie dargestellt. Durch jeweils zwei gegenläufige Pfeile neben den gestrichelten Linien wird zum Ausdruck

gebracht, dass sich Volumenschallwellen entlang durch die gestrichelten Linien repräsentierten Pfadabschnitte PA1 bis PA7 in einem Betriebsmodus der Vorrichtung in die eine und in einem anderen Betriebsmodus der Vorrichtung in die andere Richtung ausbreiten.

**[0074]** Die beiden Substrate 1, 2, die die inneren Oberfläche 12, 21 bilden, bestehen vorzugsweise aus einem nicht piezoelektrischen Material und weisen eine Dicke  $d$  auf, die als der Abstand der inneren Oberflächen 11, 21 der jeweiligen zugeordneten äußeren Oberfläche 12 bzw. 22 definiert ist. Vorliegend ist die Dicke  $d$  kleiner oder gleich der Wellenlänge der jeweils erzeugten akustischen Oberflächenwellen. Hierdurch können akustische Oberflächenwellen, die sich innerhalb der Substrate 1, 2 ausbreiten, Welleneigenschaften derart aufweisen, dass sie sich sowohl entlang der inneren Oberflächen 11, 21 als auch entlang der äußeren Oberflächen 12, 22 der plattenförmigen Substrate 1, 2 ausbreiten. Es werden somit Lamb-Wellen oder Wellen im Übergangsbereich von Lamb-Wellen und Rayleigh-Wellen angeregt. In Abhängigkeit der Dicke  $d$  der Platten der Substrate 1, 2 werden dabei akustische Oberflächenwelle im Wesentlichen in Form von Lamb-Wellen ( $d$  kleiner als die Wellenlänge der akustischen Oberflächenwellen) oder in Form von Wellen aus dem Übergangsbereich zwischen Lamb-Wellen und Rayleigh-Wellen ( $d$  gleich der Wellenlänge der akustischen Oberflächenwellen) vorliegen. In jedem Fall breiten sich die akustischen Oberflächenwellen entlang beider Oberflächen 11, 12 bzw. 21, 22 der Substrate 1 und 2 aus.

**[0075]** Wie in der **Fig. 4** veranschaulicht ist, verlaufen z.B. die akustischen Oberflächenwellen OW2 damit ausgehend von der als Sender arbeitenden Sender-Empfängereinheit SE1 entlang der Erstreckungsrichtung des zweiten Substrats 2 und insbesondere entlang der inneren Oberfläche 21 dieses Substrats 2. Ein Teil der Schallwellenenergie der entlang der inneren Oberfläche 21 des Substrats 2 laufenden akustischen Oberflächenwellen OW2 wird in das innerhalb des Innenraums 3 befindliche Medium M eingekoppelt, sodass die Volumenschallwellen VW1 innerhalb des Mediums M erzeugt werden. Dabei ist eine Ausbreitungsrichtung dieser eingekoppelten Volumenschallwellen VW1 um einen charakteristischen Winkel  $\Delta$ , der nicht eingezeichnet ist, relativ zu der Normalen auf der flachen Oberfläche 21 geneigt.

**[0076]** Die Volumenschallwellen VW1 breiten sich jeweils entlang eines Pfades P1 im Medium M aus. Dieser Pfad lässt sich in verschiedene durch gestrichelte Linien dargestellte Abschnitte PA1, PA2, PA3, PA4, PA5, PA6, PA7 unterteilen. Jeder dieser Pfadabschnitte verläuft zwischen dem einen (zweiten) Substrat 2 und dem anderen (ersten) Substrat 1.

Sobald die Volumenschallwelle VW1 an einer Interaktionsstelle an der inneren Oberfläche 11 des gegenüberliegenden Substrats 1 angelangt ist, wird ein Teil ihrer Energie in das Substrat 1 eingekoppelt, sodass hierin akustische Oberflächenwellen OW1, beispielsweise in Form von Lamb-Wellen oder Oberflächenwellen im Übergangsbereich von Lamb-Wellen und Rayleigh-Wellen, erzeugt werden, die sich entlang dieses Substrats 1 ausbreiten.

**[0077]** Ferner tritt zu jedem Zeitpunkt, an dem die Volumenschallwelle VW1 an der inneren Oberfläche 11 oder 21 eines der Substrate 1, 2 angelangt, eine Wechselwirkung dieser Schallwelle mit dem entsprechenden Substrat 1, 2 auf. Hierbei tritt in der Regel ein Energieaustausch von akustischer Energie zwischen dem Substrat 1, 2, insbesondere der Oberflächenwelle OW1, OW2 des jeweiligen Substrates 1, 2 und der Volumenschallwelle VW1 auf. Die Volumenschallwelle VW1 wird zumindest zum Teil reflektiert und ändert dabei ihre Ausbreitungsrichtung. Besteht die Wechselwirkung in einer Einkopplung von Energie aus der Volumenschallwelle VW1 in die betreffende Oberflächenwelle OW1, so wird die Amplitude der Oberflächenwelle OW1 durch diese Einkopplung erhöht und die Amplitude der Volumenschallwelle VW1 nimmt ab. Es kann alternativ auch in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Substrats und des Mediums M, sowie der Welle eine Einkopplung von Energie der Oberflächenwelle OW1 in die Volumenschallwelle VW1 erfolgen.

**[0078]** Durch die Wechselwirkung der Volumenschallwelle VW1 mit den Substraten 1, 2 entlang ihres Pfades P1 sind somit mehrere Interaktionsstellen definiert. An diesen Interaktionsstellen wechselwirkt die Volumenschallwelle VW1 jeweils mit einem Substrat 1, 2 und den in dem Substrat 1, 2 auftretenden Oberflächenwellen OW1, OW2. Insgesamt breiten sich somit Volumenschallwellen VW1 umfassende (erste) Wellenzüge auf einen im Wesentlichen zickzackförmigen Ausbreitungspfad P1 im Medium zwischen der ersten Sender-Empfängereinheit SE1 und der zweiten Sender-Empfängereinheit SE2 entlang der Haupterstreckungsrichtung des Wellenleiters aus. Aufgrund der Wechselwirkung der Volumenschallwelle VW1 mit dem dem zweiten Substrat 2 gegenüberliegenden ersten Substrat 1 an dessen inneren Oberfläche 11 kommt es zur Anregung der Oberflächenwellen OW1, die sich auf dem Substrat 1 ausbreiten und schließlich an der als Empfänger arbeitenden Sender-Empfängereinheit SE2 empfangen werden können. Zwischen den Interaktionsstellen des zweiten Substrats 2, also denjenigen Stellen, an denen die Volumenschallwellen VW1 mit dem zweiten Substrat 2 wechselwirken, breiten sich die Oberflächenwellen OW1 ohne Verstärkung aus, erfahren aber an der darauffolgenden Interaktionsstelle (unter Umständen) eine weitere Verstärkung. Durch die Messung der am Empfänger

E eintreffenden Wellenzüge, insbesondere der Oberflächenwellen OW1, die durch Wechselwirkung mit der Volumenschallwelle VW1 angeregt wurde, kann die Laufzeit von Wellenzügen zwischen der ersten und zweiten Sender-Empfängereinheit SE1, SE2 ermittelt werden.

**[0079]** So kann aus akustischen Oberflächenwellen OW1 (beziehungsweise Gruppen von Oberflächenwellen OW1), die nacheinander an der als Empfänger arbeitenden Sender-Empfängereinheit SE2 eintreffen, auf die Schallgeschwindigkeit innerhalb des Mediums M rückgeschlossen werden, insbesondere wenn die Laufzeit der Wellenzüge zwischen den Sender-Empfängereinheiten SE1, SE2 bestimmt wird. Da die gemessenen Laufzeiten der über die Volumenschallwelle VW1 an den jeweiligen Interaktionsstellen eingekoppelten akustischen Oberflächenwellen OW1 von den Eigenschaften des Mediums M beeinflusst wird, können derart durch eine (hier nicht dargestellte) elektronische Auswertereinheit, an die die Signale einer Sender-Empfängereinheit SE2 weitergeleitet werden, physikalische und/oder chemische Eigenschaften des zu vermessenden Mediums M bestimmt werden. Hierbei wird jeweils aus einer an der Sender-Empfängereinheit SE2 oder SE1 empfangenen akustischen Welle, die sich als Volumenschallwelle VW1 (oder VW2) zumindest teilweise durch das Medium M von der anderen Sender-Empfängereinheit SE1, SE2 zu dieser Sender-Empfängereinheit SE2, SE1 ausgebreitet hat, ein Empfangssignale erzeugt.

**[0080]** Hierbei ist zu beachten, dass an einem Empfänger bzw. einer im Empfänger-Modus betriebenen Sender-Empfängereinheit SE2 üblicherweise ausschließlich Oberflächenwellen OW1 empfangen werden, wobei diese Oberflächenwellen OW1 auf die auf das erste Substrat 1 auftreffende Volumenschallwelle VW1 zurückgehen. Die ermittelten zeitlichen Differenzen zwischen dem Empfang einer oder mehrerer Oberflächenwelle(n) wird dementsprechend auch als Basis für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit genutzt, wie dies nachfolgend noch näher erläutert werden wird.

**[0081]** Die Vorrichtung der **Fig. 4** kann hierfür über einen Multiplex in zwei unterschiedlichen Betriebsmodi betrieben werden, d. h., dass auch die vormals in einem Empfängermodus betriebene zweite Sender-Empfängereinheit SE2 in einem Sendermodus betrieben wird und die vormals im Sendermodus betriebene erste Sender-Empfängereinheit SE1 im Empfängermodus betrieben wird. Dabei wird nun durch die im Sendermodus betriebene zweite Sender-Empfängereinheit SE2 eine akustische Oberflächenwelle OW1 im ersten Substrat 1 angeregt. Zumindest ein Teil der Energie dieser akustischen Oberflächenwelle OW1 wird wie zuvor in Energie einer sich im Medium M ausbreitenden akustischen

Volumenschallwelle VW2 umgewandelt, die sich nun auf einem Ausbreitungspfad P2 von der zweiten Sender-Empfängereinheit SE2 zur ersten Sender-Empfängereinheit SE1 durch das Medium M ausbreitet. Die von der zweiten Sender-Empfängereinheit SE2 angeregte Oberflächenwelle OW1 einer zweiten akustischen Welle geht somit von der dieser Sender-Empfängereinheit SE2 aus, sodass die dadurch angeregte Volumenschallwelle VW2 im Wesentlichen entgegengesetzt zu der vorangegangenen Volumenschallwelle VW1 und zickzackförmig durch das Medium M in Richtung der ersten Sender-Empfängereinheit SE1 verläuft.

**[0082]** Über die Umschaltung zwischen Sender- und Empfängermodus der Sender-Empfängereinheiten SE1, SE2 wird folglich die Laufrichtung der Volumenschallwellen VW1, VW2 innerhalb des Mediums M entlang der Hauptausbreitungsrichtung des Wellenleiters umgekehrt. Es ergibt sich damit, dass sich je nach Betriebsmodus (erste oder zweite) Wellenzüge bzw. erste oder zweite akustische Wellen zwischen den beiden Sender-Empfängereinheiten SE1 und SE2 einerseits so ausbreiten, dass sie im Medium verlaufende Pfadabschnitte PA1 bis PA7 aufweisen, entlang derer sie einen Ausbreitungsgeschwindigkeitsvektor haben mit einer vektoriellen Ausbreitungsgeschwindigkeitskomponente in Richtung der Strömung des Mediums M (erste Wellenzüge), und andererseits so ausbreiten, dass sie im Medium verlaufende Pfadabschnitte PA7 bis PA1 aufweisen, entlang derer sie einen Ausbreitungsgeschwindigkeitsvektor haben mit einer vektoriellen Ausbreitungsgeschwindigkeitskomponente in Gegenrichtung zur Strömung des Mediums M (zweite Wellenzüge). Folglich weichen die Laufzeiten für an der ersten Sender-Empfängereinheit SE1 empfangene Oberflächenwellen eines zweiten Wellenzuges von den Laufzeiten für von an der zweiten Sender-Empfängereinheit SE2 empfangene Oberflächenwellen eines ersten Wellenzuges aufgrund der Strömung des Mediums M voneinander ab. Durch eine Messung der (absoluten) Laufzeiten der beiden Wellenzüge und/oder die Ermittlung einer Differenz der Laufzeiten der zueinander entgegengesetzten Wellenzüge ist es damit grundsätzlich möglich, die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums M zu bestimmen. Ferner lassen sich über die Ausbreitung der Wellenzüge entlang des Wellenleiters Informationen über die Dichte bzw. die Konzentration von Substanzen in dem Medium M ableiten.

**[0083]** Anhand empfangener Signale für eintreffende akustische Wellen (Empfangssignale) auf eine Laufzeitdifferenz oder sogar die absolute Laufzeit einer akustischen Welle zwischen den Sender-Empfängereinheiten SE1, SE2 zu schließen, ist jedoch keinesfalls trivial und erfordert gegebenenfalls einen enormen rechnerischen Aufwand. Dies gilt im Übrigen auch für andere Messvorrichtungen,

bei denen mithilfe akustischer Wellen physikalische und/oder chemische Eigenschaften eines Mediums bestimmt werden.

**[0084]** Hier setzt nun ein erfindungsgemäßes Verfahren an, das unter anderem das Aussenden zweier zueinander phasenverschobener Sendesignale zur Erzeugung von akustischen Wellen vorsieht und mit dem es möglich ist, die Auswertung empfangener Signale insbesondere bei einer Vorrichtung mit einem Wellenleiter gemäß der **Fig. 4** effizienter zu gestalten und unter anderem die Ermittlung einer Laufzeitdifferenz von sich entlang unterschiedlicher Richtungen ausbreitender akustischer Wellen anhand empfangener Signale erheblich leichter zu ermitteln.

**[0085]** So wird eine aus dem Stand der Technik bekannte Messvorrichtung gemäß der **Fig. 4** so weitergebildet, dass Sender der Vorrichtung mit zwei unterschiedlichen Sendesignalen gleicher Grundfrequenz und vorgegebenem Phasenversatz zueinander jeweils erste und zweite akustische Wellen entlang der unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen, vorzugsweise in Strömungsrichtung und entgegen der Strömungsrichtung, erzeugen, so dass in jeder Ausbreitungsrichtung jeweils zwei unterschiedliche Empfangssignale  $y_0^r$ ,  $y_1^r$  und  $y_0^s$ ,  $y_1^s$  von den Empfängern der Vorrichtung erzeugt werden. Darüber hinaus wird eine Signalverarbeitungseinrichtung, z.B. SV<sub>A</sub> oder SV<sub>B</sub>, vorgesehen, mittels der eine Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  und/oder eine absolute Laufzeit  $t_0$  durch die vier erzeugten Empfangssignale  $y_0^r$ ,  $y_1^r$ ,  $y_0^s$  und  $y_1^s$  ermittelt wird.

**[0086]** In einer Ausführungsvariante der **Fig. 1A** ist dabei ein mit mehreren Sender-Empfängereinheiten SE1, SE2, SE3 und SE4 gekoppelter oder hierin integrierter Signalerzeuger 4 vorgesehen, so dass über zwei räumlich zueinander entlang der Längserstreckung des Wellenleiters zueinander beabstandete Sender-Empfängereinheiten SE1 und SE2 sowie SE3 und SE4 jeweils ein Sendesignal  $x_1$  bzw. ein hierzu phasenverschobenes Sendesignal  $x_0$  gleicher Grundfrequenz zur Erzeugung einer akustischen (Oberflächen-)Welle benutzt werden kann.

**[0087]** Die einzelnen Sendesignale  $x_0$ ,  $x_1$  haben dabei entsprechend der obig bereits genannten Gleichung 3 vorzugsweise folgende Form:

$$x_0(t) = -w(t) \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi)$$

$$x_1(t) = w(t) \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \varphi)$$

**[0088]** Die einzelnen Sender-Empfängereinheiten SE1 bis SE4 sind auch hier jeweils so ausgebildet, dass sie sowohl akustische Wellen erzeugen als auch akustische Wellen empfangen können. So erzeugt beispielsweise eine Sender-Empfängerein-

heit SE1 eine sich in Strömungsrichtung (erste Ausbreitungsrichtung) ausbreitende akustische Welle, die an der stromab liegenden Sender-Empfängereinheit SE2 empfangen wird und hier ein Empfangssignal  $y_1^r$  erzeugt. Diese Sender-Empfängereinheit SE2 wiederum erzeugt eine zweite sich stromauf (in die zweite entgegengesetzte Ausbreitungsrichtung) ausbreitende akustische Welle, die an der stromauf liegenden Sender-Empfängereinheit SE1 empfangen wird und zur Erzeugung eines weiteren Empfangssignals  $y_1^s$  führt. Dabei gehen beide Empfangssignale  $y_1^r$  und  $y_1^s$  auf ein Sendesignal  $x_1$  zurück.

**[0089]** Gleichermaßen werden mit über die zweite Sender-Empfängereinheitenanordnung SE3-SE4 mit Sendesignalen  $x_0$  Empfangssignale  $y_0^s$  und  $y_0^r$  erzeugt.

**[0090]** Über eine Signalverarbeitungseinrichtung  $SV_A$  entsprechend der **Fig. 1B** werden die einzelnen analogen Empfangssignale  $y_0^r$ ,  $y_1^r$ ;  $y_0^s$ ,  $y_1^s$  weiterverarbeitet. Hierbei gilt entsprechend obiger Gleichung 6 für die einzelnen Empfangssignale:

$$y_0^s(t) = x_0(t - (t_0 + \Delta t)), y_1^s(t) = x_1(t - (t_0 + \Delta t))$$

$$y_0^r(t) = x_0(t - (t_0 - \Delta t)), y_1^r(t) = x_1(t - (t_0 - \Delta t))$$

**[0091]** Durch die in der **Fig. 1B** gezeigte Ausprägung der Signalverarbeitungseinrichtung  $SV_A$ , die hier insgesamt vier Multiplizierer 5.1, 5.2, 5.3 und 5.4, sowie zwei Summierer 7.1 und 7.2 und zwei Analog-Digital-Wandler 8.1 und 8.2 umfasst, werden die analogen Empfangssignale  $y_0^r$ ,  $y_1^r$ ;  $y_0^s$ ,  $y_1^s$  entsprechend der obiger Gleichung 1 zu einhüllenden Signalen  $Z(t)$  und  $N(t)$  weiterverarbeitet und digitalisiert.

**[0092]** Über eine Berechnungseinheit hier dargestellt als Signalverarbeitungsmittel 9 werden dann aus diesen digitalisierten einhüllenden Signalen  $Z(t)$  und  $N(t)$  entsprechend der Gleichung 2 Werte für eine Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen den sich stromab- und stromauf ausbreitenden akustischen Wellen gewonnen.

**[0093]** Hieraus wiederum kann bei einem bekannten Abstand  $l_0$  zwischen den einzelnen Sender-Empfängereinheiten SE1 und SE2 bzw. SE3 und SE4 sowie bekannter Schallgeschwindigkeit  $c_0$  in dem Medium M, das sich in dem Innenraum 3 befindet, entsprechend der obig dargestellten Gleichungen 4.1, 4.2 und 5 auf eine (mittlere) Strömungsgeschwindigkeit des Mediums M geschlossen werden.

**[0094]** Darüber hinaus ist es aber selbstverständlich auch möglich, mit einer Vorrichtung gemäß der **Fig. 1A** einen Proportionalitätsfaktor  $l/(c_0)^2$  aus

einer absoluten Laufzeit  $t_0$  anhand der vier Empfangssignale  $y_0^r$ ,  $y_1^r$ ;  $y_0^s$ ,  $y_1^s$  zu erhalten, indem die Signalverarbeitungseinrichtung  $SV_A$  beispielsweise Mittel zur Umsetzung der oben erläuterten Gleichung 7 aufweist.

**[0095]** Die Ermittlung der Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  mit einer Signalverarbeitungseinrichtung  $SV_A$  besteht durch ihre Einfachheit, da sie es unter Verwendung einfacher schaltungstechnischer Komponenten gestattet, zuverlässig auf die Laufzeitdifferenz der akustischen Wellen in die unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen zu schließen, insbesondere ohne dass hierfür bei der Signalverarbeitung eine Fourier-Transformation genutzt werden müsste.

**[0096]** Anhand der **Fig. 2A**, **Fig. 2B** und **Fig. 2C** sollen durch Simulationen ermittelte Signalverläufe dargestellt und insbesondere anhand der **Fig. 2C** die erreichte Messgenauigkeit bei der Ermittlung einer Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  veranschaulicht werden.

**[0097]** Hierbei zeigt die **Fig. 2A** einen normierten Amplitudenverlauf für die einzelnen Empfangssignale  $y_0^r$ ,  $y_1^r$ ;  $y_0^s$ ,  $y_1^s$ . In der **Fig. 2B** wiederum sind die sich hierdurch ergebenden Signale  $Z(t)$  und  $N(t)$  (vergleiche Gleichung 1) aufgetragen.

**[0098]** In der **Fig. 2C** sind nun die hierdurch abgeleiteten und ermittelten Laufzeitdifferenzen  $\Delta t$  in Abhängigkeit von der Abtastzeit  $T_{\text{Abt.}}$  beim Sampeln über die Signalverarbeitungseinrichtung  $SV_A$  dargestellt. Hierbei wurden insgesamt 1000 verschiedenen verrauschte und verrückte Signalverläufe simuliert und die Ergebnisse in der **Fig. 2C** übereinander gelegt. Hierbei zeigt sich, dass mit der erfindungsgemäßen Verfahrensumsetzung der vorgegebene Laufzeitdifferenzwert von 10ns im Signalschwerpunkt stets gut getroffen wird, und das bei dem vergleichsweise einfach und damit kostengünstig gehaltenen Aufbau der Signalverarbeitungseinrichtung  $SV_A$ .

**[0099]** Während bei der Ausführungsvariante gemäß der **Fig. 1A** ein gleichzeitiges Senden aller vier Sendesignale bzw. eine gleichzeitige Ansteuerung von vier verschiedenen Sender-Empfängereinheiten SE1 bis SE4 in Form von Ultraschallwandlern - vorzugsweise eingebettet in einen einzigen Ultraschallsensor einer erfindungsgemäßen (Mess-) Vorrichtung - mit zwei verschiedenen Sendesignalen  $x_0$  und  $x_1$  vorgesehen ist, kann selbstverständlich auch ein zeitversetztes Senden von Sendesignalen  $x_0$  und  $x_1$  vorgesehen sein. Eine mögliche Ausführungsvariante zeigt hierbei schematisch die **Fig. 3**.

**[0100]** Hier ist eine Ausführungsvariante einer erfindungsgemäßen Messvorrichtung insbesondere zur Bestimmung einer (mittleren) Strömungsgeschwindigkeit  $v_m$  eines in dem Innenraum 3 befindlichen

Mediums M mit einer alternativen Signalverarbeitungseinrichtung  $SV_B$  versehen, die unter anderem einen Multiplexer 40 und einen Demultiplexer 90 umfasst. Der die Sendesignale  $x_0$  und  $x_1$  vorgebende Signalerzeuger 4, der hier wieder Teil einer Anordnung mit zwei Sender-Empfängereinheiten SE1 und SE2 ist, ist mit dem Multiplexer 40 gekoppelt, um den Sender-Empfängereinheiten SE1 und SE2 zeitversetzt die einzelnen Sendesignale  $x_0$  und  $x_1$  zuzuführen. Somit können von jeder Sender-Empfängereinheit SE1 oder SE2 mit unterschiedlichen Sendesignalen  $x_0$ ,  $x_1$  erste oder zweite akustische Wellen in Strömungsrichtung bzw. entgegen der Strömungsrichtung erzeugt werden.

**[0101]** Dem Demultiplexer 90 werden dann von den Sender-Empfängereinheiten SE1 und SE2 nacheinander die Empfangssignale  $y_0^r$ ,  $y_1^r$ ;  $y_0^s$ ,  $y_1^s$  in analoger Form zugeführt und diese dann über einen nachgeschalteten Analog-Digital-Wandler 8 digitalisiert. Die digitalisierten Signale werden hier dann zur Berechnung der Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  und/oder der absoluten Laufzeit  $t_0$  in dem Signalverarbeitungsmittel 9 z. B. entsprechend den oben dargestellten Gleichungen 7, 8 und 10 genutzt.

**[0102]** Mit den erfindungsgemäßen Vorrichtungen und dem hierdurch durchführbaren erfindungsgemäßen Verfahren, sind die zeitabhängigen Verläufe von Betrag und Phase transmittierter oder reflektierter Ultraschallsignale und der daraus abgeleiteten Signallaufzeiten bzw. Laufzeitdifferenzen in besonders einfacher und effizienter Weise bestimmbar. Der Hardware-Einsatz kann zudem auf ein Minimum beschränkt werden. Dabei ist das umgesetzte Verfahren zur Bestimmung einer Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  und/oder ein Verfahren zur Bestimmung einer absoluten Laufzeit  $t_0$  äußerst robust und mit einer geringen Messunsicherheit verbunden, wenn wie dargestellt, auf vier unterschiedliche Empfangssignale  $y_0^r$ ,  $y_1^r$ ;  $y_0^s$ ,  $y_1^s$  zurückgegriffen wird, die auf zwei unterschiedliche Sendesignale  $x_0$ ,  $x_1$  gleicher Grundfrequenz  $f$  und vorgegebenem Phasenversatz zueinander zurückgegriffen wird.

**[0103]** Dabei sei noch ergänzend darauf hingewiesen, dass die Frequenzfolge bzw. der Frequenzverlauf der Sendesignale  $x_0$ ,  $x_1$  zwar vorzugsweise für jede durchgeführte Messung identisch ist, die Grundfrequenz  $f$  aber für unterschiedliche Messungen, d.h. insbesondere unterschiedliche Messanordnungen und/oder Medien, variiert werden kann.

**[0104]** Darüber hinaus werden zwar grundsätzlich pulsartige Sendesignale bevorzugt, die zu pulsartigen Empfangssignalen  $y_0^r(t)$ ,  $y_1^r(t)$ ;  $y_0^s(t)$ ,  $y_1^s(t)$  entsprechend der **Fig. 2A** führen. Grundsätzlich wäre aber auch eine kontinuierliche Anregung von

akustischen Wellen an den jeweiligen Sendern bzw. Sender-Empfängereinheiten SE1 bis SE4 denkbar.

**[0105]** Es ist darüber hinaus offensichtlich, dass mit den dargestellten Vorrichtungen und den hiermit umgesetzten Verfahren nicht nur eine (mittlere) Strömungsgeschwindigkeit  $v_m$  eines strömenden Mediums M bestimmbar ist, sondern auch - alternativ oder ergänzend - eine Konzentrations-, Dicken-, Abstands-, Temperatur- und/oder Füllstandsmessung durchgeführt werden kann, wie dies bei vergleichbaren Vorrichtungen, die mit akustischen Wellen, insbesondere Ultraschallwellen, arbeiten, bereits weithin bekannt ist. Gleiches gilt für die Bestimmung zeitabhängiger Verläufe der Momentanamplitude oder Momentanphase der empfangenen akustischen Wellen und daraus abgeleiteter Werte für Dichte und Viskosität des Mediums M.

#### Bezugszeichenliste

1	(erstes) Substrat
11	innere Oberfläche
12	äußere Oberfläche
2	(zweites) Substrat
21	innere Oberfläche
22	äußere Oberfläche
3	Innenraum
4	Signalerzeuger
40	Multiplexer
5.1 - 5.4	Multiplizierer
6	Invertierer
7.1, 7.2	Summierer
8	Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler)
8.1, 8.2	Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler)
9	Signalverarbeitungsmittel
90	Demultiplexer
a	Abstand
d	Dicke
f	Grundfrequenz
M	Medium
OW1, OW2	Oberflächenschallwelle
P1, P2	Pfad

PA1 - PA7	Pfadabschnitt
SE1, SE2, SE3, SE4	Sender-Empfänger-einheit
SV <sub>A</sub> , SV <sub>B</sub>	Signalverarbeitungseinrichtung
t <sub>0</sub>	Laufzeit
v <sub>m</sub>	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit
VW1, VW2	Volumenschallwelle
w	Fensterfunktion
x	Sendesignal
y <sup>r</sup>	Erstes Empfangssignal (stromab)
y <sup>s</sup>	Zweites Empfangssignal (stromauf)
φ	Startwinkel
Δt	Laufzeitdifferenz

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung von physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften eines Mediums auf Basis wenigstens zweier erster und zweier zweiter akustischer Wellen, die sich jeweils zumindest teilweise von mindestens einem Sender zu mindestens einem Empfänger durch das Medium ausgebreitet haben, wobei

- die ersten und zweiten akustischen Wellen jeweils durch ein Sendesignal ( $x_0, x_1$ ) erzeugt werden,
- sich die ersten akustischen Wellen durch das Medium (M) entlang einer ersten Ausbreitungsrichtung ausbreiten und sich die zweiten akustischen Wellen durch das Medium (M) entlang einer zu der ersten Ausbreitungsrichtung verschiedenen zweiten Ausbreitungsrichtung ausbreiten und

- für eine empfangene erste akustische Welle nach ihrer Ausbreitung durch das Medium (M) entlang der ersten Ausbreitungsrichtung ein erstes Empfangssignal ( $y_0^r, y_1^r$ ) und für eine empfangene zweite akustische Welle nach ihrer Ausbreitung durch das Medium (M) entlang der zweiten Ausbreitungsrichtung ein zweites Empfangssignal ( $y_0^s, y_1^s$ ) erzeugt wird, wobei aus den Empfangssignalen

( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) eine Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) der akustischen Wellen ermittelt wird und mittels einer ermittelten Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) physikalische und/oder chemische Eigenschaften des Mediums (M) bestimmt werden, und wobei

- wenigstens zwei unterschiedliche Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) im Wesentlichen gleicher Grundfrequenz (f) verwendet werden, die einen vorgegebenen Phasenversatz zueinander aufweisen und durch die jeweils eine erste und eine zweite akustische Welle

erzeugt werden, so dass für jede Ausbreitungsrichtung basierend auf beiden Sendesignalen ( $x_0, x_1$ ) zwei Empfangssignale ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) erzeugt werden, die auf die unterschiedlichen Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) zurückgehen, und

- eine Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) der sich entlang der beiden unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen ausbreitenden akustischen Wellen durch die vier Empfangssignale ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) ermittelt wird, von

denen zwei Empfangssignale ( $y_0^r, y_0^s$ ) durch erste und zweite akustische Wellen erzeugt werden, die auf ein erstes Sendesignal ( $x_0$ ) der wenigstens zwei Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) zurückgehen, und von denen zwei Empfangssignale ( $y_1^r, y_1^s$ ) durch erste und zweite akustische Wellen erzeugt werden, die auf ein zweites Sendesignal ( $x_1$ ) der wenigstens zwei Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) zurückgehen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die vier Empfangssignale ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) unmittelbar in eine Berechnung eingehen, um eine Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) zu berechnen, und erst mit Vorliegen aller vier Empfangssignale ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) eine Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) berechnet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Ermittlung einer Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) Empfangssignale ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) für akustische Wellen miteinander multipliziert werden, die von unterschiedlichen Sendesignalen ( $x_0, x_1$ ) erzeugt wurden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Multiplikation von analogen Empfangssignalen ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) vorgesehen ist, mit anschließender Berechnung einer Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) aus digitalisierten Signalen, oder dass für eine Berechnung einer Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) eine Multiplikation digitalisierter Empfangssignale ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) vorgesehen ist.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Ermittlung einer Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) eine Formel der folgenden Form genutzt wird:

$$\frac{Z(t)}{N(t)} = \frac{\left\{ y_0^s(t) \cdot y_1^r(t) - y_0^r(t) \cdot y_1^s(t) \right\}}{\left\{ y_0^r(t) \cdot y_0^s(t) + y_1^r(t) \cdot y_1^s(t) \right\}},$$

wobei t die Zeit ist und

$y_0^s$  das zweite Empfangssignal für die durch ein erstes Sendesignal ( $x_0$ ) erzeugte akustische Welle ist,  $y_1^s$  das zweite Empfangssignal für die durch ein



zweites Sendesignal ( $x_1$ ) erzeugte akustische Welle ist,  
 $y_0^r$  das erste Empfangssignal für die durch ein erstes Sendesignal ( $x_0$ ) in die andere Ausbreitungsrichtung erzeugte akustische Welle ist und  
 $y_1^r$  das erste Empfangssignal für die durch ein zweites Sendesignal ( $x_1$ ) in die andere Ausbreitungsrichtung erzeugte akustische Welle ist.

6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  nach folgender Formel ermittelt wird:

$$\Delta t = \frac{\arctan \left\{ \frac{Z(t)}{N(t)} \right\}}{4\pi f}$$

wobei  $f$  hierin eine Grundfrequenz für beide Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die beiden zwei unterschiedlichen Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) voneinander geringfügig abweichende Grundfrequenzen ( $f_0, f_1$ ) aufweisen und eine Grundfrequenz  $f$  für die Ermittlung der Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  aus dem arithmetischen Mittel der beiden Grundfrequenzen ( $f_0, f_1$ ) bestimmt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) jeweils einen Schwingungsimpuls umfassen und Hüllkurven zu den einzelnen Schwingungsimpulsen der zueinander phasenverschobenen Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) im Wesentlichen zueinander identisch sind.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass gleichzeitig oder nacheinander akustische Wellen durch die Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) erzeugt werden.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mittels der Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) eine Strömungsgeschwindigkeit ( $v_m$ ) eines strömenden Mediums (M) bestimmt wird und die akustischen Wellen durch die Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) so erzeugt werden, dass sich erste akustische Wellen durch das Medium (M) entlang einer ersten Ausbreitungsrichtung in Strömungsrichtung des Mediums (M) ausbreiten und sich zweite akustische Wellen durch das Medium (M) entlang einer zweiten Ausbreitungsrichtung gegen die Strömungsrichtung des Mediums (M) ausbreiten.

11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Strömungsgeschwindigkeit ( $v_m$ ) durch die Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) und einen bekannten Proportionalitätsfaktor ( $l/(c_0)^2$ ) berechnet wird.

12. Verfahren zur Bestimmung von physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften eines Mediums auf Basis wenigstens zweier erster und zweier zweiter akustischer Wellen, die sich jeweils zumindest teilweise von mindestens einem Sender zu mindestens einem Empfänger durch das Medium ausgebreitet haben, wobei

- die ersten und zweiten akustischen Wellen jeweils durch ein Sendesignal ( $x_0, x_1$ ) erzeugt werden,
- sich die ersten akustischen Wellen durch das Medium (M) entlang einer ersten Ausbreitungsrichtung ausbreiten und sich die zweiten akustischen Wellen durch das Medium (M) entlang einer zu der ersten Ausbreitungsrichtung identischen oder verschiedenen zweiten Ausbreitungsrichtung ausbreiten und

- für eine empfangene erste akustische Welle nach ihrer Ausbreitung durch das Medium (M) entlang der ersten Ausbreitungsrichtung ein erstes Empfangssignal ( $y_0^r, y_1^r$ ) und für eine empfangene zweite akustische Welle nach ihrer Ausbreitung durch das Medium (M) entlang der zweiten Ausbreitungsrichtung ein zweites Empfangssignal ( $y_0^s, y_1^s$ ) erzeugt wird,

wobei aus den Empfangssignalen ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) eine absolute Laufzeit ( $t_0$ ) einer akustischen Welle von einem Sender (SE1, SE2, SE3, SE4) zu einem Empfänger (SE2, SE1, SE4, SE3) ermittelt wird und mittels einer ermittelten absoluten Laufzeit ( $t_0$ ) physikalische und/oder chemische Eigenschaften des Mediums (M) bestimmt werden, und wobei

- wenigstens zwei unterschiedliche Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) im Wesentlichen gleicher Grundfrequenz ( $f$ ) verwendet werden, die einen vorgegebenen Phasenversatz zueinander aufweisen und mit denen jeweils eine erste und eine zweite akustische Welle erzeugt wird, so dass für jede Ausbreitungsrichtung basierend auf beiden Sendesignalen ( $x_0, x_1$ ) zwei Empfangssignale ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) erzeugt werden, die auf die unterschiedlichen Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) zurückgehen, und

- eine absolute Laufzeit ( $t_0$ ) einer akustischen Welle zwischen einem Sender (SE1, SE2, SE3, SE4) und einem Empfänger (SE2, SE1, SE4, SE3) durch die vier Empfangssignale ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) ermittelt wird, von denen zwei Empfangssignale ( $y_0^r, y_0^s$ ) durch erste und zweite akustische Wellen erzeugt werden, die auf ein erstes Sendesignal ( $x_0$ ) der wenigstens zwei Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) zurückgehen, und von denen zwei Empfangssignale ( $y_1^r, y_1^s$ ) durch erste und zweite akustische Wellen erzeugt werden, die auf ein zweites Sendesignal ( $x_1$ ) der wenigstens zwei Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) zurückgehen.

13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine absolute Laufzeit ( $t_0$ )

aus einem geschätzten Startwert ( $t_0$ ) und einem aus den vier Empfangssignalen ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) berechneten Differenzwert ( $\Delta t'$ ) ermittelt wird.

14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Berechnung des Differenzwerts ( $\Delta t'$ ) wenigstens einer der folgenden Terme genutzt wird:

$$\alpha = \text{atan2}\left(y_1^r(t + \hat{t}_0), y_0^r(t + \hat{t}_0)\right) - 2\pi \hat{f} \cdot (t + t_k)$$

$$\beta = \text{atan2}\left(y_1^s(t + \hat{t}_0), y_0^s(t + \hat{t}_0)\right) - 2\pi \hat{f} \cdot (t + t_k)$$

wobei hierin  $\hat{f}$  ein geschätzter Wert für die Mittenfrequenz der Empfangssignale ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) ist und  $t_k$  eine vorgegebene Zeitkonstante mit  $t_k \geq 0$  und  $y_0^s$  das zweite Empfangssignal für die durch ein erstes Sendesignal ( $x_0$ ) erzeugte akustische Welle ist,  $y_1^s$  das zweite Empfangssignal für die durch ein zweites Sendesignal ( $x_1$ ) erzeugte akustische Welle ist,  $y_0^r$  das erste Empfangssignal für die durch ein erstes Sendesignal ( $x_0$ ) in die andere Ausbreitungsrichtung erzeugte akustische Welle ist und  $y_1^r$  das erste Empfangssignal für die durch ein zweites Sendesignal ( $x_1$ ) in die andere Ausbreitungsrichtung erzeugte akustische Welle ist.

15. Verfahren nach Anspruch 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Startwert ( $\hat{t}_0$ ) für die Laufzeitberechnung mittels wenigstens einer Signaleinhüllenden eines Paares von Empfangssignalen ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) vorgegeben wird, wobei die Empfangssignale ( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) des Empfangssignalspaars auf unterschiedliche Sendesignale ( $x_0, x_1$ ), aber sich in die gleiche Ausbreitungsrichtung ausgebreitete akustische Wellen zurückgehen.

16. Verfahren nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Signaleinhüllende  $y_{\text{huel}}$  die nachfolgende Formel gegeben ist

$$y_{\text{huel}} = \sqrt{y_0^2 + y_1^2}$$

wobei

$y_0$  ein erstes Empfangssignal für die durch ein erstes Sendesignal ( $x_0$ ) erzeugte akustische Welle ist und  $y_1$  ein zweites Empfangssignal für die durch ein zweites Sendesignal ( $x_1$ ) erzeugte akustische Welle ist.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass mittels der ermittelten absoluten Laufzeit ( $t_0$ ) eine Strömungsgeschwindigkeit ( $v_m$ ) eines strömenden Mediums (M) bestimmt wird und die akustischen Wellen

durch die Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) so erzeugt werden, dass sich erste akustische Wellen durch das Medium (M) entlang einer ersten Ausbreitungsrichtung in Strömungsrichtung des Mediums (M) ausbreiten und sich zweite akustische Wellen durch das Medium (M) entlang einer zweiten Ausbreitungsrichtung gegen die Strömungsrichtung des Mediums (M) ausbreiten, wobei mittels der ermittelten absoluten Laufzeit ( $t_0$ ) ein Proportionalitätsfaktor ( $l/(c_0)^2$ ) berechnet wird und mit dem Proportionalitätsfaktor ( $l/(c_0)^2$ ) und mit einer ermittelten Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ), insbesondere mit einer nach einem Verfahren der Ansprüche 1 bis 11 ermittelten Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) zwischen wenigstens einer ersten und einer zweiten akustischen Welle, die sich entlang unterschiedlicher Ausbreitungsrichtungen zumindest teilweise durch das strömende Medium (M) ausgebreitet haben, eine Strömungsgeschwindigkeit ( $v_m$ ) bestimmt wird.

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei einer Ermittlung von mehreren Werten für Laufzeitdifferenzen ( $\Delta t$ ) und/oder für absolute Laufzeiten ( $t_0$ ) einer Mehrzahl von akustischen Wellen eine Mittelung und/oder Aufintegration der ermittelten Laufzeitdifferenzen ( $\Delta t$ ) und/oder Laufzeiten ( $t_0$ ) durchgeführt wird.

19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei dem jeweiligen Verfahren mittels einer ermittelten Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) und/oder mittels einer ermittelten absoluten Laufzeit ( $t_0$ ) eine Schallgeschwindigkeit, eine Konzentration, eine Dichte, eine Temperatur, ein Füllstand des Mediums in einem Innenraum, eine Dicke einer an das Medium angrenzenden Wandung und/oder ein Abstand zweier an das Medium angrenzender Wandungsabschnitte bestimmt wird.

20. Vorrichtung zur Bestimmung von physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften eines Mediums, mit

- einem akustischen Wellenleiter, der einen mit dem Medium (M) zu füllenden Innenraum (3) aufweist,
- wenigstens zwei Sendern (SE1, SE2; SE3, SE4), die jeweils zur Erzeugung akustischer Wellen in dem Wellenleiter durch ein Sendesignal ( $x_0, x_1$ ) des Senders (SE1, SE2; SE3, SE4) ausgebildet und vorgesehen sind, so dass sich eine erzeugte akustische Welle entlang des Wellenleiters und zumindest teilweise durch das Medium (M) ausbreitet,

- wenigstens zwei Empfängern (SE2, SE1; SE4, SE3), die räumlich zueinander entlang des Wellenleiters beabstandet und jeweils zur Erzeugung eines ersten oder zweiten Empfangssignals

( $y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s$ ) für den jeweiligen Empfänger (SE2, SE1; SE4, SE3) erreichender erster oder zweiter

akustischer Wellen ausgebildet und vorgesehen sind, wobei sich eine erste akustische Welle jeweils entlang einer ersten Ausbreitungsrichtung ausbreitet und hierfür an einem Empfänger (SE2, SE1; SE4, SE3) ein erstes Empfangssignal  $(y_0^r, y_1^r)$  erzeugt wird und sich eine zweite akustische Welle jeweils entlang einer zu der ersten Ausbreitungsrichtung identischen oder unterschiedlichen zweiten Ausbreitungsrichtung ausbreitet und hierfür an einem Empfänger (SE2, SE1; SE4, SE3) ein zweites Empfangssignal  $(y_0^s, y_1^s)$ , erzeugt wird, und

- einer Signalverarbeitungseinrichtung (SV<sub>A</sub>, SV<sub>B</sub>), mittels der aus den Empfangssignalen  $(y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s)$ ,

- wenn die zweite Ausbreitungsrichtung zu der ersten Ausbreitungsrichtung unterschiedlich ist, eine Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) zwischen empfangenen ersten und zweiten akustischen Wellen und/oder,
- wenn die zweite Ausbreitungsrichtung zu der ersten Ausbreitungsrichtung unterschiedlich oder identisch ist, eine absolute Laufzeit ( $t_0$ ) einer akustischen Welle von einem Sender (SE1, SE2; SE3, SE4) zu einem Empfänger (SE 2, SE1; SE4, SE3) ermittelt wird und die dazu ausgebildet und vorgesehen ist, mit einer ermittelten Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) und/oder einer ermittelten absoluten Laufzeit ( $t_0$ ) physikalische und/oder chemische Eigenschaften des Mediums (M) zu bestimmen, **dadurch gekennzeichnet**, dass
- die Sender (SE1, SE2; SE3, SE4) der Vorrichtung dazu ausgebildet und vorgesehen sind, mit zwei unterschiedlichen Sendesignalen ( $x_0, x_1$ ) im Wesentlichen gleicher Grundfrequenz ( $f$ ) und vorgegebenem Phasenversatz zueinander jeweils erste und zweite akustische Wellen zu erzeugen, so dass in der ersten Ausbreitungsrichtung zwei unterscheidbare erste und in der zweiten Ausbreitungsrichtung zwei unterscheidbare zweite Empfangssignale  $(y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s)$  von den Empfängern (SE2, SE1, SE4, SE3) der Vorrichtung erzeugt werden, und
- die Signalverarbeitungseinrichtung (SV<sub>A</sub>, SV<sub>B</sub>) dazu ausgebildet und vorgesehen ist, eine Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) und/oder eine absolute Laufzeit ( $t_0$ ) durch die vier Empfangssignale  $(y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s)$  zu ermitteln, von denen zwei Empfangssignale  $(y_0^r, y_0^s)$  durch erste und zweite akustischen Wellen erzeugt werden, die auf ein erstes Sendesignal ( $x_0$ ) der wenigstens zwei Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) zurückgehen, und von denen zwei Empfangssignale  $(y_1^r, y_1^s)$  durch erste und zweite akustischen Wellen erzeugt werden, die auf ein zweites Sendesignal ( $x_1$ ) der wenigstens zwei Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) zurückgehen.

21. Vorrichtung nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sender (SE1, SE2; SE3, SE4) dazu ausgebildet und vorgesehen sind,

akustische Oberflächenwellen (OW1, OW2) in dem Wellenleiter zu erzeugen.

22. Vorrichtung nach Anspruch 20 oder 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorrichtung zur Bestimmung einer Strömungsgeschwindigkeit ( $v_m$ ) eines den Innenraum (3) des Wellenleiters durchströmenden Mediums (M) ausgebildet und vorgesehen ist.

23. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Signalverarbeitungseinrichtung (SV<sub>A</sub>, SV<sub>B</sub>) Mittel (5.1, 5.2, 5.3, 5.4) zur Multiplikation analoger Empfangssignale  $(y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s)$  und Mittel (9) zur anschließenden Berechnung einer Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) aus digitalisierten Signalen, oder Mittel (8) zur Digitalisierung der Empfangssignale  $(y_0^r, y_1^r; y_0^s, y_1^s)$  und Mittel (9) zur anschließenden Multiplikation digitalisierter Empfangssignale für die Berechnung einer Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ ) aufweist.

24. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Grundfrequenz ( $f$ ) der beiden Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) variabel ist.

25. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Phasenversatz der beiden Sendesignale ( $x_0, x_1$ ) zwischen 45° und 135° variabel ist, insbesondere 90° beträgt.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1A

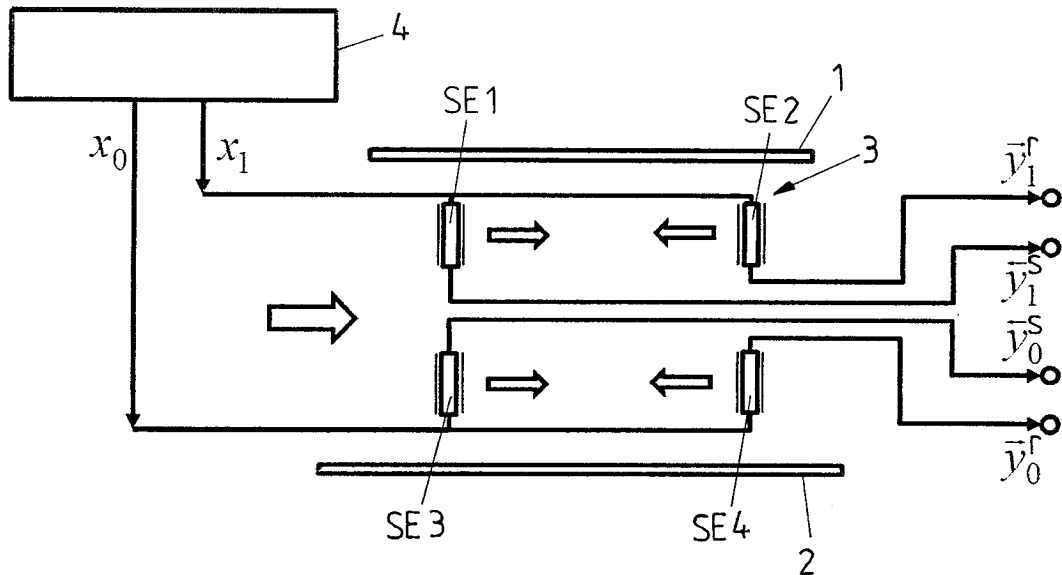


FIG 1B

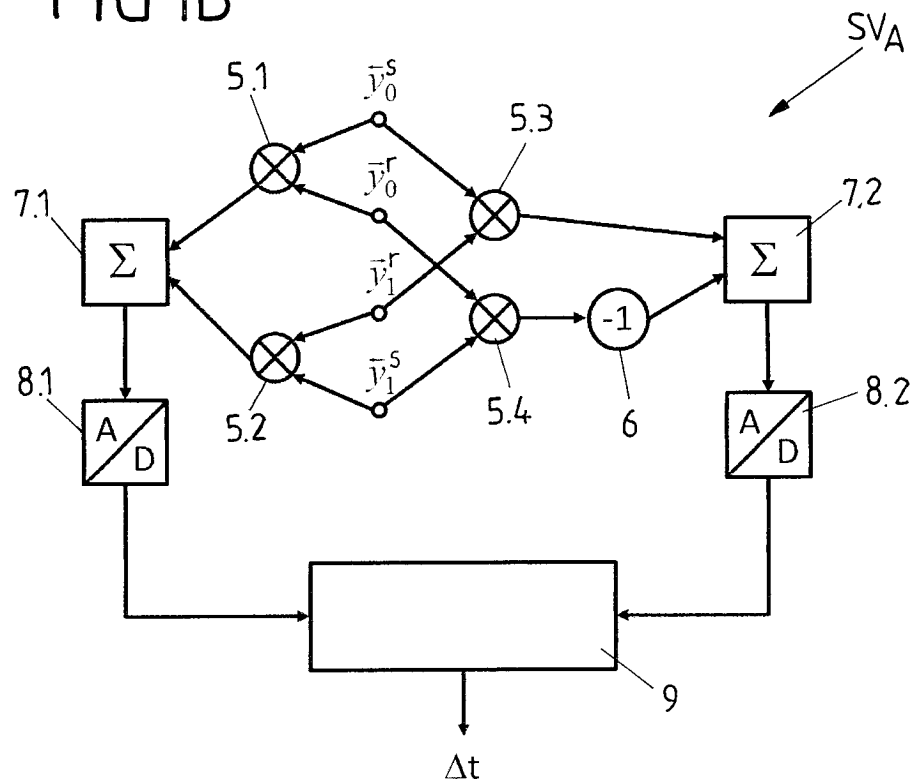


FIG 2A

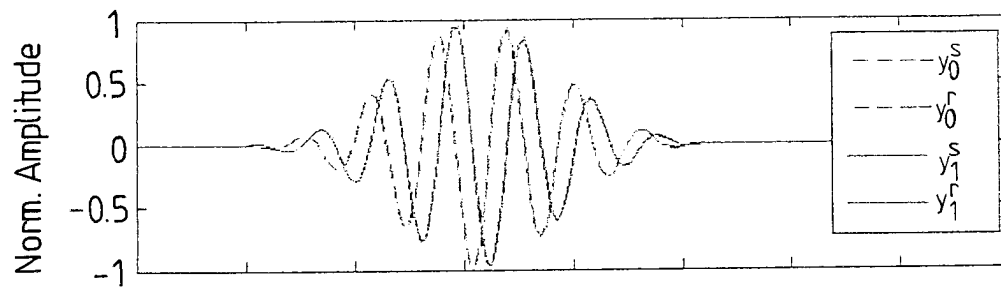


FIG 2B

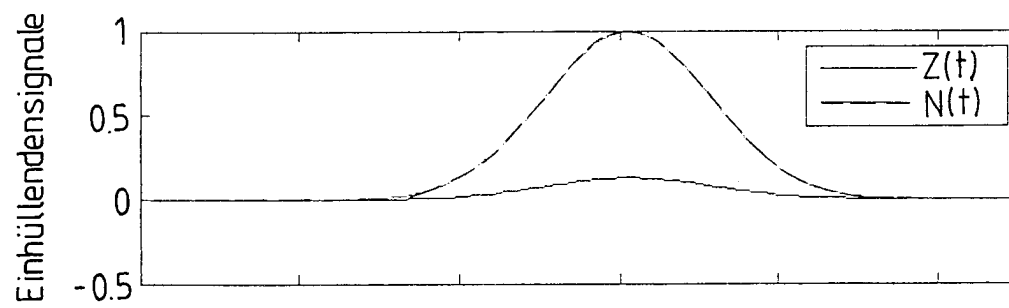


FIG 2C

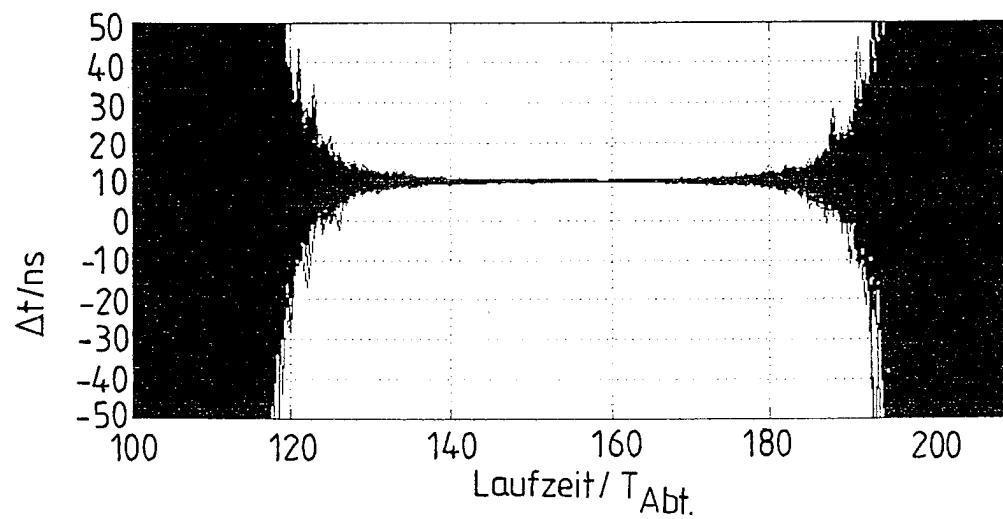
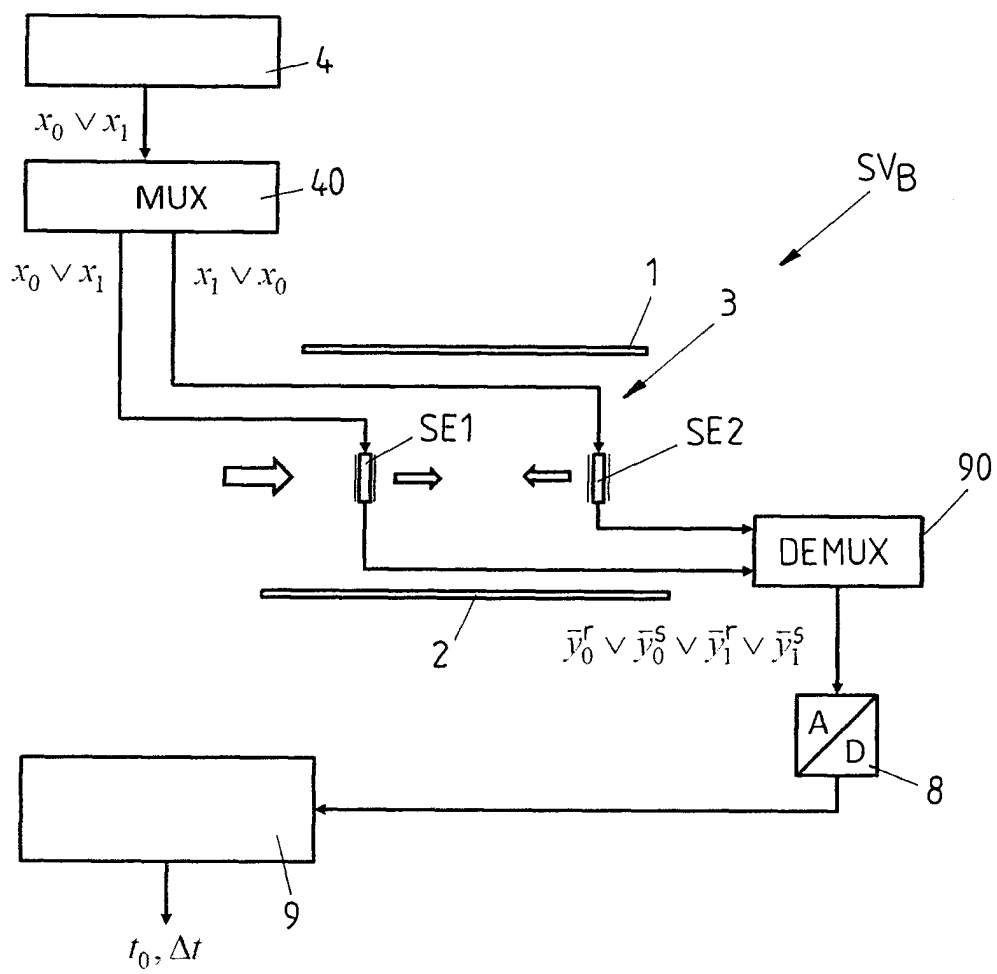


FIG 3



**FIG 4**

