

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
04. März 2021 (04.03.2021)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2021/037491 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation: *G01F 1/58* (2006.01) *G01F 23/24* (2006.01) *G01F 1/60* (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2020/071816
- (22) Internationales Anmeldedatum: 03. August 2020 (03.08.2020)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität: 10 2019 123 359.3
30. August 2019 (30.08.2019) DE
- (71) Anmelder: **ENDRESS+HAUSER FLOWTEC AG** [CH/CH]; Kägenstr. 7, 4153 Reinach (CH).
- (72) Erfinder: **TSCHUDIN, Beat**; Baumgartenweg 14, 4153 Reinach (CH). **MARIAGER, Simon**; Unterer Batterieweg 90, 4059 Basel (CH).
- (74) Anwalt: **ANDRES, Angelika**; Endress+Hauser Group Services (Deutschland) AG+Co. KG, Colmarer Str. 6, 79576 Weil am Rhein (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,

(54) Title: MAGNETIC-INDUCTIVE FLOW METER AND METHOD FOR OPERATING A MAGNETIC-INDUCTIVE FLOW METER

(54) Bezeichnung: MAGNETISCH-INDUKTIVE DURCHFLUSSMESSSONDE UND VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINER MAGNETISCH-INDUKTIVEN DURCHFLUSSMESSSONDE

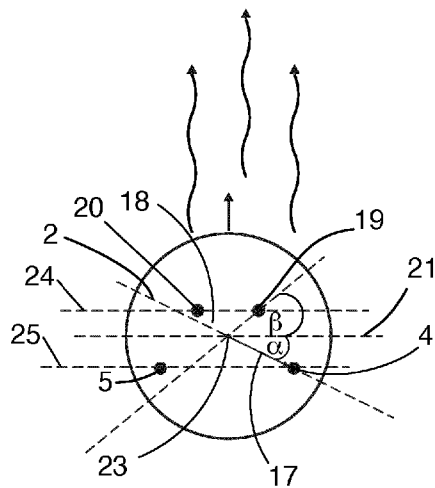


Fig. 4

(57) Abstract: The invention relates to a magnetic-inductive flow meter which can be inserted into a pipe through which a medium flows, said flow meter comprising: a housing, wherein the housing has a housing wall; at least one first and one second measurement electrode which form a galvanic contact with the flowing medium and are positioned on the housing wall; at least one magnetic field-generating device for generating a magnetic field which passes through the housing wall, wherein the magnetic field-generating device is positioned in the housing and comprises a measurement circuit which is designed to determine at least one first measurement variable, and wherein measurement values of the first measurement variable are measured between two measurement electrodes or at a measurement electrode in relation to a reference potential, in particular an earth potential. The flow meter is characterised in that: an evaluation circuit is designed to determine a Reynolds number and/or a kinematic viscosity value of the medium in the pipe by means of measurement values of the first measurement variable and of a second measurement variable which differs from the first measurement variable, wherein the measurement values of the second measurement variable are measured between two measurement electrodes or at a measurement electrode in relation to a reference potential, in particular an earth potential; and the measurement electrodes are positioned on the housing wall in such a way that, during a test measurement, quotients of current measurement values of the first and of the second measurement variable correspond bijectively with the Reynolds number of the medium in the pipe.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine magnetisch-induktive Durchflussmesssonde, die in ein von einem Medium durchströmtes Rohr einsetzbar ist und die ein Gehäuse, wobei das Gehäuse eine Gehäusewand aufweist, mindestens eine erste und eine zweite Messelektrode,



WO 2021/037491 A1

TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

die einen galvanischen Kontakt mit dem fließenden Medium bilden und an der Gehäusewandung angeordnet sind, mindestens eine magnetfelderzeugende Vorrichtung zum Erzeugen eines die Gehäusewandung durchsetzenden Magnetfeldes, wobei die magnetfelderzeugende Vorrichtung im Gehäuse angeordnet ist und eine Messschaltung umfasst, die dazu eingerichtet ist mindestens eine erste Messgröße zu bestimmen, wobei Messwerte der ersten Messgröße zwischen zwei Messelektroden oder an einer Messelektrode in Bezug zu einem Referenzpotential, insbesondere einem Erdpotential gemessen werden. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Auswerteschaltung dazu eingerichtet ist, eine Reynolds-Zahl und/oder einen kinematischen Viskositätswert des Mediums im Rohr mittels Messwerten der ersten und einer zweiten Messgröße zu ermitteln, die sich von der ersten Messgröße unterscheidet, wobei die Messwerte der zweiten Messgröße zwischen zwei Messelektroden oder an einer Messelektrode in Bezug zu einem Referenzpotential, insbesondere einem Erdpotential gemessen wird, und dass die Messelektroden so an der Gehäusewandung angeordnet sind, dass bei einer Testmessung Quotienten aktueller Messwerte der ersten und der zweiten Messgröße mit der Reynolds-Zahl des Mediums im Rohr bijektiv korrespondieren.

Magnetisch-induktive Durchflussmesssonde und Verfahren zum Betreiben einer magnetisch-induktiven Durchflussmesssonde

Magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte werden zur Bestimmung der Durchflussgeschwindigkeit und des Volumendurchflusses eines fließenden Mediums in einer Rohrleitung eingesetzt. Ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät weist ein
5 Magnetsystem auf, das ein Magnetfeld senkrecht zur Flussrichtung des fließenden Mediums erzeugt. Dafür werden üblicherweise einzelne Spulen verwendet. Um ein überwiegend homogenes Magnetfeld zu realisieren, werden zusätzlich Polschuhe so geformt und angebracht, dass die Magnetfeldlinien über den gesamten Rohrquerschnitt im Wesentlichen senkrecht zur Querachse bzw. parallel zur Vertikalachse des
10 Messrohres verlaufen. Ein an die Mantelfläche des Messrohres angebrachtes Messelektrodenpaar greift eine senkrecht zur Flussrichtung und zum Magnetfeld anliegende elektrische Messspannung bzw. Potentialdifferenz ab, die entsteht, wenn ein leitfähiges Medium bei angelegtem Magnetfeld in Flussrichtung fließt. Da die abgegriffene
15 Messspannung laut Faraday'schem Induktionsgesetz von der Geschwindigkeit des fließenden Mediums abhängt, kann aus der induzierten Messspannung U die Durchflussgeschwindigkeit u und, mit Hinzunahme eines bekannten Rohrquerschnitts, der Volumendurchfluss \dot{V} ermittelt werden.

Im Gegensatz zu einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät werden magnetisch-induktive Durchflussmesssonden mit ihrem üblicherweise kreiszylindrischen Gehäuse in
20 eine seitliche Öffnung einer Rohrleitung eingeführt und fluiddicht fixiert. Ein spezielles Messrohr ist nicht mehr notwendig. Die erwähnte Spulenanordnung auf der Mantelfläche des Messrohrs entfällt, da das Magnetfeld lediglich im Bereich des in das Fluid ragenden Frontendes der Durchflussmesssonde existiert bzw. von einem deren Spulenanordnung durchfließenden Strom in diesem Bereich erzeugt wird. Dafür wird üblicherweise das
25 Magnetsystem im Inneren des Gehäuses und in unmittelbarer Nähe zu den Messelektroden angeordnet, so dass eine Symmetrieachse der erzeugten Magnetfeldlinien die Fläche zwischen den Messelektroden senkrecht schneidet. Die Messelektroden sind entweder an der Frontfläche oder an den Seitenflächen des
30 Gehäuses angeordnet.

Für beide Messsysteme setzt sich die an den Messelektroden anliegende Messspannung U aus der vereinfachten Gleichung

$$U = f(Re) \cdot u \cdot S$$

zusammen, wobei S eine von der Sensorgeometrie und dem Magnetfeld abhängige,
35 nominelle Signalstärke und $f(Re)$ ein Strömungsprofil- bzw. Reynolds-Zahl-abhängiger Korrekturfaktor ist. Üblicherweise nimmt man den Korrekturfaktor $f(Re)$ als konstant an.

Dies ist aber nicht immer gegeben. Die nominelle Signalstärke S wird bei der Justierung der Durchflussmesssonde bestimmt und deren Wert ist in einem Speicher der Auswerteschaltung hinterlegt.

Die Reynolds-Zahl eines fließenden Mediums in einer Rohrleitung ist definiert durch

$$5 \quad Re = \rho \cdot u \cdot \frac{DN}{\mu} = u \cdot \frac{DN}{\nu},$$

mit dem Durchmesser DN der Rohrleitung, der Dichte des Mediums ρ , der dynamischen Viskosität μ und der kinematischen Viskosität ν des Mediums.

Magnetisch-induktive Durchflussmesssonden sind besonders empfindlich gegenüber der vorliegenden Reynolds-Zahl des Mediums in der Rohrleitung, da diese das
10 Strömungsprofil des fließenden Mediums bestimmt. Abhängig vom Rohrsystem, Magnetsystem und Einbautiefe kann der Korrekturfaktor $f(Re)$ variieren und um mehrere Prozent vom angenommenen, konstanten Wert abweichen. Üblicherweise wird die Anordnung der Messelektroden und der magnetfelderzeugenden Vorrichtung dahingehend optimiert, dass die Kennlinie der Durchflussmesssonde möglichst linear ist,
15 d.h. die induzierte Messspannung über einen möglichst großen Reynolds-Zahlenbereich bzw. für den für die spezifische Anwendung interessanten Reynolds-Zahlenbereich und eine vorgegebene Einbautiefe Reynolds-Zahl-unabhängig ist. Somit sind Durchflussmesssonden, welche in Übergangsströmungsbereichen eine Abweichung von einzelnen Prozenten aufweisen, und Durchflussmesssonden, welche Abweichungen von
20 ca. 2 bis 5% für Strömungen mit einem turbulenten Strömungsprofil aufweisen bereits Industriestandard.

Die EP 0 892 251 A1 offenbart eine magnetisch-induktive Durchflussmesssonde, deren in das Fluid ragende Frontende die Form einer Kugelkalotte annimmt, und in der eine erste und zweite Elektrode zum Bilden eines galvanischen Kontaktes auf einem der Meridiane
25 der Kugelkalotte symmetrisch zu einem Scheitelpunkt des Meridians angeordnet sind. Durch die Kugelkalottenform verringert sich die Bildung von Strömungswirbeln, die entstehen, wenn der Frontbereich der Durchflussmesssonden vom Medium angeströmt wird, und die Messgenauigkeit bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten nimmt zu.

Bisher ist jedoch weder eine magnetisch-induktive Durchflussmesssonde noch ein
30 Verfahren zum Betreiben einer magnetisch-induktiven Durchflussmesssonde bekannt, welche die Reynolds-Zahl des Mediums bestimmt und ausgehend davon eine Korrektur des Durchflusswertes vornimmt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde dem Abhilfe zu schaffen.

Die Aufgabe wird gelöst durch die magnetisch-induktive Durchflussmesssonde nach Anspruch 1, durch das Verfahren zum Betreiben der magnetisch-induktiven Durchflussmesssonde nach Anspruch 12 und durch die Durchflussmessstelle nach Anspruch 15.

5 Die erfindungsgemäße magnetisch-induktive Durchflussmesssonde, die in ein von einem Medium durchströmtes Rohr einsetzbar ist, umfasst:

- ein Gehäuse,

wobei das Gehäuse eine Gehäusewandung aufweist;

10 - mindestens eine erste und eine zweite Messelektrode, die an der Gehäusewandung angeordnet sind, zum Bilden jeweils eines galvanischen Kontaktes mit einem fließenden Medium;

- mindestens eine magnetfelderzeugende Vorrichtung zum Erzeugen eines die Gehäusewandung durchsetzenden Magnetfeldes,

wobei die magnetfelderzeugende Vorrichtung im Gehäuse angeordnet ist; und

15 - eine Messschaltung, die dazu eingerichtet ist mindestens eine erste Messgröße zu bestimmen,

wobei Messwerte der ersten Messgröße zwischen zwei Messelektroden oder an einer Messelektrode in Bezug zu einem Referenzpotential, insbesondere einem Erdpotential gemessen werden,

20 und ist dadurch gekennzeichnet,

dass eine Auswerteschaltung dazu eingerichtet ist, eine Reynolds-Zahl und/oder einen kinematischen Viskositätswert des Mediums im Rohr mittels Messwerte der ersten und einer zweiten Messgröße, die sich von der ersten Messgröße unterscheidet, zu ermitteln,

25 wobei Messwerte der zweiten Messgröße zwischen zwei Messelektroden oder an einer Messelektrode in Bezug zu einem Referenzpotential, insbesondere einem Erdpotential ermittelt werden,

30 wobei sich mindestens eine für die Ermittlung der Messwerte der zweiten Messgröße eingerichtete Messelektrode von den für die Ermittlung der Messwerte der ersten Messgröße eingerichteten Messelektroden unterscheidet.

Es ist besonders vorteilhaft, wenn die magnetisch-induktive Durchflussmesssonde eine Auswerteschaltung aufweist, die dazu eingerichtet ist, die Reynolds-Zahl und/oder die von der Reynolds-Zahl abhängigen kinematischen Viskosität des Mediums in der Rohrleitung mittels Messwerten zweier an mindestens zwei Messelektroden abgegriffenen
5 Messgrößen zu ermitteln. Dabei unterscheidet sich die erste Messgröße von der zweiten Messgröße. Die beiden Messgrößen unterscheiden sich dadurch, dass sie zwischen unterschiedlichen Messelektrodenpaaren ermittelt oder an unterschiedlichen Messelektroden gemessen werden.

Messschaltungen im Bereich der Durchflussmesstechnik sind hinlänglich bekannt. Die
10 Aufgabe der Messschaltung ist es sehr kleine Absolutwerte und Änderungen der jeweiligen Messgröße zu detektieren. Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Ausgestaltungen, die jeweils ihre Vor- und Nachteile haben.

Zum einen kann die Messschaltung dazu eingerichtet sein, ein Potential an einer der
15 Messelektrode in Bezug auf ein Referenzpotential abzugreifen. Somit kann selbst dann, wenn eine der zwei Messelektroden ausfällt, weiterhin die Durchflussgeschwindigkeit anhand eines ermittelten Potentials bestimmt werden. Als Referenzpotential eignet sich das Gehäusepotential oder ein Erdpotential. Die magnetisch-induktive Durchflussmesssonde kann eine Erdungselektrode aufweisen, die mit dem Referenzpotential verbunden ist. Die beiden Messgrößen können demnach die an zwei
20 Messelektroden jeweils vorherrschenden und ermittelten elektrischen Potentiale sein.

Zum anderen kann die Messschaltung so ausgebildet sein, dass sie eine zwischen zwei
Messelektroden vorherrschende Potentialdifferenz detektiert und aufnimmt.

Alternativ kann die Messschaltung dazu eingerichtet sein, die Messspannung zwischen
25 der ersten und der zweiten Messelektrode und zusätzlich dazu, das Potential an einer der beiden oder einer dritten Messelektroden in Bezug auf das Referenzpotential zu messen.

Eine Messschaltung umfasst daher einen Analog/Digital-Wandler, der die eingehende
Signale, in dem Fall die aktuell an dem jeweiligen Messelektrodenpaar anliegende
Potentialdifferenz oder das an der jeweiligen Messelektrode vorherrschende elektrische
Potential, in digitale Daten umwandelt, die dann durch eine Auswerteschaltung
30 weiterverarbeitet oder gespeichert werden. Es sind aber auch andere Messumsetzer oder Messumformer der Digitalen Messtechnik bekannt und geeignet zum Detektieren einer Messspannung oder eines elektrischen Potentials.

Die Auswerteschaltung ist dazu eingerichtet, die durch die Messschaltung gemessenen
Messwerte der jeweiligen Messgrößen zu verarbeiten und die gesuchte Messgröße
35 ermitteln. Eine Auswerteschaltung umfasst daher üblicherweise Mikroprozessoren, Verstärker und Rauschfilter. Die Mess- und Auswerteschaltung können modular

ausgebildet sein und mittels einer drahtlosen Verbindung kommunizieren, oder Teil einer einzelnen Mess- und Auswerteelektronik sein, die in einem Gehäuse der Durchflusssonde angeordnet ist.

Das erfindungsgemäße Verfahren zum Betreiben einer magnetisch-induktiven Durchflusssonde, insbesondere des erfindungsgemäßen magnetisch-induktiven Durchflusssonde,

wobei die Durchflusssonde ein Gehäuse mit einer Gehäusewandung aufweist,

wobei eine magnetfelderzeugende Vorrichtung zum Erzeugen eines die Gehäusewandung durchsetzenden Magnetfeldes im Gehäuse angeordnet ist,

wobei Messelektroden an der Gehäusewandung angeordnet sind;

umfasst die Verfahrensschritte:

- Erfassen eines Messwertes einer ersten Messgröße und eines Messwertes einer zweiten Messgröße, die sich von der ersten Messgröße unterscheidet,

wobei die Messwerte der jeweiligen Messgrößen zwischen zwei Messelektroden oder an einer Messelektrode in Bezug auf ein Referenzpotential, insbesondere ein Erdpotential bestimmt werden;

- Ermitteln einer von der ersten und der zweiten Messgröße abhängigen Reynolds-Zahl.

Die Messwerte einer einzelnen Messgröße reichen nicht aus um die Reynolds-Zahl des Mediums in der Rohrleitung zu bestimmen, weil die zwei Unbekannten, nämlich die Reynolds-Zahl und der Durchfluss des Mediums, nicht durch eine einzelne Messgröße bestimmt werden kann. Deshalb ist das gesamte Messsystem üblicherweise so eingerichtet, dass die induzierte Messspannung über einen möglichst großen Reynolds-Zahlenbereich Reynolds-Zahl-unabhängig ist. Dadurch geht die Information der vorliegenden Reynolds-Zahl verloren. Es ist daher besonders vorteilhaft, wenn die Durchflusssonde dazu eingerichtet ist, zusätzlich zur ersten Messgröße zur Bestimmung eines Durchflusswertes eine zweite Messgröße, welche Reynolds-Zahl abhängig ist, zu bestimmen und unter Berücksichtigung beider Messgrößen die Reynolds-Zahl zu ermitteln. In dem Fall muss das Messsystem nicht so angepasst werden, dass die gemessenen Messspannungen möglichst Reynolds-Zahl-unabhängig sind, was die Gestaltung des Magnet- und Messsystems erheblich einschränkt.

Die erfindungsgemäße Durchflusssonde, umfasst

- eine Rohrleitung mit einem Durchmesser DN und einer Öffnung, und

- eine erfindungsgemäße magnetisch-induktive Durchflussmesssonde;

und ist dadurch gekennzeichnet,

dass die magnetisch-induktive Durchflussmesssonde in der Öffnung angeordnet ist und eine Einbautiefe D aufweist, welche insbesondere die Ungleichung $0,05 \leq D/DN \leq 0,4$ und bevorzugt $0,1 \leq D/DN \leq 0,2$ erfüllt.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Eine Ausgestaltung sieht vor, dass die Messelektroden so an der Gehäusewandung angeordnet sind, dass bei einer Testmessung Quotienten Messwerte der ersten und der zweiten Messgröße zumindest in einem Reynolds-Zahlenbereich von $10\,000 \leq Re \leq 100\,000$, insbesondere $5\,000 \leq Re \leq 500\,000$ und bevorzugt $1\,000 \leq Re \leq 1\,000\,000$ mit der Reynolds-Zahl des Mediums im Rohr bijektiv korrespondieren.

Die Anordnung der Messelektroden am Gehäuse der Durchflussmesssonde ist wesentlich für die Bestimmung der Reynolds-Zahl. Damit man anhand der beiden Messgrößen die Reynolds-Zahl ermitteln kann, müssen die Quotienten der Messwerte bzw. muss eine mathematische Funktion, welche den Quotienten der Messwerte der jeweiligen Messgröße in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl des Mediums im Rohr beschreibt, bijektiv sein. Dies wird durch die Position der Messelektrode am Gehäuse festgelegt.

Die Position der Messelektroden ist dahingehend optimiert, dass sich der Quotient der ersten und zweiten Messgröße, insbesondere der ersten und zweiten Messspannung U_1/U_2 bijektiv zur Reynolds-Zahl des fließenden Mediums im Rohr verhält. Die Optimierung kann experimentell oder mittels eines Simulationsverfahrens erfolgen, beispielsweise mittels Finite-Elemente Simulationen.

Für den Quotienten U_1/U_2 ergibt sich unter der Annahme, dass die Durchflussgeschwindigkeit die jeweils induzierte Messspannung einer gemeinsamen Durchflussgeschwindigkeit u entspringt,

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1(Re)}{f_2(Re)} \cdot \frac{S_1}{S_2} = g(Re) \cdot \frac{S_1}{S_2}.$$

Gemäß dem Fall, dass $g(Re)$ invertierbar ist gilt außerdem

$$Re = g^{-1} \left(U_1 \cdot \frac{S_2}{S_1 \cdot U_2} \right),$$

wobei g^{-1} die Umkehrfunktion von g ist. Die Bijektivität des Quotienten kann am einfachsten dadurch realisiert werden, dass die erste und die zweite Messelektrode so am Gehäuse angeordnet werden, dass der erste Korrekturfaktor $f_1(Re)$ über den

Reynolds-Zahlenbereich Reynolds-Zahl-unabhängig ist. In diesem Fall muss der zweite Korrekturfaktor f_2 bijektiv mit der Reynolds-Zahl korrespondieren. Die Position einer der beiden Messelektrode oder einer dritten Messelektrode wird daher idealerweise so gewählt, dass die Änderung des Korrekturfaktors $f_2(Re)$, welche die Reynolds-Zahl-
5 Abhängigkeit der zweiten Messgröße beschreibt, bzw. die Steigung des Quotienten U_1/U_2 für unterschiedliche Reynolds-Zahlen möglichst groß ist.

Es ist jedoch vorteilhaft, wenn mindestens drei Messelektroden für die Bestimmung der Messgrößen zur Verfügung stehen. Die Bijektivität des Quotienten kann dann dadurch realisiert werden, dass die erste und die zweite Messelektrode so am Gehäuse
10 angeordnet werden, dass der erste Korrekturfaktor $f_1(Re)$, der sich hinter der induzierten Messspannung verbirgt über den Reynolds-Zahlenbereich Reynolds-Zahl-unabhängig ist. In diesem Fall muss der zweite Korrekturfaktor f_2 bijektiv mit der Reynolds-Zahl korrespondieren. Die Position der dritten Messelektrode wird daher idealerweise so gewählt, dass die Änderung des Korrekturfaktors $f_2(Re)$ bzw. die Steigung des
15 Quotienten für unterschiedliche Reynolds-Zahlen möglichst groß ist. Der Korrekturfaktors $f_2(Re)$ kann demnach durch eine zwischen der ersten und der dritten Messelektrode ermittelte Messspannung, durch eine zwischen der zweiten und der dritten Messelektrode ermittelten Messspannung oder durch das an der dritten Messelektrode ermittelte Potential in Bezug auf das Referenzpotential bestimmt werden.

Die Positionierung der einzelne Messelektroden am Gehäuse ist ausschlaggebend für die Bestimmung der Reynolds-Zahl oder der kinematischen Viskosität. Zur Bestimmung der Reynolds-Zahl werden Messwerte zweier Messgrößen benötigt. Die erste Messgröße wird mit der Messschaltung an einem Messelektrodenpaar ermittelt. Das gleiche gilt vorzugsweise auch für die zweite Messgröße. Die Position der einzelnen Messelektroden
25 kann jedoch nicht beliebig gewählt werden. Es muss gelten, dass der Quotient der Messwerte der ersten und der zweiten Messgröße bijektiv mit der Reynoldszahl des fließenden Mediums im Rohr korrespondiert. Das heißt, dass die Quotienten der Messwerte der ersten und der zweiten Messgröße, gemessen über einen Reynolds-Zahlenbereich, durch eine mathematische Funktion beschrieben werden kann, die bijektiv zur Reynolds-Zahl ist bzw. dass die Menge der Quotienten der Messwerte über einen
30 Reynolds-Zahlenbereich bijektiv zu der verknüpften Menge der Reynolds-Zahlen korrespondiert.

Dies wird beispielsweise dadurch realisiert, dass man das erste Messelektrodenpaar diametral auf eine Frontfläche anordnen, wie es bei konventionellen
35 Durchflussmesssonden üblich ist, und die dritte Messelektrode bzw. die dritte und eine vierte Messelektrode versetzt zum ersten Messelektrodenpaar an der Frontfläche oder an einer Seitenfläche des Gehäuses anordnet.

Somit sind die Messwerte der ersten Messgröße im Wesentlichen Reynolds-Zahl-unabhängig und die Messwerte der zweite Messgröße Reynolds-Zahl-abhängig. Dies ist jedoch nicht die einzige Möglichkeit ein erfindungsgemäßes Durchflussmesssonde zu realisieren. Es ist auch vorstellbar, dass alle Messelektroden so angeordnet werden, dass
5 die an den Messelektroden über den Reynolds-Zahlenbereich bzw. über einen Teil des Reynolds-Zahlenbereich abgegriffenen Messwerte Reynolds-Zahl-abhängig sind. In diesem Fall muss aber der Quotient der Messwerte bijektiv mit der Reynolds-Zahl korrespondieren, damit die Reynolds-Zahl bestimmt werden kann.

Die Auswerteschaltung weist üblicherweise eine Speichereinheit auf, wobei die
10 Speichereinheit einen ersten Datensatz aufweist mit Referenzwerten, die mit der ersten und zweiten Messgröße korrelieren, und insbesondere proportional zum Quotienten der ersten und zweiten Messgröße sind, wobei die Speichereinheit einen zweiten Datensatz aufweist mit Reynolds-Zahlen, wobei der erste und der zweite Datensatz bijektiv korrespondieren, wobei die Auswerteschaltung dazu eingerichtet ist anhand des ersten
15 und zweiten Messgröße die korrespondierende Reynolds-Zahl des Mediums in der Rohrleitung zu ermitteln.

Als Speichereinheit eignet sich nicht flüchtiger Speicher, wie Flash-Speicher oder EPROM. Diese kann in der Auswerteschaltung integriert oder separat bereitgestellt sein. Die Speichereinheit weist vorzugsweise mindestens einen ersten und einen zweiten
20 Datensatz auf. Im ersten Datensatz sind Referenzwerte hinterlegt. Diese stammen von Computer-Simulationen oder von Justiermessungen. Die Referenzwerte können beispielsweise Quotienten der simulierten oder gemessenen Messwerte der ersten Messgröße und der zweiten Messgröße sein. Der zweite Datensatz weist Reynolds-Zahlen auf, die den Quotienten zugeordnet sind. Alternativ können Paare, aus jeweils
25 einer Reynolds-Zahl und einem Referenzwert in der Speichereinheit hinterlegt sein. Alternativ kann in der Speichereinheit auch eine mathematische Funktion hinterlegt sein, die den zwei Messgrößen oder einem Term, der von den zwei Messgrößen abhängt Reynolds-Zahlen zuordnet.

Eine Ausgestaltung sieht vor, dass die Messschaltung dazu eingerichtet ist, die
30 Messwerte der ersten Messgröße zwischen der ersten und der zweiten Messelektrode zu bestimmen,

wobei die Messschaltung dazu eingerichtet ist, Messwerte der zweiten Messgröße zwischen einer ersten und einer dritten Messelektrode oder zwischen einer zweiten und der dritten Messelektrode zu ermitteln.

Die Messschaltung ist vorzugsweise dermaßen ausgebildet, dass sie eine erste
35 Potentialdifferenz U_1 zwischen einem ersten Messelektrodenpaar und eine zweite Potentialdifferenz U_2 zwischen einem zweiten Messelektrodenpaar ermittelt. Die

Bestimmung der Messspannung erfolgt entweder durch das direkte Messen der Potentialdifferenz zwischen den beiden Messelektroden oder durch das Messen des jeweils an den Messelektroden vorherrschenden, elektrischen Potentials in Bezug auf ein Referenzpotential und dem Bilden einer Differenz. Dabei gilt $U_1 = f_1(Re) \cdot S_1 \cdot u$ und $U_2 =$
5 $f_2(Re) \cdot S_2 \cdot u$, wobei $f_1(Re)$ und $f_2(Re)$ jeweils einen Reynolds-Zahl-abhängigen Korrekturfaktor beschreiben. Die ermittelten Messwerte werden an eine Auswerteschaltung weitergeleitet, die eine Speichereinheit umfasst, in der Referenzwerte und Reynolds-Zahlen hinterlegt sind bzw. in der eine mathematische Funktion, welche Reynolds-Zahlen Referenzwerten zuordnet hinterlegt ist.

10 Es ist vorteilhaft, wenn die Durchflussmesssonde genau drei Messelektroden aufweist. Dadurch reduziert sich die Anzahl an potentiellen Leckage-Stellen auf drei. Diese Ausgestaltung lässt sich am einfachsten dadurch realisieren, dass eine herkömmliche magnetisch-induktive Durchflussmesssonde mit zwei Messelektroden um eine weitere Messelektrode erweitert wird. Diese kann an einer Seitenfläche des Gehäuses
15 angeordnet sein oder an der Frontfläche, versetzt zur ersten und zweiten Messelektrode.

Es ist besonders vorteilhaft, wenn die drei Messelektroden auf einer, auf der Stirnfläche des Gehäuses verlaufenden Gerade, insbesondere eines Durchmessers der Frontfläche angeordnet sind. Beim Einhalten der vorgegebenen Einbaulage, liegt bei dieser Ausgestaltung an den jeweiligen Messelektrodenpaaren eine deutlich größeres
20 Messsignal vor, als sonst.

Spielt die Messsignalstärke jedoch nur eine untergeordnete Rolle, so ergibt sich durch das Versetzen der dritten Messelektrode bezüglich des die erste und zweite Messelektrode schneidenden Gerade ein weiterer Freiheitsgrad für die Optimierung der Reynolds-Zahl abhängigen bzw- für der zweiten Messgröße.

25 Eine Ausgestaltung sieht vor, dass die Messschaltung dazu eingerichtet ist die Messwerte der ersten Messgröße zwischen der ersten und der zweiten Messelektrode zu bestimmen,

wobei die Messschaltung dazu eingerichtet ist Messwerte der zweiten Messgröße zwischen einer dritten und einer vierten Messelektrode zu ermitteln.

30 Die Messschaltung ist vorzugsweise dermaßen ausgebildet, dass sie eine erste Potentialdifferenz U_1 zwischen einem ersten Messelektrodenpaar und eine zweite Potentialdifferenz U_2 zwischen einem zweiten Messelektrodenpaar ermittelt. Die Bestimmung der Messspannung erfolgt entweder durch das direkte Messen der Potentialdifferenz zwischen den beiden Messelektroden oder durch das Messen des
35 jeweils an den Messelektroden vorherrschenden, elektrischen Potentials in Bezug auf ein Referenzpotential und dem Bilden einer Differenz. Dabei gilt $U_1 = f_1(Re) \cdot S_1 \cdot u$ und $U_2 =$

$f_2(Re) \cdot S_2 \cdot u$, wobei $f_1(Re)$ und $f_2(Re)$ jeweils einen Reynolds-Zahl-abhängigen Korrekturfaktor beschreiben. Die ermittelten Messwerte werden an eine Auswerteschaltung weitergeleitet, die eine Speichereinheit umfasst, in der Referenzwerte und Reynolds-Zahlen hinterlegt sind bzw. in der eine mathematische Funktion, welche Reynolds-Zahlen Referenzwerten zuordnet hinterlegt ist.

Um Common-Mode Störungen zu vermeiden und somit das Rauschen im Signal zu minimieren, ist es vorteilhaft, wenn es sich bei den beiden Messgrößen nicht um Potentiale im Bezug zu einem Referenzpotential handelt, sondern um Potentialdifferenzen, die gemessen werden.

Bei herkömmlichen magnetisch-induktiven Durchflussmesssonden wird das Magnetsystem und die Position der Messelektroden dahingehend optimiert, dass das jeweils an den Messelektroden vorherrschende elektrische Potential linear mit der Durchflussgeschwindigkeit korreliert. Fügt man nun eine dritte Messelektrode hinzu und misst die Potentialdifferenz zwischen der dritten und einer der beiden Messelektroden, so geht immer der Einfluss des linearisierten Messsystems mit in die zweite Messgröße ein. Diese sollte jedoch über einen möglichst großen Reynolds-Zahlenbereich Reynolds-Zahl-abhängig sein.

Es ist daher besonders vorteilhaft, wenn die Messwerte der zweiten Messgröße an der dritten und einer vierten Messelektrode abgegriffen werden, die versetzt zum ersten Messelektrodenpaar angeordnet sind. Dadurch ist auch die am zweiten Messelektrodenpaar anliegende Potentialdifferenz von den beiden Potentialen der ersten Messgröße entkoppelt.

Es ist besonders vorteilhaft, wenn das erste Messelektrodenpaar diametral bzw. auf der Frontfläche des Gehäuses angeordnet ist.

Eine Ausgestaltung sieht vor, dass das Gehäuse zumindest abschnittsweise zylindrisch geformt ist und eine Mantelfläche aufweist,

wobei die dritte Messelektrode an der Mantelfläche angeordnet ist und einen galvanischen Kontakt mit dem Medium bildet.

Dabei kann die dritte Messelektrode durch eine einzelne Stiftelektrode gebildet sein, oder sich über die gesamte Mantelfläche des Gehäuses erstrecken bzw. durch den leitfähigen Mantelkörper des Gehäuses gebildet sein. Durch die Anbringung der dritten Messelektroden an die Mantelfläche eröffnen sich weitere Optimierungsmöglichkeiten für die jeweiligen Reynolds-Zahl abhängigen Messgrößen, so dass der Bereich, in dem der Quotient der beiden Messgrößen bijektiv mit der Reynolds-Zahl korrespondiert, erweitert werden kann.

Des Weiteren lassen sich durch diese spezielle Anordnung besonders schmale Durchflussmesssonden realisieren.

Eine Ausgestaltung sieht vor, dass die erste, zweite und eine dritte Messelektrode an einer Stirnfläche des Gehäuses angeordnet sind.

5 Dies ist besonders dann vorteilhaft, da ein umständliches Abdichten der Messelektroden an der Mantelfläche des überwiegend zylinderförmigen Gehäuses vermieden wird. Des Weiteren ist der Herstellungsaufwand dieser speziellen Durchflussmesssonde erheblich geringer. Für Anwendungen in Rohre mit geringem Durchmesser ist die Einbautiefe so gering, dass nur ein minimaler Anteil der Mantelfläche das Medium berührt.

10 Eine Ausgestaltung sieht vor, dass die erste und die zweite Messelektrode auf einem auf der Stirnfläche verlaufenden und koaxial zum Gehäuse angeordneten Kreisumfang liegen,

wobei der Kreisumfang einen Bereich umschließt, in dem die dritte Messelektrode angeordnet ist oder bevorzugt die dritte und die vierte Messelektrode angeordnet sind.

15 Es ist besonders vorteilhaft, wenn die drei Messelektroden an der Stirnfläche angeordnet sind. Simulationen konnten zeigen, dass es für ein herkömmliches Magnetsystem aus Spulenkern, Spule und Rückführkörper, bei dem sich der Spulenkern unmittelbar bis zum Frontende erstreckt, vorteilhaft ist, wenn zusätzlich zu den beiden herkömmlichen Messelektroden eine oder zwei weitere Messelektroden am Frontende, insbesondere auf
20 der durch die zwei Messelektroden definierten Kreisfläche, angebracht werden.

Dabei gilt für die Positionierung der ersten und zweiten Messelektrode idealerweise, dass $R_{12}/R_f \geq 0,8$ und bevorzugt $R_{12}/R_f \geq 0,9$ erfüllt wird, wobei R_f der Radius der Frontfläche zum Mittelpunkt ist, wobei die Frontfläche üblicherweise kreisrund ausgebildet ist und wobei R_{12} den Abstand der ersten und zweiten Messelektrode zum Mittelpunkt
25 beschreibt.

Eine Ausgestaltung sieht vor, dass die erste und die zweite Messelektrode auf einer, auf der Stirnfläche verlaufenden Gerade angeordnet sind,

wobei die dritte und die vierte Messelektrode durch die Gerade geschnitten werden,

30 wobei die dritte und die vierte Messelektrode zwischen der ersten und der zweiten Messelektrode angeordnet sind.

Es hat sich erstaunlicherweise gezeigt, dass für die Erfüllung der bijektiven Relation zwischen den beiden Messwerten es bereits ausreicht, wenn zwischen den

herkömmlichen zwei Messelektroden, zwei weitere Messelektroden angeordnet werden, wobei alle vier Messelektroden im Wesentlichen auf einer Geraden liegen.

Durch die Anordnung aller Messelektroden auf einer Gerade kann für beide Messelektrodenpaare eine maximale Signalstärke erreicht werden. Des Weiteren bleibt
5 für diese Ausgestaltung ein bidirektionaler Einsatz der Durchflussmesssonde in der Rohrleitung erhalten.

Eine Ausgestaltung sieht vor, dass die Messelektroden auf Kreisumfängen konzentrischer Kreise liegen,

wobei die erste und die zweite Messelektrode auf einem der Kreisumfänge mit
10 einem Radius R_{12} liegen,

wobei die dritte und die vierte Messelektrode auf einem der Kreisumfänge mit einem Radius R_{34} liegen,

wobei ein Verhältnis der beiden Radien die Ungleichung
 $0,2 \leq R_{34}/R_{12} \leq 0,9$, insbesondere $0,3 \leq R_{34}/R_{12} \leq 0,7$ und bevorzugt
15 $0,4 \leq R_{34}/R_{12} \leq 0,6$ erfüllt.

Es ist besonders vorteilhaft, wenn bei der Anordnung der Messelektroden die oben angegebene Grenzen für das Verhältnis der beiden Radien eingehalten werden. Wenn die dritte und vierte Messelektroden die Bedingung erfüllen, ist die induzierte Messspannung Reynolds-Zahl-abhängig bzw. weist der Korrekturfaktor $f(Re)$ eine
20 besonders große Reynolds-Zahl-Abhängigkeit auf, so dass bereits geringe Änderungen der Reynolds-Zahl des Mediums detektiert werden können.

Eine Ausgestaltung sieht vor, dass aktuelle Messwerte der ersten Messgröße bei der Testmessung in einem Reynolds-Zahlenbereich von $10\,000 \leq Re \leq 100\,000$ im Wesentlichen proportional zur Durchflussgeschwindigkeit des Mediums sind,

wobei eine Änderung aktueller Messwerte der zweiten Messgröße mit
25 zunehmender Reynolds-Zahl bei der Testmessung in einem Reynolds-Zahlenbereich von $10\,000 \leq Re \leq 100\,000$ nicht konstant ist.

Bei Reynolds-Zahlen kleiner 1 000 befindet sich die Strömung in einem Übergangsbereich zwischen turbulenter und laminarer Strömung und $f(Re)$ lässt sich
30 nicht mehr durch eine definierte Funktion beschreiben. $f(Re)$ weist ein Hysterese-Verhalten auf oder variiert über die Zeit. Bei großen Reynolds-Zahlen ist das Strömungsprofil Reynolds-Zahl-unabhängig und somit $f(Re)$ für beide Messgrößen konstant. In dem Fall kann die Reynolds-Zahl nicht bestimmt werden.

Eine Ausgestaltung sieht vor, dass das fließende Medium in der Testmessung ein newtonsches Fluid, insbesondere Wasser ist,

wobei in der Testmessung das Durchflussmesssonde so in einer Rohrleitung mit einer geraden Einlaufstrecke von mindestens 20 DN und bevorzugt mindestens 50 DN
5 eingebracht ist, dass ein im Wesentlichen symmetrisches Strömungsprofil im Medium vorliegt,

wobei die Rohrleitung einen Durchmesser DN von DN 80 aufweist,

wobei ein Abstand zwischen der Stirnfläche und einer Innenwandung der Rohrleitung die Einbautiefe D beschreibt,

10 wobei die Einbautiefe $0,05 \leq D/DN \leq 0,4$ und bevorzugt $0,1 \leq D/DN \leq 0,2$ erfüllt.

Die Testmessung beschreibt eine Messumgebung, in der die Bedingung für die Bestimmung der Reynolds-Zahl, nämlich die Bijektivität der Abbildung des Quotienten der beiden Messgrößen auf die Reynolds-Zahl, erfüllt ist.

15 Eine Ausgestaltung sieht die Verfahrensschritte vor:

- Bilden eines Referenzwertes aus den Messwerten der ersten und der zweiten Messgröße,

wobei der Referenzwert proportional zum Quotienten der Messwerte der ersten und der zweiten Messgröße ist; und

20 - Ermitteln einer Reynolds-Zahl in Abhängigkeit des Referenzwertes.

Es ist besonders vorteilhaft, wenn die Reynolds-Zahl bestimmt und an den Benutzer ausgegeben wird. Dadurch lässt sich unkompliziert überprüfen, ob die vom Hersteller angegebene Messgenauigkeit noch gilt, oder ob die vorliegende Reynolds-Zahl außerhalb des Anwendungsbereiches liegt.

25 Eine Ausgestaltung sieht die Verfahrensschritte vor:

- Bilden einer korrigierten Durchflussgeschwindigkeit und/oder eines korrigierten Volumendurchflusses mittels eines von der Reynolds-Zahl abhängigen Korrekturfaktors; und/oder

30 - Ermitteln des kinematischen Viskositätswertes des Mediums im Rohr mittels Messwerte der ersten oder der zweiten Messgröße und der ermittelten Reynolds-Zahl.

Es ist besonders vorteilhaft, wenn in der Speichereinheit Korrekturfaktoren, insbesondere einer der beiden Korrekturfaktoren f_1 und f_2 hinterlegt sind, die zur genaueren Bestimmung der Durchflussgeschwindigkeit und/oder des Volumendurchflusses dienen. Die Korrekturfaktoren können in einem Simulationsverfahren bestimmt oder beim

5 Justierverfahren ermittelt bzw. gemessen werden.

Mittels der Korrekturfaktoren können Reynolds-Zahl-bedingte Abweichungen des Durchflussmesswertes reduziert werden, so dass der Reynolds-Zahlenbereich vergrößert wird, in dem die angegebene Messgenauigkeit erfüllt wird.

Eine Ausgestaltung sieht vor, dass eine Funktion, welche Reynolds-Zahlen Quotienten der ersten und der zweiten Messgröße zuordnet, zumindest in einem Reynolds-Zahlenbereich von $10\,000 \leq Re \leq 100\,000$, insbesondere $5\,000 \leq Re \leq 500\,000$ und bevorzugt $1\,000 \leq Re \leq 1\,000\,000$ bijektiv ist.

10

Die Ausgabe der Messwerte erfolgt beispielsweise über ein, mit der Durchflusssonde verbundenes Display. Alternativ kann das Display auch Teil eines Smartphones oder Laptops sein und über eine kabellose Verbindung die anzuzeigenden

15 Messwerte von der Auswerteschaltung erhalten. Alternative und in der Prozessautomatisierung bekannte Ausgabeeinheiten sind Systeme zur Datenübertragung, wie Feldbusse oder Echtzeit-Ethernet.

Die Erfindung wird anhand der nachfolgenden Figuren näher erläutert. Es zeigt:

20 Fig. 1: eine perspektivische und teilweise geschnittene Darstellung einer magnetisch-induktiven Durchflusssonde nach dem Stand der Technik;

Fig. 2: eine Längsschnittdarstellung einer in einer Rohrleitung installierten magnetisch-induktiven Durchflusssonde nach dem Stand der Technik;

25 Fig. 3: eine Frontansicht einer ersten Ausgestaltung der erfindungsgemäßen magnetisch-induktiven Durchflusssonde;

Fig. 4: eine Frontansicht einer zweiten Ausgestaltung der erfindungsgemäßen magnetisch-induktiven Durchflusssonde;

Fig. 5: eine Längsschnittdarstellung der ersten Ausgestaltung der erfindungsgemäßen magnetisch-induktiven Durchflusssonde mit zusätzlichem Paddel;

30 Fig. 6: eine Längsschnittdarstellung einer dritten Ausgestaltung der erfindungsgemäßen magnetisch-induktiven Durchflusssonde;

Fig. 7: eine Längsschnittdarstellung einer vierten Ausgestaltung der erfindungsgemäßen magnetisch-induktiven Durchflusssonde;

Fig. 8: zwei Diagramme, wobei das erste Diagramm die Funktionen $f_1(Re)$ und $f_2(Re)$ in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl und das zweite Diagramm den Quotienten g der beiden Funktionen $f_1(Re)$ und $f_2(Re)$ in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl abbildet;

5 Fig. 9: ein Diagramm, welches den Fehler in Abhängigkeit von der Durchflussgeschwindigkeit des Mediums für verschiedene Elektrodenanordnungen darstellt; und

Fig. 10: ein Flussdiagramm einer Ausgestaltung des Verfahrens zum Betreiben einer magnetisch-induktiven Durchflussmesssonde.

10 Anhand der perspektivischen und teilweise geschnittenen Darstellung der Fig. 1 wird zunächst das der Erfindung zugrunde liegende Messprinzip erläutert. Eine Durchflussmesssonde 1 umfasst ein im allgemeinen kreiszylindrisches, einen vorgegebenen Außendurchmesser aufweisendes Gehäuse 3. Dieses ist an den Durchmesser einer Bohrung angepasst, die sich in einer Wand einer in Fig. 1 nicht, dagegen in Fig. 2 dargestellten Rohrleitung 13 befindet und in die die

15 Durchflussmesssonde 1 fluiddicht eingesteckt ist. In der Rohrleitung 13 strömt ein zu messendes Medium, in das die Durchflussmesssonde 1 praktisch senkrecht zur Strömungsrichtung des Mediums eintaucht, die durch die gewellten Pfeile 12 angedeutet ist. Ein in das Medium ragendes Frontende 2 des Gehäuses 3 ist mit einem Frontteil 6 aus Isoliermaterial fluiddicht verschlossen. Mittels einer im Gehäuse 2 angeordneten

20 Spulenordnung 9 lässt sich ein durch das Frontende hindurch, in das Medium hineinreichendes Magnetfeld 8 erzeugen. Ein mindestens teilweise aus einem weichmagnetischen Material bestehender, im Gehäuse 2 angeordneter Spulenkern 7 endet an oder in der Nähe des Frontendes. Eine Rückführung 10, die die Spulenordnung 9 und den Spulenkern 7 umschließt, ist dazu eingerichtet das aus dem

25 Frontende hindurchreichenden Magnetfeld 8 in das Gehäuse 2 zurückzuführen. Der Spulenkern 7, die Spulenordnung 9 und eine Rückführung 10 bilden eine magnetfelderzeugende Vorrichtung. Eine erste und eine zweite galvanische Messelektrode 4, 5 sind in dem Frontteil 6 angeordnet und berühren das Medium. An den

30 Messelektroden 4, 5 lässt sich eine aufgrund des Faraday'schen Induktionsgesetzes induzierte elektrische Spannung mittels einer Mess- und/oder Auswerteeinheit 11 abgreifen. Diese ist maximal, wenn die Durchflussmesssonde so in die Rohrleitung 13 eingebaut ist, dass eine durch eine die beiden Messelektroden 4, 5 schneidende Gerade und eine Längsachse der Durchflussmesssonde aufgespannte Ebene senkrecht zu der Strömungsrichtung 12 bzw. Längsachse der Rohrleitung 21 verläuft.

35 Die Fig. 2 stellt ein in eine Rohrleitung eingebaute Durchflussmesssonde 1 im Längsschnitt dar. Die Durchflussmesssonde 1 ist mittels einer Einschraubverbindung 14, die in die Wand der Rohrleitung 13 eingesetzt und mit ihr z.B. verschweißt ist, in der

Rohrleitung 13 fluiddicht befestigt. Dieser Aufbau der Messstelle ist besonders zweckmäßig, da zunächst die Einschraubverbindung 14 in die Rohrleitung 13 eingesetzt und darin eingeschweißt werden kann und erst danach die Durchflussmesssonde 1 in den Einschraubverbindung 14 eingesteckt, ihrerseits darin eingeschraubt und mittels
5 einer Dichtung 15 abgedichtet zu werden braucht. Dadurch entsteht einbaubedingt ein unbekannter Einbauwinkel. Die erste, zweite, dritte und vierte Messelektrode 4, 5, 19, 20 sind auf dem Frontende 2 symmetrisch zu einem Zentrum 6 des Frontendes 2 angeordnet. Alle vier Messelektroden 4, 5, 19, 20 liegen auf einer Gerade. Die Einbautiefe D gibt an, wie tief die Durchflussmesssonde in das Medium eingeführt ist bzw.
10 in das Rohr hineinragt.

Die Fig. 3 bis 7 zeigen unterschiedliche Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen magnetisch-induktiven Durchflussmesssonde. Die Ausgestaltungen unterscheiden sich darin, dass die Positionierung der Messelektroden variiert. Um die Übersichtlichkeit der Figuren zur gewährleisten wird auf die Darstellung der magnetfelderzeugende
15 Vorrichtung verzichtet. In der Fig. 1 oder 2 wird jeweils ein Magnetsystem offenbart, das eine Spule, einen Spulenkern und einen Rückführkörper offenbart. Es sind aber auch andere magnetfelderzeugende Vorrichtungen bekannt, die in magnetisch-induktiven Durchflussmesssonden verbaut werden. Die genaue Anordnung der Messelektroden hängt von der Geometrie und Anordnung der magnetfelderzeugenden Vorrichtung ab.
20 Diese muss daher bei der Optimierung der idealen Anordnung der Messelektroden berücksichtigt werden.

Die Fig. 3 zeigt eine schematische Frontansicht eines ersten Ausführungsbeispiels der erfindungsgemäßen Durchflussmesssonde. Ein Pfeil deutet die Strömungsrichtung 12 des fließenden Mediums an. Die ideale Einbauorientierung verlangt, dass eine das
25 Messelektrodenpaar schneidende Bezugsgerade 21 senkrecht zur Strömungsrichtung 12 des Mediums verläuft. Die erste und die zweite Messelektrode 3, 4 sind auf der Bezugsgerade liegend auf der Frontfläche 22 angeordnet und ihre Positionierung ist so an die magnetfelderzeugende Vorrichtung angepasst, dass die an den beiden Messelektroden 3, 4 anliegende, induzierte Messspannung über den angegebenen
30 Reynolds-Zahlenbereich linear ist. Zusätzlich zu der ersten und zweiten Messelektrode 3, 4 ist eine dritte und vierte Messelektrode 19, 20 an der Frontfläche 22 angeordnet. Die dritte und vierte Messelektrode 19, 20 liegen auch auf der Bezugsgerade 21 und sind zwischen der ersten und zweiten Messelektrode 4, 5 angeordnet. Die erste und zweite Messelektrode 4, 5 liegen auf einem Kreisumfang mit Radius R_{12} und die dritte und vierte
35 Messelektrode liegen auf einem Kreisumfang mit Radius R_{34} . Gemäß dieser Ausgestaltung ist $R_{34} < R_{12}$.

Die Messschaltung ist dermaßen ausgebildet, dass sie eine erste Potentialdifferenz U_1 zwischen der ersten und der zweiten Messelektrode 4, 5 und eine zweite

Potentialdifferenz U_2 zwischen der dritten und vierten Messelektrode 20, 21 abgreift, mit

$$U_1 = f_1(Re) \cdot S_1 \cdot u \text{ und}$$

$U_2 = f_2(Re) \cdot S_2 \cdot u$, wobei $f_1(Re)$ und $f_2(Re)$ jeweils einen Reynolds-Zahl-abhängigen

Korrekturfaktor beschreiben. Die Positionierung der dritten und vierten Messelektrode 20,

5 21 ist dahingehend optimiert, dass sich der Quotient der ersten und zweiten

Potentialdifferenz U_1/U_2 bijektiv zur Reynolds-Zahl des fließenden Mediums im Rohr

verhält bzw. dass sich eine von der ersten und zweiten Potentialdifferenz abhängige,

mathematische Funktion, die die Reynolds-Zahl auf den Quotienten abbildet bijektiv ist.

Die Optimierung der Anordnung kann experimentell oder mittels eines

10 Simulationsverfahrens erfolgen, beispielsweise mittels Finite-Elemente Simulationen.

Für den Quotienten U_1/U_2 ergibt sich

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1(Re)}{f_2(Re)} \cdot \frac{S_1}{S_2} = g(Re) \cdot \frac{S_1}{S_2}.$$

Gemäß dem Fall, dass gRe invertierbar ist gilt außerdem

$$Re = g^{-1}\left(U_1 \cdot \frac{S_2}{S_1 \cdot U_2}\right),$$

15 wobei g^{-1} die Umkehrfunktion von g ist. Die Bijektivität des Quotienten kann am einfachsten dadurch realisiert werden, dass die erste und die zweite Messelektrode so im Gehäuse angebracht werden, dass der erste Korrekturfaktor $f_1(Re)$ über den Reynolds-Zahlenbereich Reynolds-Zahl-unabhängig ist. In diesem Fall muss der zweite Korrekturfaktor f_2 bijektiv mit der Reynolds-Zahl korrespondieren.

20 Die Messschaltung ist dazu eingerichtet eine Potentialdifferenz zwischen der ersten und der zweiten Messelektrode 3, 4 und eine Potentialdifferenz an der dritten und vierten Messelektrode 19, 20 abzugreifen oder an den jeweiligen Messelektrode ein Potential in Bezug auf ein Referenzpotential zu messen. Die Messdaten werden an eine Auswerteeinheit weitergeleitet, die eine Speichereinheit umfasst, in der Referenzwerte und Reynolds-Zahlen hinterlegt sind. Eine Auswerteschaltung ist dazu eingerichtet, aus
25 den gemessenen Messdaten und den hinterlegten Referenzdaten die Reynolds-Zahl des Mediums im Rohr zu bestimmen. Ist die Reynolds-Zahl bekannt, so lässt sich die kinematische Viskosität mit Hinzunahme der Messwerte der ersten oder der zweiten Messgröße oder der bereits bestimmten Durchflussgeschwindigkeit bzw. des
30 Volumendurchflusses berechnen. Die Messschaltung, Auswerteschaltung und die Speichereinheit können anders als in der schematischen Darstellung abgebildet auf einer Elektronikeinheit angeordnet sein.

Gemäß der ersten Ausgestaltung liegen die Messelektroden, an denen eine möglichst Reynolds-Zahlen unabhängige Messspannung abgegriffen wird, auf einem Kreisumfang,

welcher einen Bereich einschließt, in dem die beiden Messelektroden angeordnet sind, an denen eine Reynolds-Zahlen abhängige Messspannung abgegriffen wird. Mit einer Anpassung des Magnetsystems kann aber auch die an den innenliegenden Messelektroden anliegende Messspannung linear mit der Durchflussgeschwindigkeit korrelieren und die an den außenliegenden Messelektroden anliegende Messspannung Reynolds-Zahl abhängig sein. Erfindungsgemäß muss nur erfüllt sein, dass der Quotient der beiden induzierten und gemessenen Messspannungen bijektiv über einen festgelegten Reynolds-Zahlenbereich sein muss.

Die Fig. 4 zeigt eine Frontansicht einer zweiten Ausgestaltung der erfindungsgemäßen magnetisch-induktiven Durchflussmesssonde. In dieser Ausgestaltung sind vier Messelektroden 4, 5, 19, 20 an dem Frontende 2 der Durchflussmesssonde angeordnet. Dabei schneidet eine erste Messelektrodenachse 24 das zweite Messelektrodenpaar 19, 20 und eine zweite Messelektrodenachse 25 das erste Messelektrodenpaar 4, 5. Beide Messelektrodenachsen 24, 25 verlaufen im Wesentlichen parallel zueinander. Eine die die Frontfläche in zwei gleich große Flächen einteilende und parallel zur ersten oder zweiten Messelektrodenachse 24, 25 verlaufende Bezugsgerade 21 verläuft durch den Mittelpunkt 23 des Frontendes 2. Eine der zwei das zweite Messelektrodenpaar bildenden Messelektroden 19, 20 und der Mittelpunkt 23 werden durch einen zweiten Radius geschnitten. Eine der zwei das erste Messelektrodenpaar bildenden Messelektroden 4, 5 und der Mittelpunkt 23 der Frontfläche 2 werden durch eine erste Gerade so geschnitten, dass die Bezugsgerade 21 und die erste Gerade einen Winkel β aufspannen. Eine erste Gerade, welche den Mittelpunkt 23 und eine der beiden das erste Messelektrodenpaar bildenden Messelektroden 4, 5 schneidet, spannt zusammen mit der Bezugsgeraden 21 einen Winkel α auf. Wählt man die Winkel so, dass $\alpha = \beta = 0^\circ$ gilt, endet man bei der ersten Ausgestaltung. Ausgehend vom Magnetsystem lassen sich die Winkel α und β so optimieren, dass an einem Messelektrodenpaar eine Reynolds-Zahl unabhängige Messspannung und am anderen Messelektrodenpaar eine Reynolds-Zahl abhängige Messspannung induziert wird, wobei die jeweilige Abhängigkeit für einen beschränkten Reynolds-Zahlenbereich gilt. Die Bezugsgerade 21 orientiert sich zusätzlich auch senkrecht zur Fließrichtung des Mediums. Die Durchflussmesssonde wird so in das Rohr eingebaut, dass die Fließrichtung des Mediums senkrecht zur Bezugsgeraden 21 verläuft.

Die Fig. 5 zeigt eine Längsschnittdarstellung einer Modifizierung der ersten Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Durchflussmesssonde. Im Unterschied zur Fig. 1 weist das Frontende 2 ein Paddel 26 auf. Somit wird das Frontende 2 nicht durch eine einzelne Frontfläche, sondern durch mehrere Frontflächen, die teilweise senkrecht zueinander stehen oder parallel verlaufen, gebildet. Das heißt auch, dass die Messelektroden an den Seitenflächen oder an der Frontfläche des Paddels 26 angeordnet sein können. Gemäß der ersten Ausgestaltung sind die Messelektroden jedoch nicht am Paddel 26 angebracht. Die Messelektroden 4, 5, 19, 20 befinden sich im Bereich zwischen dem Paddel 26 und

dem Randbereich des Frontendes 2. Die erste und zweite Messelektrode 4, 5 weisen jeweils einen Abstand R_{12} zum Mittelpunkt des Frontendes auf. Die Position der beiden Messelektroden 4, 5 ist dahingehend optimiert, dass der Korrekturfaktor zur Ermittlung der Durchflussgeschwindigkeit unabhängig von der Reynolds-Zahl ist. Der Mittelpunkt des Frontendes liegt auf einer Längsebene der Durchflussmesssonde, die auch gleichzeitig eine Spiegelebene ist. Die dritte und vierte Messelektrode 19, 20 liegen auf dem Umfang eines Kreisumfangs mit Radius R_{34} zum Mittelpunkt. Die Position der beiden Messelektroden 19, 20 ist dahingehend optimiert, dass der Korrekturfaktor zur Ermittlung der Durchflussgeschwindigkeit von der Reynolds-Zahl abhängig ist. Für die in der Fig. 5 abgebildete Ausgestaltung gilt, dass $R_{34} < R_{12}$ ist.

Die Fig. 6 zeigt eine Längsschnittdarstellung einer zweiten Ausgestaltung, bei der die dritte und vierte Messelektrode 19, 20 an der Mantelfläche (28) des Gehäuses und die erste und zweite Messelektrode 4, 5 an dem Frontende 2 angeordnet sind. In dieser Ausgestaltung ist die Anordnung, der an der Frontfläche angeordneten Messelektroden 4, 5 dahingehend an die magnetfelderzeugenden Vorrichtung angepasst, dass der Durchflussmesswert über einen möglichst großen Reynolds-Zahlenbereich linear mit der ermittelten Messspannung korreliert. Die Positionierung der an der Ummantelung angeordneten Messelektroden 19, 20 in Korrelation mit dem Magnetsystem ist so gewählt, dass die an den beiden Messelektroden induzierte Messspannung über einen möglichst großen Reynolds-Zahlenbereich Reynolds-Zahl abhängig ist. Die Optimierung dieser beiden Messelektroden 19, 20 erfolgt dermaßen, dass die Steigung des Korrekturfaktors $f(Re)$ bei variierender Reynolds-Zahl möglichst groß wird.

Es sind magnetisch-induktive Durchflussmesssonden im Stand der Technik bekannt, welche Messelektroden aufweisen, die ausschließlich an der Mantelfläche (28) des Gehäuses angebracht sind. Entsprechend ist die magnetfelderzeugende Vorrichtung auch so angepasst, dass die induzierte Messspannung linear mit der Durchflussgeschwindigkeit korreliert. Ausgehend von derartigen Durchflussmesssonden wird die Anordnung der ersten und zweiten Messelektroden (4, 5) in Abhängigkeit zum Magnetsystem so gewählt, dass die induzierte Messspannung über einen möglichst großen Reynolds-Zahlenbereich Reynolds-Zahl abhängig ist, bzw. dass der Gradient des Korrekturfaktors mit zunehmende Reynolds-Zahl möglichst groß ist.

Die Fig. 7 zeigt einen Längsschnitt einer vierten Ausgestaltung. Zusätzlich zur ersten und zweiten Messelektroden 4, 5, welche beide am Frontende 2 angeordnet sind, ist auch eine dritte Messelektrode 19 auf der Frontfläche positioniert. Der Abstand der ersten und zweiten Messelektrode 4, 5 definiert den Durchmesser eines Kreises. Dabei liegt die dritte Messelektrode 19 außerhalb der Kreisfläche. Gemäß der vierten Ausgestaltung ist die Messschaltung so eingerichtet, dass eine Messspannung an der ersten und zweiten Messelektrode 4, 5 und ein elektrisches Potential an der dritten Messelektrode 19 in Bezug

auf ein Erdpotential oder eine Messspannung zwischen der dritten und der ersten bzw. zweiten Messelektrode 19, 4 bzw. 19, 5 abgegriffen wird.

Für alle Ausgestaltungen gilt, dass die Positionierung der Messelektroden so in Beziehung zur magnetfelderzeugenden Vorrichtung gewählt werden muss, dass eine erste Messgröße, die über einen Reynolds-Zahlenbereich Reynolds-Zahl unabhängig ist, und eine zweite Messgröße ermittelt werden kann, die über den gleichen Reynolds-Zahlenbereich Reynolds-Zahl abhängig ist. Insbesondere muss gelten, dass der Quotient der beiden Messgrößen für unterschiedliche Reynolds-Zahlen eine bijektive, mathematische Funktion beschreibt.

Die Fig. 8 zeigt zwei Diagramme, wobei das erste Diagramm einen Zusammenhang zwischen der einzelnen Korrekturfaktoren f_1 , f_2 und der Reynolds-Zahl des fließenden Mediums im Rohr darstellt und das zweite Diagramm einen Zusammenhang zwischen den Quotienten der Korrekturfaktoren g und der Reynolds-Zahl des fließenden Mediums im Rohr darstellt. Die beiden Diagramme beschränken sich auf einen Reynolds-Zahlenbereich von ca. 10^3 bis 10^7 . Die Korrekturfaktoren f_1 und f_2 sind jeweils mit einer der zwei von unterschiedlichen Messelektrodenpaaren abgegriffenen Potentialdifferenzen verknüpft. Der Verlauf der Funktionen f_1 und f_2 weist drei Bereiche I, II, III auf. Im ersten und dritten Bereich I, III ist der Verlauf der f_1 nicht konstant. In diesem Beispiel weist der Verlauf im ersten Bereich I eine negative Steigung und im dritten Bereich III eine positive Steigung auf. Im zweiten Bereich II hingegen ist der Verlauf der f_1 konstant. Die Durchflussmesssonde ist für diesen Reynolds-Zahlenbereich linear. Die zweite Funktion f_2 ist mindestens im zweiten Bereich bijektiv. Im abgebildeten Beispiel ist der Verlauf der f_2 auch im ersten und dritten Bereich bijektiv I, III. Daraus ergibt sich für den Quotienten g , dass er in den Bereichen eins bis drei I, II, III bijektiv ist. Somit lässt sich jedem Quotienten der Messdaten der beiden Messgrößen eindeutig eine Reynolds-Zahl zuordnen. D.h., kann ein Wert von g bestimmt werden, so lässt sich die entsprechende Reynolds-Zahl ableiten. Für die Bereiche, in denen die Durchflussgeschwindigkeit empfindlich gegenüber Reynolds-Zahl-Änderungen ist siehe Bereich I und III können Messabweichungen unter Berücksichtigung der Reynolds-Zahl-abhängigen Korrekturfunktion korrigiert werden.

Die Fig. 9 zeigt ein Diagramm, das den Einfluss der Position der Messelektroden am Frontende auf die Reynolds-Zahl-Abhängigkeit der induzierten Messspannung beschreibt. Das Diagramm bildet den Reynolds-Zahl bedingten Messfehler auf die Durchflussgeschwindigkeit ab. Die Reynolds-Zahl hängt von der Durchflussgeschwindigkeit ab. Fünf unterschiedliche Messelektrodenpositionen (5; 7; 9; 9,5 und 11 Millimeter Abstand zum Mittelpunkt) wurden vermessen und die Abweichung vom tatsächlichen Durchflusswert bestimmt (Verläufe A-E). Der Wert nach dem Symbol „e“ gibt den Radius eines gedachten Kreisumfanges in Millimeter an, auf dem die

Messelektroden liegen. Man erkennt an den Messdaten, dass bei einem Abstand von 9,5 mm die Abweichung des Durchflussmesswertes über den gesamten abgebildeten Reynolds-Zahlenbereich im Wesentlichen Reynolds-Zahl-unabhängig ist, bzw. dass der Fehler immer geringer als 2,5% ist (siehe gepunkteter Verlauf B). Sind die

5 Messelektroden jedoch auf einem Kreisumfang mit einem Radius von 5 mm angeordnet, so kann nicht mehr von einem Reynolds-Zahl-unabhängigen Korrekturfaktor ausgegangen werden. Messabweichungen von bis zu 20% liegen vor (siehe Verlauf E). Mit Hilfe einer Durchflussmesssonde, die ein Messelektrodenpaar aufweist, welches auf einem Kreisumfang mit 9,5 mm und die über ein weiteres Messelektrodenpaar verfügt,

10 welches auf einem Kreisumfang mit einem Radius von 5 mm liegt, lässt sich nun unter Berücksichtigung der jeweils an den Messelektrodenpaaren anliegenden Messspannung die Reynolds-Zahl bestimmen bzw. eine Reynolds-Zahl-abhängige Korrektur von einer der beiden Messspannungen durchführen.

Die Fig. 10 zeigt ein Flussdiagramm einer Ausgestaltung des Verfahrens zum Betreiben

15 einer magnetisch-induktiven Durchflussmesssonde. In einem ersten Schritt wird die erste Potentialdifferenz U_1 an dem ersten Messelektrodenpaar gemessen. In einem zweiten Schritt wird die zweite Potentialdifferenz U_2 an dem zweiten Messelektrodenpaar gemessen. Alternativ zum Messen der Potentialdifferenz können auch in beiden zuvor genannten Schritten die Potentiale an den jeweiligen Messelektroden in Bezug zum

20 Referenzpotential gemessen werden und die Differenz beispielsweise in der Auswerteschaltung gebildet werden. Die beiden ersten Schritte müssen nicht nacheinander, sondern können auch gleichzeitig erfolgen. Es kann auch die zweite Potentialdifferenz U_2 zuerst und dann die erste Potentialdifferenz U_1 gemessen werden. Üblicherweise werden jedoch Messspannungen zweier Messphasen, in denen jeweils

25 unterschiedliche, insbesondere entgegengesetzte Gleichspannungen an die Spulen angelegt sind und in denen das Magnetfeld eingeschwungen ist, für die Bestimmung der Durchflussgeschwindigkeit bzw. des Volumendurchflusses berücksichtigt. Dadurch lässt sich ein Offset im Nullpunkt kompensieren. Die Messung der Potentialdifferenz bzw. der Potentiale erfolgt über eine Messschaltung. Die Auswerteschaltung bildet einen

30 Quotienten aus den beiden gemessenen Messwerten, insbesondere Potentialdifferenzen, und vergleicht diesen Quotienten mit einem diesem ermittelten Quotienten zugeordneten Reynolds-Zahl. Diese ist in einem Speicher hinterlegt. Im Speicher kann alternativ auch eine mathematische Gleichung oder eine mathematische Funktion hinterlegt sein, die eine Reynolds-Zahl oder einen Reynolds-Zahlenbereich einem Quotienten zuordnet.

35 Alternativ können im Speicher auch Daten hinterlegt sein, die in einem Justierverfahren ermittelt worden sind. Die Daten können die im Justierverfahren gemessenen Referenzwerte sein, aber auch inter- bzw. extrapolierte Werte bzw. Werte einer beispielsweise geglätteten Kennlinie oder Fit-Funktion der Messdaten. Die Referenzwerte

können in einem Justierverfahren experimentell und/oder mittels eines Simulationsprogrammes bestimmt sein.

Bezugszeichenliste

	1	Durchflussmesssonde
	2	Frontende
5	3	Gehäuse
	4	erste Messelektrode
	5	zweite Messelektrode
	6	Frontteil
	7	Spulenkern
10	8	Magnetfeldlinien
	9	Spulenanordnung
	10	Rückführung
	11	Mess-, Betriebs- und/oder Auswerteeinheit
	12	Strömungsrichtung
15	13	Rohrleitung
	14	Einschraubverbindung
	15	Dichtung
	16	Messelektrode
	17	Radius R_{12}
20	18	Radius R_{34}
	19	dritte Messelektrode
	20	vierte Messelektrode
	21	Bezugsgerade
	22	Frontfläche
25	23	Mittelpunkt
	24	erste Messelektrodenachse
	25	zweite Messelektrodenachse
	26	Paddel
	27	Längsachse
30	28	Mantelfläche

Patentansprüche

1. Magnetisch-induktive Durchflussmesssonde (1), die in ein von einem Medium durchströmtes Rohr einsetzbar ist, umfassend:

5 - ein Gehäuse (3),

wobei das Gehäuse (3) eine Gehäusewandung aufweist;

- mindestens eine erste und eine zweite Messelektrode (4, 5), die an der Gehäusewandung angeordnet sind, zum Bilden jeweils eines galvanischen Kontaktes mit einem fließenden Medium;

10 - mindestens eine magnetfelderzeugende Vorrichtung zum Erzeugen eines die Gehäusewandung durchsetzenden Magnetfeldes,

wobei die magnetfelderzeugende Vorrichtung im Gehäuse (3) angeordnet ist; und

- eine Messschaltung, die dazu eingerichtet ist mindestens eine erste Messgröße zu bestimmen,

15 wobei Messwerte der ersten Messgröße zwischen zwei Messelektroden oder an einer Messelektrode in Bezug zu einem Referenzpotential, insbesondere einem Erdpotential gemessen werden,

dadurch gekennzeichnet,

20 dass eine Auswerteschaltung dazu eingerichtet ist, eine Reynolds-Zahl und/oder einen kinematischen Viskositätswert des Mediums im Rohr mittels Messwerte der ersten und einer zweiten Messgröße, die sich von der ersten Messgröße unterscheidet, zu ermitteln,

wobei Messwerte der zweiten Messgröße zwischen zwei Messelektroden oder an einer Messelektrode in Bezug zu einem Referenzpotential, insbesondere einem

25 Erdpotential ermittelt werden,

wobei sich mindestens eine für die Ermittlung der Messwerte der zweiten Messgröße eingerichtete Messelektrode von den für die Ermittlung der Messwerte der ersten Messgröße eingerichteten Messelektroden unterscheidet.

30 2. Durchflussmesssonde (1) nach Anspruch 1,

wobei die Messelektroden so an der Gehäusewandung angeordnet sind, dass bei einer Testmessung Quotienten aktueller Messwerte der ersten und der zweiten Messgröße zumindest in einem Reynolds-Zahlenbereich von $10\,000 \leq Re \leq 100\,000$, insbesondere $5\,000 \leq Re \leq 500\,000$ und bevorzugt $1\,000 \leq Re \leq 1\,000\,000$ mit der Reynolds-Zahl des Mediums im Rohr bijektiv korrespondieren.

3. Durchflusssonde (1) nach Anspruch 1 und/oder 2,

wobei die Messschaltung dazu eingerichtet ist die Messwerte der ersten Messgröße zwischen der ersten und der zweiten Messelektrode (4, 5) zu bestimmen,

10 wobei die Messschaltung dazu eingerichtet ist Messwerte der zweiten Messgröße zwischen einer ersten und einer dritten Messelektrode (4, 19) oder zwischen einer zweiten und der dritten Messelektrode (5, 19) zu ermitteln.

4. Durchflusssonde (1) nach Anspruch 1 und/oder 2,

15 wobei die Messschaltung dazu eingerichtet ist die Messwerte der ersten Messgröße zwischen der ersten und der zweiten Messelektrode (4, 5) zu bestimmen,

wobei die Messschaltung dazu eingerichtet ist Messwerte der zweiten Messgröße zwischen einer dritten und einer vierten Messelektrode (19, 20) zu ermitteln.

20 5. Durchflusssonde (1) nach Anspruch 3 oder 4,

wobei das Gehäuse (3) zumindest abschnittsweise zylindrisch geformt ist und eine Mantelfläche (28) aufweist,

wobei die dritte Messelektrode (19) an der Mantelfläche (28) angeordnet ist und einen galvanischen Kontakt mit dem Medium bildet.

25

6. Durchflusssonde (1) nach Anspruch 3 oder 4,

wobei die erste, zweite und eine dritte Messelektrode (4, 5, 19) an einer Stirnfläche des Gehäuses angeordnet sind.

7. Durchflusssonde (1) nach Anspruch 6,

wobei die erste und die zweite Messelektrode (4, 5) auf einem auf der Stirnfläche (22) verlaufenden und koaxial zum Gehäuse (3) angeordneten Kreisumfang liegen,

5 wobei der Kreisumfang einen Bereich umschließt, in dem die dritte Messelektrode (19) angeordnet ist oder bevorzugt die dritte und die vierte Messelektrode (19, 20) angeordnet sind.

8. Durchflusssonde (1) nach Anspruch 6 und/oder 7,

10 wobei die erste und die zweite Messelektrode (4, 5) auf einer, auf der Stirnfläche (22) verlaufenden Gerade angeordnet sind,

wobei die dritte und die vierte Messelektrode (19, 20) durch die Gerade geschnitten werden,

wobei die dritte und die vierte Messelektrode (19, 20) zwischen der ersten und der zweiten Messelektrode (4, 5) angeordnet sind.

15

9. Durchflusssonde (1) nach Anspruch 7 und/oder 8,

wobei die Messelektroden (4, 5, 19, 20) auf Kreisumfängen konzentrischer Kreise liegen,

20 wobei die erste und die zweite Messelektrode (4, 5) auf einem der Kreisumfänge mit einem Radius R_{12} liegen,

wobei die dritte und die vierte Messelektrode (19, 20) auf einem der Kreisumfänge mit einem Radius R_{34} liegen,

25 wobei ein Verhältnis der beiden Radien die Ungleichung $0,2 \leq R_{34}/R_{12} \leq 0,9$, insbesondere $0,3 \leq R_{34}/R_{12} \leq 0,7$ und bevorzugt $0,4 \leq R_{34}/R_{12} \leq 0,6$ erfüllt.

10. Durchflusssonde (1) nach einem der vorherigen Ansprüche,

wobei aktuelle Messwerte der ersten Messgröße bei der Testmessung in einem Reynolds-Zahlenbereich von $10\,000 \leq Re \leq 100\,000$ im Wesentlichen proportional zur Durchflussgeschwindigkeit des Mediums sind,

5 wobei eine Änderung aktueller Messwerte der zweiten Messgröße mit zunehmender Reynolds-Zahl bei der Testmessung in einem Reynolds-Zahlenbereich von $10\,000 \leq Re \leq 100\,000$ nicht konstant ist.

11. Durchflussmesssonde (1) nach einem der vorherigen Ansprüche,

10 wobei in der Testmessung das fließende Medium ein newtonsches Fluid, insbesondere Wasser ist,

wobei in der Testmessung die Durchflussmesssonde (1) so in einer Rohrleitung mit einer geraden Einlaufstrecke von mindestens 20 DN und bevorzugt mindestens 50 DN eingebracht ist, dass ein im Wesentlichen symmetrisches Strömungsprofil im Medium vorliegt,

15 wobei das Rohr einen Durchmesser DN von DN 80 aufweist,

wobei ein Abstand zwischen der Stirnfläche (22) und einer Öffnung des Rohres, in die die Durchflussmesssonde (1) eingesetzt ist, die Einbautiefe D beschreibt,

wobei die Einbautiefe $0,05 \leq D/DN \leq 0,4$ und bevorzugt $0,1 \leq D/DN \leq 0,2$ erfüllt.

20

12. Verfahren zum Betreiben einer magnetisch-induktiven Durchflussmesssonde (1), insbesondere der magnetisch-induktiven Durchflussmesssonde (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 11,

25 wobei die Durchflusssonde (1) ein Gehäuse (3) mit einer Gehäusewandung aufweist,

wobei eine magnetfelderzeugende Vorrichtung zum Erzeugen eines die Gehäusewandung durchsetzenden Magnetfeldes im Gehäuse angeordnet ist,

wobei Messelektroden an der Gehäusewandung angeordnet sind;

umfassend die Verfahrensschritte:

- Erfassen eines Messwertes einer ersten Messgröße und eines Messwertes einer zweiten Messgröße, die sich von der ersten Messgröße unterscheidet,

5 wobei die Messwerte der jeweiligen Messgrößen zwischen zwei Messelektroden oder an einer Messelektrode in Bezug auf ein Referenzpotential, insbesondere ein Erdpotential bestimmt werden;

- Ermitteln einer von der ersten und der zweiten Messgröße abhängigen Reynolds-Zahl.

13. Verfahren nach Anspruch 12,

- 10 - Bilden eines Referenzwertes aus den Messwerten der ersten und der zweiten Messgröße,

wobei der Referenzwert proportional zum Quotienten der Messwerte der ersten und der zweiten Messgröße ist; und

- Ermitteln einer Reynolds-Zahl in Abhängigkeit des Referenzwertes.

15 14. Verfahren nach Anspruch 12 und/oder 13, umfassend den Verfahrensschritt:

- Bilden einer korrigierten Durchflussgeschwindigkeit und/oder eines korrigierten Volumendurchflusses mittels eines von der Reynolds-Zahl abhängigen Korrekturfaktors; und/oder

20 - Ermitteln des kinematischen Viskositätswertes des Mediums im Rohr mittels Messwerte der ersten oder der zweiten Messgröße und der ermittelten Reynolds-Zahl.

15. Durchflussmessstelle, umfassend:

- eine Rohrleitung (13) mit einem Durchmesser DN und einer Öffnung, und
 - eine magnetisch-induktive Durchflussmesssonde (1) nach einem der Ansprüche 1 bis
- 25 11;

dadurch gekennzeichnet,

dass die magnetisch-induktive Durchflussmesssonde (1) in der Öffnung angeordnet ist und eine Einbautiefe D aufweist, welche insbesondere $0,05 \leq D/DN \leq 0,4$ und bevorzugt $0,1 \leq D/DN \leq 0,2$ erfüllt.

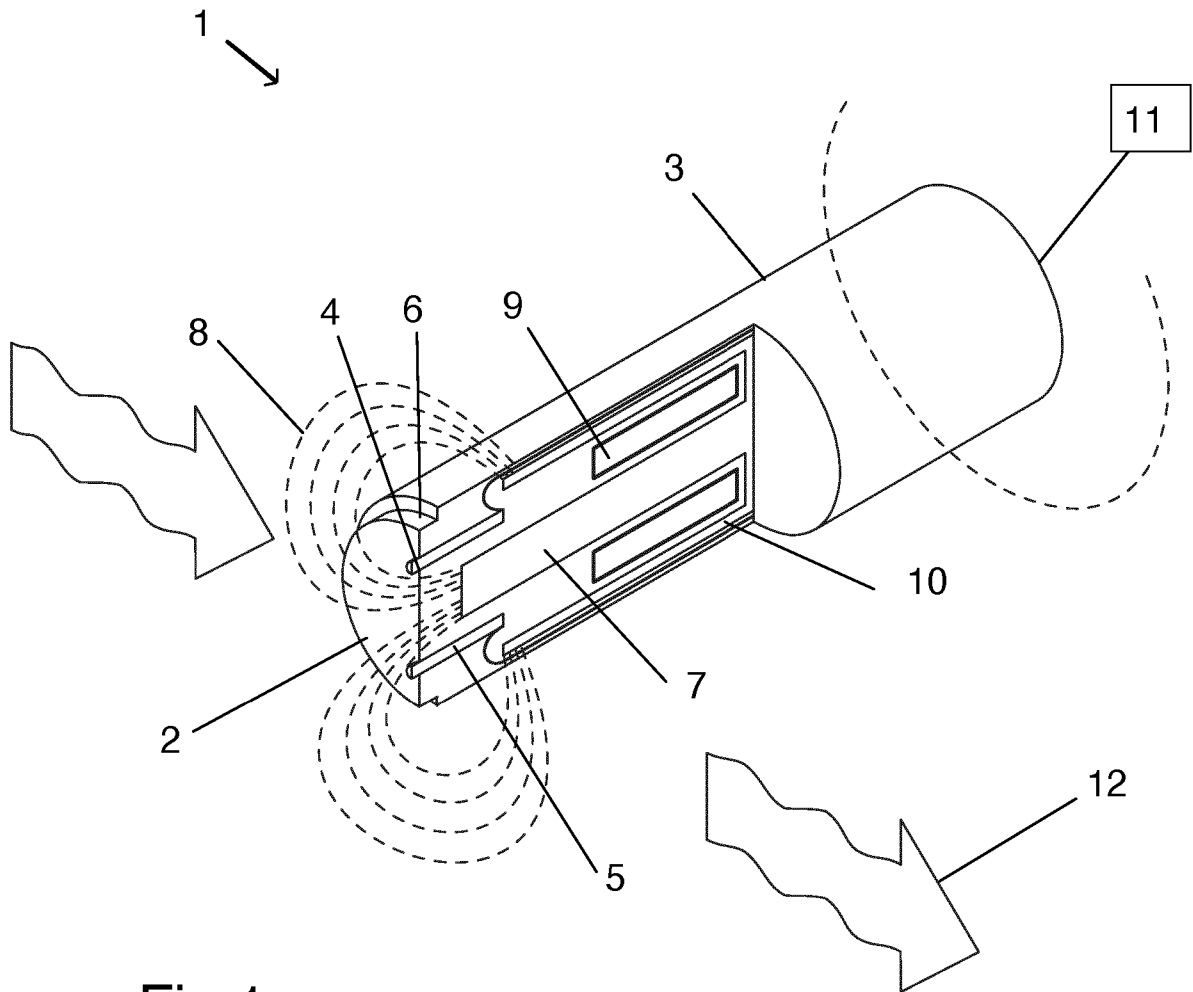


Fig.1

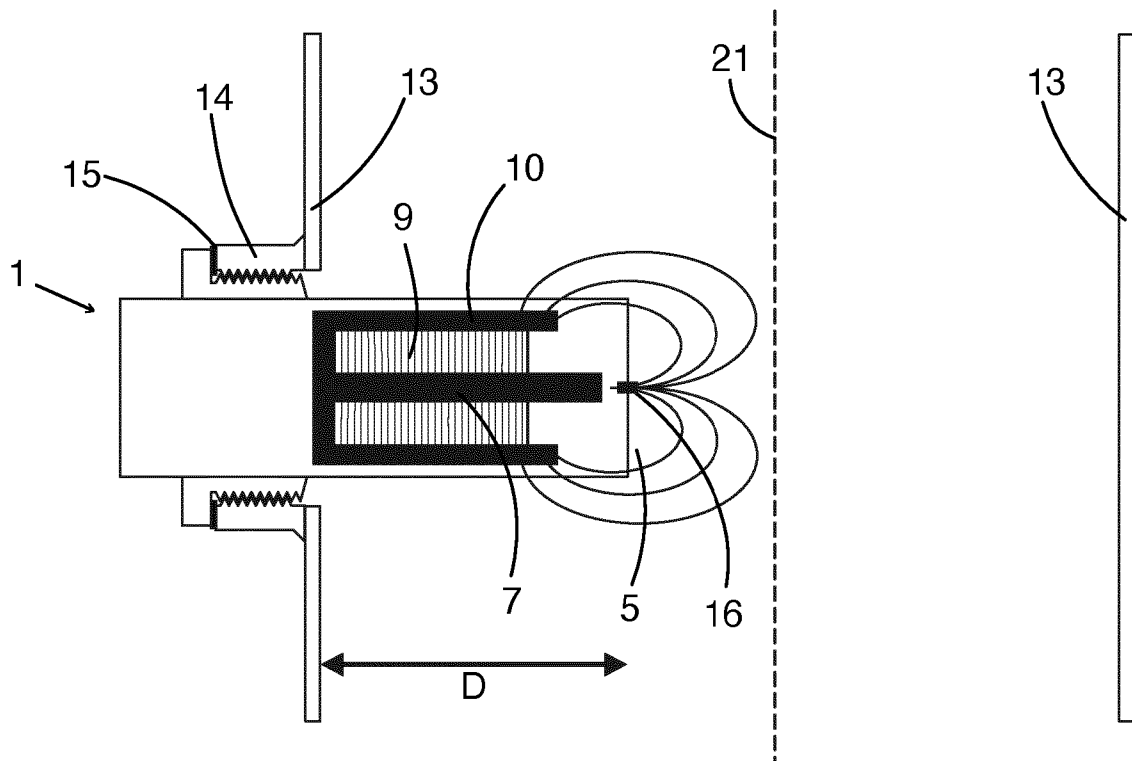


Fig. 2

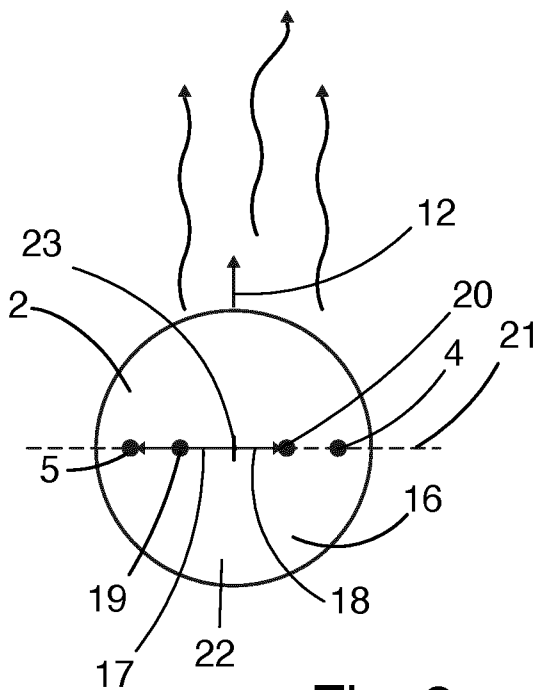


Fig. 3

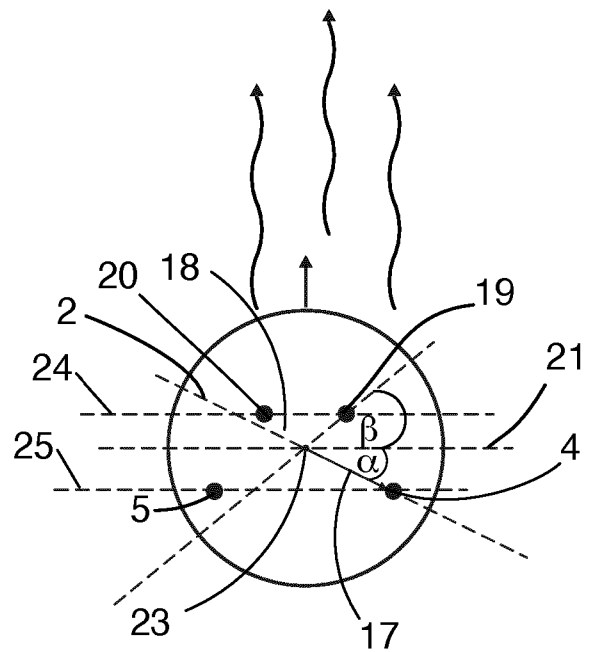


Fig. 4

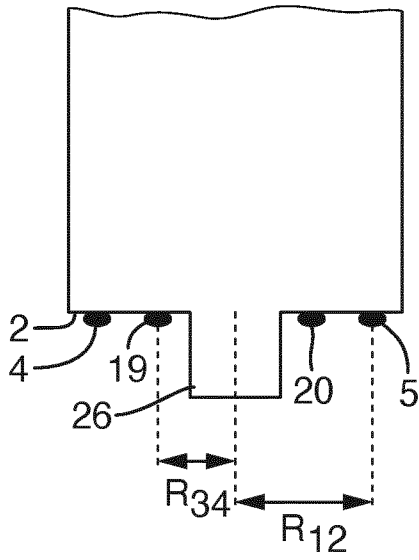


Fig. 5

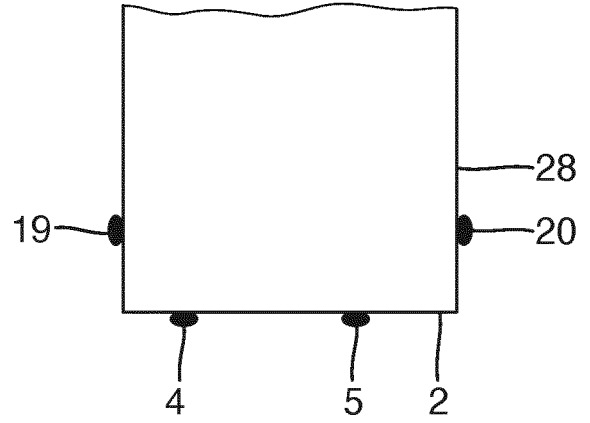


Fig. 6

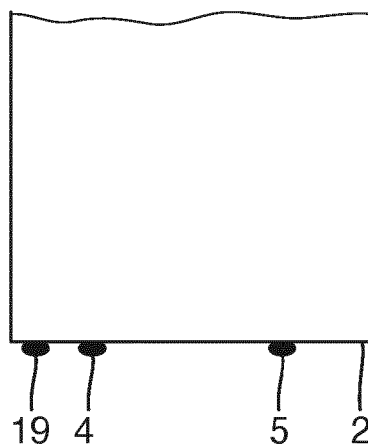


Fig. 7

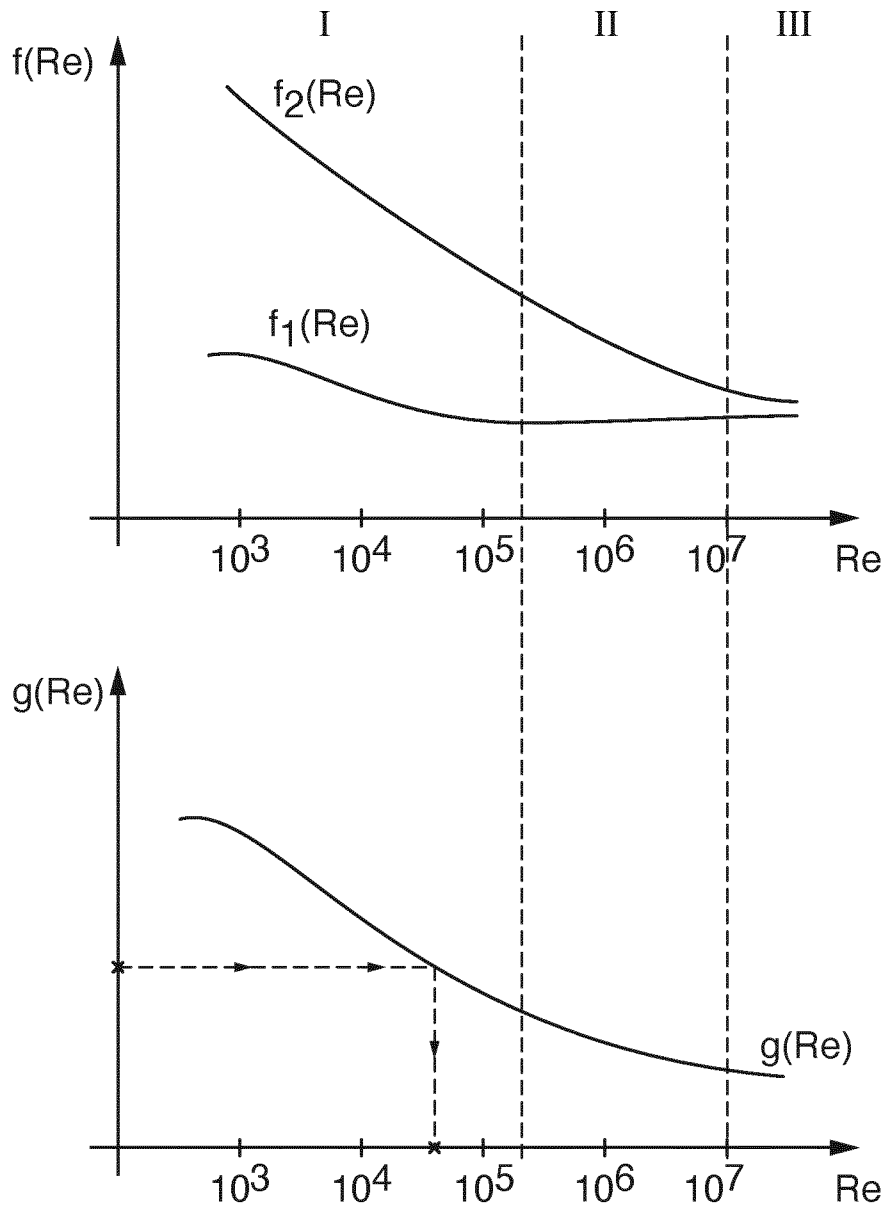


Fig. 8

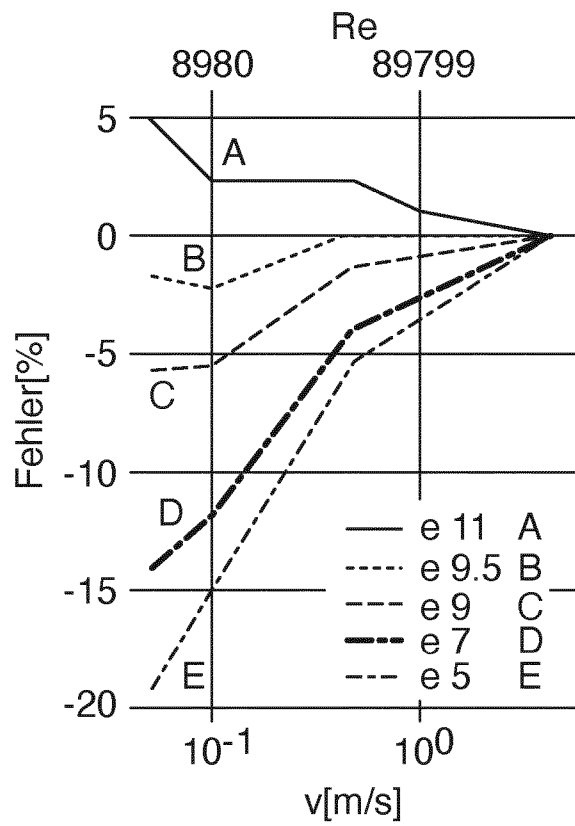


Fig. 9

6/6

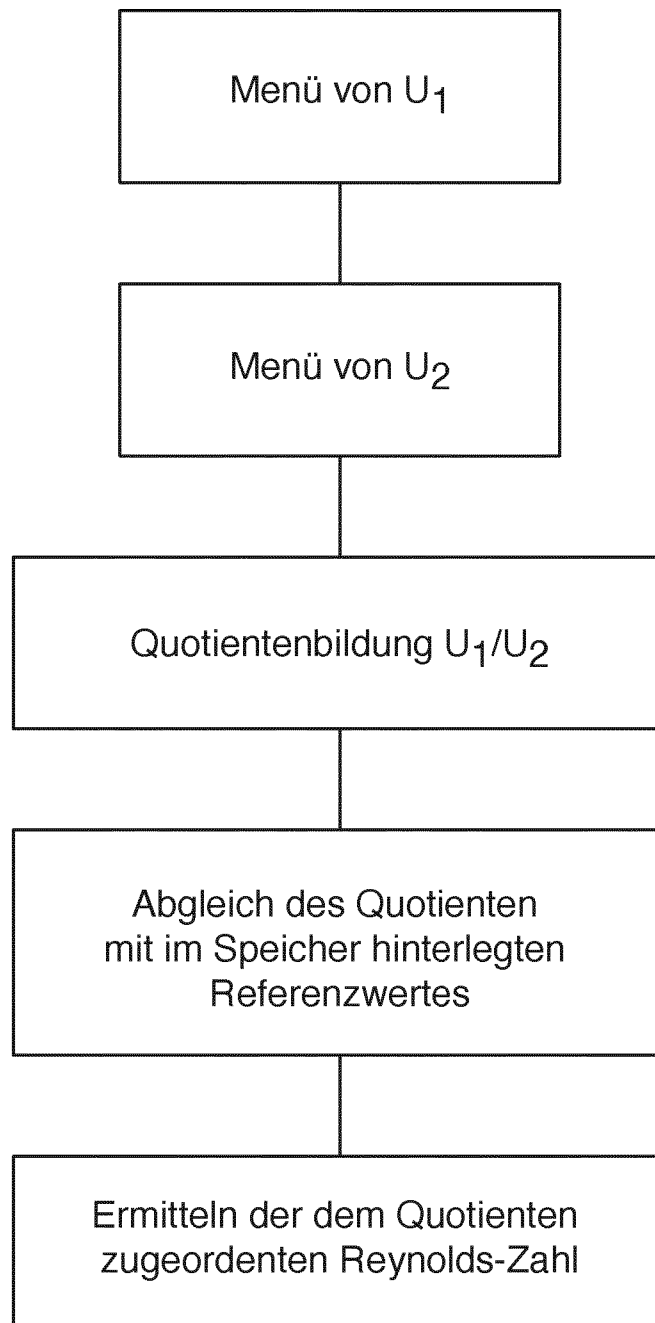


Fig. 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2020/071816

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>G01F 1/58</i> (2006.01)i; <i>G01F 1/60</i> (2006.01)i; <i>G01F 23/24</i> (2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01F		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	TRAECHTLER A ET AL. "TOMOGRAPHISCHE METHODEN BEI DER INDUKTIVEN DURCHFLUSSMESSUNG ZUR BESTIMMUNG VON STROEMUNGSPROFILIEN UND -PARAMETERN" <i>TM - TECHNISCHES MESSEN/PLATTFORM FÜR METHODEN, SYSTEME UND ANWENDUNGEN DER MESSTECHNIK, R.OLDENBOURG VERLAG. MUNCHEN, DE,</i> Vol. 64, No. 10, 01 October 1997 (1997-10-01), pages 365-373 ISSN: 0171-8096, XP000750766	1,3,4,6,12,15
A	parts 3 and 4; page 367 - page 370; figures 4, 9, 10	2,5,7-11,13,14
X	ANSGAR TRÄCHTLER ET AL. "In-Line Monitoring of Rheological Parameters with an Electromagnetic Flowmeter" <i>PARTICLE AND PARTICLE SYSTEMS CHARACTERIZATION., DE,</i> Vol. 15, No. 1, 01 February 1998 (1998-02-01), pages 30-35 DOI: 10.1002/(SICI)1521-4117(199802)15:1<30::AID-PPSC30>3.0.CO;2-X ISSN: 0934-0866, XP055729760 the whole document	1,12
X	DE 102007063372 A1 (FLOWTEC AG [CH]) 02 July 2009 (2009-07-02) paragraphs [0087], [0088]	1,12
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 09 November 2020		Date of mailing of the international search report 17 November 2020
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Reeb, Bertrand Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2020/071816

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2016238422 A1 (WEE ARNSTEIN [NO] ET AL) 18 August 2016 (2016-08-18) paragraphs [0111], [0100]; claim 1	1-15
A	JP S6175217 A (TOKICO LTD) 17 April 1986 (1986-04-17) the whole document	1-15
A	US 6094992 A (MESCH FRANZ [DE] ET AL) 01 August 2000 (2000-08-01) figure 1	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2020/071816

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
DE	102007063372	A1	02 July 2009	CN 101910805 A	08 December 2010
				DE 102007063372 A1	02 July 2009
				EP 2227677 A2	15 September 2010
				RU 2010132144 A	10 February 2012
				WO 2009083533 A2	09 July 2009
US	2016238422	A1	18 August 2016	BR 112016007272 A2	12 September 2017
				CA 2923497 A1	09 April 2015
				EP 3052905 A1	10 August 2016
				US 2016238422 A1	18 August 2016
				WO 2015050460 A1	09 April 2015
JP	S6175217	A	17 April 1986	NONE	
US	6094992	A	01 August 2000	NONE	

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. G01F1/58 G01F1/60 G01F23/24 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) G01F		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	TRAECHTLER A ET AL: "TOMOGRAPHISCHE METHODEN BEI DER INDUKTIVEN DURCHFLUSSMESSUNG ZUR BESTIMMUNG VON STROMUNGSPROFILIEN UND -PARAMETERN", TM - TECHNISCHES MESSEN/PLATTFORM FÜR METHODEN, SYSTEME UND ANWENDUNGEN DER MESSTECHNIK, R.OLDENBOURG VERLAG. MUNCHEN, DE, Bd. 64, Nr. 10, 1. Oktober 1997 (1997-10-01), Seiten 365-373, XP000750766, ISSN: 0171-8096	1,3,4,6, 12,15
A	Teile 3 und 4; Seite 367 - Seite 370; Abbildungen 4,9,10 ----- -/--	2,5, 7-11,13, 14
<input checked="" type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts	
9. November 2020	17/11/2020	
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Reeb, Bertrand	

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	<p>ANSGAR TRÄCHTLER ET AL: "In-Line Monitoring of Rheological Parameters with an Electromagnetic Flowmeter", PARTICLE AND PARTICLE SYSTEMS CHARACTERIZATION., Bd. 15, Nr. 1, 1. Februar 1998 (1998-02-01), Seiten 30-35, XP055729760, DE ISSN: 0934-0866, DOI: 10.1002/(SICI)1521-4117(199802)15:1<30::AID-PPSC30>3.0.CO;2-X das ganze Dokument</p> <p>-----</p>	1,12
X	<p>DE 10 2007 063372 A1 (FLOWTEC AG [CH]) 2. Juli 2009 (2009-07-02) Absätze [0087], [0088]</p> <p>-----</p>	1,12
A	<p>US 2016/238422 A1 (WEE ARNSTEIN [NO] ET AL) 18. August 2016 (2016-08-18) Absätze [0111], [0100]; Anspruch 1</p> <p>-----</p>	1-15
A	<p>JP S61 75217 A (TOKICO LTD) 17. April 1986 (1986-04-17) das ganze Dokument</p> <p>-----</p>	1-15
A	<p>US 6 094 992 A (MESCH FRANZ [DE] ET AL) 1. August 2000 (2000-08-01) Abbildung 1</p> <p>-----</p>	1-15

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2020/071816

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102007063372 A1	02-07-2009	CN 101910805 A	08-12-2010
		DE 102007063372 A1	02-07-2009
		EP 2227677 A2	15-09-2010
		RU 2010132144 A	10-02-2012
		WO 2009083533 A2	09-07-2009

US 2016238422 A1	18-08-2016	BR 112016007272 A2	12-09-2017
		CA 2923497 A1	09-04-2015
		EP 3052905 A1	10-08-2016
		US 2016238422 A1	18-08-2016
		WO 2015050460 A1	09-04-2015

JP S6175217 A	17-04-1986	KEINE	

US 6094992 A	01-08-2000	KEINE	
