



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2019 209 199.7**  
 (22) Anmeldetag: **26.06.2019**  
 (43) Offenlegungstag: **31.12.2020**

(51) Int Cl.: **G01N 27/04** (2006.01)  
**G01N 27/22** (2006.01)  
**G01N 27/08** (2006.01)  
**G01K 7/00** (2006.01)

(71) Anmelder:  
**Technische Universität Hamburg, 21073  
 Hamburg, DE**

(74) Vertreter:  
**Maiwald Patentanwalts- und  
 Rechtsanwaltsgesellschaft mbH, 80335 München,  
 DE**

(72) Erfinder:  
**Kern, Thorsten Alexander, Prof. Dr.-Ing., 21079  
 Hamburg, DE; Schlüter, Michael, Prof. Dr.-Ing.,  
 28870 Ottersberg, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	10 2011 017 677	A1
US	2002 / 0 150 142	A1
US	2018 / 0 374 244	A1
US	5 339 628	A

**MACHIN, Thomas D. [u.a.]: In-pipe  
 rheology and mixing characterisation using  
 electrical resistance sensing. In: Chemical  
 Engineering Science, Vol. 187, 2018, S.  
 327-341. - ISSN 0009-2509 (P); 1873-4405  
 (E). DOI: 10.1016/j.ces.2018.05.017. URL:  
[https://www.sciencedirect.com/science/  
 article/pii/S0009250918303087/pdf?md5=  
 2021c2d410ea784c8f4e275324dff930&pid=1-s2.0-  
 S0009250918303087-main.pdf](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250918303087/pdf?md5=2021c2d410ea784c8f4e275324dff930&pid=1-s2.0-S0009250918303087-main.pdf) [abgerufen am  
 29.08.2019]**

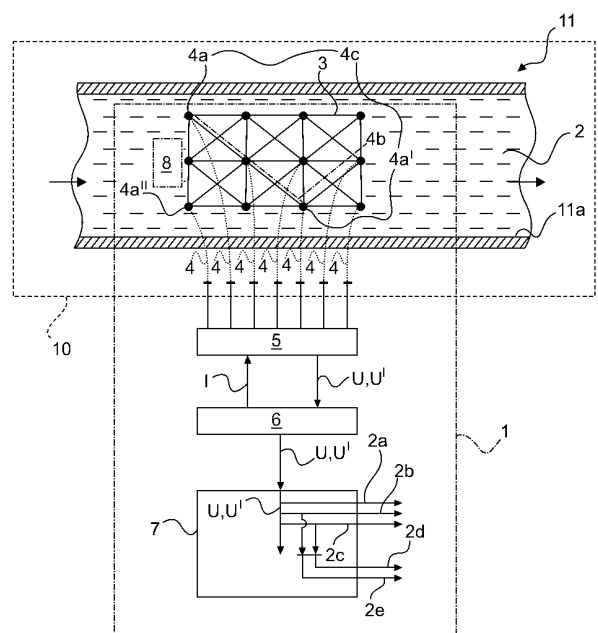
**SHARIFI, Mohadeseh ; YOUNG, Brent:  
 Electrical resistance tomography (ERT)  
 applications to chemical engineering. In:  
 Chemical Engineering Research and Design :  
 Transactions of the Institution of Chemical  
 Engineers: Part A, Vol. 91, 2013, No. 9, S. 1625-  
 1645. - ISSN 0263-8762 (P); 1744-3563 (E). DOI:  
 10.1016/j.cherd.2013.05.026**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Messinstrument für Eigenschaften eines strömenden Mediums**

(57) Zusammenfassung: Messinstrument (1) für die räumliche Verteilung mindestens einer Eigenschaft eines strömenden Mediums (2), umfassend eine von dem Medium (2) durchströmbare dreidimensionale Struktur (3) aus mindestens einem elektrisch leitenden oder halbleitenden Material, weiterhin umfassend eine Vielzahl von Kontaktierungsmitteln (4), wobei jedes Kontaktierungsmittel (4) einen definierten Ort (4a) innerhalb der dreidimensionalen Struktur (3) kontaktiert und es somit ermöglicht, an diesem Ort (4a) eine elektrische Spannung an die dreidimensionale Struktur (3) anzulegen und/oder abzugreifen, und/oder einen elektrischen Strom in die dreidimensionale Struktur (3) einzuleiten und/oder aus der dreidimensionalen Struktur auszuleiten. Durchströmbarer Reaktor (10) mit dem Messinstrument (1). Verfahren (100) zum Betreiben des Messinstruments (1), wobei Linienintegrale (9) des elektrischen Widerstands, der Impedanz und/oder einer hieraus abgeleiteten Größe zwischen den Orten (4a, 4a') vieler Paarungen (4c) ermittelt werden (110) und wobei durch tomographische Rekonstruktion aus den Linienintegralen eine räumliche Verteilung (9a) der interessierenden Größe ermittelt wird (120).



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft die Messung der räumlichen Verteilung von Eigenschaften, wie beispielsweise der Temperatur, in einem strömenden Medium.

**Stand der Technik**

**[0002]** Für die Durchführung chemischer und/oder biologischer Reaktionen sind durchströmbare Reaktoren gebräuchlich. In einen derartigen Reaktor wird an einem Ende ein Medium in einem ersten Zustand zugeführt, beispielsweise als Gemisch von Reaktanden. Es wird dann erwartet, dass das Medium einen beabsichtigten zweiten Zustand annimmt, bevor es das andere Ende des Reaktors erreicht. Dieser beabsichtigte Zustand kann beispielsweise darin bestehen, dass die beiden Reaktanden zu einem Produkt durchgereagert sind.

**[0003]** Für die hierbei erzielbare Ausbeute ist es wichtig, dass innerhalb des Mediums homogene Bedingungen für die Umwandlung herrschen. Insbesondere ist es wichtig, dass die Temperatur innerhalb des Mediums homogen verteilt ist. Die Geschwindigkeit, mit der sowohl chemische als auch biologische Reaktionen ablaufen, ist meistens stark temperaturabhängig.

**[0004]** (M. Sharifi et al., „Electrical Resistance Tomography (ERT) applications to Chemical Engineering“, Chemical Engineering Research and Design 91, 1625-2645 (2013)) offenbart, jeweils zwischen Paaren von Elektroden, die am Innenumfang eines Reaktors oder einer Rohrleitung in das Medium hineintreten, Ströme durch das Medium zu leiten und die räumliche Verteilung der Leitfähigkeit im Medium tomographisch zu rekonstruieren.

**[0005]** (T. D. Machin, H. Wie, R. W. Greenwood, M. J. H. Simmons, „In-pipe rheology and mixing characterization using electrical resistance sensing“, Chemical Engineering Science 187, 327-341 (2018)) offenbart ein weiteres Verfahren, mit dem auf der Basis elektrischer Widerstandsmessungen die Verteilung der Temperatur und der Fließgeschwindigkeit im Medium orts aufgelöst ermittelt werden kann.

**Aufgabe und Lösung**

**[0006]** Es ist die Aufgabe der Erfindung, die Ortsauflösung, mit der die Temperatur und andere Eigenschaften des Mediums aus elektrischen Widerstandsmessungen rekonstruiert werden können, zu verbessern.

**[0007]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Messinstrument gemäß Hauptanspruch, einen durchströmbaren Reaktor gemäß Nebenanspruch und ein Verfahren zum Betreiben gemäß wei-

terem Nebenanspruch. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich jeweils aus den darauf rückbezogenen Unteransprüchen.

**Offenbarung der Erfindung**

**[0008]** Im Rahmen der Erfindung wurde ein Messinstrument für die räumliche Verteilung mindestens einer Eigenschaft eines strömenden Mediums entwickelt. Das Medium kann als eine Phase oder insbesondere auch als Gemisch aus mehreren Phasen vorliegen.

**[0009]** Das Messinstrument umfasst eine von dem Medium durchströmbare dreidimensionale Struktur aus mindestens einem elektrisch leitenden oder halbleitenden Material. Das leitende oder halbleitende Material ist in seinen elektrischen Eigenschaften von mindestens einer interessierenden Messgröße (wie beispielsweise der Temperatur des Mediums) im Zusammenspiel mit dem Messumfeld (wie beispielsweise einem das Material umgebenden Dielektrikum) abhängig. Es ist also ein Wandler zwischen Messgröße und elektrischem Verhalten. Diese Struktur kann zusätzlich geometrisch dazu ausgebildet sein, das durchströmende Medium, welches beispielsweise zwei Phasen aus verschiedenen Bestandteilen enthalten kann, zu durchmischen und/oder als Träger eines Katalysators zu dienen. Beispielsweise kann die Struktur so ausgebildet sein, dass die Strömung des Mediums mindestens zum Teil von einer laminaren in eine turbulente Strömung umgewandelt wird. Die Struktur dient somit nicht ausschließlich dazu, den Ist-Zustand der Homogenität der Verteilung zu messen, sondern trägt gleichzeitig noch dazu bei, diese Homogenität zu verbessern. Insbesondere kann es sich bei der dreidimensionalen Struktur um eine Struktur handeln, die eigentlich primär dazu gedacht ist, eine Strömung des Mediums zu durchmischen und somit zu homogenisieren, und/oder als Katalysator für eine chemische und/oder biologische Reaktion in dem Medium zu dienen.

**[0010]** Das Messinstrument umfasst eine Vielzahl von Kontaktierungsmitteln. Jedes Kontaktierungsmittel kontaktiert einen definierten Ort innerhalb der dreidimensionalen Struktur und ermöglicht es somit, an diesem Ort eine elektrische Spannung an die dreidimensionale Struktur anzulegen und/oder abzugreifen, und/oder einen elektrischen Strom in die dreidimensionale Struktur einzuleiten und/oder aus der dreidimensionalen Struktur auszuleiten. Die Kontaktierungsmittel können insbesondere beispielsweise Leitungen sein, die von dem kontaktierten Ort im Inneren der dreidimensionalen Struktur nach außerhalb der dreidimensionalen Struktur führen, so dass der kontaktierte Ort beispielsweise an eine Spannungsquelle, an eine Stromquelle, an ein Spannungsmessgerät und/oder an ein Strommessgerät angeschlossen werden kann.

**[0011]** Indem viele Orte innerhalb der dreidimensionalen Struktur auf diese Weise erschlossen werden, kann als primäre Messgröße der elektrische Widerstand, bzw. die Leitfähigkeit, der dreidimensionalen Struktur jeweils entlang einer Vielzahl von durch diese dreidimensionale Struktur verlaufenden Wegen erfasst werden. Die Ortsauflösung und auch die Qualität einer aus diesen Messungen erhaltenen tomographischen Rekonstruktion werden durch drei zusammenwirkende Effekte verbessert:

- In der dreidimensionalen Struktur lässt sich eine größere Anzahl von elektrisch ansteuerbaren Orten unterbringen als am Umfang einer Rohrleitung oder eines Reaktors. Somit lassen sich Messungen mit einer viel größeren Variabilität zu der tomographischen Rekonstruktion kombinieren.
- Insbesondere können die elektrisch ansteuerbaren Orte dichter aneinander liegen, was einen direkten Einfluss auf die Ortsauflösung der tomographischen Rekonstruktion hat.
- Da die dreidimensionale Struktur aus einem bekannten Material besteht, sind für die entlang verschiedener Wege durch diese Struktur gemessenen elektrischen Widerstände bzw. Leitfähigkeiten Nominalwerte für bestimmte Normbedingungen bekannt. Der Kontakt mit dem Medium hat zur Folge, dass das Material anderen als den besagten Normbedingungen ausgesetzt ist. Dementsprechend ändern sich die elektrischen Eigenschaften des Materials. Das Material dient also gleichsam als Wandler, der Eigenschaften des Mediums, wie etwa die Temperatur, in eine Abweichung der elektrischen Eigenschaften des Materials von den Nominalwerten umwandelt. Diese Abweichung lässt sich sehr genau erfassen.

**[0012]** In einer vorteilhaften Ausgestaltung umfasst die dreidimensionale Struktur ein Netzwerk und/oder einen offenporigen Schaum aus dem mindestens einen elektrisch leitenden oder halbleitenden Material. Als elektrisch leitende Materialien kommen insbesondere alle Metalle in Betracht, die durch das Medium nicht korrodiert werden. So ist beispielsweise Titan gegen viele Chemikalien beständig. Ein offenporiger Schaum hat den Vorteil, dass er besonders einfach und schnell herzustellen ist. Hingegen bietet ein Netzwerk, welches beispielsweise durch 3D-Druck oder durch Weben von Drähten herstellbar ist, eine bessere Kontrolle über die möglichen Strompfade innerhalb der dreidimensionalen Struktur.

**[0013]** In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung umfasst die dreidimensionale Struktur eine Anordnung individueller Festkörper aus dem mindestens einen elektrisch leitenden oder halbleitenden Material. Die individuellen Festkörper in dieser Anordnung sind durch Verpressen und/oder durch Wärmebe-

handlung untereinander elektrisch verbunden. Das Verpressen kann insbesondere zum Zeitpunkt der Verwendung des Messinstruments noch andauern. Die dreidimensionale Struktur kann also beispielsweise eine Schüttung individueller Festkörper nach Art eines Festbettreaktors umfassen, die permanent durch eine Federkraft zusammengedrückt wird.

**[0014]** In einer weiteren besonders vorteilhaften Ausgestaltung umfasst das elektrisch leitende oder halbleitende Material mindestens ein Katalysatormaterial, welches die Aktivierungsenergie für einen chemischen und/oder biologischen Prozess in dem strömenden Medium herabzusetzen vermag. Dann kann das Medium auf einer besonders großen Kontaktfläche mit dem Katalysatormaterial in Kontakt gebracht werden. Alternativ oder auch in Kombination hierzu kann eine äußere und/oder innere Oberfläche der dreidimensionalen Struktur zumindest punktuell mit einem solchen Katalysatormaterial belegt sein. Katalysatormaterialien sind häufig Edelmetalle oder Seltene Erden und entsprechend teuer, so dass erhebliche Kosten eingespart werden, wenn diese Materialien auf eine dreidimensionale Struktur aus einem preiswerteren Grundmaterial aufgebracht sind.

**[0015]** Wie zuvor erläutert, hat die Dichte der mit den Kontaktierungsmitteln kontaktierten und somit elektrisch ansteuerbaren Orte einen Einfluss auf die bei einer tomographischen Rekonstruktion von Eigenschaften des Mediums erzielbaren Ortsauflösung. Daher sind in einer weiteren besonders vorteilhaften Ausgestaltung mindestens 25.000 verschiedene Orte pro Kubikmeter Volumen, das eine Einhüllende um die dreidimensionale Struktur hat, mit Kontaktierungsmitteln kontaktiert.

**[0016]** Wenn die dreidimensionale Struktur beispielsweise ein Netzwerk ist, das einen zylindrischen durchströmten Reaktor von 1 m Länge und 5 cm Durchmesser ausfüllt, dann ist diese Zylinderform die Einhüllende der dreidimensionalen Struktur. Diese hat ein Volumen von  $0,00196 \text{ m}^3$ . Sobald 49 oder mehr Orte in diesem Volumen elektrisch kontaktiert sind, ist die Dichte von 25.000 Orten pro  $\text{m}^3$  erreicht.

**[0017]** In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung befinden sich in der dreidimensionalen Struktur mindestens 50 % der mit Kontaktierungsmitteln kontaktierten Orte jeweils in höchstens 2 cm Entfernung zu mindestens einem weiteren mit Kontaktierungsmitteln kontaktierten Ort. Je größer dieser prozentuale Anteil ist, desto besser. Besonders bevorzugt befindet sich in höchstens 2 cm Entfernung zu jedem mit Kontaktierungsmitteln kontaktierten Ort mindestens ein weiterer kontaktierter Ort. Versuche haben gezeigt, dass zur Erzielung einer vorgegebenen Voxelauflösung der tomographischen Rekonstruktion (beispielsweise  $1 \text{ mm}^3$ ) benachbarte kontaktierte Orte in jeder der drei Raumdimensionen maximal das

Zehnfache der Voxelgröße als Abstand zueinander haben sollten (in diesem Beispiel 1 cm).

**[0018]** In einer weiteren besonders vorteilhaften Ausgestaltung umfasst das Messinstrument weiterhin einen Multiplexer, über den Kontaktierungsmittel wahlweise mit mindestens einer Spannungsquelle, mit mindestens einer Stromquelle, mit mindestens einem Spannungsmessgerät, und/oder mit mindestens einem Strommessgerät, verbindbar sind. Wie zuvor erläutert, ist die Anzahl der mit Kontaktierungsmitteln kontaktierten Orte, und somit erst recht die Anzahl der hieraus bildbaren Paare für elektrische Messungen, vergleichsweise groß. Diese Anzahl kann zwar bereits von vornherein deutlich reduziert werden, indem beispielsweise immer nur in einer Stromrichtung gemessen wird und nicht auch in der umgekehrten Stromrichtung, und/oder indem beispielsweise Paare aus direkt benachbarten Orten ausgeschlossen werden. Die verbleibende Anzahl ist jedoch noch groß genug, um einen erheblichen Verkabelungsaufwand zu verursachen, wenn alle sinnvollen Verbindungen fest verdrahtet werden sollen. Ist ein Multiplexer vorhanden, so ist nur jedes Kontaktierungsmittel einerseits und jeder Pol einer Spannungs- oder Stromquelle oder eines Messgeräts andererseits mit dem Multiplexer zu verbinden. Konkrete Messungen können dann initiiert werden, indem die entsprechenden benötigten Verbindungen im Multiplexer geschaltet werden.

**[0019]** In einer weiteren besonders vorteilhaften Ausgestaltung umfasst das Messinstrument Messmittel, die dazu ausgebildet sind, eine zwischen einem ersten, mit einem ersten Kontaktierungsmittel kontaktierten Ort und einem zweiten, mit einem zweiten Kontaktierungsmittel kontaktierten Ort abfallende Spannung  $U$  zu messen, während zwischen diesen beiden Orten ein bekannter Strom  $I$  fließt. Mit einer derartigen Vierdrahtmessung kann ein Linienintegral des Widerstands, den der Strom  $I$  auf dem Weg vom ersten zum zweiten Ort erfährt, gemessen werden. Dabei kann der Einfluss der Widerstände in den Kontaktierungsmitteln und in den weiteren Zuleitungen unterdrückt werden.

**[0020]** Dass ein bekannter Strom  $I$  fließt, kann beispielsweise erreicht werden, indem dieser Strom  $I$  durch eine Konstantstromquelle aktiv auf einen bekannten Sollwert geregelt wird. Es kann aber auch beispielsweise eine vorgegebene Spannung zwischen dem ersten Ort und dem zweiten Ort angelegt und der sich dann einstellende Strom  $I$  gemessen werden.

**[0021]** Wenn ein Gleichstrom  $I$  fließt und eine Gleichspannung  $U$  gemessen wird, misst die Vierdrahtmessung den Ohmschen Widerstand. In einer weiteren besonders vorteilhaften Ausgestaltung sind die Messmittel jedoch dazu ausgebildet, eine Wechsel-

spannung  $U$  mit einer Frequenz  $\omega$  zu messen, während ein bekannter Wechselstrom  $I$  mit der gleichen Frequenz  $\omega$  fließt. Die Frequenz  $\omega$  kann insbesondere im Bereich zwischen 0 und 1 kHz liegen, wobei bei biologischen Prozessen auch Frequenzen  $\omega$  im MHz-Bereich relevant sein können. Auf diese Weise kann die Impedanz des Strompfads zwischen den beiden Orten gemessen werden.

**[0022]** Das Medium, das diesen Strompfad umspült, hat physikalisch die Wirkung eines Dielektrikums. Damit ändert es analog zu dem Dielektrikum in einem Koaxialkabel die Kapazität, mit der der Strompfad behaftet ist. Die geänderte Kapazität wiederum hat eine Impedanz mit einem charakteristischen Frequenzgang und kann daher durch frequenzabhängige Messung der Impedanz ermittelt werden. Insbesondere kann der Einfluss der durch das Medium geänderten Kapazität von dem Einfluss weiterer parasitärer Kapazitäten in den Kontaktierungsmitteln oder weiteren Zuleitungen unterschieden werden, da diese parasitären Kapazitäten einen anderen Frequenzgang haben.

**[0023]** Somit kann über die Messung der Impedanz bevorzugt zusätzlich auf solche Eigenschaften des Mediums zurückgeschlossen werden, die dessen Dielektrizitätskonstante ändern. Dies kann beispielsweise die Zusammensetzung des Mediums oder auch ein Durchmischungsgrad des Mediums beispielsweise mit Luft sein.

**[0024]** Beispielsweise kann ein aus mehreren Phasen bestehendes Medium gezielt mit Luftblasen beaufschlagt werden, die die Durchmischung der Phasen verbessern. Wenn die gewünschte Reaktion durch Bakterien unterstützt wird, kann diese Luft weiterhin die Bakterien mit Sauerstoff versorgen.

**[0025]** In einer weiteren besonders vorteilhaften Ausgestaltung sind die Messmittel dazu ausgebildet, einen bekannten Wechselstrom  $I$  mit mindestens zwei Frequenzkomponenten  $\omega_1$  und  $\omega_2$ , und/oder mit einem Kontinuum von Frequenzen  $\omega$ , entlang des Weges zwischen den beiden Orten zu treiben und mindestens zwei Frequenzkomponenten  $\omega_1$  und  $\omega_2$  der Wechselspannung  $U$  zu messen. Auf diese Weise können mehrere Eigenschaften des Mediums im Zusammenspiel mit der Messumgebung, die auf die unterschiedlichen Frequenzkomponenten  $\omega_1$  und  $\omega_2$  der Impedanz Einfluss nehmen, simultan erfasst werden. Eine solche simultane Messung spart nicht nur Zeit, sondern eliminiert auch Fehler, die durch eine Änderung von Messbedingungen zwischen nacheinander durchgeführten Messungen entstehen können.

**[0026]** Ein Wechselstrom  $I$  mit einem Kontinuum von Frequenzen  $\omega$  kann beispielsweise eine Abfolge von Pulsen, beispielsweise Rechteckpulsen, beinhalten.

Jeder derartige Puls ist aperiodisch und enthält daher unendlich viele Fourier-Komponenten  $\omega$ .

**[0027]** Nach dem zuvor Gesagten umfasst das Messinstrument vorteilhaft eine Auswerteeinheit, die dazu ausgebildet ist, aus der mit den Messmitteln gemessenen Spannung  $U$  ein Linienintegral der Temperatur, der Leitfähigkeit und/oder der Dielektrizitätskonstanten des Mediums entlang des Weges zwischen den beiden Orten, zwischen denen die Spannung  $U$  abfällt, zu ermitteln. Aus einer Vielzahl derartiger Linienintegrale lässt sich die räumliche Verteilung der Temperatur, der Leitfähigkeit und/oder der Dielektrizitätskonstanten ermitteln.

**[0028]** Insbesondere kann die Auswerteeinheit vorteilhaft dazu ausgebildet sein, aus einer oder mehreren Messungen der elektrischen Impedanz des Weges zwischen den beiden Orten bei unterschiedlichen Frequenzen  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  mehrere Messgrößen des Mediums, wie etwa die Temperatur, die Dichte, den Luftgehalt oder eine Anzahl aktiver Zellen, zu ermitteln. Diese Messgrößen können dann einzeln oder miteinander verknüpft ausgewertet werden. Zu diesem Zweck können eine oder mehrere Messungen ausgewertet werden, also beispielsweise nacheinander durchgeführte Messungen oder auch eine simultane Messung auf mehreren Frequenzen  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ .

**[0029]** Wie zuvor erläutert, ist die Auswerteeinheit vorteilhaft zusätzlich dazu ausgebildet, aus der Leitfähigkeit und/oder der Dielektrizitätskonstanten eine Zusammensetzung des Mediums, und/oder den Grad einer Durchmischung des Mediums mit mindestens einem Gas, auszuwerten. Diese zusätzliche Auswertung kann bereits in dem Stadium erfolgen, in dem die Leitfähigkeit, und/oder die Dielektrizitätskonstante, des Mediums noch als Linienintegral vorliegt. Es kann aber auch beispielsweise eine bereits tomographisch rekonstruierte räumliche Verteilung der Leitfähigkeit, und/oder der Dielektrizitätskonstanten, nachträglich in eine räumliche Verteilung der Zusammensetzung des Mediums, und/oder des Grades der Durchmischung mit dem Gas, umgewandelt werden.

**[0030]** In einer weiteren besonders vorteilhaften Ausgestaltung umfasst das Messinstrument weiterhin Anregungsmittel zur Beaufschlagung mindestens eines Teils der dreidimensionalen Struktur mit einer mechanischen Druckspannung und/oder Zugspannung. Auf diese Weise kann die dreidimensionale Struktur gezielt verstimmt werden. Insbesondere kann durch ein periodisches Verstimmen mit einer hohen Frequenz und anschließendes Demodulieren des Messsignals mit dieser hohen Frequenz ein Signalanteil, der von der physikalischen Wechselwirkung der dreidimensionalen Struktur mit dem Medium herrührt, von Rauschen und anderen Störungen unterschieden werden. Zum Demodulieren kann ins-

besondere beispielsweise ein Lock-In-Verstärker verwendet werden.

**[0031]** Die Erfindung bezieht sich auch auf einen durchströmbaren Reaktor für die chemische und/oder biologische Umwandlung mindestens eines Mediums von einem ersten Zustand in einen zweiten Zustand. Dieser Reaktor umfasst ein von dem Medium durchströmbares Behältnis, wie beispielsweise eine Rohrleitung. Weiterhin umfasst der Reaktor das zuvor beschriebene Messinstrument.

**[0032]** Die dreidimensionale Struktur des Messinstruments ist innerhalb des Behältnisses angeordnet und somit der Strömung des Mediums durch das Behältnis ausgesetzt. Das bedeutet, dass mindestens ein Teil des durch das Behältnis strömenden Mediums auch durch die dreidimensionale Struktur strömt. Die Kontaktierungsmittel des Messinstruments sind aus dem Behältnis durch die Wandung des Behältnisses nach außen geführt.

**[0033]** Auf diese Weise wird eine Behinderung der Strömung durch die Kontaktierungsmittel minimiert. Insbesondere entstehen im Bereich der Kontaktierungsmittel keine Hinterschnitte, in denen sich Ablagerungen bilden könnten.

**[0034]** Die Kontaktierungsmittel können beispielsweise an einer Außenwand des Reaktors in leitfähigen Kontaktpads enden. Wenn die zu beobachtenden Reaktionen hinreichend langsam ablaufen, können diese Kontaktpads für die Durchführung von Messungen zwischen zwei konkreten kontaktierten Orten manuell oder robotisch angewählt werden. Für schnellere Prozesse ist es hingegen ratsam, derartige Umschaltvorgänge mit einem oder mehreren Multiplexern vorzunehmen.

**[0035]** Die Erfindung bezieht sich auch auf ein Verfahren zum Betreiben des zuvor beschriebenen Messinstruments, und/oder des zuvor beschriebenen durchströmbaren Reaktors.

**[0036]** Bei diesem Verfahren wird für eine Vielzahl von Paarungen von Orten in der dreidimensionalen Struktur des Messinstruments, die mit Kontaktierungsmitteln kontaktiert sind, jeweils ein Linienintegral des elektrischen Widerstands, und/oder der Impedanz, und/oder einer aus dem elektrischen Widerstand und/oder der Impedanz abgeleiteten Größe, zwischen den beiden Orten der Paarung ermittelt. Aus den Linienintegralen in Verbindung mit den Ortskoordinaten der jeweiligen Orte wird durch tomographische Rekonstruktion eine räumliche Verteilung des elektrischen Widerstands, der Impedanz, und/oder der abgeleiteten Größe, ermittelt.

**[0037]** Dabei kann sich die Auswahl der Paarungen insbesondere beispielsweise nach ihrem Aussage-

wert für die tomographische Rekonstruktion richten. So ist es beispielsweise vorteilhaft, wenn die Menge der insgesamt ausgewählten Paarungen die möglichen Projektionswinkel, unter denen die räumliche Verteilung jeweils auf ein Linienintegral projiziert werden kann, möglichst vollständig und mit einer hinreichenden Variabilität abdeckt. Auch sollten die Projektionswinkel sich mit einem möglichst kleinen Fehler aus den Koordinaten der gewählten Orte ergeben. Hierfür ist es vorteilhaft, wenn die gewählten Orte möglichst weit voneinander entfernt sind. Insbesondere können Paarungen von in der dreidimensionalen Struktur zueinander benachbart liegenden kontaktierten Orten ausgeschlossen werden.

**[0038]** In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung wird die tomographische Rekonstruktion mit der inversen Radon-Transformation durchgeführt. Diese Transformation verknüpft direkt eine Sammlung von Linienintegralen einer Größe unter verschiedenen Projektionswinkeln in einer Ebene mit der Verteilung der Größe in dieser Ebene.

**[0039]** Damit kann insbesondere beispielsweise die Aufgabe, die räumliche Verteilung des elektrischen Widerstands, der Impedanz oder der abgeleiteten Größe zu ermitteln, darauf zurückgeführt werden, in einer Vielzahl aufeinanderfolgender Ebenen jeweils die inverse Radon-Transformation durchzuführen. Vorteilhaft werden dann als Ausgangsmaterial für jede inverse Radon-Transformation jeweils Paarungen kontaktierter Orte gewählt, die möglichst genau in einer Ebene liegen.

**[0040]** In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung werden für mehrere Paarungen von Orten gleichzeitig Linienintegrale ermittelt. Es wird also beispielsweise ein erster Strom von dem einen Ort des ersten Paares zum anderen Ort des ersten Paares getrieben und ein erster Spannungsabfall zwischen diesen beiden Orten des ersten Paares gemessen, während gleichzeitig ein zweiter Strom von dem einen Ort des ersten Paares zum anderen Ort des zweiten Paares getrieben und ein zweiter Spannungsabfall zwischen diesen beiden Orten des zweiten Paares gemessen wird. Auch wenn der kürzeste Strompfad zwischen den beiden Orten des ersten Paares den kürzesten Strompfad zwischen den beiden Orten des zweiten Paares nicht schneidet, so wird sich doch ein Teil des jeweiligen Stroms abseits dieser kürzesten Strompfade bewegen. Es ist daher nicht prinzipiell auszuschließen, dass es zu einem Überschneiden zwischen den beiden gleichzeitig durchgeführten Messungen kommt. Dem steht jedoch als Gegenwert gegenüber, dass in der gleichen Zeit mehr Linienintegrale ermittelt werden können, was die Datenbasis für die tomographische Rekonstruktion vergrößert.

**[0041]** In einer weiteren besonders vorteilhaften Ausgestaltung werden die Linienintegrale vor oder

bei der tomographischen Rekonstruktion räumlich und/oder zeitlich gefiltert. Eine zeitliche Filterung kann beispielsweise beinhalten, Messwerte mehrfach aufzunehmen und durch Bildung eines Mittelwerts oder Medians zu glätten. Eine räumliche Filterung lässt sich beispielsweise direkt in die inverse Radon-Transformation integrieren, indem die sogenannte gefilterte Rückprojektion verwendet wird. Dabei wird jedes Linienintegral mit einem Hochpassfilter gefaltet. Die gefalteten Linienintegrale werden anschließend der inversen Radon-Transformation zugeführt.

**[0042]** Die inverse Radon-Transformation setzt grundsätzlich voraus, dass auf die Linienintegrale ein Hochpassfilter angewendet wird. Art und Stärke des Hochpassfilters sind jedoch Freiheitsgrade, mit denen auf das Auftreten von Rauschen reagiert werden kann. So kann beispielsweise mit einem Shepp-Logan-Filter eine Kontrastüberhöhung bewirkt werden um den Preis, dass das Rauschen etwas verstärkt wird. Ist das Rauschen bereits zu stark, kann stattdessen beispielsweise ein Ram-Lak-Filter verwendet werden um den Preis, dass mit dem Rauschen auch der Kontrast reduziert wird.

**[0043]** Grundsätzlich ist es bei jeder tomographischen Rekonstruktion, die auf der Lösung eines inversen Problems basiert, sinnvoll, die aufgenommenen Linienintegrale vor der Rekonstruktion zu entrauschen. Die Rekonstruktion hängt nicht stetig von den Eingangsdaten ab, so dass auch bereits geringes Rauschen deutlich verstärkt werden kann.

**[0044]** Daher wird während der Messung von Linienintegralen des elektrischen Widerstands, und/oder der Impedanz, zusätzlich an mindestens einem weiteren, an dieser Messung nicht beteiligten, mit Kontaktierungsmitteln kontaktierten Ort eine elektrische Spannung gemessen und in die tomographische Rekonstruktion, und/oder in die räumliche und/oder zeitliche Filterung, einbezogen. Wenn beispielsweise die tomographische Rekonstruktion das Lösen eines überbestimmten Gleichungssystems beinhaltet, dann können aus den zusätzlich gemessenen Spannungen weitere Gleichungen abgeleitet werden, die in das Gleichungssystem einbezogen werden können.

#### Figurenliste

**[0045]** Nachfolgend wird der Gegenstand der Erfindung anhand von Figuren erläutert, ohne dass der Gegenstand der Erfindung hierdurch beschränkt wird. Es ist gezeigt:

**Fig. 1:** Ausführungsbeispiel des durchströmbar-  
baren Reaktors **10** mit einem Ausführungsbeispiel  
des Messinstruments **1**;

**Fig. 2:** Beispielhafte Bildung einer dreidimensio-  
nalen Struktur **3** für das Messinstrument **1** aus  
individuellen Festkörpern **3a-3f**;

**Fig. 3:** Ausführungsbeispiel des Verfahrens **100**  
zum Betreiben des Messinstruments **1**;

**Fig. 4:** Schematische Darstellung des Ergebnis-  
ses einer Testmessung mit dem Messinstrument  
**1**.

**[0046]** **Fig. 1** ist eine schematische Darstellung ein-  
es Ausführungsbeispiels des durchströmbar-  
baren Reaktors **10**. Der durchströmbar-  
bare Reaktor **10** hat ein als  
Rohr ausgebildetes Behältnis **11**, das in der in **Fig. 1**  
gezeigten Momentaufnahme in Pfeilrichtung von dem  
umzuwandelnden Medium **2** durchströmt wird. Inner-  
halb des Rohrs **11** befindet sich eine metallische drei-  
dimensionale Struktur **3** mit durch Punkte (\*) markier-  
ten Knoten. Diese Knoten sind Orte, die jeweils mit  
Kontaktierungsmitteln **4** kontaktierbar sind. Die Kon-  
taktierungsmittel **4** sind Leitungen, die durch die Wan-  
dung **11a** des Rohrs **11** nach außen geführt sind.  
In **Fig. 1** sind der Übersichtlichkeit halber nur einige  
wenige dieser Kontaktierungsmittel **4** eingezeich-  
net, und nur drei hiermit kontaktierte Orte sind mit Be-  
zugszeichen **4a**, **4a'** bzw. **4a''** bezeichnet. Die drei-  
dimensionale Struktur **3** kann durch einen piezoelektri-  
schen Schwinger **8** gestaucht oder gedehnt werden.

**[0047]** Die Kontaktierungsmittel **4** sind an einen Mul-  
tiplexer **5** angeschlossen, der wiederum mit Messmit-  
teln **6** verbunden ist. Diese Messmittel **6** sind dazu  
ausgebildet, einen bekannten Strom **I** auf den Strom-  
pfad **4b** zwischen zwei frei wählbaren, jeweils durch  
Kontaktierungsmittel **4** kontaktierten Orten **4a** und **4a'**  
zu treiben und die zwischen den Orten **4a** und **4a'**  
abfallende Spannung **U** zu messen. Die Orte **4a** und **4a'**  
bilden eine Paarung **4c**.

**[0048]** Zusätzlich sind die Messmittel **6** auch dazu  
ausgebildet, die Spannung **U'** an einem weiteren Ort  
**4a''** zu messen, der nicht Teil des kürzesten Strom-  
pfades **4b** zwischen den Orten **4a** und **4a'** ist.

**[0049]** Die Messung macht sich zu Nutze, dass die  
lokalen Eigenschaften und der lokale Zustand des  
Mediums **2** jeweils einen lokalen Einfluss auf den  
elektrischen Widerstand des Materials der dreidimensio-  
nalen Struktur **3** haben. Der Widerstand bzw. die  
Impedanz, den bzw. die der bekannte Strom **I** entlang  
des Strompfades **4b** zwischen den Orten **4a** und **4a'**  
erfährt, ist somit ein Maß für ein Linienintegral derar-  
tiger Einflussgrößen entlang dieses Strompfades **4b**.

**[0050]** Aus den Spannungen **U** und **U'** werden in der  
Auswerteeinheit **7** somit Linienintegrale der Tempe-  
ratur **2a**, der Leitfähigkeit **2b** und der Dielektrizitäts-

konstanten **2c** des Mediums **2** entlang des Strom-  
pfades **4b** ausgewertet. Aus der Leitfähigkeit **2b** und  
der Dielektrizitätskonstanten **2c** können wiederum ei-  
ne Zusammensetzung **2d** des Mediums **2** sowie der  
Grad **2e** der Durchmischung dieses Mediums **2** mit ein-  
em Gas, wie beispielsweise Luft, ausgewertet wer-  
den.

**[0051]** **Fig. 2** zeigt schematisch, wie eine dreidi-  
mensionale Struktur **3** aus individuellen Festkörpern  
**3a-3f** aufgebaut werden kann. Dies ist beispielswei-  
se vorteilhaft für Halbleiter, die sich anders als Me-  
talle schwer zu einem Geflecht weben oder mit ein-  
em 3D-Drucker aufbauen lassen. **Fig. 2** zeigt eine  
Aufsicht auf einen Ausschnitt der dreidimensionalen  
Struktur **3**. In einer ersten Lage in der Zeichenebe-  
ne liegen drei Festkörper **3a-3c**, und in einer zweiten  
Lage oberhalb der Zeichenebene liegen drei weite-  
re Festkörper **3d-3f**. Wie in **Fig. 2** zu sehen ist, ist  
die dreidimensionale Struktur **3** räumlich durchgän-  
gig: Es gibt Bereiche **3g**, in denen das Medium **2** zu-  
nächst in der ersten Lage durch einen der Festkörper  
**3a-3c** und dann in der zweiten Lage durch einen der  
Festkörper **3d-3f** hindurchtreten kann.

**[0052]** **Fig. 3** zeigt ein Ausführungsbeispiel des Ver-  
fahrens **100**. In Schritt **110** wird für eine Vielzahl von  
Paarungen **4c** von Orten **4a**, **4a'** jeweils ein Linienin-  
tegral **9** des elektrischen Widerstands bzw. der Impe-  
danz zwischen den beiden Orten **4a**, **4a'** dieser Paa-  
rung **4c** ermittelt. Hierbei können gemäß Block **111**  
mehrere solche Linienintegrale **9** für mehrere Paa-  
rungen **4c** gleichzeitig ermittelt werden. Gemäß Block  
**112** kann eine räumliche und/oder zeitliche Filterung  
erfolgen, um Rauschen und andere Störungen zu be-  
seitigen. Hierfür kann beispielsweise eine an dem  
weiteren Ort **4a''** gemessene zusätzliche Spannung  
**U'** herangezogen werden.

**[0053]** In Schritt **120** werden die Linienintegrale **9** zu-  
sammengeführt, um in Verbindung mit den jeweiligen  
Ortskoordinaten der Orte **4a** und **4a'** in jeder Paarung  
**4c** durch tomographische Rekonstruktion eine räum-  
liche Verteilung **9a** des elektrischen Widerstands, der  
Impedanz bzw. einer hieraus abgeleiteten Größe zu  
ermitteln. Hierzu kann insbesondere beispielsweise  
gemäß Block **121** die inverse Radon-Transformation  
verwendet werden. Gemäß Block **122** kann auch bei  
der tomographischen Rekonstruktion eine Filterung  
erfolgen, etwa indem die gefilterte Rückprojektion als  
inverse Radon-Transformation verwendet wird. Für  
diese Filterung **122**, sowie allgemein zur Unterstüt-  
zung der tomographischen Rekonstruktion **120**, kann  
wiederum die gemäß Block **113** gemessene zusätzli-  
che Spannung **U'** herangezogen werden.

**[0054]** **Fig. 4** zeigt schematisch das Ergebnis einer  
mit einem prototypischen Messinstrument **1** durchge-  
führten Testmessung. Für diese Testmessung wur-  
de ein Heizwiderstand als Wärmequelle in das Innere

der in **Fig. 1** skizzierten dreidimensionalen Struktur **3** des Messinstruments **1** eingebracht. Aus Messungen des elektrischen Widerstands zwischen den jeweiligen Orten **4a** und **4a'** einer Vielzahl von Paarungen **4c** wurde die räumliche Verteilung **9a** der Temperatur innerhalb der dreidimensionalen Struktur **3** tomographisch rekonstruiert. In **Fig. 4** sind Projektionen des Bereichs **9a\***, in denen die Temperatur auf Grund der Wärmeentwicklung durch den Heizwiderstand oberhalb eines Schwellwerts liegt, auf die drei senkrecht aufeinander stehenden Ebenen **A**, **B** und **C** eingezeichnet. Die Kurve **9a1** repräsentiert die Kontur des Bereichs **9a\*** in der Ebene **A**. Die Kurve **9a2** repräsentiert die Kontur des Bereichs **9a\*** in der Ebene **B**. Die Kurve **9a3** repräsentiert die Kontur des Bereichs **9a\*** in der Ebene **C**. Hierbei sind die Ebenen **A**, **B** und **C** jeweils beispielhaft gewählt. Es sind auch Projektionen auf beliebige andere Ebenen ermittelbar.

#### Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Messinstrument	<b>9a</b>	räumliche Verteilung, rekonstruiert aus Linienintegralen <b>9</b>
<b>2</b>	Medium	<b>9a*</b>	Bereich mit erhöhter Temperatur bei Testmessung
<b>2a</b>	Temperatur des Mediums <b>2</b>	<b>9a1-9a3</b>	Konturen des Bereichs <b>9*</b> , projiziert auf die Ebenen <b>A</b> , <b>B</b> , <b>C</b>
<b>2b</b>	Leitfähigkeit des Mediums <b>2</b>	<b>10</b>	durchströmbarer Reaktor mit Messinstrument <b>1</b>
<b>2c</b>	Dielektrizitätskonstante des Mediums <b>2</b>	<b>11</b>	Behältnis des durchströmbareren Reaktors <b>10</b> für Medium <b>2</b>
<b>2d</b>	Zusammensetzung des Mediums <b>2</b>	<b>11a</b>	Wandung des Behältnisses <b>11</b>
<b>2e</b>	Grad der Durchmischung des Mediums <b>2</b> mit Gas	<b>A, B, C</b>	Ebenen
<b>3</b>	dreidimensionale Struktur	<b>I</b>	Strom zwischen Orten <b>4a</b> und <b>4a'</b>
<b>3a-3f</b>	Festkörper zum Aufbau der Struktur <b>3</b>	<b>U</b>	Spannungsabfall zwischen Orten <b>4a</b> und <b>4a'</b>
<b>3g</b>	durchgängige Bereiche in Struktur <b>3</b> aus Festkörpern <b>3a-3f</b>	<b>U'</b>	weitere Spannung an Ort <b>4a''</b>
<b>4</b>	Kontaktierungsmittel	<b>100</b>	Verfahren
<b>4a, 4a'</b>	mit den Mitteln <b>4</b> kontaktierte Orte, die eine Paarung <b>4c</b> bilden	<b>110</b>	Ermitteln der Linienintegrale <b>9</b>
<b>4a''</b>	weiterer mit einem Kontaktierungsmittel <b>4</b> kontaktierter Ort	<b>111</b>	gleichzeitiges Messen mehrerer Linienintegrale <b>9</b>
<b>4b</b>	Strompfad zwischen den Orten <b>4a</b> und <b>4a'</b>	<b>112</b>	räumliches und/oder zeitliches Filtern
<b>4c</b>	Paarung aus den Orten <b>4a</b> und <b>4a'</b>	<b>113</b>	Messen der zusätzlichen Spannung <b>U'</b>
<b>5</b>	Multiplexer	<b>120</b>	tomographisches Ermitteln der räumlichen Verteilung <b>9a</b>
<b>6</b>	Messmittel	<b>121</b>	Anwenden der inversen Radon-Transformation
<b>7</b>	Auswerteeinheit	<b>122</b>	räumliches und/oder zeitliches Filtern
<b>8</b>	Anregungsmittel		
<b>9</b>	Linienintegral über Widerstand, Impedanz oder abgeleitete Größe		

#### Patentansprüche

1. Messinstrument (1) für die räumliche Verteilung mindestens einer Eigenschaft eines strömenden Mediums (2), umfassend eine von dem Medium (2) durchströmbare dreidimensionale Struktur (3) aus mindestens einem elektrisch leitenden oder halbleitenden Material, weiterhin umfassend eine Vielzahl von Kontaktierungsmitteln (4), wobei jedes Kontaktierungsmittel (4) einen definierten Ort (4a) innerhalb der dreidimensionalen Struktur (3) kontaktiert und es somit ermöglicht, an diesem Ort (4a) eine elektrische Spannung an die dreidimensionale Struktur (3) anzulegen und/oder abzugreifen, und/oder einen elektrischen Strom in die dreidimensionale Struktur (3) einzuleiten und/oder aus der dreidimensionalen Struktur auszuleiten.

2. Messinstrument (1) nach Anspruch 1, wobei die dreidimensionale Struktur (3) ein Netzwerk und/oder einen offenporigen Schaum aus dem mindestens ei-



nen elektrisch leitenden oder halbleitenden Material umfasst.

3. Messinstrument (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 2, wobei die dreidimensionale Struktur (3) eine Anordnung individueller Festkörper (3a-3f) aus dem mindestens einen elektrisch leitenden oder halbleitenden Material umfasst und wobei die individuellen Festkörper (3a-3f) in dieser Anordnung durch Verpressen und/oder durch Wärmebehandlung untereinander elektrisch verbunden sind.

4. Messinstrument (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das elektrisch leitende oder halbleitende Material (3) geometrisch dazu ausgebildet ist, das durchströmende Medium zu durchmischen und somit zu homogenisieren.

5. Messinstrument (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei das elektrisch leitende oder halbleitende Material (3) mindestens ein Katalysatormaterial umfasst, welches die Aktivierungsenergie für einen chemischen und/oder biologischen Prozess in dem strömenden Medium herabzusetzen vermag, und/oder wobei eine äußere und/oder innere Oberfläche der dreidimensionalen Struktur (3) zumindest punktuell mit einem solchen Katalysatormaterial belegt ist.

6. Messinstrument (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei in der dreidimensionalen Struktur (3) mindestens 25.000 verschiedene Orte (4a) pro Kubikmeter Volumen, das eine Einhüllende um die dreidimensionale Struktur (3) hat, mit Kontaktierungsmitteln (4) kontaktiert sind.

7. Messinstrument (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei sich in der dreidimensionalen Struktur (3) mindestens 50 % der mit Kontaktierungsmitteln kontaktierten Orte (4a) jeweils in höchstens 2 cm Entfernung zu mindestens einem weiteren mit Kontaktierungsmitteln (4) kontaktierten Ort (4a) befinden.

8. Messinstrument (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 7, weiterhin umfassend einen Multiplexer (5), über den Kontaktierungsmittel (4) wahlweise mit mindestens einer Spannungsquelle, mit mindestens einer Stromquelle, mit mindestens einem Spannungsmessgerät, und/oder mit mindestens einem Strommessgerät, verbindbar sind.

9. Messinstrument (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 8, weiterhin umfassend Messmittel (6), die dazu ausgebildet sind, eine zwischen einem ersten, mit einem ersten Kontaktierungsmittel (4) kontaktierten Ort (4a) und einem zweiten, mit einem zweiten Kontaktierungsmittel (4') kontaktierten Ort (4a') abfallende Spannung  $U$  zu messen, während zwischen diesen beiden Orten (4a, 4a') ein bekannter Strom  $I$  fließt.

10. Messinstrument (1) nach Anspruch 9, wobei die Messmittel (6) dazu ausgebildet sind, eine Wechselspannung  $U$  mit einer Frequenz  $\omega$  zu messen, während ein bekannter Wechselstrom  $I$  mit der gleichen Frequenz  $\omega$  fließt.

11. Messinstrument (1) nach Anspruch 10, wobei die Messmittel (6) dazu ausgebildet sind, einen bekannten Wechselstrom  $I$  mit mindestens zwei Frequenzkomponenten  $\omega_1$  und  $\omega_2$ , und/oder mit einem Kontinuum von Frequenzen  $\omega$ , entlang des Weges (4b) zwischen den beiden Orten (4a, 4a') zu treiben und mindestens zwei Frequenzkomponenten  $\omega_1$  und  $\omega_2$  der Wechselspannung  $U$  zu messen.

12. Messinstrument (1) nach einem der Ansprüche 9 bis 10, weiterhin umfassend eine Auswerteeinheit (7), die dazu ausgebildet ist, aus der mit den Messmitteln (6) gemessenen Spannung  $U$  ein Linienintegral der Temperatur (2a), der Leitfähigkeit (2b) und/oder der Dielektrizitätskonstanten (2c) des Mediums (2) entlang des Weges (4b) zwischen den beiden Orten (4a, 4a') zu ermitteln.

13. Messinstrument (1) nach den Ansprüchen 10 und 12 sowie optional zusätzlich nach Anspruch 11, wobei die Auswerteeinheit (7) dazu ausgebildet ist, aus einer oder mehreren Messungen der elektrischen Impedanz des Weges (4b) zwischen den beiden Orten (4a, 4a') bei unterschiedlichen Frequenzen  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  mehrere Messgrößen zu ermitteln.

14. Messinstrument (1) nach Anspruch 13, wobei die Auswerteeinheit (7) zusätzlich dazu ausgebildet ist, aus der Leitfähigkeit (2b) und/oder der Dielektrizitätskonstanten (2c) eine Zusammensetzung (2d) des Mediums (2), und/oder den Grad (2e) einer Durchmischung des Mediums (2) mit mindestens einem Gas, auszuwerten.

15. Messinstrument (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 14, weiterhin umfassend Anregungsmittel (8) zur Beaufschlagung mindestens eines Teils der dreidimensionalen Struktur (3) mit einer mechanischen Druckspannung und/oder Zugspannung.

16. Durchströmbarer Reaktor (10) für die chemische und/oder biologische Umwandlung mindestens eines Mediums (2) von einem ersten Zustand in einen zweiten Zustand, umfassend ein von dem Medium (2) durchströmbares Behältnis (11) sowie das Messinstrument (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei die dreidimensionale Struktur (3) des Messinstruments (1) innerhalb des Behältnisses (11) angeordnet ist, so dass mindestens ein Teil des durch das Behältnis (11) strömenden Mediums (2) auch durch die dreidimensionale Struktur (3) strömt, und wobei die Kontaktierungsmittel (4) des Messinstruments (1) aus dem Behältnis (11) durch die Wandung (11a) des Behältnisses (11) nach außen geführt sind.

17. Verfahren (100) zum Betreiben eines Messinstruments (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 15, und/oder eines durchströmbaren Reaktors (10) nach Anspruch 16, mit den Schritten:

- für eine Vielzahl von Paarungen (4c) von Orten (4a, 4a') in der dreidimensionalen Struktur (3) des Messinstruments (1), die mit Kontaktierungsmitteln (4) kontaktiert sind, wird jeweils ein Linienintegral (9) des elektrischen Widerstands, und/oder der Impedanz, und/oder einer aus dem elektrischen Widerstand und/oder der Impedanz abgeleiteten Größe, zwischen den beiden Orten (4a, 4a') der Paarung (4c) ermittelt (110);
- aus den Linienintegralen (9) in Verbindung mit den Ortskoordinaten der jeweiligen Orte (4a, 4a') wird durch tomographische Rekonstruktion eine räumliche Verteilung (9a) des elektrischen Widerstands, der Impedanz, und/oder der abgeleiteten Größe, ermittelt (120).

18. Verfahren (100) nach Anspruch 17, wobei die tomographische Rekonstruktion (120) mit der inversen Radon-Transformation durchgeführt wird (121).

19. Verfahren (100) nach einem der Ansprüche 17 bis 18, wobei für mehrere Paarungen (4b) von Orten (4a, 4a') gleichzeitig Linienintegrale (9) ermittelt werden (111).

20. Verfahren (100) nach einem der Ansprüche 17 bis 19, wobei die Linienintegrale vor (112) oder bei (122) der tomographischen Rekonstruktion (120) räumlich und/oder zeitlich gefiltert werden.

21. Verfahren (100) nach einem der Ansprüche 17 bis 20, wobei während der Messung (110) von Linienintegralen (9) des elektrischen Widerstands, und/oder der Impedanz, zusätzlich an mindestens einem weiteren, an dieser Messung nicht beteiligten, mit Kontaktierungsmitteln (4) kontaktierten Ort (4a'') eine elektrische Spannung  $U'$  gemessen (113) und in die tomographische Rekonstruktion (120), und/oder in die räumliche und/oder zeitliche Filterung (112, 122), einbezogen wird.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

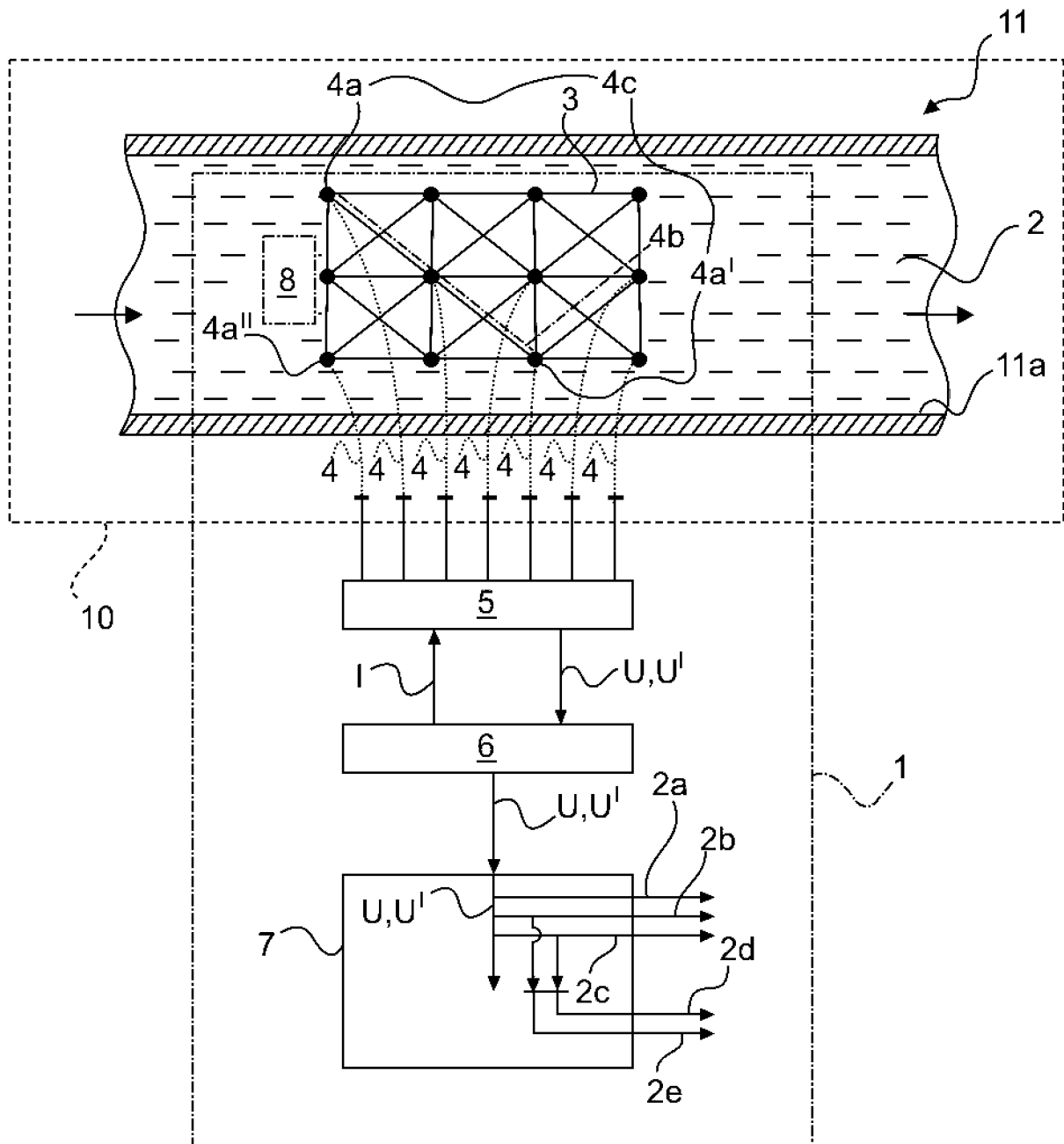


Fig. 1

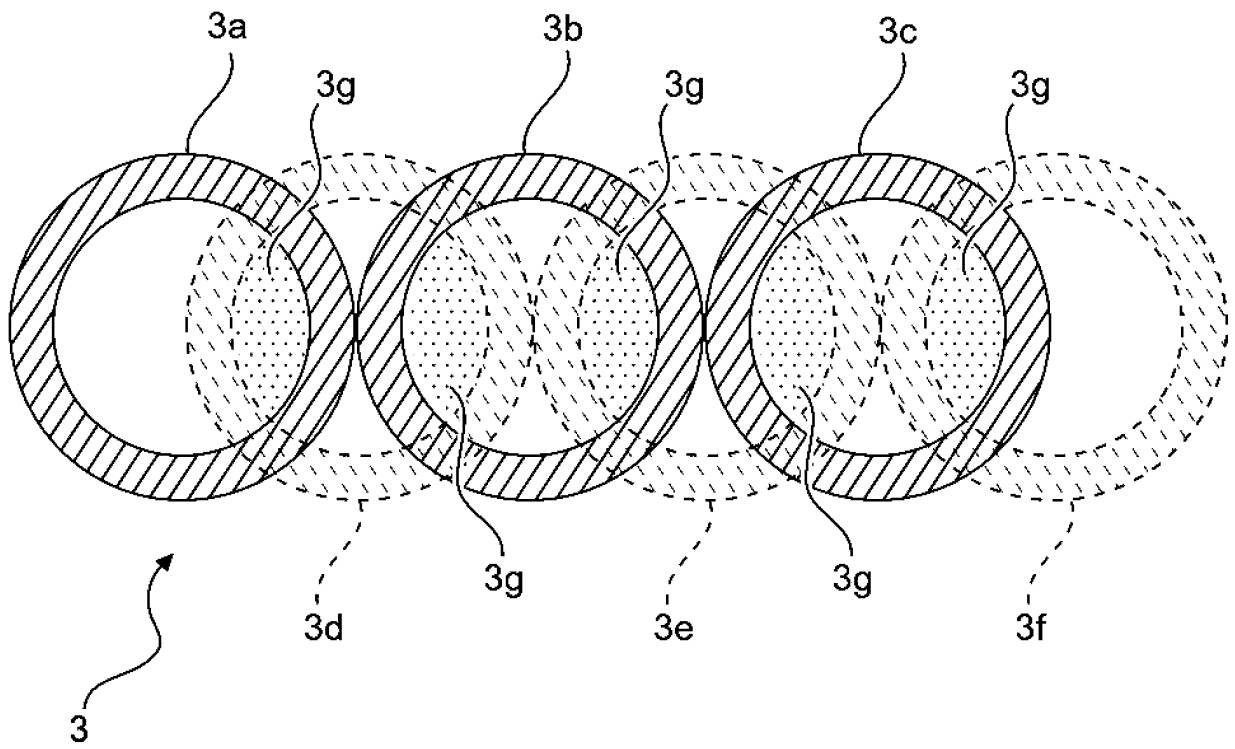


Fig. 2

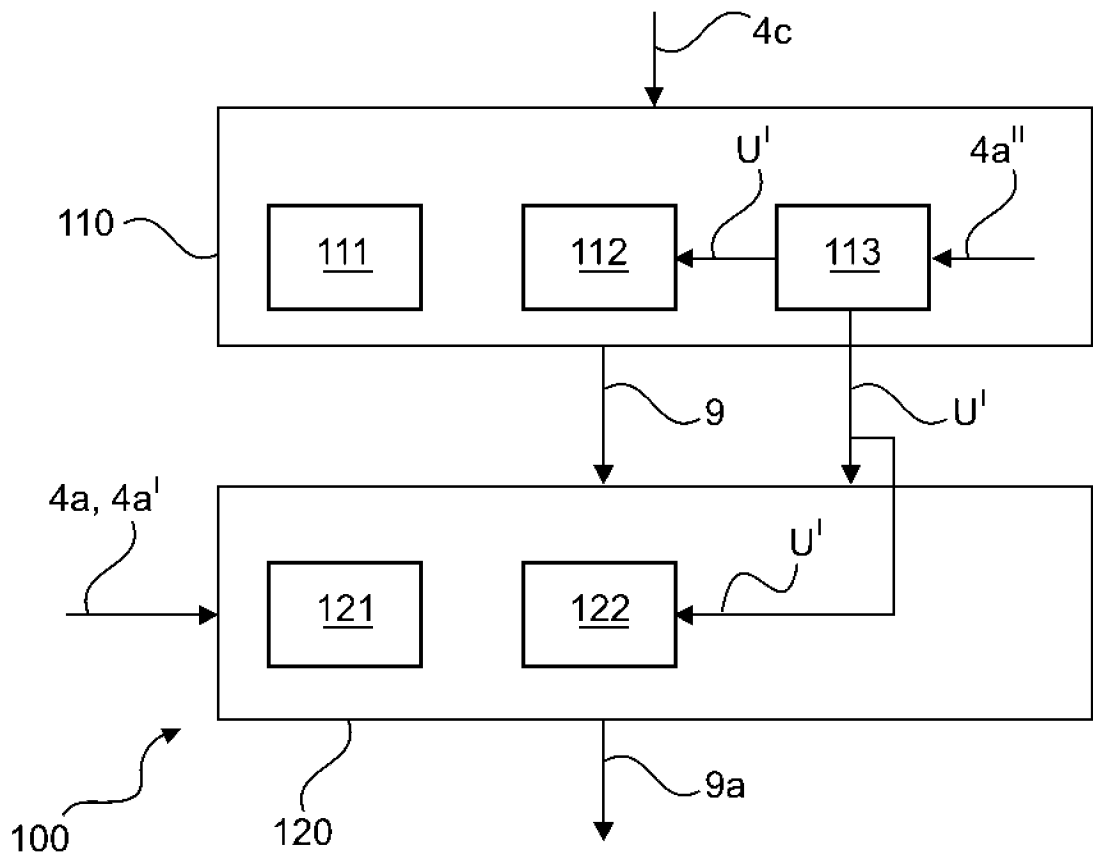


Fig. 3

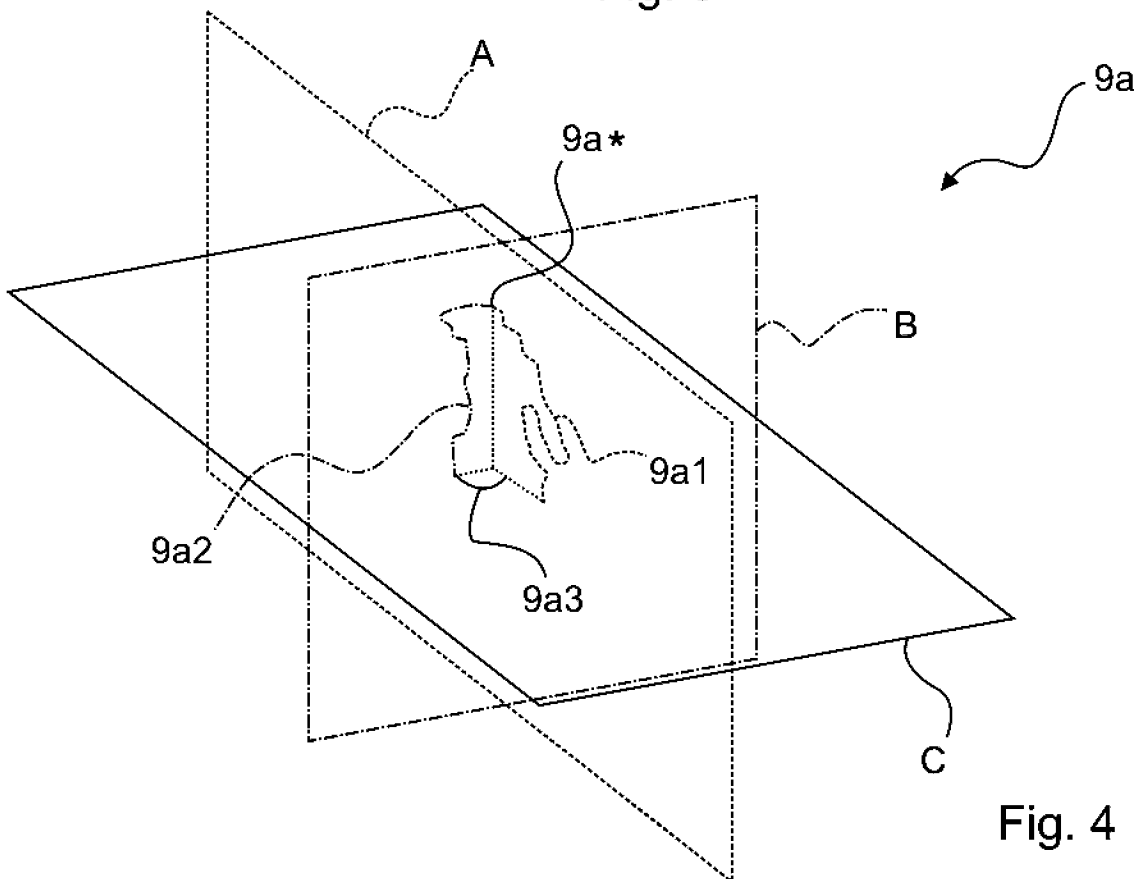


Fig. 4