

Neuartige kapazitive Sensoren für die Visualisierung von Mehrphasenströmungen

Marco Jose da Silva, Sebastian Thiele, Uwe Hampel, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e. V.

Manuskripteingang: 13. Januar 2009; zur Veröffentlichung angenommen: 19. Januar 2009

In diesem Beitrag werden zwei neuartige bildgebende Sensoren zur Untersuchung von Mehrphasenströmungen beschrieben – der kapazitive Gittersensor und der kapazitive Flächensensor. Beide Sensoren basieren auf einer matrixförmigen Anordnung von Messelementen, mit denen die elektrische Kapazität eines umgebenden Fluides sehr schnell abgetastet wird. Dadurch sind diese Sensoren in der Lage, zeitlich und räumlich hochaufgelöste Bilder der Phasenverteilung einer Mehrphasenströmung zu erzeugen. Die Sensoren und die zugehörige Messelektronik werden präsentiert. Darüber hinaus werden ausgewählte Ergebnisse von Strömungsvisualisierungen dargestellt und diskutiert.

Schlagwörter: Strömungsvisualisierung, Mehrphasenströmung, elektrische Kapazität, elektrische Permittivität, Gittersensor, interdigitaler Sensor

Novel Capacitive Sensors for the Visualization of Multi-Phase Flows

Two novel imaging sensors for the investigation of multi-phase flows are introduced – the capacitive wire-mesh sensor and the capacitive planar array sensor. Both sensor systems are based on a matrix-type arrangement of sensing elements by which the electrical capacitance of a surrounding fluid is scanned very fast. Thus these sensors are able to yield temporally and spatially high-resolved images of the phase distribution in a multi-phase flow. The sensors and the respective measuring electronics are represented. Furthermore some selected flow visualization results are represented and discussed.

Keywords: Flow visualization, multi-phase flow, electrical capacitance, electric permittivity, wire-mesh sensor, interdigital sensor

1 Einleitung

Die experimentelle Untersuchung von Flüssigkeitsströmungen ist für die Optimierung von chemischen und verfahrenstechnischen Prozessen (Reagieren, Mischen, Separieren und Transportieren von Stoffen), für die Analyse von Anlagen in der chemischen Industrie, der

Pharmazie, der Lebensmittelherstellung und der Energieerzeugung, sowie in der Grundlagenforschung zur Entwicklung und Verifikation thermohydraulischer Modelle für Mehrphasenströmungen von hoher Bedeutung. Aufgrund dieser Bedeutung besteht ein hoher Bedarf an geeigneten Messverfahren für Mehrphasenströmungen. Diese sollten in der Lage sein, die Phasenverteilung

in der Strömung sowie weitere Parameter, wie Druck, Temperatur, Fluidgeschwindigkeit oder Stoffkonzentration, möglichst mehrdimensional zu erfassen. Bis heute wurden dazu vielfältige Messverfahren auf Basis verschiedener physikalischer Sensorprinzipien vorgeschlagen.

Am bekanntesten sind derzeit optisch-bildgebende Messverfahren, wie laserbasierte Geschwindigkeitsmessung (PIV, LDA, PDA) und Hochgeschwindigkeits-Videometrie [1; 2]. Solche Messverfahren sind aber kaum für undurchsichtige Flüssigkeiten oder Phasengemische mit hoher Phasengrenzflächendichte geeignet. Darüber hinaus benötigen sie einen optischen Zugang zur Strömung, was nicht immer erfüllbar oder gewünscht ist. Auf der anderen Seite erfahren computertomographische Messverfahren eine zunehmende Bedeutung bei der Analyse von Mehrphasenströmungen. Zu den tomographischen Messverfahren zählen Röntgen- [3] und Gammastrahlen-Tomographie [4], elektrische Tomographieverfahren (EIT, ECT, ERT) [5; 6], und weitere [7; 8]. Aufgrund individueller Nachteile in der praktischen Anwendung ist jedoch keine dieser Techniken universell einsetzbar. Tomographische Messverfahren auf der Basis von Röntgen- oder Gammastrahlung sind kostenintensiv, langsam und bergen Gefährdungspotenzial. Elektrische Tomographieverfahren verfügen hingegen über nur unzureichende räumliche Auflösung.

Aus diesem Grund wurden am Institut für Sicherheitsforschung des Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e. V. (FZD) alternative Messverfahren entwickelt, mit denen einige der oben genannten Probleme gelöst werden konnten. In diesem Beitrag werden zwei neuartige bildgebende Messverfahren zur Untersuchung von Mehrphasenströmungen beschrieben. Zum einen wird der kapazitive Gittersensor und zum anderen der kapazitive Flächensensor vorgestellt. Beide Sensoren basieren auf der mehrkanaligen Messung der elektrischen Kapazität eines strömenden Fluides. Sie sind in der Lage, zeitlich und räumlich hochaufgelöste Bilder der Permittivitäts- bzw. Phasenverteilung im Querschnitt eines Strömungskanals oder entlang einer Objektfläche zu erzeugen. Zunächst werden beide Sensoren sowie die dazugehörige mehrkanalige Messelektronik vorgestellt. Nachfolgend werden zwei Anwendungsbeispiele aus der Strömungsdiagnostik präsentiert.

2 Stand der Technik

2.1 Gittersensor

Zur Untersuchung von Flüssigkeitsströmungen wurde bereits 1998 der Leitfähigkeits-Gittersensor entwickelt, der eine Messung der lokalen elektrischen Leitfähigkeit im Querschnitt eines Untersuchungsvolumens mit hoher

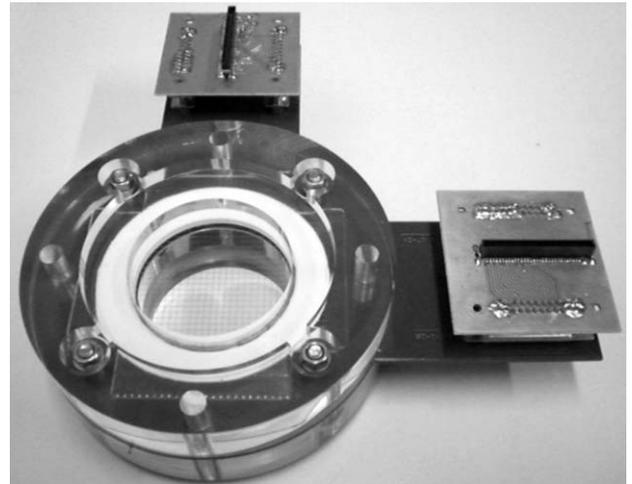


Bild 1: Gittersensor mit 2×24 Drähten für die Untersuchung von Rohrströmungen.

Figure 1: Wire-mesh sensor with 2×24 wires for the investigation of pipe flows.

räumlicher und zeitlicher Auflösung ermöglicht [9]. Das derzeitige Hauptanwendungsgebiet derartiger Sensoren sind experimentelle Grundlagenuntersuchungen zur Analyse von Gas-Wasser-Gemischströmungen in thermohydraulischen Anlagenkomponenten [10].

Gittersensoren bestehen aus einem Elektrodenraster, bei dem Drahtelektroden in zwei zur Strömung senkrechten Ebenen orthogonal zueinander in einem Abstand von wenigen Millimetern angeordnet sind. Bild 1 zeigt beispielhaft einen Gittersensor mit 2×24 Drähten. Die Drahtkreuzungen bilden so eine matrixförmige Anordnung von Messpunkten. Die einzelnen Sendelektroden werden sequenziell angeregt, während die Empfänger-electroden parallel abgetastet werden, um die elektrische Leitfähigkeit jedes einzelnen Kreuzungspunkts zu bestimmen. Da unterschiedliche Fluide unterschiedliche elektrische Eigenschaften besitzen, ist der Sensor in der Lage, komplette Bilder der Fluidverteilung in einem Strömungsquerschnitt – etwa einer Rohrleitung – darzustellen. Die Nachteile einer geringfügigen Strömungsbeflussung sowie Invasivität (konstruktive Maßnahmen zum Einbau von Sensoren in Rohrleitungen oder Anlagenkomponenten) konkurrieren mit den Vorteilen hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung.

2.2 Flächensensor

Mit Flächensensoren wird die Untersuchung mehrphasiger, tangentialer Randströmungen, wie z. B. an Rohr- und Behälterwänden, mit einer hohen zeitlichen Auflösung ermöglicht. Solche Flächensensoren sind aus einer Matrix aus koplanaren, interdigitalen Elektrodenpaaren

aufgebaut. Der Begriff „interdigital“ bezeichnet dünne, streifenförmige Elektroden, die im Abstand von weniger als einem Millimeter parallel zueinander liegen und ein fächerförmiges Elektrodenpaar bilden. Durch Anlegen einer Anregungsspannung an einer Elektrode wird zwischen den benachbarten Elektrodenstreifen ein elektrisches Feld aufgebaut, welches das zu untersuchende Medium durchdringt. Über den resultierenden elektrischen Strom zwischen der Anregungs- und der Empfangselektrode lässt sich eine elektrische Eigenschaft des Mediums analysieren. Interdigitale Sensoren wurden bereits in einer Vielzahl von Anwendungen zur Messung von physikalischen oder chemischen Eigenschaften von Stoffen eingesetzt [11]. Allerdings wurden hierbei normalerweise nur einzelne interdigitale Sensoren verwendet, welche eine hohe Messgenauigkeit erzielen.

Auf dem hier vorgestellten Sensor zur bildgebenden Prozessdiagnostik sind interdigitale Elektrodenpaare in einem periodischen Muster flächig angeordnet. Bild 2 zeigt einen typischen Flächensensor mit 32×32 Sensorzellen. Hier wird auch ein gittersensorartiges Anregungs- und Messschema verwendet. Die Anregungselektroden werden sequenziell angeregt und die Ströme an den Empfangselektroden parallel abgetastet. Auf diese Weise können Strömungsprozesse

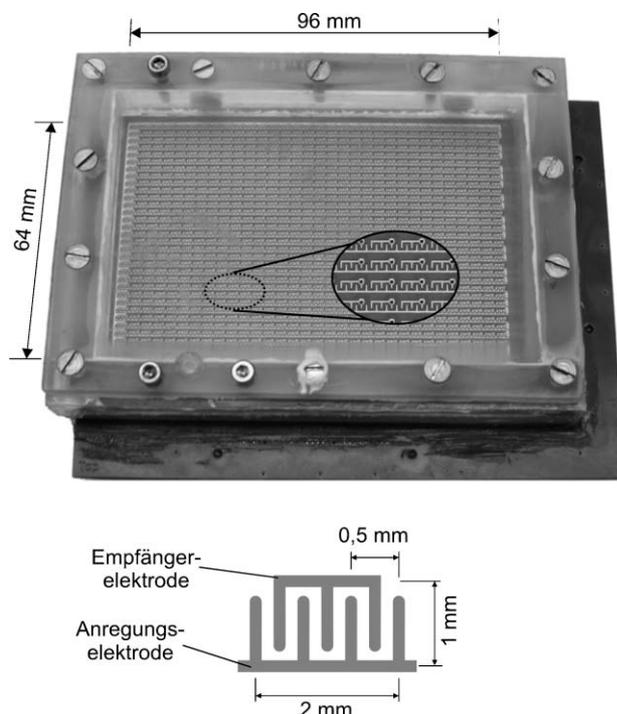


Bild 2: Experimenteller Flächensensor und Detailansicht einer interdigitalen Sensorzelle.

Figure 2: Experimental planar array sensor and in detail the geometry of a sensing structure.

über zeitlich aufgelöste Bildsequenzen visualisiert werden. Das Prinzip des Flächensensors wurde kürzlich durch unsere Arbeitsgruppe anhand einer Leitfähigkeits-Messelektronik vorgestellt [12].

3 Mehrkanalige kapazitive Messelektronik

Bisherige Gitter- bzw. Flächensensoren wurden nach einem Leitfähigkeitsmessprinzip betrieben [9; 12]. Der Einsatzbereich dieser Sensoren ist jedoch dadurch begrenzt, dass mindestens eine Phase der zu vermessenden Strömung eine elektrische Leitfähigkeit von mindestens $0,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ haben muss. Aus diesem Grund wurde das Messprinzip durch unsere Arbeitsgruppe in Richtung Kapazitäts- bzw. Permittivitätsmessung erweitert, sodass nunmehr auch eine Visualisierung von Mehrphasenströmungen in elektrisch nicht leitfähigen Flüssigkeiten, wie zum Beispiel Öl oder Alkoholen, möglich ist [13]. Das zugrunde liegende kapazitive Messprinzip wird im Folgenden beschrieben.

3.1 Allgemeines Messprinzip

Beide in Abschnitt 2 beschriebenen Sensoren können von derselben Messelektronik betrieben werden, welche die elektrische Kapazität der einzelnen Kreuzungspunkte eines Gittersensors bzw. der einzelnen Sensorzellen eines Flächensensors sehr schnell erfasst. Wie bereits erwähnt, arbeitet die Elektronik mit einem gemultiplexten Anregungs- und Messschema. Die Funktionsweise ist schematisch in Bild 3 beispielhaft für den Gittersensor dargestellt. Bild 4 zeigt das dazugehörige Anregungs- und Messschema. Die Elektroden der Sendeebene werden durch die Messelektronik nacheinander mit einer sinusförmigen Wechselspannung angeregt, wobei die nicht angeregten Elektroden der Sendeebene mittels Analogschaltern auf Nullpotential gelegt werden. An den Elektroden in der Empfangsebene werden parallel die in den Kreuzungspunkten durch das Strömungsmedium übertragenen elektrischen (Verschiebungs-) Ströme gesammelt und durch Transimpedanzverstärker (Strom-Spannungs-Wandler) in ein Spannungssignal gewandelt. Nachfolgend wird die Wechselspannung durch einen logarithmischen Verstärker demoduliert, d. h. in eine entsprechende Gleichspannung umgewandelt. Die Gleichspannungen werden mittels Analog-Digital-Umsetzern digitalisiert. Die Digitalwerte der Spannungen, welche den Kapazitätswerten im jeweiligen Kreuzungspunkt entsprechen, werden an einen Messrechner übertragen, wo die Daten bearbeitet und dargestellt werden. Die Steuerung der analogen Schalter sowie des Sample & Hold-Signals für

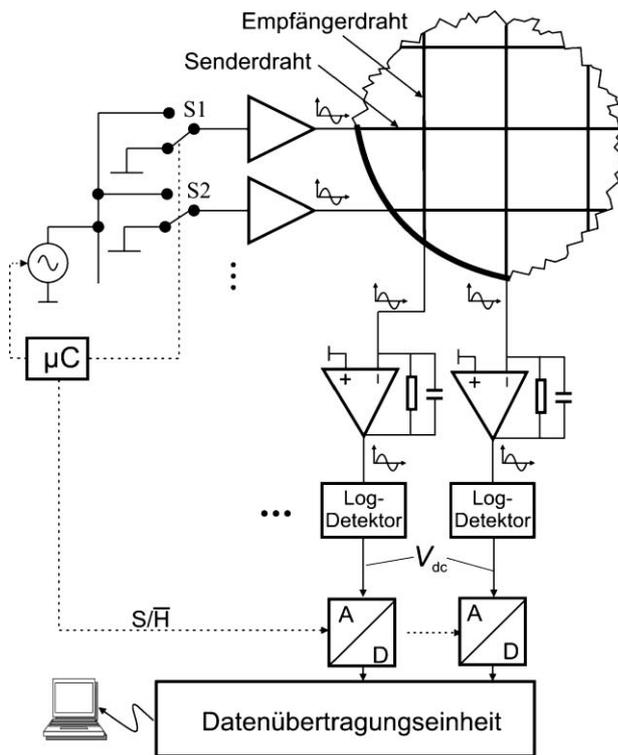


Bild 3: Messelektronik zur mehrkanaligen Kapazitätsmessung.

Figure 3: Measuring electronics for multi-channel capacitance measurement.

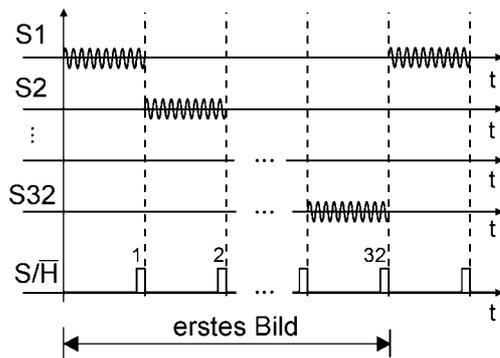


Bild 4: Anregungsschema für die gemultiplexte mehrkanalige Kapazitätsmessung.

Figure 4: Excitation scheme for the multichannel multiplexed capacitance measurement.

die Analog-Digital-Umsetzung wird durch einen PIC-Mikrocontroller realisiert. Durch schnelles sequenzielles Anregen der Sende-Elektroden und paralleles Messen an den Empfänger-Elektroden werden Bildraten von bis zu 10 kHz erreicht [14].

Durch das Anlegen von Nullpotenzial an den nicht aktivierten Sendelektroden erfolgt eine Fokussierung des Signalpfades in den Kreuzungspunkten der jeweils aktiven Sendelektrode. Die Empfängerelektroden liegen wegen der virtuellen Masse des Operationsverstärkereingangs ebenfalls auf Nullpotenzial.

In vielen diagnostischen Fragestellungen ist nicht die Kapazität an den Kreuzungspunkten, respektive die relative Permittivität des anliegenden Mediums, sondern lediglich die aktuell anliegende stoffliche Phase von Interesse, die sich durch ihren Permittivitätswert auszeichnet. Daher genügt es meist, durch ein der Datenerfassung nachgeschaltetes Binarisierungsverfahren die stoffliche Phase zu identifizieren. Für diesen Fall arbeiten Gitter- und Flächensensor als bildgebende Phasensensoren. Im Gegensatz zu tomographischen Messverfahren erlauben Gitter- und Flächensensoren eine direkte Messung der Stoffphasen- bzw. Permittivitätsverteilung und benötigen keinen Rekonstruktionsalgorithmus, welcher im Allgemeinen hohe Rechenleistung erfordert und zu Bildfehlern beitragen kann.

3.2 Permittivitätsmessung

Zur Messung der Kapazität bzw. Permittivität wird ein Wechselspannungsmessverfahren eingesetzt, welches eine hohe Immunität gegenüber Streukapazitäten und ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) durch Verwendung der Operationsverstärker-Technik bietet. Dadurch wird die Messung sehr kleiner Kapazitäten zwischen den Messelektroden in einem schnellen Messregime ermöglicht. Damit kann eine sichere Unterscheidung von Stoffphasen in transienten Mehrphasenströmungen gewährleistet werden. Die Wechselspannungsmessmethode wurde bereits erfolgreich in der elektrischen Kapazitätstomographie angewendet [15].

Das zentrale Element der Wechselspannungsmessmethode ist ein Operationsverstärker (OPV), der als Transimpedanzverstärker beschaltet ist. Hierfür wurde der Schaltkreis OPA656 des Herstellers Texas Instruments ausgewählt. Eine Prinzipschaltung ist in Bild 5 dargestellt. Als Anregungssignal dient eine sinusförmige Wechselspannung U_e . Der Schalter S_x dient zur Entkopplung der Anregungselektrode von U_e in einem sequenziellen Messregime mit mehreren Messstellen. Die an die zu bestimmende Kapazität C_x zwischen den Messelektroden mit dem Schalter S_x angelegte Spannung U_e verursacht den Strom I_x . Dieser Strom wird über den Rückkoppelkreis (C_f und R_f) des Transimpedanzverstärkers in eine zu C_x proportionale Ausgangsspannung U_a gemäß

$$U_a = -U_e \frac{C_x}{C_f} \tag{1}$$

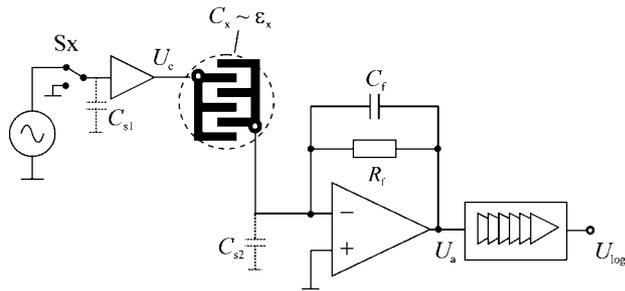


Bild 5: Schaltbild der Kapazitätsmessung mit der Wechsellspannungsmethode als Beispiel für den Flächensensor.

Figure 5: Equivalent circuit for one single channel of the capacitance measuring electronics. Exemplary shown is the planar sensor.

gewandelt [15]. Der Widerstand R_f dient zur Frequenzkompensation des OPV.

Die Kapazitäten C_{s1} und C_{s2} sind parasitäre Streukapazitäten zwischen den Elektroden und Masse. Diese werden durch Kabelzuführungen, Kontaktierungen und benachbarte Elektroden in einem mehrkanaligen System gebildet. Durch den geringen Innenwiderstand der Spannungsquelle U_e wird die positive Elektrode von C_{s1} auf das niederohmige Potenzial der Spannungsquelle gebracht. Der virtuelle Kurzschluss am Eingang des OPV verhindert die Aufladung von C_{s2} . Somit haben die Streukapazitäten keinen Einfluss auf die Messung. Die hohe Streuimmunität der Messmethode ist ein großer Vorteil für die Messung kleiner Kapazitäten.

Zur Demodulation der sinusförmigen Spannung U_a wurde ein logarithmischer Detektor AD8307 (Analog Devices) verwendet. Dieser erzeugt eine Gleichspannung U_{log} proportional zur Amplitude der Wechselspannung U_a

$$U_{log} = U_1 \cdot \ln\left(\frac{U_a}{U_2}\right). \quad (2)$$

Die Spannungen U_1 und U_2 sind spezifische Konstanten des Schaltkreises und werden experimentell ermittelt.

Die Kapazität eines Kreuzungspunktes bzw. eines Sensorelements ist proportional zur relativen Permittivität ϵ_r der Substanz im Messvolumen

$$C_x = k_g \epsilon_0 \epsilon_r, \quad (3)$$

wobei ϵ_0 die relative Permittivität des Vakuums (8,85 pF/m) und k_g ein Geometriefaktor zur Beschreibung der Elektrodenanordnung ist.

Unter Berücksichtigung der Gleichungen (1) bis (3) ergibt sich die Übertragungsfunktion der Empfangselektronik

$$U_{log} = a \cdot \ln(\epsilon_r) + b \quad (4)$$

wobei die Parameter a und b Konstanten sind, welche den Geometriefaktor k_g , die Rückkopplungskapazität C_f und die Log-Detektor-Konstanten U_1 und U_2 einschließen. Infolgedessen stellt die gemessene Spannung U_{log} effektiv die relative Permittivität ϵ_r dar. Die logarithmische Antwort des Messsystems sichert eine verlässliche Permittivitätsmessung in einem breiten Bereich von Permittivitätswerten ab und erlaubt daher die Untersuchung eines breiten Spektrums von Substanzen.

3.3 Kalibrierung

Die bei Messungen entstehenden Datenvolumina repräsentieren die gemessenen Spannungswerte $U_{log}(i, j, k)$, welche gemäß Gl. (4) wiederum proportional zu den Permittivitätswerten für jeden Gitterpunkt (i, j) und zum Messzeitpunkt k sind.

Die Toleranzen der Kapazitäten und der Verstärkungen der OPVs sowie die Toleranzen bei der Sensorfertigung ergeben für jeden Kanal der Erfassungselektronik eine geringfügig abweichende Charakteristik. Diese führt zu einer Abweichung der Ausgangsspannungen U_{log} für die verschiedenen Kanäle bei gleichen Umgebungsbedingungen für alle Sensorzellen. Diese systematischen Abweichungen müssen über eine Kalibrierung kompensiert werden. Dabei werden zum einen die Spannungswerte $U_{log}^H(i, j)$ für ein Fluid hoher relativer Permittivität ϵ_r^H (etwa Öl oder Wasser) und zum anderen die Werte $U_{log}^N(i, j)$ für ein Fluid niedriger relativer Permittivität ϵ_r^N (normalerweise Luft) ermittelt. In der Regel werden Durchschnittswerte über ein ausreichend langes Zeitintervall gebildet, um den Einfluss von Rauschen zu unterdrücken. Auf der Basis der Messwerte der oberen und unteren Kalibriermessungen können für jeden Gitterkreuzungspunkt bzw. für jede Sensorzelle die entsprechenden Parameter a und b aus Gl. (4) gemäß

$$a(i, j) = \frac{U_{log}^H(i, j) - U_{log}^N(i, j)}{\ln(\epsilon_r^H) - \ln(\epsilon_r^N)} \quad (5)$$

und

$$b(i, j) = \frac{U_{log}^N(i, j) \cdot \ln(\epsilon_r^H) - U_{log}^H(i, j) \cdot \ln(\epsilon_r^N)}{\ln(\epsilon_r^H) - \ln(\epsilon_r^N)} \quad (6)$$

bestimmt werden. Daraus ergibt sich die relative Permittivität am Messpunkt i und j zu

$$\epsilon_r(i, j, k) = \exp\left(\frac{U_{log}(i, j, k) - b(i, j)}{a(i, j)}\right) \quad (7)$$

aus der gemessenen Spannung $U_{log}(i, j, k)$ sowie aus den durch die Kalibrierung ermittelten Konstanten $a(i, j)$ und $b(i, j)$.

4 Anwendungsbeispiele

Die Anwendung der oben beschriebenen Sensoren wird nachfolgend anhand ausgewählter Strömungsexperimente erläutert. Es ist dabei nicht das Ziel, die zugrunde liegende Physik der Strömungsvorgänge zu beschreiben, sondern vielmehr zu zeigen, dass die genannten Sensoren geeignete Werkzeuge zur Untersuchung derartiger komplexer Strömungen darstellen.

4.1 Visualisierung der Strömungsformen einer Zweiphasenströmung in einem Rohr

Für Gas-Flüssigkeits-Zweiphasenströmungen gibt es prinzipiell eine endlose Anzahl von Formen, in denen die Phasen innerhalb einer Strömung verteilt sein können. Diese Verteilungen werden gewöhnlich in einige sogenannte Strömungsformen oder -regime unterteilt. Die Berechnung von Energie-, Impuls- und Stofftransport innerhalb der Zweiphasenströmung setzt die Kenntnis der Strömungsform voraus, da viele Gleichungen für Wärmeübergang, Druckabfall und Stofftransport nur für bestimmte Strömungsformen gelten [16]. Ebenfalls ist die Analyse von sich einstellenden Strömungsformen in Rohren oder Reaktionsgefäßen in vielen Anwendungsgebieten von Interesse, da spezielle Strömungsformen unerwünscht sind. Dies gilt zum Beispiel in der Mineralölförderung, wo das Auftreten von Pfropfenströmungen in Rohrnetzen zur Beschädigung von Anlagenkomponenten durch Druckschläge führen kann.

Zur Analyse von Strömungsformen in einer aufwärtsgerichteten Silikonöl-Gas-Zweiphasenströmung in einem Rohr wurde der neu entwickelte Kapazitäts-Gittersensor eingesetzt. Ziel war die Untersuchung der sich am oberen Ende der Rohrleitung einstellenden Strömungsform für vorgegebene Gas- und Flüssigkeitsdurchsätze. Dafür wurde der Sensor aus Bild 1 eingesetzt. Die Rohrleitungsstrecke hat 67 mm Innendurchmesser und ist 6 m lang. Silikonöl ($\epsilon_r = 2,7$) wird aus einem Sammelbehälter in das Testrohr gepumpt. Dabei durchströmt das Öl einen Satz von Rotametern zur fein skalierten Durchflussmessung. Luft ($\epsilon_r = 1$) aus einem Druckluftspeicher wird mit dem Öl am unteren Ende der Rohrleitung gemischt. Der Gittersensor liegt 5 m hinter der Gaseinspeisung, sodass die zu untersuchende Strömung als voll entwickelt betrachtet werden kann. Der obere Rohranschluss ist mit einem Gravitationsseparator verbunden, in dem die Luft zur Atmosphäre freigegeben wird. Die abseparierte schaumfreie Flüssigkeit wird dann dem Sammelbehälter zurückgeführt.

Bild 6 zeigt gemessene repräsentative Gasgehaltsverteilungsschnittbilder. Je nach Leerrohrgeschwindigkeit

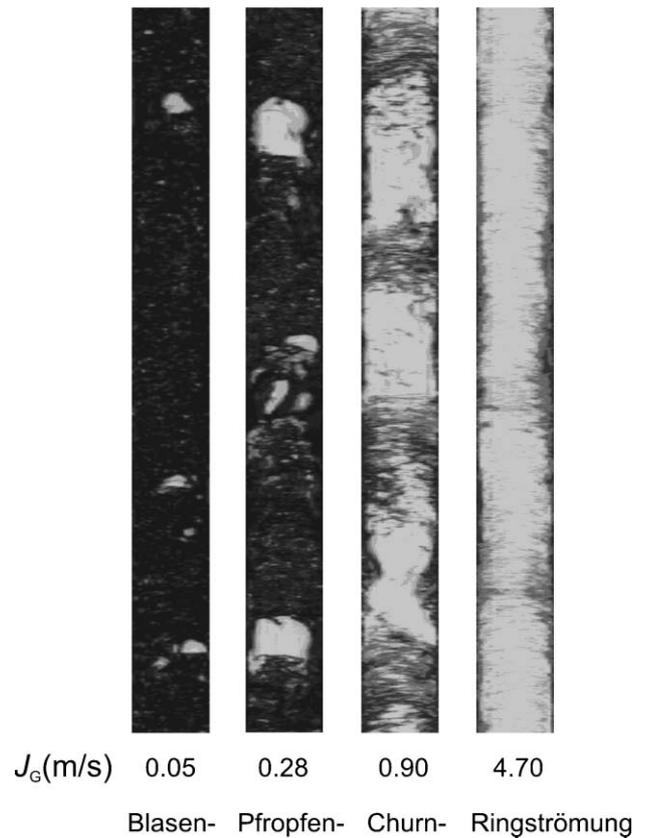


Bild 6: Messdaten einer aufwärtsgerichteten Zweiphasenströmung in einem senkrechten Rohr (axialer Schnitt entlang des Rohrdurchmessers) für verschiedene Luftleerrohrgeschwindigkeiten J_G . Die Öl-Leerrohrgeschwindigkeit liegt bei 1 m/s. Die Gasphase ist hell, die Flüssigphase dunkel abgebildet.

Figure 6: Visualization of data acquired with a wire-mesh sensor in a vertical test section of a two-phase flow for different gas superficial velocities J_G . The oil superficial velocity was kept constant at 1 m/s. Gaseous phase is shown in bright while liquid phase is in dark.

der Gasphase J_G sind charakteristische Strömungsformen zu beobachten. Die Bildrate des Sensors lag bei 5000 Bildern pro Sekunde. Mit dieser Aufnahmegegeschwindigkeit lassen sich viele Details der Strömung visualisieren. In Bild 6 sind Blasen-, Pfropfen-, Churn-Turbulent- und Ringströmungsform [16] ersichtlich, wobei die Öl-Leerrohrgeschwindigkeit konstant bei 1 m/s lag, während die Luft-Leerrohrgeschwindigkeit variiert wurde. Die Gasphase wird in den Bildern hell, die Flüssigphase dunkel dargestellt.

4.2 Visualisierung der Vermischung zweier Flüssigkeiten mittels eines Flächensensors

Das Mischen von Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte tritt in einer Vielzahl von industriellen Anwendungen auf, etwa bei der Mischung von Benzinfraktionen, beim Mischen von Polymeren und in der Getränkeproduktion. Heute werden Mischvorgänge in verfahrenstechnischen Apparaten anhand von Erfahrungswerten durchgeführt und unterliegen nur geringer oder keiner Prozessüberwachung. Ein Online- und Echtzeit-Monitoring von Mischprozessen kann dabei helfen, Prozesse zu optimieren, Energie zu sparen und die Produktqualität zu verbessern (Verhinderung ungenügender Vermischung zum Beispiel durch Segregation). Die Eignung des neu entwickelten kapazitiven Flächensensors für die Visualisierung von Mischvorgängen wurde in einem Schlüsselexperiment untersucht.

In diesem Experiment wurde der Flächensensor aus Bild 2 benutzt. Die Flüssigkeiten konnten in den Behälter durch eine kleine Öffnung eingefüllt werden. Da der Sensor im Behälter unter einem Winkel von ca. 40° gedreht montiert war, erscheint das Flüssigkeitsniveau in den Bildern geneigt. Der Anfangszustand für das Vermischungsexperiment wurde in folgender Weise hergestellt. Zuerst wurden in den Behälter 40 ml Isopropanol ($\epsilon_r = 20,1$) gefüllt. Danach wurden in den Behälter sehr langsam 40 ml Waschbenzin ($\epsilon_r \sim 2,0$) eingefüllt, um zunächst das Vermischen beider Flüssigkeiten zu vermeiden. Der obere Teil des Behälters wurde leer gelassen (Luft). Aus diesem geschichteten Initialzustand wurden die beiden Flüssigkeiten durch Schütteln des Behälters mit einer Dauer von 10 s in Bewegung versetzt. Die Permittivitätswertverteilung entlang der Sensoroberfläche wurde für 15 s mit einer Wiederholungsrate von 1 kHz aufgezeichnet. Einige ausgewählte Bilder, in denen der transiente Mischprozess beobachtet werden kann, sind in Bild 7 dargestellt. Im ersten Bild bei $t = 0$ ist die dreischichtige Struktur von Isopropanol, Waschbenzin und Luft leicht erkennbar. Am Ende, bei $t = 15$ s, sind beide Flüssigkeiten vollständig gemischt. Die beiden mittleren Abbildungen auf der linken Seite in Bild 7 zeigen zwei weitere ausgewählte Permittivitätsverteilungen. Der Vermischungsprozess ist transient und gelegentlich können einige Strukturen wie zum Beispiel Wellen identifiziert werden. In den rechts stehenden Verteilungen im Bild 7 wird der zeitliche Verlauf einer solchen Flüssigkeitswelle auf der Sensoroberfläche mit einer Zeitauflösung von 10 ms dargestellt.

Aus den durch den Flächensensor gewonnenen Bildern können prinzipiell interessante Prozessparameter

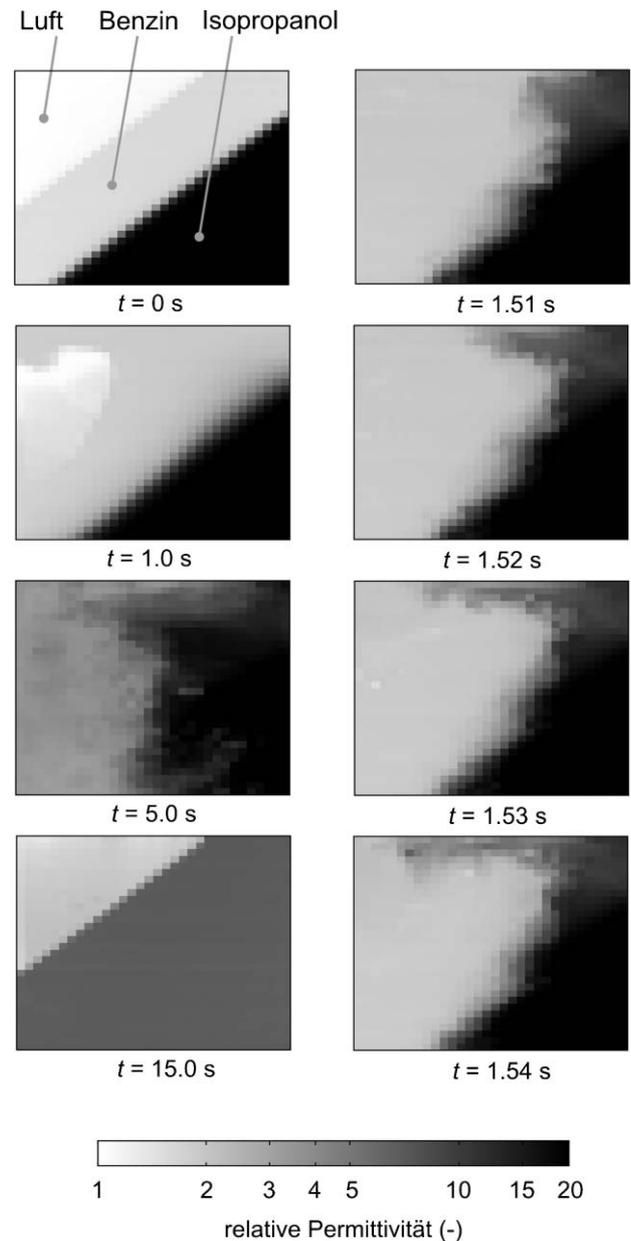


Bild 7: Ausgewählte Permittivitätsbilder einer 15-s-Sequenz für einen Vermischungsprozess, aufgezeichnet mit dem kapazitiven Flächensensor.
Figure 7: Selected permittivity distribution images of a two-component mixing experiment acquired with the capacitive planar sensor.

wie das lokale Mischverhältnis oder der Mischprozessfortschritt durch Bildverarbeitungsalgorithmen extrahiert werden.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden zwei neuartige kapazitive Sensoren mit der dazugehörigen mehrkanaligen Messelektronik zur Visualisierung von Mehrphasenströmungen präsentiert. Beide Sensoren sind in der Lage, zeitlich und räumlich hochaufgelöste Bilder von Fluidverteilungen zu erzeugen. Sie eignen sich somit für die Untersuchung transienter Mehrphasen-Strömungsphänomene. Die Sensoren können prinzipiell sehr robust für raue Betriebsbedingungen, wie hohe Drücke und Temperaturen, ausgelegt werden [17] und sind daher für viele praktische strömungsmechanische und technologische Fragestellungen in Forschung und Industrie einsetzbar.

Literatur

- [1] R. J. Adrian: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. In: Annual Review of Fluid Mechanics **23**, 1991, S. 261–304.
- [2] K. Bauckhage: Gleichzeitige Erfassung von Partikelmerkmalen und Eigenschaften mehrphasiger Strömungen mit Hilfe der Phasen-Doppler-Anemometrie. In: Chemie Ingenieur Technik **68**, 1996, S. 253–266.
- [3] E. Hervieu, E. Jouet, L. Desbat: Development and validation of an x-ray tomograph for two-phase flow. In: Annals of the New York Academy of Sciences **972**, 2002, S. 87–94.
- [4] U. Hampel, A. Bieberle, D. Hoppe, J. Kronenberg, E. Schleicher, T. Sühnel, F. Zimmermann, C. Zippe: High resolution gamma ray tomography scanner for flow measurement and non-destructive testing applications. In: Review of Scientific Instruments **78**, 2007, S. 103 704.
- [5] T. A. York: Status of electrical tomography in industrial applications. In: Journal of Electronic Imaging **10**, 2001, S. 608–619.
- [6] D. Watznig: Sequenzielles Monte-Carlo-Filter zur zweidimensionalen Rekonstruktion von Materialinhomogenitäten in Mehrphasenströmungen. In: Technisches Messen **75**(4), 2008, S. 221–229.
- [7] C. Boyer, A. M. Duquenne, G. Wild: Measuring techniques in gas-liquid and gas-liquid-solid reactors. In: Chemical Engineering Science **57**(16), 2002, S. 3185–3215.
- [8] E. A. Hammer, G. A. Johansen, T. Dyakowski, E. P. L. Roberts, J. C. Cullivans, R. A. Williams, Y. A. Hassan, C. S. Claiborn: Advanced experimental techniques. In: Multiphase Flow Handbook, Crowe, C. T. (Hrsg.), Boca Raton 2006, CRC Press.
- [9] H.-M. Prasser, A. Böttger, J. Zschau: A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. In: Flow Measurement and Instrumentation **9**, 1998, S. 111–119.
- [10] H.-M. Prasser, M. Beyer, H. Carl, A. Manera, H. Schütz, P. Pietruske: Experiments on upwards gas/liquid flow in vertical pipes. Wissenschaftlich-Technische Berichte/Forschungszentrum Dresden-Rossendorf; FZD-482, 2007.
- [11] A. V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, M. Zahn: Interdigital sensors and transducers. In: Proceedings of the IEEE **92**, 2004, S. 808–845.
- [12] M. J. Da Silva, T. Sühnel, E. Schleicher, R. Vaibar, D. Lucas, U. Hampel: Planar array sensor for high-speed component distribution imaging in fluid flow applications. In: Sensors **7**, 2007, S. 2430–2445.
- [13] M. J. Da Silva, E. Schleicher, U. Hampel: Capacitance wire-mesh sensor for fast measurement of phase fraction distributions. In: Measurement Science and Technology **18**, 2007, S. 2245–2251.
- [14] S. Thiele: Entwicklung und Aufbau eines kapazitiven Oberflächensensors für die Phasenverteilungs- und Geschwindigkeitsmessung zweiphasiger Strömungen. Dipl.-Arb., Technische Universität Dresden, 2007.
- [15] W. Q. Yang, T. A. York: New AC-based capacitance tomography system. In: IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology **146**, 1999, S. 47–53.
- [16] B. Azzopardi: Gas-liquid Flows. New York: Begell House, 2006.
- [17] H. Pietruske, H.-M. Prasser: Wire-mesh sensors for high-resolving two-phase flow studies at high pressures and temperatures. In: Flow Measurement and Instrumentation **18**, 2007, S. 87–94.



1



2



3

1 Dr.-Ing. Marco Jose da Silva absolvierte von 1996 bis 1998 das Grundstudium an der Federal University of Technology – Parana, Brasilien und von 1999 bis 2002 das Hauptstudium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden (Studienrichtung Informatikstechnik). Von 2003 bis 2004 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Federal University of Technology – Parana tätig. Seit 2004 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter des Forschungszentrums Dresden-Rossendorf e. V. am Institut für Sicherheitsforschung. Im Jahr 2008 promovierte er zum Dr.-Ing. in Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden.

Adresse: Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e. V.,
Institut für Sicherheitsforschung, Bautzner Land-
straße 128, 01328 Dresden, E-Mail: m.dasilva@fzd.de

2 Dipl.-Ing. Sebastian Thiele absolvierte von 2001 bis 2007 sein Studium der Elektrotechnik (Studienrichtung Automatisierungs- und Regelungstechnik) an der Technischen Universität Dresden. Seit 2007 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter des Forschungszentrums Dresden-Rossendorf e. V. am Institut für Sicherheitsforschung und hat im Juli 2008 sein Promotionsstudium im Themengebiet der autonomen Sensorik an der TU Dresden aufgenommen.

Adresse: s. o., E-Mail: thiele@fzd.de

3 PD Dr.-Ing. habil. Uwe Hampel studierte Informatik, und promovierte und habilitierte an der Fakultät Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden. Seit 2002 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit 2006 Leiter der Abteilung Experimentelle Thermofluid-dynamik am Forschungszentrum Dresden-Rossendorf. Sein Fachgebiet ist die Messtechnik für Mehrphasenströmungen mit Schwerpunkt bildgebende Messverfahren.

Adresse: s. o., E-Mail: u.hampel@fzd.de