

# Zeitlich und örtlich hochaufgelöste Messung von Oberflächenbelastungen infolge Kavitation

Martin Dimitrov, Tim F. Groß, Peter F. Pelz

## 1 Stand der Technik

Kavitation, ein weitreichendes Phänomen in hydraulischen Maschinen, entsteht infolge hydrodynamischer Druckabsenkung. Wenn der statische Druck in der Maschine lokal den Dampfdruck oder die Zugfestigkeit der Flüssigkeit erreicht, wachsen Keime zu Kavitationsblasen. Der anschließende Blasenkollaps führt zur Aussendung von Druckwellen, die schließlich zur Anregung von Bauteiloberflächen und damit zur Schallemission führen. Darüber hinaus folgt aus dem unmittelbar an Oberflächen stattfindenden Blasenkollaps im Einzelnen oder in Kollektiven erosiver Materialverschleiß. Bei dauerhaftem Einsatz hydraulischer Maschinen in einem sich durch starke Kavitation auszeichnenden Betriebsbereich kann es zu lokalen Bauteilschädigungen und einer deutlichen Reduzierung der Lebensdauer kommen. In vielen technischen Anwendungen wird der Einsatzbereich hydraulischer Maschinen nicht nur von der zur Verfügung stehenden Leistung begrenzt, sondern auch durch das aggressive Verhalten der Kavitation. Eine frühzeitige Erkennung kritischer Kavitationszustände während des Betriebs kann die Industrie in die Lage versetzen, die Lebensdauer hydraulischer Maschinen zu erhöhen, indem aktiv, z. B. durch Reduzierung der Drehzahl, in den Betrieb der Maschine eingegriffen wird. Darüber hinaus trägt eine möglichst detaillierte Kenntnis der durch die Kavitation verursachten Werkstoffbelastung bzgl. Ort und Intensität dazu bei, Bauteile strömungstechnisch zu optimieren und damit Standzeiten sowie Wartungsintervalle kostenorientiert abzustimmen.

Derzeit kommen zum Feststellen des erosiven Potenzials kavitierender Strömungen hauptsächlich zwei Messmethoden zum Einsatz; nämlich (i) die irreversible Änderung dünner Schichten (Pit-Count) und, (ii) die akustische Messung der Erosion.

Methoden, welche die unmittelbare Schädigung einer Bauteiloberfläche im Fokus haben (i), nutzen dünne Schichten unterschiedlicher Materialien wie Lacke oder Weichmetalle (z.B. Kupfer). Diese werden auf kavitationsbeanspruchte Flächen aufgetragen, so dass deren Oberfläche irreversibel verändert wird. Die Kavitationsschädigung wird nach dem Stand der Technik durch optische Verfahren ausgewertet. Diese Methode erweist sich jedoch als zeitintensiv und aufwendig, da die Messergebnisse nicht direkt zur Verfügung stehen und das Verfahren ein kumulatives Verfahren ist, d. h. für jede Betriebspunktänderung muss eine untersuchte Oberfläche neu beschichtet, geschädigt und ausgewertet werden.

Eine alternative Methode die Kavitationsaggressivität zu erfassen, ist die akustische Methode (ii). Die implodierenden Kavitationsblasen erzeugen Druckwellen, die wiederum als akustische Signale messbar sind. Die erzeugten Signale weisen einen steilen Anstieg des Drucksignals ( $>100 \text{ bar}/\mu\text{s}$ ) auf, der sich in der Regel bei kleineren Blasen über einige hundert Nanosekunden erstreckt. Häufig werden Hydrophone oder hochfrequente Drucksensoren basierend auf Piezotechnologie eingesetzt, die von ihrem dynamischen Verhalten meist jedoch nicht ausreichen, um das Kavitationsereignis zeitlich ausreichend genau aufzulösen.

Wesentlicher Nachteil bei der akustischen Methode ist der Verlust der räumlichen Information. Flüssigkeit und elastische Festkörper der Maschine wirken als räumliche Tiefpass-Filter, so dass die Belastungsverteilung auf der benetzten Oberfläche nicht bestimmt werden kann. Letztlich führt turbulenzbedingter Schall der Strömung zu Störungen des Signals.

Neben den zwei herkömmlichen Methoden die Kavitationserosion zu messen und anschließend zu beurteilen, existiert mit einem am Institut für Fluidsystemtechnik entwickelten Foliensensor eine dritte Möglichkeit [1][2][3][4]. Diese neue Messtechnik ermöglicht es, Oberflächendrücke örtlich und zeitlich hochaufgelöst zu erfassen und anschließend auf das erosive Potential zu schließen. Die Kernkomponente der Oberflächendrucksensoren ist ein dünne piezoelektrische Folie aus dem Kunststoff Polyvinylidenfluorid (PVDF; C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), die sich durch ihre geringe Dicke von ungefähr 50 µm und der damit verbundenen hohen rechnerischen Eigenfrequenz von bis zu 10 GHz auszeichnet.

Die Folie reagiert auf Druck mit einer Dickenänderung und infolge des piezoelektrischen Effektes mit der Erzeugung einer elektrischen Ladung. Da die Folien aus einem elektrisch nicht leitenden Kunststoff bestehen, muss die Ladung mittels Elektroden aus der Folie abgeleitet werden. Durch unterschiedliche Gestaltungen der Elektroden kann der Sensor als Punktsensor (0-D), Liniensensor (1-D) oder Flächensensor (2-D) ausgeführt werden. Je nach Elektrodendesign ändert sich die Messdatenerfassung und –auswertung.

Tabelle 1 Vor- und Nachteile der verschiedenen Technologien

	akustisch	Pit-count	PVDF-Folie
online Messung	+	-	+
einfache Auswertung	+	-	+
örtliche Auflösung	-	+	+
zeitliche Auflösung	+	-	+
Werkstoffstudien	-	+	0
Versuchsvorbereitungszeit	+	-	+
Gekrümmte Oberflächen	+	0	+

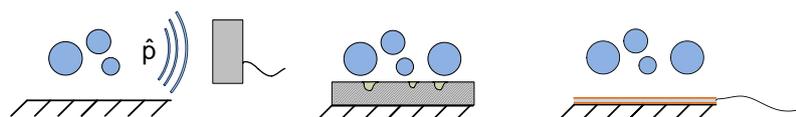


Tabelle 1 bewertet die drei vorgestellten Technologien hinsichtlich verschiedener Kriterien. Neben der hier vorgestellten Vermessung des Erosionspotentials kavitierender Strömungen bietet die PVDF-Sensortechnik zahlreiche weitere Anwendungsmöglichkeiten. Neben der

Vermessung transienter und turbulenter Druckschwankungen in Strömungen ist auch der Einsatz in anderen Bereichen der Technik, zum Beispiel der Robotik als schneller und flexibler Sensor denkbar.

## 2 Überblick über transiente, turbulente und kavitierende Strömungen

In der Forschung auf den Gebieten Fluidenergiemaschinen, Strömungs- und Strukturmechanik ist die experimentelle Ermittlung des Druckfeldes an der Oberfläche notwendig, um entweder Modellhypothesen zu verifizieren oder Oberflächenbeanspruchungen zu ermitteln. In der Vergangenheit war die Kenntnis des Druckfeldes im zeitlichen Mittel häufig ausreichend, da sowieso nur zeitlich gemittelte Größen mit der verfügbaren Rechenleistung berechenbar waren.

Da Modelle heute zunehmend kleinere Zeitskalen auflösen und diese Modelle auch rechenbar sind, wächst aber zunehmend der Wunsch, transiente Vorgänge an Grenzflächen aufzulösen.

Im Folgenden soll Klarheit darüber geschaffen werden, welche Zeit- und Längen- und Druckskalen für eine zeitlich und räumlich auflösende Messtechnologie von Interesse sind. Dabei werden drei Fälle unterschieden: (i) periodische Strömungen, (ii) turbulente Strömungen, (iii) kavitierende Strömungen. Es wird von einer Wasserströmung (kinematischen Viskosität  $\nu = 1 \text{ mm}^2/\text{sec}$ , Dichte  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) mit einer Geschwindigkeit von  $U \sim 1 \text{ m/sec}$  durch eine Maschine der typischen Abmessung  $L \sim 100 \text{ mm}$  ausgegangen.

(i) In Turbomaschinen sind Strömungsvorgänge periodisch und zwar mit einer dominanten Frequenz gebildet aus dem Produkt von Schaufelanzahl und Drehfrequenz. Bei einer Schaufelanzahl von 5 und einer Drehzahl von 3000 Umdrehungen pro Minute ist die dominante Frequenz also von der Größenordnung 100 Hz bei einer typischen Länge der Maschine von 100 mm. Die auszulösenden Drücke sind von der Größenordnung des dynamischen Druckes skaliert mit einem Reibungsbeiwert, also  $c_w \rho U^2 \sim 100 \text{ Pa}$ .

(ii) Will man turbulente Strömungsvorgänge auflösen, dann ist die maximale typische Frequenz durch die Zeitskalen nach Kolmogorov gegeben. Bei einer moderaten Dissipationsrate von  $\varepsilon = 1 \text{ W/kg}$  folgt aus Dimensionsgründen die Frequenz der kleinsten Wirbel zu  $\sqrt{\varepsilon/\nu} \sim 1 \text{ kHz}$ . Die Größe dieser Wirbel ist von der Ordnung  $\sqrt[4]{\nu^3/\varepsilon} \sim 0.03 \text{ mm}$  [5]. Der zugehörige Schwankungsdruck ist von der Ordnung  $\rho \sqrt{\varepsilon \nu} \sim 1 \text{ Pa}$ .

Die größten Wirbel zeigen eine Frequenz, die durch die Wirbelablösefrequenz vorgegeben ist. Bei einer Länge von 100 mm und einer Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/sec also 100 Hz. Der aufzulösende Frequenzbereich bei typischen turbulenten Strömungen ist also 100 Hz bis 1 kHz. Die zugehörigen Längenskalen demnach 0.03 mm bis 100 mm.

(iii) Bei kavitierenden Strömungen sind Wolkenstrukturen von der Größenordnung der Maschinen, d.h. hier  $\sim 100 \text{ mm}$  und die Frequenz von der Größenordnung der Ablösefrequenz großer Wirbel  $\sim 100 \text{ Hz}$  vorzufinden. Die kleinsten Strukturen sind Einzelblasen der Größe  $\sim 0.01 \text{ mm}$ . Die Eigenfrequenz dieser Blase ist von der Ordnung  $\sim 100 \text{ kHz}$ , d.h. zwei Größenordnungen oberhalb der höchsten Wirbelfrequenz. Die Eigenfrequenz einer Kavitationswolke ist durch die Schallgeschwindigkeit der Zweiphasenströmung geteilt durch die Wolkengröße  $D \sim 100 \text{ mm}$  gegeben und um den Faktor  $\beta^{-2} = d/(D \sqrt{\alpha(1-\alpha)})$  kleiner als die Blaseneigenfrequenzen. Bei „großen“ Wolken, d.h.  $\beta \sim 100$  treten damit

Eigenfrequenzen von 10 kHz bei Strukturgrößen von 10 mm auf [6]. Die transienten Druckspitzen sind begründet durch die axiomatische (d.h. exakte) Riemannsche Verträglichkeitsbedingung der Gasdynamik  $|dp| = |\rho a du|$  von der Größenordnung  $\rho a \Delta u$  ( $\rho \sim 1000 \text{ kg/m}^3$ , Schallgeschwindigkeit  $a \sim 100 \dots 1000 \text{ m/sec}$ , Geschwindigkeitsänderung  $\Delta u \sim 1 \dots 100 \text{ m/sec}$ ), d.h.  $\sim 10^6 \dots 10^8 \text{ Pa}$  je nach Gehalt an ungelöster Luft und reichen damit an die Fließgrenze von Metallen heran.

In Tabelle 2 sind typische Längen und Zeiten von turbulenten und kavitierenden Strömungen gegenübergestellt.

**Tabelle 2** Typische Längen, Zeiten und Drücke von Strömungen in hydraulischen Komponenten.

	min. Frequenz in kHz	max. Frequenz in kHz	min. Struktur in mm	max. Struktur in mm	transiente Druckamplituden in Pa
periodische Strömung		$\sim 0.1$ <i>Blattfolgefrequenz</i>	$\sim 10$ <i>Detailgröße</i>	$\sim 100$ <i>Körperabmessung</i>	$\sim 100$
turbulente Strömung	$\sim 0.1$ <i>Ablösefrequenz</i>	$\sim 1$ <i>Kolmogorov-Frequenz</i>	$\sim 0.03$ <i>Kolmogorov-Länge</i>	$\sim 100$ <i>Wirbelgröße</i>	$\sim 1$
kavitierende Strömung	$\sim 0.1$ <i>Ablösefrequenz</i>	$\sim 100$ <i>Blaseneigenfrequenz</i> $\sim 10$ <i>Wolkeneigenfrequenz</i>	$\sim 0.005$ <i>Blasendurchmesser</i>	$\sim 100$ <i>Wirbelgröße = Wolkengröße</i>	$\sim 10^5 \dots 10^8$ <i>je nach Gehalt ungelöster Luft</i>

### 3 Sensordesign und -prinzip

Durch den Einsatzbereich des Sensors zur Ermittlung des erosiven Potentials kavitierender Strömungen werden hohe Anforderungen an das Sensordesign sowie an das Sensorprinzip gestellt, die es zu erfüllen gilt.

Aus den bekannten Prinzipien zur Umwandlung von mechanischen Größen in elektrische verbleiben nur wenige, die Signale aus dem Bereich  $10^6 \text{ Hz}$  umwandeln können [7]. In die enge Auswahl kommen die piezoresistiven und piezoelektrischen Sensorprinzipien. Der Einsatz von piezoresistiven Sensoren in Druckarrays kann mittels Dehnmessstreifen oder Silizium-Dias erfolgen. Die Dehnmessstreifen bieten eine zu grobe örtliche Auflösung von mehreren Millimetern pro Pixel und können die gewünschten hochfrequenten Messungen nicht erreichen. Die Herstellung von großflächigen Silizium-Dias, die Drucksensoren verteilt auf der Oberfläche aufweisen, ist sehr kostspielig und die geforderte Bruchsicherheit ist bei den Messungen von Kavitation nicht gegeben.

Auf dem Markt ist noch eine dritte Klasse von piezoelektrischen Werkstoffen, die Polymere. Eines davon ist das Polyvinylidenfluorid (PVDF oder  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$ ). Dieses gehört zu den teilkristallinen Kunststoffen und erhält seine piezoelektrischen Eigenschaften, wenn das PVDF einem elektrischen Feld und erhöhte Temperatur ausgesetzt wird. Durch seine ferroelektrischen Eigenschaften richten sich seine Dipole in dem elektrostatischen Feld aus [8]. Im festen Zustand bewirkt ein Druck auf seine Oberfläche eine Ladungsverschiebung, die als elektrische Ladung zu messen ist.

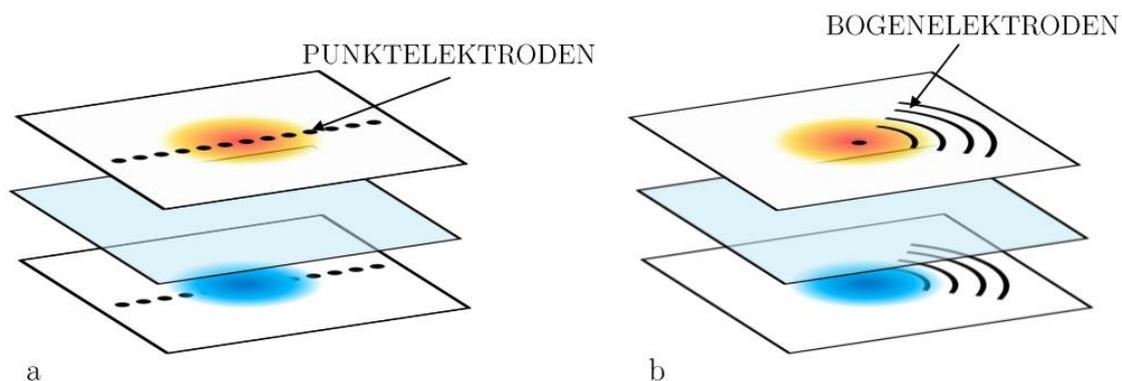
Das polarisierte piezoelektrische PVDF wird meistens in Form von Folien oder Kabeln hergestellt. Die Folienform bietet sich als eine geeignete Form für die Sensor konstruktion an, da zweidimensionale Oberflächensensoren erstellt werden sollen. Gefertigt als eine dünne Kunststoffmembran ist das PVDF biegsam und im Gegenteil zu den weit verbreiteten piezoelektrischen Kristallen oder Keramiken bruch sicher. Sie lässt sich dadurch leicht auf gekrümmte Flächen applizieren und erträgt stoßartige Belastungen ohne zu zersplittern. Bedingt durch seine hohe Schallgeschwindigkeit ( $a_f = 2200 \text{ m/s}$ ) und die geringe Foliendicke ( $b = 9 \text{ }\mu\text{m}$  bzw.  $28 \text{ }\mu\text{m}$ ) können Sensoren mit einer mechanischen Eigenfrequenz von  $10^8$  bis  $10^9$  Hz konstruiert werden [9].

### 3.1 0D-Sensoren

Bei der Konstruktion einzelner Drucksensoren ohne örtliche Auflösung werden Elektroden, die die elektrische Ladung sammeln, auf beiden Seiten der PVDF-Folie platziert. Die Größe der Sensorfläche muss so angepasst werden, dass sie der gewünschten Anwendung entspricht. Das 0D-Sensordesign ist in allen auf diesem Wirkprinzip basierenden konventionellen Drucksensoren und Hydrophonen zu finden. [4]

### 3.2 1D-Sensoren

Unter 1D-Sensoren versteht man ein Sensorarray (Anzahl  $> 2$ ), das örtliche Messpunkte nur in eine Richtung auf der PVDF-Oberfläche aufweist. Dieses Design findet beispielsweise Anwendung bei den Untersuchungen von Druckwellenausbreitungen auf einer Fläche. Die einzelnen Messpunkte, auch Pixel genannt, können verschiedene Geometrieformen aufweisen, vgl. Abbildung 1. [4]



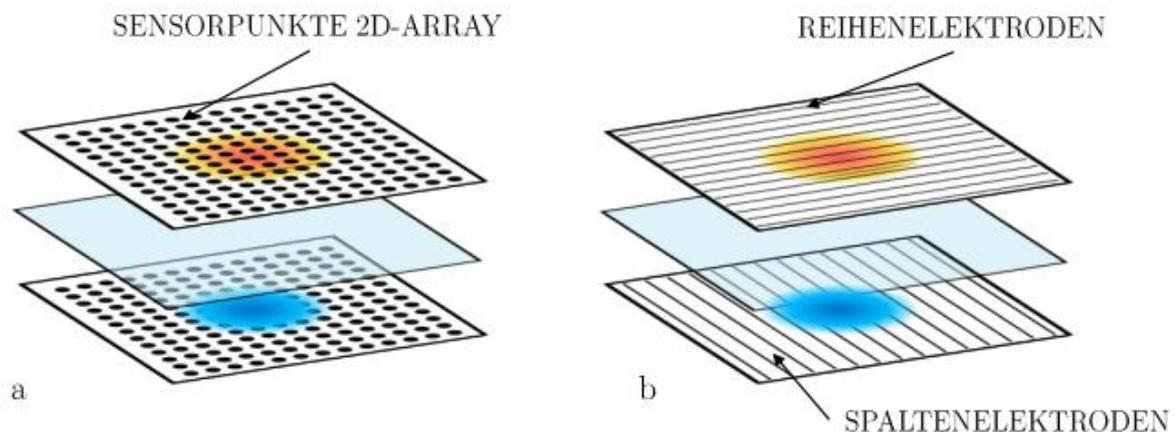
**Abbildung 1** Beispiele für Elektrodengeometrie bei 1D Sensorarrays: kartesische (a) und polare (b) Anordnung

Die Pixel können direkt auf ein Stück PVDF-Folie durch Aufbringung von Elektroden abgebildet werden, wodurch die Sensor konstruktion wenig aufwendig wird. Querdehnungen der Folie müssen dabei vermieden werden, da diese die Messung verfälschen würden. Dies kann erreicht werden, indem die PVDF-Folie vollflächig frei in der Ebene schwebt. Das 1D-Sensorarray kann mit einer Reihen anordnung aus handelsüblichen Drucksensoren verglichen werden. Ein wesentlicher Vorteil eines PVDF-Sensorarrays ist die örtliche Auflösung von bis zu  $50 \text{ }\mu\text{m}$  je nach Fertigungsverfahren. Bei den konventionellen Sensoren beträgt die kleinste örtliche Auflösung mehrere Millimeter. [4]

### 3.3 2D-Sensoren

Die 2D-Sensorarrays bieten eine weitere Raumdimension auf der PVDF-Oberfläche. Dazu wird ein 2D-Array bzw. eine Matrix aus Elektroden auf der Sensorfläche positioniert. Bei dieser Anordnung können wieder alle Messpunkte auf einer PVDF-Folie abgebildet werden. [4]

Das Elektrodendesign aus Abbildung 2 a besitzt ein 2D-Drucksensorarray, welches örtlich und zeitlich hochauflösend die Druckverteilung auf der Sensoroberfläche messen kann. Die Signalleitung der Elektroden auf der Oberseite der Folie stellt große Herausforderungen an die Sensorkonstruktion. Wenn die Pixelzahl wächst, wächst auch die Anzahl der Leitungen, die aus der PVDF-Folie nach Außen geführt werden müssen. Das hat zur Folge, dass die Schicht, in welcher die elektrischen Leitungen geführt werden, immer dicker wird. Dadurch verringert sich die Steifigkeit des Sensors in der Normalrichtung, was nicht erwünscht ist. [4]



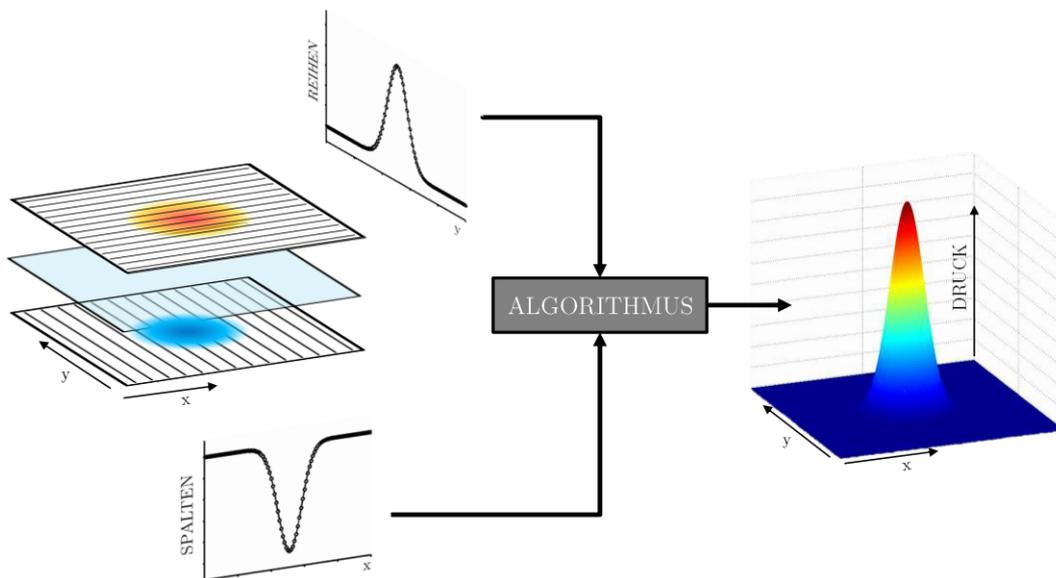
**Abbildung 2** 2D-Sensorarray mit punktueller Verteilung (a) und als Elektrodenmatrix (b)

Ein Problem des Elektrodendesigns aus Abbildung 2 a ist das Hardwarevolumen, welches mit ansteigender Pixelanzahl proportional wächst. Für 1000 Pixel werden 1000 Ladungsverstärker beansprucht. Daraus resultieren enorme Datenvolumen, die gespeichert oder bearbeitet werden müssen. [4]

Ein anderes Elektrodendesign ist in Abbildung 2 b dargestellt. Dieses reduziert das Volumen der benötigten Hardware deutlich. Die einzelnen Pixel werden zu länglichen Elektroden verbunden. Die Elektroden auf der Unterseite sind senkrecht in der Ebene bezüglich der Elektroden auf der Oberseite ausgerichtet. Dadurch bilden sich auf der Oberseite der Folie Reihenelektroden und auf der Unterseite Spaltenelektroden, so dass die Reihen senkrecht zu den Spalten positioniert sind. An jedem Knotenpunkt bildet sich ein Pixel. Seine sensitive Fläche wird durch die Breite der Elektroden definiert. Alle Pixel aus dem Sensor zusammen werden Sensormatrix genannt. Dieses Elektrodendesign erlaubt es, die elektrischen Anschlüsse der Elektroden außerhalb der Sensorfläche zu konstruieren. Dadurch wird die Dicke der sensitiven Fläche des Sensors nicht erhöht. [4]

Ein weiterer Bestandteil des Designs aus Abbildung 2 b ist die Abtastung der elektrischen Ladung. Die PVDF-Folie wird beidseitig mit Elektroden bestückt, elektrisch gesehen werden

aber die Ladungen als Monopole behandelt. Das bedeutet, dass jede Elektrode unabhängig, ob Reihe oder Spalte, an einen Ladungsverstärker angeschlossen wird. Dieser hat ein konstantes Bezugspotential, zu diesem wird die elektrische Ladung gemessen. [4]



**Abbildung 3** 2D-Sensor mit Elektrodenmatrix. Die Druckbelastung wird zuerst als Spalten- und Reihendaten gesammelt und mittels eines Algorithmus wiedergegeben.

Das Sensordesign der Elektrodenmatrix bietet grundlegende Vorteile bei der Sensorkonstruktion: eine reduzierte Anzahl an Verstärkerkanälen, ein geringes zu bearbeitendes Datenvolumen und eine schlanke Kabelführung. Bei gleichbleibendem Datenvolumen kann die geringe Anzahl von physikalischen Messkanälen hochfrequent abgetastet werden, im Vergleich zu einem Sensor mit großer Anzahl von Kanälen. Mit diesem Sensordesign gehen aber auch Herausforderungen bei der Auswertung der gemessenen Daten einher. Durch die Reduktion der Messkanäle verringert sich die Information der Ladung einzelner Pixel, denn die Messdaten liegen nur als Reihen- und Spalteninformationen vor. Die abgetasteten Messdaten jeder Elektrode repräsentieren die Summe der Ladungen aus der gesamten Elektrode. Diese Daten müssen mittels eines mathematischen Algorithmus bearbeitet werden, um die Druckverteilung auf der Sensoroberfläche wieder herzustellen. [4]

#### 4 Zusammenfassung

Für viele fluidtechnische Anwendungen ist die Messung von räumlich und zeitlich aufgelösten Oberflächendrücken von großer Bedeutung. Die mechanische Beanspruchung durch Kavitation führt in hydraulischen Maschinen zu Oberflächenerosion und kann unter Umständen zum Ausfall der Maschinen führen. Die Erforschung dieses besonders hochfrequenten Strömungsphänomens liefert neue Erkenntnisse über die Oberflächendruckbeanspruchung, die in die Auslegung und Konstruktion dieser Maschinen fließen können.

Aktuelle Messsysteme zur Erfassung von Kavitation können entweder nur zeitlich oder nur örtlich die Druckereignisse des physikalischen Phänomens aufnehmen. Diese Messsysteme erzeugen Messdaten über die Oberflächendruckbeanspruchung bzw. die Kavitationsintensität in Form von Körperschall. Die Nachteile dieser Messsysteme sind, dass sowohl die

Vorbereitung der Messung als auch teilweise die nachfolgende Auswertung der Messdaten sehr zeitintensiv sind. Weiterhin können sie den Kavitationsvorgang entweder nur zeitlich oder nur örtlich messen.

Das hier vorgestellte Messprinzip erlaubt die zeitlich und örtlich aufgelöste Vermessung von Oberflächendrücken. Die Kernkomponente des Sensors ist eine nur wenige Mikrometer dicke Folie aus Polyvinylidenfluorid (PVDF; C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), die piezoelektrische Eigenschaften aufweist. Die durch Druck auf der Folienoberfläche entstehende Ladung kann mit Elektroden auf der Ober- und Unterseite abgegriffen werden. Je nach Ausführung der Elektroden kann ein Sensor als 0D-, 1D- oder 2D-Sensor ausgeführt werden.

## Literatur

- [1] M. Dimitrov, P. Pelz, A. Lyashenko, A. Tehrani, E. Dörsam: *Measurement system by printed thin pressure sensor array*. IFK, Aachen, 2014.
- [2] S. Lang, M. Dimitrov und P. F. Pelz: *Spatial and temporal high resolution measurement of bubble impacts*. IFK, Aachen, 2014. in: Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Cavitation (2012).
- [3] M. Dimitrov, P. Pelz, R. Werthschützky: *Messsystem für zeitlich und örtlich hochaufgelöste Druckmessung*. Sensor und Test, Nürnberg, 2014.
- [4] M. Dimitrov: *Räumlich auflösende, dynamische Druckmesssysteme mit piezoelektrischen Foliensensoren*. wird erscheinen in: Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik, Herausgeber P. Pelz, Darmstadt
- [5] A. N. Kolmogorov: *The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers*. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1991, Nr. 434
- [6] J. Buttenbender: *Über die Dynamik von Kavitationswolken*. Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik, Band 1, Herausgeber P.F. Pelz, Darmstadt, 2012
- [7] G. Eberle, H. Schmidt, W. Eisenmenger: *Piezoelectric Polymer Electrets*. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996
- [8] T. Furukawa: *Piezoelectricity and Pyroelectricity in Polymers*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989
- [9] D. Bacon: *Characteristics of a pvdf membrane hydrophone for use in the range 1-100MHz*. IEEE Transactions Sonics and Ultrasonics, 1982