

Überwachung der Hydrodynamik in Blasensäulenreaktoren mit Distributed Acoustic Sensing

Yannik Schick¹ und Marco Da Silva¹

¹Institut für Elektrische Messtechnik, Johannes Kepler Universität Linz, Österreich
Kontakt: marco.dasilva@jku.at

Einleitung

Mehrphasige Blasensäulenreaktoren sind aufgrund ihrer funktionalen Simplizität und ökonomischen Effizienz von zentraler Bedeutung in der chemischen Prozessindustrie und werden für unterschiedlichste Reaktionsabläufe mit intensivem Bedarf an Wärme- und Stoffübertragungsleistungen eingesetzt [1]. Die komplexe Hydrodynamik innerhalb dieser Reaktoren bedingt den Einsatz innovativer Überwachungstechnologien, um Prozessparameter wie die Blasenverteilung und -größe zuverlässig zu bestimmen. Neben optischen Verfahren, die transparente Medien voraussetzen, bieten akustische Methoden eine bewährte Alternative zur präzisen Erfassung solcher Prozessparameter [2].

Traditionelle akustische Methoden sind durch ihre begrenzte räumliche Auflösung und dem notwendigen direkten Kontakt mit dem Medium eingeschränkt. In den letzten Jahren hat sich das Distributed Acoustic Sensing (DAS) als vielversprechendes, intrusionsfreies Verfahren zur großflächigen Erfassung akustischer und thermischer Phänomene etabliert. Diese Technologie ermöglicht, messgrößeninduzierte Störungen entlang kilometerlanger Glasfasern zu lokalisieren und auszuwerten, weshalb sich deren Anwendung in der Ölindustrie bereits nachhaltig etabliert hat [3]. Unter Berücksichtigung der zuvor dargelegten Aspekte erscheint der Einsatz von DAS an großskaligen Reaktoren als potenzialträchtiger Ansatz zur Umsetzung einer optimierten Prozesssteuerung.

Methoden und Materialien

Blasensäulenreaktoren sind zylindrische Reaktionsbehälter, die eine bodenseitige Möglichkeit zur Gasinjektion bieten. Zur Analyse des Potenzials der DAS-Anwendung wurde ein Laboraufbau, bestehend aus einer 2 m hohen Acrylsäule realisiert. Die Säule hat einen Außenradius von 75 mm und wurde bis zu einer Höhe von 1,3 m mit deionisiertem Wasser gefüllt. Durch eine Begasungseinrichtung (engl. „sparger“) wurde Luft mittels installiertem Druckluftnetz eingeleitet, wobei der Gasdurchfluss mittels einer manuell gesteuerten Regeleinheit eingestellt wurde. Dies ermöglicht die gezielte Einstellung verschiedener Strömungsregime entlang der in Abb. 1 dargestellten Strömungskarte. Abhängig vom Säulendurchmesser ergibt sich dabei eine Limitierung der einstellbaren Regime-Konfigurationen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde die Säule im deterministischen Bereich der Blasenströmung

(engl. „bubbly flow“) betrieben. Andere Strömungsregime wurden bereits in einer vorausgegangenen Publikation beschrieben [4].

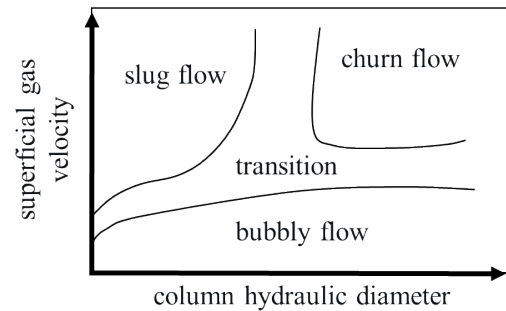


Abb. 1: Qualitative Strömungskarte

Zur Detektion der inhärenten hydrodynamischen Ereignisse und einhergehenden Schwingungsemissionen wurde der in Abb. 2 dargestellte Laborreaktor mit einer Duplex-Glasfaser (9/125µm G652.D) instrumentiert. Zur effektiven Ausschöpfung des Potenzials der hohen räumlichen Reichweite wurde die Faser spiralförmig über ca. 85 cm um die Säule gewickelt, wobei ein Versatz von 3 mm pro Umdrehung aufgrund des Faseraußendurchmessers entstand. Die durch das eingesetzte DAS-System vorgegebene räumliche Auflösung von 4 m entlang der Faser konnte so zu nutzbaren 25 mm entlang der Säulenhöhe optimiert werden.

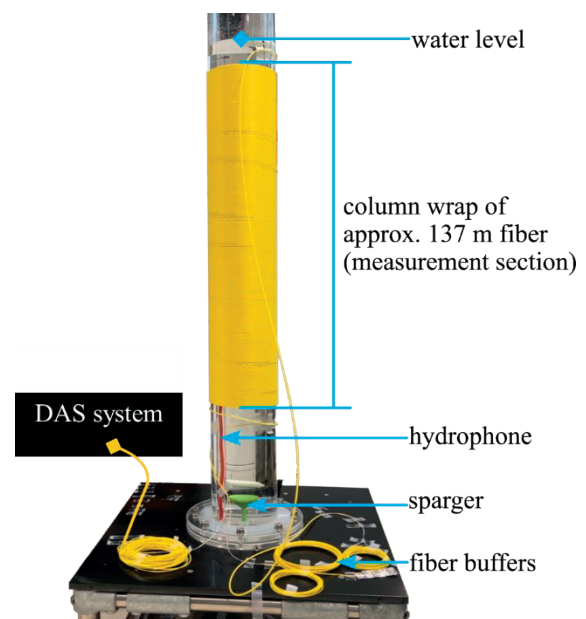


Abb. 2: Versuchsaufbau

Zum Aufbau eines vollständigen DAS-Sensorsystems, basierend auf dem Sensing Element der optischen Faser, muss diese durch eine Opto-Elektronik ausgelesen werden. Die Funktionsweise des eingesetzten Φ -OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) Systems mit heterodyner Detektion ist als simplifiziertes Blockschaltbild in Abb. 3 (links) dargestellt. Die notwendige photonische Energie wird durch einen kontinuierlichen (engl. „continuous wave“ (CW)), schmalbandigen (engl. „narrow linewidth“ (NL)) Laser bereitgestellt. Das Laserlicht wird anschließend mit einem akustooptischen Modulator (AOM) entsprechend pulsformig moduliert und subsequently mittels erbium-dotierten Faserverstärkern (engl. „erbium-doped fiber amplifier“ (EDFA)) intensiviert. Der so pulsierte und amplifizierte Laser wird durch einen optischen Zirkulator in die zu untersuchende optische Faser eingekoppelt. Innerhalb der Faser kommt es aufgrund von fertigungsbedingten Unregelmäßigkeiten zu Rayleigh Streuung (vgl. Abb. 3 (rechts)), wobei ein Teil entlang der Faser zurück zum optischen Zirkulator gelangt. Dieses rückgestreute Licht wird nach dem Prinzip der optischen Überlagerungsdetektion mit der initialen Laserquelle gemischt und ein optisches Schwebungssignal mit der Frequenz $\Delta\omega$ erzeugt. Mittels symmetrischem Fotoempfänger (engl. „balanced photodetector“) wird dieses in ein elektrisches Signal gewandelt. Dieses elektrische Signal ist proportional zur zeitabhängigen Intensitätsvariation des eintreffenden Lichts am Detektor und kann mittels einer getakteten Datenerfassung (engl. „data acquisition“ (DAQ)) digitalisiert wer-

den. Durch eine folgende In-Phase-&-Quadrature-Demodulation in der digitalen Domäne kann aus der Detektorintensität die Phase des Lichts extrahiert werden, welche sich durch die Laufzeitverschiebung des Laserpulses bestimmten Faserpositionen zuordnen lässt. Der Wert der Phase variiert innerhalb eines Intervalls von $[-\pi, \pi]$, was die Notwendigkeit eines mathematischen Entfaltungsprozesses (engl. „phase unwrap“) bei intervallüberschreitenden Änderungen hervorbringt, um Phasensprünge entlang der Faser zu vermeiden. Eine anschließende räumliche Differentiation der Phasenverläufe ermöglicht die Bestimmung der Phasenänderung. Hierfür wird die Faser mit Hilfe der definierten Messlänge (engl. „Gauge Length“) in feste Abschnitte sektioniert. Abhängig von der aus der Pulsbreite resultierenden simultanen Ausleuchtung und den erwarteten Wellenlängen muss die Messlänge angemessen gewählt werden, um die Vergleichspositionen für die Bestimmung der Phasenänderung gewinnbringend zu definieren. Im Rahmen der dargebotenen Untersuchungen und erwarteten Frequenzkomponenten wurde dieser Faktor auf das 1,5-fache der Laserpulslänge gesetzt. Die extrahierte Phasenänderung steht in direktem Zusammenhang mit einer dynamischen Dehnung der Faser [5]. Zum Tragen kommen hier zwei Faktoren; einerseits die variierte Faserlänge selbst, andererseits die geänderte Modenausbreitungskonstante, die auf der durch die Dehnung verursachten Änderung des Brechungsindex und des Durchmessers basiert. Wird Kraft auf eine optische Faser appliziert kommt es, wie in Abb. 3 (unten rechts) dargestellt, zu

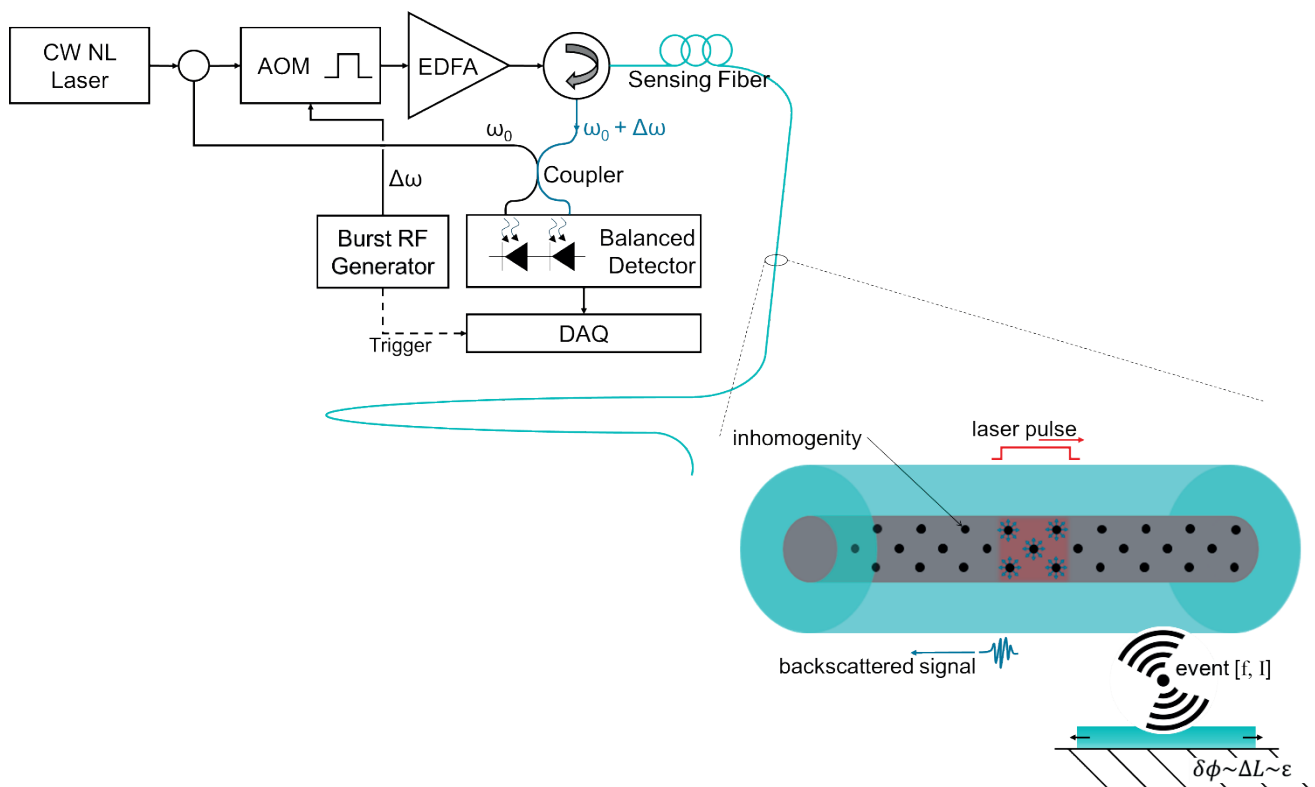


Abb. 3: Funktionsskizze des DAS-Systems basierend auf der Φ -OTDR Heterodyne Detection Topologie (links) und der Faserrückstreuung sowie eventinduzierte Dehnung (rechts)

einer Longitudinaldehnung der Faser. Eine Druckwelle kann in diesem Zusammenhang als (quasi-)periodische, kraftinduzierte Auslenkung eines Mediums aufgefasst werden. Es ergeben sich zwei charakteristische Parameter einer Welle, die Intensität I , also die Stärke der Einwirkung und deren aus der Periodizität resultierenden Frequenz f .

Mathematisch lässt sich diese Beziehung durch den linearen Zusammenhang

$$\varepsilon(x, t) = \frac{\delta\phi(x, t) \lambda}{4\pi * n * G * \xi}$$

ausdrücken [6], was die Bestimmung der Dehnungswerte aus der Phasenänderung ermöglicht. Die Umrechnung hängt von der Betriebswellenlänge der Laserquelle λ , vom Brechungsindex n der zu prüfenden Faser sowie ihren photoelastischen Materialeigenschaften ξ und dem zentralen Demodulationsparameter der Messlänge G ab.

Das eingesetzte DAS-System stützt sich auf einen 1550 nm Laser, der in Pulsen von 40 ns moduliert wird. Diese werden mit einer Wiederholrate von 10 kHz in die Faser eingekoppelt, was bezugnehmend auf das Abtasttheorem eine theoretisch detektierbare Frequenz von 5 kHz impliziert. Aus der Pulsbreite und der Lichtgeschwindigkeit resultiert, dass ungefähr 4 m Faser zeitgleich illuminiert werden, wodurch die optische Auflösung des Systems definiert wird. Für die Digitalisierung des Photodetektor-Signals kam ein DAQ-System mit einer Abtastrate von 500 MHz zum Einsatz.

Ergebnisse

Die mehrdimensionale Erfassungscharakteristik der faseroptischen DAS-Sensorik lässt sich bestmöglich in einer visualisierten Matrix alias Farb- oder Graustufenkarte wiedergeben. Die Ergebnisse für je eine Messung mit variierender Lufteströmung von 2, 6 und 10 L/min sind in Abb. 4 dargestellt. Die auftretenden periodischen Muster im akustischen Spektrum bestätigen vom Gasvolumen abhängige prozessinduzierte passive Emissionen, wobei deren Vorkommen bereits mittels herkömmlicher, intrusiver Messwandler bestätigt wurde [2]. Entlang der Zeitachse (x -Achse) wiederholen sich dabei konstante Extrema, die durch repetitive Werte in der Phasenänderung charakterisiert werden. Diese sind entlang der kompletten Faserlänge (y -Achse) detektierbar, wobei die ungestörten Flächen über- und unterhalb den in Abb. 2 dargestellten Pufferwicklungen (engl. „fiber buffers“) zuzuschreiben sind. Diese bieten die Möglichkeit, etwaige Umgebungsstörungen vom Messsignal zu separieren. Das sich einstellende Muster, respektive dessen Frequenz, Intensität und der sich einstellende Versatz stehen nach Abb. 4 in direkter Abhängigkeit zum injizierten Blasenschwarm. Es ergibt sich daraus eine direkte Abhängigkeit des prozessabhängigen Parameters des eingeblasenen Gas-

volumens vom aufgezeichneten DAS-Signal, was eine hydrodynamik-beschreibende Informationsextraktion ermöglicht.

Bezugnehmend auf die bereits realisierten akustischen Analysen subaquatischer Blasen, die bis in die 1930er Jahre zurückgehen [7], ermöglicht die Auswertung der Intensität und deren zeitabhängigem Verlauf (der Frequenzkomponente) Aussagen zu einzelnen Blasen bis hin zu Blasenschwärmen [8]. Die Aussagen können dabei Parameter wie Blasengröße und approximierter Beschreibung der Verteilung umfassen. Bei ausreichender Intensität können diese Signale aus den nicht intrusiven Messungen der glasfaserbasierten DAS-Methode extrahiert werden und so einen signifikanten Vorteil gegenüber klassischen akustischen Wandlern aufbringen. Durch die räumliche Detektionsbeschaffenheit der DAS-Technologie ist es weiterführend möglich, auch die Ausbreitung der Emissionen entlang der Säulenhöhe aufzuzeichnen.

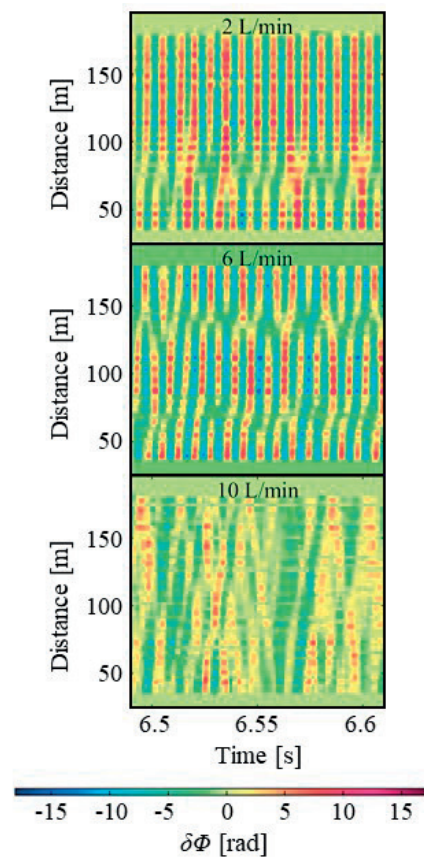


Abb. 4: Gesammelte Darstellung von Farbkarten für einen Ausschnitt der DAS-Messdaten bei einer Lufteströmung von 2, 6 und 10 L/min

Betrachtet man zwei räumlich voneinander getrennte Positionen in Abb. 4 entlang der Faser, zeigen die zeitperiodischen Fluktuationen einen konstant ansteigenden Versatz. Es ergeben sich daraus geneigte Muster, die zeigen, dass die aufgezeichneten Signale entlang der Säulenhöhe von unterhalb der Wicklung nach oben propagieren. Aus der subsequenten

Analyse dieser Propagationsmuster resultiert die Bestimmung der Schallausbreitung, speziell deren Geschwindigkeit (engl. „speed of sound“). Diese Ausbreitungsvariable steht im direkten Zusammenhang zum inhärenten Gasvolumen und der vorherrschenden Temperatur, wie in Abb. 5 für Wasser als rein flüssiges Medium dargestellt. Die eingangs angesprochene Möglichkeit der Bestimmung von Temperaturgradienten mittels temperaturinduzierten Längenänderung der Faser (im DC-Bereich) kann dadurch optimiert und erweitert werden. Der so gegebene ganzheitliche Überwachungsansatz bietet perspektivisch die Möglichkeit die Temperaturbestimmung innerhalb des Reaktors intrusionsfrei zu realisieren.

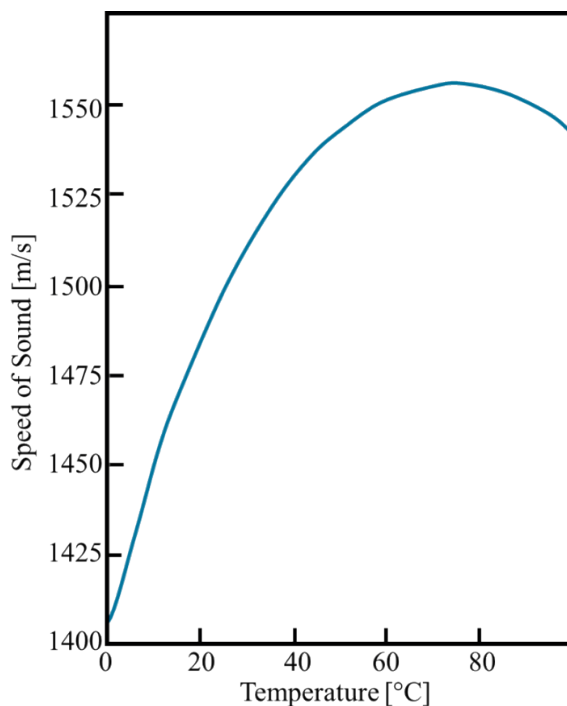


Abb. 5: Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Wasser nach Leighton [9]

Diskussion

Die Ergebnisse unterstreichen das Potenzial des DAS-Ansatzes zur akustischen Erfassung hydrodynamischer Phänomene innerhalb einer Blasensäule. Es wird eindeutig die Detektierbarkeit bereits in der Vergangenheit bewiesener passiv-akustischer Emissionen evident, die im Zuge der analysierten Prozesse entstehen. Die Abhängigkeit dieser Emissionen von wichtigen Prozessparametern eröffnen das Potenzial für die Entwicklung innovativer messtechnischer Anwendungen, die auf der präzisen Erfassung und Analyse dieser Emissionen mittels DAS basieren.

Neben dieser Möglichkeit, klassische akustische Wandler durch eine nicht intrusive Applikation von DAS zu ersetzen, entstehen durch die räumlich

verteilte Charakteristik neue gewinnbringende Möglichkeiten. Die aus diesem Merkmal resultierende Erfassbarkeit der Ausbreitung akustischer Emissionen ermöglicht die Bestimmung der vorherrschenden lokalen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Über deren Verknüpfung mit sekundären Informationen, wie der inhärenten Temperatur, entstehen Möglichkeiten zur detaillierten Charakterisierung der Vorgänge, die über die klassischen akustischen Methoden hinausgehen. Es gilt daher zukünftig die Limitationen und Chancen weiter zu analysieren und die direkte Parameterextraktion fehlerbehaftet zu analysieren.

Literatur

- [1] N. Kantarci, F. Borak, and K. O. Ulgen, "Bubble column reactors," *Process Biochemistry*, vol. 40, no. 7, pp. 2263–2283, 2005, doi: 10.1016/j.procbio.2004.10.004.
- [2] J. W.R. Boyd and J. Varley, "The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes," *Chemical Engineering Science*, vol. 56, no. 5, pp. 1749–1767, 2001, doi: 10.1016/S0009-2509(00)00540-6.
- [3] A. H. Hartog, *An introduction to distributed optical fibre sensors*. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [4] Y. Schick, G. H. Weber, M. Da Silva, C. Martelli, and M. W. Hlawitschka, "Flow monitoring in a bubble column reactor by Distributed Acoustic Sensing," *tm - Technisches Messen*, vol. 91, s1, pp. 14–19, 2024, doi: 10.1515/teme-2024-0048.
- [5] C. D. Butter and G. B. Hocker, "Fiber optics strain gauge," *Applied optics*, vol. 17, no. 18, pp. 2867–2869, 1978, doi: 10.1364/AO.17.002867.
- [6] SEAFOM, "Measuring Sensor Performance Document – (SEAFOM MSP-02 V2.0): DAS Parameter Definitions and Tests," Feb. 2024.
- [7] M. Minnaert, "XVI. On musical air-bubbles and the sounds of running water," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 16, no. 104, pp. 235–248, 1933, doi: 10.1080/14786443309462277.
- [8] S. W. Yoon, L. A. Crum, A. Prosperetti, and N. Q. Lu, "An investigation of the collective oscillations of a bubble cloud," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 89, no. 2, pp. 700–706, 1991, doi: 10.1121/1.1894629.
- [9] T. Leighton, *The Acoustic Bubble*. Burlington: Elsevier Science, 2012.