

Messung des Flüssigkeitsanteils wässriger Schäume mit einem Leitfähigkeits-Gittersensor

Liquid fraction measurement in foams using a conductivity wire-mesh sensor

M. Ziauddin¹, J. Wollrab¹, E. Schleicher², P. Trtik³, L. Knüpfer², A. Skrypnik¹, T. Lappan², K. Eckert^{1,2} & S. Heitkam^{1,2}

1. Institut für Verfahrens- und Umwelttechnik, TU Dresden, 01062 Dresden, Germany

2. Institut für Fluidodynamik, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 01328 Dresden, Germany

3. Laboratory for Neutron Scattering and Imaging, Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen, Schweiz

Wässriger Schaum, Flüssigkeitsgehalt, Drahtgitter-Sensor, Wasserbrücken, Drahtabstand
Liquid Foam, Liquid Fraction, Wire-Mesh Sensor, Capillary Bridges, Wire Spacing

Zusammenfassung

Der Flüssigkeitsanteil wässriger Schäume beeinflusst sowohl die Schaumrheologie als auch die Schaumstabilität und ist daher eine wichtige Größe für industrielle Mehrphasenprozesse. In dieser Arbeit wird die In-situ-Messung des Flüssigkeitsanteils wässriger Schäume anhand der elektrischen Leitfähigkeit unter Verwendung eines Gittersensors [Prasser, 1998] untersucht. Die Sende- und Empfängerelektroden des Sensors sind als zwei Ebenen paralleler Drähte, orthogonal zueinander ausgerichtet mit einem kleinen axialen Versatz angeordnet, die im Schaum platziert werden. An jedem Kreuzungspunkt wird der lokale Leitwert und damit der Flüssigkeitsanteil [Feitosa, 2005] gemessen. Diese Messungen wurden durch simultane Bestimmung des Flüssigkeitsanteils mittels Neutronenradiographie validiert. Dabei wurde ein linearer Zusammenhang zwischen den Messwerten von Gittersensor und Neutronen-Radiographie festgestellt [Ziauddin, 2022]. Allerdings bilden sich Flüssigkeitsbrücken zwischen den Drähten, wodurch der Gittersensor den Flüssigkeitsanteil systematisch überschätzt. Durch ausreichend große Drahtabstände kann die Brückenbildung eliminiert werden und der Gittersensor liefert phasengemittelte Messungen des Flüssigkeitsanteils in Schäumen.

Einleitung

Flüssige Schäume sind Suspensionen von Gasblasen in einer Flüssigkeit, die durch Zugabe von oberflächenaktiven Substanzen stabilisiert werden. Sie spielen eine wichtige Rolle in vielen industriellen Prozessen. In einigen Prozessen, wie der Schaumflotation, der Schaumfraktionierung oder der Produktion von geschäumten Bauteilen, spielen sie eine integrale Rolle. In anderen Prozessen, wie der Biogaswäsche oder dem Einfüllen von Getränken, können sie den Prozess erheblich beeinträchtigen.

Ein wichtiger Zustandsparameter von Schäumen ist der Flüssigkeitsgehalt ϕ , definiert als das phasengemittelte Verhältnis von Flüssigkeitsvolumen und Schaumvolumen [Cantat, 2013]. Er hat starken Einfluss auf die Schaumrheologie und damit auf das Fließverhalten des Schaums im Prozess. Weiterhin beeinflusst er Gasdiffusion und Lamellenreißen im Schaum und damit die Stabilität des Schaums. Und nicht zuletzt hat der Flüssigkeitsgehalt direkte

Auswirkungen auf den Prozess selbst. Ein hoher Flüssigkeitsgehalt in der Schaumfraktionierung führt zu einer geringeren Reinheit des Extrakts [Kesharvarzi, 2022].

Es existieren verschiedene Methoden, den Flüssigkeitsgehalt von Schäumen zu bestimmen. Optische Beobachtungen an einer transparenten Wand erlauben eine Abschätzung des wandnahen Flüssigkeitsgehalts [Forel, 2016]. Röntgen- [Lappan, 2023] oder Neutronenradiographie [Heitkam, 2018] ermöglichen eine zeitaufgelöste, berührungsfreie Messung. Auch die Reflexion und Dämpfung von Ultraschall [Emmerich, 2022] oder elektrische Kapazitätssensoren [Staud, 2022] können genutzt werden. In den meisten Anwendungen wird jedoch die elektrische Leitfähigkeit zwischen zwei Elektroden genutzt. Feitosa et al. [Feitosa, 2005] dokumentieren den direkten Zusammenhang zwischen der relativen elektrischen Leitfähigkeit und dem Flüssigkeitsgehalt. Die relative elektrischen Leitfähigkeit ist dabei das Verhältnis der Leitfähigkeit des Schaums zur Leitfähigkeit der Flüssigkeit. Diese Methode findet mit verschiedenen Elektrodengeometrien Anwendung [Karapantsios, 2008]. Es gibt auch Versuche, mit mehreren wandgebundenen Elektroden eine Leitfähigkeitstomographie durchzuführen und die Flüssigkeitsverteilung zu messen [Wang, 1999].

In dieser Arbeit wird statt klassischer Elektroden nun der kommerziell verfügbare Drahtgittersensor [Prasser, 1998] genutzt. Dabei werden zwei Ebenen paralleler Drähte, orthogonal zueinander ausgerichtet mit einem kleinen axialen Versatz durch den Schaum geführt (siehe Abb. 1). An den Drähten der ersten Ebene werden nacheinander Spannungssignale angelegt und jeweils an allen Drähten der zweiten Ebene der zugehörige Stromfluss gemessen. Dadurch wird an jeden Kreuzungspunkt des Drahtgitters der elektrische Leitwert des Schaums bestimmt. Im Gegensatz zu klassischen Elektrodenpaaren sind die Drahtpaare jedoch nur wenige Millimeter voneinander entfernt. In unseren vorherigen Arbeiten konnten wir durch Abgleich mit Neutronenradiographie zeigen, dass die Messwerte des Drahtgittersensor zwar linear und reproduzierbar mit dem Flüssigkeitsgehalt des Schaums zusammenhängen, der Flüssigkeitsgehalt jedoch deutlich überschätzt wird. Wir führten dies auf die Bildung von Wasserbrücken an den Kreuzungspunkten der Drahtgitter zurück. Mithilfe von Neutronenradiographie wurde bereits die Bildung von Wasseransammlungen im Kreuzungsbereich qualitativ beobachtet (Abb. 1)

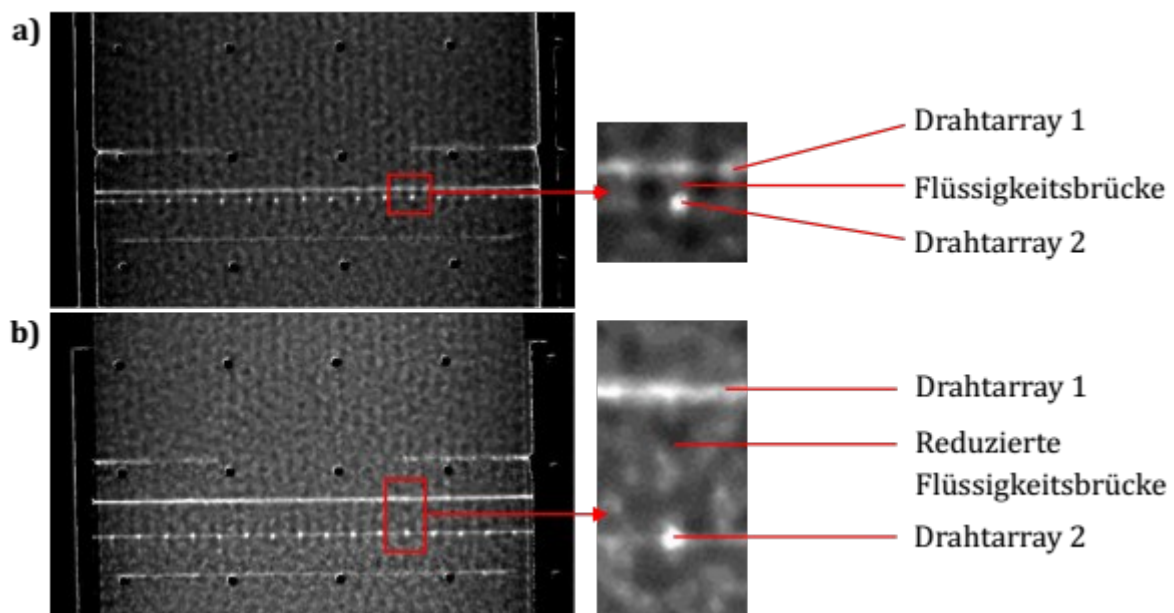


Abb. 1: Qualitative Beobachtung von Flüssigkeitsansammlungen an den Kreuzungspunkten des Drahtgittersensors bei kleinen Abständen (a) bzw. fehlende Ansammlung bei großen Abständen (b).

In dieser Arbeit wird nun untersucht, wie sich die Messwerte des Drahtgitter-Sensors verändern, wenn der Abstand zwischen den Drähten vergrößert wird. Unsere Hypothese ist, dass bei hinreichend großem Abstand die Messwerte gegen ein gutes Phasenmittel konvergieren.

Material und Methoden

Die Experimente wurden in einer runden, vertikalen Schaumsäule mit 100 mm Innendurchmesser durchgeführt (Abb. 2). Die Säule wird mit 1 L Tensidlösung gefüllt, bestehend aus deionisiertem Wasser und 6 g/L Natriumlaurylsulfat (SDS). Druckluft (1 L/min) wird am Boden der Säule mittels eines Blasenerzeugers eingebracht. Dazu wird entweder eine gesinter-te Glasplatte oder 7 Nadeln genutzt. Die so erzeugten Blasen haben einen Durchmesser von 0.58 mm (± 0.25 mm) für die Platte bzw. 2.48 mm (± 1.0 mm) für die Nadeln. Die Blasen steigen auf und bilden einen Schaum, der die Säule füllt. Aufgrund der Verwendung von sehr hoher Tensidkonzentration ist der Schaum und damit die Blasengröße zeitlich stabil. Am oberen Ende der Säule wird über drei Nadeln Tensidlösung eingebracht. Diese wird mit einer 3-Kanal Peristaltikpumpe dem Reservoir unter dem Schaum entzogen, so dass der Schaum statisch bleibt. Die Flüssigkeit sickert durch den Schaum und bewirkt damit einen konstanten und homogenen Flüssigkeitsgehalt in der Schaumsäule. Durch Variation des Drainagestroms zwischen 15 ml/min und 60 ml/min lässt sich der Flüssigkeitsgehalt reproduzierbar variieren.

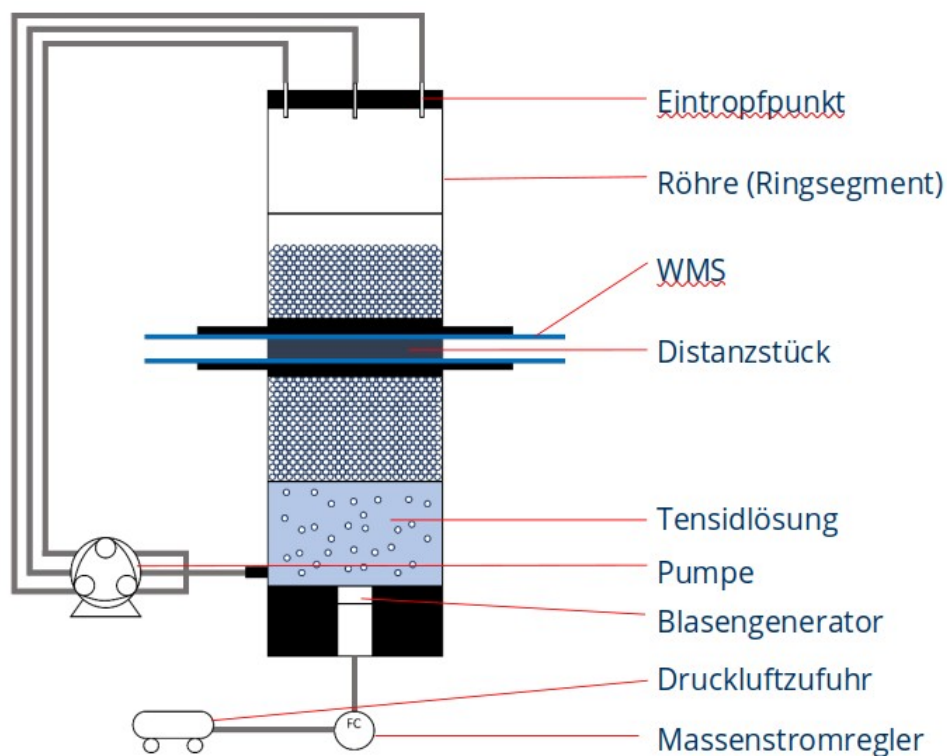


Abb. 2: Setup zur Messung des Flüssigkeitsgehaltes von Schäumen mittels Drahtgittersensor.

Der Drahtgitter-Sensor befindet sich 140 mm über der Wasseroberfläche. Er besteht aus 16 x 16 Drähten aus Edelstahl. Die beiden Drahtebenen sind jeweils auf einer eigenen Platine angebracht. So lässt sich der Abstand zwischen den Ebenen mithilfe von 3D-gedruckten Abstandshaltern variieren. Für jeden Abstand muss jedoch eine eigene Kalibration durchgeführt werden. Dazu wird die Säule komplett mit Tensidlösung gefüllt, so dass der Flüssigkeitsgehalt von 100 % gemessen werden kann. Die relative Leitfähigkeit ergibt sich dann als

Verhältnis des Leitwerts im Schaum und des Leitwerts bei 100 % Flüssigkeitsgehalt. Mithilfe der Gleichung von Feitosa et al. [Feitosa 2005] wird dann der Flüssigkeitsgehalt berechnet.

Ergebnisse

Eine typische, instantane Messung der Flüssigkeitsverteilung ist in Abbildung 3 dargestellt. In Wandnähe wird der Flüssigkeitsgehalt aufgrund des Wandinflusses systematisch überschätzt. Daher wird der Wandbereich maskiert und für die folgenden Untersuchungen nicht betrachtet.

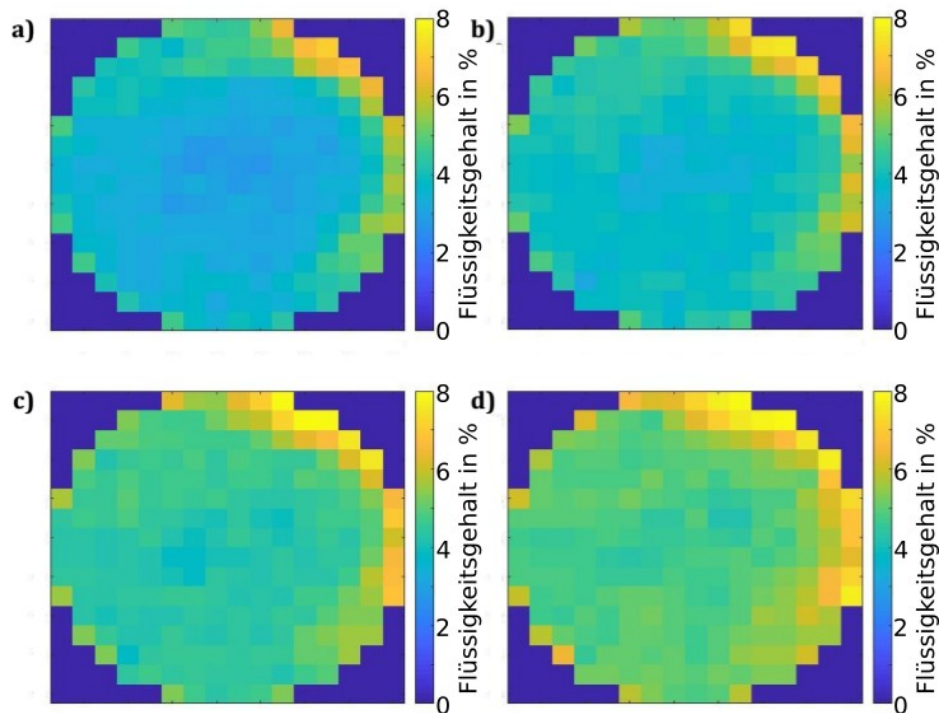


Abb. 3: Instantane Messung des Flüssigkeitsgehalts in feinporigem Schaum mit a) 15 ml/min, b) 30 ml/min, c) 45 ml/min und d) 60 ml/min Drainagevolumenstrom und 3 mm Gitterabstand.

Für jede Bestimmung des Flüssigkeitsgehalts wurden über 10 s Messungen mit 5000 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Diese 50.000 Flüssigkeitsverteilungen wurden sowohl über die Zeit als auch über die Gitterpunkte gemittelt. Die resultierenden mittleren Flüssigkeitsgehalte sind in Abbildung 4 für grobporigen Schaum (2.48 mm Blasendurchmesser) und in Abbildung 5 für feinporigen Schaum (0.58 mm Blasendurchmesser) dargestellt. Mit zunehmendem Drainagevolumenstrom steigt auch der Flüssigkeitsgehalt. Feinporiger Schaum hat generell einen größeren Drainagewiderstand [Lorceau, 2009] und daher bei gleichem Drainagevolumenstrom einen größeren Flüssigkeitsgehalt.

Der Einfluss des Gitterabstands ist deutlich zu erkennen. Für hinreichend große Gitterabstände konvergieren die Messwerte gegen einen bestimmten Flüssigkeitsgehalt. Bei zu geringen Abständen kommt es zu einer Überschätzung des Flüssigkeitsgehalts. Insbesondere bei grobporigem Schaum sind systematische Überschätzungen auf bis zu 300 % im Verhältnis zu großen Gitterabständen zu erkennen. Bei feinporigem Schaum sind immerhin noch 150 % Überschätzung erkennbar.

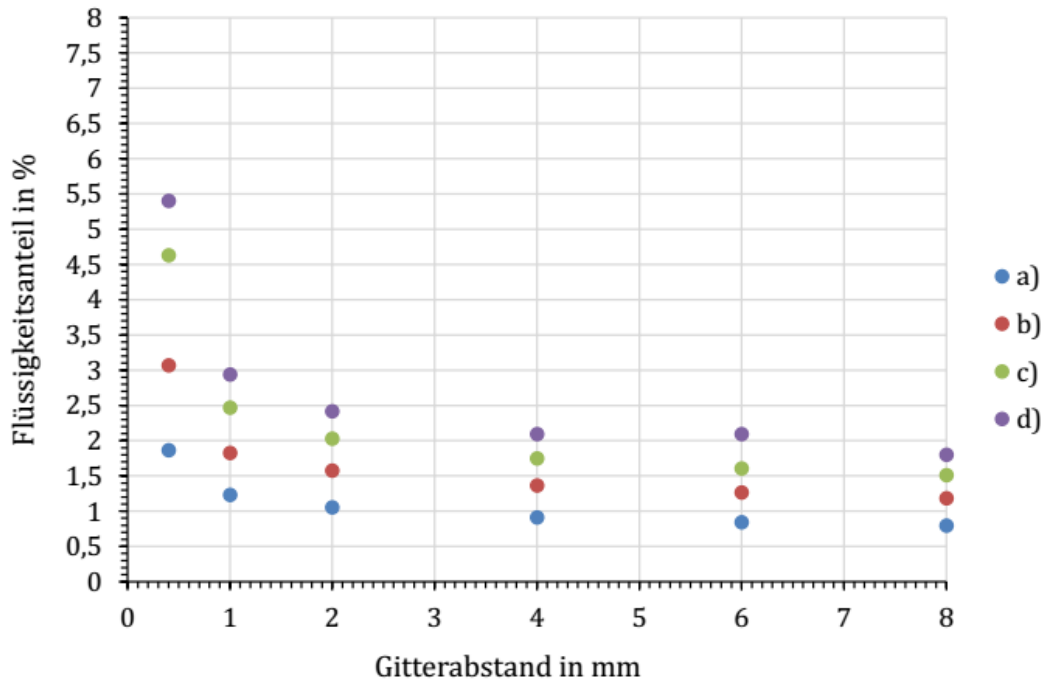


Abb. 4: Gemittelte Messwerte des Flüssigkeitsgehalts in grobporigem Schaum (2.48 mm Blasendurchmesser) für verschiedene Gitterabstände mit a) 15 ml/min, b) 30 ml/min, c) 45 ml/min, und d) 60 ml/min Drainagevolumenstrom.

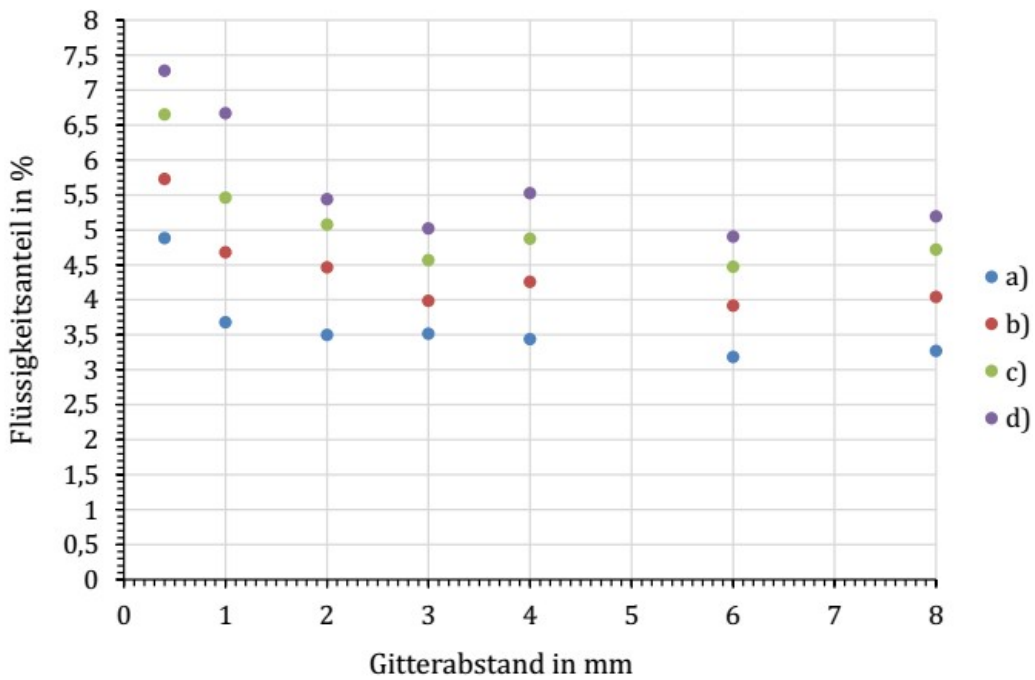


Abb. 5: Gemittelte Messwerte des Flüssigkeitsgehalts in feinporigem Schaum (0.58 mm Blasendurchmesser) für verschiedene Gitterabstände mit a) 15 ml/min, b) 30 ml/min, c) 45 ml/min, und d) 60 ml/min Drainagevolumenstrom.

Weiterhin ist erkennbar, dass der Gradient, mit der die Überschätzung mit zunehmendem Gitterabstand abfällt, von der Blasengröße abhängt. Für grobporigen Schaum (Abb. 4) ist nach ca. 4 mm bis 6 mm das Plateau erreicht. Für feinporigen Schaum (Abb. 5) konvergieren die Messwerte bereits nach ca. 2 mm bis 3 mm. Vermutlich skalieren diese Werte mit der Blasengröße.

Diskussion

Die Messungen haben gezeigt, dass der Drahtgittersensor bei zu geringem Abstand zwischen den Drahtebenen den Flüssigkeitsgehalt von wässrigen Schäumen deutlich überschätzen kann. Um diesen Effekt sicher ausschließen zu können, sollten Gitterabstände von bis zu drei Blasendurchmessern eingehalten werden. Gleichzeitig reduzieren hohe Gitterabstände jedoch die räumliche Auflösung, da der Strom dann eine größere Querschnittsfläche durchdringt und damit die Mittlung des Flüssigkeitsgehalts über ein größeres Volumen stattfindet. In unserem Fall betrug der horizontale Abstand zwischen zwei Kreuzungspunkten 5.9 mm. Für den grobporigen Schaum wäre ein vertikaler Gitterabstand von 7.4 mm zu wählen. Damit käme es noch nicht zu einer wesentlichen Überlappung der Kreuzungspunkte. Für Schaum mit noch größeren Blasen oder für Drahtgittersensoren mit höherer Drahtanzahl pro Sensordurchmesser könnte der Effekt jedoch relevant werden.

Nach wie vor unklar ist, ob die Werte bei ausreichend großem Gitterabstand auch dem wahren Flüssigkeitsgehalt des Schaums entsprechen. Dafür bedarf es einer erneuten Kalibrierung des Drahtgittersensors in Schaum. Dies soll demnächst äquivalent zu [Ziauddin, 2022] mit Neutronenradiographie erfolgen, unter Verwendung hinreichend großer Drahtgitter-Abstände.

Dankesworte

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (HE 7529/3-1) für die finanzielle Unterstützung. Messungen zur Neutronenradiographie wurden am Paul-Scherrer Institut, Villigen, Schweiz durchgeführt.

Literatur

Cantat, I., Cohen-Addad, S., Elias, F., Graner, F., Höhler, R., Pitois, O., Rouyer, F., & Saint-Jalmes, A., 2013: *Foams: structure and dynamics*. OUP Oxford.

Emmerich, H., Knüpfer, L., Heitkam, S., Starke, E., Trtik, P., Schaller, L., Weik, D., & Czarske, J., 2022: "Ultrasound imaging of liquid fraction in foam", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.

Feitosa, K., Marze, S., Saint-Jalmes, A., & Durian, D. J., 2005: "Electrical conductivity of dispersions: from dry foams to dilute suspensions", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17(41), 6301.

Forel, E., Rio, E., Schneider, M., Beguin, S., Weaire, D., Hutzler, S., & Drenckhan, W., 2016: "The surface tells it all: relationship between volume and surface fraction of liquid dispersions", *Soft matter*, 12(38), 8025-8029.

Heitkam, S., Rudolph, M., Lappan, T., Sarma, M., Eckert, S., Trtik, P., Lehmann, E., Vontobel, P., & Eckert, K., 2018: "Neutron imaging of froth structure and particle motion", *Minerals Engineering*, 119, 126-129.

Karapantsios, T. D., & Papara, M., 2008: "On the design of electrical conductance probes for foam drainage applications: assessment of ring electrodes performance and bubble size effects on measurements", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 323(1-3), 139-148.

Keshavarzi, B., Krause, T., Sikandar, S., Schwarzenberger, K., Eckert, K., Ansoorge-Schumacher, M. B., & Heitkam, S., 2022: "Protein enrichment by foam Fractionation: Experiment and modeling", *Chemical Engineering Science*, 256, 117715.

Lappan, T., Herting, D., Ziauddin, M., Stenzel, J., Shevchenko, N., Eckert, S., Eckert, K., & Heitkam, S., 2023: "X-ray Particle Tracking Velocimetry in an Overflowing Foam", *Applied Sciences*, 13(3), 1765.

Lorceau, E., Louvet, N., Rouyer, F., & Pitois, O., 2009: "Permeability of aqueous foams", *The European Physical Journal E*, 28(3), 293-304.

Prasser, H. M., Böttger, A., & Zschau, J., 1998: "A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows", *Flow measurement and instrumentation*, 9(2), 111-119.

Staud, R., Heller, D., Knüpfer, L., Heitkam, S., Einfalt, D., Jasch, K., & Scholl, S., 2022: "Minimal-Invasive Method for the Evaluation of Liquid Fractions in Foams with a Point Level Sensor", *Chemical Engineering & Technology*, 45(8), 1397-1403.

Wang, M., & Cilliers, J. J., 1999: "Detecting non-uniform foam density using electrical resistance tomography", *Chemical Engineering Science*, 54(5), 707-712.

Ziauddin, M., Schleicher, E., Trtik, P., Knüpfer, L., Skrypnik, A., Lappan, T., Eckert, K., & Heitkam, S., 2022: "Comparing wire-mesh sensor with neutron radiography for measurement of liquid fraction in foam", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 51(1), 015101.