Bestimmung von Gasblasenparametern durch akustische Messungen in der Gasdüsenzuleitung

Thomas Wiesner[1], Bernhard G. Zagar[2]
Institut für Elektrische Messtechnik, Johannes Kepler Universität, 4040 Linz, Österreich
Email: [1] thomas.wiesner@jku.at, [2] bernhard.zagar@jku.at

Einleitung

In industriellen Prozessen wird häufig Gas in Form von Blasen in eine Flüssigkeit eingeleitet, um eine große Grenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit sicherzustellen oder eine Umwälzung der Flüssigkeit zu erreichen.

Für die Prozessoptimierung und Überwachung ist die Kenntnis von Parametern wie z.B. durchschnittliches Blasenvolumen, Blasengeometrie und Blasenablösefrequenz wichtig. Solange sich die Blase noch nicht von der Düse abgelöst hat, bilden Blaseninnenraum, Düse und Zuleitung einen gemeinsamen Gasraum, sodass die Bestimmung von Blasenparametern durch die Messung der akustischen Eigenschaften dieses Gesamtvolumens prinzipiell möglich scheint.

Die Entwicklung eines Systems zur akustischen Bestimmung von Blasenparametern ist aber nur dann sinnvoll bzw. möglich, wenn die gesuchten Blasenparameter einen ausreichend großen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften des gesamten Gasraums haben. Der vorliegende Beitrag stellt die rechnerischen und experimentellen Ergebnisse einer Untersuchung der Rückwirkung der Gasblasenlänge auf das akustische Übertragungsverhalten der Zuleitung einer Gasdüse vor.

Im Betrieb der Gasdüse ändern sich die Form und das Volumen der Gasblase ständig: Das Volumen wächst an, bis sich die Blase ablöst und sich wenig später die nächste bildet. Zur Vereinfachung wurde die zeitliche Entwicklung der Gasblase nicht berücksichtigt, d.h. für die Rechnung bzw. Messung wurde jeweils ein Zeitpunkt mit fixer Blasengeometrie herausgegriffen.

Versuchsaufbau

Die in Abb. 1 dargestellte Geometrie des Versuchsaufbaus ist einer prozesstechnischen Anlage im Maßstab

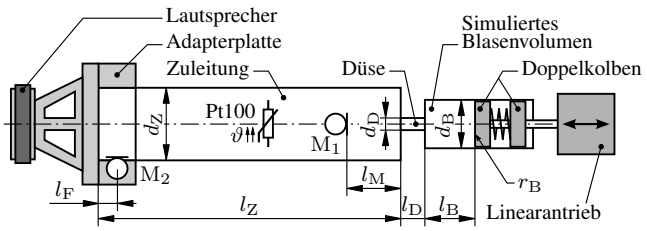

Abbildung 1: Geometrie des Versuchsaufbaus. Zeichnung nicht maßstabsgetreu. Geometrieparameter: $l_Z = 1{,}115\,\mathrm{m}$, $l_D = 30\,\mathrm{mm}$, $l_B = -24\ldots70\,\mathrm{mm}$, $l_F = 20\,\mathrm{mm}$, $d_Z = 35{,}5\,\mathrm{mm}$, $d_D = 2\,\mathrm{mm}$, $d_B = 8\,\mathrm{mm}$

von annähernd 1:1 nachempfunden und besteht im Wesentlichen aus drei Rohrstücken mit kreisförmigem Querschnitt, von denen das linke die Zuleitung, das mittlere die Düse und das rechte die Blase darstellt. Das Innenvolumen wird über einen Lautsprecher akustisch angeregt und die Übertragungsfunktion

$$G(\omega, l_B) = \frac{u_{M_1}(\omega, l_B)}{u_{M_2}(\omega, l_B)} \quad [1] \qquad (1)$$

zwischen den Mikrofonen M_1 und M_2 in Abhängigkeit von Blasenlänge l_B und Kreisfrequenz ω gemessen. Hierbei sind u_{M_1} und u_{M_2} die Ausgangsspannungen der Mikrofonvorverstärker. Das Mikrofon M_1 befindet sich auf einem im Rohr verschiebbaren Mikrofonhalter, sodass unterschiedliche Mikrofonpositionen l_M realisiert werden können. Das Mikrofon M_2 ist hingegen fest in der Adapterplatte montiert. Das Ziel ist, zu untersuchen, ob von $G(\omega, l_B)$ auf l_B zurückgeschlossen werden kann.

Der Versuchsaufbau gestattet die stufenlose Vorgabe der Blasenlänge l_B durch Verschieben eines Doppelkolbens mit einem Linearantrieb (ZaberTech T-LSM100A). Die Besonderheit der Doppelkolbenanordnung besteht darin, dass auch negative Blasenvolumina, entsprechend dem Eindringen von Flüssigkeit in die Düse, simuliert werden können: Der rechte Kolben in Abb. 1 ist fest mit der Kolbenstange verbunden. Der linke Kolben ist auf der Kolbenstange verschiebbar und wird von einer Feder nach links gedrückt, wobei sein Weg durch einen Anschlag auf der Kolbenstange begrenzt wird. Schiebt der Linearantrieb die Kolbenstange nach links, so bewegen sich zunächst beide Kolben gemeinsam und die Blasenlänge l_B wird reduziert. Sobald $l_B = 0$ erreicht wird, behindert der kleinere Querschnitt der Düse die Weiterbewegung des linken Kolbens und die Feder zwischen den Kolben wird zusammengedrückt. Die Kolbenstange, deren Durchmesser etwas kleiner als der Düsendurchmesser ist, dringt daher für $l_B < 0$ durch den linken Kolben hindurch in die Düse ein.

Ein Blockschaltbild des gesamten Versuchsaufbaus ist in Abb. 2 dargestellt. Der Lautsprecher (Visaton FRS8 $4\,\Omega$) wird von einem Audioverstärker (WPA-600PRO) gespeist, der sein Eingangssignal von einem Funktionsgenerator (Agilent 33210A) erhält. Ein zwischengeschalteter Begrenzer/Abschwächer passt den Ausgangsspannungsbereich des Funktionsgenerators an den Eingangsspannungsbereich des Audioverstärkers an. Die Mikrofone sind handelsübliche Elektret-Mikrofone (Kingstate KEEG1538WB-100LB). Der Mikrofonvorverstärker,

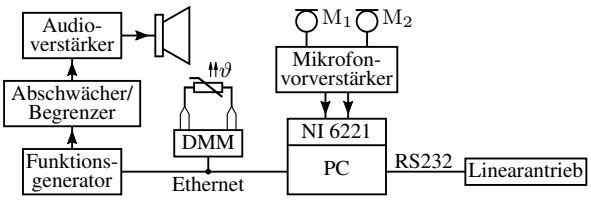

Abbildung 2: Blockdiagramm des Versuchsaufbaus

der im Zuge des Projektes spezifisch entwickelt wurde, versorgt die Mikrofone, puffert deren Ausgansignale und stellt so ein Signal mit kleinem Innenwiderstand für die Datenerfassungskarte (NI PCI6221) des Steuerungs-PCs bereit. Der Pt100 Widerstandstemperatursensor (Correge PTFC101A, DIN IEC 751 class A) befindet sich, sowohl radial als auch axial, etwa in der Mitte des Zuleitungsrohres. Sein Widerstandswert wird mittels Vierleitertechnik von einem Digitalmultimeter (Agilent 34410A) erfasst. Die Steuerung des Versuchsaufbaus erfolgt mithilfe von Matlab-Skripten.

Messdatenaufnahme und Aufbereitung

Zuerst wird die gewünschte Blasenlänge l_B mit dem Linearantrieb eingestellt. Dann wird der Funktionsgenerator auf eine harmonische Signalform mit der nächsten zu messenden Frequenz konfiguriert und eine Sekunde lang die Mikrofonsignale mit einer Abtastrate von 50 kHz aufgezeichnet. Falls die Bedingung

$$0{,}7\,\hat{u}_\mathrm{mic} < \max(u_{\mathrm{M}_1}, u_{\mathrm{M}_2}) < 0{,}9\,\hat{u}_\mathrm{mic} \tag{2}$$

mit der maximal zulässigen Mikrofonamplitude $\hat{u}_\mathrm{mic}$ nicht erfüllt ist und die maximale Lautsprecherbelastbarkeit eine Korrektur der ausgegebenen Signalamplitude erlaubt, wird diese durchgeführt und die Messung wiederholt, ansonsten wird die Messung akzeptiert. Durch diese adaptive Veränderung der Anregung erhöht sich der erzielbare Dynamikbereich der Messung um etwa 40 dB, weil die maximale Anregungsamplitude nicht mehr für alle Frequenzen auf einen gemeinsamen Wert begrenzt ist.

Die Daten einer akzeptierten Messung werden zur Reduktion von Leakage-Effekten auf eine ganze Anzahl von Perioden beschnitten, bevor die komplexwertigen Signalamplituden bei der Messfrequenz mit der diskreten Fourier Transformation [5] berechnet werden. Danach wird der Widerstandswert des Temperatursensors erfasst, zusammen mit den Mikrofonsignaldaten gespeichert und mit dem nächsten Frequenzwert fortgesetzt.

Kompensation des Temperatureinflusses

Die Messung des Frequenzganges dauert je nach Anzahl der Messpunkte mehrere Stunden. Da bei der Messung keine klimatisierte Umgebung zur Verfügung stand, wurde der Temperatureinfluss rechnerisch bei der Auswertung berücksichtigt.

Unter der Annahme eines linearen homogenen Mediums sowie Schalldrücken, die so klein sind, dass eine lineare Näherung der beschreibenden Gleichungen zulässig ist, wird das Schallfeld in einem Gas im stationären harmonischen Fall durch die Helmholtz-Gleichung (siehe z.B. [2])

$$\frac{\omega^2}{c^2}\,p(\vec{x}) + \Delta\,p(\vec{x}) = 0 \tag{3}$$

mit der Position $\vec{x}$, dem Schalldruck p, dem Laplace-Operator Δ und der Schallgeschwindigkeit

$$c = \sqrt{\gamma\,R_\mathrm{s}\,T} \qquad [\mathrm{m/s}] \tag{4}$$

mit dem Adiabatenexponent γ, der spezifischen Gaskonstante R_s und der absoluten Temperatur T beschrieben. Der Koeffizient ω/c und somit die Lösung von (3) hängt von der Schallgeschwindigkeit und daher von der Temperatur ab. Zwei Messungen bei den Temperaturen $T_{\mathrm{m},1}$ und $T_{\mathrm{m},2}$ und den Frequenzen $\omega_{\mathrm{m},1}$ und $\omega_{\mathrm{m},2}$ liefern das gleiche Ergebnis, wenn

$$\frac{\omega_{\mathrm{m},1}^2}{\omega_{\mathrm{m},2}^2} = \frac{T_{\mathrm{m},1}}{T_{\mathrm{m},2}} \tag{5}$$

gilt, d.h. die Messfrequenz muss entsprechend der Temperatur angepasst werden um die gleichen Blasenparameter zu liefern. Alternativ kann bei vorgegebener Messfrequenz auch die Frequenz des Datenpunktes bei der Auswertung auf

$$\omega_\mathrm{c} = \omega_\mathrm{m}\sqrt{\frac{T_\mathrm{ref}}{T_\mathrm{m}}} \qquad [\mathrm{rad/s}] \tag{6}$$

korrigiert werden, wobei T_ref eine gemeinsame Referenztemperatur für alle Datenpunkte ist. Für den Laborversuch wurde die letztere Methode verwendet und $T_\mathrm{ref} = \overline{T}_\mathrm{m}$ mit dem arithmetischen Mittelwert $\overline{T}_\mathrm{m}$ der Temperatur über die gesamte Messzeit gewählt.

Die mathematische Beschreibung des Problems erfordert neben der Gleichung (3) auch die Angabe von Randbedingungen, welche ebenfalls einem Temperatureinfluss unterliegen. Eine Analyse zeigt, dass eine Temperaturänderung einer Veränderung der Anregungsamplitude äquivalent ist, welche bei der Auswertung nach Gleichung (1) herausfällt und daher nicht gesondert berücksichtigt werden muss.

Modellrechnung

Für die Simulation wurde ein vereinfachtes eindimensionales Modell in Anlehnung an die in [4] im Kapitel Schalldämpfer beschriebenen Methoden verwendet. Dazu wurde die Geometrie in N Abschnitte mit jeweils konstantem Querschnitt und konstanten Materialparametern aufgespaltet und in jedem Abschnitt $i = 1 \ldots N$ die Ausbreitung einer ebenen vor- und rücklaufenden Schallwelle, beschrieben durch den Schalldruck

$$p_i(x_i) = a_i\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_i x_i} + b_i\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}k_i x_i} \qquad [\mathrm{Pa}] \tag{7}$$

im Bereich i bzw. die Schallschnelle

$$v_i(x_i) = \frac{1}{\rho_i\,c_i}\left(a_i\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_i x_i} - b_i\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}k_i x_i}\right) \qquad [\mathrm{m/s}] \tag{8}$$

im gleichen Abschnitt, angesetzt. Die Koeffizienten a_i und b_i sind die gesuchten komplexwertigen Unbekannten und k_i ist die komplexwertige Kreiswellenzahl. An den Schnittstellen zwischen i-tem und $(i+1)$-tem Abschnitt gilt für den Schalldruck

$$p_i(x_i = x_{\mathrm{s},i}) = p_{i+1}(x_{i+1} = x_{\mathrm{s},i+1}) \quad [\mathrm{Pa}] \qquad (9)$$

und für die Schallschnelle v

$$A_i\, v_i(x_i = x_{\mathrm{s},i}) = A_{i+1}\, v_{i+1}(x_{i+1} = x_{\mathrm{s},i+1})\,, \qquad (10)$$

wobei x_s die Koordinate der Trennstelle im Koordinatensystem des jeweiligen Abschnittes und A_i die Querschnittsfläche des Abschnitts i bezeichnen. Die Randbedingung bei vorgegebener Schnelle v_R lautet

$$v_\mathrm{R} = v_i(x_i = x_{\mathrm{R},i}) \qquad [\mathrm{m/s}] \qquad (11)$$

mit der Position $x_{\mathrm{R},i}$ des Randes im i-ten Koordinatensystem und ein vorgegebener Reflexionsfaktor r_R wird durch

$$r_\mathrm{R} = \frac{b_i\, \mathrm{e}^{\mathrm{j}k_i x_{\mathrm{R},i}}}{a_i\, \mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_i x_{\mathrm{R},i}}} \qquad [1] \qquad (12)$$

berücksichtigt. Diese Methodik liefert ein lineares Gleichungssystem mit $2N$ Unbekannten, das sich leicht numerisch lösen lässt.

Der in Abb. 1 dargestellte Aufbau wurde in die drei Bereiche Zuleitung, Düse und Blase (Indizes Z, D, und B) aufgetrennt. Im Fall von $l_\mathrm{B} < 0$ gibt es nur mehr die ersten beiden Kammern und die wirksame Düsenlänge ist $l'_\mathrm{D} = l_\mathrm{D} + l_\mathrm{B}$.

Bei vernachlässigter Rückwirkung des Schallfeldes auf die Bewegung der Lautsprechermembran gibt diese als Randbedingung die Geschwindigkeit vor. An der Doppelkolbenanordnung wurde ein Reflexionsfaktor r_B angenommen, welcher eine unvollständige Reflexion aufgrund von Leckagen berücksichtigt.

Dämpfung

Für den Energieverlust einer Schallwelle sind mehrere physikalische Phänomene verantwortlich [1, 3]. Die wichtigsten sind die Dämpfung durch Scher- und Volumenviskosität sowie Wärmeleitung im Gas („klassische Absorptionseffekte“), molekulare Absorption und Dämpfung durch die Wände und Einbauten. Für die Schallausbreitung in Rohren mit kreisrundem Querschnitt unter Berücksichtigung des Wandeinflusses sind in der Literatur mehrere Näherungslösungen zu finden. Eine Übersicht gibt z.B. [6].

Bei der Auswertung der Gleichungen aus [1, 3, 6] mit den Materialdaten für Luft bei einem Umgebungsdruck von $p_0 \approx 1000\,\mathrm{hPa}$ und rund 20°C Umgebungstemperatur zeigt sich, dass im Frequenzbereich der Messungen im unteren einstelligen kHz-Bereich klassische und molekulare Absorption gegenüber der Rohrwanddämpfung vernachlässigbar sind. In den Simulationen ist deshalb nur der Einfluss der Rohrwand berücksichtigt, welcher

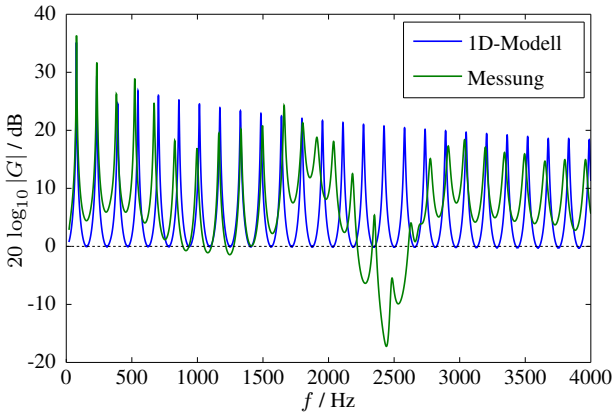

Abbildung 3: Vergleich von Messung und 1D-Modell für $l_\mathrm{B} = 46{,}5\,\mathrm{mm}$, $l_\mathrm{M} = 3\,\mathrm{mm}$.

mit der in [6] zu findenden „low reduced frequency solution“ berechnet wurde. Diese Näherungslösung beinhaltet außer der Dämpfung auch die reduzierte Schallgeschwindigkeit in engen Rohren. Der Einfluss von Einbauten, wie der Mikrofonhalterung oder Kabel, wurde vernachlässigt.

Messergebnisse

Die $-3\,\mathrm{dB}$-Breite der Rohrresonanzspitzen beträgt $\approx 5\,\mathrm{Hz}$, weshalb bei der Messung ein Frequenzinkrement von $1\,\mathrm{Hz}$ gewählt wurde. Bei den Messungen wurden Frequenzen unterhalb $4\,\mathrm{kHz}$ betrachtet, da die Zuleitung im linken Bereich eine in Abb. 1 nicht dargestellte T-Abzweigung zur Kabeldurchführung besitzt, welche, genauso wie die bei höheren Frequenzen einsetzenden Quermoden, in der Modellbildung nicht berücksichtigt ist und deren Einflüsse bei höheren Frequenzen signifikant werden.

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich einer Messung und der 1D-Rechnung. Die Frequenzen der ersten drei Eigenmoden stimmen gut überein. Die komplexe Struktur des Messergebnisses kann durch die Vernachlässigungen der Simulation (Mikrofonhalterung, Kabel, T-Abzweigung, etc.) aber nicht reproduziert werden.

Wichtiger als die absoluten Werte von $G(\omega, l_\mathrm{B})$ ist die Veränderung von $G(\omega, l_\mathrm{B})$ mit l_B, da der Absolutwert z.B. durch eine Referenzmessung bestimmt werden kann. Der Frequenzgang der Signalkette vom Funktionsgenerator bis inklusive Lautsprecher kürzt sich bereits bei der Berechnung von $G(\omega, l_\mathrm{B})$. Werden die Messungen auf eine Referenz-Blasenlänge l'_B bezogen

$$G'(\omega, l_\mathrm{B}) = \frac{G(\omega, l_\mathrm{B})}{G(\omega, l'_\mathrm{B})}\,, \qquad [1] \qquad (13)$$

so kürzen sich zusätzlich alle Teile von $G(\omega, l_\mathrm{B})$, welche beim Verändern von l_B konstant bleiben, also z.B. unterschiedliche Empfindlichkeiten der beiden Mikrofone, des Mikrofonvorverstärkers und der Datenerfassungskarte.

Abbildung 4 zeigt das Simulationsergebnis entsprechend (13). Als Referenz $G(\omega, l'_\mathrm{B})$ wurde $l'_\mathrm{B} = \max(l_\mathrm{B})$ gewählt. Die Messergebnisse für 40 verschiedene Werte von l_B sind in Abb. 5 zu sehen. Beide Resultate stimmen qualitativ

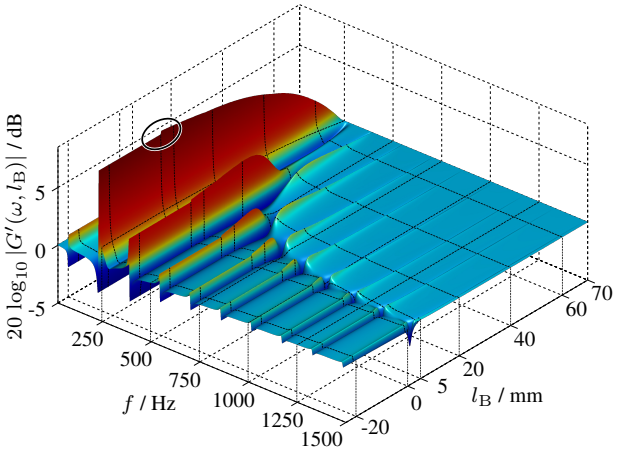

Abbildung 4: 1D-Simulation der Veränderung des Übertragungsverhaltens zwischen den Mikrofonen in Abhängigkeit von l_B für $l_\mathrm{M} = 3\,\mathrm{mm}$. Die Referenzblasenlänge ist $l'_\mathrm{B} = 70\,\mathrm{mm}$. Die Markierung zeigt eine Stufe beim Übergang von $l_\mathrm{B} < 0$ zu $l_\mathrm{B} \geq 0$, hervorgerufen durch die unvollständige Reflexion an der Kolbenstange.

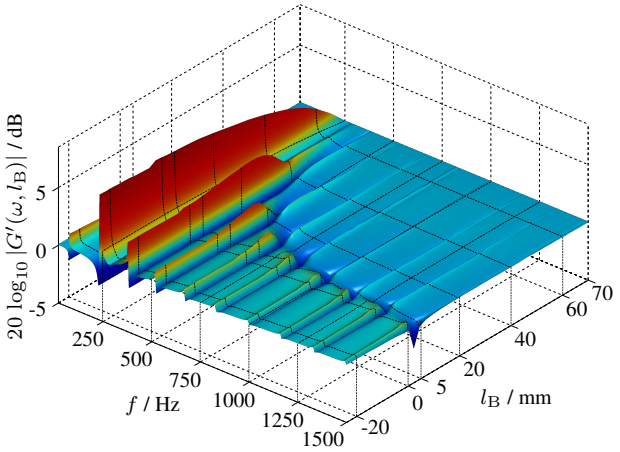

Abbildung 5: Die zu Abb. 4 gehörenden Messergebnisse ($l_\mathrm{M} = 3\,\mathrm{mm}$, $l'_\mathrm{B} = 70\,\mathrm{mm}$) von G'. Der qualitative Verlauf ist ähnlich Abb. 4, der Betrag von G' ist bei der Messung etwas kleiner.

gut überein, lediglich die maximalen Änderungen sind bei der Rechnung $\approx 8\,\mathrm{dB}$ und bei der Messung nur $\approx 6\,\mathrm{dB}$.

In der Simulation wurde

$$r_\mathrm{B} = \begin{cases} r_{\mathrm{B},1} = 0{,}25 & \text{für } l_\mathrm{B} < 0 \\ r_{\mathrm{B},2} = 0{,}97 & \text{für } l_\mathrm{B} \geq 0 \end{cases} \qquad [1] \qquad (14)$$

verwendet. Wird $r_{\mathrm{B},1}$ wie $r_{\mathrm{B},2}$ nahe 1 gewählt, so zeigt das Simulationsergebnis nicht die in Abb. 4 markierte Stufe nach oben für steigende l_B, sondern eine Stufe nach unten. Dieses Ergebnis ist ein Indiz dafür, dass am Ende der Kolbenstange keine vollständige Reflexion stattfindet, sondern z.B. durch den Ringspalt zwischen Kolbenstange und Düse eine nennenswerte Dämpfung verursacht wird.

Im Bereich von $l_\mathrm{B} > 5\,\mathrm{mm}$ ist eine deutliche Veränderung des Übertragungsverhaltens mit der Blasengröße sichtbar. Eine Zuordnung von Blasengröße und Übertragungsverhalten ist hier gut möglich. Für kleinere l_B ist das im betrachteten Frequenzbereich schwierig und ab $l_\mathrm{B} < 0$ ist praktisch keine Veränderung mehr sichtbar. Eine Bestimmung, wie weit Flüssigkeit in die Düse eingedrungen ist, ist daher kaum möglich. Die Güte der Messung ist in diesem Bereich wegen des kleinen Reflexionsfaktors $r_{\mathrm{B},1}$ zwar fraglich, jedoch ist auch bei einer Simulation mit $r_{\mathrm{B},1} = 0{,}97$ dort kaum eine Änderung sichtbar.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulations- und Messergebnisse haben für die betrachtete Geometrie und den betrachteten Frequenzbereich gezeigt, dass ein Rückschluss vom akustischen Übertragungsverhalten einer Düsenzuleitung auf die Länge der mit der Düse verbundenen Gasblase möglich ist, sofern deren Länge nicht zu klein ist. Die Detektion von in die Düse eindringender Flüssigkeit gestaltet sich jedoch schwierig.

Für die Entwicklung eines einsetzbaren Systems zur Blasenparametermessung sind weitere Arbeiten notwendig. Hier wurde nur der Einfluss eines Parameters (der Blasenlänge) für eine (zylindrische) Blasenform untersucht, während die Blasen in der Realität komplexe zeitlich veränderliche Formen annehmen können. Zusätzlich muss die Messzeit für ein praktisch verwendbares System stark reduziert werden und ein solches System muss mit den Störgeräuschen, welche durch die Ablösung der Blasen in der Zuleitung erzeugt werden, zurechtkommen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des österreichischen COMET-K2 Zentrums des Linz Center of Mechatronics (LCM) durchgeführt und wurde von der österreichischen Bundesregierung und dem Land Oberösterreich finanziert.

Literatur

[1] Bhatia, A. B.: Ultrasonic Absorption – An Introduction to the Theory of Sound Absorption and Dispersion in Gases, Liquids and Solids. Dover Publications, New York, 1967

[2] Crocker, M. J. (Herausgeber): Handbook of Acoustics. John Wiley & Sons, 1998

[3] Lerch, R., Sessler G., Wolf, D.: Technische Akustik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009

[4] Möser, M.: Technische Akustik. Springer Vieweg, 9. Auflage, 2012

[5] Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., Buck, J. R.: Discrete-Time Signal Processing. Prentice Hall, 2. Auflage, 1999

[6] Tijdeman, H.: On the Propagation of Sound Waves in Cylindrical Tubes. Journal of Sound and Vibration, 39 (1975), 1–33