Bestimmung von stationären Schallfeldern in Ultraschall-Durchflussreaktoren

Christian Steuck[1], Rafael Piscoya[1], Martin Ochmann[1], Jonas Möhricke[2], Rainer Jung[2]
[1] *Beuth Hochschule für Technik Berlin, Luxemburger Straße 10, 13355 Berlin, csteuck@beuth-hochschule.de*
[2] *BANDELIN electronic GmbH & Co. KG, Heinrichstraße 3-4, 12207 Berlin*

Einleitung

Es werden Schallfelder in Ultraschall-Rohrreaktoren bei vorhandener Flüssigkeitsströmung betrachtet. Der Einfluss einer Fluidströmung auf niederfrequente Ultraschallfelder und in typischen Ultraschall-Rohrreaktoren in Abhängigkeit von den Kenngrößen wie Schallintensität, Frequenz und Fluiddruck wird numerisch mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) untersucht. Abhängig von der Position der Schallwandler an der Reaktorwand und ihrer Ansteuerung (Polung, Frequenz) können Ausdehnung und Lage intensiver Kavitationszonen (Ultraschall-Intensitätsmaxima) beeinflusst und damit das Design der Reaktoren optimiert werden. Weiterhin wird untersucht, wie sich Geschwindigkeit und Profil der Strömung auf das Schallfeld bei 25 kHz auswirken. In der Praxis sollen in wässrigen Fluiden gelöste Stoffe wie z. B. Schlamm beschallt werden. In einer Parameterstudie über die Viskosität kann so später die optimale Feststoffkonzentration bestimmt werden. Die Modelle der Reaktoren wurden von der Firma BANDELIN electronic GmbH & Co. KG bereitgestellt.

Theorie

Druck p_{ges}, Dichte ϱ_{ges} und Geschwindigkeit $\vec{v}_{ges}$ haben einen stationären Anteil (das „zeitliche Mittel“) und einen akustischen Anteil (die „Wechselgrößen“), wobei die akustischen Größen zeitharmonisch sind, zum Beispiel $p_{ges}(\vec{r},t) = p_0(\vec{r}) + p(\vec{r})e^{i\omega t}$.

Dieser Ansatz wird eingesetzt in die Navier-Stokes-Gleichungen, die die Impuls- und Massenerhaltung vollständig beschreiben. Man kann diese in zwei Gleichungen separieren; die eine enthält nur die stationären Größen p_0 und $\vec{u}$, die andere enthält Terme nullter und erster Ordnung, also auch die Wechselgrößen Schalldruck p und Schallschnelle $\vec{v}$. Produkte aus den Wechselgrößen („Terme höherer Ordnung“) werden vernachlässigt. Für die akustischen Größen erhält man die Gleichungen:

$$-\frac{\varrho_0}{c^2} i\omega \left(i\omega\phi + \vec{u}\cdot\nabla\phi\right) + \ldots$$
$$\nabla\cdot\left[\varrho_0\nabla\phi - \frac{\varrho_0}{c^2}\left(i\omega\phi + \vec{u}\cdot\nabla\phi\right)\right] = 0 \qquad (1)$$

und

$$p = -\varrho_0\left(i\omega\phi + \vec{u}\cdot\nabla\phi\right) \qquad (2)$$

für die Unbekannten ϕ und p. Dabei wird die Schallschnelle v mittels

$$\vec{v} = \nabla\phi \qquad (3)$$

durch ihr Potenzial ϕ beschrieben; der akustische Anteil ϱ der Dichte wird durch den Schalldruck p ausgedrückt:

$$p = \varrho c^2. \qquad (4)$$

Es bedeuten:

$\vec{u}$	stationäre Strömungsgeschwindigkeit
p	Schalldruck, komplexe Amplitude
ϱ, ϱ_0	Dichte, akustischer und stationärer Anteil
v	Schallschnelle, komplexe Amplitude
ϕ	Schallschnellepotenzial
ω	Kreisfrequenz
c	Schallgeschwindigkeit
Ma	Machzahl ($Ma = \lvert\vec{u}\rvert/c$).

Modellierung

Die Rohrreaktoren haben eine einfache Geometrie (Abbildung 1), sie wurden daher als Zylinder modelliert. Die Schallwandler werden als kreisrunde Gebiete mit vorgegebener Beschleunigung berücksichtigt.

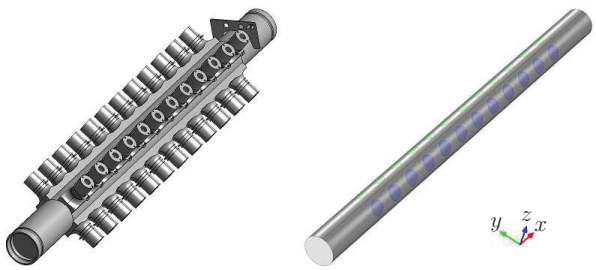

Abbildung 1: Ultraschall-Rohrreaktor mit Wandlern und Comsol-Zylindermodell.

Die Rechnung erfolgt einfach gekoppelt: Eine strömungsmechanische Rechnung liefert den stationären Druck p_0 und die Strömungsgeschwindigkeit u. Daraufhin wird das Schallfeld in dieser Strömung berechnet. Die Rückwirkung des Schalls auf die Strömung wird nicht berücksichtigt.

Randbedingungen für die Strömungsrechnung:

- Einlass ($x = -L/2$): mittlere Einströmgeschwindigkeit $\overline{u}$
- Auslass ($x = +L/2$): statischer Druck $p_0 = 0$
- Mantelfläche: $u = 0$

Verwendet wurde das k-ϵ-Modell der Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equations (RANS) mit den empirischen

Gleichungen

$$I_T = 0.16 \cdot Re^{-1/8} \tag{5}$$

$$L_T = 0.07 \cdot r \tag{6}$$

für die Turbulenz-Intensität I_T und Turbulenzlänge L_T (Zylinderradius r, Reynoldszahl Re).

Randbedingungen für die akustische Rechnung:

- Ein- und Auslass ($x = \pm L/2$): Impedanz ϱc
- Wandler: Normalbeschleunigung $-\omega^2 \cdot x_{max}$ mit $x_{max} = 20\ \mu$m
- restliche Wand: schallhart

Die Normalbeschleunigung ist damit über die gesamte Fläche eines Ultraschallwandlers gleich, das entspricht also einer kolbenförmigen Auslenkung. Der Wert der Amplitude ist mit 20 μm höher als in der Realität. In praxi kann jeder Wandler auch um 180° phasenverschoben angesteuert werden, es sind daher diverse „Anregungsmuster“ möglich.

Ergebnisse

Das Ergebnis der strömungsmechanischen Rechnung zeigt Abbildung 2. Am Einstrom wurde eine über den Zylinderquerschnitt konstante Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/s vorgegeben. Dahinter stellt sich ein turbulentes Strömungsprofil ein.

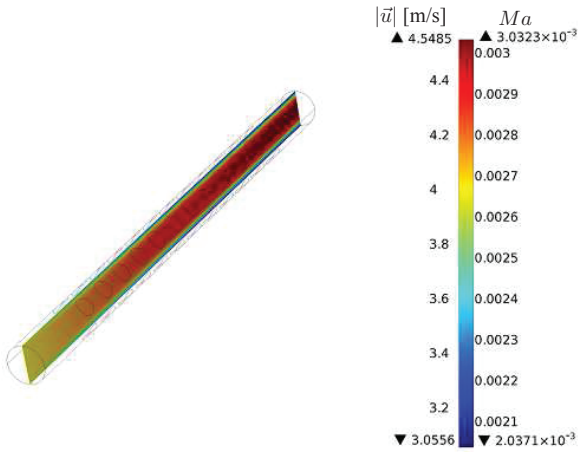

Abbildung 2: Strömungsgeschwindigkeit $|\vec{u}|$ im Reaktor bei einer mittleren Einströmgeschwindigkeit von 4 m/s (Machzahl $Ma = 2.67 \cdot 10^{-3}$)

Ab Machzahlen $Ma \approx 0.01$ ergeben sich merkliche Verschiebungen von Gebieten mit im Vergleich zu $u = 0$ hohen und niedrigen Pegeln. Die Pegel in einem Längsschnitt durch den Reaktor zeigen die Abbildungen 5 und 7.

Es wurden die vier in Abbildung 3 dargestellten „Anregungsmuster“ simuliert:

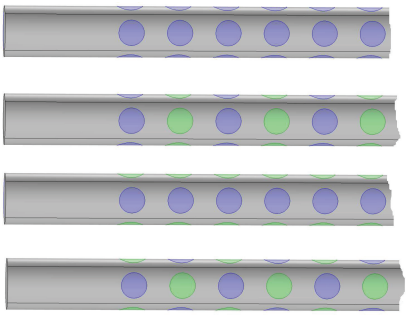

Abbildung 3: Untersuchte Anregungsmuster: alle in Phase, „Ringe“, „Linien“, „Schachbrettmuster“. In unterschiedlicher Farbe dargestellte Wandler schwingen zueinander um 180° phasenverschoben.

Hier dargestellt sind Ergebnisse für die Fälle „alle Wandler in Phase“ und „ringförmige Anregung“.

Bei konphaser Anregung aller Wandler ergeben sich die folgenden Schalldruckpegel:

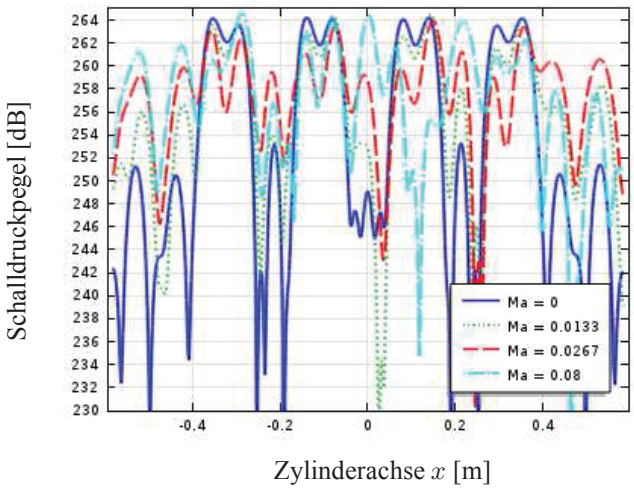

Abbildung 4: Schalldruckpegel entlang einer Längslinie ($y = z = 1$ cm) durch den Reaktor bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Alle Wandler werden konphas mit $f = 25$ kHz angeregt.

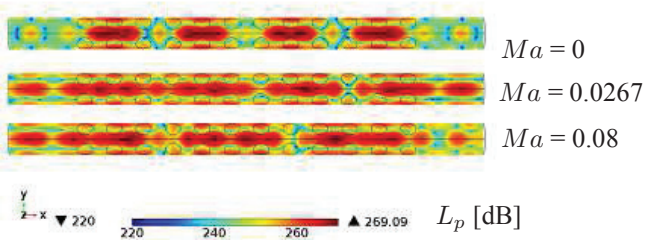

Abbildung 5: Schalldruckpegel in einer Schnittfläche ($z = 0$) durch den Reaktor bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Alle Wandler werden konphas mit $f = 25$ kHz angeregt.

Ein Effekt ist besonders an den Enden des Zylinders zu beobachten. Dort steigt der Schallpegel bei höheren Machzahlen, die Strömung scheint eine Vergrößerung des effektiv beschallten Gebietes zu bewirken. Im Inneren des Zylinders überlagern sich 48 Schallquellen, eine eindeutige Tendenz der Strömungswirkung lässt sich nicht angeben.

Bei ringförmiger Anregung ergeben sich diese Schalldruckpegel:

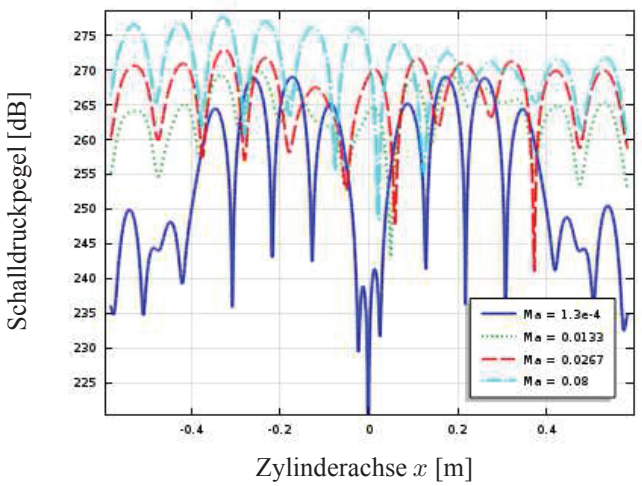

Abbildung 6: Schalldruckpegel entlang einer Längslinie ($y = z = 1$ cm) durch den Reaktor bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Die Wandler werden nach ringförmigen Muster mit $f = 25$ kHz angeregt.

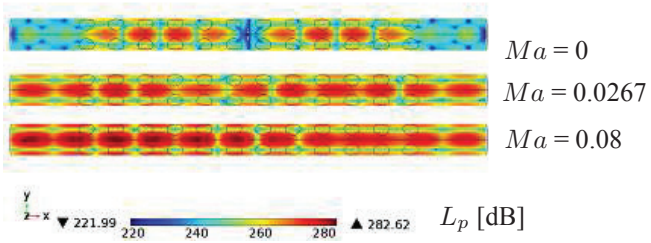

Abbildung 7: Schalldruckpegel in einer Schnittfläche ($z = 0$) durch den Reaktor bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Die Wandler werden nach ringförmigen Muster mit $f = 25$ kHz angeregt.

Die Ergebnisse entstanden im Projekt Forschungsassistenz VII, gefördert durch den Europäischen Sozialfonds ESF.

Literatur

[1] Piscoya, R., Ochmann, M., Möhricke, J., Jung, R.: Bestimmung von stationären Schallfeldern in Ultraschall-Durchflussreaktoren. 41. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2015), Nürnberg, Deutschland (März 2015)