Niederfrequente Ultraschallfelder mit Fluidströmung in Rohrreaktoren

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

DAGA 2015 NÜRNBERG

Problem

Ultraschallreaktoren dienen zum Suspendieren, Emulgieren, Desagglomerieren, Entgasen, Desinfizieren oder zur Reaktionsbeschleunigung. Die Energie des Schallfeldes tötet zum Beispiel Bakterien oder liefert die Energie für chemische Reaktionen. Ziel ist

- hoher Schalldruck
- eine hohe Intensität und
- eine homogene Verteilung der Schallenergie

im Reaktor. Mit der Finite-Elemente-Methode sollten die Schallfelder simuliert und geeignete Parameter gefunden werden.

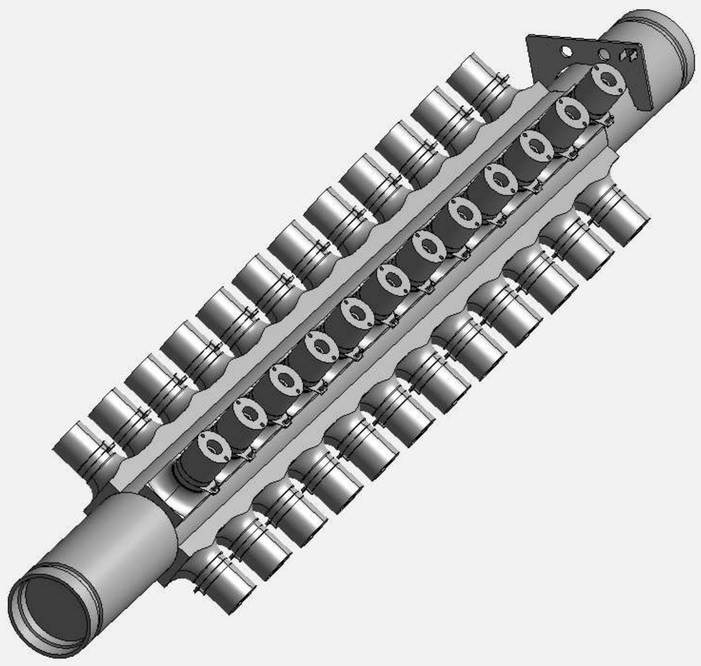


Abbildung 1: Ultraschallreaktor mit 48 Wandlern für 25 und 40 kHz.

Ansatz

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:

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

und

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

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

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

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

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

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 Gleichungen (1) und (2) wurden mit der Finite-Elemente-Methode gelöst. Die finiten Elemente sind Tetraeder mit quadratischen Ansatzfunktionen. Alle Lösungsschritte wurden mit der kommerziellen Software Comsol Multiphysics durchgeführt.

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

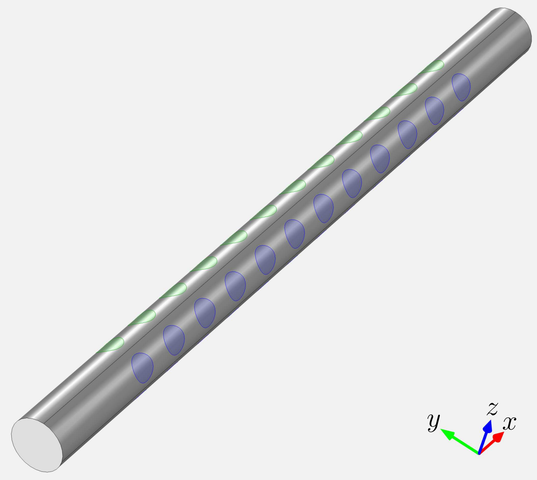


Abbildung 2: Comsol-Zylindermodell mit Wandlern.

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 $p_0 = 0$
- Wand: $u = 0$

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

$$I_T = 0.16 \cdot Re^{-1/8} \quad (5)$$
$$L_T = 0.07 \cdot r \quad (6)$$

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

Jeder Wandler känn auch um 180° phasenverschoben angesteuert werden.

Ergebnisse

Da Ergebnis der strömungsmechanischen Rechnung zeigt Abbildung 3.

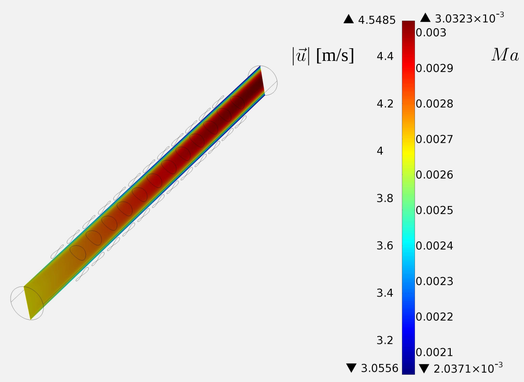
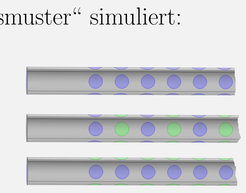


Abbildung 3: Strömungsgeschwindigkeit $|\vec{u}|$ im Reaktor bei einer mittleren Einströmgeschwindigkeit von 4 m/s (Machzahl $Ma = 2.67 \cdot 10^{-3}$)

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 unterschiedliche „Anregungsmuster“ simuliert:

- alle Wandler in Phase
- „Ringe“
- „Linien“
- „Schachbrettmuster“



Wandler mit unterschiedlicher Farbe schwingen zueinander um 180° phasenverschoben.

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

Konphase Anregung:

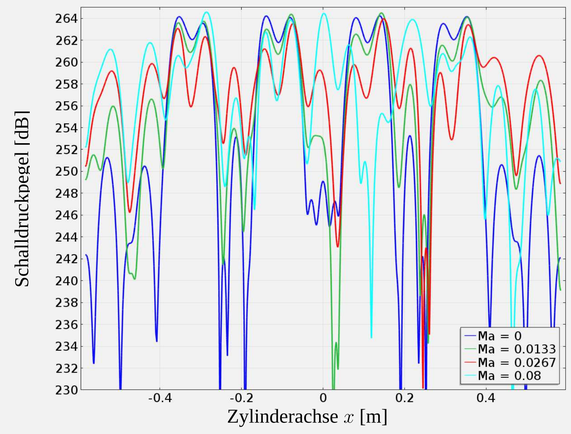


Abbildung 4: Schalldruckpegel entlang einer Längslinie ($y = z = 1$ cm) durch den Reaktor bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Alle Wandler werden konphas mit $f = 25$ kHz angeregt.

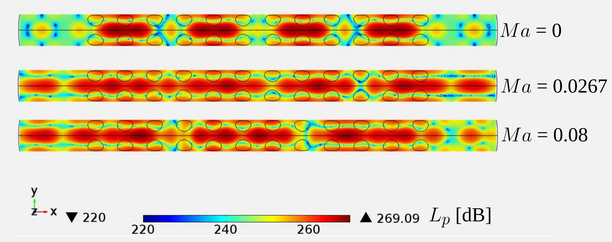


Abbildung 5: Schalldruckpegel in einer Schnittfläche ($z = 0$) durch den Reaktor bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Alle Wandler werden konphas mit $f = 25$ kHz angeregt.

Ringförmige Anregung:

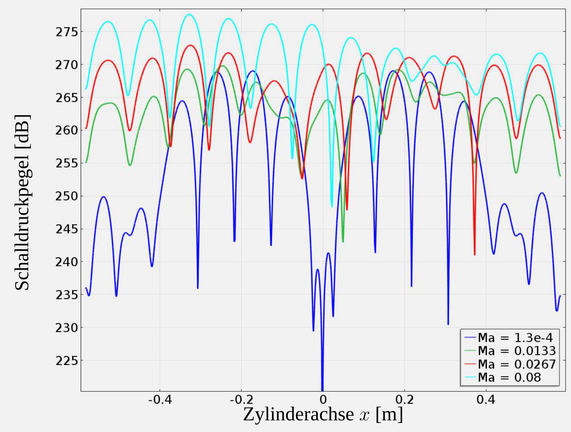


Abbildung 6: Schalldruckpegel entlang einer Längslinie ($y = z = 1$ cm) durch den Reaktor bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Die Wandler werden nach ringförmigen Muster mit $f = 25$ kHz angeregt.

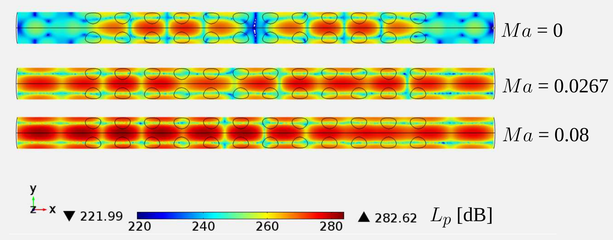


Abbildung 7: Schalldruckpegel in einer Schnittfläche ($z = 0$) durch den Reaktor bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Die Wandler werden nach ringförmigen Muster mit $f = 25$ kHz angeregt.

Literatur

[1] Piscoya, R. et al.: „Bestimmung von stationären Schallfeldern in Ultraschall-Durchflussreaktoren”, 41. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2015), März 2015, Nürnberg, Deutschland.

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

Senatsverwaltung für Wirtschaft, Technologie und Forschung
be Berlin
ESF ...eine Chance durch Europa!
EUROPÄISCHE UNION Europäischer Sozialfonds Investition in Ihre Zukunft