

Herstellen einer künstlichen Freifeldbedingung durch Gegenschall

Martin G. Lange¹, Delf Sachau²

¹ Helmut-Schmidt-Universität, 20535 Hamburg, Deutschland, Email: martinglange@bundeswehr.org

² Helmut-Schmidt-Universität, 20535 Hamburg, Deutschland, Email: sachau@hsu-hh.de

Einleitung

In schwach gedämpften geschlossenen Innenräumen, wie z.B. einer Flugzeugkabine, entstehen stehende Schallwellen, die eine Schallquellenortung schwierig machen. Daher wird im Rahmen der Entwicklung einer akustischen Innenraummesstechnik ein künstliches Freifeld erzeugt, welches in ein Schallrohr implementiert wird. Die im inneren des Rohres gemessene Schallintensität entspricht somit der von der Kabinenwand abgestrahlten Schallintensität die von der Messeinrichtung erfasst wird. Der Vorteil dieser Methode im Vergleich zu einer vollständigen Schallfeldvermessung liegt in der direkten Messung, ohne störende Reflexionen. Das Lösen des inversen Problems der Schallfeldberechnung ist dadurch unnötig. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein im Versuchsaufbau implementiertes Verfahren zur Realisierung des Freifeldes im Schallrohr für den monofrequenten Sonderfall vorgestellt. Misst man den komplexen Schalldruck an zwei Stellen x_1 und x_2 , so kann man durch geeignete Verrechnung auf die Amplituden der hin- und der rücklaufenden Welle schließen. Die zur Rechnung erforderlichen komplexen Drücke werden aus dem jeweiligen Zeitsignal durch eine monofrequente FFT ermittelt. Damit ist das eindimensionale Schallfeld vermessen. Die rücklaufende Schallwelle kann nun durch ein am Ende des Schallrohres befindlichen Lautsprecher destruktiv überlagert und damit ausgelöscht werden. Da sich bei einer veränderten Lautsprecheransteuerung auch die Impedanz am Rohrende ändert, muss sich die Ansteuerung integrierend anpassen. Im Versuch konnte die Amplitude der rücklaufenden Schallwelle auf unter 1% ihres Ausgangswertes reduziert werden. Weitergehende Untersuchungen werden sich mit mehrfrequenten und stochastischen Schallsignalen beschäftigen.

1 Grundgleichungen

Misst man den komplexen Schalldruck an zwei Stellen x_1 und x_2 in der Form

$$p_x = A_{hin} \exp^{i(\omega t - kx + \phi_{hin})} + A_{rück} \exp^{i(\omega t + kx + \phi_{rück})},$$

so gelangt man durch Umformung zum Ergebnis

$$A_{rück} \exp^{i\phi_{rück}} = \frac{(p_1 - p_2 \exp^{ik(x_2 - x_1)}) \exp^{-ikx_1}}{(\exp^{ik(x_2 - x_1)})^2 - 1}.$$

Nun gilt es also dieses Ergebnis in eine Regelung umzusetzen. Dazu ist es erforderlich die komplexen Drücke p_1 und p_2 zu ermitteln und in eine geeignete Regelstruktur umzusetzen.

Um den angesprochenen komplexen Druck ermitteln

zu können muss eine FFT durchgeführt werden. Da hier nur der monofrequente Fall betrachtet wird langt eine monofrequente FFT (MiniFFT). Während sich mittels der diskreten FFT eine periodische Funktion durch $f(t, x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t - kx) + b_n \sin(n\omega t - kx))$ darstellen lässt, kann hier im monofrequenten Fall die Reihe nach dem ersten Glied abgebrochen werden, sofern die Frequenz ω bekannt ist. Der Schalldruck ergibt sich dann durch $p(t, x) = (a_1 + ib_1) \exp^{i\omega t + ikx}$. Die Faktoren a bzw. b ergeben sich $a = \frac{2}{T} \int f(t) \cos(\omega t) dt$ und $b = \frac{2}{T} \int f(t) \sin(\omega t) dt$, bzw. im diskreten Fall $a = \frac{2}{n} \sum_{u=1}^n f(n\Delta t) \cos(\omega n\Delta t)$ und $b = \frac{2}{n} \sum_{u=1}^n f(n\Delta t) \sin(\omega n\Delta t)$. Um eine bessere Orientierung geben zu können ist das Regelungsprinzip in Abbildung 1 dargestellt.

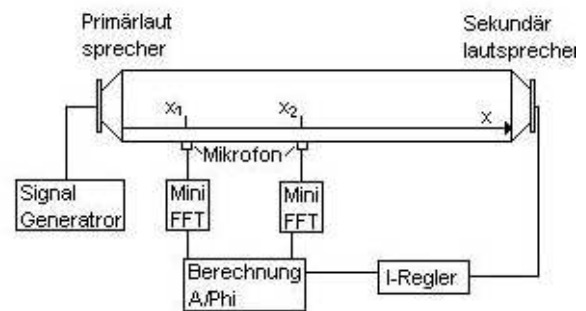


Abbildung 1: Schematischer Versuchsaufbau

2 Randbedingung am Lautsprecher

Um das System geeignet steuern zu können muss noch geklärt werden, welches Übertragungsverhalten ein Lautsprecher aufweist. Hierbei geht es vor allem um die Frage, ob ein Lautsprecher einen Druck oder eine Schnelle erzeugt. Folgender Versuch wurde durchgeführt: in ein Schallrohr wurde ein Lautsprecher installiert und mit zwei verschiedenen Frequenzen derart angeregt, dass im einen Fall die Länge des Rohres $\frac{3}{2}\lambda$ im anderen Fall $\frac{7}{4}\lambda$ betrug. Zudem wurde in beiden Fällen das andere Ende des Rohres entweder offen gelassen ($p_{x=l} = 0$) oder geschlossen ($q_{x=l} = 0$). Die Fälle wurden also so angelegt, dass der Lautsprecher entweder genau im Druckknoten oder im Druckbauch lag. Die Auswirkungen des beschriebenen Versuchsaufbaus auf das Schallfeld lassen sich einfach erklären. Setzt man voraus, dass es sich bei einem Lautsprecher um eine Druckrandbedingung handelt, gibt man

im Fall $l = \frac{3}{4}\lambda$ und $p_{x=l} = 0$ den Druck im Schallknoten durch den Lautsprecher vor, im Schallbauch entsteht eine entsprechende Überhöhung des Schalldrucks. Zur Verdeutlichung zeigen die Abbildungen 2 und 3 jeweils in rot den Fall des offenen Rohres und in schwarz den Fall der schallharten Randbedingung.

Handelt es sich jedoch bei einem Lautsprecher um eine

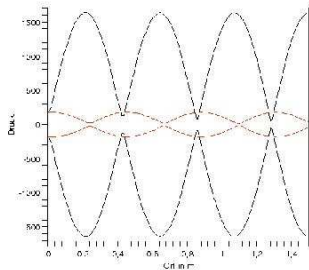


Abbildung 2: Annahme einer DruckRB

Schnellerandbedingung, wird die Schallschnelle im Schallbauch (da unter der Voraussetzung, dass $A_{hin} = A_{rück}$ Druck und Schnelle um $\frac{\pi}{2}$ Phasenverschoben sind) vorgegeben, die Überhöhung bleibt also aus. Man stellt fest,

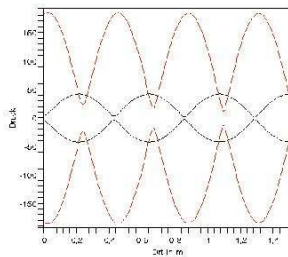


Abbildung 3: Annahme einer SchnelleRB

das die gewählten Fälle den Extremfällen entsprechen. Daher langt es den Schalldruck und die Schallschnelle direkt vor dem Lautsprecher zu messen und die einzelnen Werte miteinander zu vergleichen. Wegen der linearen Zusammenhänge wurde bei der Messung darauf verzichtet die Messwerte in Pa bzw. $\frac{mm}{s}$ umzurechnen, daher sind in Tabelle 2 die Druckwerte in mV und die Schnellewerte in $\frac{mm}{s^2}$ (Beschleunigungsaufnehmer auf der Lautsprechermembran) angegeben. Aus dem Vergleich des je-

$\frac{l}{\lambda}$	RB	p[mV]	B [$\frac{mm}{s^2}$]
$\frac{3}{2}$	$p_{x=l} = 0$	23	126
	$q_{x=l} = 0$	174	100
$\frac{1}{4}$	$p_{x=l} = 0$	34,9	98
	$q_{x=l} = 0$	108	123

Tabelle 1: Druck- und Beschleunigungswerte

weils niedrigsten mit dem höchsten Wert ergibt, dass der Druck um bis zu 640% ansteigt, während die Schnelle um

max. 28% zunimmt. Die Annahme es handele sich bei einem Lautsprecher um eine Schnellequelle ist also näherungsweise richtig und für diese Zwecke erstmal ausreichend.

3 Experiment

Mit Hilfe der Software Simulink wurde ein Regler entworfen in dem die reale Regelstrecke über dSpace eingebunden werden konnte. Aus den beiden diskreten Mikrofonsignalen wurden je mittels einer MiniFFT die komplexen Druckwerte, die Amplitude und Phase der Zeitsignale und daraus wiederum die rücklaufende Welle berechnet. Aus diesen Werten wiederum wurde ein komplexer Zeiger zur Lautsprecheransteuerung berechnet (Regelabweichung), der zu der bereits existierenden Ansteuerung addiert wurde. Damit war ein diskreter I-Regler realisiert. Ein Versuch mit einer Tonfrequenz von 100Hz und einer Abtastfrequenz von 20kHz ergab eine Auslöschung der rücklaufenden Welle von über 99% nach ca. 1.5s (s. Abb. 4).

Wesentliches Manko hierbei waren die nicht bekannten

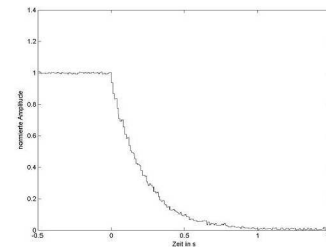


Abbildung 4: Amplitude der rücklaufenden Welle

Verstärkungen des Lautsprechers und der Mikrofone, was zu einer in der Amplitude ungenauen Ansteuerung des Lautsprechers führte die jedoch über die Zeit durch den I-Regler ausgeglichen wurde.

4 Ausblick

Die derzeitigen Bemühungen sind dahingehend die Freifeldbedingung durch Adaptive Filter zu ermöglichen. Der Vorteil hierbei ist die Möglichkeit auch nicht periodische Signale durch geeignete Messung zu behandeln. Da im Endprodukt ein Einfluss von Aussen vermieden werden soll ist es erforderlich die Übertragung von Schalleistung aus dem Umfeld in das Schallrohr hinein zu verhindern. Hierzu ist es Notwendig den Schalldruck am offenen Ende des Schallrohres a priori zu kennen. Der sehr erfolgreiche Einsatz der hier entwickelten MiniFFT wird hierbei von erheblichem Vorteil sein.