

Thermoacoustic Oscillations

Donald Fahey
Wave Motion & Optics
Spring 2006
Prof. Peter Timbie
Oversættelse fra:

http://uw.physics.wisc.edu/~timbie/P325/Fahey_thermoacoustic_oscillations.pdf
af P. A. Andersen

Abstract

I en tid med øgede miljøhensyn og øget betydning på effektivitet giver termakustiske stående bølger og svingninger en mulig løsning på mange nutidige problemer. Elementær stående bølgeteori diskuteres, samt sammenhængen mellem termodynamik og akustiske svingninger. Derudover gennemgås fordelene ved Sondhauss oscillationer og enheder til deres produktion er detaljeret for stående bølger. Endvidere indsigt i anvendelser af termoakustisk resonansrør, såsom motorer og køleskabe, samt andre spændende aspekter af emnet er dækket.

Thermoacoustic Oscillations

Lyd er et af de mest naturlige og velkendte fænomener, som vi oplever på en dag til daglig basis. I løbet af det seneste århundrede har folk lært at udnytte lyd som et middel til gavn for samfundet. Ultralydskirurgi, støjreducerende systemer og SONAR er alle fremragende eksempler på en sådan opfindsomhed. I den stadig mere miljøvenlige bevidste verden vi lever i, er ideen om at erstatte andre behov med mindre skadelig akustiske modpart attraktive. Køling, elektricitet og mekanisk energi er alt sammen eksempler på applikationer, som lyd er velegnet til, og de introducerer begrebet om en sammenhæng mellem akustik og termodynamik. Her diskuteres de grundlæggende begreber bag termoakustiske processer, hvordan de har udviklet sig, og i hvilken retning deres forskning leder os.

Studiet af termoakustik har en rig og interessant historie. Lord Rayleigh var den første til at give en grundig kvalitativ beskrivelse af termoakustiske effekter. I hans værk "The Theory of Sound", udgivet i 1887, diskuterede han evnen til at generere temperaturforskelle ved hjælp af akustiske svingninger. Emnet forblev stort set uberørt i over firs år, indtil 1969, hvor Rott begyndte en række udgivelser, der signalerede en genoplivning i termoakustisk forskning.

Af de første emner, der blev behandlet, var det måske vigtigste **Taconis svingning**. Dette fænomen blev opdaget, da den åbne ende af et gasfyldt rør var nedsænket i flydende nitrogen og afkølet til en kryogen temperatur. Mærkeligt nok, når røret blev fjernet fra kølevæsken, begyndte det at vibrere og "synges" højt. I hans skelsættende

analyse af denne effekt banede Rott vejen til den kvantitative undersøgelse af termoakustik.

Til at begynde med bør vi kort gennemgå begrebet stående bølger i kolonner af luft. Da vi har at gøre med langsgående trykbølger i en gas, for at opnå en ligning for vores bølger skal vi løse

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\rho}{\kappa} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad \text{hvor} \quad \kappa = -V \frac{d\rho}{dV},$$

som giver

$$\psi = A \cos(\omega t \pm kx) + B \sin(\omega t \pm kx).$$

For at producere stående bølger, skal to bølger (ψ_1 og ψ_2) rejse i modsat retninger med lige store amplituder, hvis sum er

$$\psi = [2 A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)] \cos(kx).$$

Dette resulterer i noder med nul ψ forskydning fordelt på hver halve bølgelængde, og antinoder med maksimal forskydning placeret halvvejs mellem noderne. Antallet af noder i røret afhænger af den stående bølges harmoniske og grænsebetingelser. I et rør med en lukket ende dikterer randbetingelserne et maksimum forskydning i den åbne ende, og nul forskydning i den lukkede ende. Forskellen fra et rør med to åbne ender, følger det, at kun ulige overtoner kan dannes, med først ($n=1$) defineret som den grundlæggende harmoniske. I dette tilfælde har vi

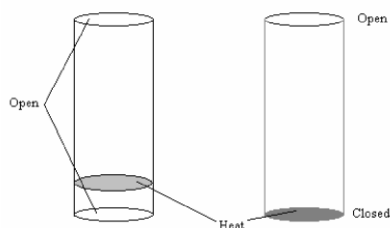
$$kL = n \frac{\pi}{2} \quad \text{where } k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ and } v = \frac{\omega \lambda}{2\pi}, \quad \text{so } \omega = \frac{vn\pi}{2L},$$

hvor L er længden af røret, og n er det harmoniske tal. Her ser vi, at frekvensen er afhængig af det harmoniske tal, hastigheden (i mediet) og røret længde. Som man kunne forvente, mindskes bølgelængden ved at reducere længden af røret ved den grundlæggende harmoniske og svarer dermed til en højere frekvens (for konstant lydets hastighed i en gas). Desuden,

$$\lambda_n = \frac{4L}{n} \quad \text{for } n = 1, 3, 5, \dots$$

Dette bliver især nyttigt, når man overvejer anvendelser af vibrerende luftsøjler inden for termoakustik.

Termoakustik refererer til produktionen af akustiske bølger ved hjælp af overførsel af varme (eller det omvendte, det vil sige sonisk inducerede varmegradienter). Dette gøres normalt ved hjælp af et resonansrør, enten med to åbne ender, eller en ende åben og en ende lukket. I tilfælde af to åbne ender omtales trykbølger som Rijke-oscillationer, og er blevet studeret grundigt i to århundreder. Af mere interesse for os



Figur 1. Rijke-røret til venstre har to åbne ender og et varmeelement nær bunden. Sondhuass Tuben har en lukket ende, som er opvarmet for at producere ulige antal harmonisk stående bølger.

er svingninger i et rør med en lukket ende, kendt som **Sondhauss svingninger**. Selvom de ikke er diskuteret kvantitativt før sidste halvdel af det 20. århundrede, har disse tendens til at være mere effektive og industrielt anvendelige bølger.

Som nævnt før forekommer Sondhauss-oscillationer udelukkende i rør, der har en eller begge ender lukket. Varme påføres den lukkede ende af røret. Som temperaturen stiger, omdannes varme til kinetisk energi i gasmolekylerne i den lukkede ende af rør. Gasmolekylerne accelererer mod den køligere ende af røret og skaber derved et område med relativt lavt tryk i den opvarmede ende. Som disse molekyler afkøles, accelererer den anden endes gas molekyler mod den varme ende for at udfylde området med lavt tryk. Disse molekyler opvarmes derefter, og processen begynder igen. Dette afslutter en cyklus af en termisk oscillation, og er analog med Stirling-cyklussen.

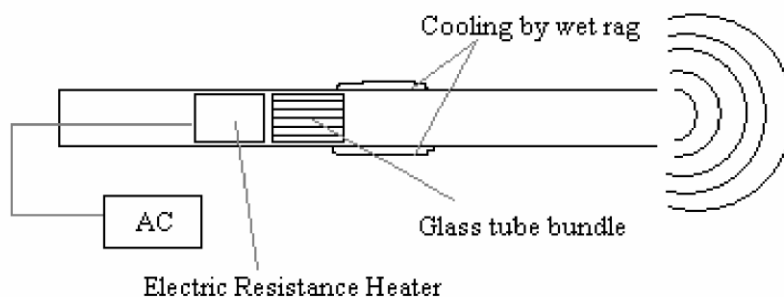
Accelerationen og decelerationen af gasmolekylerne i forhold til tidskort til en sinusoid. I det væsentlige er resultatet en selvopretholdt serie af langsgående sinusformede lufttrykssvingninger. Inden i røret er trykbølgefronterne nogenlunde plan, hvorimod minimal toroidal adfærd forekommer i nærheden af munden af røret. Den dominerende bølgeform uden for rørets mund er sfærisk. Det kommer ikke som nogen overraskelse, at disse træk er ækvivalente med lydbølger og i de fleste tilfælde er hørbare lyd et direkte biprodukt af hele processen.

Udtrykket *termoakustisk svingning* refererer til den termiske oprindelse af lyd produceret af trykssvingninger. Eksperimentelt er det utroligt enkelt at bygge et apparat, der er i stand til at producere sådanne svingninger. Det er klart, at en rør- eller rørlignende hulrumsform er nødvendig. Et glat, lige cylindrisk indre undgår uønskede hvirveldannelser eller ikke-lineære trykvariationer, der ville komplicere analysen meget. Derudover kræves en minimumshastighed for varmepåføring til den lukkede ende af røret. I den termoakustiske genoplivning i 1970'erne var dette omkring 30 watt pr. kubiktomme.

Måske mindre indlysende er betydningen af placeringen af varmeanordningen. Varmeoverførselshastigheden er direkte proportional med den akustiske hastighed. Ved at anvende superpositionsprincippet er det til vores fordel at placere den maksimale varmegradiant ved punktet med maksimal gasmolekylehastighed. I standard luftsøjlesvingninger, såsom i en flute eller koksflaske, skifter man mellem harmoniske ved at variere den hastighed, hvormed lufttrykket indføres i systemet. Det vil sige, at hvis man blæser hårdere, opstår der højere ordens harmoniske. På

samme måde, ved minimale varmepåføringshastigheder, exciteres den grundlæggende harmoniske. For de rør, der almindeligvis anvendes i laboratorieforsøg, er disse frekvenser i den nedre ende af det hørbare område. For at justere for dette, anvendes en større temperaturforskel, som ofte resulterer i den anden harmoniske ($n = 3$). Den maksimale gasmolekylehastighed i sådanne systemer er cirka en tredjedel af rørets længde fra den lukkede ende, derfor er det her, varmeelementet skal placeres for det mest effektive arrangement.

En af de første store ændringer til Sondhauss grundlæggende rørdesign var introduktion af et bundt små pyrexrør til systemet. Disse rør er placeret lige ved siden af varmelegemet på den side, der er tættest på den åbne ende, og server tre specifikke formål. For det første giver de et lille bidrag til systemet ved at fungere som en regenerator. Under disse omstændigheder virker 'regeneratoren' ved, at hvert lille rør får funktion af 'flaskehals' for trafikken af gasmolekyler, der forsøger at passere igennem. Under tryk, bliver gassen tvunget igennem og får hastighed i processen for at rumme det mindre tværsnit. Dernæst fungerer bundtet som en isolator mellem den varme og kolde områder af røret. Dette skaber en stejlere temperaturgradient og forbedres derved systemets effektivitet. Til sidst fungerer bundtet som en akustisk impedans, der skaber et faseskift. Det opfylder den førnævnte betingelse, at gasbevægelse, tryk og temperaturbølger er alle tidsmæssigt i fase. Andre mindre markante ændringer har været lavet til moderne Sondhauss-rør, selvom deres indvirkning på den grundlæggende proces er minimal, og er normalt designet til at passe til behovene i et specifikt eksperiment.



Figur 2. Et modificeret Sondhauss resonansrør. Bemærk placeringen af glastrørsbundtet og varmeelementet.

Igennem 1980'erne og 90'erne fremmede mange forskere vores forståelse af Sondhauss resonanseffekter ved at forbedre termoakustisk effektivitet gennem introduktion af regenerators, par og modificerede rørstrukturer. Af særlig interesse i at præsentere forskning var Hoflers opfindelse af et termoakustisk køleskab med stående bølger. Her er den tidsfasede superposition af gasbevægelse, temperatur og varmeoverførsel svingninger i lydbølgerne arbejder effektiv med at absorbere varme fra belastninger ved lav temperaturer og overføre det til en vask ved højere temperaturer. Denne afkøling proces er et stærkt undersøgt forskningsområde i dag og rummer mange potentielle anvendelsesmuligheder kraft-, apparat- og rumindustrien.

Ligesom Hoflers elegante køleskab er udnyttelsen af Sondhauss svingninger som et middel til at drive en motor. Der er to grundlæggende typer for akustiske motorer: stående bølge og rejsebølge. Dem, der bruger stående bølger (i modsætning til den fremstillede analogi ovenfor) er naturlige motorer og kræver modifikationer af væggene i rørets indre. I 1979 beviste Ceperley, at den ønskede Stirling-motor er af rejsebølgeklassen, og udløser udviklingen af teori inden for rejsetermoakustik. Selvom sådan motorer konkurrerer med effektiviteten med dem, der findes i standardbiler, de er alt for omfangsrige, og mangler for det meste evnen til at blive inkorporeret i andre teknologier. Stadig, primitive versioner af termoakustiske Stirling-motorer er allerede blevet implementeret i køleskabe til nogle moderne rumfartøjer.

Uden tvivl Hoflers idé om et køleskab uden bevægelige dele, sammen med Swift og andres udvikling af ikke-forbrændingsmotorer er grunde til begejstring i termakustikkens område. I dag er vi på fremmarch med forskning og resultater, og hvert år bringer nye resultater os tættere på at erstatte eksisterende teknologier med grønnere og mere effektive løsninger. Snart kan vi alle afkøle vores huse med termoakustisk køleskabe, og at drive vores biler på gamle Don Henley-bånd. ;)

Bibliografi

Backhaus, S., G.W. Swift. Nye varianter af termoakustiske motorer, 9. International Kongres om lyd og vibration, juli 2002

Feldman, K.T., R.L. Carter. En undersøgelse af varmedrevne trykssvingninger i en gas, Journal of Heat Transfer, v 92, n 3, august 1970, s. 536-41.

Galiullin. R.G., I.P. Revva, G.G. Khalimov. Termoakustisk effekt i en resonans semiopen tube, Journal of Engineering Physics, v 43, n 4, okt. 1982, s. 1126-32.

Hecht, E. Optics. 3rd Edition, Addison-Wesley, 1998.

Swift, G. W. Thermoacoustic Engines, Journal of the Acoustical Society of America, v 84, n 4, okt. 1988, s. 1148-80.

Swift, G.W. Hvad er termoakustik? Los Alamos National Laboratory Website, <http://www.lanl.gov/thermoacoustics/ehistory.pdf>

Wheatley, J., T. Hofler, G.W. Swift, A. Migliori. Forstå nogle simple fænomener i termoakustik med anvendelse på akustiske varmemotorer, American Journal of Physics, v 53, nr. 2, februar 1985, s. 147-62.