

Schlüsselwörter: Thermoakustik · Thermodynamik · Temperaturgradient · Wärmereservoir · akustische Wellen · thermoakustische Maschinen

Dieser Artikel ist der erste einer Reihe, die sich mit den Phänomenen der Thermoakustik befasst. Der vorliegende Beitrag geht zunächst auf das Phänomen und die geschichtlichen Hintergründe ein, in einem zweiten Beitrag werden tatsächliche praktische Anwendungen vorgestellt.

The Thermo-acoustic Phenomena

Keywords: thermo-acoustic · thermodynamic · temperature gradient · heat reservoir · acoustic waves · thermo-acoustic machines

This article is the first in a series concerning the thermo-acoustic phenomena. It will deal with the phenomena itself and the history behind it. The actual practical applications will be introduced in a second part.

Das Phänomen Thermoakustik

Geschichte und Hintergrund

Zwei physikalische Disziplinen, Thermodynamik und Akustik, deren tiefes Verständnis bereits im 19. Jahrhundert durch die klassische Physik erlangt wurde, erzielen in ihrer Wechselwirkung Phänomene, die zwar seit langer Zeit bekannt sind, aber erst seit wenigen Jahrzehnten quantitativ verstanden werden. Die Thermoakustik, ein Kunstwort, erweitert die klassische Akustik um die Beschreibung thermischer Vorgänge in akustischen Wellen. Dabei können akustische Wellen inhomogene Temperaturverteilungen an begrenzenden Kontaktflächen erzeugen, aber auch akustische Wellen durch inhomogene Temperaturverteilungen an diesen Kontaktflächen angeregt werden. Diese beiden Mechanismen erlauben es, thermoakustische Wärmekraftmaschinen und thermoakustische Kältemaschinen zu konstruieren. Ein großer Teil der Forschung der letzten 25 Jahre in der Thermoakustik ist der ständigen Verbesserung dieser Maschinen gewidmet, wobei bemerkenswerte Erfolge erzielt wurden und sich nunmehr erste kommerzielle Anwendungen der Thermoakustik am Markt zeigen.

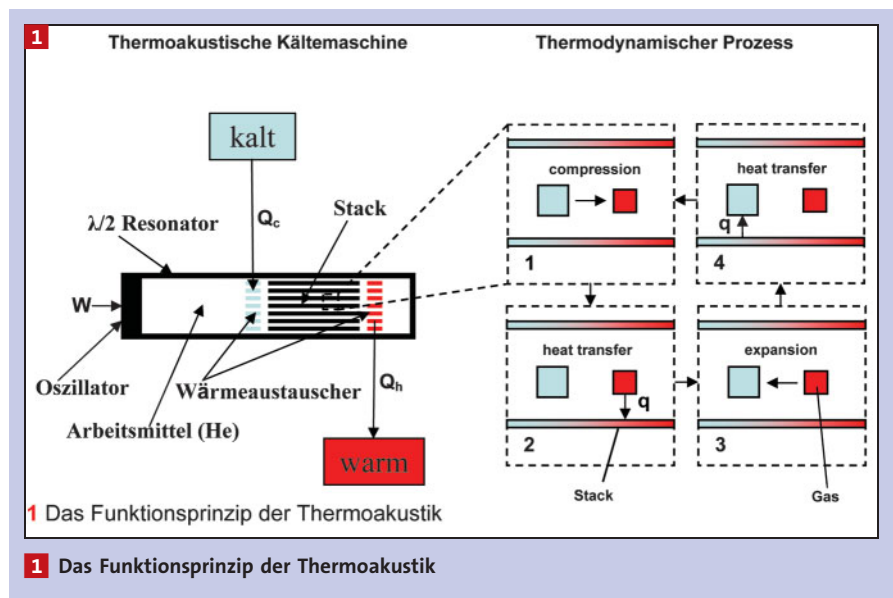
Thermoakustische Phänomene bedürfen keiner aufwändigen Apparaturen zu ihrer Erzeugung und Beobachtung. Sie sind Bestandteil akustischer Vorgänge und damit allgegenwärtig, jedoch in vielen Fällen zu klein, um unsere Aufmerksamkeit zu wecken. Dieses ändert sich, wenn besondere Umstände den thermoakustischen Effekt

so verstärken, dass eine deutlich wahrnehmbare Wirkung erzielt wird.

Letztlich ist der thermoakustische Effekt nichts anderes, als eine bislang nur selten wahrgenommene Form der Energieumwandlung von akustischer in thermische Energie. Von den frühen Glasbläsern ist bekannt, dass das Glas zunächst erwärmt und dann verformt wurde. Dabei entsteht ein hörbarer Summton. Nichts anderes als die Umwandlung von thermischer in akustische Energie. Quasi umgekehrt ist der thermoakustische Effekt zu beschreiben: die Umwandlung von akustischer in thermische Energie, die wir entweder als Wärme oder Kälte wahrnehmen.

Sehr einfache Apparaturen wurden zunächst von B. Higgins (1777), C. Sondhauss (1850) und P. L. Rijke (1859) vorgestellt. Der von Higgins als „singende Flammen“ bezeichnete Aufbau lässt eine Wasserstoffflamme in einem Glasrohr brennen. Die schlechte Wärmeleitung des Glases bewirkt durch die Flamme eine inhomogene Temperaturverteilung in der Glaswand, die zur Anregung deutlich hörbarer Schallwellen führt. Dieser Versuch wurde von Rijke modifiziert, indem er statt der Flamme ein beheiztes Drahtgitter in der Mitte des nach ihm benannten Rijke-Rohres platzierte und so Schallwellen merklicher Amplitude anregen konnte.

Nur wenige Forscher setzten sich im 19. Jahrhundert mit dem thermoakustischen Effekt auseinander, um neben einer experi-



Autor

Dr. Martin Altenbokum
Axima Refrigeration GmbH, Lindau

mentellen Reproduktion des Phänomens auch eine physikalische Erklärung aus den Grundlagen der Thermodynamik und Fluidodynamik dafür zu geben. Eine zumindest qualitativ zutreffende Erklärung wurde von Lord J.W.S. Rayleigh erstmals 1878 veröffentlicht und in seinem Buch „The Theory of Sound“ 1896 vertieft. Somit galt die Thermoakustik Anfang des 20. Jahrhunderts als prinzipiell verstanden, obwohl keinerlei Modelle zur Berechnung der Effekte zur Verfügung standen.

Diese unbefriedigende Situation änderte sich erst mit einer Reihe von Veröffentlichungen des Schweizer Mathematikers N. Rott an der ETH Zürich in den Jahren 1969 bis 1978. Rott bediente sich der elementaren physikalischen Grundgesetze der Erhaltung von Masse, Impuls und Energie, ausgedrückt durch die Kontinuitätsgleichung und die Navier-Stokes-Gleichung der Fluidodynamik sowie der Wärmeleitungsgleichung der Thermodynamik. Während die Akustik aus der Fluidodynamik durch eine Reihe von Vereinfachungen hervorgeht, bei der thermoakustische Effekte entfallen, konnte Rott durch eine subtilere Näherung auch thermische Effekte in der Wellengleichung der Akustik beibehalten. Die nach ihm benannte Rott'sche Wellengleichung der Thermoakustik beschrieb erstmals die Ausbreitung von akustischen Wellen bei inhomogenen Temperaturverteilungen. Die Theorie wurde in den Jahren 1972 bis 1974 experimentell an der ETH Zürich verifiziert.

Mit den erfolgreichen Arbeiten von Rott zur Thermoakustik wurde das Forschungsgebiet wiederbelebt, ja erst zu einem solchen gemacht. Seit 1980 findet die Thermoakustik weltweit hohes Interesse bei einer Vielzahl renommierter Forschungsinstitute und Universitäten. Unser Wissen über thermoakustische Effekte ist seitdem nahezu explodiert und viele Forscher der Thermoakustik erwarten für das 21. Jahrhundert einen Durchbruch, der thermoakustische Maschinen auf die Stufe klassischer ingenieurwissenschaftlicher Lösungen heben wird. Besonders zu erwähnen sind dabei die Arbeiten von G. Swift vom Los Alamos National Laboratory, der durch seine grundlegenden Arbeiten ersten praktischen Anwendungen den Weg ebnete. Dem interessierten Leser wird sein faszinierendes Buch „Thermoacoustics“ ans Herz gelegt. Hierin gelingt die Symbiose von Thermodynamik und Akustik zu einem neuen Teilgebiet der Physik.

Doch was sind eigentlich thermoakustische Maschinen? Sie nutzen den thermoakustischen Effekt, also die Umwandlung von Schallenergie in Wärme oder Kälte, um Wärmekraftmaschinen und Kältemaschinen technisch zu realisieren. Bei Wärmekraftmaschinen wird ein Temperaturgradient in einem Medium, der mit zwei Reservoirs unterschiedlicher Temperatur in Verbindung steht, zur Anregung energiereicher akustischer Wellen verwendet. Diese akustische Energie kann effizient in elektrische Energie umgewandelt werden. Bei thermoakustischen Kältemaschinen werden zunächst energiereiche Schallwellen erzeugt. Dieses kann mittels elektroakustischer Antriebe sehr hoher Effizienz erfolgen. In Verbindung mit einem zweiten Medium erzeugen diese Schallwellen im zweiten Medium einen Temperaturgradienten. Bringt man

das zweite Medium in Kontakt mit zwei Wärmereservoirs, so können die Schallwellen dem kälteren Reservoir weitere Wärme entziehen und dem Reservoir höherer Temperatur hinzufügen.

Technisch gesehen sind thermoakustische Maschinen geeignet, konventionelle Kreisprozesse mit Verdichtern zu ersetzen. Thermoakustische Kältemaschinen, z.B. in Form so genannter Cryocooler, erzeugen aus Schallenergie Kälteenergie. Dabei handelt es sich beispielsweise um Pulsrohre, die über ein geeignetes Arrangement von Resonator, Arbeitsmedium, Stack und Wärmeaustauschern in der Lage sind, tiefe Kälte effizient und wirtschaftlich zu erzeugen. Einstufige Cryocooler sind heute in der Lage, Temperaturen von 70 K in wenigen Minuten zu erreichen, mehrstufige Cryocooler schaffen es bis hinunter zu weniger als einem Kelvin. Dies alles bei entsprechenden Kälteleistungen und einem Wirkungsgrad nach Carnot von bis zu 20 %. Diese Effizienz verspricht auch wirtschaftlich nutzbare Cryocooler. Besonders hervorzuheben ist der Umstand, dass thermoakustische Maschinen, mit Ausnahme der elektroakustischen Antriebe, etwa in Form von Linearmotoren, gänzlich ohne bewegliche Teile auskommen und somit vollkommen verschleißfrei arbeiten.

Sehr erfolgreich hat sich auch die Kombination Wärmekraftmaschinen und Kältemaschinen erweisen. Dabei werden mit einer thermoakustischen Wärmekraftmaschine zunächst energiereiche Schallwellen erzeugt. Diese Schallwellen nutzt eine thermoakustische Kältemaschine, um ein Reservoir auf tiefe Temperaturen zu kühlen. Das Besondere an dieser Kombination ist das Fehlen jeglicher bewegter Teile; diese sind bei konventionellen Maschinen unvermeidbar. Daher wird thermoakustischen Maschinen generell eine hohe Zuverlässigkeit zugesprochen, welche sie besonders interessant für bestimmte Anwendungen mit höchsten Anforderungen an die Zuverlässigkeit macht. Nicht zufällig finden sich viele realisierte thermoakustische Maschinen in der Luft- und Raumfahrt sowie militärischen Einrichtungen wieder.

Das Prinzip der Kombination zweier thermoakustischer Maschinen wurde erstmals erfolgreich zur Verflüssigung von Erdgas verwendet. Dabei wird ein Teil des Erdgases verbrannt, um den Temperaturgradienten zur Erzeugung der Schallwellen zu liefern. In der zweiten Stufe vermag die thermoakustische Kältemaschine mit diesen Schallwellen tiefe Temperaturen zu erzeugen, die zur Verflüssigung des nicht verbrannten Erdgases ausreichen. Wurde das Erdgas in der Vergangenheit einfach abge-

fackelt, so bietet sich nur mit dieser Lösung eine Möglichkeit, das Erdgas zu verflüssigen. Perspektivisch sollen Schiffe mit vielen thermoakustischen Gasverflüssigern ausgestattet werden, um das Offshore-Erdgas zu sammeln und nutzbringend einzusetzen. Wurden beim ersten Gasverflüssiger noch 60 % des Gases verbrannt, um 40 % zu verflüssigen, so werden die Maschinen der nächsten Generation 85 % und mehr verflüssigen können.

Das Funktionsprinzip

Die ersten thermoakustischen Kältemaschinen (Abb. 1) basierten auf stehenden akustischen Wellen, die sich in einem Resonator halber Wellenlänge ausbilden. Während sich am rechten Ende des Resonators ein Knoten befindet, wird das linke Ende von einem Oszillator gebildet, der das Arbeitsmedium zu monochromatischen Schwingungen hoher Intensität anregt. Als Oszillator kann ein einfacher, im Frequenzspektrum breitbandiger Lautsprecher eingesetzt werden, optimal ist jedoch ein auf einen engen Frequenzbereich optimierter elektroakustischer Antrieb mit hohem Wirkungsgrad. Als Arbeitsmedium hat sich Helium bewährt, da die Einatomigkeit dieses Gases den thermoakustischen Effekt begünstigt. Das für den thermoakustischen Effekt erforderliche zweite Medium wird von einem Stapel Platten, dem so genannten Stack, gebildet. Diese Platten werden in einem Abstand von wenigen 1/10 mm geschichtet. Sie sollten aus einem Material mit hoher Wärmekapazität und geringer Wärmeleitung bestehen. Hierbei haben sich Kunststoffe bewährt. Da es sich beim thermoakustischen Effekt um ein Grenzschichtphänomen handelt, ist die Gesamtoberfläche aller Platten des Stapels maßgeblich für die erreichbare Kälteleistung. Die Zu- und Ableitung von Wärme aus Reservoirs geschieht über Wärmetauscher links und rechts vom Plattenstapel. Durch die longitudinale Schwingung der akustischen Welle wird Gas zwischen Stack und Wärmetauschern bewegt. So kann durch das Gas Wärme vom Stack in den warmen Wärmetauscher und vom kalten Wärmetauscher in den Stack transportiert werden.

Der dem thermoakustischen Effekt zu Grunde liegende thermodynamische Kreisprozess im Arbeitsmedium findet in den Räumen zwischen den Platten des Stapels statt. Das Gas wird durch die akustische Welle zu longitudinalen Schwingungen angeregt und bewegt sich dabei längs der Platten. Neben dieser Bewegung unterliegt das Gas auch einer periodischen Druckveränderung, die mit einer dazu synchronen Temperaturveränderung verbunden ist. Die Kom-

bination aus Bewegung und Temperaturveränderung erzielt den thermoakustischen Effekt. Eine quantitativ korrekte Beschreibung ist mittels der Rott'schen Wellengleichung möglich, das Prinzip kann jedoch bereits aus der Betrachtung eines einzelnen „Gaspakets“ zu vier Zeitpunkten im Kreisprozess verstanden werden.

Zum Zeitpunkt 1 wird das Gas längs der Platte bewegt und zugleich isentrop komprimiert. Da in einer stehenden Welle Schallschnelle und Druck um 90° phasenverschoben sind, wird der Druck und damit die Temperatur des Gaspakets extremal, wenn dessen Bewegung zum Stillstand gekommen ist. Während der Bewegung findet in der Vereinfachung dieses Modells kein Wärmeaustausch zwischen Gas und Platte statt.

Zum Zeitpunkt 2 befindet sich das unbewegte Gaspaket im thermischen Kontakt mit der Platte. Bei einer thermoakustischen Kältemaschine ist die Temperatur des Gaspakets größer als die Temperatur der Platte am Ort des Gaspakets. Dadurch findet eine irreversible Wärmeübertragung vom Gas in das zweite Medium statt, bis das Gaspaket die Temperatur der Platte angenommen hat. Diese Irreversibilität ist ein Kennzeichen aller thermoakustischen Effekte und begrenzt deren theoretische Effizienz.

Zum Zeitpunkt 3 wird das Gaspaket wieder an seine Ausgangsposition bewegt und dabei isentrop entspannt. Druck und Temperatur sinken dabei auf minimale Werte. Auch hier findet im Modell während der Bewegung kein Wärmeaustausch mit der Platte statt.

Zum Zeitpunkt 4 befindet sich das unbewegte Gaspaket im thermischen Kontakt mit der Platte. Da das Gaspaket zum Zeitpunkt 2 Wärme an die Platte abgegeben hat, sollte es nun kälter sein als die Platte und damit Wärme von der Platte in das Gaspaket fließen, bis Platte und Gaspaket identische Temperaturen angenommen haben. In diesem Zustand ist der Ausgangspunkt wieder erreicht und ein Zyklus des Kreisprozesses abgeschlossen.

Als Ergebnis eines Zyklus wurde Wärme von einer kälteren Stelle der Platte entnommen und an einer wärmeren Stelle der Platte deponiert. Im vereinfachten Modell werden viele nebeneinander liegende Gaspakete betrachtet, die in ihrer Zusammenarbeit dem linken Wärmetauscher (kaltes Reservoir) Wärme entnehmen und jeweils um eine Schwingungsamplitude pro Gaspaket längs der Platten zum rechten Wärmetauscher (warmes Reservoir) transportieren. Der dabei erzielte Effekt ist eine weitere Abkühlung des kalten Reservoirs, d.h. der Apparat hat die Funktion einer Kältemaschine.