



Doctoral Thesis

## Anwendungen thermoakustischer Schwingungen in der Tieftemperaturtechnik

**Author(s):**

Luck, Hans Rudolf

**Publication Date:**

1992

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000629546> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 9618

**Anwendungen thermoakustischer Schwingungen  
in der Tieftemperaturtechnik**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels  
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZÜRICH

vorgelegt von

HANS RUDOLF LUCK

Dipl. Masch. Ing. ETH  
geboren am 6. Oktober 1960  
von Ascharina GR

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. Ch. Trepp, Referent  
Prof. Dr. H. Thomann, Korreferent

ADAG Administration & Druck AG

Zürich 1992

25. 3. 92

Ch. Trepp

## ZUSAMMENFASSUNG

Thermoakustische Gasschwingungen werden in halboffenen Rohren und Kanälen mit grossen Temperaturgradienten erzeugt. Da die Oszillationen auch spontan und unerwünscht auftreten können, führen sie vor allem in der Tieftemperaturtechnik oft zu Problemen.

Während zur Entstehung der Schwingungen und zur Dämpfung bereits einiges Wissen vorhanden ist, wurden über technische Nutzungen bisher nur sehr wenige Arbeiten durchgeführt. Das Hauptgewicht dieser Studie liegt deshalb bei der Untersuchung von möglichen thermoakustischen Maschinen, ihrer Dimensionierung, den günstigen Bauformen und Anwendungsmöglichkeiten.

Als Grundlage für den theoretischen Teil dienen die Arbeiten von Rott (1969, 1980) und von Müller (1982, 1983), welche die vollständige Berechnung thermoakustischer Apparate erlauben, falls die Druckamplitude vorgegeben wird.

Alle bisher untersuchten thermoakustischen Wärme- Kraft- Maschinen, sowie auch die unerwünschten Oszillationen, funktionieren jedoch als freie Schwinger. Frequenz und Amplitude stellen sich dabei allein aufgrund des Zusammenwirkens des Antriebs und des Verbrauchers ein.

Als wesentliche Neuerung wurde deshalb ein Modell für freie Schwingssysteme erarbeitet. In Analogie zur Mechanik beschreibt es den Apparat als Feder/Masse-Schwinger mit Dämpfern. Damit kann nun die Amplitude, und somit auch die Leistung und der Enthalpiefluss berechnet werden. Das Modell kann auch auf kompliziertere technische Geometrien angewendet werden.

Bei freien Schwingern startet die Oszillation nach Erreichen der erforderlichen Temperatur von selbst, und die Amplitude steigt solange an, bis Antriebs- und Verlust-

leistung gleich gross sind. Bei gut dimensionierten Maschinen können Amplituden bis ca. 20 % des Mitteldruckes erwartet werden.

Das System schwingt immer mit der Eigenfrequenz. Um die deshalb bestehende starre Kopplung zwischen Frequenz und Geometrie zu brechen, wird die Verwendung eines Kolbens anstelle der schwingenden kalten Gassäule vorgeschlagen. Auf diese Weise lassen sich auch kleine Apparate mit mässigen Betriebsfrequenzen realisieren.

Im Rahmen eines ersten experimentellen Teils wurde eine thermoakustische Wärme-Kraft-Maschine mit Aluminiumkolben gebaut. Die Messungen zeigen eine sehr gute qualitative Uebereinstimmung mit den berechneten Kennlinien. Der quantitative Vergleich zeigt unterschiedliche Resultate; insbesondere bei tiefen Frequenzen und kleinen Temperaturverhältnissen sind recht grosse Abweichungen festzustellen.

Die Ursache für diese Fehler liegt vor allem in den Schwierigkeiten bei der Bestimmung der turbulenten Verluste. Diese haben eine entscheidende Bedeutung, da sie durch ihr quadratisches Anwachsen den Amplitudenanstieg begrenzen.

Als Anwendungsmöglichkeit einer thermoakustischen Maschine wird ihr Einsatz als kalter Kompressor untersucht. Solche Apparate zur Verdichtung von He-Gas im Bereich von 2...20 K haben in der Tieftemperaturtechnik zunehmende Bedeutung.

Es zeigt sich, dass eine solche Anwendung möglich ist. Es bestehen jedoch gravierende Nachteile, sodass ein thermoakustischer kalter Kompressor im Vergleich zu den bereits etablierten Kolben- und Turbomaschinen kaum bestehen kann.

In einem zweiten experimentellen Teil wurde eine Pulsationsrohr-Kältemaschine gebaut und getestet. Sie beruht in ihrer Grundform auf der Umkehrung des thermoakustischen Effekts. Die Gasschwingung wird mit Hilfe eines Kolbens produziert und erzeugt einen Temperaturgradienten in der Wand des Pulsationsrohres.

Mit Hilfe verschiedener Modifikationen konnte eine minimale Kühltemperatur von 72.5 K erreicht werden, weitere Optimierungen sind noch möglich. Die Verbesserungen werden durch zusätzliche Expansionseffekte erzielt; die Pulsationsrohr- Kältemaschine in ihrer heutigen Form ist deshalb kein rein thermoakustischer Apparat mehr und kann auch nicht als solcher berechnet werden.

Im letzten Abschnitt wird das Problem unerwünschter Oszillationen behandelt. Das im Grundlagenteil hergeleitete Modell kann zur Dimensionierung der Rohrleitungen verwendet werden, sodass eine Anfachung verunmöglicht wird. Weiter werden Methoden zur Dämpfung von Schwingungen in vorhandenen Anlagen vorgestellt.

## ABSTRACT

Thermoacoustic gas oscillations can be excited in half-open tubes and channels with big temperature gradients. Since these oscillations can also start up spontaneously, they often cause problems in cryogenic equipment.

While some papers on excitation and damping have been published, very little work has been done so far on technical utilizations. The main purpose of the present work is therefore to study thermoacoustic engines, their dimensioning, suitable constructions and possibilities of applications.

The theoretical part is based on the publications of Rott (1969, 1980) and Müller (1982). They allow the complete calculation of thermoacoustic devices with given pressure amplitudes.

However, all known thermoacoustic heat engines, and also the undesired oscillations, are free oscillators. Frequency and amplitude are determined solely by the interactions between the thermoacoustic drive and the power consuming part.

Therefore a new model for the free oscillator had to be developed. In analogy to mechanics, it describes the whole apparatus as a system of springs, masses and dampers. With this model, the amplitude, and subsequently the power and the enthalpy flow can now be calculated. The model can also be applied on quite complicated technical geometries.

Free oscillators start up spontaneously as soon as the necessary temperature gradient is reached, and the amplitude rises until the losses equal the driving power. For well designed engines, amplitudes of up to 20 % of the mean pressure may be expected.

The system always oscillates in its eigenfrequency, which is directly given by the geometry. Here the use of a solid piston instead of the cold gas column is suggested

to allow the construction of small engines with moderate working frequencies.

For a first series of experiments, a thermoacoustic heat engine with aluminium piston has been built. Measurements are in very good qualitative agreement with the calculated characteristics.

A quantitative comparison shows varying results; significant differences can be found at low frequencies and small temperature ratios.

These errors are mainly caused by problems in determining the turbulent losses. They are very important, since their square growth limits the increase of the amplitude.

As a possible application, the use of a thermoacoustic engine as a cold compressor is discussed. Helium vapor compressors in the range of 2...20 K have a growing importance in cryogenics. The results show that such an application is possible. But there are significant disadvantages, and it is doubtful, whether a thermoacoustic engine can compete with the established piston- and turbocompressors.

For a second series of experiments, a pulse tube refrigerator has been built and tested. In its basic configuration, it is based on the reversed thermoacoustic effect. A piston produces oscillations, which then cause a temperature gradient in the wall of the pulse tube. Different modifications have been made to reach a minimum no-load temperature of 72.5 K; further improvements are still possible. These low temperatures have been achieved because of additional expansion effects. The pulse tube refrigerator in its modern configuration is therefore not a purely thermoacoustic device and cannot be calculated as such.

In the last chapter, the problem of undesired spontaneous oscillations is discussed. The theoretical model developed in the first part of this work allows to dimension

cryogenic piping such as to avoid excitation. Furthermore, methods to damp oscillations in existing equipment are presented.