

B Klangerzeugung durch Wärme: eine Kuriosität von 1859 neu betrachtet

Konrad Unger*

*5 Jahre Sommerfeld-Seminar: Schwingungen in der
Quantenwelt und im Reich der Töne*

Die vor zwei Jahren in Leipzig gegründete Arnold-Sommerfeld-Gesellschaft e.V. beschäftigt sich nicht nur mit ARNOLD SOMMERFELDS „Atombau und Spektrallinien“, seiner berühmten relativistisch erweiterten Quantentheorie, oder jener „Endfassung“ der Quantentheorie seines Meisterschülers WERNER HEISENBERG. Dieses Fachwissen der Atomphysik ist noch in beträchtlichem Umfang aktuell, was sich in den entsprechenden Vortragsthemen niederschlägt.

Überraschend sind eher Themata zur Physik der Musikinstrumente in dem schon in das fünfte Jahr gehenden Sommerfeld-Seminar. Hierzu ist anzumerken, daß der Physiker ARNOLD SOMMERFELD ein ausgesprochener Kunstliebhaber und leidlicher Klavierspieler war, der natürlich auch Musikinstrumente theoretisch-physikalischen Betrachtungen unterwarf. So wurden am Ende des vergangenen Jahres die Theorien der schwingenden Saite und der schwingenden Membran im Musikinstrumenten-Museum der Universität Leipzig diskutiert – im gedrängten SOMMERFELD-Stil.¹ In der traditionsreichen Umgebung wurden zudem von Frau Dr. ESZTER FONTANA handerzeugte Membranschwingungen verschieden gestalteter Pauken zu Gehör gebracht.

*Prof. Dr. Konrad Unger, Kommandant-Prendel-Allee 100, 04299 Leipzig

¹Dr. W. Eisenberg: ARNOLD SOMMERFELD *und die Physik der Membranen*. In: Sommerfeld-Seminar der Arnold-Sommerfeld-Gesellschaft e.V. vom 24. November 1999

In seinem Experimentalvortrag im ersten SOMMERFELD-Seminar 2000² widmete sich Herr Prof. Dr. KONRAD UNGER neueren Aspekten einer Physik der Musikinstrumente, wobei er nach seiner Darlegung der notwendigen Bestandteile der Theorie eines bestimmten Musikinstrumentes – sozusagen als praktische Anwendung – eine von ihm so genannte „elektrische Glasposaune“ (Abb. B.1) vorführte, in der Klänge durch kontinuierliche Wärmezufuhr erzeugt werden, – eine Kuriosität, über die nachfolgend genauer berichtet wird.

Dabei demonstrierte das von Herrn GERALD BIEHL zur Verfügung gestellte Ambiente im Foyer des Kulturamtes der Stadt Leipzig das Eingebundensein der Thematik in das öffentliche Interesse dieser traditionsreichen Stadt.

Wolfgang Eisenberg, Arnold-Sommerfeld-Gesellschaft



Abb. B.1: Prof. Dr. K. UNGER demonstriert die Klangerzeugung an seiner elektrischen Glasposaune

²Prof. Dr. K. Unger: *Moderne Aspekte in der Physik der Musikinstrumente*. In: Sommerfeld-Seminar der Arnold-Sommerfeld-Gesellschaft e.V. vom 18. Januar 2000

B.1 Einleitung

Beim Physikstudium an der Universität Leipzig wurde (und wird) ein von PETER DEBYE eingeführter Vorlesungsversuch gezeigt, bei dem mit Wärme in einem Glasrohr (Länge 1. . . 1,5 m; Durchmesser 3. . . 10 cm) ein lauter Ton erzeugt wird. Zudem wird überprüft, daß die zur Tonhöhe gehörende Wellenlänge der doppelten Rohrlänge entspricht. Allerdings wird zum Mechanismus der Schwingungserzeugung fast nichts gesagt. Um dieses Defizit – wenigstens für mich – auszugleichen, habe ich mich in der Literatur umgesehen und eine leicht verbesserte Anordnung aufgebaut, die physikalisch möglichst durchsichtig und für die Untersuchungen zum Test theoretischer Modellvorstellungen geeignet sein sollte.

B.2 Die erste Mitteilung

Die erste Mitteilung zur besagten Klangerzeugung stammt von P. L. RIJKE 1859 [1]: In einem senkrecht aufgestellten Glasrohr (s. Abb. B.2) war ein Drahtgeflecht (0,2-mm-Eisendrähte in Abständen von ca. 1 mm) bei etwa einem Viertel der Rohrlänge unten eingeklemmt. Erhitzen des Drahtgeflechts auf Rotglut mit z. B. einem Bunsenbrenner ergibt nach Fortnehmen der Flamme einen lauten Ton, der einige Sekunden andauert. Wird ein elektrisch aufgeheiztes Drahtgitter verwendet, dauert der Ton lange an – bis sich die Rohrwand insgesamt erhitzt hat.

B.3 Erweiterungen

P. RIESS [2] hat ebenfalls gefunden, wie man einen Dauerton erzeugen kann: Bei ihm wird das kalte (und eventuell noch von außen gekühlte) Drahtgeflecht ins obere Drittel des Rohres verlegt und von unten in einiger Entfernung vom Drahtgeflecht mit einer Flamme warme Luft bzw. Abgase zugeführt. Ein zusätzlich angebrachtes Drahtgeflecht oder Metallsieb, das den aufsteigenden Luftstrom bremst, begünstigt die Klangerzeugung sowohl in dieser Anordnung als auch in der ursprünglich von RIJKE angegebenen.

H. PFLAUM [3] hat in seiner Dissertation von 1909 die Bedingungen der Klangerzeugung eingehend untersucht, wobei die RIJKESche Anordnung mit elektrisch geheiztem Drahtgitter verwendet wurde, die er als „elektrische Pfeife“ bezeichnet hat. In der nachfolgenden Literatur wird im Gegensatz zu „singenden Flammen“ oft von „Netztönen“ geschrieben. Für einen Nachbau schien

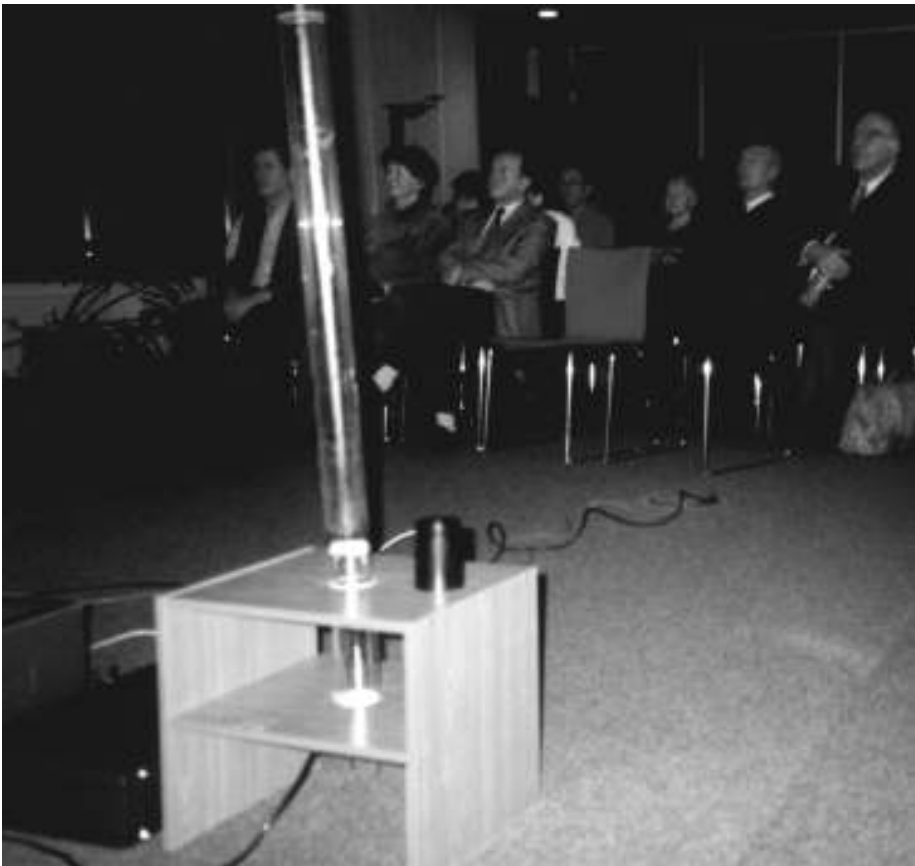


Abb. B.2: Experimentelle Anordnung

mir die elektrische Variante am geeignetsten, da sie Dauertöne erzeugen kann und Flammen sowie Abgase vermeidet. Es erwies sich als günstig für das Anschwingen, die Geschwindigkeit der erwärmten, aufsteigenden Luft zu drosseln. Dies ist statt der Verwendung dämpfender Metallsiebe, die ja als Wärmedepot oder „Regenerator“ (s. u.) während der Schwingungen wirken können und die Schallwellen teilweise reflektieren, leicht möglich, indem man das Rohr einfach zur Seite neigt: Es gibt dann einen Bereich des Neigungswinkels, in dem das Rohr tönt. Die Neigung bewirkt (ebenso wie das Verschließen eines Rohrendes) die gewünschte Drosselung der Kaminwirkung, was am Aufglühen des Drahtgitters unmittelbar sichtbar wird. Um in Hinblick auf ein kurioses Musikinstrument die Tonhöhe variieren zu können, wird ein zweites Glasrohr eingeführt, mit dessen Verschiebung – in der Art einer Posaune – die effektive Rohrlänge verändert werden kann. Eine Aufweitung am oberen Rohrende erleichtert das Anschwingen der Töne; es ergibt sich so eine „elektrische Glasposaune“.

B.4 Erläuterung zum Mechanismus der Klangerzeugung

In einem *horizontal* gelagerten Rohr breitet sich die Erwärmung der Luft nach beiden Seiten um das geheizte Drahtgitter mit einer bestimmten Geschwindigkeit aus. Hierbei wird kein Ton erzeugt. Wenn beim *vertikal* oder geneigt aufgestellten Rohr die Geschwindigkeit der aufsteigenden Luft jedoch größer als die thermische Ausbreitungsgeschwindigkeit ist, folgt auf eine durch die Heizung angefachte Kaminwirkung die Abkühlung der Heizdrahtoberfläche durch die von unten nachströmende kalte Luft und somit ein Abbremsen der vertikalen Luftströmung. Nach kurzer Zeit wird hierdurch und durch Nachlieferung von Wärme aus dem Drahtinneren die Temperatur der Drahtoberfläche wieder ansteigen, die vertikale Strömung wieder angefacht usw. Wesentlich für die Klangerzeugung ist, inwieweit sich das Tempo von Luftausdehnung und -kompression entsprechend den Eigenschwingungen des Rohres mit dem Rhythmus der Temperaturveränderung der Drahtoberfläche in richtiger Phase aufeinander einstellen. Lord RAYLEIGH [4] hat 1896 mit Bezug auf die „singenden Flammen“ darauf hingewiesen, daß sich die Schwingungen in Röhren, in denen Flammen (oder geheizte Drahtgitter) Wärme zuführen, anfachen lassen, wenn die Luft bevorzugt an Stellen hoher Dichte erwärmt (bzw. an Stellen niedriger Dichte abgekühlt, siehe [2]) wird. Zu bemerken ist, daß eine genauere, quantitative Theorie der Netztöne aber bisher fehlt; um sie zu skizzieren, sollen hier folgende Hinweise genügen:

- a) Es ist bekannt, zu welcher ortsabhängigen Schwingung der Gasdruck und die Gasdichte im Rohr fähig sind, wenn nur die unvermeidliche Dämpfung der Schwingung durch geeignete, phasenrichtige Energiezufuhr überkompensiert wird.
- b) Die mittlere Luftdichte im Rohr, die wegen der Erhitzung kleiner als in der Umgebung ist, liefert die Geschwindigkeit der aufsteigenden Luft. Angefacht wird diese Geschwindigkeit durch das Drahtgitter entsprechend der Temperatur seiner Oberfläche, die sich dabei abkühlt, aber andererseits vom Drahtinneren Wärme nachgeliefert bekommt.
- c) Die vom Drahtgitter abgegebene Wärmenergie findet sich in der erhitzten Luft wieder, wobei die pro Zeiteinheit durch das Gitter strömende Luftmenge, d. h. ihre Geschwindigkeit und ihr Druck, entscheidend sind.

Für die drei genannten Zusammenhänge a)...c) sind drei gekoppelte Differentialgleichungen für die zeitabhängigen Variablen Oberflächentemperatur,

Geschwindigkeit und Dichte der Luft zu formulieren. Die Lösungen vereinfachen sich bei Beschränkung auf das Kleinsignalverhalten und enthalten die Parameterbereiche, in denen eine Schwingung spontan erzeugt wird.

B.5 Hinweis auf Zusammenhänge mit einem STIRLING-Motor

Da die Fortpflanzung einer akustischen Welle ein adiabatischer (praktisch wärmeisolierter) Prozeß ist, entsteht bei Kompression der Luft eine Temperaturerhöhung, bei Ausdehnung eine Temperaturerniedrigung. Für die in einer stehenden Welle im Rohr auftretenden Temperaturoszillationen sind Drahtgitter oder Metallsiebe bezüglich der Wärmeenergie gut aufnahme- und abgabefähig: sie wirken dann wie Wärmedepots oder „Regeneratoren“ in einem STIRLING-Motor, einer speziellen Wärmekraftmaschine. Tatsächlich ist in den letzten Jahren die besondere, schnelle Betriebsart eines STIRLING-Motors, bei der Wärme in mechanoakustische Energie verwandelt wird, ohne daß sich dabei ein Kolben oder ein Ventil bewegt, mehrfach studiert worden [5, 6]. In einem geschlossenem Rohrsystem wird eine genügend große Temperaturdifferenz aufrecht erhalten und mit hohem Wirkungsgrad akustische Energie erzeugt. Dabei ist der Regenerator wesentlich und die Frequenz durch die Schallgeschwindigkeit und die Umlaufstrecke festgelegt.

B.6 Schlußbemerkungen

Die RIJKESche Kuriosität neu zu betrachten, erscheint nicht nur bezüglich möglicher Erkenntnisse und Anwendungen als spezielle Wärmekraftmaschine oder auch als exotisches Musikinstrument interessant; es zeigt sich auch, wie sehr eine überzeugende Theorie für den empirisch gefundenen, danach abgewandelten kuriosen Effekt überfällig ist. Natürlich sollen Folgerungen aus den theoretischen Vorstellungen zur Erklärung des kuriosen Effektes experimentell überprüft werden:

- Wenn die Oberflächentemperatur des Drahtgitters im Takt der akustischen Schwingung oszillieren soll, so muß sich das durch die oszillierende Wärmestrahlung optisch nachweisen lassen.
- Auch wenn sich die Temperaturoszillation des Drahtgitters besonders auf eine oberflächennahe Schicht bezieht, ist ein oszillierender Widerstand

des Heizdrahtes zu erwarten. Das Drahtmaterial sollte zum günstigen Nachweis dabei einen hohen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes aufweisen.

- Ebenso erscheinen zukünftige Untersuchungen mit einer Drucksonde genügend geringer Trägheit entlang des schwingenden Rohres als aufschlußreich.

Nach den genannten Untersuchungen soll die experimentelle Anordnung (Abb. B.2) im Kuriositätenkabinett der Arnold-Sommerfeld-Gesellschaft e.V. zu besichtigen sein.

Literaturverzeichnis

- [1] P. L. Rijke: Poggendorffs Annalen der Physik 107 (1859), 339
- [2] P. Riess: Poggendorffs Annalen der Physik 108 (1859), 653, und 109 (1860), 145
- [3] H. Pflaum: Dissertation Physikalisches Institut der Universität Rostock, 1909
- [4] Lord Rayleigh: *Theorie of sound*. Vol. II (1896). 2nd printing (1926), p. 226
- [5] T. Yazaki et al.: Physical Review Letters 81 (1998), 3128
- [6] S. Backhaus, G. W. Swift: Nature 339 (1999), 335, vgl. S. Jorda: Physikalische Blätter 55, 7 und 8 (1999), 19