

Die Energie der Musik

Rotierende Weihnachtskugeln

Joachim Schlichting Christian Ucke

In der Weihnachtszeit werden viele Weihnachtslieder gespielt. Wir stellen uns die Frage, ob die dabei aufgewandte akustische Energie nicht ausgenutzt werden könnte, um beispielsweise eine Weihnachtspyramide anzutreiben [1]. Das würde nicht nur Kerzen sparen, sondern auch das von der Kerzenflamme ausgehende Gefahrenpotential verringern.

Eine besondere „Empfänglichkeit“ für Schall zeigen die in der Weihnachtszeit fast allgegenwärtigen Weihnachtskugeln (Bild 1). Bläst man vorsichtig über die Öffnung einer solchen Kugel, (die man durch Herausziehen des Aufhängers freilegt,) so kann man ihr einen „satten“ Ton entlocken. Wie bei den „professionellen“ Blasinstrumente hängt auch bei den Weihnachtskugeln die Tonhöhe von den äußeren Abmessungen ab. Schon Hermann von Helmholtz hat die theoretischen Grundlagen des akustomechanischen Verhaltens gelegt, indem er äußerlich ganz ähnliche, meist ebenfalls aus dünnem Glas gefertigte, heute Helmholtz Resonatoren genannte Kugeln untersuchte (siehe Bild 2).

Helmholtz ermittelte mit diesen Kugeln die im „musikali-

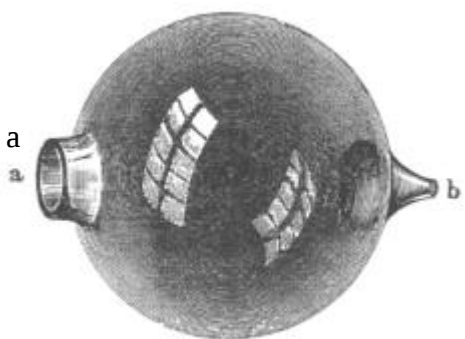


Bild 2: Helmholtz- Resonator. Damit man den aus dem musikalischen Klang herausgefilterten Oberton unmittelbar wahrnehmen kann, ist die Kugel mit einer Art Schalltrichter ausgestattet, der in die Ohrmuschel eingeführt wird.



Bild 1: Weihnachtskugel, nicht nur optisch auch akustisch interessant.

schen Klang“ enthaltenen Obertöne und machte sie für jedermann wahrnehmbar. Wenn durch die Öffnung a der Kugel Schallwellen passender Frequenz in die Kugel gelangen, bilden sich stehende Wellen aus. Zur physikalischen Beschreibung dieses Phänomens faßte Helmholtz die Luft in der Kugel und im Hals als eine Art „Feder-Masse“-System auf, bei dem die Masse des Luftpfropfens im Hals an der elastischen Feder der Luft im Innern der Kugel „hängt“ und durch die äußere Schallwelle zum Mitschwingen angeregt wird. Dies führt allerdings nur dann zu einem nennenswerten Effekt wenn das Schallfeld, in dem sich die Kugel befindet, Eigenfrequenzen des Feder- Luft- Systems enthält (Resonanz) (siehe Messung der Resonanzfrequenz). Das läßt sich auf ein-

fache Weise dadurch demonstrieren, daß man die Kugel mit einem von einem Sinusgenerator versorgten Lautsprecher beschallt und die Frequenz variiert. Immer dann, wenn man die Eigenfrequenz erreicht, kommt es zu einer deutlichen Verstärkung des jeweiligen Tones. Mit einem vor der Kugelloffnung gehaltenen Kerzenflamme kann man die Luftbewegung sichtbar machen. Bei höheren Schallintensitäten wird die Flamme ausgeblasen: Durch die Öffnung der Kugel geraten nicht nur Schallwellen hinein, sondern kommen wie aus einer Düse Luftjets heraus.

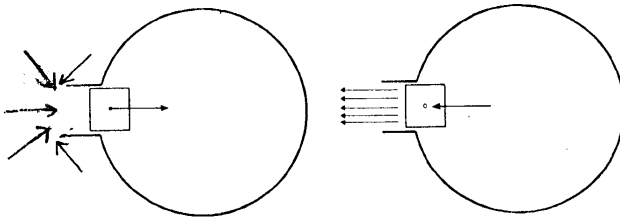


Bild 3: Die ungerichtet, von allen Seiten einströmende und als gerichteter Jet ausstromende Luft sorgen für einen resultierenden Impulsübertrag.

Unter der Voraussetzung, daß man der Kugel entsprechende Bewegungsfreiheit verleiht, kann die sich in den Jets äußernde kinetische Energie zur Fortbewegung ausgenutzt werden. Da die Schallquelle stationär ist, kommen dafür nur periodische Bewegungen in Frage, Rotationen oder Schwingungen: An einem Faden aufgehängt, wird die Kugel durch den akustischen Energie- und Impulsstrom mehr oder weniger weit ausgelenkt, bis die rücktreibende Kraft (unterstützt durch die entfernungsbedingte Abnahme der Schallintensität) zu einer Rückbewegung führt usw. Im Falle einer drehbar gelagerten Kugel, kommt auch noch die bei der Rückschwingung ungenutzt bleibende Energie der Bewegung zugute.



Bild 4: Das drehbar über einer Lautsprecherbox angebrachte Weihnachtskugelrad, wird von unten beschallt und mit akustischer Energie versorgt.

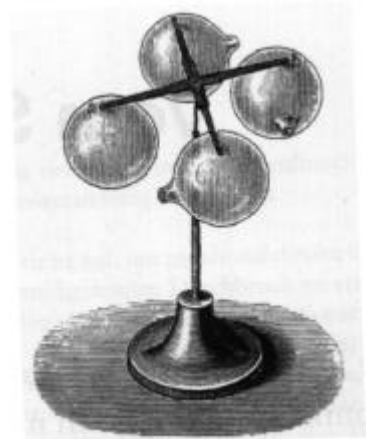


Bild 5: Lange vor unserem Weihnachtskugelrad gab es eine entsprechende Erfindung (aus [3])

Warum kommt es überhaupt zu einem Vortrieb? Da der Luftpfropfen mit der Eigenfrequenz des Resonators durch die Öffnung ein und austritt, wäre doch vielmehr eine (aufgrund der verhältnismäßig großen Trägheit der Kugel) unmerklichen Hin- und Herbewegung zu erwarten. Die Antwort ist in der Asymmetrie zwischen dem gerichteten Ausstoßen und dem ungerichteten Einsaugen der Luft von allen Seiten begründet (vgl. einen ähnlichen Vorgang beim Dampf- Jet- Boot [2]). Während sich die ausgestoßenen Luftteilchen hauptsächlich in einer Richtung bewegen und ihren Impuls in dieser Richtung auf die umgebende Luft übertragen, (wodurch ein entsprechend großer Rückstoß auf die Kugel möglich wird), prallen die von allen Richtungen radial auf die Öffnung zuströmenden Luftteilchen aufeinander und heben ihre

Impulse zum großen Teil auf (Bild 4). Aus einem ähnlichen Grund kann man beispielsweise eine Kerze aus verhältnismäßig großer Distanz ausblasen. Wohingegen es nahezu unmöglich ist, sie selbst aus großer Nähe „auszusaugen.“

In der vorliegenden Konstruktion (siehe Bild 4) haben wir drei gleichartige Weihnachtsbaumkugeln drehbar spitzengelagert über der Öffnung einer Lautsprecherbox angebracht. Wird dieses Weihnachtskugelrad mit einer passenden Resonanzfrequenz bestrahlt, so setzt es sich je nach der Intensität des „treibenden Tones“ in mehr oder weniger schnelle Drehbewegung.

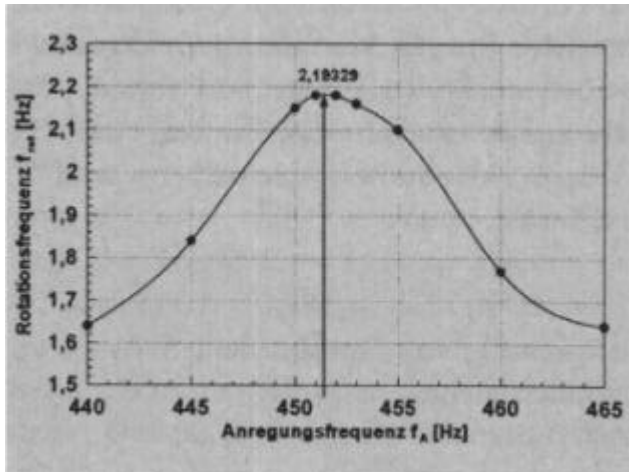


Bild 6: Experimentell ermittelter Zusammenhang zwischen der Rotationsgeschwindigkeit (bzw. Rotationsfrequenz) des Kugelrades und der von der Schallquelle gelieferten Anregungsfrequenz (aus [1]).

Auch wenn die Anregungsfrequenz nur näherungsweise der Resonanzfrequenz entspricht, wird das Rad in Bewegung gesetzt (siehe Bild 6).

Dieser Sachverhalt versetzt uns überhaupt erst in die Lage, unser Ziel zu verwirklichen, Weihnachtsmusik und nicht bloß langweilige Töne des Sinusgenerators (die beim Weihnachtsfest nur stören würden) zum Antrieb unseres Weihnachtsrades auszunutzen. Es genügt eine Weihnachts- CD (am besten mit lautstarker Tenoreinlage) abzuspielen, um das Rad in Bewegung zu halten. Bei Musikpassagen, die in der passenden Tonhöhe liegen, nimmt das Rad Fahrt auf. Über weniger passende Passagen hilft die Trägheit des Rades

hinweg. Bei den von uns benutzten Kugeln mit einer Resonanzfrequenz von 451 Hz waren Weihnachtslieder mit schmalzigen Tenoreinlagen besonders wirkungsvoll: Beim Einsatz des Sologesangs begann das Rad geradezu (vor Begeisterung?) zu rasen.

Für diejenigen, die unserer Idee folgend, ihr Weihnachtsfest durch eine originelle akustomechanische Einlage stimmungsmäßig vertiefen wollen, sollten wir nicht unerwähnt lassen, daß die lautstarke Aktion des Weihnachtskugelrades jede Unterhaltung im Keim erstickt. Notfalls kann man aber vorübergehend auf die altbekannte Wärmekraftantrieb der Weihnachtspyramide zurückgreifen. An laute Discomusik gewöhnte Jugendliche kommen jedoch voll auf ihre Kosten.

Zur Messung der Resonanzfrequenz

Nach der Helmholtzschen Modellvorstellung eines Feder- Masse- Systems leitet man eine Resonanzfrequenz von

$$f_{\text{Resonanz}} = \frac{c}{2p} \sqrt{\frac{A}{V \cdot l}}$$

ab, wobei c die Schallgeschwindigkeit in der Luft, A der Querschnitt der Öffnung, l die Länge des in der Öffnung schwingenden Luftpfpfens und V das in der Kugel enthaltene schwingende Luftvolumen ist. Da man realerweise davon ausgehen muß, daß der Luftpfpfen in Abhängigkeit vom Halsdurchmesser in die umgebende Luft hineinragt, ist die Länge l der Öffnung mit einem Korrekturfaktor

zu verstehen. Dazu gibt es in der Literatur verschiedene Ansätze. Helmholtz schlug vor, l durch $l_{\text{eff}} = l + 2s$ zu ersetzen, wobei $s = \frac{1}{4} \pi R$ (R = Radius des Halses) ist.

Mit den Abmessungen unserer Kugeln (siehe Bild) ergibt sich daraus eine Resonanzfrequenz von 436,6 Hz. Gemessen wurde (siehe Bild) eine Frequenz von 451,3 Hz. Die Übereinstimmung ist also überraschend gut.

Literatur:

[1] C. Zeiger, H.J. Schlichting, V. Nordmeier. Die Kinetik der Christbaumkugeln. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.): Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung der DPG Duisburg 1995, S. 286 - 291.

[2] H.J. Schlichting, B. Rodewald: Physikalische Phänomene am Dampf- Jet- Boot. Praxis der Naturwissenschaften - Physik 39/8, 19 (1990).

[3] Müller- Pouilllets: Lehrbuch der Physik und Meteorologie. Braunschweig: Vieweg 1906, S. 790.

$$f = \frac{1}{2p} \cdot \sqrt{\frac{D}{m}}$$

gegeben ist. Die Masse $m = A l \rho$ des Luftpfropfens (A = Querschnitt, l = Länge des Luftpfropfens, ρ = Dichte der Luft) (siehe Bild) erleidet aufgrund der akustisch bedingten Luftdruckänderung Δp eine Kraft

$$\Delta F = A \Delta p.$$

Da die Luftdruckänderungen so schnell erfolgen, daß kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfinden, wenn m die Masse des Luftpfropfens und D die „Federkonstante“ der Luft darstellt. Die Masse m dD und m lassen sich folgendermaßen abschätzen: