

Zeigen bewegte Schalluhren eine Zeitdilatation wie Einsteins Lichtuhr?

N. Feist¹, S. Kerber²

¹86368 Gersthofen, Leo-Fall-Str. 26, Deutschland, Email: norbert.feist@ncs.de

²AG Technische Akustik, MMK, TU München, 80333 München, Deutschland

Abstract

Vermutet man als Ursache für die Zeitdilatation bewegter Uhren die sich ändernde Phasengeschwindigkeit c in mediumdurchströmten Resonatoren, läßt sich diese Hypothese mit akustischen Resonanzrohren im Windkanal testen. Es wird über ein erstes Experiment hierzu berichtet.

Einleitung

Man könnte die Einheit der Sekunde auch über die akustische Grundfrequenz eines im Medium Luft ruhenden offenen Resonators der wirksamen Länge $L_0 = 1$ Meter bei der Schallgeschwindigkeit $c_0 = 343$ m/s unter Normalbedingungen definieren. Mit der Resonatorgleichung

$$v_0 = c_0 / 2L_0 \quad [s^{-1}] \quad (1)$$

entsprechen dann 171,5 seiner Schwingungen einer Sekunde.

Die Konstanz einer Schalluhr beliebiger konstanter Abmessung hinge dann ausschließlich von der Schallgeschwindigkeit im Innern ab. Da diese z. B. von der Temperatur abhängt, würde eine kleinere Schallgeschwindigkeit infolge niedrigerer Lufttemperatur zu einer niedrigeren Taktrate – zu einer Zeitdilatation – führen.

In analoger Weise könnten – wenn man wie Planck auch Atome als Resonatoren ansieht [1] – die Emissions- und Absorptionsfrequenzen der Atome oder die Taktrate von Atomuhren von der Lichtgeschwindigkeit c innerhalb dieser atomaren Resonatoren abhängen.

Als erstes läßt sich damit zwanglos die Abhängigkeit der Gangrate von Atomuhren vom Gravitationspotential erklären, die von Einstein [2] 1911 in Form der gravitativen Rotverschiebung vorhergesagt und später experimentell verifiziert und auch praktisch angewandt (GPS) wurde. Strahlt eine Quelle beim Gravitationspotential φ_0 elektromagnetische Wellen der Frequenz ν_0 ab, so emittiert sie beim – per Definition negativ zu rechnenden – Potential $\varphi \neq 0$ unter sonst gleichen Bedingungen die Frequenz ν'

$$\nu' \cong \nu_0 \left(1 + \varphi / c^2\right) \quad [s^{-1}] \quad (2)$$

Diese Verringerung der Resonatorgrundfrequenz ist direkt proportional der vermutlich ursächlichen, ebenfalls von Einstein [2] vorhergesagten und mittels der Ablenkung des Fixsternlichtes am Sonnenrand oder durch Laufzeitmessungen von Planeten-Radarechos verifizierten Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Gravitationspotential φ :

$$c' \cong c_0 \left(1 + \varphi / c^2\right) \quad [m/s] \quad (3)$$

Auch die Abhängigkeit der Gangrate der Atomuhren von der Geschwindigkeit v ließe sich über die Änderung der Lichtgeschwindigkeit in den Planck'schen atomaren Resonatoren erklären. In seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“

[3] hatte Einstein bereits 1905 die später als Zeitdilatation bezeichnete Abhängigkeit des Uhrenganges von der Geschwindigkeit vorhergesagt. Danach ändert sich die Frequenz einer Quelle wie folgt:

$$\nu' = \nu_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2} \quad [s^{-1}] \quad (4)$$

Die Rückführung auch dieses relativistischen Uhreneffektes auf eine sich in diesem Fall bei Bewegung ändernde Lichtgeschwindigkeit im atomaren Resonator setzt allerdings die Annahme eines alles durchdringenden Ausbreitungsmediums für elektromagnetische Wellen voraus. Gleichwohl kann das Prinzip dann auch mit offenen akustischen Resonatoren getestet werden, wie im Folgenden gezeigt wird.

Grundfrequenz bewegter offener Resonatoren

Wird ein beidseitig offenes Rohr mit einer Öffnung voraus mit der Geschwindigkeit v im Medium Luft bewegt, so ergeben sich im Rohr die beiden entgegengesetzt gerichteten unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten $c + v$ und $c - v$. Mit der Resonatorbedingung der Amplitude Null an den Rohrenden resultieren die beiden Frequenzen

$$\nu_1 = (c + v) / 2L \text{ bzw. } \nu_2 = (c - v) / 2L \quad [s^{-1}] \quad (5)$$

Auch bei den modernen auf dem Sagnaceffekt [4] beruhenden optischen Ringlasergyroskopen werden klassisch diese beiden von der Umfangsgeschwindigkeit v abhängigen unterschiedlichen Lichtgeschwindigkeiten $c + v$ und $c - v$ mit der Folge zweier unterschiedlicher Frequenzen erwartet, deren Schwebungsfrequenz ein Maß für die Drehzahl ist.

Diese Ringresonatoren zeigen allerdings prinzipiell ohne künstlich aufgeprägtes Rütteln bei geringem Durchmesser und geringer Drehzahl einen Einrast- oder Lock-In-Effekt. (“Lock-in is the tendency for coupled classical oscillators to coalesce to a common frequency. In ring lasers lock-in causes the counter propagating beams to form standing waves to preclude the possibility of detecting rotation” [5])

Wenn, wie im linearen akustischen Resonator sowieso gegeben, Hin- und Rückwelle exakt den gleichen Weg nehmen, kommt es offensichtlich entgegen dem Superpositionsprinzip auch schon bei niedrigster Intensität zu einer nichtlinearen Synchronisation beider Frequenzen. Dieser Lock-In-Effekt ermöglicht offenbar die Bildung einer stehenden Welle auch aus gegenläufig fortschreitenden Wellen ungleicher Frequenz. Vermutlich resultiert wie beim ruhenden Resonator auch beim bewegten Resonator als Mittenfrequenz das geometrische Mittel der pegelgleichen, in diesem Fall durch Gl. (5) gegebenen Grenzfrequenzen des Frequenzbandes:

$$\nu' = \sqrt{\nu_1 \nu_2} = \sqrt{\frac{(c + v)(c - v)}{2L \cdot 2L}} = \frac{c}{2L} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (6)$$

Das Ergebnis stimmt mit Einsteins Gl. (4) überein und sagt auch für einen offenen akustischen Resonator eine Frequenzabhängigkeit gemäß dem Lorentzfaktor voraus, wobei in diesem Fall c die Schallgeschwindigkeit ist.

Ein im Windkanal mit der Geschwindigkeit v durchströmtes beidseitig offenes Resonanzrohr sollte danach nicht zwei bevorzugte Frequenzen gemäß Gl. (5) sondern nur eine Verringerung der Grundfrequenz und ihrer Harmonischen entsprechend dem Lorentzfaktor nach Gl. (6) zeigen.

Resonanzrohrexperiment

Hierzu wurden im Windkanal A der TU München jeweils mit und ohne Strömung die Luftsäulen dreier verschiedener Resonanzrohre:

PVC, DN110 x 3,2 x 1500 mm

PP, DN 75 x 1,5 x 1000 mm

TiZn, DN 87 x 0,75 x 900 mm

per Lautsprecher 20 sec lang mittels Maximal-Längen-Sequenzen zu Schwingungen angeregt. Die Aufnahme der Spektren der ungeraden Harmonischen erfolgte mit einer Samplingrate von 44.1 kHz über eine Bohrung in der Rohrlänglenmitte.

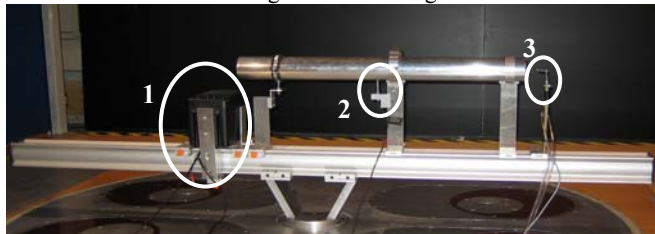


Abb. 1 TiZn-Resonanzrohr DN 87 x 0,75 x 900 mm auf optischer Bank im Windkanal. Windeintritt links. Darunter Lautsprecher(1); Mikrophon in der Mitte(2); rechts Temperaturfühler und Prandtl-Sonde(3).

Ergebnisse

Die Spektren wurden bis 2000 Hz ausgewertet. Dazu wurde ein Bandpassfilter mit 10 Hz Bandbreite in 1 Hz-Schritten über den Bereich geschoben und die Energie in diesem Band berechnet. Jedes Spektrum wurde über den bekannten Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Temperatur auf einheitlich 20°C normiert. Wie erwartet zeigte sich keine Aufspaltung der Resonanzfrequenz entspr. $c + v$ und $c - v$ sondern eine Verringerung. Das Verhältnis von Wind-Resonanzfrequenz ν' zur Ruhfrequenz ν_0 aus Gl. (6) bietet eine von den Rohrparametern unabhängige Ergebnisdarstellung in Form des reziproken Lorentzfaktors als Sollwert. Eine Windkanalgeschwindigkeit von $v = 60$ m/s oder 216 km/h ergibt danach einen reziproken Lorentzfaktor von 0,985. Das Mittel aller 29 Versuche bei dieser maximal auch im Rohr erreichten Geschwindigkeit ergab einen reziproken Lorentzfaktor von $0,986 \pm 0,010$.

Abb. 2 zeigt die Messergebnisse mit dem PP-Rohr grafisch. Insbesondere bei den höheren Harmonischen mit dem entsprechend größeren Effekt sieht man deutlich die grüne Resonanzkurve für 40 m/s links von der schwarzen Kurve (0 m/s) und die rote Kurve für 60 m/s noch weiter links liegen:

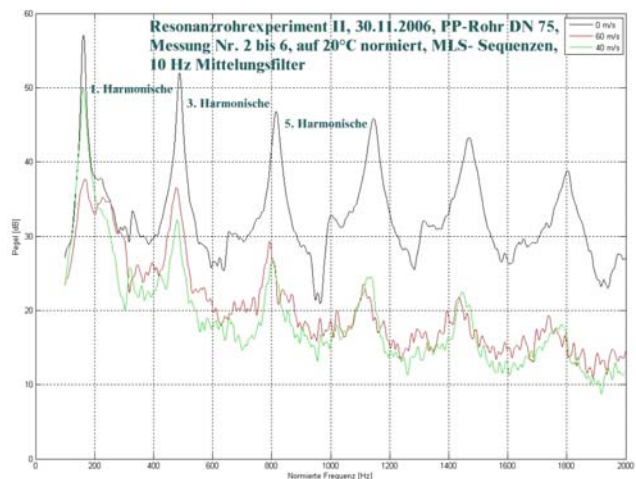


Abb. 2. PP-Rohr, Schallspektren bei 0, bei 40 und bei 60 m/s

Diskussion

Das Phänomen der Frequenzsynchronisation wurde zuerst von Huygens an gemeinsam aufgehängten Pendeluhrn und später von Lord Rayleigh an benachbarten leicht verstimmt Orgelpfeifen beobachtet. Technische Relevanz erhielt der Effekt in Form der „Mitnahme“ bei rückgekoppelten Verstärkerröhren und später beim Josephson-Kontakt. Dieser in Mechanik, Akustik, Optik und HF-Technik zu beobachtende Lock-In-Effekt verleiht als „universal concept in nonlinear science“ [6] der hier vorgestellten möglichen Ursache für die „Zeitdilatation“ trotz der noch hohen Standardabweichung der ersten Versuchsergebnisse mit einer Schalluhr eine gewisse Wahrscheinlichkeit.

Zusammenfassung

Zur Klärung der Frage, ob eine bewegte Schalluhr prinzipiell der gleichen Zeitdilatation unterliegt wie Einsteins Lichtuhr, wurde die Frequenzniedrigung offener Resonanzrohre im Windkanal gemessen. Die Antwort lautet „Ja“, jedoch sind für eine gesicherte Aussage weitere Untersuchungen nötig.

Danksagung

Die Autoren danken Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H. Marko und Prof. Dr.-Ing. habil. H. Fastl sowie Dr.-Ing. habil. Ch. Breitsamter und Dipl.-Ing. M.Sc. A. Allen für wertvolle Anregungen und Unterstützung bei der Durchführung der Experimente.

Literatur

- [1] Einstein, A., Planck, M.: *Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung*. Phys. Zeitschr. 10: 817-825, 1909.
- [2] Einstein, A.: *Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes*. Ann. Phys. 35:898-908, 1911.
- [3] Einstein, A.: *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Ann. Phys. (Leipzig) 17:891-921, 1905.
- [4] Stedman, G.E.: *Ring-laser tests of fundamental physics and geophysics*. Rep. Prog. Phys. 60:615-688, 1997.
- [5] Dunn, R.W. et al.: *Design and initial operation of a 367 m² rectangular ring laser*. App. Opt. 41:1685-1688, 2002.
- [6] Pikovsky, A., Rosenblum M., und Kurths, J.: *Synchronization – A universal concept in nonlinear science*. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.