

Warum die Klingel im "Vakuum" wirklich nicht zu hören ist

Zum Versuch

Nach Evakuierung einer Glasglocke hört man die darin befindliche Klingel nicht mehr (ab 28 mbar in 1 m Entfernung). Um Körperschall zu unterbinden, hängt man die Klingel am Besten an einem Gummi auf.

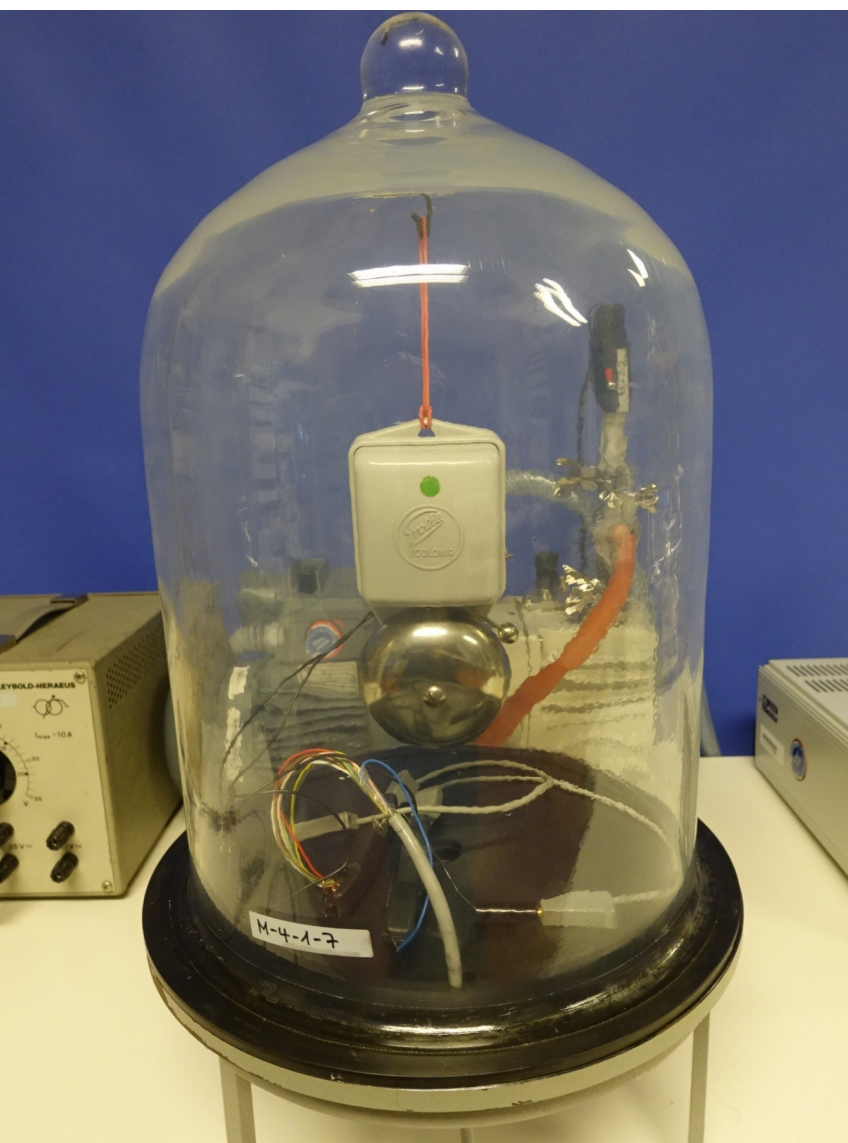


Abb. 1

Die üblicherweise angegebene Erklärung für diesen bekannten Versuch ist, dass die Materie fehlt und sich somit kein Schall ausbreiten kann. Tatsächlich ist der üblicherweise in der Schule erreichbare Druck $\geq 0,13$ mbar (hier 5 mbar), dies entspricht einer mittleren freien Weglänge von 0,5 mm (hier 13 μm). Selbst bei Ultraschall mit $f = 24$ kHz hat man noch eine viel größere Wellenlänge von 14 mm. D. h. Schallwellen sollten sich weiterhin ausbreiten können. Dies hat Herr Lindenmeyer in seiner Abschlussarbeit mit stehenden Wellen nachgewiesen:

Schalldruck gegen Position mit einem Arduinoaufbau bei 40 mbar und 24 kHz:
Der Abstand der Minima beträgt $\frac{\lambda}{2}$.

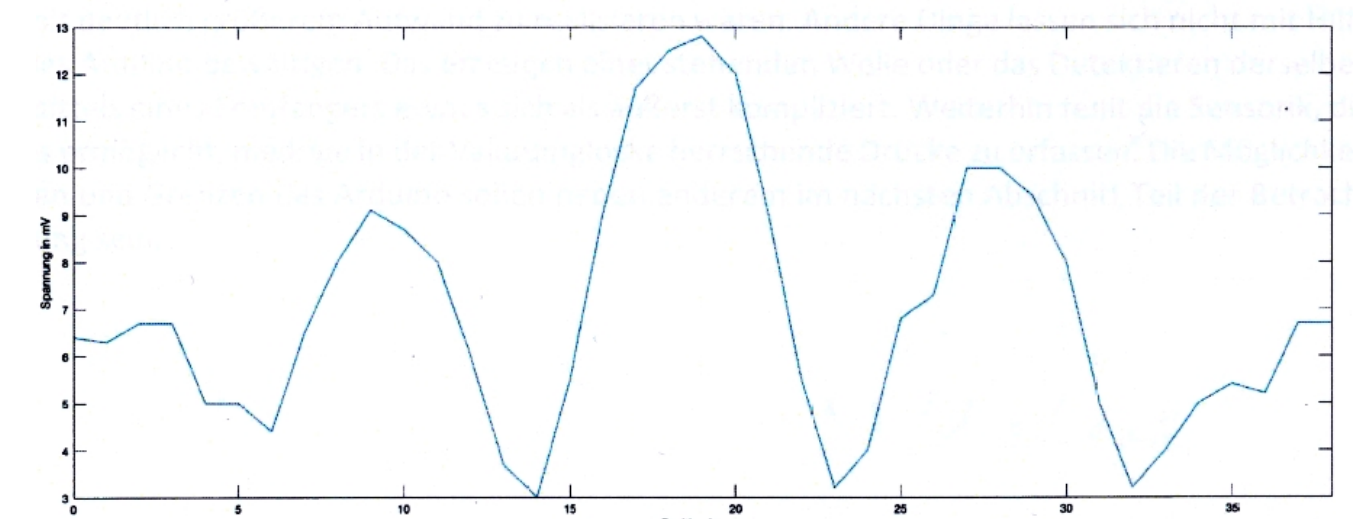


Abb. 2

Haupteffekt: Schalleintrag

Annahme: Membranauslenkung und Schallgeschwindigkeit = konst.

1) Anschaulich:

$V_1, V_2 \dots$ Volumen des Schallberges

$p_1, p_2 \dots$ Absolutdruck des Schallberges

$p_S \dots$ Schalldruck

Kompression der Luft durch die Membran:

$$V_2 = V_1 \cdot 0,993 \rightarrow p_2 \approx p_1 \cdot 1,01$$

$$p_S \hat{=} p_2 - p_1 = 0,01 \cdot p_1$$

D. h.: Schalldruck $p_S \sim$ Vakuumdruck p_1

2) Exakt:

Bei $v \ll c$ folgen die Luftmoleküle nahe der Membran dieser. Es entsteht eine Longitudinalwelle wie bei der Slinkyfeder.

$$Z = \rho \cdot c; c \approx \text{konst.}$$

Isotherme Zustandsänderung in der

$$\text{Vakuumglocke: } \frac{p_{vak2}}{p_{vak1}} = \frac{V_{vak1}}{V_{vak2}} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \rightarrow p_{vak} \sim \rho \rightarrow$$

$$Z \sim p_{vak}; \text{ im Fernfeld ist } Z = \frac{p_S}{v}$$

$$v = v_{Membran} \text{ Annahme} = \text{konst.}$$

$$\rightarrow \text{Schalldruck } p_S \sim \text{Vakuumdruck } p_{vak}$$

$v \dots$ Schallschnelle

$c \dots$ Schallgeschwindigkeit

$Z \dots$ Schallkennimpedanz

$\rho_1, \rho_2 \dots$ Dichte

$p_{vak1}, p_{vak2} \dots$ Druck in der Glasglocke

$V_{vak1}, V_{vak2} \dots$ veränderliches Glockenvolumen

Messung

$p_S = k \cdot p^c \rightarrow$ Proportionalität entspräche einem Exponenten von $c = 1$.

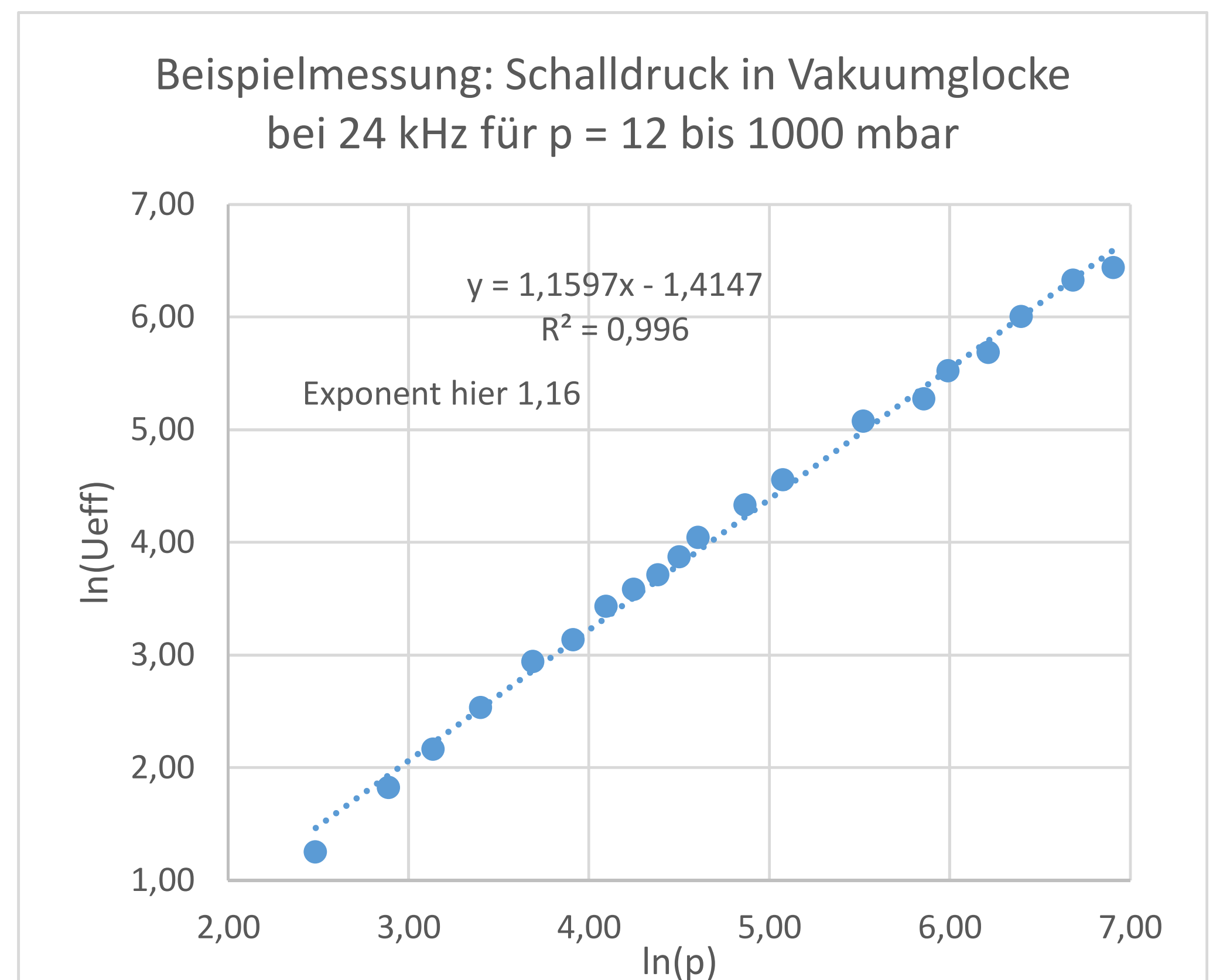


Abb. 3

Die Messkurven streuen wegen stehender Wellen in der Glasglocke (siehe zweites Plakat). Die Mittelung vieler Messungen mit verschiedenen Geräten ergab:

Druckbereich	Exponent Messung innen	Exponent Messung außen
50 bis 800 mbar	0,96	0,77
13 bis 80 mbar	1,42	-

D. h. die Exponenten liegen in der Nähe von eins, also der Proportionalität.

Malte Lindenmeyer,
Daniel Schwarz Physikdidaktik
Poster: Daniel Schwarz

Warum die Klingel im “Vakuum“ wirklich nicht zu hören ist

Weitere Effekte

- **Mehrfachreflexionen** zwischen den Wänden des Aufbaus: Dies liegt an der viel größeren Schallkennimpedanz von Glas (auch Gummi) gegenüber Luft, erst recht gegenüber dünner Luft. Dadurch ist es in der Glasglocke lauter, als es ohne diese wäre.
- **Stehende Wellen:** Es gibt erstens Minima und Maxima (siehe Abb. 5) und zweitens sind diese je nach Konstellation des Aufbaus mal stärker und mal schwächer. Die Streuung der Messkurven rührt vermutlich daher.
- **Biegeschwingungen:** Das Glas ist viel dünner als die Wellenlänge darin (wegen der großen Schallgeschwindigkeit in Glas). Mit einem Mikrofon bemerkt man außen bei 24 kHz Schwingungsbäuche und –knoten. Außerdem wird der Messwert deutlich kleiner, wenn man nur seitlich anfasst. Die einfache Theorie mit der Schallkennimpedanz (Reflexionsfaktor) ist wegen dem dünnen Glas nicht mehr anwendbar.
- Wegen des dünnen Glases und vermutlich **Reibung** ist es innen trotz der Mehrfachreflexionen bei weitem nicht so laut, wie nach einfacher Berechnung des Reflexionsfaktors mit den Schallkennimpedanzen zu erwarten wäre.
- **Kleine Änderung der Schallgeschwindigkeit:** Zwischen 13 und 1000 mbar ungefähr 1,6 % laut Abbey und Barlow (1948). Diese kleine Änderung kann sich schon auf die stehenden Wellen, die man je nach Aufbau und Frequenz gerade hat, auswirken, insbesondere wenn sich das Mikrofon in einem Minimum befindet (schlimmstenfalls von Null nach endlich).
- Die **Auslenkung** des jeweiligen Schallgebers könnte bei großen **Drücken** ggf. abnehmen.
- **Kaltverschweißen:** Der Klöppel an der Klingel verbindet sich kurzzeitig mit ihr, so dass Späne entstehen, bei 1000 mbar genauso wie im Vakuum.



Abb. 4

Nachweis stehender Wellen in der Glasglocke

Sowohl mit einem Lautsprecher (Sinus), als auch mit der Klingel selbst konnten stehende Wellen bei 1000 mbar nachgewiesen werden: Hier wurde ein Mikrofon in der Glasglocke mit der Klingel verschoben. Die kleine Periode von ca. 2,67 cm entspricht $\lambda/2$ bei einer der Hauptfrequenzen der Klingel.

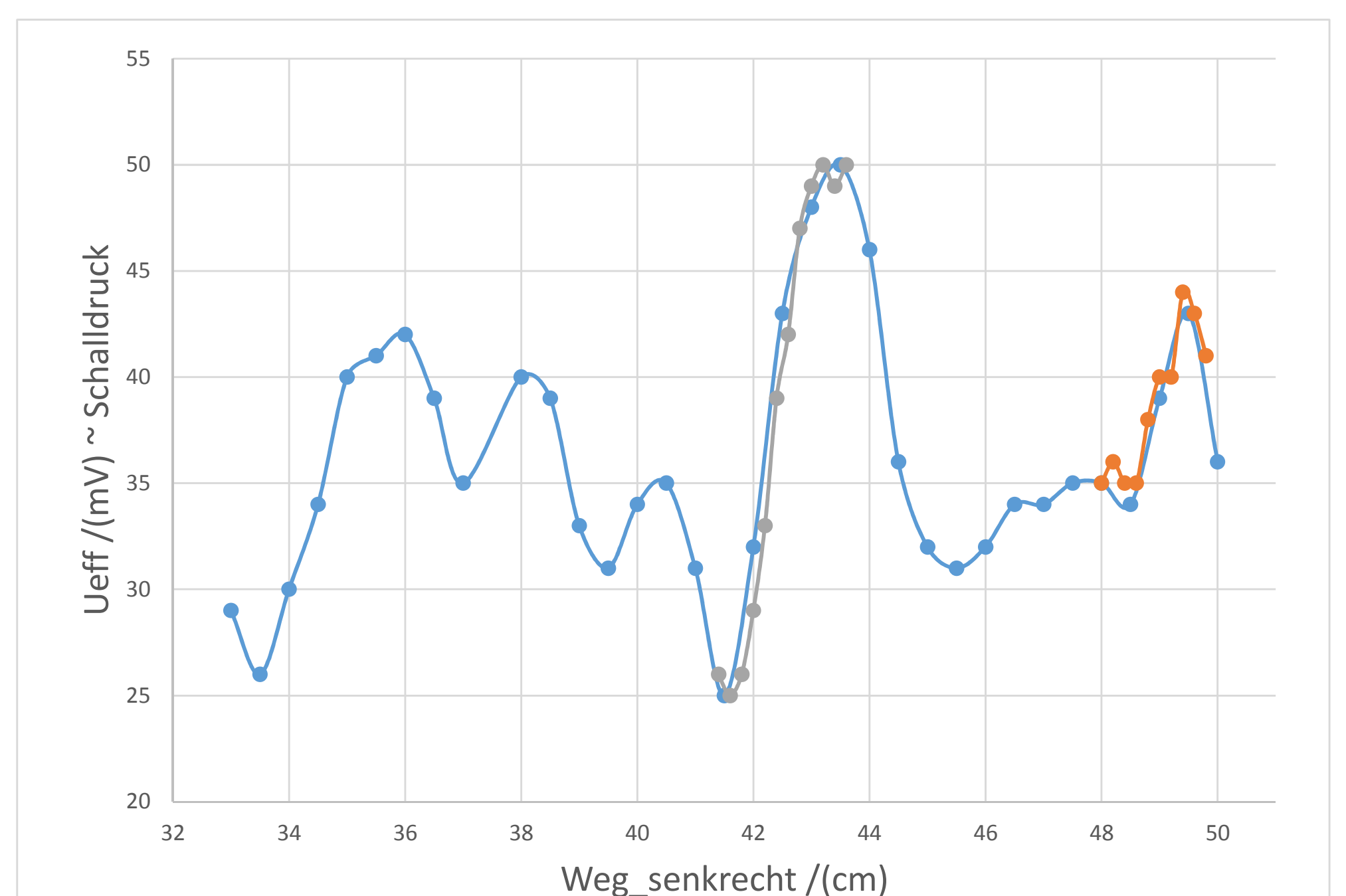


Abb. 5

Messprobleme

- Bei größeren Drücken kann die aufgenommene Energie des Mikrofons ($F \cdot s = F \cdot \frac{F}{D} \sim \frac{p_s^2}{D} \sim \frac{p_{vak}^2}{D}$) ggf. in die Nähe der Schallenergie ($I \sim p_{vak}$) kommen. Im Extremfall ändert sich dann der gemessene “Schalldruck“ bei Druckänderung nicht mehr:

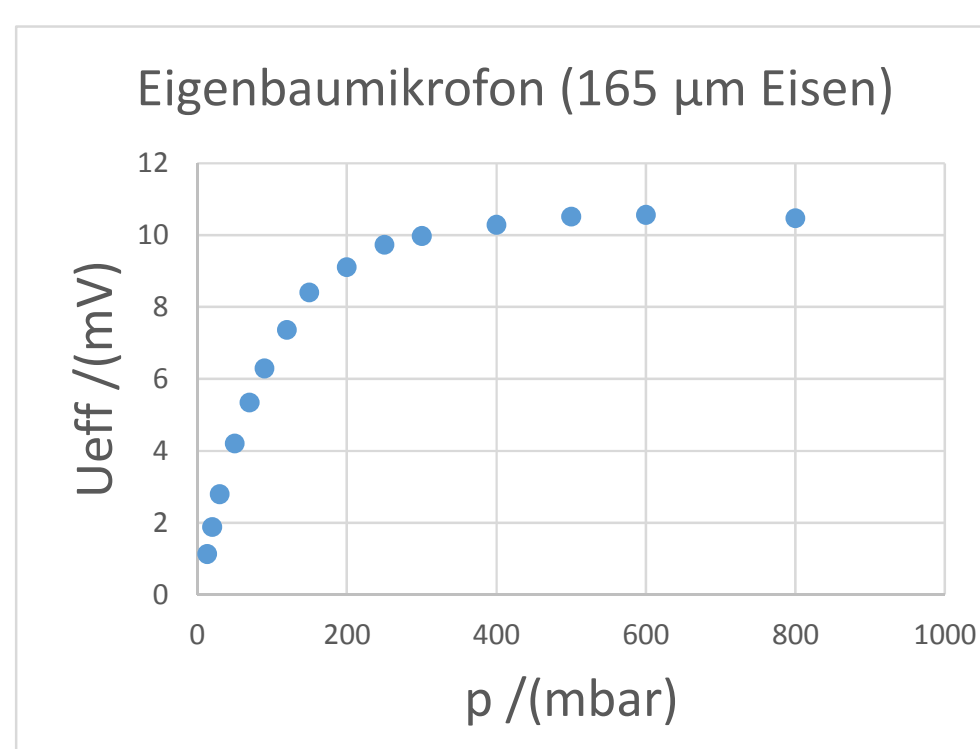


Abb. 6

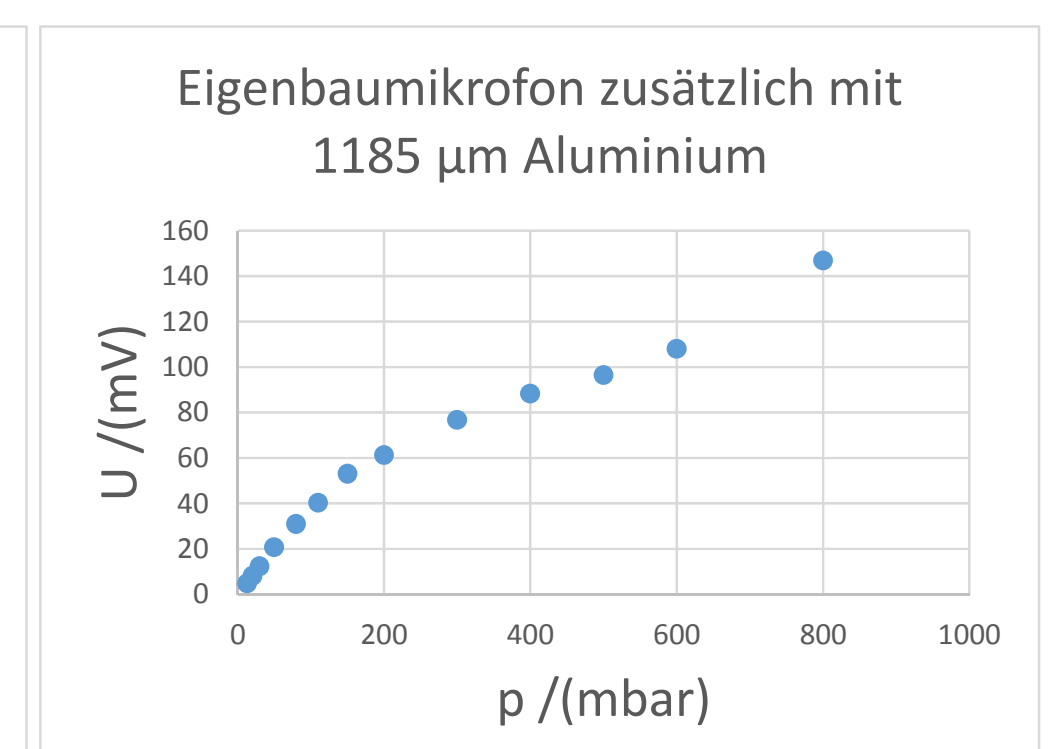


Abb. 7

- Die Frequenz des Summers ist ein wenig druckabhängig (2,73 kHz bis 2,79 kHz).
- Nach schneller Änderung des Vakuumdrucks ändern sich die Schalldruckwerte erst eine Weile, die Ursache ist unbekannt.

Literatur

- Fleming, R. (2012): Don't Believe Everything the Professor Tells You!. IEEE Electrical Insulation Magazine - IEEE ELECTR INSUL MAGAZINE, Vol. 28, No. 1, S. 3
 Abbey, R. L. und Barlow, G. E. (1948): The velocity of sound in gases. CSIRO Australia, S. 183