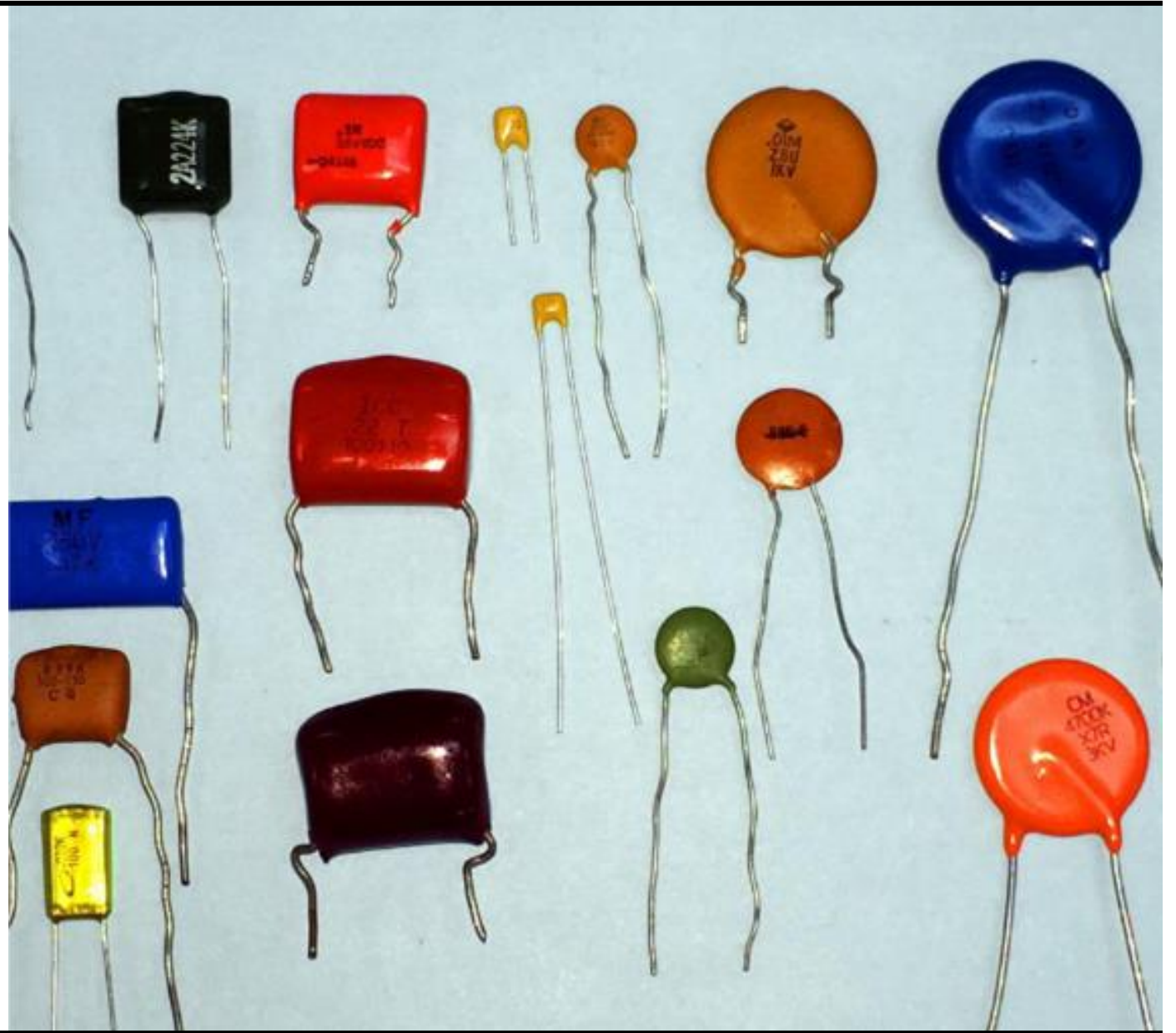

Turnaj mladých fyziků Fyzikální týmová soutěž středoškoláků 2026-2027

Úloha č. 4. Zpívající kondenzátor

Natalia Podoliak, Fyzikální ústav
podoliak@fzu.cz

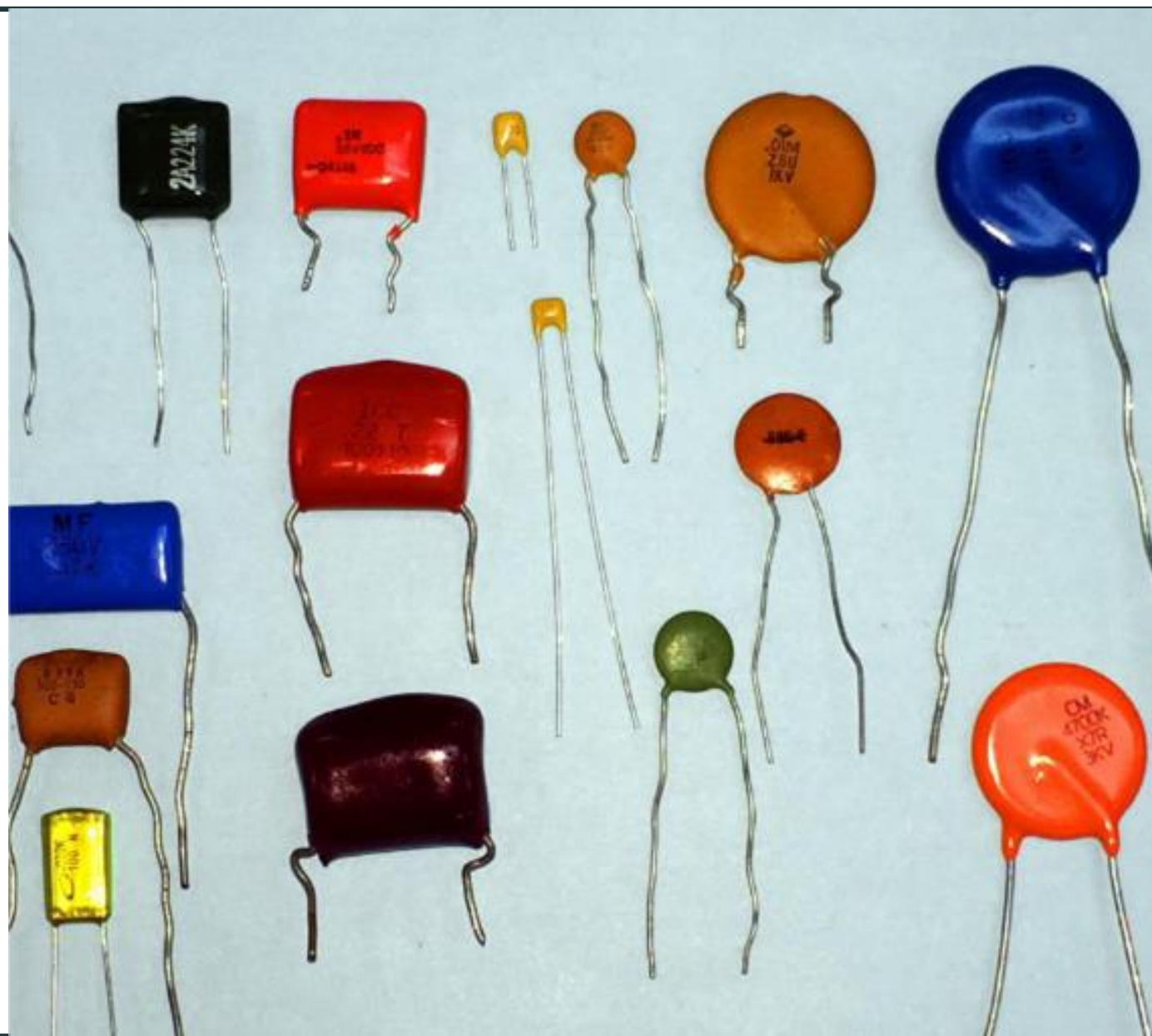
4. Singing capacitor

Certain types of ceramic capacitors emit an audible sound when an alternating voltage is applied across them. Investigate the characteristics of the sound produced and how they depend on relevant parameters, such as voltage, frequency, and capacitor properties.



4. Zpívající kondenzátor

Při přiložení střídavého napětí vydávají některé typy keramických kondenzátorů slyšitelný zvuk. Prozkoumejte vlastnosti vytvořeného zvuku a jejich závislost na relevantních parametrech, jako je napětí, frekvence a vlastnosti kondenzátoru.



4. Zpívající kondenzátor

Ukázka

<https://www.youtube.com/watch?v=q9rAD2Cjfog>

Kondenzátor

Kondenzátor se skládá ze dvou **vodivých** desek (*elektrod*) oddělených **dielektrikem**. Na každou z desek se přivádí **elektrické náboje** opačné polarity, které se vzájemně přitahují **elektrickou silou**. Dielektrikum mezi deskami nedovolí, aby se **částice** s nábojem dostaly do kontaktu, a tím došlo k *neutralizaci*, jinak *vybití* elektrických nábojů. Přitom dielektrikum svou **polarizací** zmenšuje sílu elektrického pole nábojů na deskách a umožňuje tak umístění většího množství náboje.



Kondenzátor

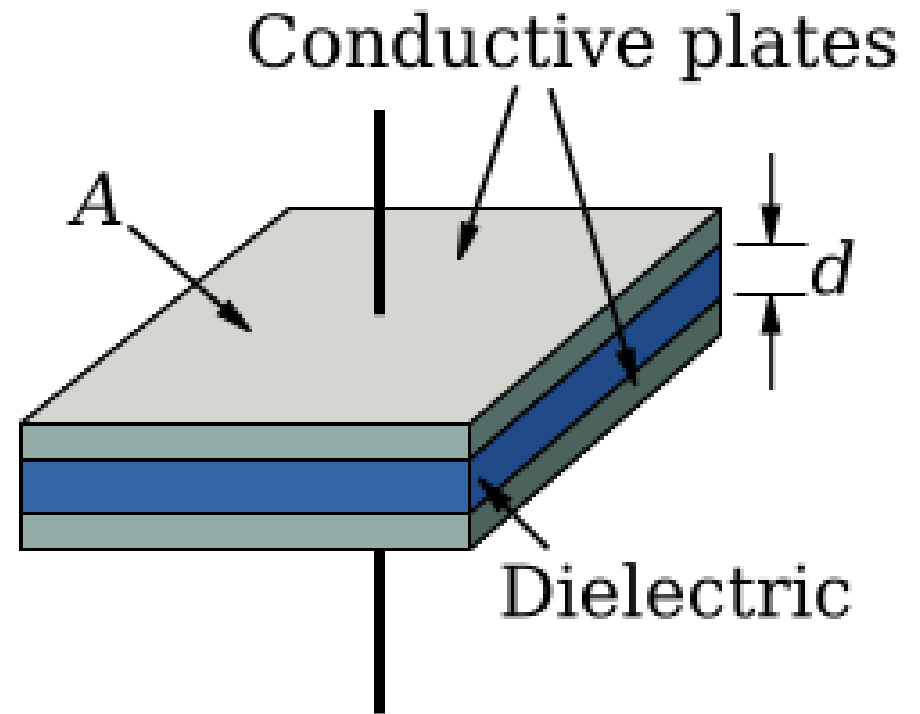
Elektrické napětí

$$V = \int_0^d E(z) dz = Ed = \frac{\sigma}{\varepsilon} d = \frac{Qd}{\varepsilon A}$$

Elektrická kapacita

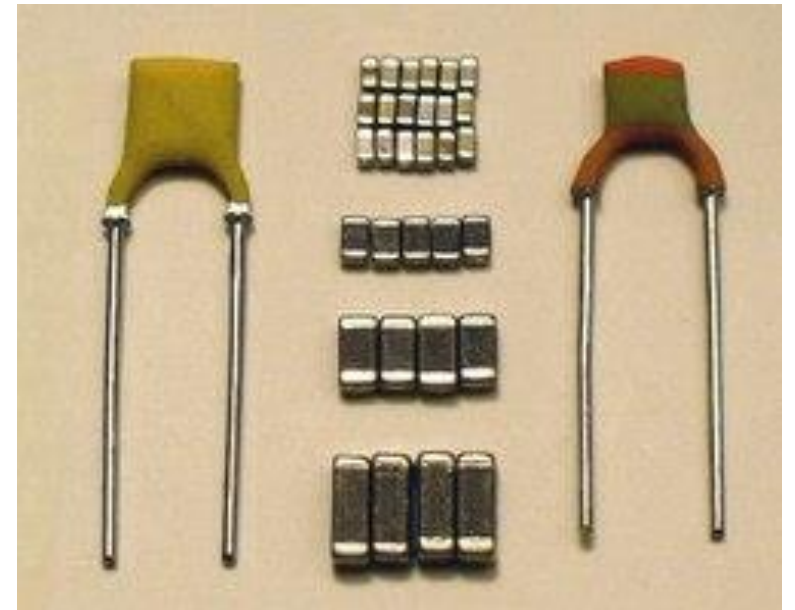
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\varepsilon A}{d}$$

ε – permitivita dielektrického materiálu



Keramický kondenzátor

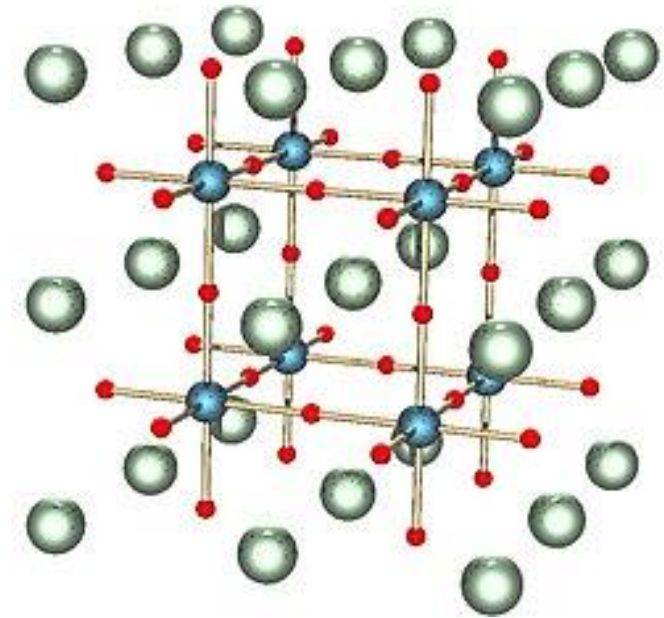
- **jednovrstvé** (single layer) – kapacita do řádu nF až kolem 100 nF u větších provedení.
- **vícevrstvé** (**MLCC** – multi layer chip capacitors) – výhodou je výrazné navýšení kapacity, minimální indukčnost.
 - s paraelektrickým dielektrikem – kapacita do stovek nF, až několik μF u větších provedení
 - s feroelektrickým dielektrikem – kapacita do stovek μF



A selection of ceramic capacitors: fixed leaded disc capacitors on the left and right; multilayer ceramic chip capacitors (MLCC) in the middle

Titaničitan barnatý (BaTiO_3)

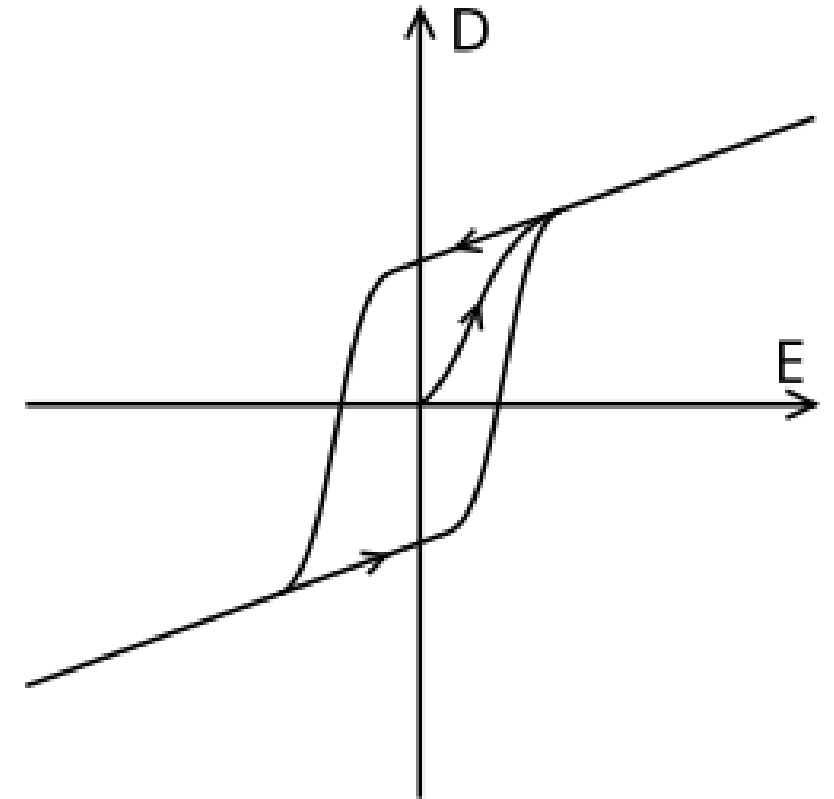
Objevený v 1921, feroelektrický keramický materiál titaničitan barnatý s permitivitou v řádu 1 000, cca desetkrát větší než u skídy, začal být běžně využíván v aplikacích.



Feroelektrika

Ferolektrika: Trvalá elektrická polarizace materiálu, která existuje i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole a může být přepnuta mezi několika ekvivalentními stavy.

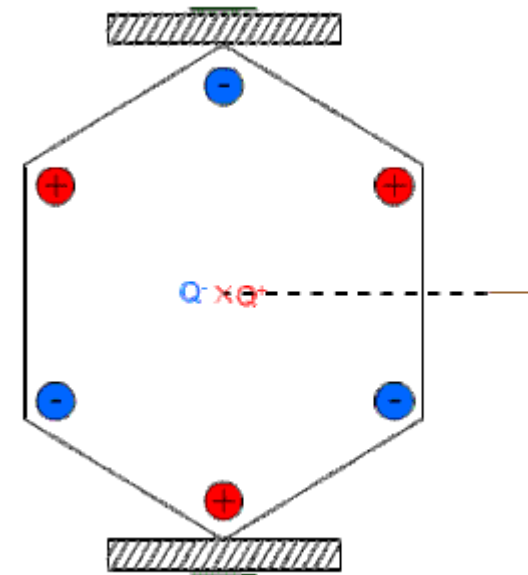
Feroelektrické materiály mají zároveň **piezoelektrické** vlastnosti (generují an elektrický náboj když jsou mechanicky stlačené)



Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev (z [řeckého](#) *piezein* (πιέζειν) – *tlačit*) je schopnost [krystalu](#) při [deformování](#) generovat [elektrické napětí](#). Může se vyskytovat pouze u krystalů, které nemají [střed symetrie](#). Piezoelektrický jev je lineární.

Opačný jev, kdy se krystal deformuje ve vnějším elektrickém poli, se nazývá **nepřímý piezoelektrický jev**.



Piezoelektrický jev

Elektrická indukce $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$, nebo $D_i = \sum_j \varepsilon_{ij} E_j$

Maxwellovy rovnice $\nabla \cdot \vec{D} = 0$, $\nabla \times \vec{E} = 0$

Hookův zákon (též **Hookeův zákon**) popisuje pružnou [deformaci](#) materiálu působením [síly](#), za předpokladu malých sil a malých deformací, které po odlehčení zmizí.

$$\mathbf{S} = \mathbf{sT},$$

S_{ij}
↑
tenzor deformace

$= \sum_{k,l}$
↑
tenzor poddajnosti

$S_{ijkl} T_{kl}$
↑
tenzor napětí

Piezoelektrický jev

Spojené rovnice:

$$S_{ij} = \sum_{k,\ell} s_{ijkl} T_{k\ell} + \sum_k d_{ijk}^t E_k,$$

$$D_i = \sum_{j,k} d_{ijk} T_{jk} + \sum_j \varepsilon_{ij} E_j,$$

Elektrostriktce

Elektrostriktce je fyzikální jev, při kterém vlivem vnějšího [elektrického pole](#) nebo pod vlivem změny elektrického pole dochází k deformaci [dielektrik](#). Deformace bývá přímo úměrná druhé mocnině intenzity elektrického pole a nedochází ke změně směru deformace s otočením směru elektrického pole

$$S_{ij} = Q_{ijkl} P_k P_l$$

↑
tenzor deformace

$$Q_{ijkl} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S_{ij}}{\partial P_k \partial P_l}$$

↑
tenzor elektrostriktce

Mikrofonný efekt

Feroelektrické kondenzátory mohou trpět **mikrofonným efektem**, produkovat zvuky kvůli nepřímému piezoelektrickému efektu.

Lidské ucho rozezná vibrace 20 - 20,000 Hz

Zdroje:

- <https://www.youtube.com/watch?v=F2gX-R1k7MM>
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor>
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Ceramic_capacitor
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Barium_titanate
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Ferroelectricity>
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostriction>
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Microphonics>
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Hearing_range
-