

Acoustic decaphonic piano

its mathematics, physics and sound

A. Bogucki^{1,2} and P. Nurowski^{2,3}

¹ Centrum Fizyki Teoretycznej, Polska Akademia Nauk

² Wydział Fizyki UW

³ Guandong Technion, Israel Institute of Technology

Part B

GRIEG meets Chopin

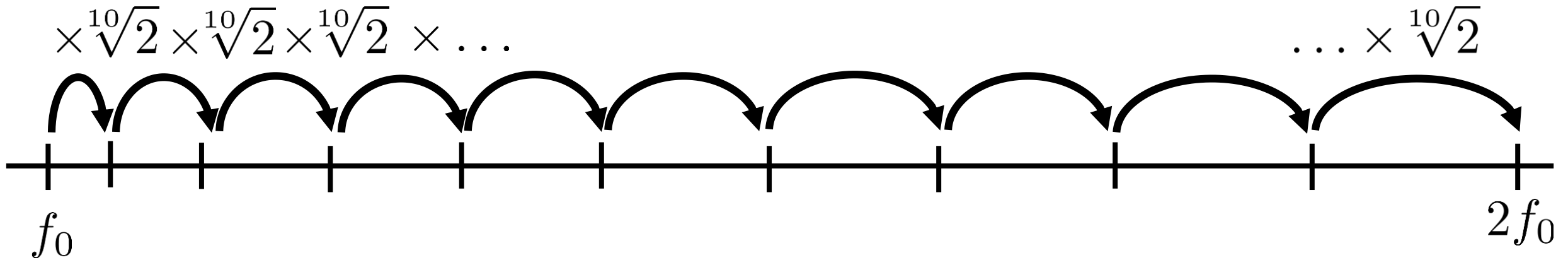
Warszawa, July 11, 2023

Photo by K. Nurowska



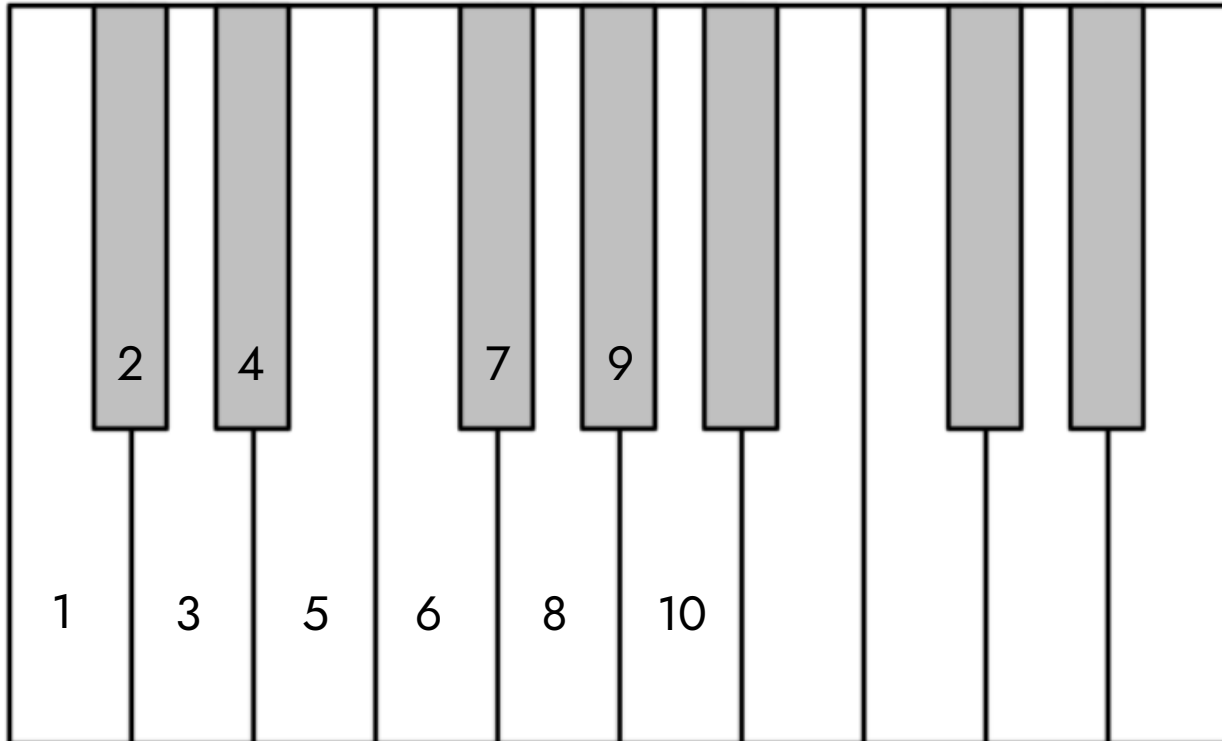
From math to physics

10 TET: we have procedure:



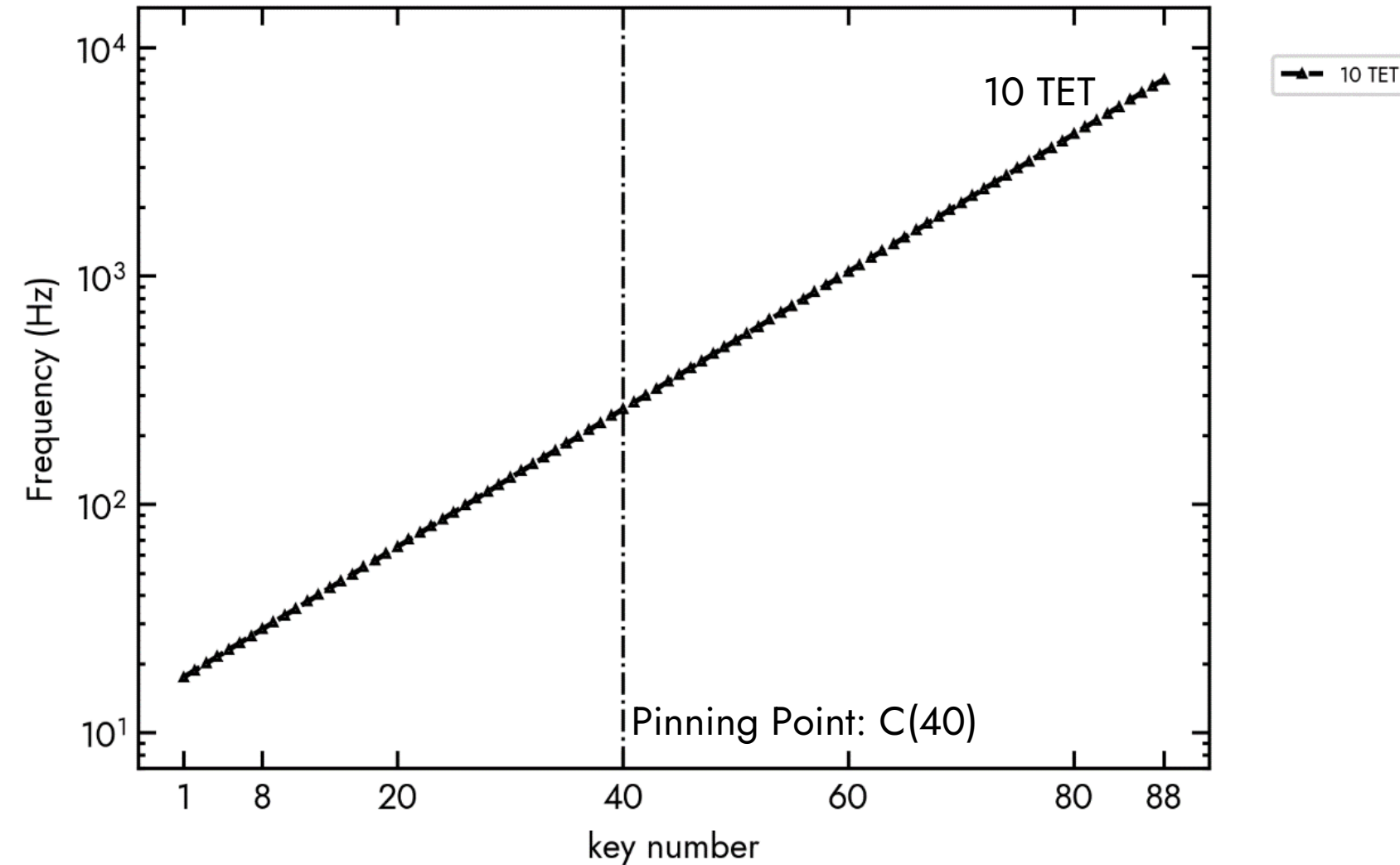
From math to physics

Start with C4: 261.63 Hz

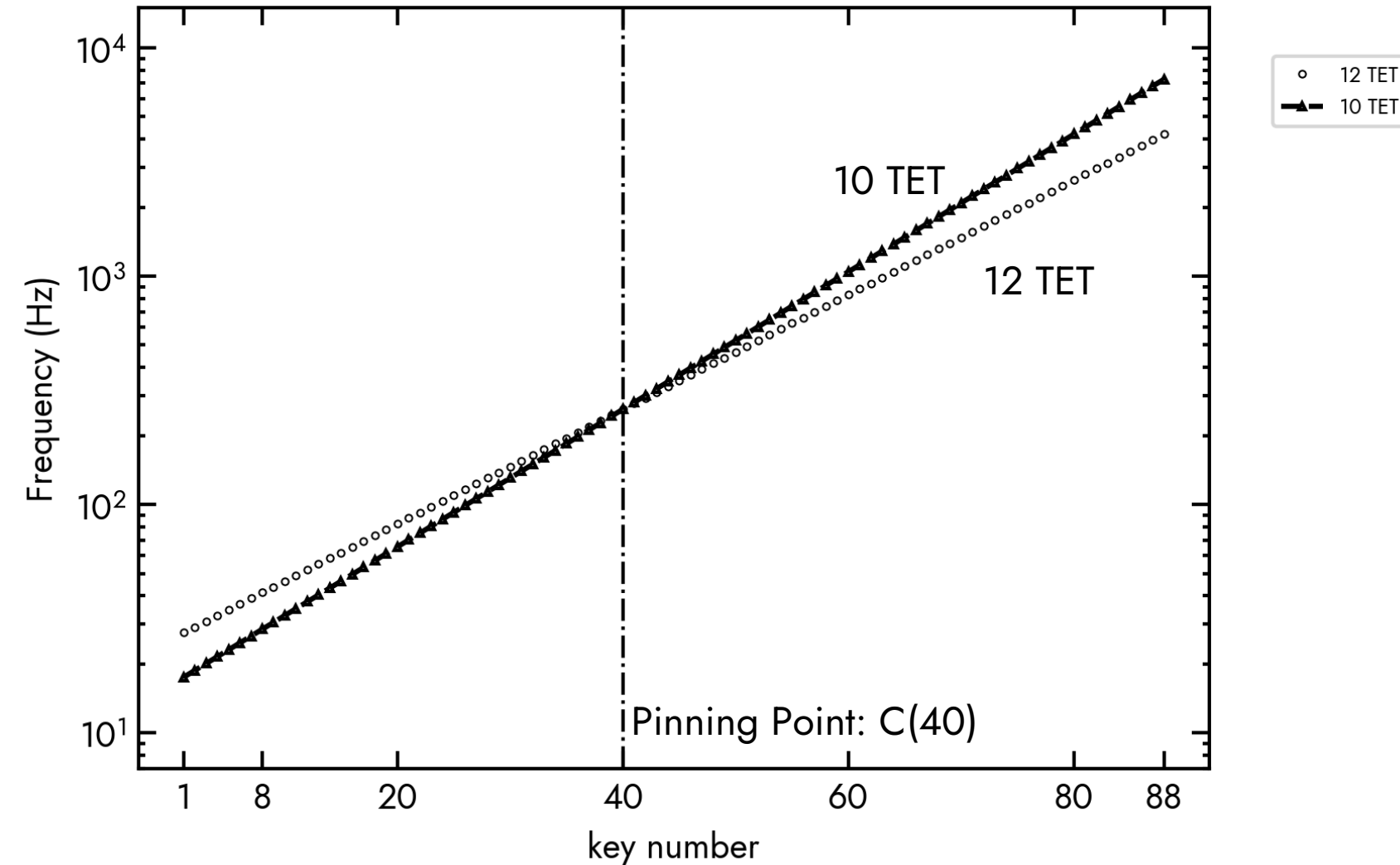


Result		
Step	f/f_0	f (Hz)
1	1.000	261.63
2	1.072	280.47
3	1.149	300.61
4	1.231	322.07
5	1.320	345.35
6	1.414	369.94
7	1.516	396.63
8	1.625	425.15
9	1.741	455.50
10	1.866	488.20
1	2.000	523.26

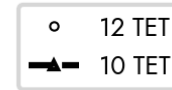
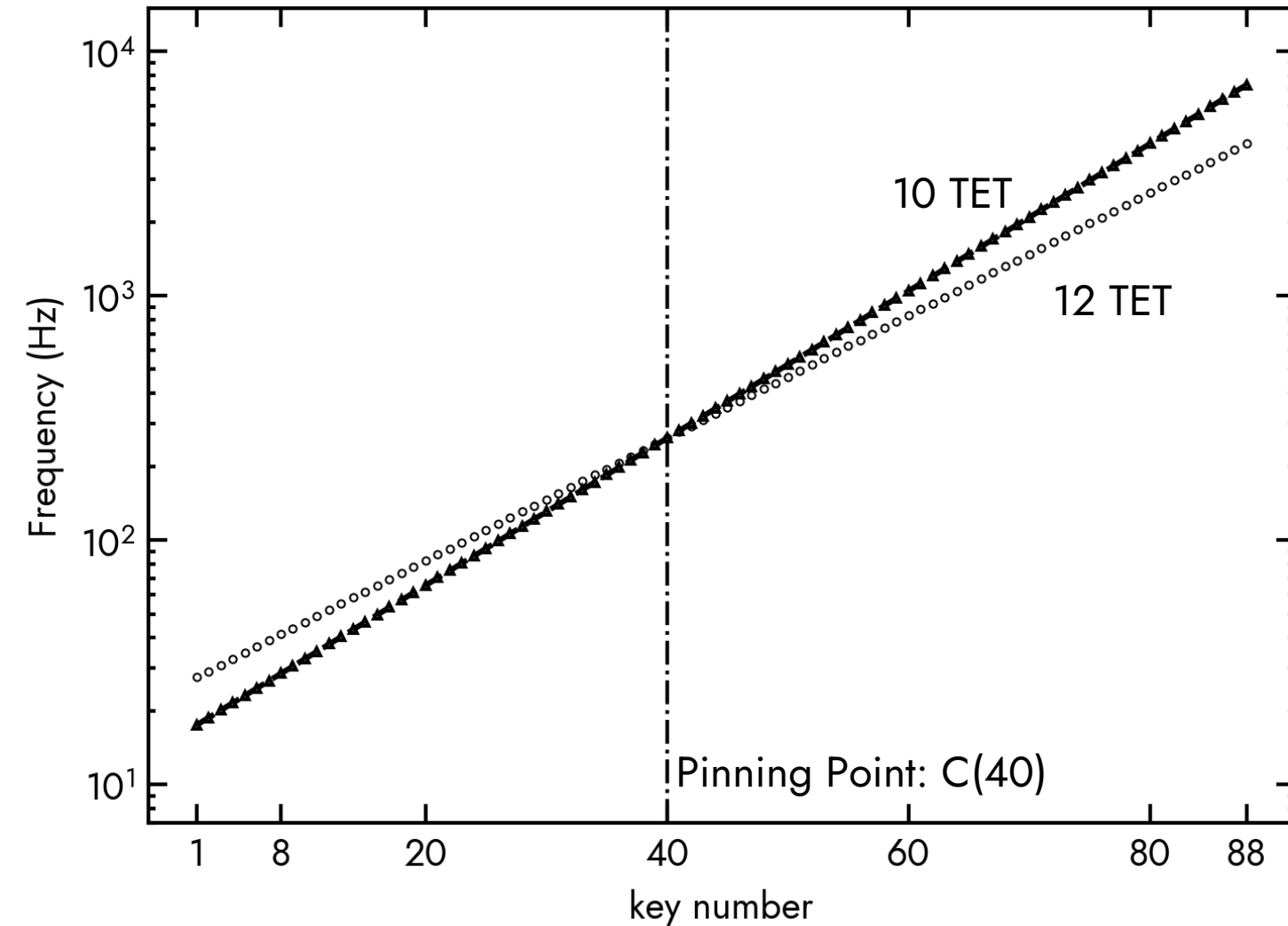
Frequency vs key number



Frequency vs key number

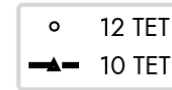
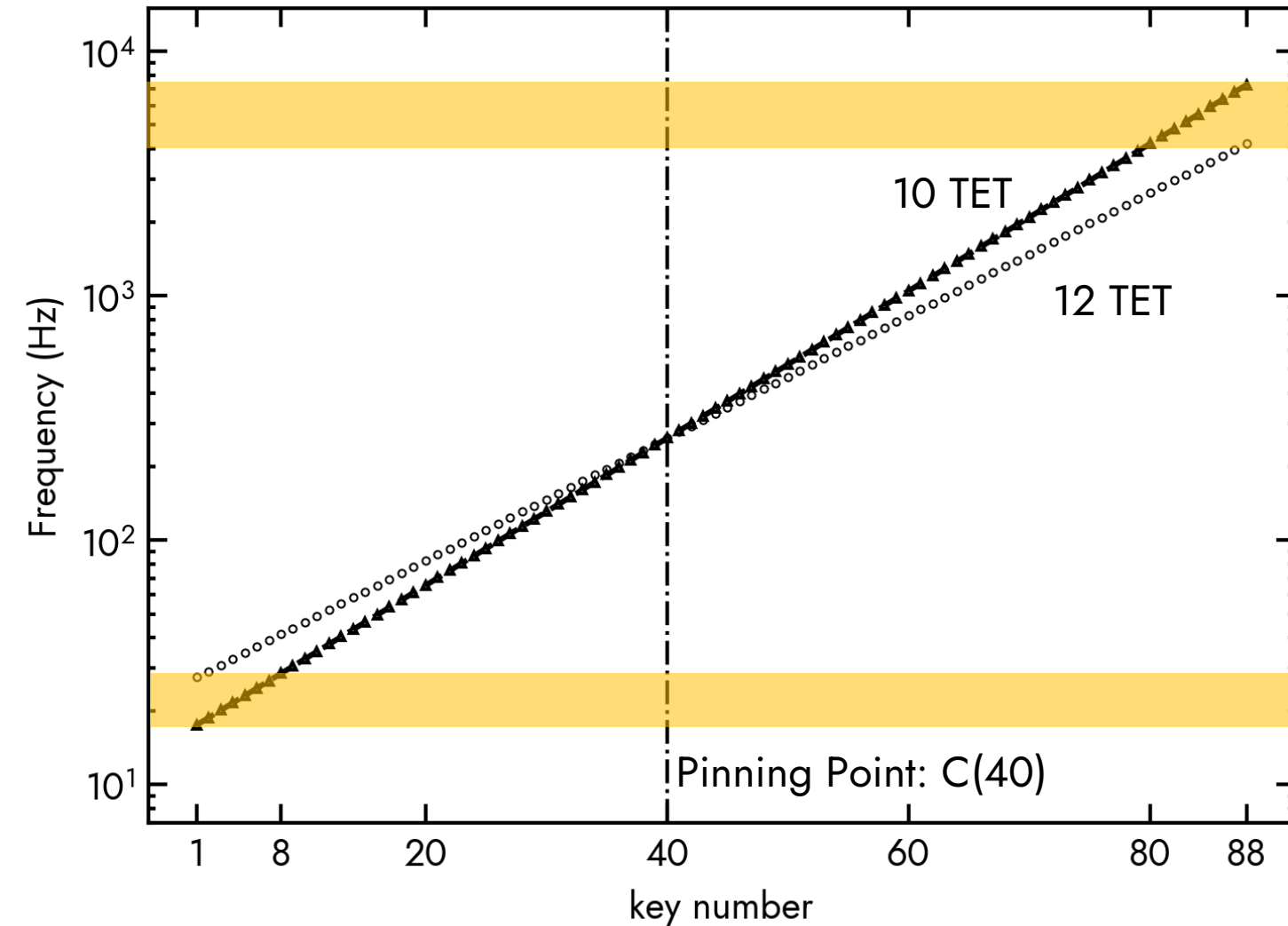


Frequency vs key number



scale	min	max
12 TET	26.24 Hz	3360 Hz
10 TET	16.72 Hz	5650 Hz

Frequency vs key number



scale	min	max
12 TET	26.24 Hz	3360 Hz
10 TET	16.72 Hz	5650 Hz

Extended instrument range!

Physics of a string

Frequency

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Speaking length of string

Linear density

Tension



Tension (N)

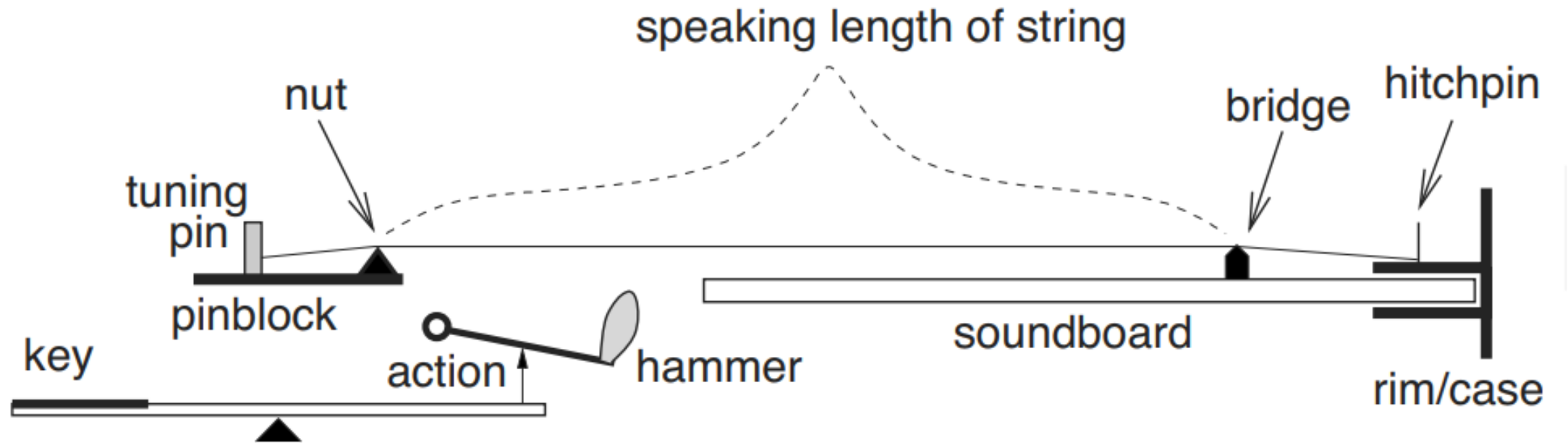
$$T = 4\mu f^2 L^2$$

Linear density:

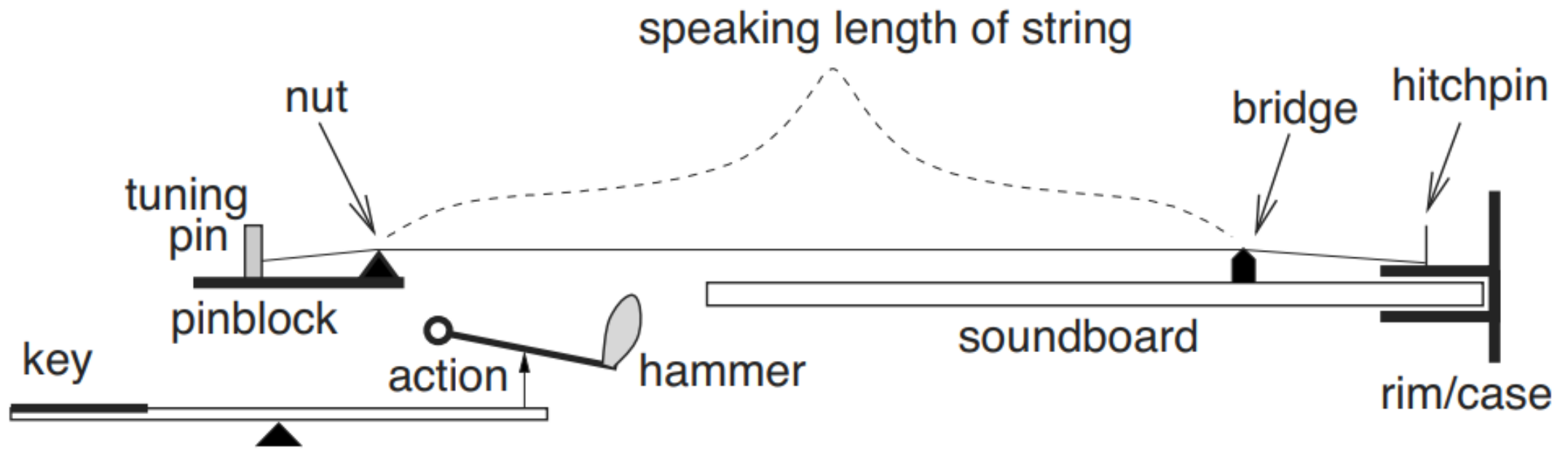
$$\mu = M/L = \rho V/L = \rho(SL)/L = \pi\rho(d/2)^2$$

String density

Speaking length

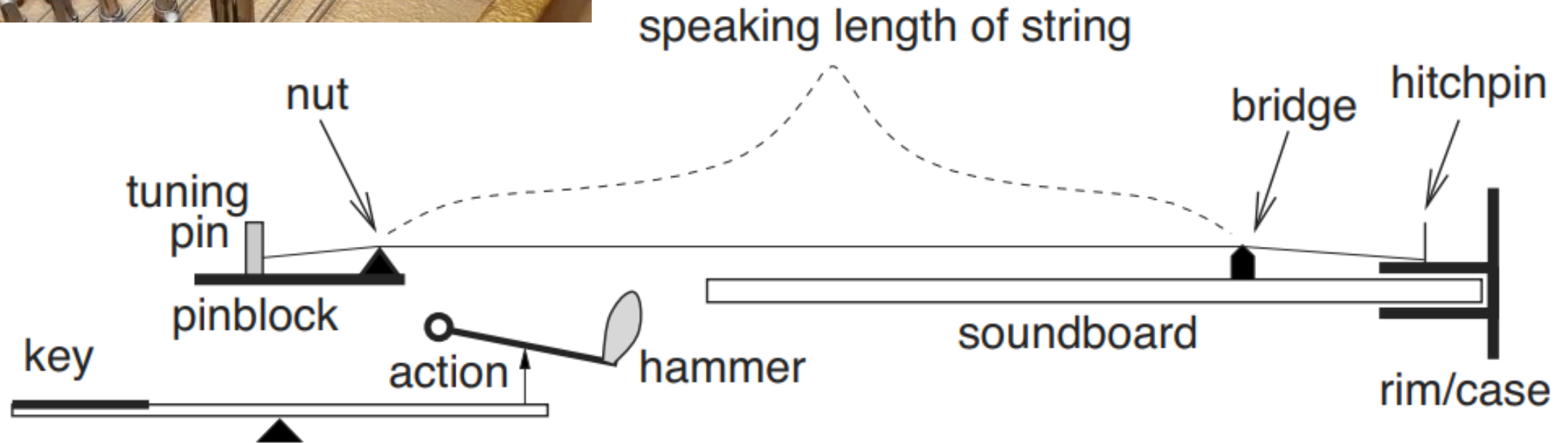


Speaking length

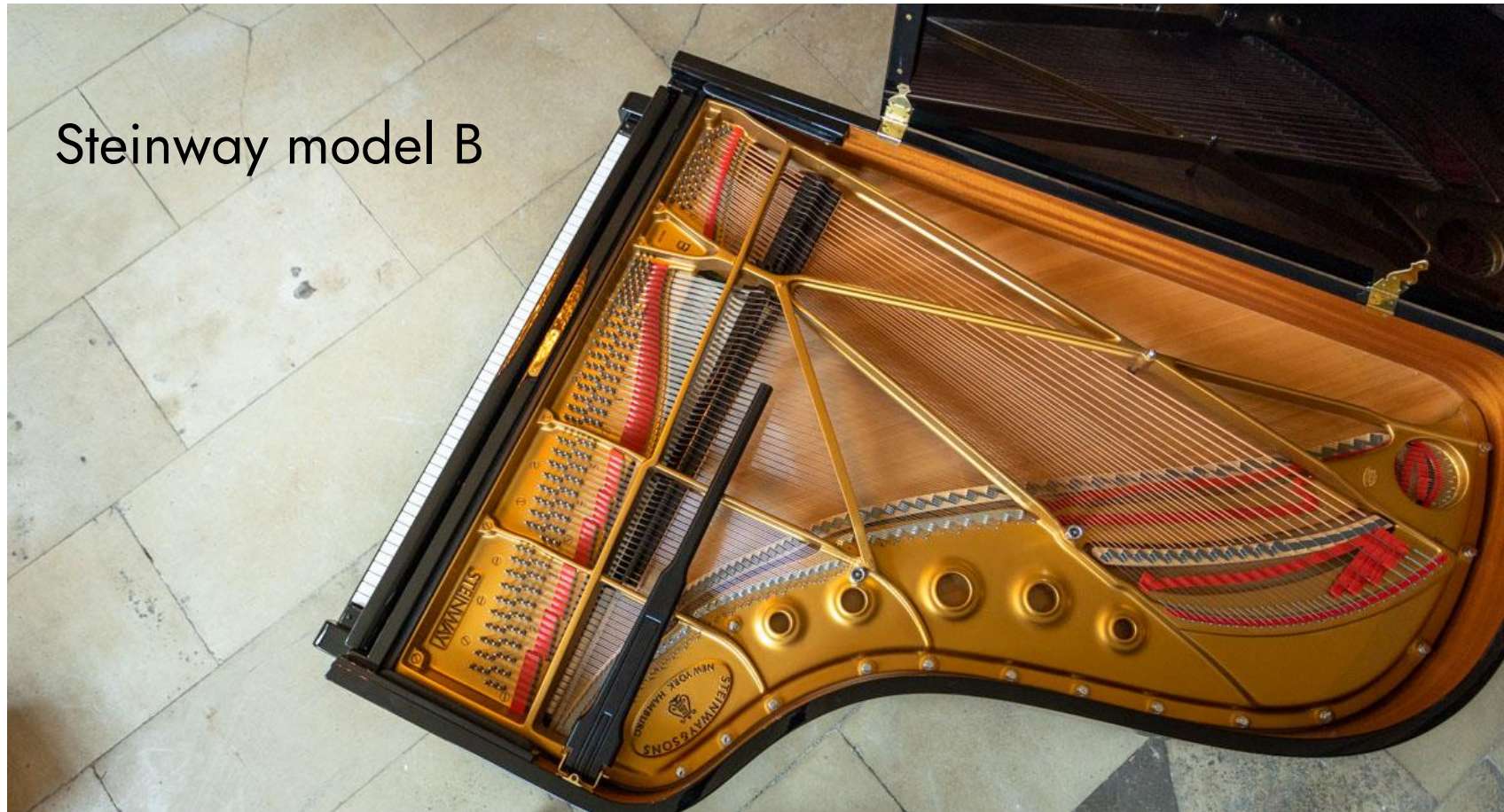


Speaking length

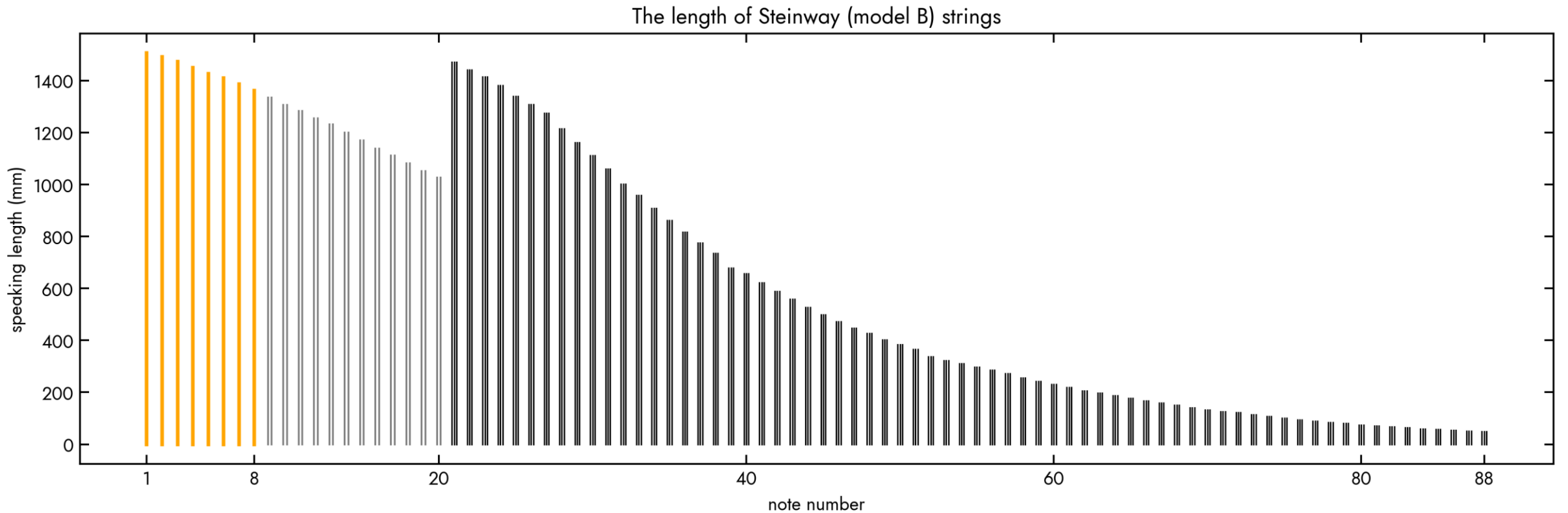
https://www.robertspianos.com/wp-content/uploads/2018/07/img_5b4d1142f22cf.png



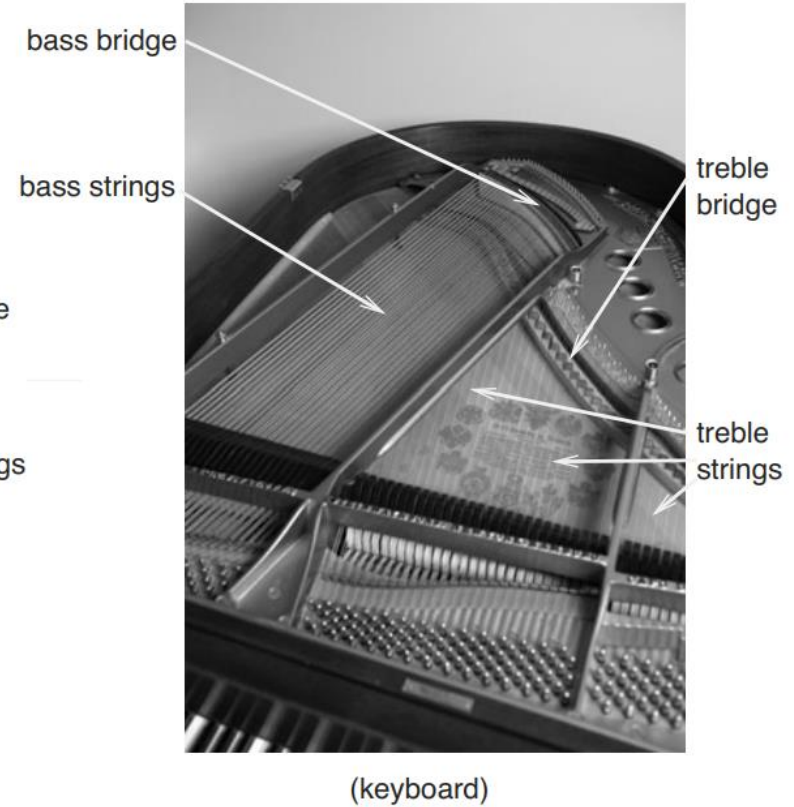
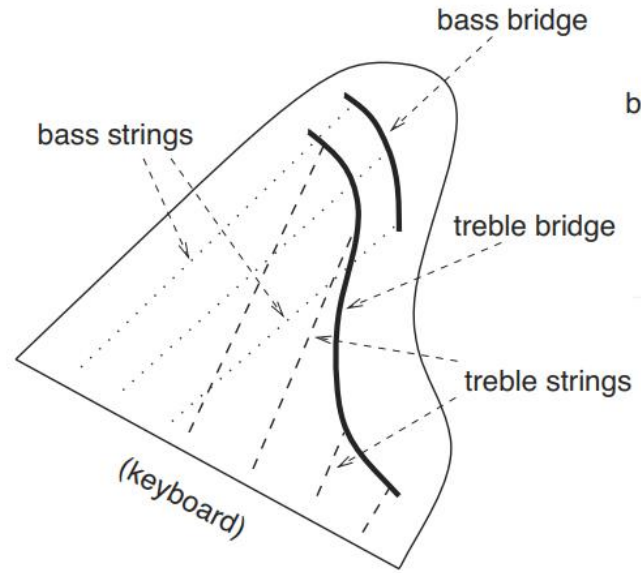
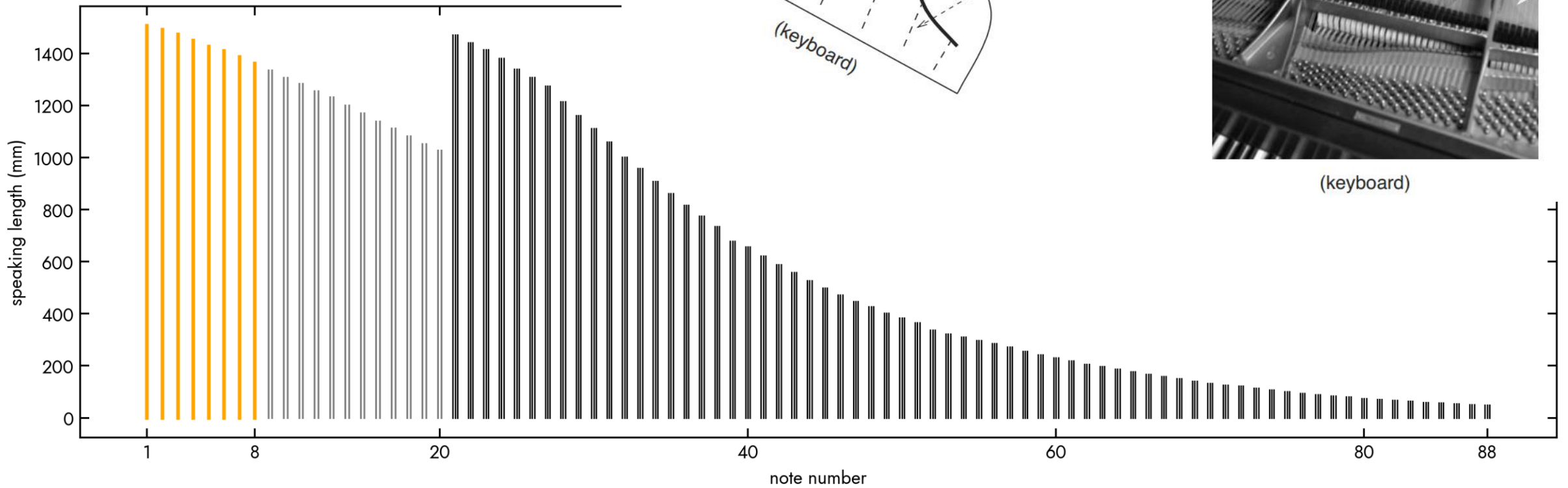
Speaking length



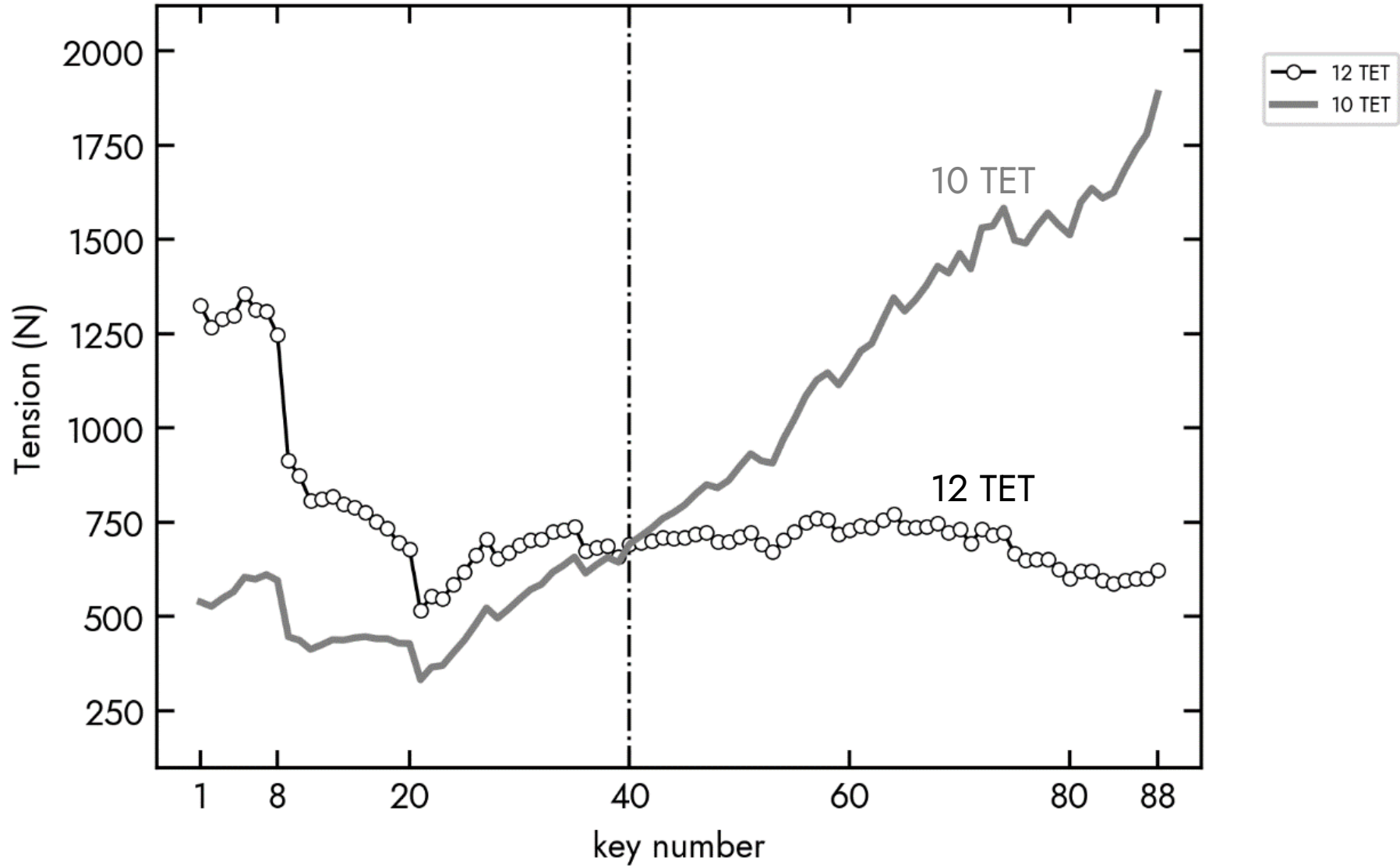
Speaking length



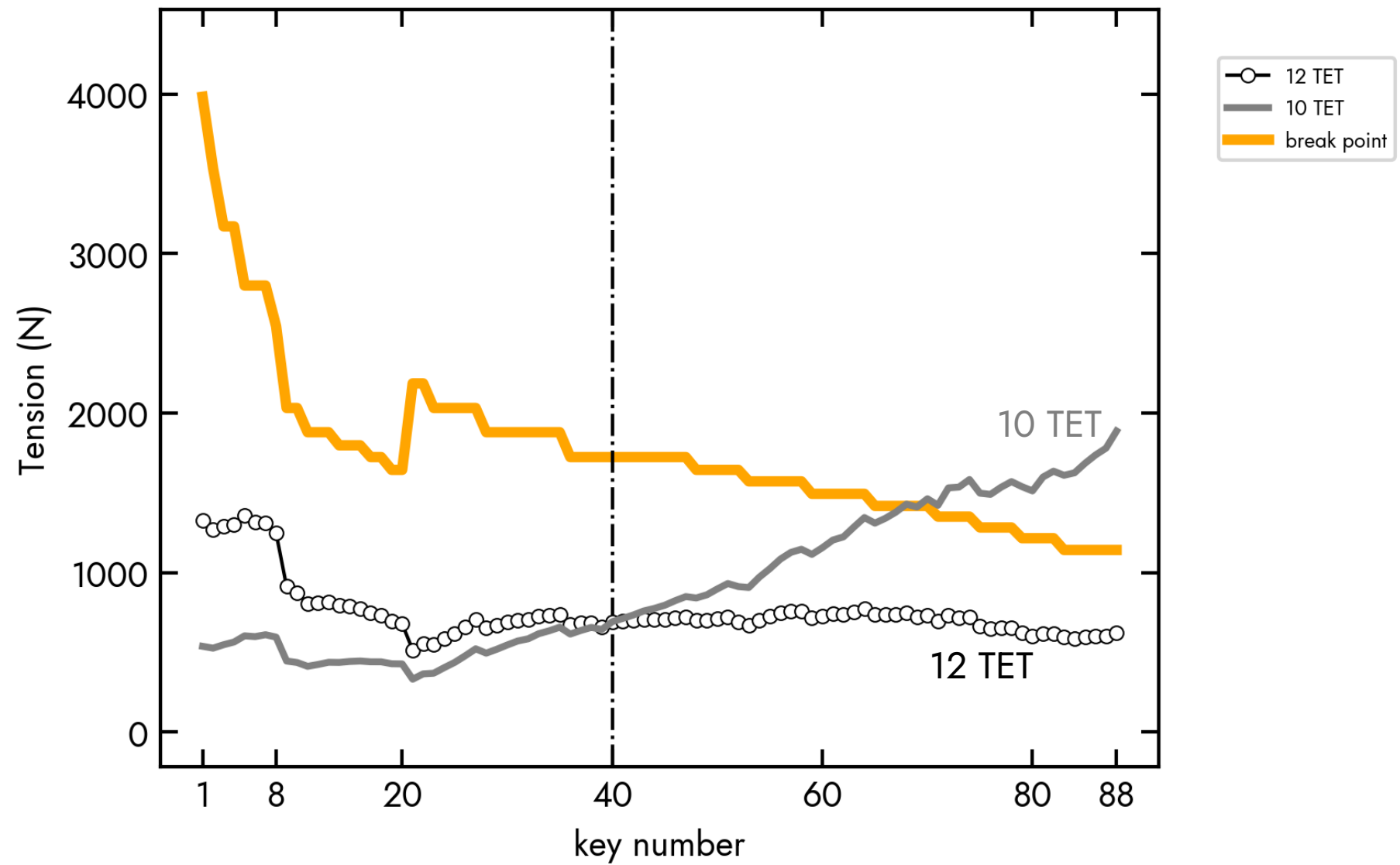
Speaking length



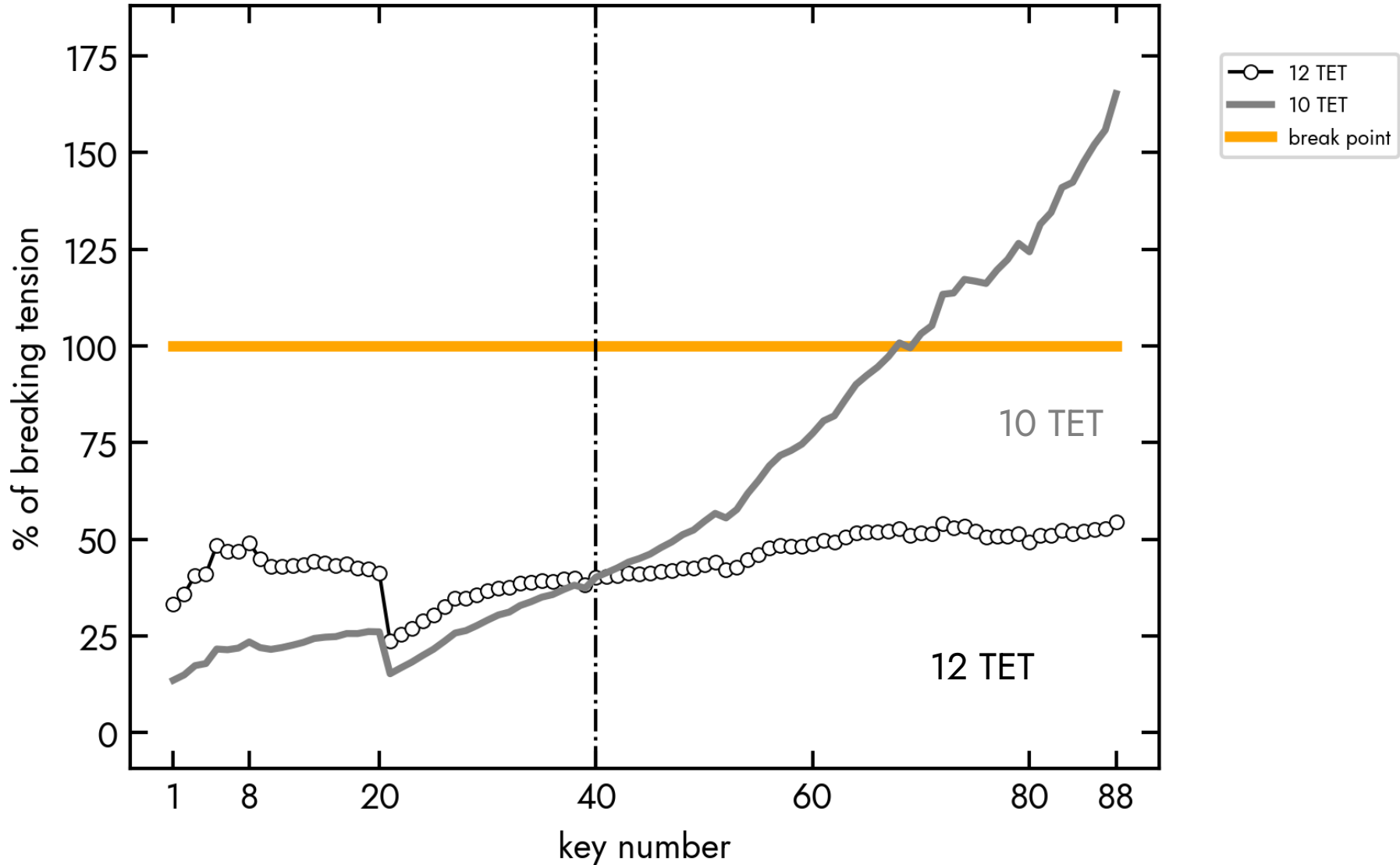
Tension



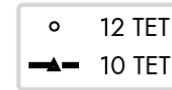
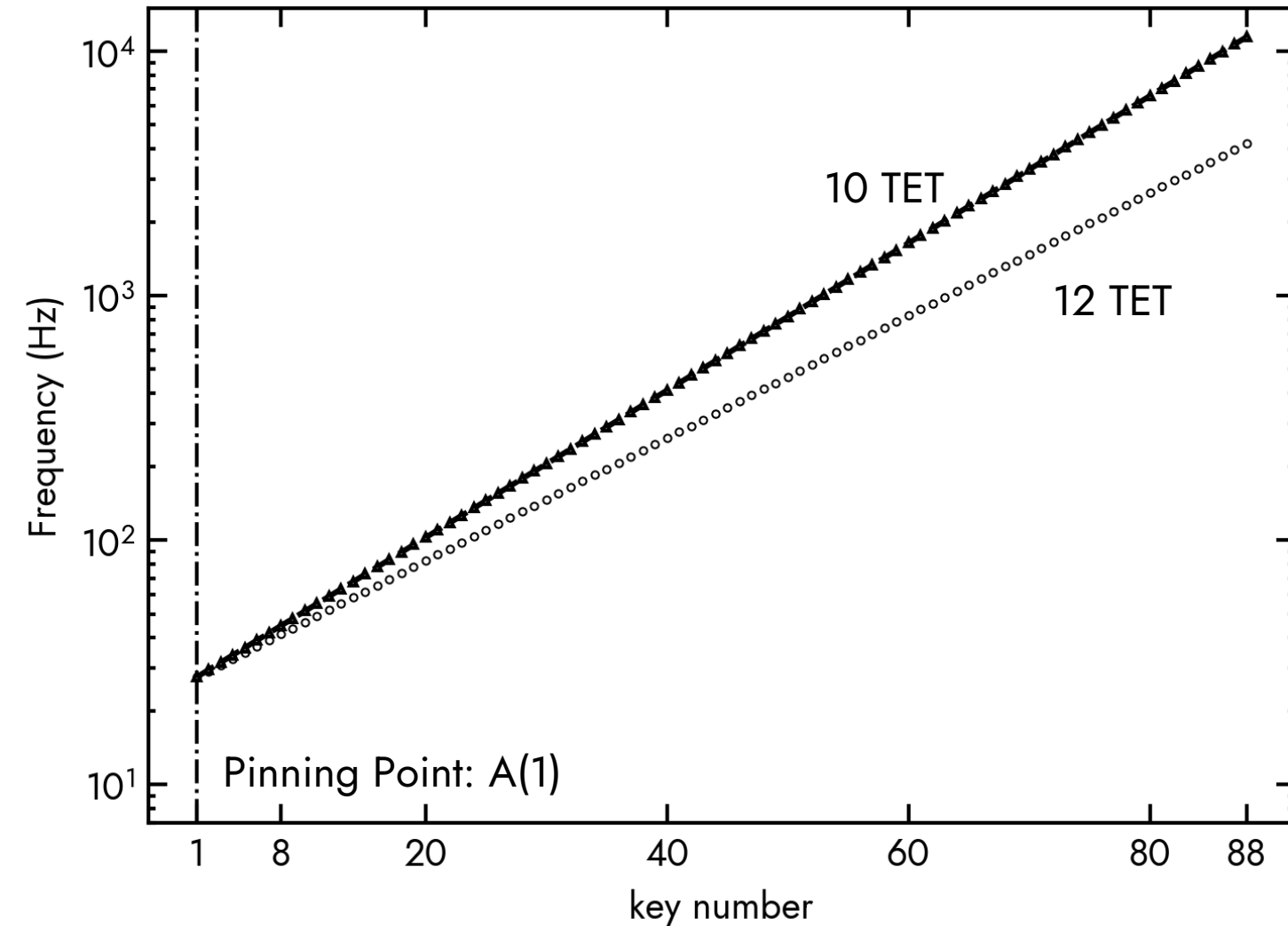
Tension



Tension as %

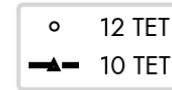
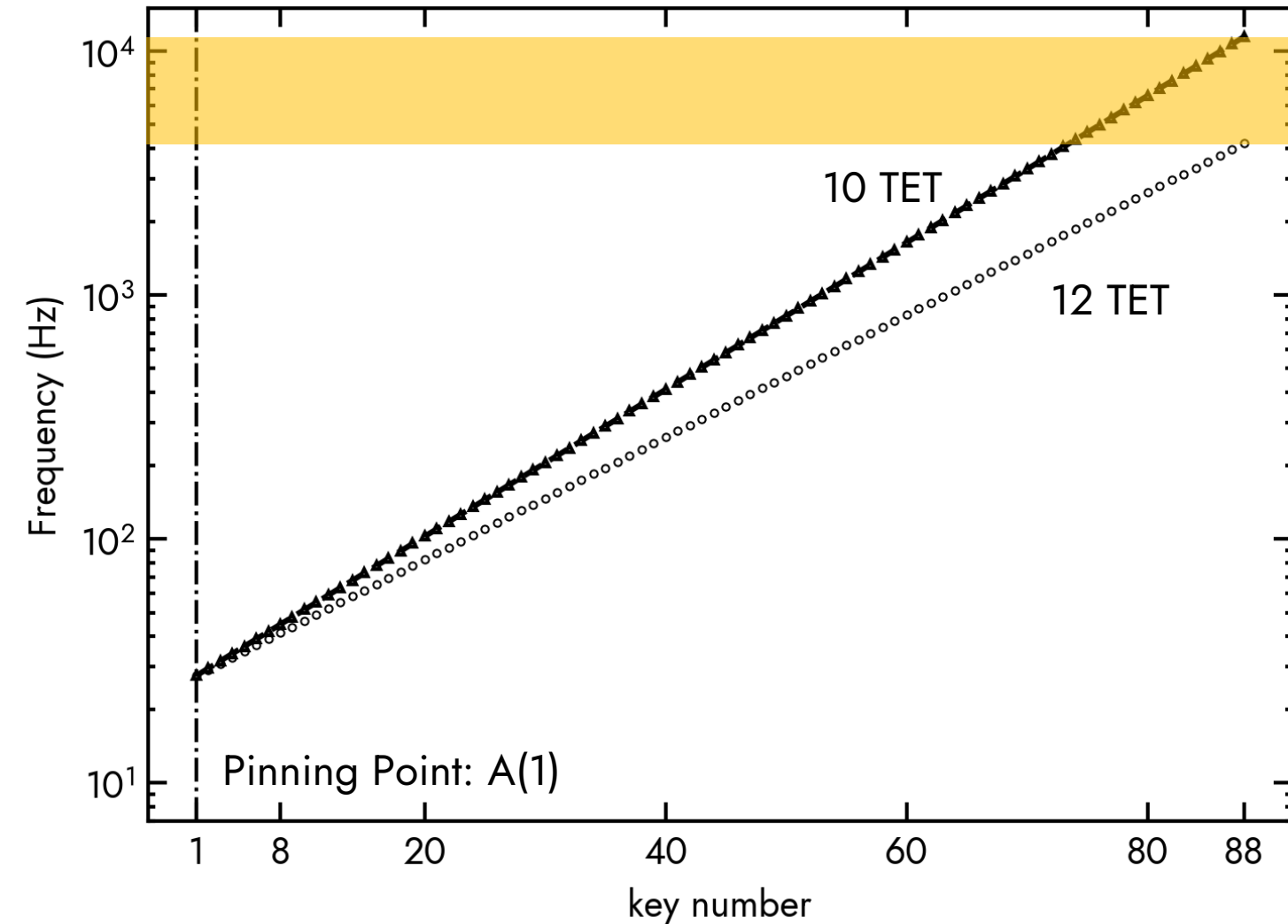


Frequency vs key number



scale	min	max
12 TET	26.24 Hz	3360 Hz
10 TET	16.72 Hz	11 436 Hz

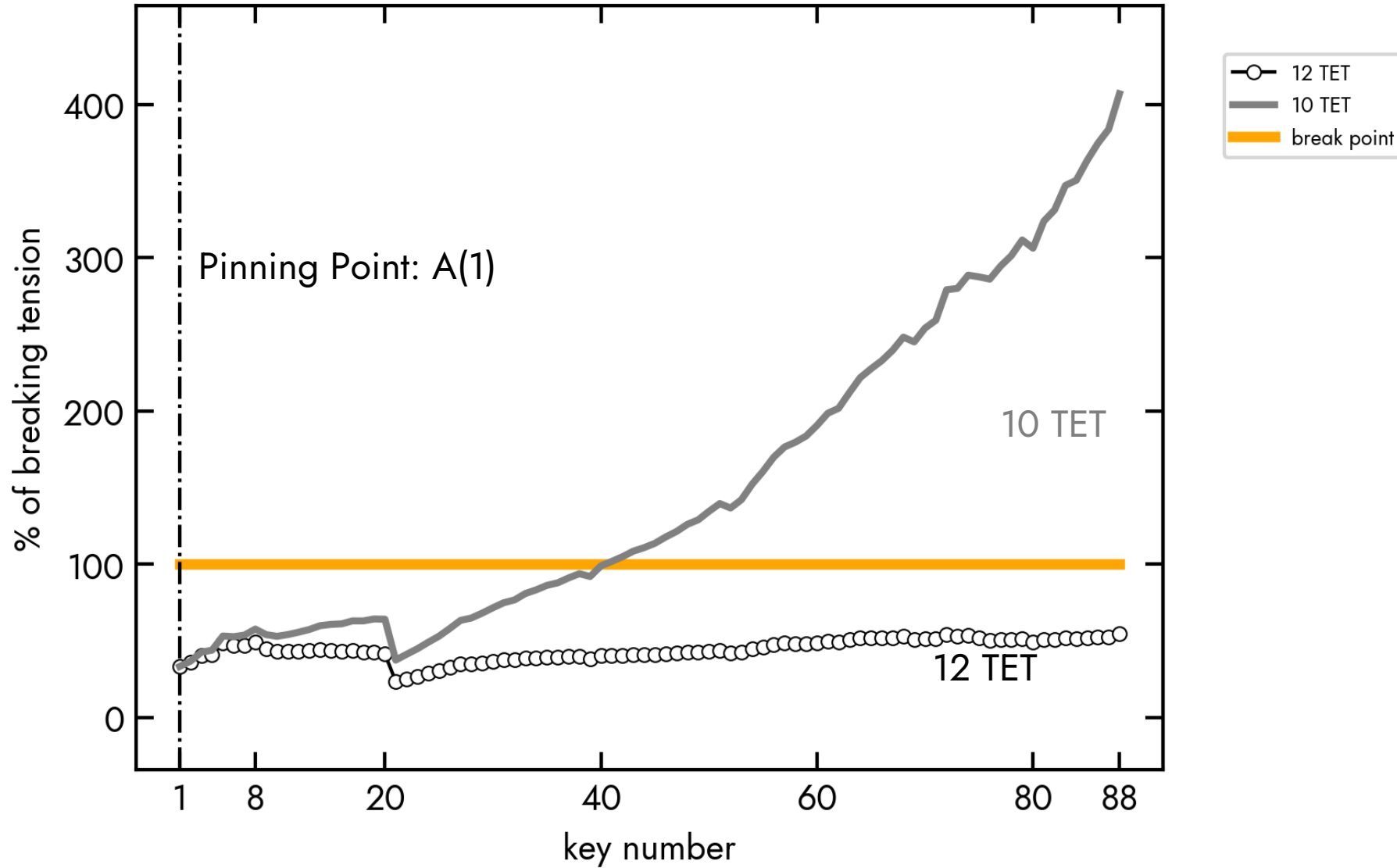
Frequency vs key number



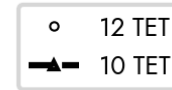
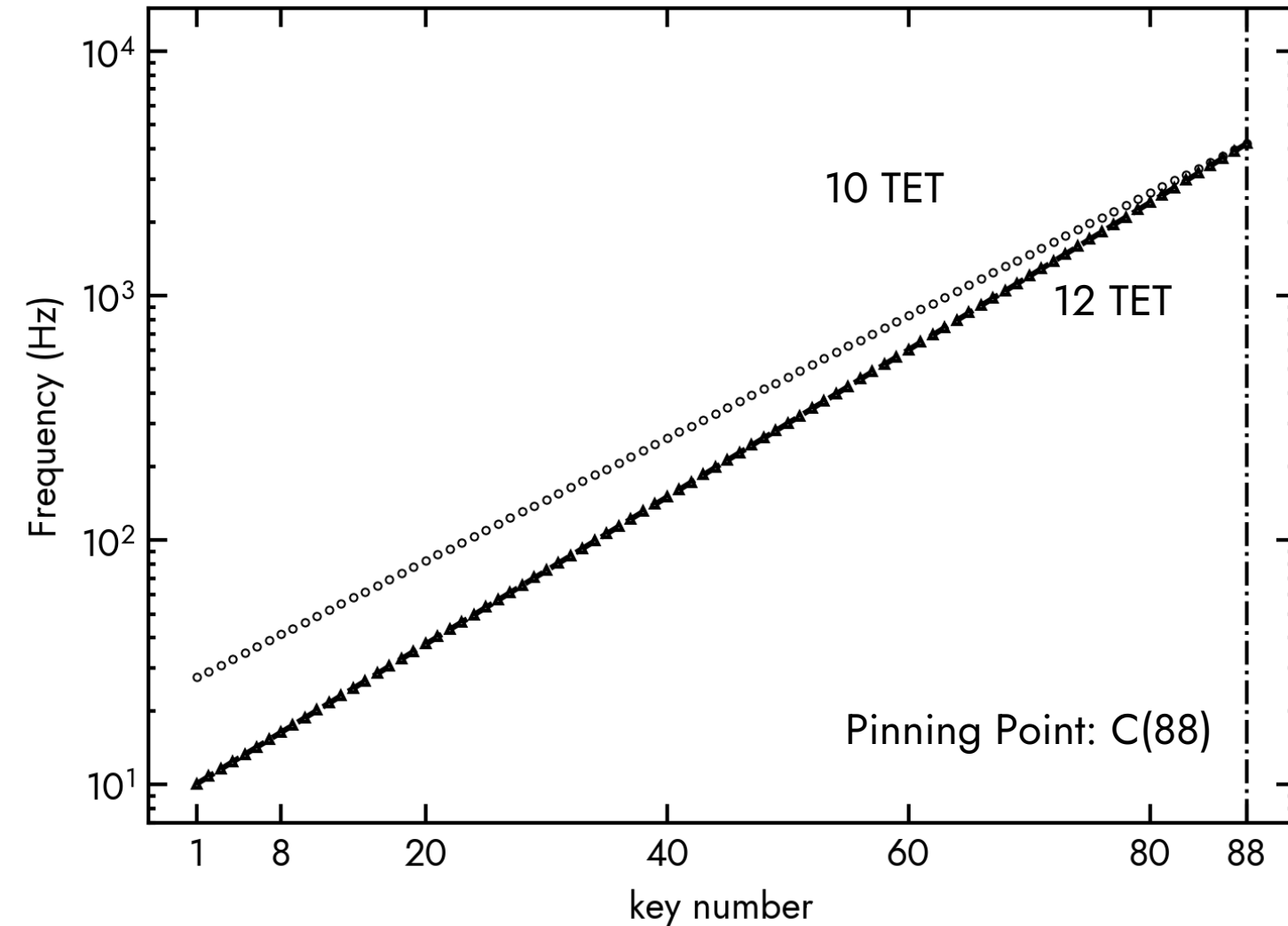
scale	min	max
12 TET	26.24 Hz	3360 Hz
10 TET	16.72 Hz	11 436 Hz

Extended instrument range!

Tension as %

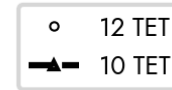
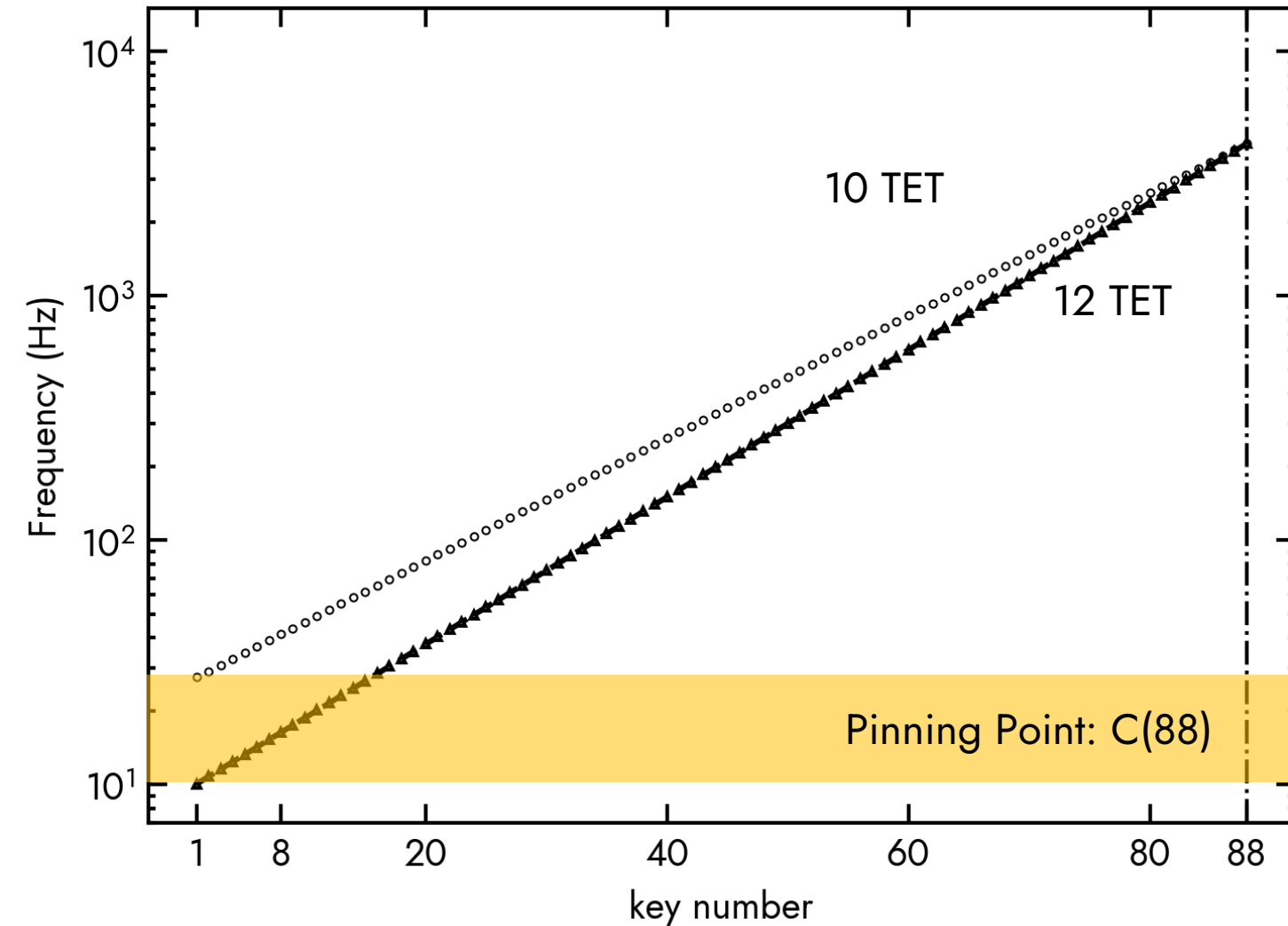


Frequency vs key number



scale	min	max
12 TET	26.24 Hz	3360 Hz
10 TET	10.06 Hz	5650 Hz

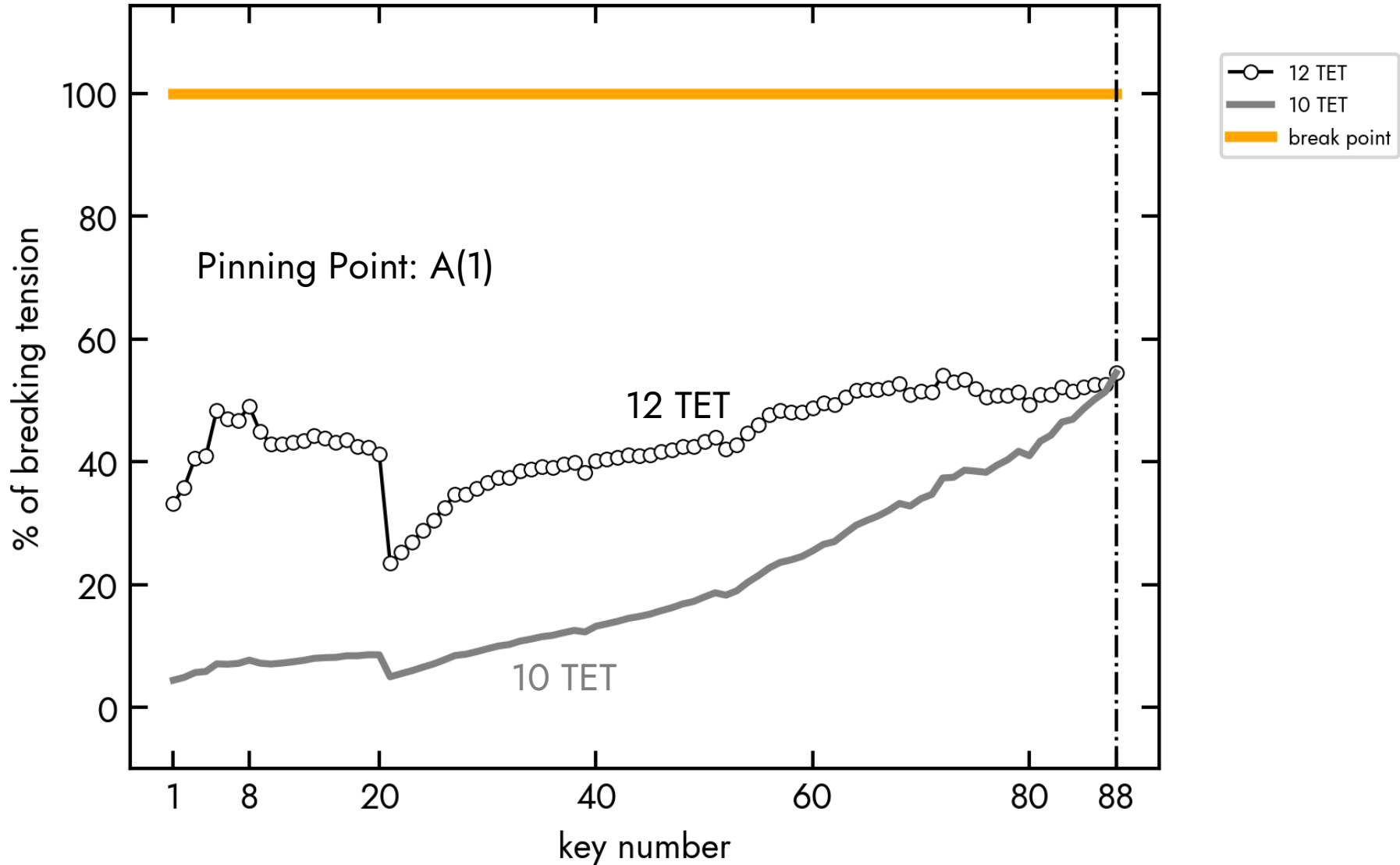
Frequency vs key number



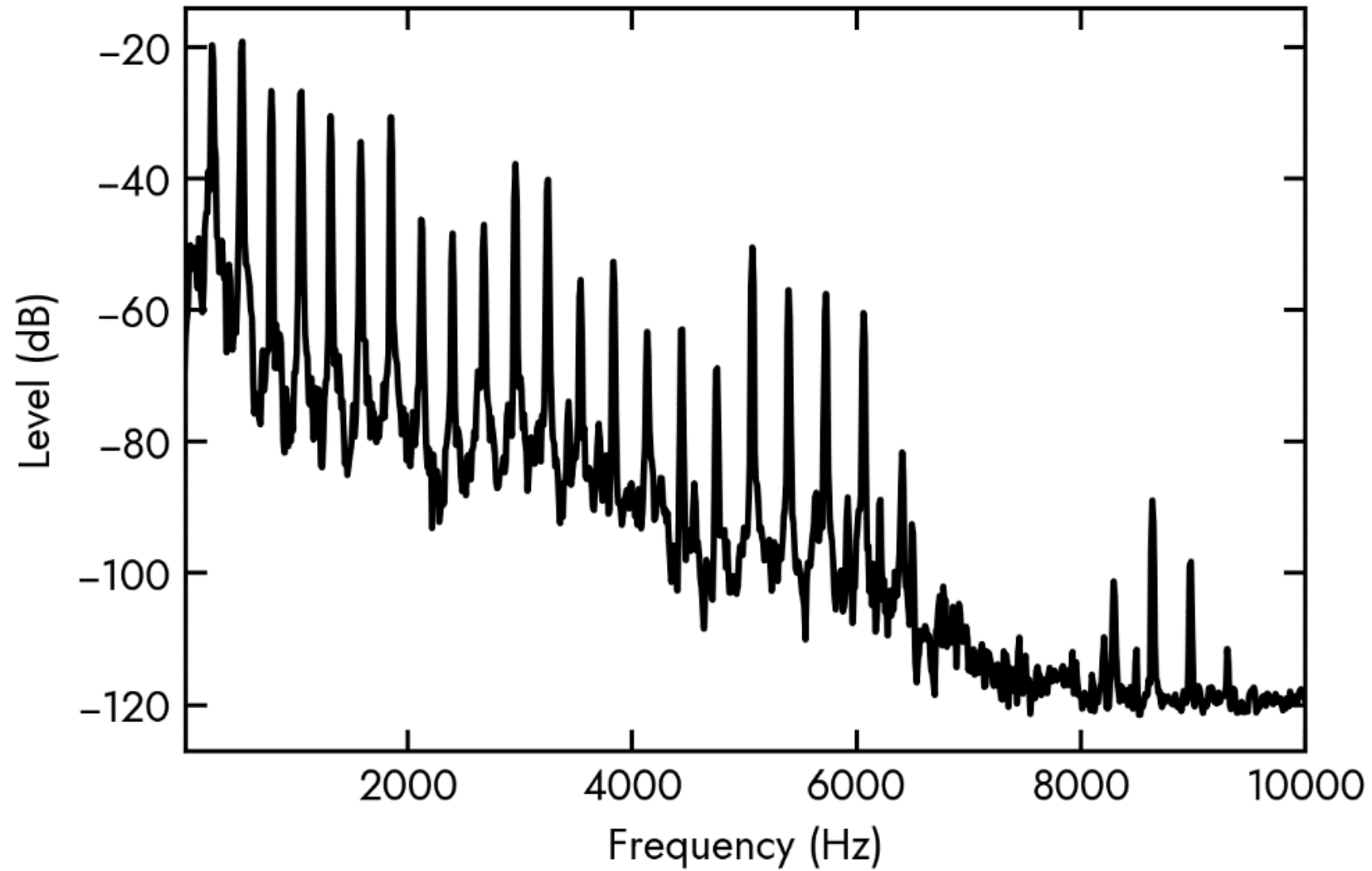
scale	min	max
12 TET	26.24 Hz	3360 Hz
10 TET	10.06 Hz	5650 Hz

Extended instrument range!

Tension as %

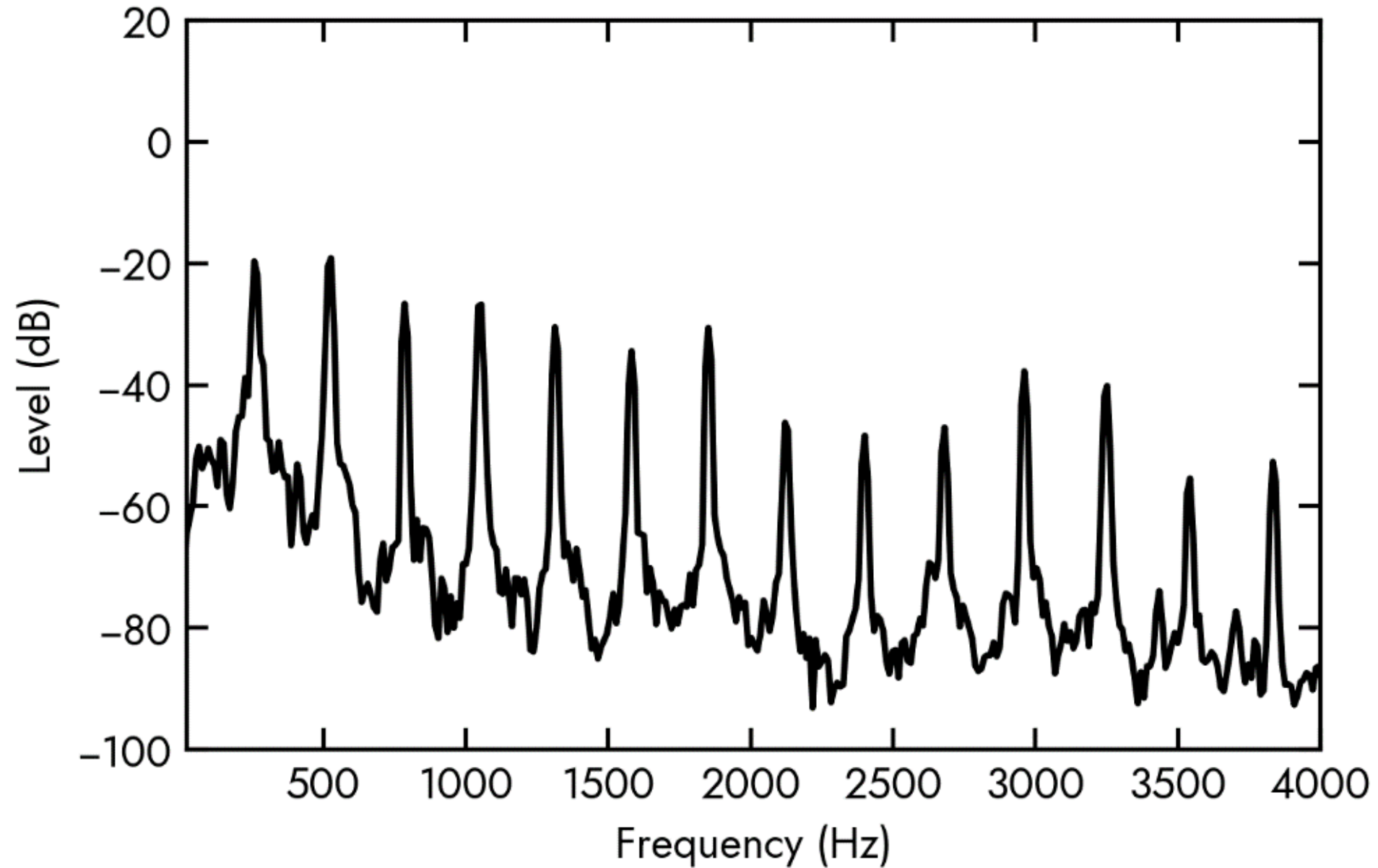


Sound quality

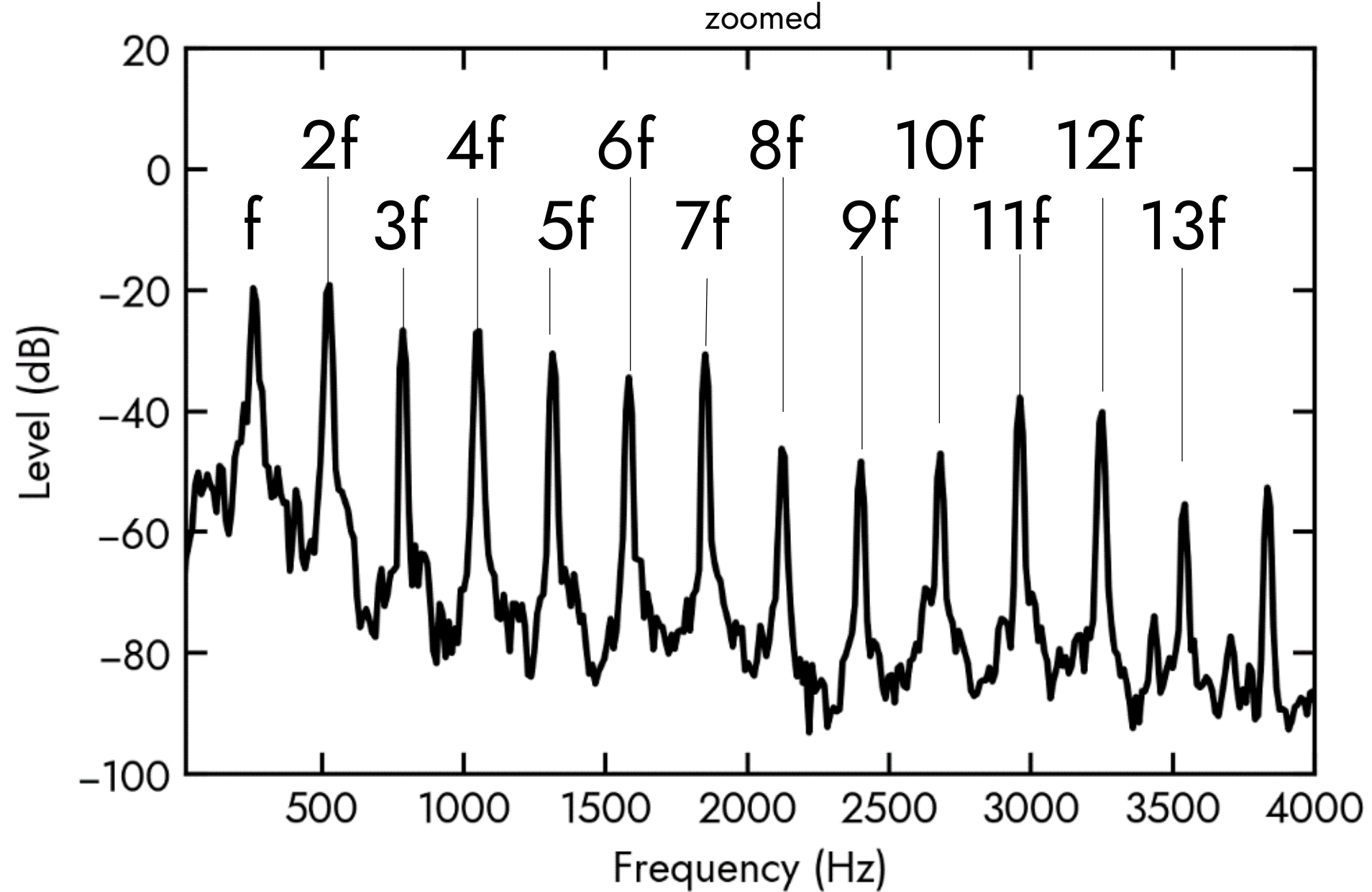


Sound quality

zoomed



Sound quality



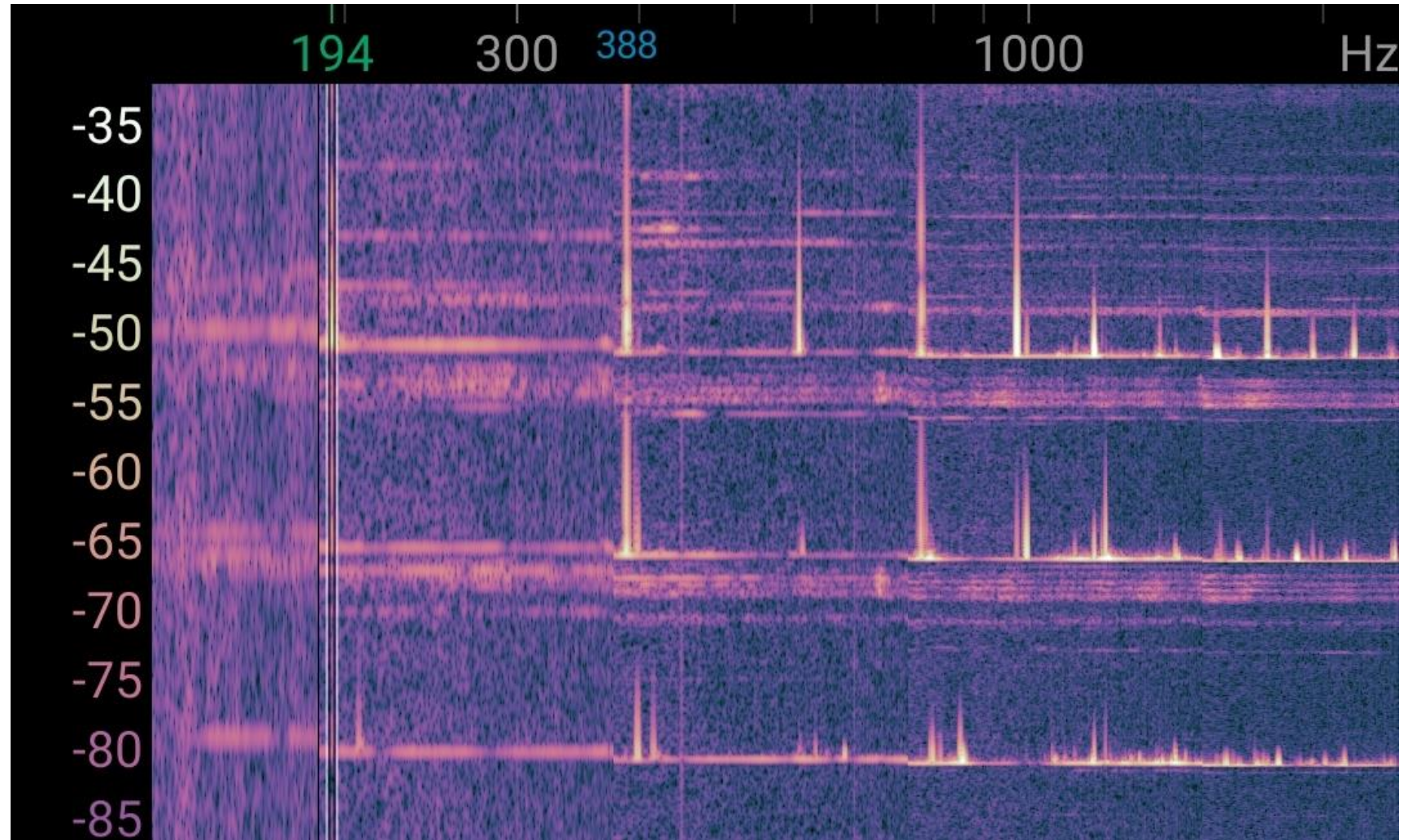
Sound quality

Piano demonstrator
by
Andrzej Włodarczyk

String 1000 mm

String 490 mm

String 340 mm



Beyond simple physics



https://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_resonance

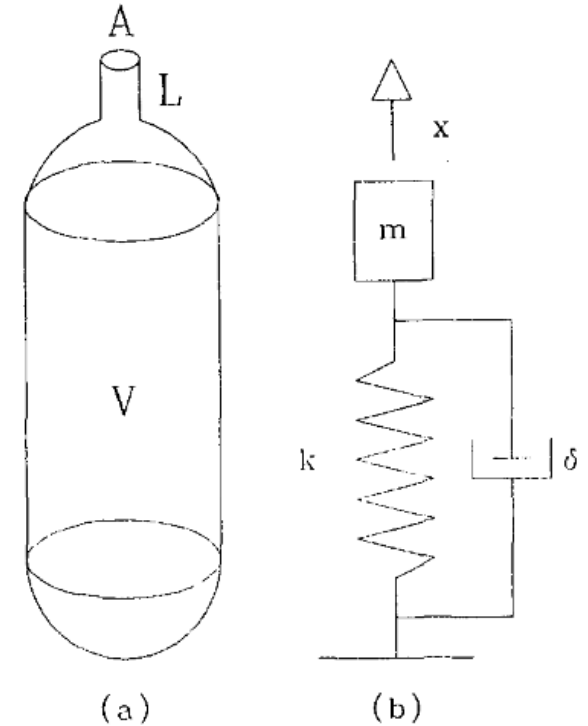
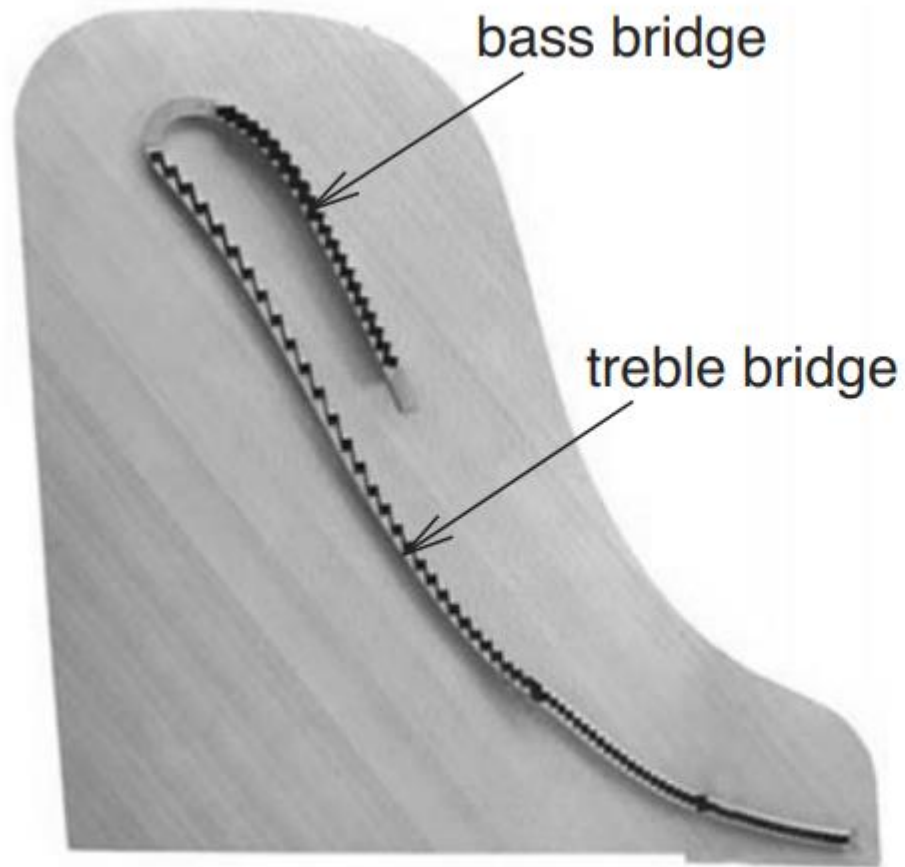


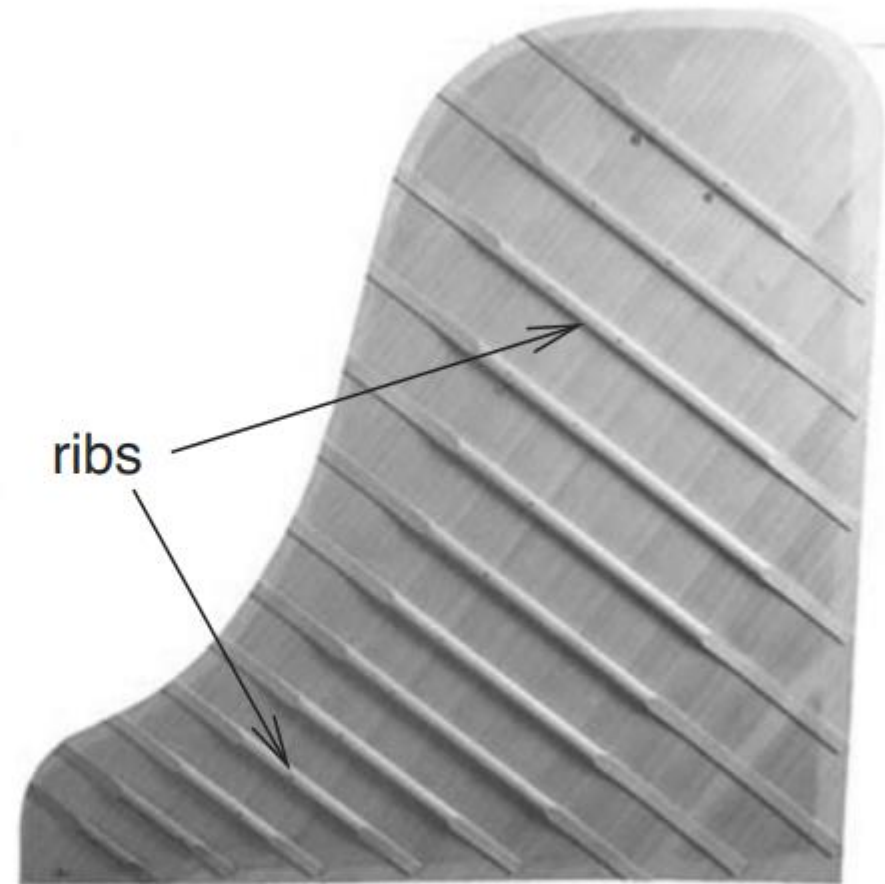
Fig. 1. (a) Diagram of a typical Helmholtz resonator showing the meaning of the symbols used in the text. (b) Simple mechanical oscillator equivalent to the Helmholtz resonator.

R. R. Boullosa et al.: The reaction force on a Helmholtz resonator driven at high sound pressure amplitudes. American Journal of Physics 60, 722 (1992)

Beyond simple physics: soundboard

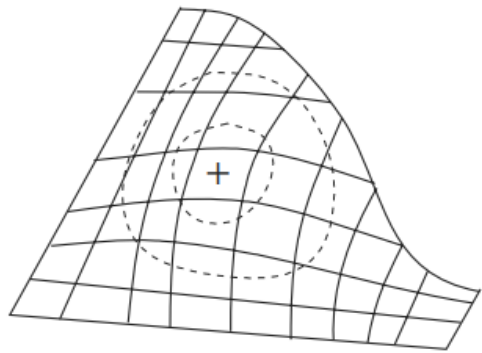


(a)

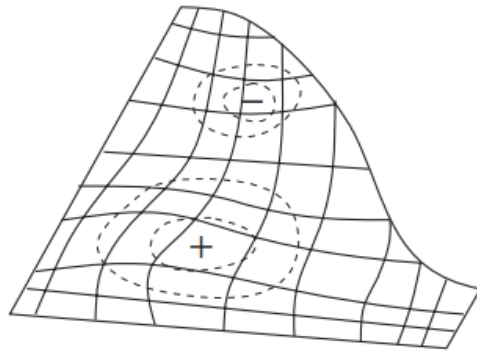


(b)

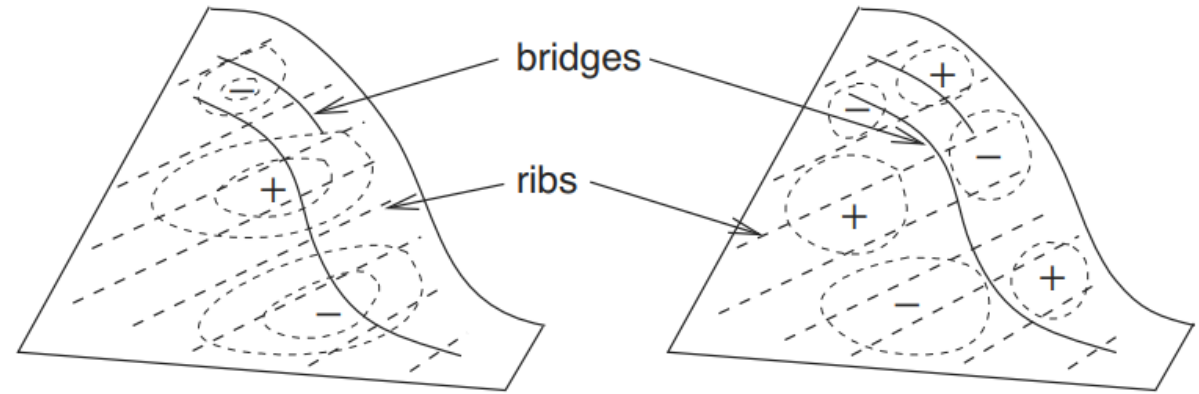
Beyond simple physics: soundboard



(a)



(b)



(a)

(b)

Beyond simple physics: soundboard

<https://youtu.be/yz1kDKblzws>

Chladni figures



Fig. 17. First (lowest) soundboard mode at 49 Hz.

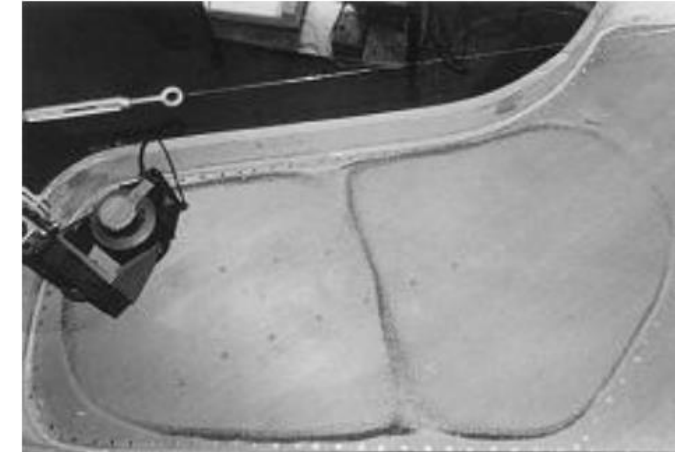


Fig. 18. Second mode at 67 Hz.



Fig. 19. Third mode at 89 Hz.

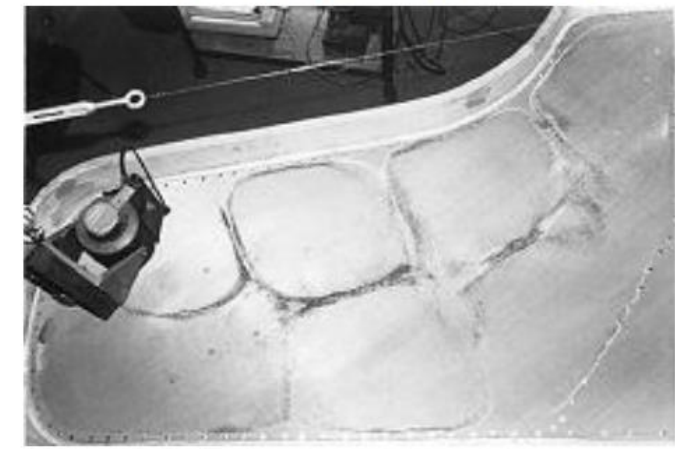
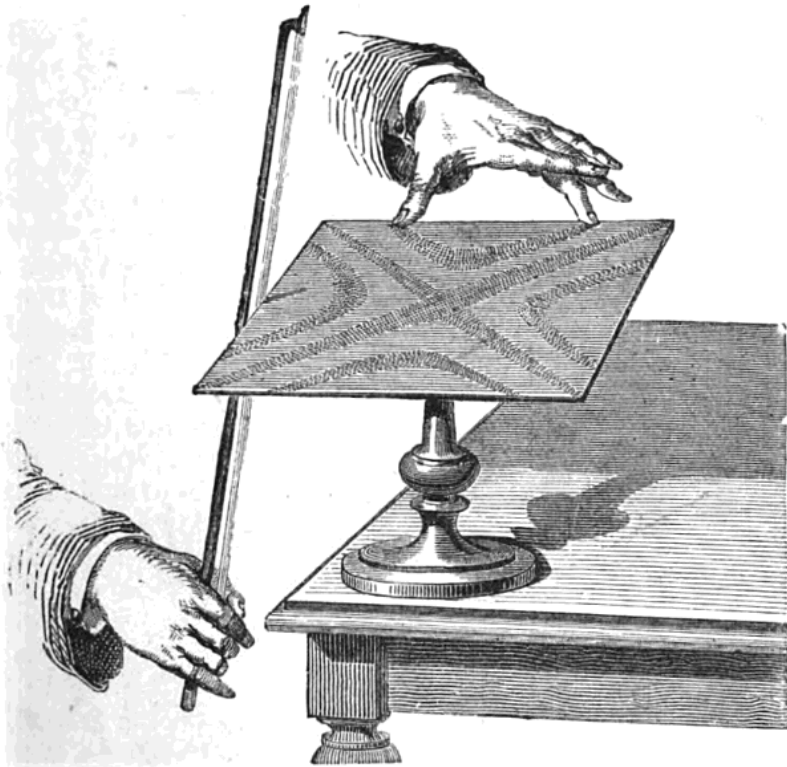


Fig. 20. Eighth mode at 184 Hz.



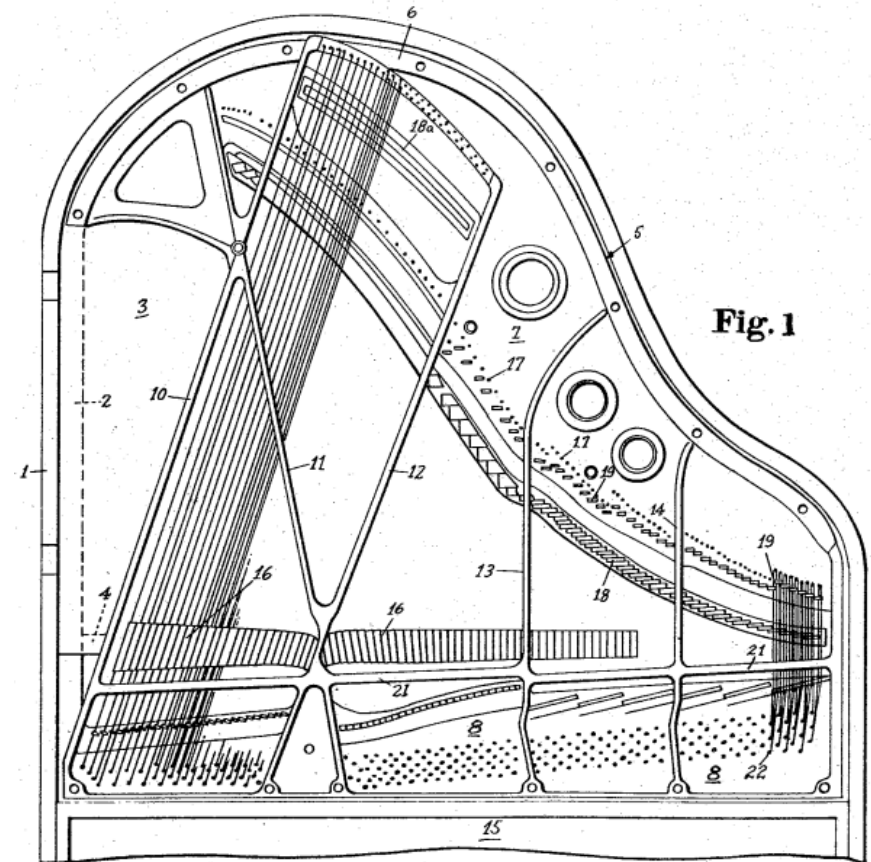
https://en.wikipedia.org/wiki/Ernst_Chladni

Beyond simple physics: longitudinal modes



https://www.fuw.edu.pl/~abogucki/Density_calculator.html
https://www.fuw.edu.pl/~abogucki/E_modulus.html

Let's calculate it!



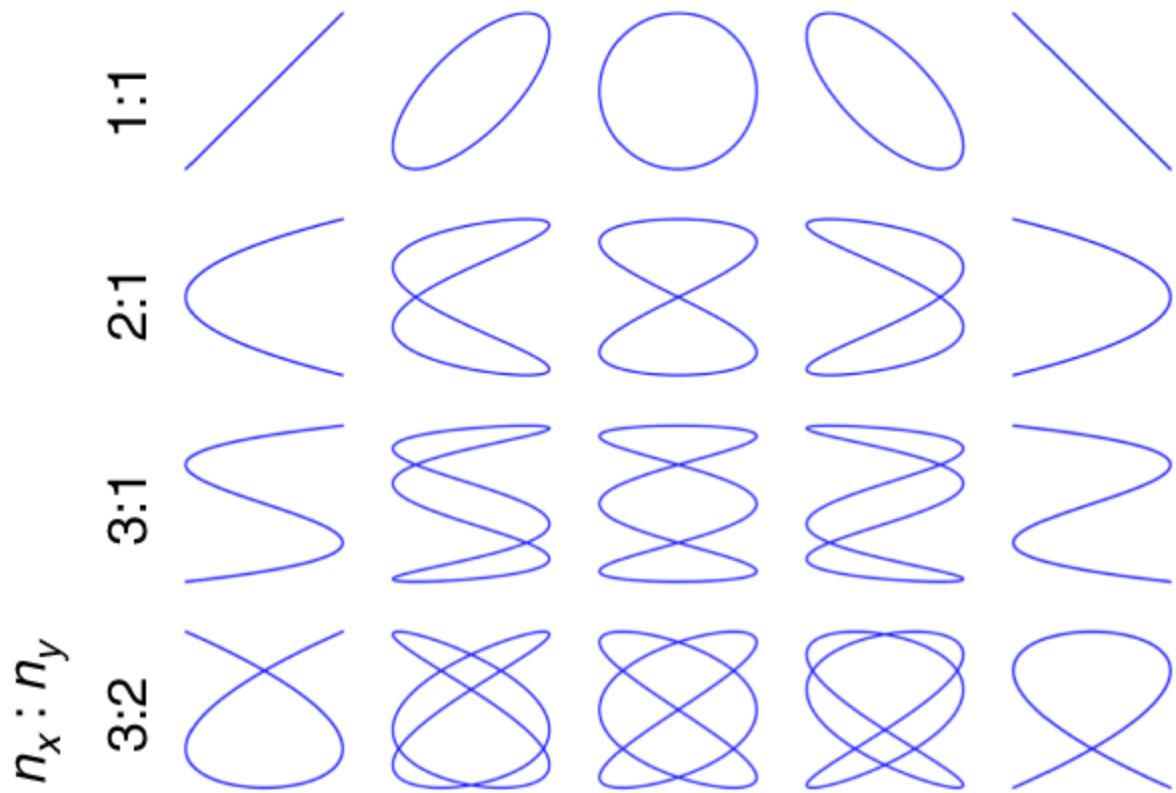
Nov. 11, 1969
H. A. CONKLIN, JR.
FORWARD TERMINATION MEANS FOR THE SPEAKING LENGTH
OF PIANO STRINGS AND THE LIKE
3,477,331
Filed Aug. 15, 1966
4 Sheets-Sheet 1

US3477331A

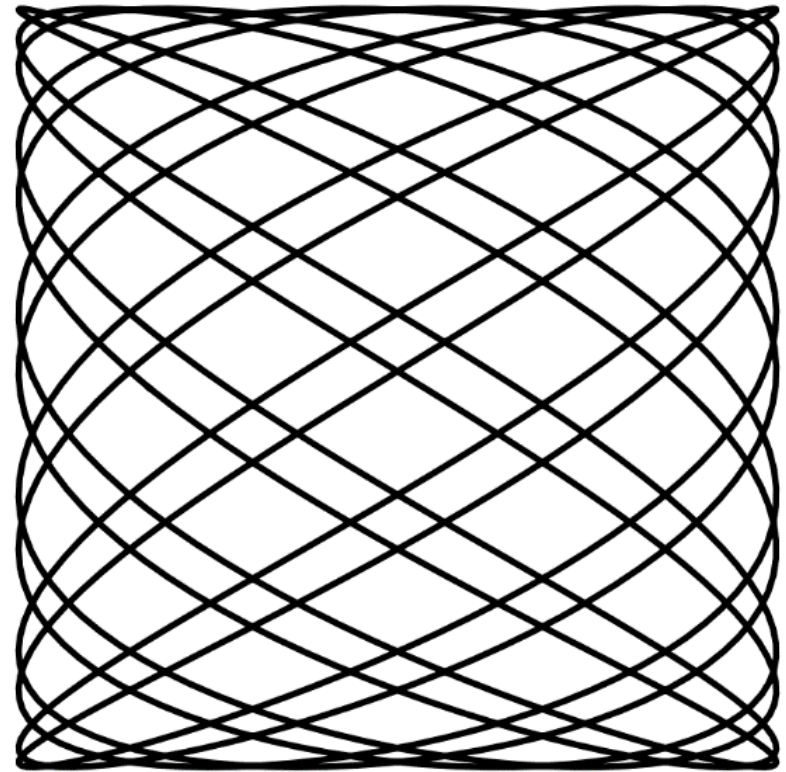
Beyond simple physics: longitudinal modes

Metal/alloy	Density (kg/m ³)
Aluminium	2700
Copper	8960
Iron	7860
Stainless Steel	7750 - 8030
Brass	8400 - 8730
Lead	11340
Gold	19300

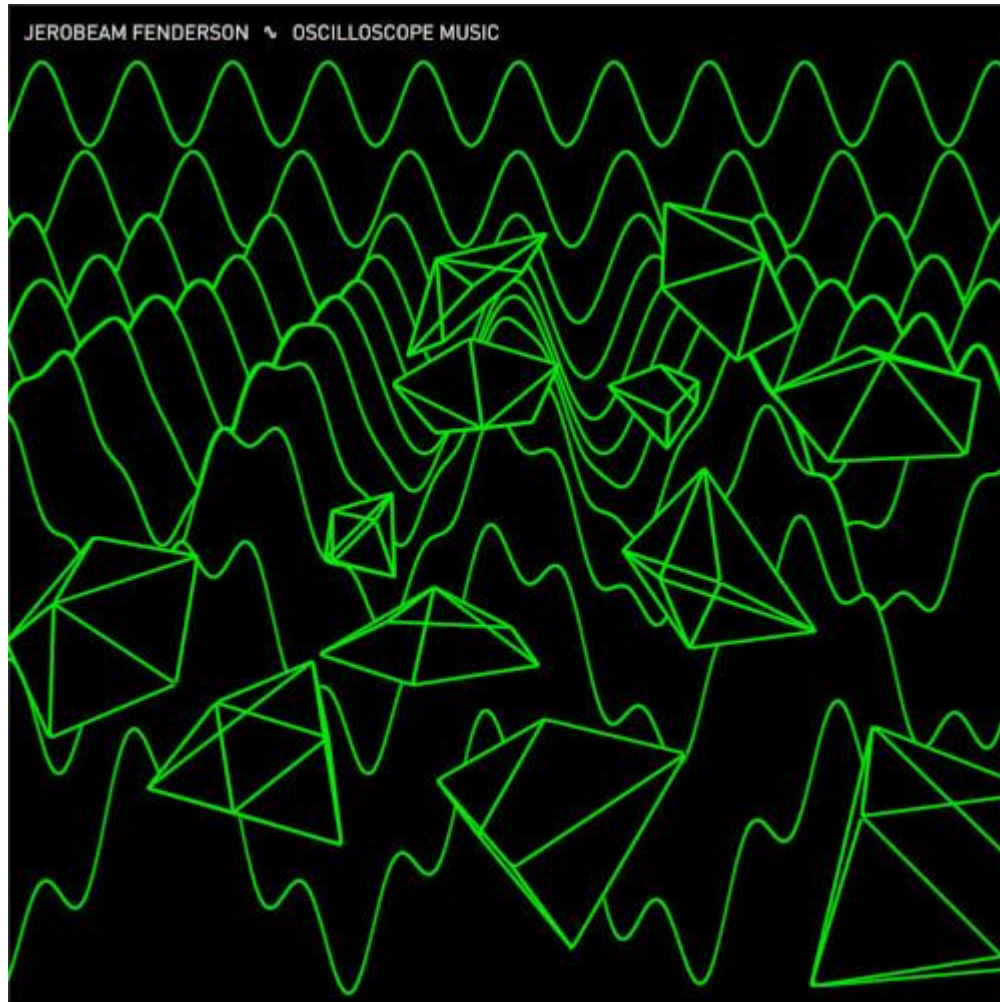
Beyond simple physics: Lissajous figures



Lissajous Figure (13, 8)

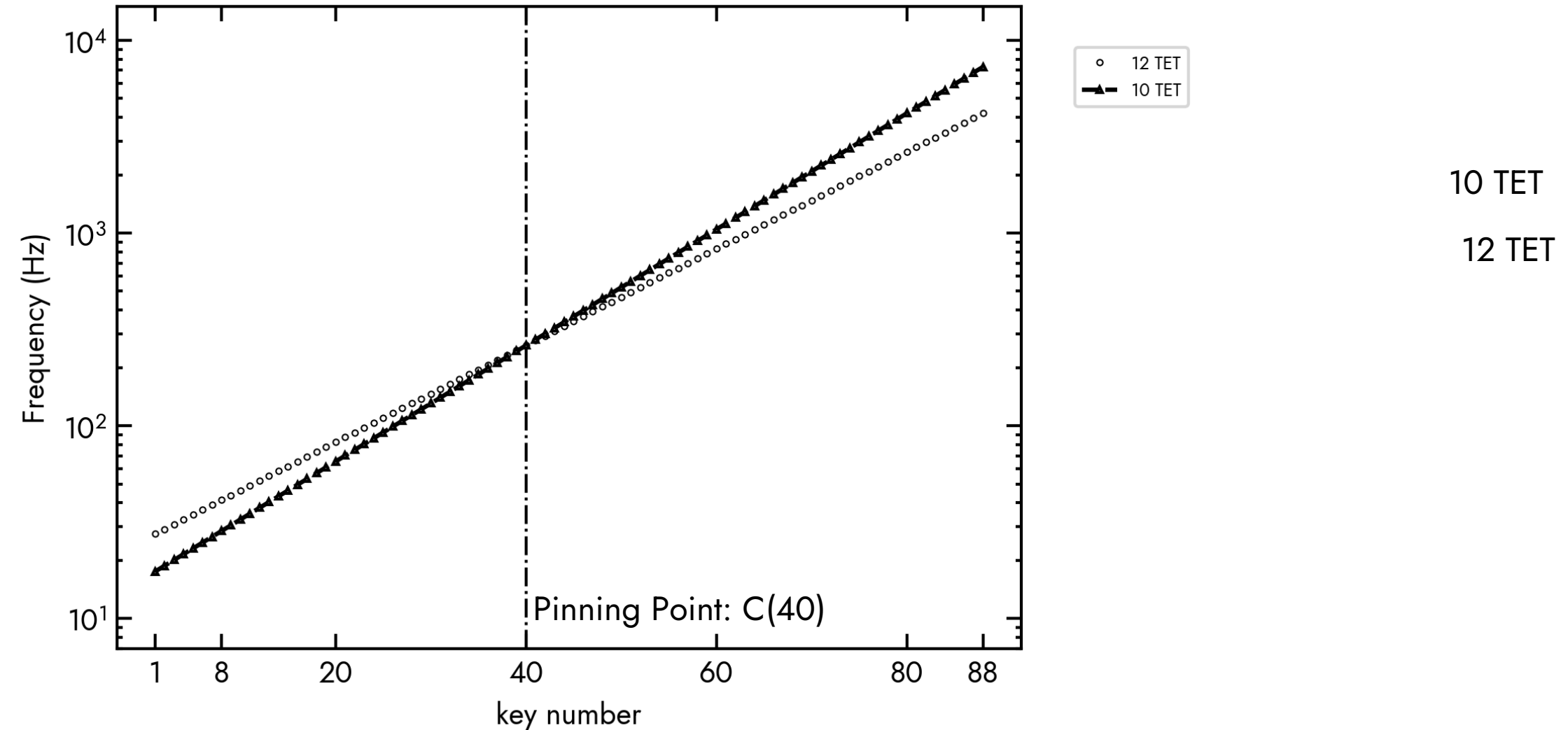


Beyond simple physics: Lissajous figures

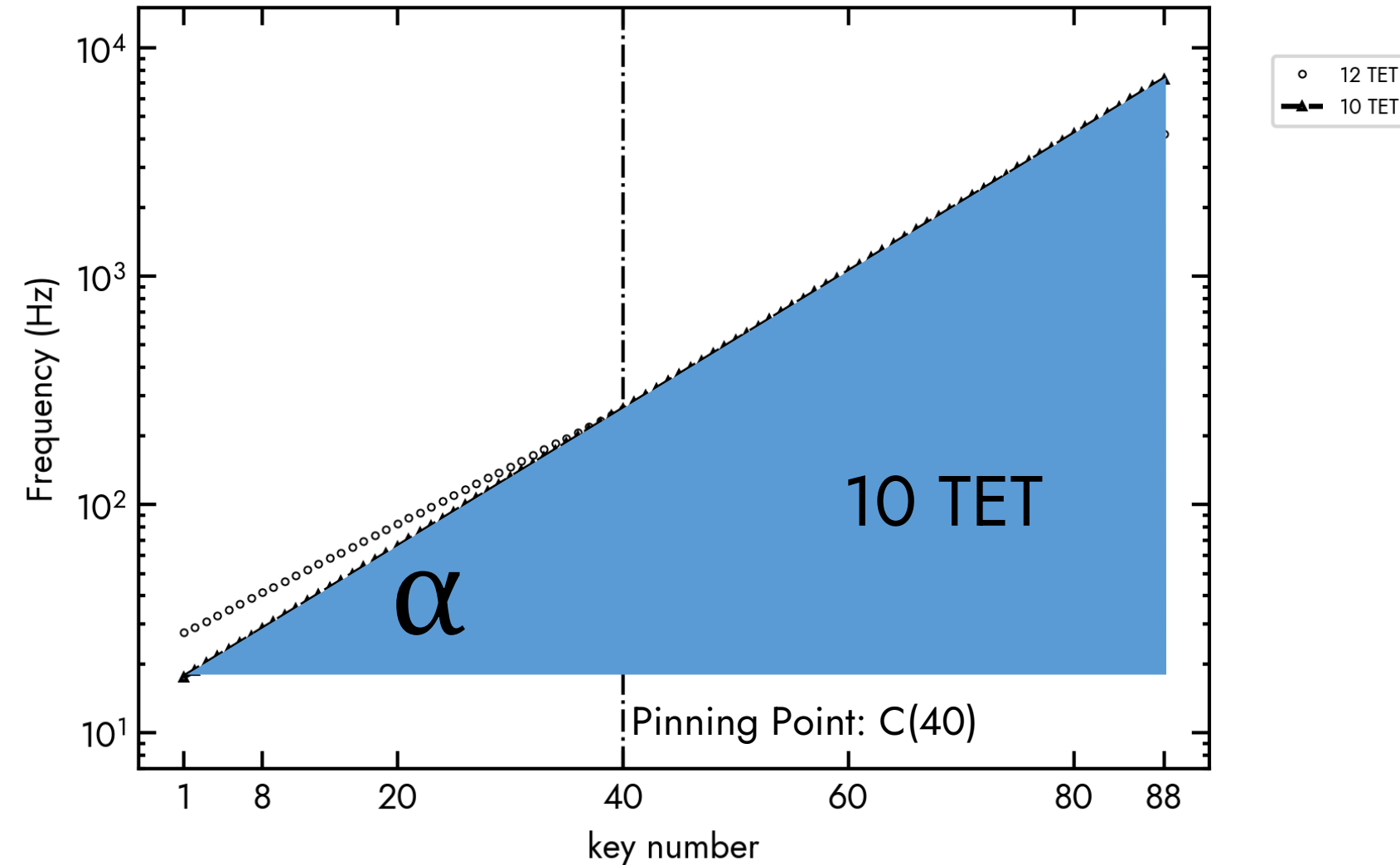


Oscilloscope Music is a project
by
Jerobeam Fenderson and Hansi3D

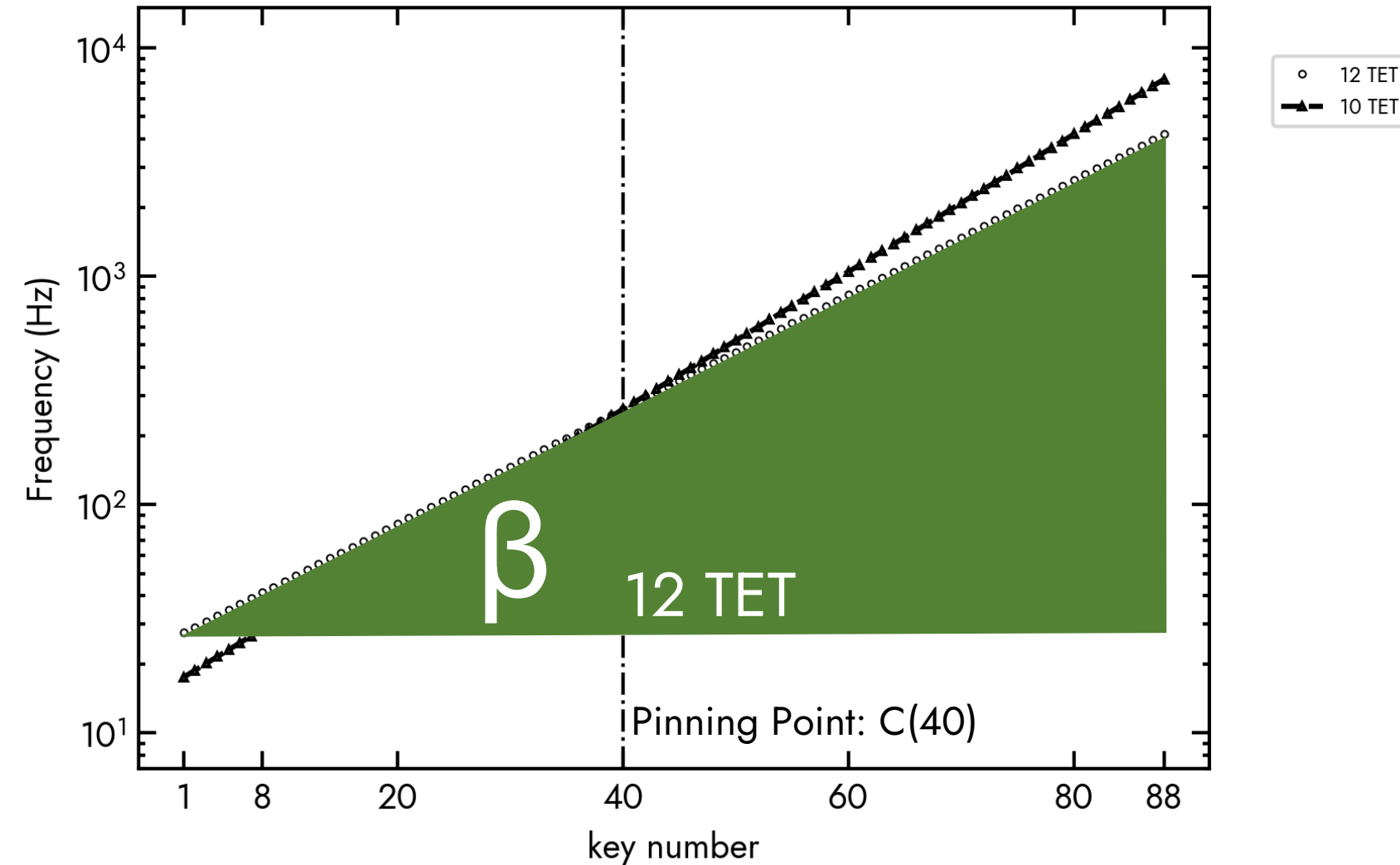
Fixing the problem



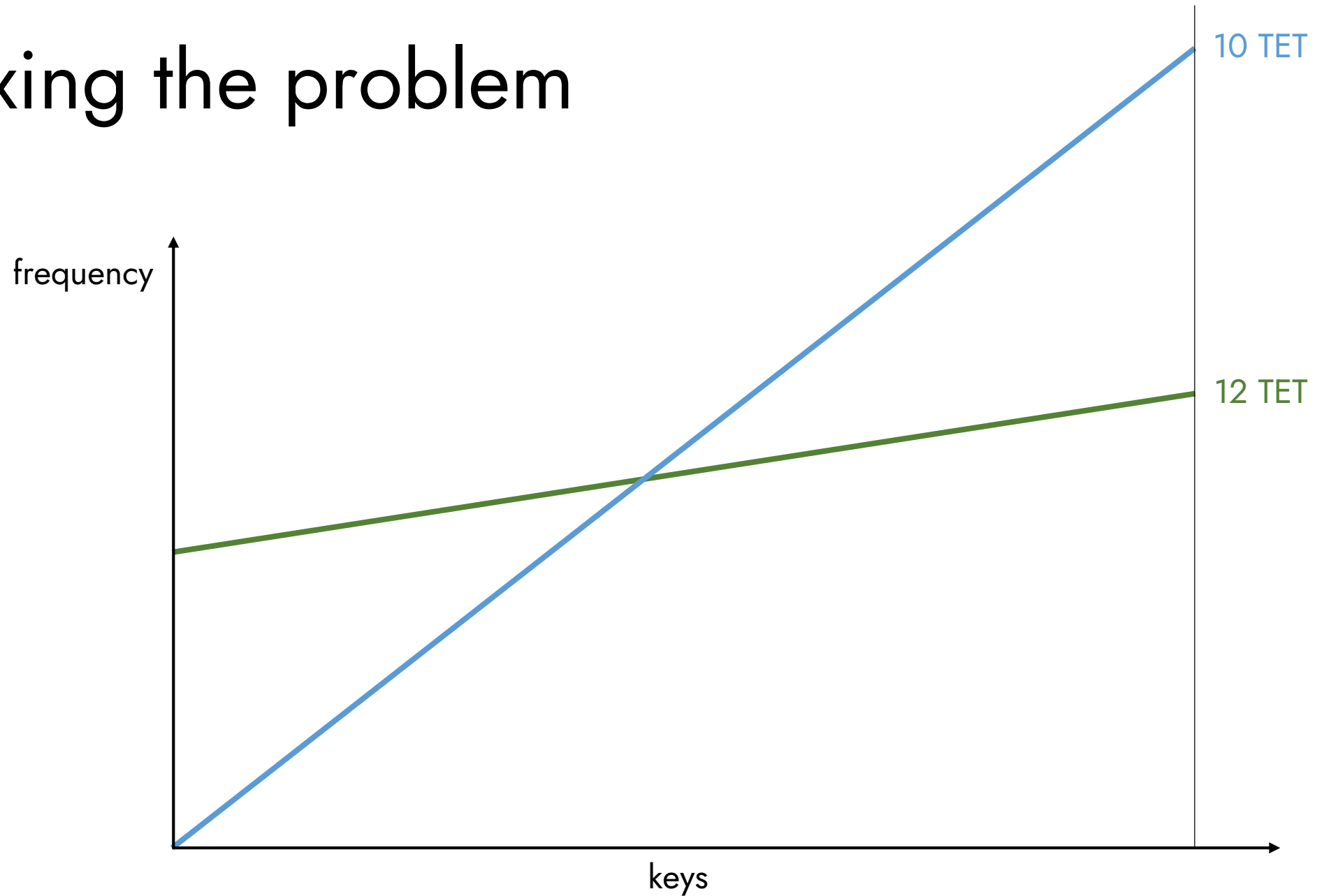
Fixing the problem



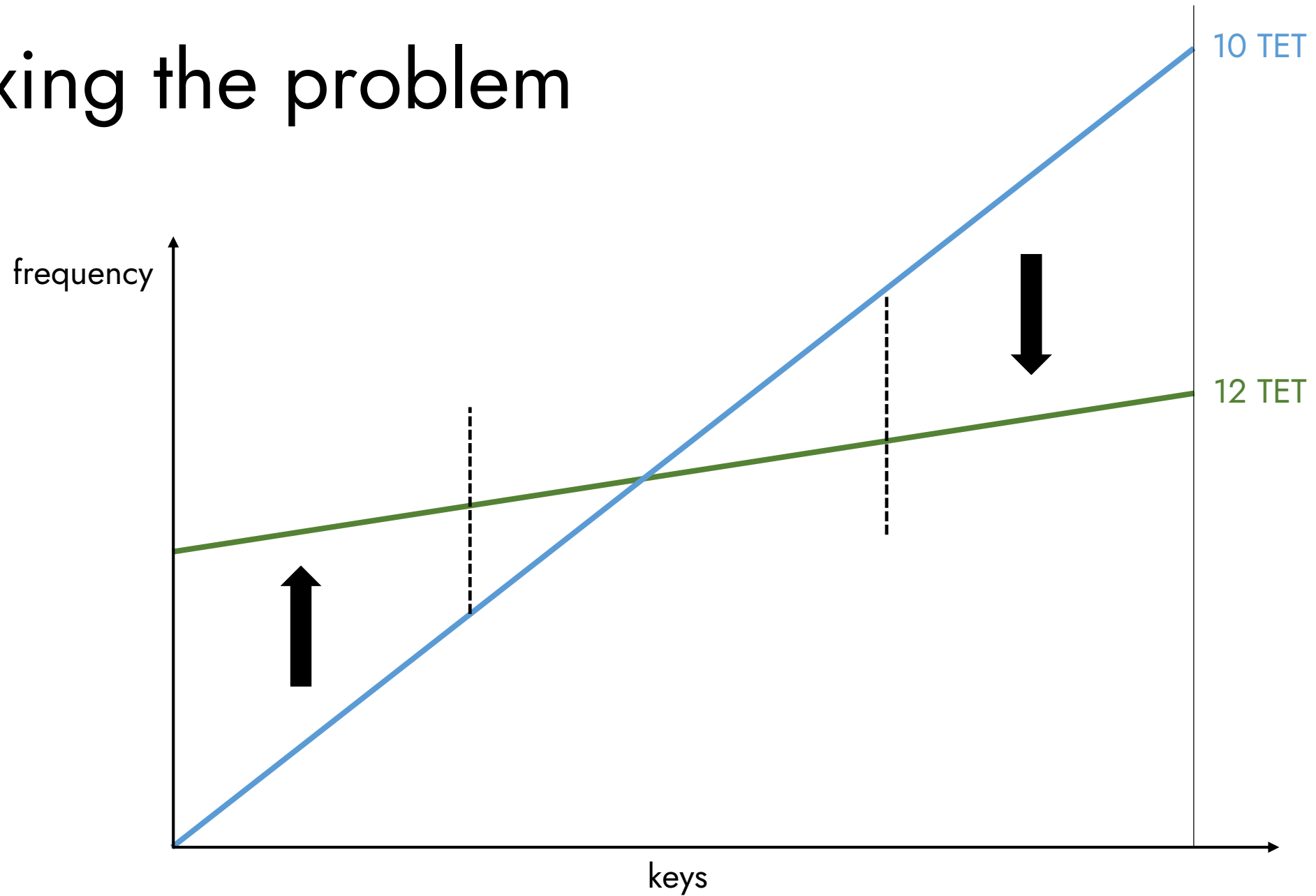
Fixing the problem



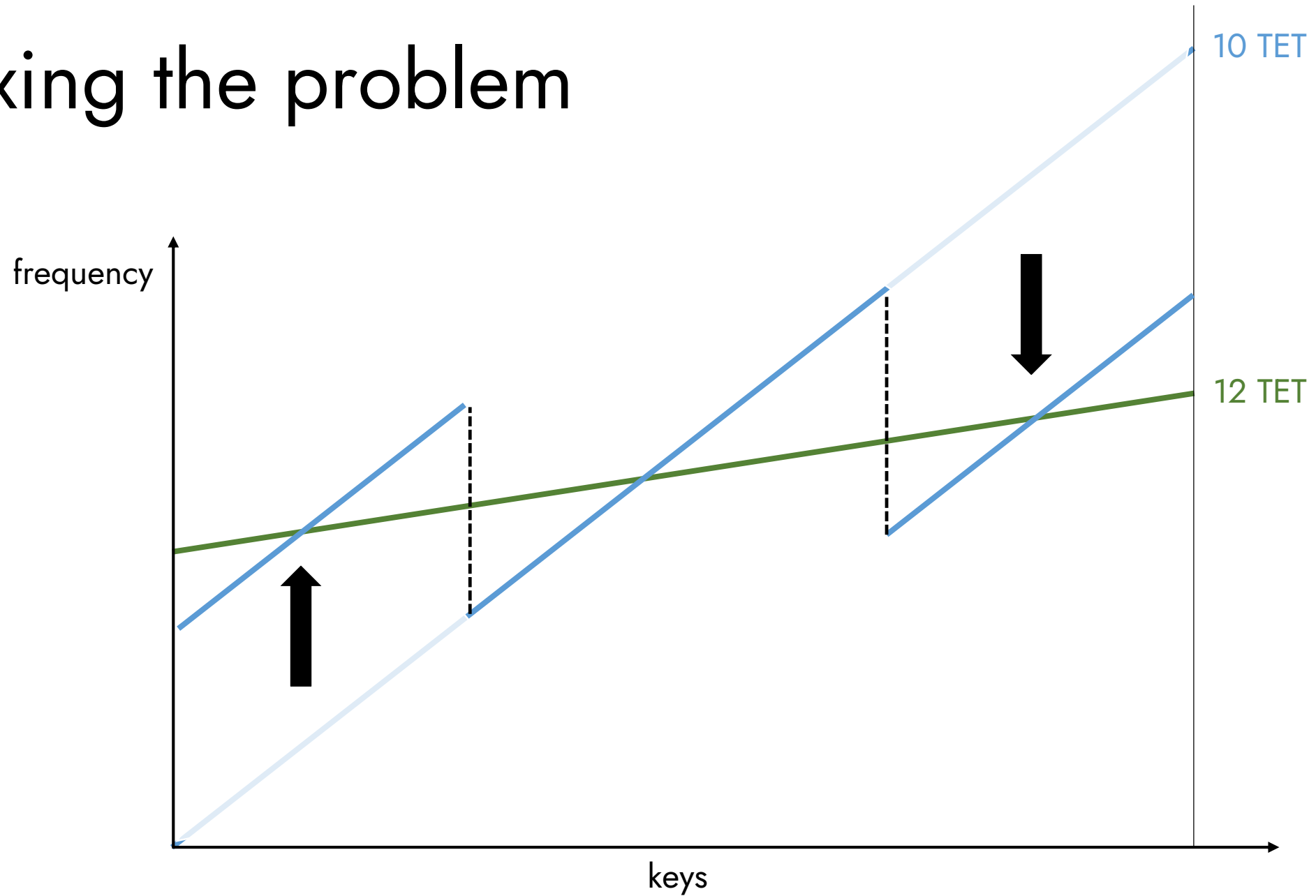
Fixing the problem



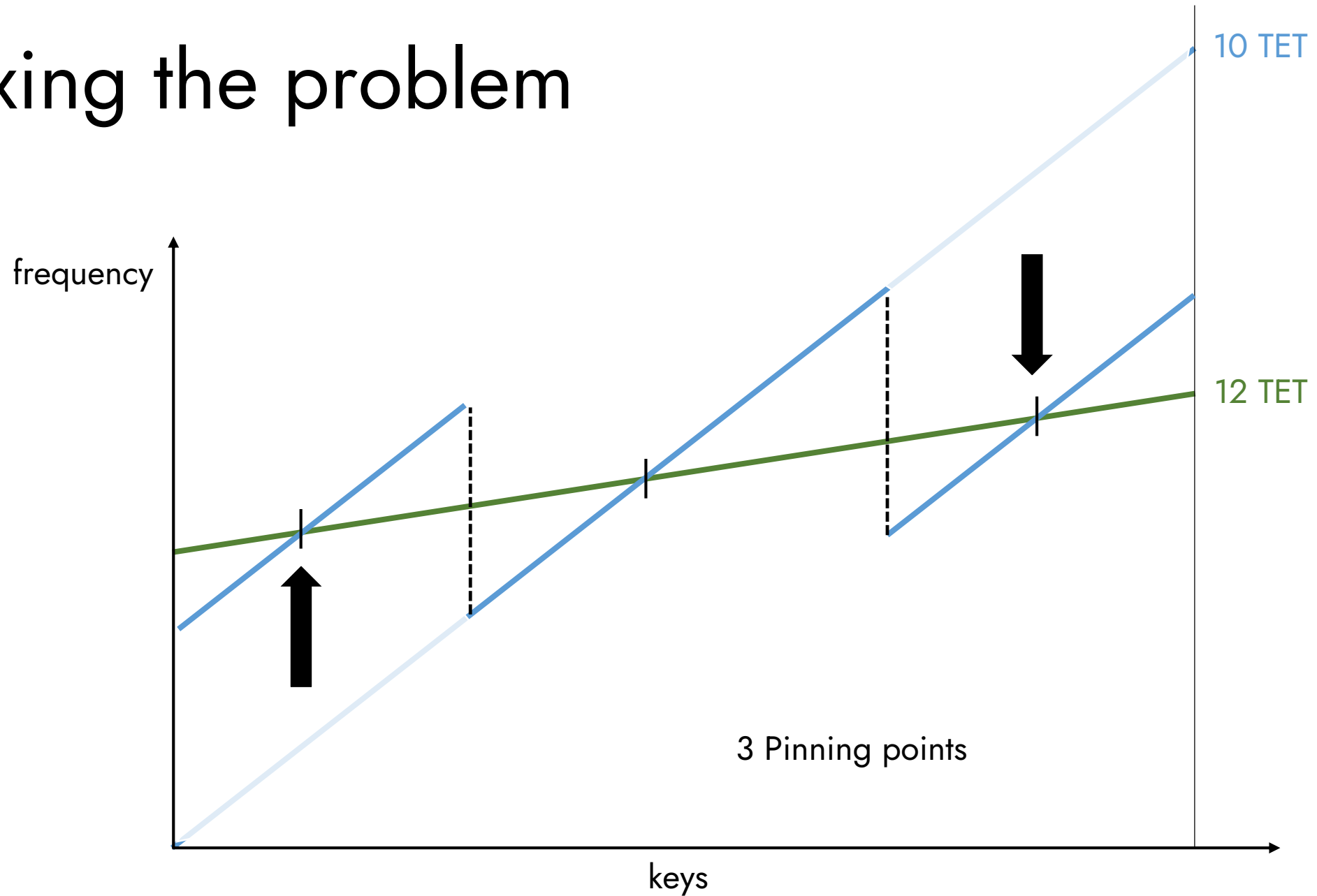
Fixing the problem



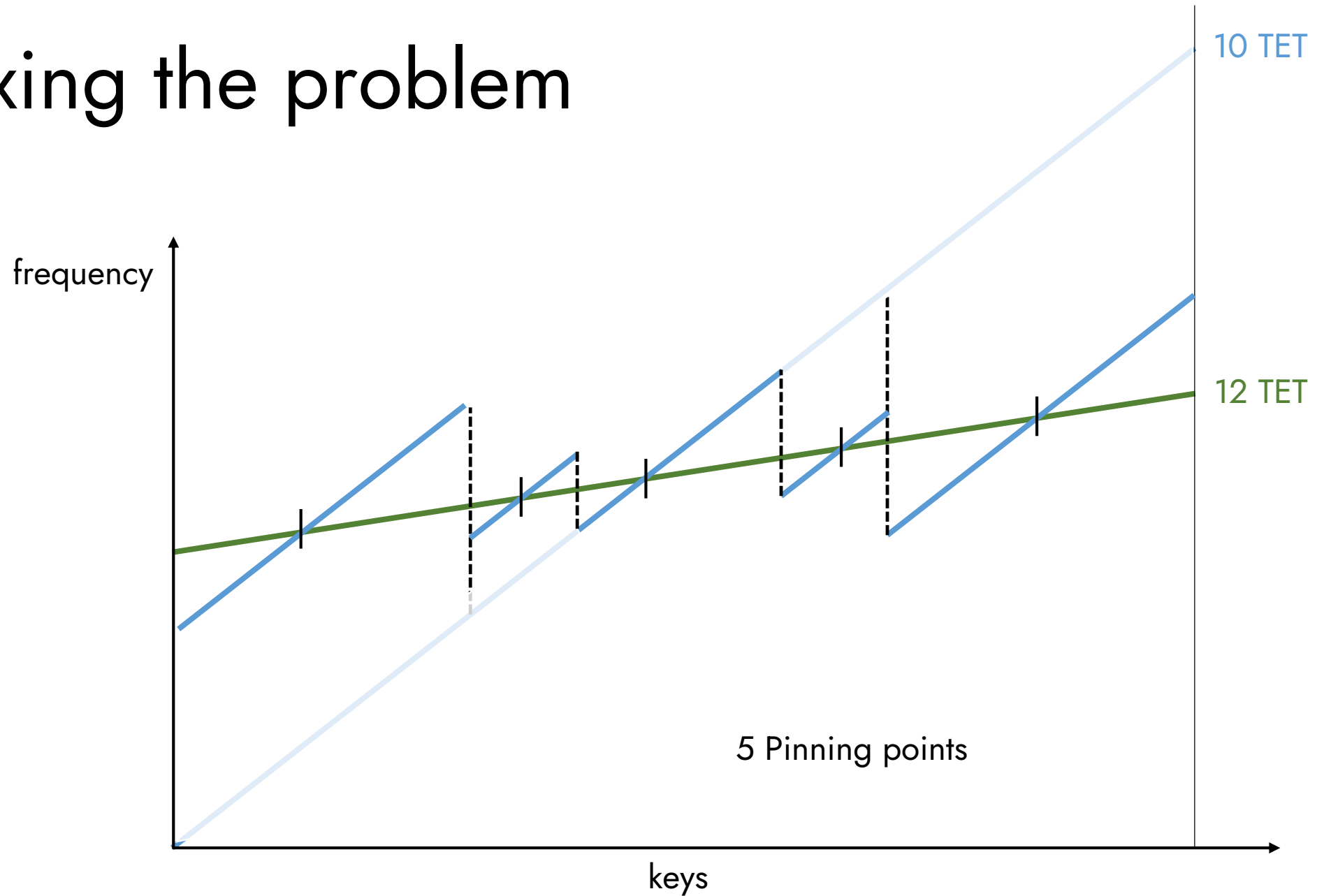
Fixing the problem



Fixing the problem



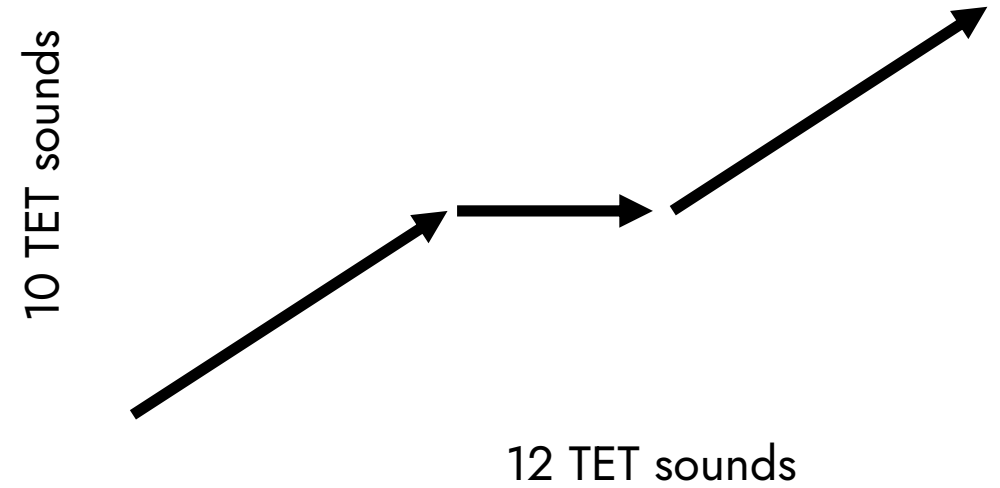
Fixing the problem



Fixing the problem

Mapping method:

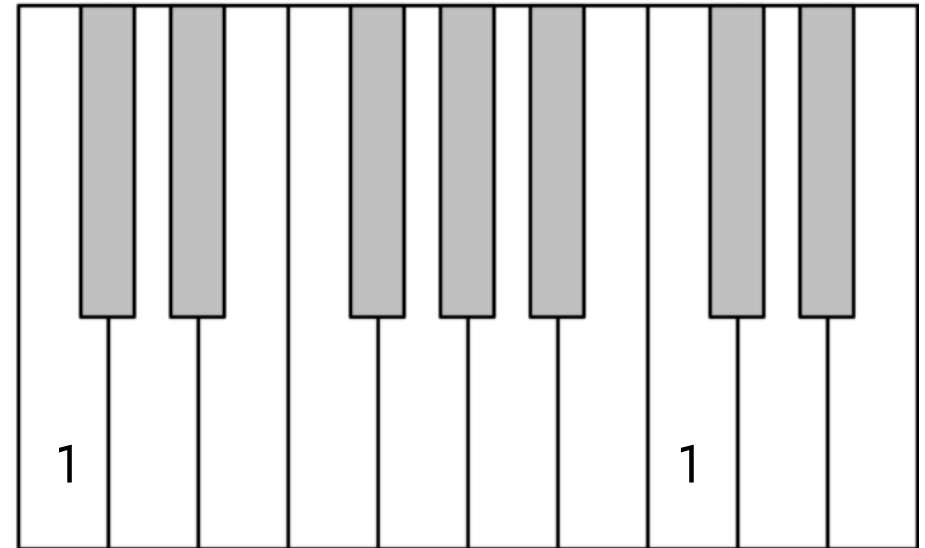
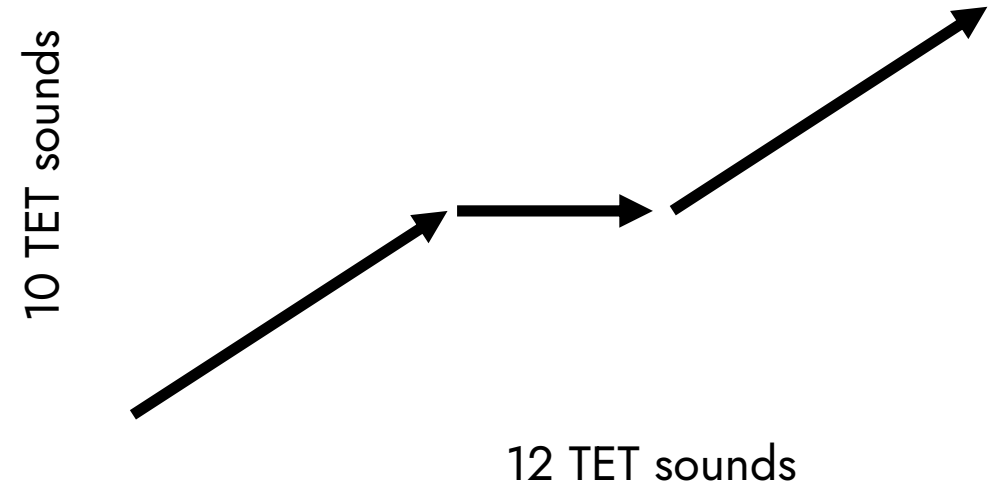
- Monotonic Ascend



Fixing the problem

Mapping method:

- Monotonic Ascend
- Keep octave interval

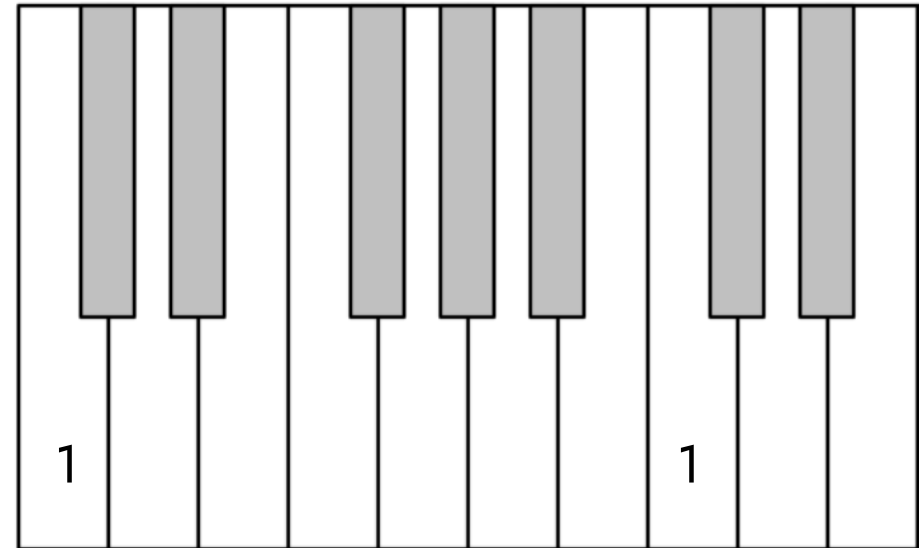
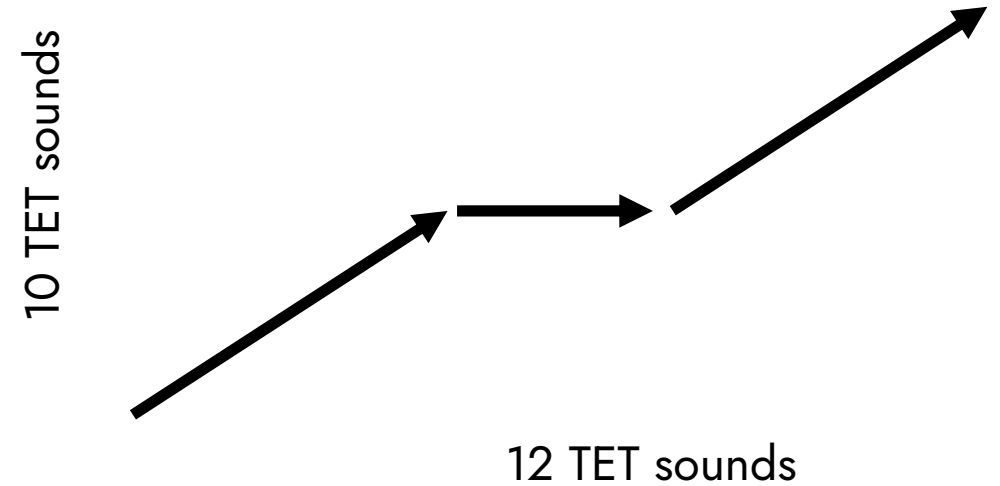


Fixing the problem

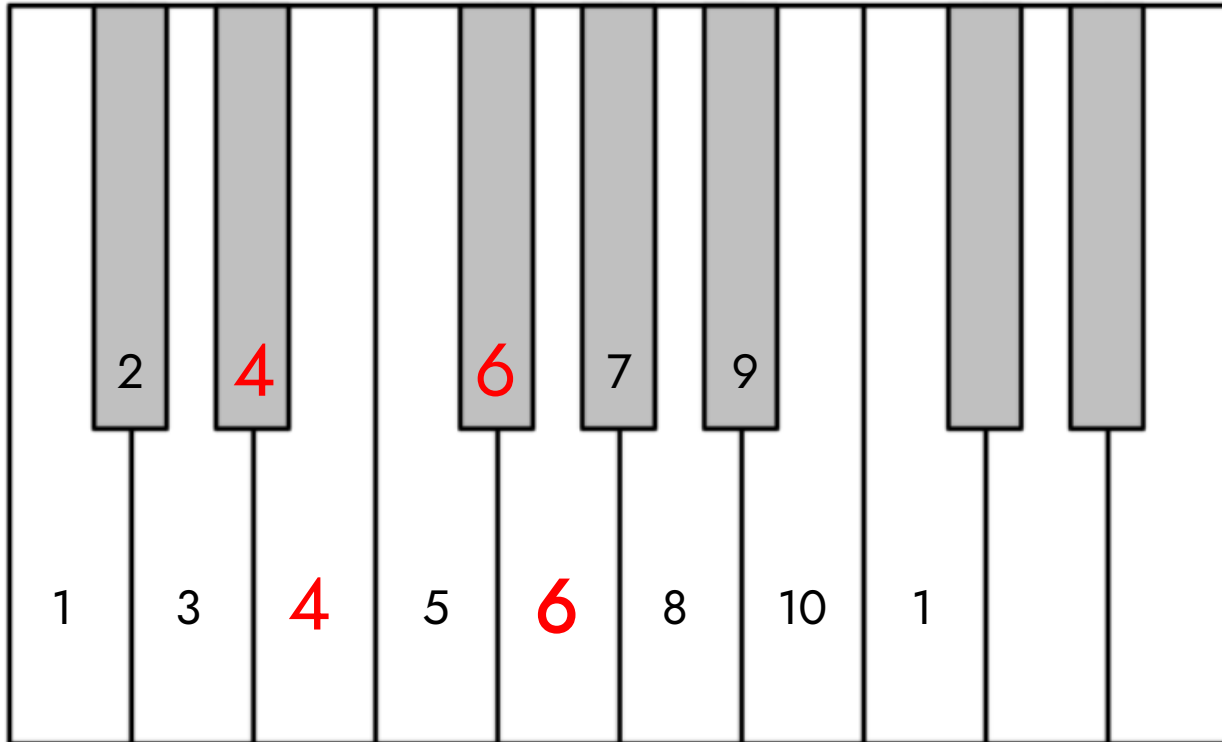
Mapping method:

- Monotonic Ascend
- Keep octave interval

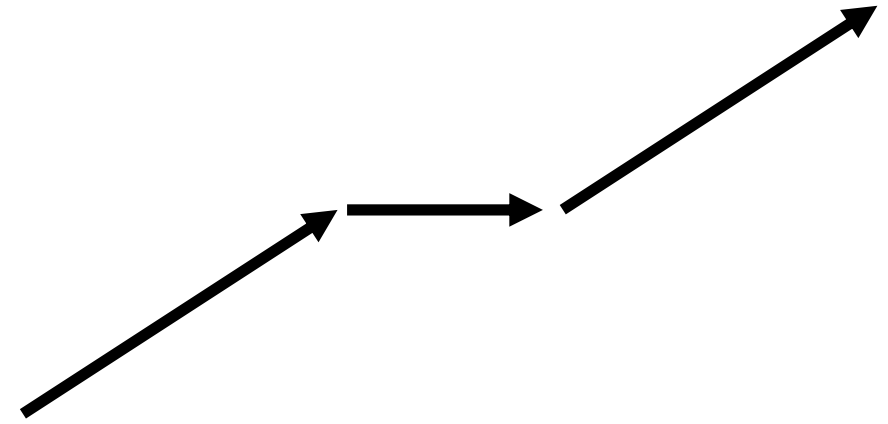
We need 2 duplicates



Fixing the problem



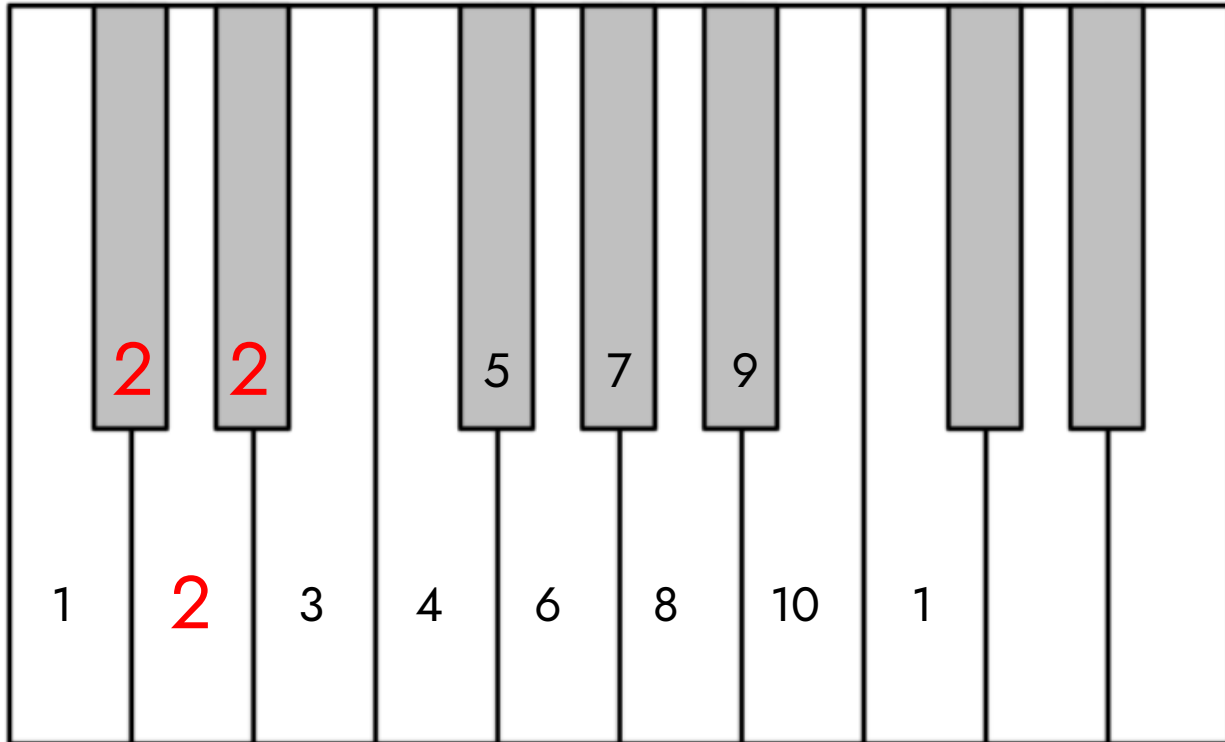
10 TET sounds



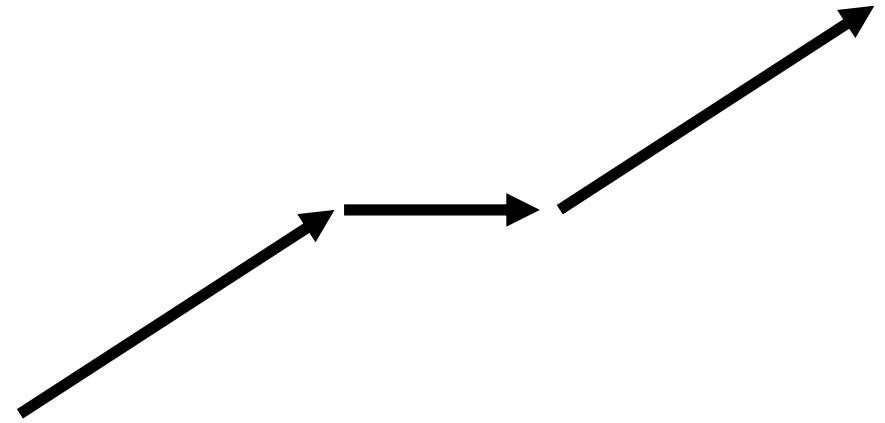
12 TET sounds

{4,6}

Fixing the problem



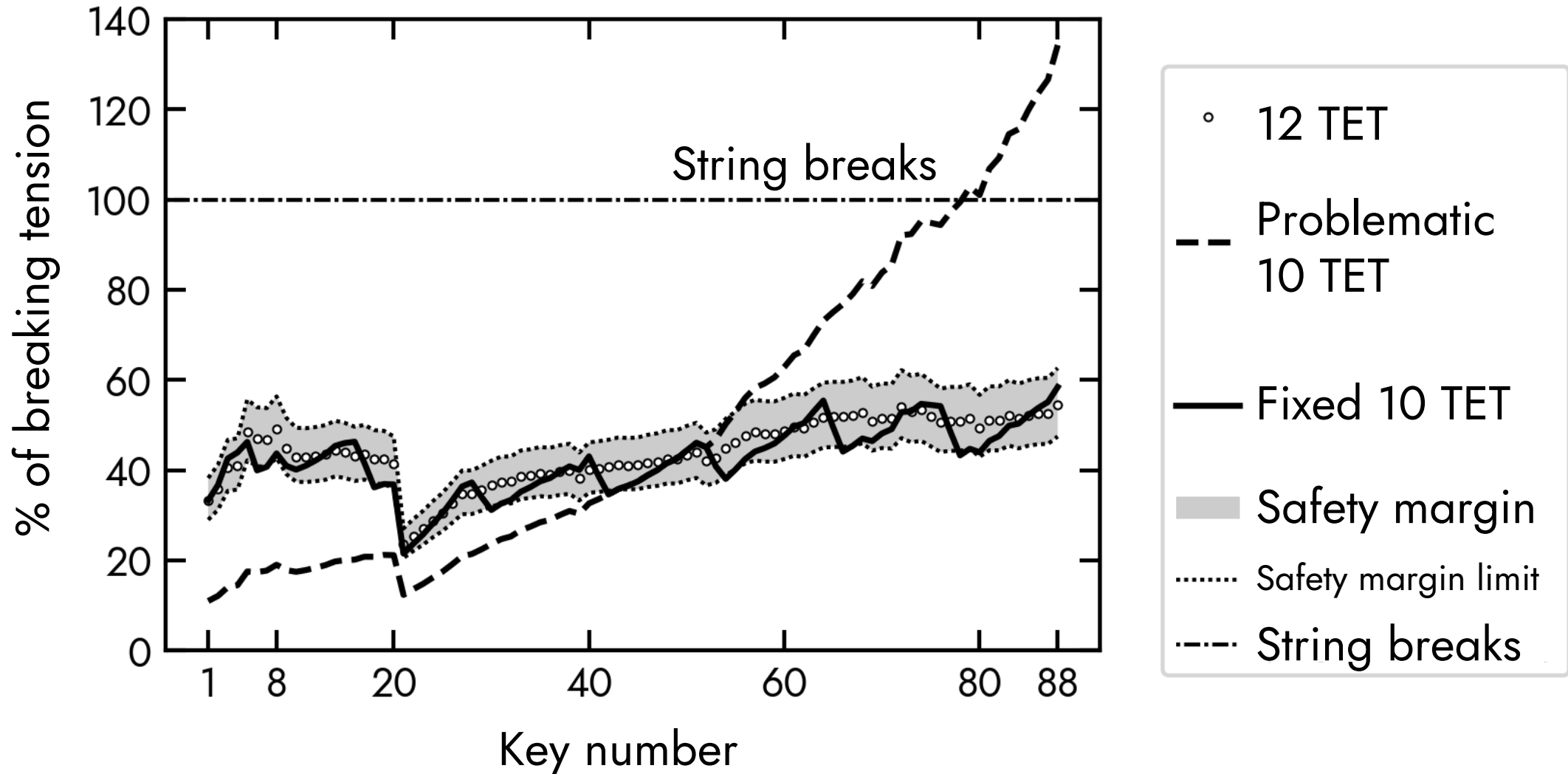
10 TET sounds



12 TET sounds

$\{2,2\}$

Fixing the problem



Which mapping is the best?

Matter of:

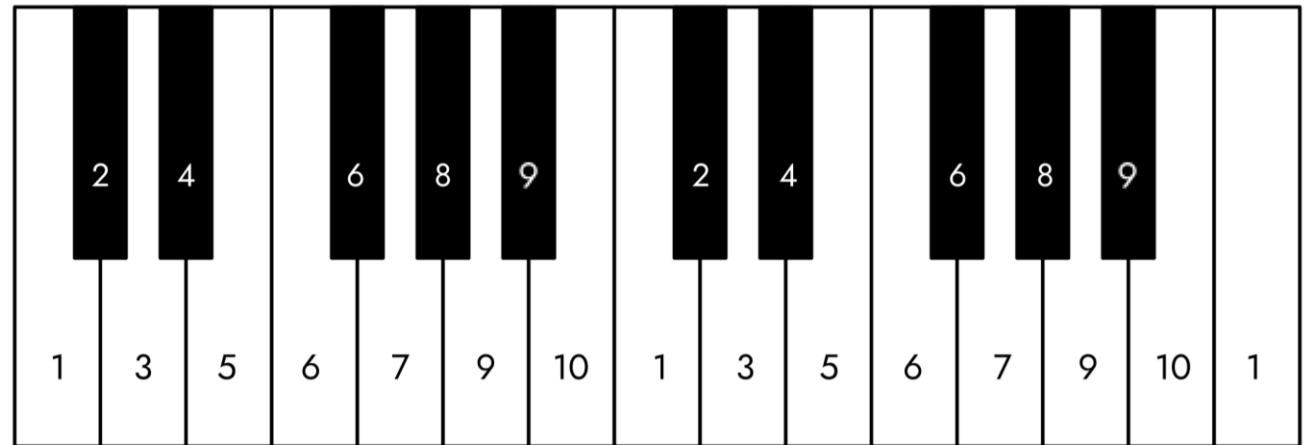
- Experience
- Personal preference
- Aesthetic taste

Which mapping is the best?

Matter of:

- Experience
- Personal preference
- Aesthetic taste

Leszek Moźdzers choice:



Which mapping is the best?

Matter of:

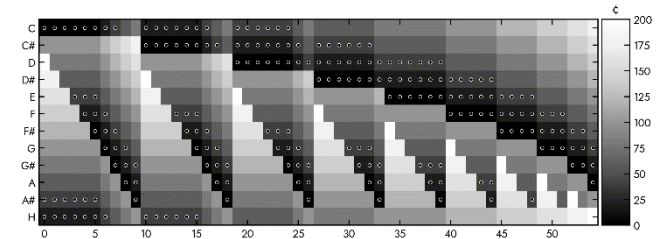
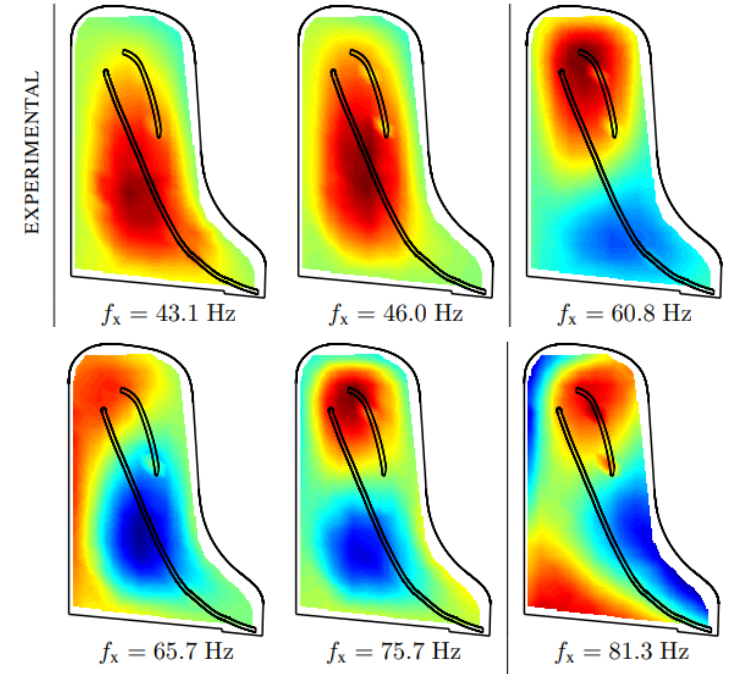
- Experience
- Personal preference
- Aesthetic taste

Leszek Możdżers choice:



Summary

- 10 TET scale = octave/10
- From idea to object → physics!
- Details create unique timbre
- Proposed method gives new possibilities
- Acoustic decaphonic piano





http://nowamiodowa.pl/themes/demo/assets/images/obrazy/nowa_miodowa_hero.jpg

Concert

13.07.2023, godzina 19:00
Nowa Miodowa,
Rakowiecka 21,
Warszawa

Leszek Możdżer



Acknowledgements



Paweł Nurowski

Paweł Trautman

Andrzej Włodarczyk

Krzysztof Pawłowski

Piotr Sułkowski

Michał Jachura

Andrzej Karczyński

Leszek Możdżer

Dorota Wink

Concert grand piano:

Roman Galiński

Jan Grzyśka

Ryszard Mariański

Mirek Mastalerz

Sławomir Rosa

**FACULTY OF
PHYSICS**



The lecture is organized as a part of conference “GRIEG meets Chopin” and is funded by the Norwegian Financial Mechanism 2014-2021, with project registration number 2019/34/H/ST1/00636.

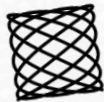
Concert

13.07.2023, godzina 19:00
Nowa Miodowa,
Rakowiecka 21,
Warszawa

LESZEK MOŹDŻER SOLO

PREMIERA
FORTEPIANU
DEKAFONICZNEGO

NOWA MIODOWA
SALA KONCERTOWA ZPSM NR 1,
UL. RAKOWIECKA 21, WARSZAWA



13.07.2023
godz. 19:00

W trakcie koncertu Leszek Możdżer - pianista światowej klasy, odważny eksplorator i oryginalny twórca, wyróżniający się własnym językiem muzycznym - zaprezentuje powstały z jego inicjatywy pierwszy na świecie akustyczny fortepian dekafoniczny. W takim fortepianie jedna oktawa jest podzielona na dziesięć równych interwałów (zgodnie z tzw. skalą 10 TET), co odróżnia go od najczęściej stosowanego systemu, w którym oktawa jest podzielona na dwanaście części (12 TET).

Aby marzenie pianisty mogło się spełnić, konieczne było rozwiązanie szeregu problemów praktycznych i technicznych. Współpraca nawiązana z prof. Pawłem Nurowskim, matematykiem i fizykiem z Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk, a także z Aleksandrem Boguckim z Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego zaowocowała opracowaniem bezpiecznej metody pozwalającej na przekształcenie istniejącego fortepianu w fortepian dekafoniczny. Głównym problemem, który należało rozwiązać było zmniejszenie naprężeń powstających w trakcie przestrojenia oraz zachowanie barwy instrumentu. Całkowite naprężenie strun w fortepianie dla standardowej skali 12 TET wynosi ponad 17 ton. Zmiana stroju do skali 10 TET bez zastosowania opracowanych rozwiązań prowadziłaby do zwiększenia naprężeń o ponad 6 ton, zerwania znacznej części strun lub utraty charakterystycznego brzmienia fortepianu.

Opracowane rozwiązanie problemu, zgłoszone do urzędu patentowego, bazuje na znalezieniu odwzorowania matematycznego pomiędzy istniejącymi klawiszami fortepianu a dźwiękami skali 10 TET, które minimalizuje wszystkie wymienione zagrożenia. W rezultacie otrzymano ponad pięćdziesiąt możliwych odwzorowań. Wykorzystując doświadczenie Andrzeja Włodarczyka, konstruktora fortepianów oraz eksperta w dziedzinie instrumentów historycznych, udało się zawęzić otrzymane rozwiązania do najoptymalniejszych z punktu widzenia akustyki fortepianu, a także zrealizować je na prototypowym dekafonicznym pianinie akustycznym. Ostateczny wybór rozwiązania został dokonany przez Leszka Możdżera w oparciu o jego ogromne doświadczenie pianistyczne. W wybranym przez pianistę rozwiązaniu klawiatura fortepianu dekafonicznego posiada układ, w którym klawisze F i Fis wydają ten sam dźwięk odpowiadający szóstemu stopniowi skali 10 TET, zaś klawisze A i Ais - dziewiątemu.

Akustyczny fortepian dekafoniczny prezentowany w trakcie koncertu powstał dzięki pracy szeregu specjalistów. Klawiaturę wykonał Ryszard Mariański, obudowę Roman Galiński, nad akustyką pracował Sławomir Rosa. Za mechanikę fortepianu, regulację, intonację oraz strojenie odpowiadali Jan Grzyśka i Mirosław Mastalerz.



Norway grants

Koncert odbywa się w ramach konferencji „GRIEG meets Chopin” i jest wspierany ze środków Norweskigo Mechanizmu Finansowego 2014-2021, z projektu o numerze 2019/34/H/ST/00636.

Fundacja
Nowa
Miodowa



ZPSM NR 1