

Fale stojące. Mechanizm wytwarzania dźwięku w instrumentach muzycznych

Wstęp do tematu: Fale stojące. Mechanizm wytwarzania dźwięku w instrumentach muzycznych. Zasób zawiera: ogólny wstęp do tematu, fotografię, odwołanie do wcześniejszej wiedzy ucznia oraz cele lekcji sformułowane w języku ucznia.

Zasób zawiera: wstęp do pojęcia dźwięku; opis doświadczenia, którego celem jest wytworzenie fali stojącej na sznurze zamocowanym na jednym końcu zilustrowany fotografią przedstawiającą oczekiwany efekt doświadczenia; schemat fali stojącej z opisem; określenie charakterystycznych elementów fali stojącej; ilustrację jednej czwartej długości fali stojącej z zaznaczonymi węzłem i strzałką; określenie częstotliwości podstawowej, polecenie dla ucznia (zadanie rachunkowe).

Zasób zawiera: określenie instrumentu muzycznego; ilustrację przedstawiającą falę stojącą w strunie w różnych konfiguracjach; wyjaśnienie pojęć: alikwot/składowa harmoniczna; polecenie dla ucznia.

Zasób zawiera opis doświadczenia, którego celem jest wytworzenie dźwięku w piszczałce zamkniętej; film pt. Czy falę stojącą w powietrzu można zobaczyć? ciekawostkę dotyczącą piszczałki; zadanie interaktywne typu prawda/ fałsz, składające się z sześciu sformułowań.

Zasób zawiera: siedem sformułowań podsumowujących; dwa polecenia dla ucznia (jedno rachunkowe, drugie problemowe).

Zasób zawiera wyjaśnienie pojęć: częstotliwość podstawowa, fala stojąca, rezonator.

Zasób zawiera trzy zadania interaktywne dotyczące dźwięków.

Fale stojące. Mechanizm wytwarzania dźwięku w instrumentach muzycznych

Zostać wirtuozem gitary, skrzypiec, fortepianu – wielu ma takie marzenia. Każdy wirtuoz musi jednak zrobić pierwszy krok i dowiedzieć się, jak na wybranym instrumencie wytworzyć dźwięk o odpowiedniej wysokości, zgodnie z zapisem nutowym.



Elementem generującym dźwięk w fortepianie nie są bynajmniej klawisze, lecz struny rozpięte na stalowej ramie, uderzane młoteczkami obciążonymi filcem. Jednak odpowiednie rozwiązania konstrukcyjne sprawiają, że dynamika uderzenia palca w klawisz jest przenoszona na dynamikę uderzenia młoteczek w strunę

Źródło: Oskar Seljeskog, dostępny w internecie: flickr.com, licencja: CC BY 2.0.

Przed przystąpieniem do zapoznania się z tematem, należy znać poniższe zagadnienia

- definicję fali oraz fal harmoniczych;
- wielkości opisujące fale: amplituda, okres i częstotliwość, długość i prędkość fali;
- cechy dźwięku: wysokość, głośność i barwa dźwięku;
- związek cech dźwięku z wielkościami fizycznymi charakterystycznymi dla drgań i fal.

Nauczysz się

- opisywać falę stojącą i nazywać jej charakterystyczne elementy;
- opisywać mechanizm wytwarzania dźwięków w instrumentach muzycznych;
- wytwarzać dźwięki o większej i mniejszej częstotliwości od wskazanego dźwięku wzorcowego za pomocą instrumentu muzycznego lub dowolnego układu drgającego.

Fale stojące

Dźwięk jest zjawiskiem złożonym. Fizyk, który chce wyjaśnić mechanizm powstawania dźwięku w instrumentach muzycznych, stoi przed trudnym wyzwaniem. Przede wszystkim jednak musi znać i rozumieć pojęcie fali stojącej. W celu jego przybliżenia zaczniemy od przeprowadzenia doświadczenia.

Doświadczenie 1

Wytworzenie fali stojącej na sznurze zamocowanym na jednym końcu.

Co będzie potrzebne

- elastyczny sznur (może być gumowy);
- solidnie zamocowany w ścianie hak lub inny element, do którego możemy przywiązać sznur. Najlepiej, aby uchwyt był na wysokości łokcia eksperymentatora.

Instrukcja

1. Przywiąż solidnie jeden koniec sznurka do uchwytu na ścianie.
2. Chwyć drugi koniec sznura i odsuń się od ściany na odległość równą długości sznurka; sznurek powinien być rozciągnięty w kierunku poziomym.
3. Potrząsaj rytmicznie trzymanym końcem sznurka, zmieniaj częstotliwość ruchu i dobierz ją tak, aby uzyskać efekt podobny do tego na zdjęciu.
4. Zwiększ częstotliwość ruchu ręki i ponownie poszukaj takiej sytuacji, gdy drgania sznura ustabilizują się.



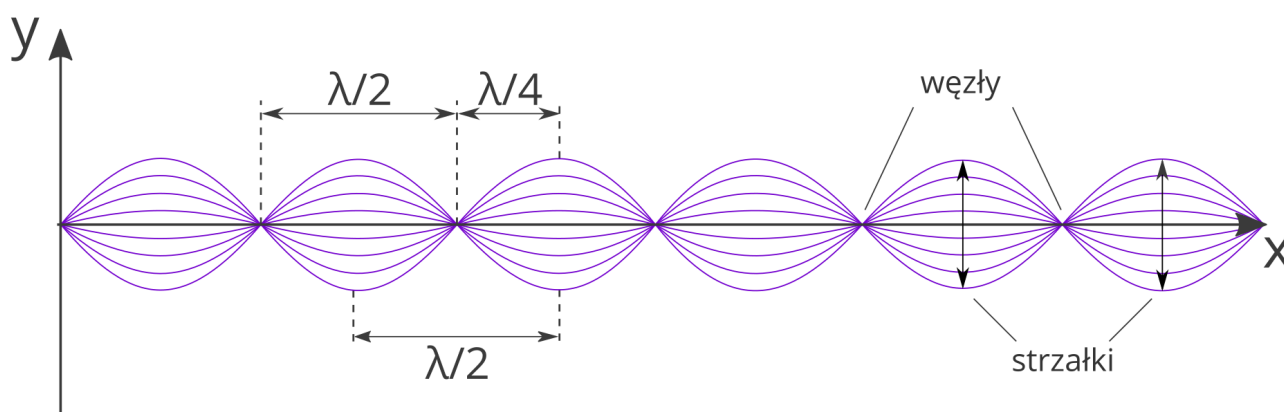
Fala powstaje kiedy szybko poruszamy końcem liny – oczekiwany efekt doświadczenia

Źródło: Tomorrow Sp. z o.o.

Podsumowanie

Zaobserwowany efekt nosi nazwę **fali stojącej**. Wprawiając w drgania koniec sznura, wzbudzałyśmy w nim falę. Fala ta, docierając do umocowanego końca sznura, odbijała się. W ten sposób wzdłuż sznura biegły dwie fale: jedna od eksperymentatora, a druga do eksperymentatora. Fale te nakładały się na siebie. Przy niektórych, wybranych częstotliwościach wynik ich nakładania się wyglądał tak, jakby żadna fala nie biegła wzdłuż sznura, tylko niektóre jego elementy drgały z maksymalną amplitudą, inne z mniejszą, a niektóre nie drgały wcale.

Poniższy rysunek przedstawia schematycznie uzyskaną falę stojącą.



Schemat fali stojącej

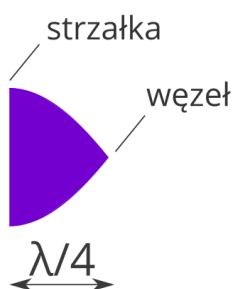
Fala stojąca ma charakterystyczne dla siebie elementy:

- **węzły** – są to te miejsca ośrodka (sznurka), które nie drgają (amplituda drgań jest równa zero);
- **strzałki** – są to te miejsca ośrodka (sznurka), które drgają z maksymalną amplitudą.

Odległość między węzłem a sąsiednią strzałką jest równa $\frac{1}{4}$ długości fali biegnącej w sznurze, natomiast dwa sąsiednie węzły lub dwie sąsiednie strzałki oddalone są o $\frac{1}{2}$ długości fali biegnącej w ośrodku.

Zwróć uwagę, że w naszym przykładzie (eksperyment z początku tego rozdziału) w miejscu, gdzie sznur był umocowany, zawsze powstawał węzeł, natomiast w miejscu pobudzonym do drgań tworzyła się strzałka.

Zatem najdłuższa fala, jaka mogła powstać w naszym sznurze, miała jeden węzeł i jedną strzałkę. Jej kształt pokazuje poniższy rysunek.



Fala stojąca o największej długości

Źródło: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

Największej długości fali w przeprowadzonym przez nas doświadczeniu ze sznurem odpowiada najmniejsza częstotliwość drgań, przy której udało się uzyskać falę stojącą. Tę częstotliwość nazywamy **częstotliwością podstawową**. Zwróć uwagę, że największa długość fali (a tym samym najmniejsza częstotliwość fali) związana jest z długością sznura ($\lambda = 4L$).

Ćwiczenie 1

Odległość między sąsiednimi strzałkami w pewnej fali stojącej wynosi 40 cm. Jaką długość ma fala biegnąca w ośrodku, w którym powstała fala stojąca? Zaznacz poprawną odpowiedź.

☐ Długość fali w ośrodku wynosi 60 cm.

☐ Długość fali w ośrodku wynosi 80 cm.

☐ Długość fali w ośrodku wynosi 90 cm.

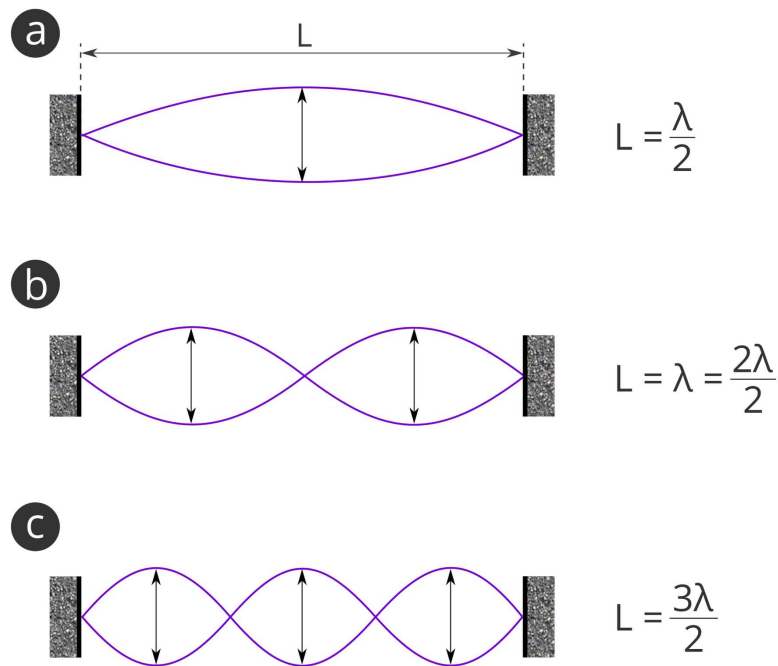
☐ Długość fali w ośrodku wynosi 40 cm.

Instrumenty strunowe

Instrumentem muzycznym możemy nazwać każdy przedmiot, który wytwarza dźwięk, a ten dźwięk wykorzystywany jest do tworzenia muzyki. Ponieważ źródłem dźwięków są ciała drgające, to elementem zasadniczym każdego instrumentu muzycznego musi być ciało, które drga z odpowiednią częstotliwością. Tym ciałem może być struna w instrumentach strunowych lub słup powietrza w instrumentach dętych, membrana głośnika lub bębna, sprężysta blaszka w pozytywkach lub cymbałkach itp.

W nauce o instrumentach muzycznych wprowadza się różnego rodzaju podziały i systematykę. W e – podręczniku ograniczono się do opisanie dwóch popularnych typów instrumentów, czyli strunowych i dętych.

Elementem drgającym w instrumentach strunowych jest struna – sprężysty drut, włókno sztuczne lub naturalne itp. Struna jest zamocowana na obu końcach. Można pobudzać ją do drgań w różny sposób: szarpiąc (jak w gitarze), uderzając młoteczkami (jak w fortepianie) lub pocierając smyczkiem (jak w skrzypcach). Niezależnie od sposobu pobudzenia do drgań, w strunie powstaje fala stojąca z węzłami w miejscach zamocowania. Symboliczny obraz takiej fali stojącej pokazuje poniższy rysunek.



Fala stojąca w strunie

Źródło: Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

Oznacza to, że najdłuższa fala, jaka może powstać w strunie, składa się z dwóch węzłów i jednej strzałki. Długość takiej fali jest dwa razy większa od długości struny ($\lambda = 2L$).

Ponieważ z najdłuższą falą stojącą w strunie związana jest jej częstotliwość podstawowa, możemy powiedzieć, że krótsza struna drga z większą częstotliwością podstawową i wydaje dźwięk wyższy.

Można łatwo się o tym przekonać, mając do dyspozycji gitarę lub inny instrument strunowy. Jeśli najpierw pobudzimy do drgań całą strunę, a następnie skrócimy drgającą część struny, przyciskając ją w jakimś miejscu na gryfie (progu), to dźwięk uzyskany w drugim przypadku będzie wyższy od pierwszego.

Mówimy tu o jednej i tej samej strunie. Częstotliwość dźwięku zależy bowiem również od grubości struny: grubsza (masywniejsza) struna wydaje dźwięk niższy niż cienka struna o tej samej długości. Dodatkowo możemy wpływać na wysokość dźwięku emitowanego przez strunę, zmieniając jej napięcie. Dzieje się tak przy strojeniu instrumentu.

W strunie oprócz fali podstawowej może powstawać jednocześnie kilka innych fal stojących o większej częstotliwości. Takie dodatkowe fale stojące nazywane są alikwotami lub składowymi harmonicznymi. Wirtuozi instrumentów strunowych wykorzystują je do wykonywania [flażoletów](#).

Ćwiczenie 2

Wyjaśnij, na czym polega zjawisko flażoletów.

Instrumenty dęte (piszczałki)

Czynnikiem, który w każdym instrumencie dętym odpowiada za powstawanie dźwięku, jest słup powietrza ograniczony elementami konstrukcyjnymi instrumentu. Dla uproszczenia taki „element roboczy” będziemy nazywać piszczałką. Piszczałki mogą być otwarte lub zamknięte.

Zbudujmy piszczałkę zamkniętą, wykorzystując zwykłą probówkę.

Doświadczenie 2

Wytworzenie dźwięku w piszczalce zamkniętej.

Co będzie potrzebne

- probówka o długości 15 cm;
- woda;
- alternatywnie: mikrofon i komputer z programem „Oscyloskop”.

Instrukcja

1. Do probówki wlej nieco wody, tak aby słup powietrza powyżej poziomu wody wynosił około 12 cm.
2. Dmuchnij energicznie nad górną krawędzią probówki – probówka wyda dźwięk.
3. Zwróć uwagę na wysokość dźwięku. Jeśli dysponujesz komputerem i mikrofonem, obserwuj wskazania oscyloskopu i zanotuj częstotliwość sygnału zarejestrowanego przez mikrofon.
4. Dolej wody do probówki, zmniejszając długość słupa powietrza do około 8 cm i ponownie „zagraj” na takiej piszczalce. Obserwuj wysokość dźwięku wydawanego przez piszczalkę.
5. Ponownie dolej wody do probówki, skracając słup powietrza i ponownie zagraj na piszczalce.

Podsumowanie

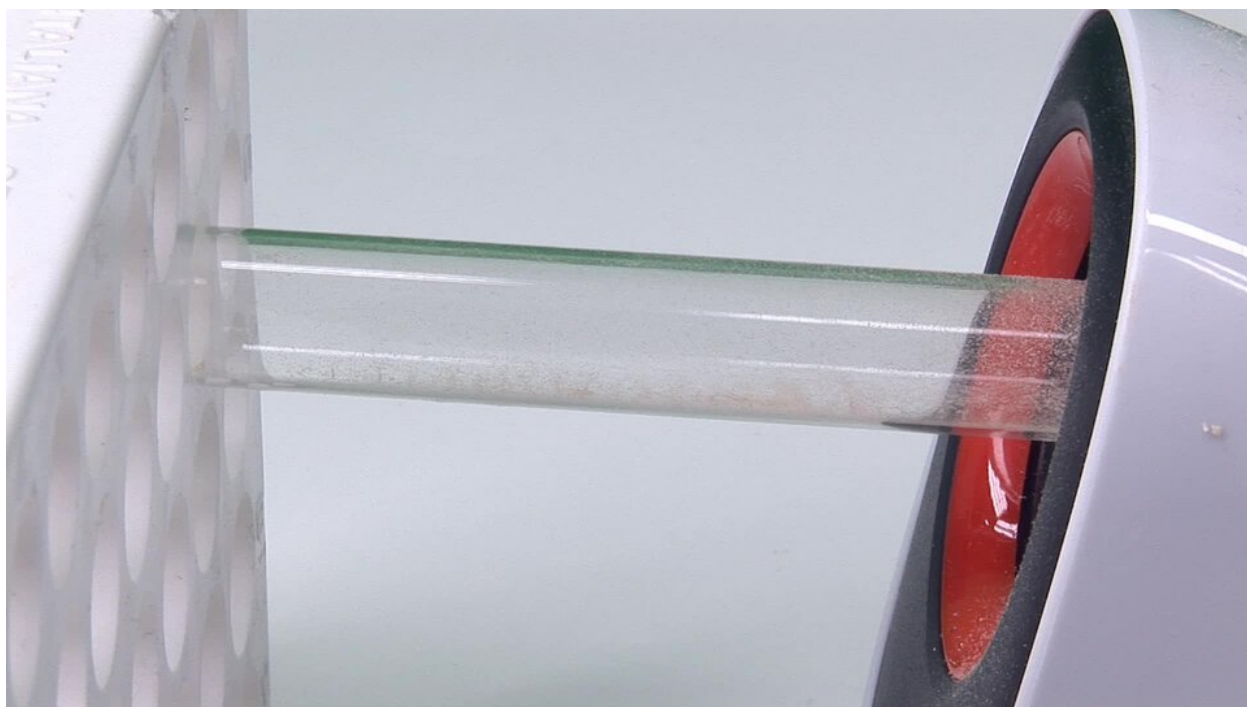
Słup powietrza w probówce nad powierzchnią wody wydawał dźwięk. Wysokość (częstotliwość) tego dźwięku zależała od długości słupa powietrza w probówce.

Ćwiczenie 3

Zapisz, jak zmieniała się (rosła czy malała) wysokość dźwięku emitowanego przez piszczałkę, gdy jej długość malała.

Piszczałka wydawała dźwięk. Oznacza to, że słup powietrza w probówce drgał i powstała w nim fala stojąca. Tuż nad powierzchnią wody utworzył się węzeł, a u wylotu próbówki – strzałka.

A jak wyglądają drgania słupa powietrza w piszczałce otwartej? Zostało to opisane w poniższym filmie.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R67HOevQNM88J>

Czy falę stojącą w powietrzu można zobaczyć?

Źródło: Tomorrow Sp.z o.o.

Film przedstawia drgania pyłu korkowego rozsypanego w szklanej rurze w chwili, gdy w tej rurze powstaje akustyczna fala stojąca.

W profesjonalnych instrumentach dętych też są piszczałki. Różnią się one sposobem pobudzania do drgań zawartego w nich słupa powietrza oraz materiałem, z którego je wykonano. Może to być drewno w instrumentach dętych drewnianych lub metal w instrumentach blaszanych. Wszystko to wpływa na barwę dźwięku, ale nie wpływa na częstotliwość podstawową dźwięku: ta zależy tylko od długości piszczałki.

Ciekawostka

Wysokość dźwięku zależy tylko od długości piszczałki pod warunkiem, że piszczałka wypełniona jest powietrzem. Gdyby wypełnić piszczałkę innym gazem, wysokość dźwięku zmieniłaby się bez zmiany rozmiarów instrumentu, ale to nie jest przedmiotem rozważań w tym podręczniku. Zainteresowanych odsyłamy do innych źródeł.

Ćwiczenie 4

Które z poniższych twierdzeń jest prawdziwe, a które fałszywe? Przy każdym zdaniu w tabeli zaznacz „Prawda” albo „Fałsz”.

Zdanie	Prawda	Fałsz
Fala stojąca to fala, w której cząsteczki ośrodka nie wykonują drgań.	☐	☐
Każdy przedmiot wydający dźwięk może być instrumentem muzycznym.	☐	☐
Węzeł i strzałka to charakterystyczne elementy fali stojącej.	☐	☐
Węzeł to takie miejsce, w którym cząsteczki ośrodka drgają z maksymalną amplitudą.	☐	☐
Dłuższa piszczałka wydaje dźwięk o większej częstotliwości.	☐	☐
Struna wydaje dźwięk o częstotliwości 600 Hz. Aby uzyskać dźwięk o częstotliwości 800 Hz, należy zmniejszyć długość struny.	☐	☐

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>, licencja: CC BY 3.0.

Podsumowanie

- Podstawowym elementem instrumentu muzycznego jest ciało drgające: struna, słup powietrza, membrana itp.
- W drgających elementach instrumentów (strunach, słupach powietrza, membranach) powstają fale stojące.

- Fale stojące są wynikiem nałożenia się fal biegnących w przeciwne strony i składają się z:
 - węzłów – miejsc, w których elementy ośrodka nie drgają;
 - strzałek – miejsc, gdzie amplituda drgań elementów ośrodka jest maksymalna.
- Odległość dwóch sąsiednich węzłów równa jest połowie długości fali biegnącej w ośrodku.
- Wysokość (częstotliwość) dźwięku emitowanego przez instrument zależy od najdłuższej (podstawowej) fali, jaka może powstać w elemencie drgającym, a ta związana jest z wielkością tego elementu.
- W instrumentach dętych większej długości piszczałki odpowiada mniejsza częstotliwość podstawowa, a tym samym niższy dźwięk.
- W instrumentach strunowych wysokość dźwięku zależy od:
 - długości struny; większa długość – niższy dźwięk,
 - grubości struny; cieńsza struna – wyższy dźwięk,
 - naciągu struny; większa siła naciągu – wyższy dźwięk.

Ćwiczenie 5

Zamocowana z obu końców struna ma długość 60 cm, a dźwięk rozchodzi się w niej z prędkością o wartości $5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Oblicz częstotliwość podstawową powstającego dźwięku oraz długość wytworzonej fali dźwiękowej w powietrzu. Prędkość dźwięku w powietrzu przyjmij równą $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Częstotliwość podstawowa tego dźwięku to około , a długość fali w powietrzu to około .

Ćwiczenie 6

Bardzo popularnym dziś instrumentem muzycznym jest syntezator. Skorzystaj z dostępnych Ci źródeł informacji i odpowiedz na pytanie: co jest elementem drgającym w tym instrumencie oraz od czego zależy wysokość dźwięku emitowanego przez ten instrument?

Słownik

częstotliwość podstawowa

najmniejsza możliwa częstotliwość fali stojącej powstającej w ośrodku (strunie lub słupie powietrza) o długości L . Jej wartość zależy od L .

fala stojąca

efekt nałożenia się fali biegnącej ze źródła i odbitej w danym ośrodku. Nie obserwuje się w niej przesuwania się grzbietów i dolin fali; charakterystycznymi elementami są węzły (miejsca wygaszenia drgań) i strzałki (miejsca, gdzie drgania mają maksymalną amplitudę).

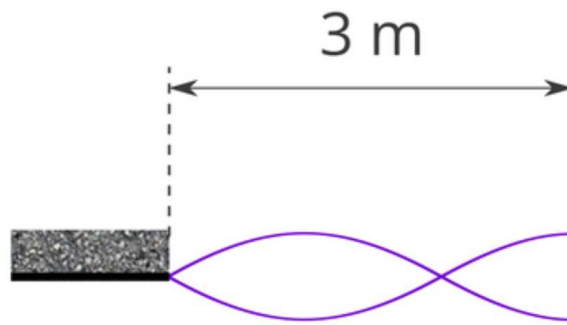
flażolet

sposób wydobywania dźwięku (np. z instrumentu strunowego) polegający na tym, że jedna składowa harmoniczna dominuje nad innymi, w szczególności nad tonem podstawowym.

rezonator

element instrumentu muzycznego służący do wzmacniania dźwięku, na przykład pudło rezonansowe gitary czy fortepianu.

Zadania podsumowujące rozdział



Sznurek o długości $L = 3 \text{ m}$ zamocowano jednym końcem do ściany, i potrząsając drugim końcem, wytworzono w nim falę stojącą jak na rysunku powyżej. Ile wynosi długość fali biegnącej w tym sznurze?

☐ 2 m

☐ 3 m

☐ 4 m

☐ 6 m

☐ 1 m

Ćwiczenie 8



Która z wymienionych czynności doprowadzi do zwiększenia wysokości dźwięku emitowanego przez gitary? Zaznacz poprawne odpowiedzi.

☐ Wybranie cieńszej struny o tej samej długości.

☐ Zmniejszenie napięcia struny.

☐ Wybranie grubszej struny o tej samej długości.

☐ Zwiększenie napięcia struny.

☐ Mocniejsze szarpnięcie struny.

☐ Skrócenie struny.

☐ Wydłużenie struny.

Źródło: Helena Nazarenko-Fogt <Helena.Nazarenko-Fogt@up.wroc.pl>.