# Mecânica

Oscilações e ondas

PHYSICS EXPERIMENT

# Ondas mecânicas

## ANÁLISE DE ONDAS ESTÁTICAS SOBRE UMA MOLA ESPIRAL TENSIONADA E UMA CORDA TENSIONADA.

- Geração de ondas longitudinais estáticas em uma mola espiral e de ondas transversais estáticas em uma corda.
- Medição das frequências próprias $f_n$ em dependência do número $n$ de nós.
- Determinação dos comprimentos de onda $\lambda_n$ pertinentes e da velocidade de onda c.

UE1050700

03/16 UD

Fig. 1: Disposição de medição para análise de ondas estáticas sobre corda tensionada (à esq.) e uma mola tensionada (à dir.).

## FUNDAMENTOS GERAIS

**Ondas mecânicas surgem, por exemplo, em uma mola espiral tensionada ou em uma corda tensionada. Na mola espiral, fala-se em ondas longitudinais, pois o deslocamento ocorre paralelamente à direção de propagação. Ondas na corda, por outro lado, são ondas transversais. Em ambos os casos, formam-se ondas estáticas quando o meio portador é firmemente fixado em uma extremidade, pois a onda incidente e a onda refletida na extremidade fixa se sobrepõem com amplitude e comprimento de onda iguais. Se a outra extremidade também for fixada, as ondas somente podem espalhar-se se as condições de ressonâncias forem satisfeitas.**

Seja $\xi(x,t)$ o deslocamento longitudinal, respectivamente transversal no local $x$ ao longo do meio portador no tempo $t$. Então, vale

$$(1) \quad \xi_1(x,t) = \xi_0 \cdot \cos\left(2\pi \cdot f \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right)$$

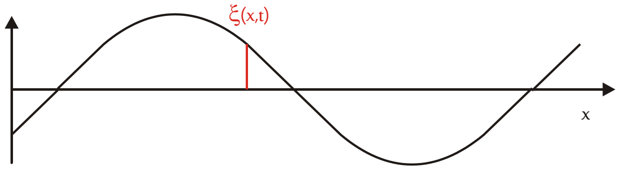


Fig. 2: Representação para definição do deslocamento local $\xi(x,t)$

uma onda senoidal correndo sobre o meio portador para a direita. A frequência $f$ e o comprimento de onda $\lambda$ são aqui interligados pela relação

(2) $c = f \cdot \lambda$
$c$: Velocidade da onda.

Se esta onda for refletida vindo da esquerda em $x$ = 0 em uma extremidade fixa, então se formará a onda correndo para a esquerda

(3) $\xi_2(x,t) = -\xi_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x)$

Ambas as ondas se sobrepõem para a onda estática

(4) $\xi(x,t) = 2\xi_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \sin(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x)$

Estas reflexões valem completamente independentemente do tipo de onda e do meio portador.

Se a segunda extremidade também for fixada e isto estiver em $x$ = $L$, para todos os tempos, a condição de ressonância

(5) $\xi(L,t) = 0 = \sin(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L)$

tem que ser satisfeita. Disto se conclui, para o comprimento de onda

(6a) $\frac{2\pi}{\lambda_n} \cdot L = (n+1) \cdot \pi$ bzw. $\lambda_n = 2 \cdot \frac{L}{n+1}$

ou $L = (n+1) \cdot \frac{\lambda_n}{2}$

e, conforme equação (2) para a frequência

(6b) $f_n = (n+1) \cdot \frac{c}{2 \cdot L}$

Ou seja, a condição de ressonância (5) demanda que o comprimento $L$ seja exatamente um múltiplo inteiro da metade do comprimento de onda. A frequência de ressonância tem que se adequar a este comprimento de onda. $n$ é aqui o número de nós de oscilação. Ele é zero, quando se formar somente um ventre na oscilação básica (vide Fig. 3).

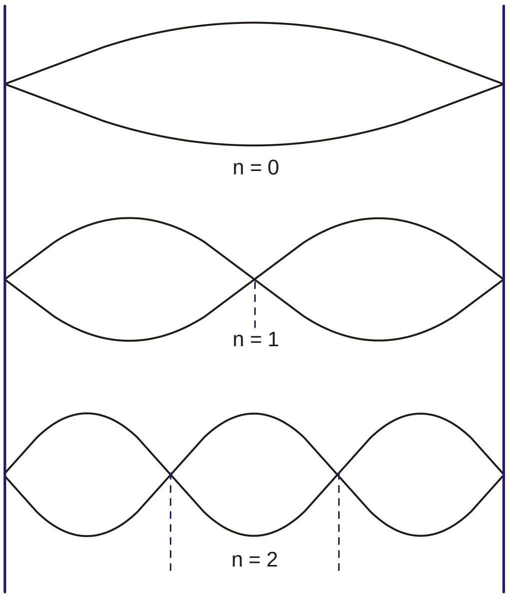


Fig. 3: Ondas estáticas

Na experiência, o meio portador – uma mola espiral ou uma corda – é fixado em uma extremidade. Na distância $L$ em relação a ela, a outra extremidade é ligada a um gerador de vibrações que é operado por um gerador de funções para gerar oscilações com baixa amplitude e frequência $f$ ajustável. Esta extremidade também pode ser observada como extremidade fixa para aproximação.

## LISTA DE APARELHOS

| | |
|---|---|
| 1 Acessórios para oscilações de molas | 1000703 (U56003) |
| 1 Acessório para ondas em cordas | 1008540 (U85560081) |
| 1 Gerador de vibrações | 1000701 (U56001) |
| 1 Gerador de funções FG 100 @230V | 1009957 (U8533600-230) |
| ou | |
| 1 Gerador de funções FG 100 @115V | 1009956 (U8533600-115) |
| 1 Dinamômetro de precisão, 2 N | 1003105 (U20033) |
| 1 Fita métrica, 2 m | 1002603 (U10073) |
| 1 Par de cabos de segurança para experiências, 75cm, vermelho/azul | 1017718 (U13816) |

## MONTAGEM

**Ondas sobre mola espiral**

- Fixar a haste de suporte angulada no encaixe no lado traseiro do gerador de vibrações.
- Enganchar uma extremidade da mola espiral na haste de suporte angulada, fixar o pino com auxílio do parafuso borboleta.
- Fixar a mola espiral com auxílio do pino no gerador de vibrações e tensionar desta forma.
- Ajustar o comprimento (efetivo) L da mola espiral (fig. 4a) para aprox. 30 cm. Se for o caso, adaptar a posição da haste de suporte angulada.
- Conectar o geração de funções ao gerador de vibração.

**Ondas sobre corda**

- Antes da colocação em operação, remover a trava de transporte (parafuso com porca) da placa de base.
- Parafusar a haste curta de suporte na placa de base. Parafusar a haste longa de suporte na haste curta de suporte.
- Colocar o dispositivo de desvio e o encaixe para dinamômetro na haste e fixar.
- Fixar a haste do suporte com pino no encaixe no lado de trás do gerador de vibrações.
- Pendurar o dinamômetro no encaixe. Se for o caso, executar calibração do ponto zero antes.
- Enganchar o elástico no dinamômetro e conduzi-lo ao gerador de vibração sob o dispositivo de desvio. Atentar para que passe paralelamente à mesa.
- Conduzir a corda pelo pino no oscilador do gerador de vibração e pela haste do suporte com pino. Com auxílio do parafuso borboleta, inicialmente fixar a corda somente na haste do suporte com pino. Isto serve como alívio de tensão transversal para a membrana do alto-falante (Fig. 5).

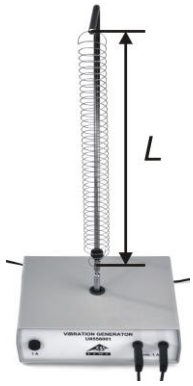


Fig. 4a: Ilustração do comprimento *L* efetivo da mola espiral tensionada.

- Selecionar a distância entre o suporte com o dispositivo de desvio e o gerador de vibração de forma que o comprimento *L* (efetivo) da corda (Fig. 4b) seja de aprox. 90 cm. Tensionar a corda com auxílio do dinamômetro ($F \approx 0{,}6$ N) e fixá-la apenas levemente com auxílio do parafuso borboleta no pino do oscilador.
- Conectar o geração de funções ao gerador de vibração.

## REALIZAÇÃO

- Medir e anotar os comprimentos *L* efetivos da mola espiral tensionada e da corda tensionada (Fig. 4a, b).
- Selecionar a forma de onda "seno" no gerador de funções. Colocar o ajuste de amplitude em 5 V (posição de 12 horas).
- Aumentar e frequência de 1 Hz lentamente em etapas de 0,1 Hz tanto para a mola espiral quanto para a corda. As frequências de ressonância, em que não se formam nós de oscilação (um ventre de oscilação), um nó de oscilação, bem como dois, três, quatro e cinco nós de oscilação e anotar na Tab. 1 e na Tab. 2.
- Aumentar a força de tensão da corda sucessivamente para 1,0 N e 1,4 N. Para isto, deslocar o dinamômetro na haste do suporte para cima. Repetir respectivamente a medição e anotar as frequências de ressonância na Tab. 2.
- Para a determinação direta da carga da massa da corda, medir o comprimento total $L_0$ e a massa *m* da corda.

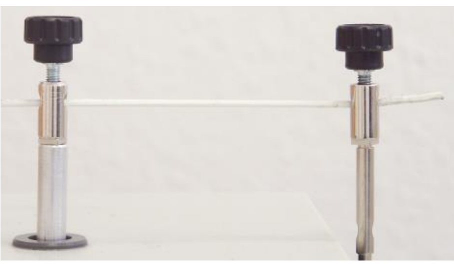

Fig. 5: Ilustração do alívio de tensão transversal da corda tensionada.

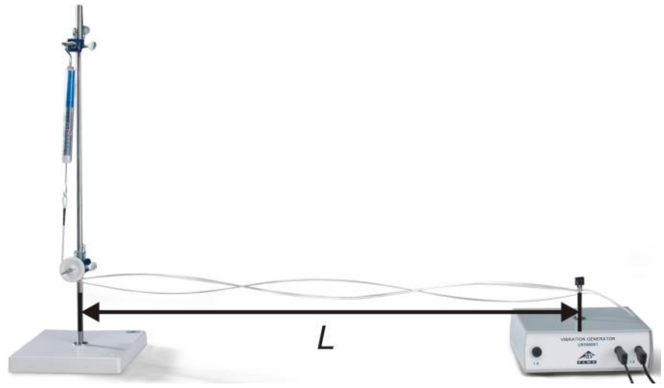


Fig. 4b: Ilustração do comprimento *L* efetivo da corda tensionada.

## EXEMPLO DE MEDIÇÃO

Comprimento *L* da mola espiral tensionada: 0,31 m

Comprimento *L* da corda tensionada: 0,90 m

Tab. 1: Frequência de ressonância como função do número de nós para ondas ao longo de mola espiral

| *n* | $f_n$ / Hz |
|---|---|
| 0 | 7,7 |
| 1 | 15,4 |
| 2 | 23,0 |
| 3 | 30,6 |
| 4 | 38,6 |
| 5 | 45,7 |

Tab. 2: Frequência de ressonância em dependência do número de nós para as ondas na corda com diferentes forças de tensão.

| *n* | $f_n$ / Hz | | |
|---|---|---|---|
| | *F*= 0,6 N | *F*= 1,0 N | *F*= 1,4 N |
| 0 | 7,9 | 9,8 | 12,1 |
| 1 | 15,7 | 19,6 | 24,0 |
| 2 | 23,4 | 29,4 | 35,7 |
| 3 | 30,9 | 39,2 | 47,3 |
| 4 | 39,4 | 49,5 | 59,2 |
| 5 | 47,5 | 58,7 | 71,7 |

Comprimento total da corda $L_0$: 1,05 m

Massa da corda *m*: 3,3 g

# AVALIAÇÃO

**Determinação da velocidade de onda *c***

Se se aplica a frequência de ressonância contra o número dos nós de oscilação, os pontos de medição segundo a equação (6b) ficam em uma reta com a inclinação

$$\text{(7)}\quad \alpha = \frac{c}{2\cdot L} \Leftrightarrow c = 2\cdot L\cdot \alpha\,.$$

Daí, é possível calcular a velocidade de onda *c* com comprimento *L* conhecido.

- Aplicar graficamente as frequências de ressonância $f_n$ para as ondas sobre mola espiral (Tab. 1) e as ondas sobre corda (Tab. 2) contra a número *n* de nós de oscilação e adaptar a respectivamente uma reta (Fig. 6, Fig. 7).
- A partir das inclinações das retas α, determinar as velocidades de ondas *c* e anotar na Tab. 3 (ondas sobre mola espiral) e Tab. 4 (ondas sobre corda).

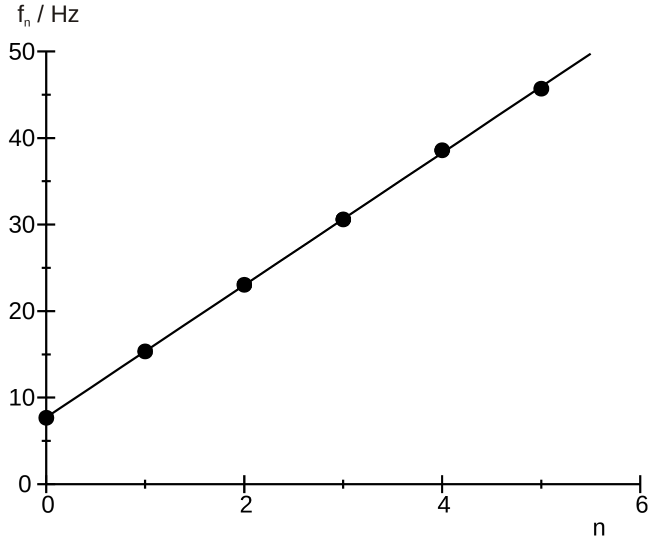


Fig. 6: Frequência de ressonância em dependência do número de nós para as ondas na mola espiral

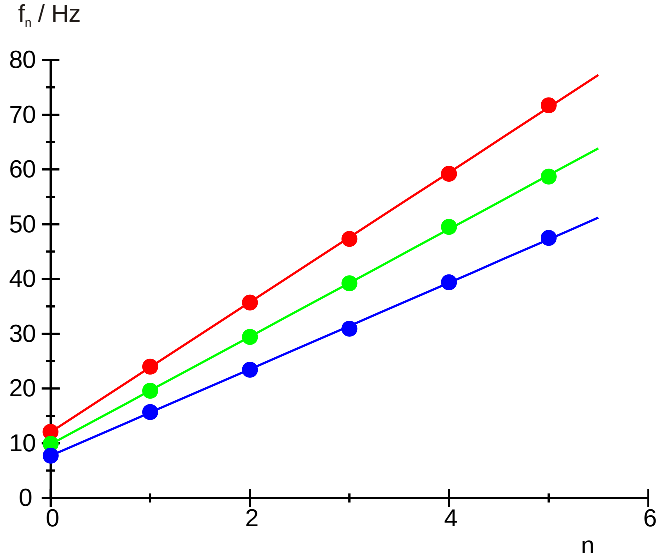


Fig. 7: Frequência de ressonância em dependência do número de nós para as ondas sobre corda com forças de tensão *F* = 0,6 N (azul), *F* = 1,0 N (verde) e *F* = 1,4 N (vermelho).

Tab. 3: Inclinação da reta adaptada e a velocidae de onda daí determinada para as ondas sobre mola espiral, comprimento da mola espiral (tensionada), *L* = 0,31 m.

| α / Hz | *c* / m/s |
|---|---|
| 7,6 | 4,7 |

Tab. 4: Inclinação da reta adaptada,velocidades de ondas daí determinadas e seus quadrados para as ondas sobre corda com diferentes forças de tensão, comprimento da corda (tensionada) *L* = 0,90 m.

| *F* / N | α / Hz | *c* / m/s | $c^2$ / m²/s² |
|---|---|---|---|
| 0,6 | 7,9 | 14,2 | 202 |
| 1,0 | 9,8 | 17,6 | 310 |
| 1,4 | 11,9 | 21,4 | 458 |

**Determinação dos comprimentos de onda $\lambda_n$ pertencentes às frequências de ressonância $f_n$**

- Calcular os comprimentos de onda $\lambda_n$ uma vez a partir dos comprimentos *L* e do número de nós *n*, e uma vez a partir das frequências de ressonância $f_n$ e as velocidades de onda *c* para as ondas sobre mola espiral (Tab. 1, Tab. 3) e as ondas sobre corda (Tab. 2, Tab. 4) segundo as equações (6a) e (2) e anotar na Tab. 5 e Tab. 6.

Tab. 5: Comprimento de onda em dependência do número de nós para as ondas sobre mola espiral, comprimento da mola espiral (tensionada) *L* = 0,31 m.

| *n* | $\lambda_n = 2\cdot\frac{L}{n+1}$ | $\lambda_n = \frac{c}{f_n}$ |
|---|---|---|
| 0 | 0,62 m | 0,62 m |
| 1 | 0,31 m | 0,31 m |
| 2 | 0,21 m | 0,21 m |
| 3 | 0,16 m | 0,16 m |
| 4 | 0,12 m | 0,12 m |
| 5 | 0,10 m | 0,10 m |

Tab. 6: Comprimento de onda em dependência do número de nós para as ondas sobre corda, comprimento da corda (tensionada) $L$ = 0,90 m.

| $n$ | $\lambda_n = 2 \cdot \frac{L}{n+1}$ | $\lambda_n = \frac{c}{f_n}$ | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $F$= 0,6 N | $F$= 1,0 N | $F$= 1,4 N |
| 0 | 1,80 m | 1,80 m | 1,80 m | 1,77 m |
| 1 | 0,90 m | 0,90 m | 0,90 m | 0,89 m |
| 2 | 0,60 m | 0,61 m | 0,60 m | 0,60 m |
| 3 | 0,45 m | 0,46 m | 0,45 m | 0,45 m |
| 4 | 0,36 m | 0,36 m | 0,36 m | 0,36 m |
| 5 | 0,30 m | 0.30 m | 0,30 m | 0.30 m |

Os comprimentos de onda, conforme esperado, conferem.

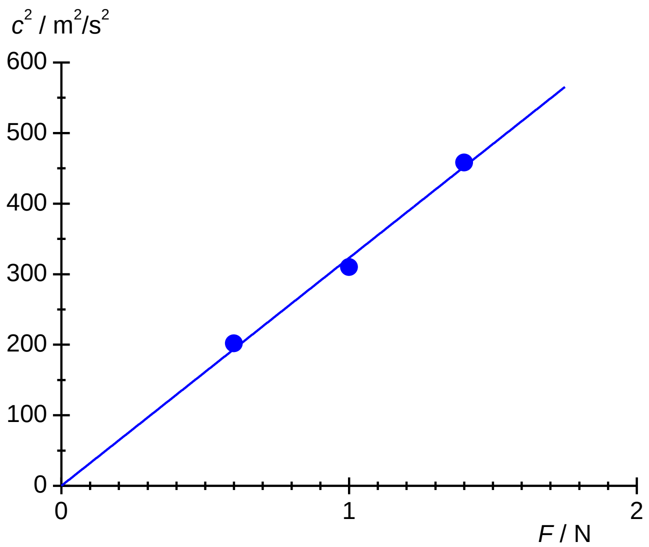


Fig. 8: Quadrado do comprimento de onda $c^2$ das ondas sobre a corda em dependência de $F$.

**Determinação da densidade de peso μ da corda**

A velocidade de onda depende, com os outros parâmetros iguais, da força de tensão $F$, como atestam a Fig. 7 e Tab. 4 para as ondas sobre corda. Vale:

$$(8)\quad c = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \Rightarrow c^2 = \frac{1}{\mu} \cdot F\,.$$

$F$: Força de tensão
μ :Densidade de peso

- Calcular os quadrados das velocidades de onda $c^2$, anotar na Tab. 4, aplicar graficamente contra a força de tensão $F$ e adaptar uma reta (Fig. 8).
- A partir da inclinação da reta conforme equação (8), determinar a densidade de peso μ da corda por formação do valor inverso.

$$(9)\quad \mu = \frac{1}{323\,\frac{\text{m}}{\text{kg}}} = 0{,}0031\,\frac{\text{kg}}{\text{m}} = 3{,}10\,\frac{\text{g}}{\text{m}}\,.$$

- Determinar a densidade de peso diretamente a partir do comprimento e do peso medido de um pedaço de corda.

$$(10)\quad \mu = \frac{m}{L_0} = \frac{3{,}3\ \text{g}}{1{,}05\ \text{m}} = 3{,}14\,\frac{\text{g}}{\text{m}}\,.$$

Os valores para as densidades de peso conferem até cerca de 1%.