

# Lorentzkraftgetriebene schwingende Saite

Ilja Rückmann

Universität Bremen

DPG-Frühjahrstagung 2011, Münster



# Gliederung

- 1 Motivation und Zielstellung
- 2 Grundlagen
- 3 Experimenteller Aufbau und Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung

# Gliederung

- 1 Motivation und Zielstellung
- 2 Grundlagen
- 3 Experimenteller Aufbau und Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung

# Motivation

- Resonante stehende Wellen - ein wichtiges physikalisches Konzept
- Anwendungen
  - Akustik und Optik
  - Elektrizitätslehre (Antennen)
  - Quantenmechanik (Energiezustände des Elektrons im Atom)

Klassisches Monochord:

- nur kurze Beobachtungszeit nach Anzupfen möglich
- Stroboskop notwendig
- nur 1. und evtl. 2. Harmonische beobachtbar

# Idee: Lorentzkraftgetriebenes Monochord

- berührungslose und kontinuierliche Anregung der Saite
- Beobachtung von:
  - Schwingungsbäuchen und Schwingungsknoten
    - mit dem Auge (ohne Stroboskop!) bis 6. Harm.
    - durch Verschieben des Magneten bis 32. Harm.
- Einstellung der Resonanzen (Sehen, Hören, Lissajousfiguren)
- erzwungene Schwingungen, Resonanz, Phasenverschiebung
- Frequenzanalyse:
  - Obertöne in Abhängigkeit von der Stärke der Anregungskraft

# Gliederung

- 1 Motivation und Zielstellung
- 2 Grundlagen
- 3 Experimenteller Aufbau und Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung

# Phasengeschwindigkeit einer transversalen Seilwelle

$$\nu_{\text{PH}} = \sqrt{\frac{F_x}{\rho A}}$$

$\frac{F_x}{A}$  - Zugspannung

$\rho$  - Dichte

Mit  $\nu_{\text{PH}} = \lambda f$  folgt:  $f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{F_x}{\rho A}}$

- Knoten mindestens bei  $x = 0$  und  $x = L$
- Welche Wellenlängen sind möglich?

## Lösung: stehende Wellen

- konstruktive Überlagerung von hin- und rücklaufender Welle

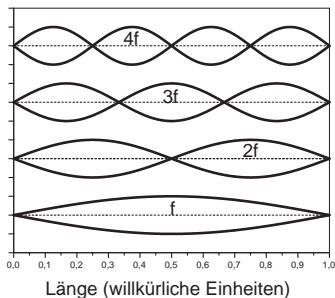
$$y(x, t) = \hat{y} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) + \hat{y} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} + \pi \right) = 2\hat{y} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \frac{2\pi t}{T}$$

- Randbedingung  $y(L) = 0$  liefert:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad \text{mit} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



# Eigenfrequenzen



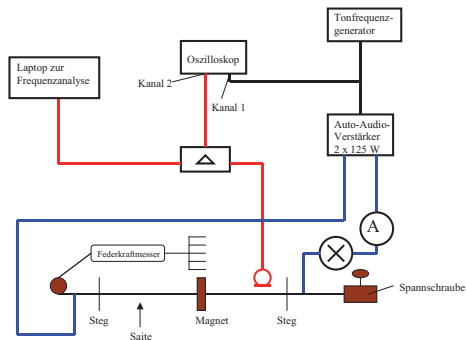
Schwingungszustände bis zur 4. Harmonischen dargestellt zum Zeitpunkt  $t$  und  $t + T_{n/2}$

$$f_n = \frac{v_{PH}}{\lambda_n} = \frac{1}{\lambda_n} \sqrt{\frac{F_c}{\rho A}} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F_x}{\rho A}}$$

# Gliederung

- 1 Motivation und Zielstellung
- 2 Grundlagen
- 3 Experimenteller Aufbau und Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung

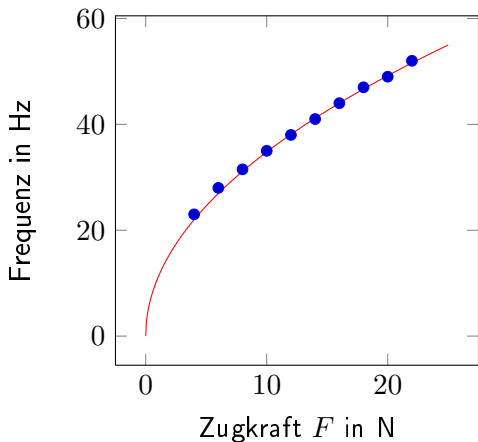
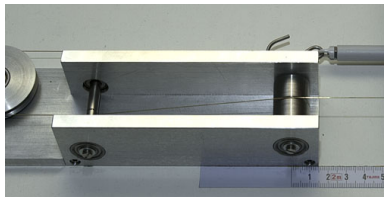
# Experimenteller Aufbau



- Strombegrenzung durch Glühlampe (12 V / 18W) auf 1,5 A
- Saite: Messingdraht! (0,45 mm)
- $F_L$  (0,2 A) = 1,5 mN bis  $F_L$  (1,5 A) = 11,5 mN ( $B = 0,5$  T)

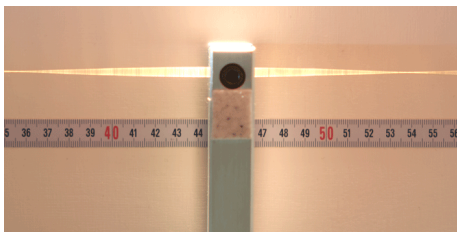
# Grundfrequenz vs. Zugkraft

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_x}{\rho A}}$$



- Rollensteg verhindert Haftreibungseinfluss

## 5. Harmonische



Saitenlänge: 90 cm

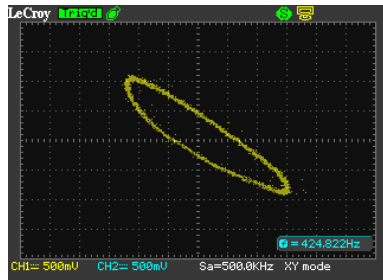
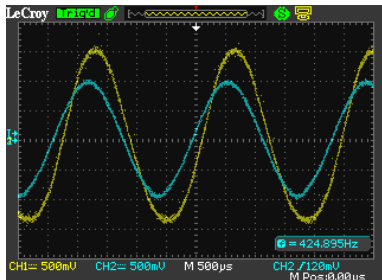


Knotenabstand: 18 cm

Bis zur 6. Harmonischen können die Eigenschwingungen gut mit dem Auge beobachtet werden

# Resonanzeinstellung mit Lissajous-Figuren

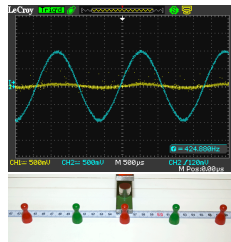
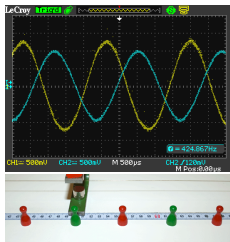
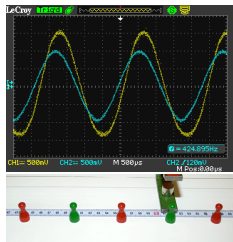
- CH1—Generatorsignal (blau)
- CH2—Mikrofonsignal (gelb)



- Im Resonanzfall beträgt die Phasenverschiebung  $\pm \frac{\pi}{2}$

# Anregung höherer Harmonischer

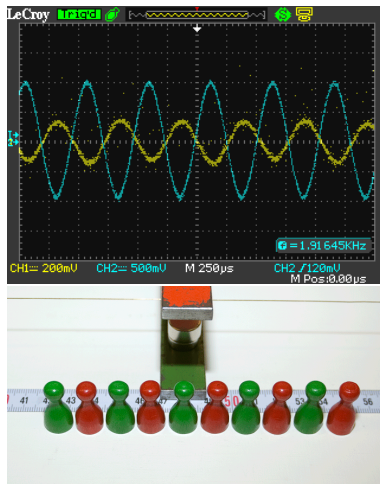
- Anregung  $f_8 = 425 \text{ Hz}$  ( $f_1 = 53,2 \text{ Hz}$ ,  $F = 10 \text{ N}$ ,  $I = 0,6 \text{ A}$ ,  $F_L = 6 \text{ mN}$ )
- Resonanzeinstellung: Hören, Sehen, Mikrofonsignal, Lissajousfigur
- Ausmessen der Bäuche und Knoten durch Verschieben des Magneten



- Magnet am benachbarten Bauch verschiebt Mikrofonsignal um  $180^\circ$
- $90 \text{ cm} / 11,3 \text{ cm} = 7,96$  (8. Harmonische)

## 36. Harmonische

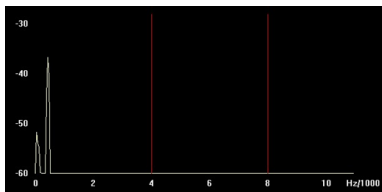
- Anregung mit  $f_{36} = 1916 \text{ Hz}$
- nur zwischen den Knoten findet eine Anregung statt
- nur die Breite des Magneten begrenzt die Auflösung



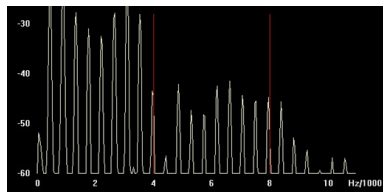


# Frequenzanalyse und Variation der Lorentzkraft

- Resonante Anregung der 8. Harmonischen mit  $f_8 = 425 \text{ Hz}$   
( $f_1 = 53,2 \text{ Hz}$ ,  $F = 10 \text{ N}$ )



$$F_L = 2,25 \text{ mN } (I = 0,3 \text{ A})$$



$$F_L = 11,3 \text{ mN } (I = 1,5 \text{ A})$$

- Bei starker Anregung entstehen viele Obertöne der direkt angeregten 8. Harmonischen
- beobachtbar: 8., 16.... bis zur 192.(=  $24 \cdot 8$ ) Harmonischen

# Gliederung

- 1 Motivation und Zielstellung
- 2 Grundlagen
- 3 Experimenteller Aufbau und Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- komplexer Versuch mit vielen Lerninhalten
- stehende Wellen an der schwingende Saite
- berührungslose, kontinuierliche Anregung mittels Lorentzkraft
- Beobachtung der Eigenzustände mit dem Auge und durch das Verschieben des Magneten entlang der Saite
- Resonanzeinstellung durch Sehen, Hören, Lissajousfiguren
- erzwungene Schwingungen, Resonanz, Phase
- Frequenzanalyse: harmonische und anharmonische Anregung

# Danksagung

An das Praktikumsteam:

Waltraud Hoffmann, Silke Glüge, Peter Kruse, Christoph Windzio



Fotos und Präsentationslayout ( $\LaTeX$ -Beamerklasse): Christoph Windzio