

Im Gleichschritt über eine Brücke, ist das gefährlich? – Experimente zu erzwungenen Schwingungen und Resonanz

Martin Czekalla und Daniel Schulz, Münster



Spielmannszug, der im Gleichschritt marschiert

Schwingungen treten im Alltag in verschiedenen Situationen auf, beispielsweise bei der Federung von Fahrzeugen, bei Gebäuden und Brücken, bei Vibrationen von Maschinen oder bei schwingenden Saiten von Musikinstrumenten. Ein besonderes Phänomen, die **Resonanz**, stellt man allerdings erst dann fest, wenn eine periodische Kraft das schwingungsfähige System anregt. Voraussetzung für Resonanz ist, dass die Frequenz des Antriebs der Eigenfrequenz f_0 des schwingungsfähigen Systems entspricht oder ihr möglichst nahekommt. Ein im Gleichschritt über eine Brücke marschierender Spielmannszug ist ein entsprechendes Beispiel für eine solche Situation.

Lassen Sie Ihre Schüler dieses spannende Phänomen in einfachen und zugleich beeindruckenden Schülerexperimenten untersuchen.

Der Beitrag im Überblick

<p>Klasse: 10 (Einführungsphase/S II)</p> <p>Dauer: 2–6 Stunden</p> <p>Ihr Plus:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Kontextorientierter Einstieg ✓ Schüleraktivierung durch Experimente ✓ Individuelle Unterstützung durch Tippkarten ✓ Medieneinsatz 	<p>Inhalt</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gedämpfte und ungedämpfte Schwingungen • Erzwungene Schwingungen • Resonanz • Darstellung von Resonanzkurven
--	--

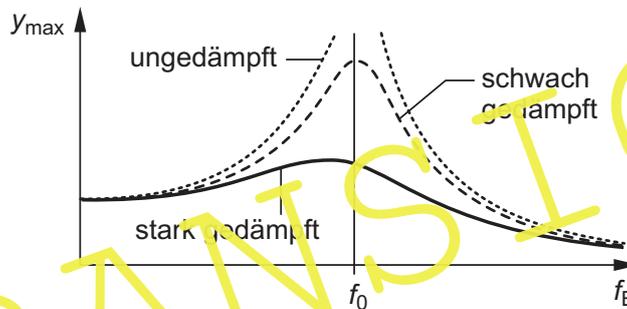
Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

Erzwungene Schwingung und Resonanz – fachlicher Hintergrund

Wenn ein schwingungsfähiges System aus der Ruhelage ausgelenkt und dann losgelassen wird, schwingt es mit seiner **Eigenfrequenz** f_0 . Wirkt allerdings eine äußere Kraft auf dieses System (Anregung), die ihre eigene bestimmte (Erreger-) Frequenz f hat, liegt eine **erzwungene Schwingung** vor.

Bei einer erzwungenen Schwingung hängt die Amplitude der Schwingung und folglich die dem schwingenden System zugeführte Energie von der Differenz zwischen f und f_0 sowie von der Dämpfung ab. Die Amplitude erreicht ein Maximum, wenn die Frequenz der äußeren Kraft etwa gleich der Eigenfrequenz ist, also: $f \approx f_0$. Dieses Phänomen wird als **Resonanz** bezeichnet. Die Eigenfrequenz f_0 eines schwingungsfähigen Systems ist also die sog. **Resonanzfrequenz**.

Anhand der **Resonanzkurve** kann man überlegen, wie sich unerwünschte Resonanzen (z. B. bei Brücken) verhindern lassen. Hierfür muss man die Dämpfung erhöhen oder die Eigenfrequenz des schwingenden Körpers so verändern, dass sie außerhalb des Bereiches der Anregungsfrequenz liegt.



Hinweise zur Gestaltung des Unterrichts

Beginnen Sie die Einheit in einer Doppelstunde mit dem § 27 der StVO (**M 1**). Ihre Schüler werden wahrscheinlich schnell vermuten, dass Brücken durch im Gleichschritt marschierende Menschen in Schwingungen geraten können. Zeigen Sie daraufhin einen ersten Ausschnitt (6:20–7:00) aus der **Kopfball-Folge** (siehe Mediathek). Im Gegensatz zur vorher aufgebauten Erwartungshaltung bei den Schülern gerät die Brücke nicht in Schwingungen. Nutzen Sie diesen kognitiven Konflikt, um mit Ihren Schülern mögliche Gründe hierfür in Form von **Hypothesen** zu sammeln, auf die Sie am Ende der Unterrichtsstunde zurückgreifen können.

Nach der experimentellen Erarbeitungsphase durch Ihre Schüler stellen sich die Lernenden ihre Ergebnisse gegenseitig vor, und der Lernzugewinn wird definiert. In der anschließenden Sicherungsphase können Sie den zweiten Ausschnitt (07:00–11:11) des Kopfball-Videos zeigen. Hier marschieren die Musiker erneut in der Eigenfrequenz (diese wird ab 05:00 gemessen), die Dämpfer sind blockiert und die Brücke gerät in starke Schwingungen. Falls Sie genügend Zeit haben, können Sie am Ende der Doppelstunde auch den kompletten Filmbeitrag zeigen.

Materialübersicht

⌚ V = Vorbereitungszeit SV = Schülerversuch Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt
 ⌚ D = Durchführungszeit LV = Lehrerversuch Fo = Folie

M 1	Ab	§ 27 der Straßenverkehrs-Ordnung – Einstieg über einen Gesetzestext
	Film	Ausschnitt aus der Sendung „Kopfball“ vom 28.10.2012 (Im Gleichschritt über eine Brücke)
		<input type="checkbox"/> Beamer
M 2	SV	Pendel und Föhn
	⌚ V: 5 min	<input type="checkbox"/> Fadenpendel mit Stativ <input type="checkbox"/> App B'Metronome (Android)
	⌚ D: 25 min	<input type="checkbox"/> Föhn <input type="checkbox"/> App Pro Metronome (iOS)
		<input type="checkbox"/> Handy / Tablet
M 3	SV	Stimmgabel und Lautsprecher
	⌚ V: 5 min	<input type="checkbox"/> Stimmgabel mit Halterung
	⌚ D: 25 min	<input type="checkbox"/> Frequenzgenerator
		<input type="checkbox"/> Lautsprecher und Kabel
		<input type="checkbox"/> Gummihammer
M 4	SV	Schwingende Stäbe
	⌚ V: 45 min	<input type="checkbox"/> Brett mit unterschiedlich langen Holzstäben <input type="checkbox"/> App B'Metronome (Android)
	⌚ D: 25 min	<input type="checkbox"/> Handy / Tablet <input type="checkbox"/> App Pro Metronome (iOS)
M 5	SV	Gekoppelte Pendel
	⌚ V: 5 min	<input type="checkbox"/> 2 durch eine Feder verbundene Fadenpendel inkl. Stativen
	⌚ D: 25 min	<input type="checkbox"/> Massestücke
M 6	SV	Federschwingung
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> Feder mit Massestück und Stativ
	⌚ D: 25 min	<input type="checkbox"/> Schnur
		<input type="checkbox"/> Umlenkrolle
		<input type="checkbox"/> Motor mit einstellbarer Drehzahl und Drehteller
		<input type="checkbox"/> Papp-Bögen
M 7	Ab	Info: Erzwungene Schwingungen und Resonanz
M 8	Ab	Diagrammvorlagen zu den Schülerversuchen
M 9	Ab	Tippkarten zu den Schülerversuchen
M 10	Ab	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die Erläuterungen und Lösungen zu den Materialien finden Sie ab Seite 15.

Minimalplan

Führen Sie nur einen der fünf Versuche durch (je nach den Gegebenheiten in Ihrer Physiksammlung) und besprechen Sie dann das Infoblatt (**M 7**) zur Resonanz.

M 2 Pendel und Föhn

Schülerversuch

🕒 Vorbereitung: 5 min

🕒 Durchführung: 25 min

Materialien

- Fadenpendel mit Stativ
- App B'Metronome (Android)
- Handy/Tablet
- Föhn
- App Pro Metronome (iOS)

Versuchsvorbereitung

Ein Fadenpendel (genauer: das System bestehend aus Kugel und dünner Schnur) hat eine bestimmte Frequenz, mit der es schwingt, wenn es ausgelenkt und losgelassen wird – seine **Eigenfrequenz** f_0 .

Die App B'Metronome (oder Pro Metronome) erzeugt ein Tonsignal in einem bestimmten Takt (BPM heißt *Beats per Minute*). Außerdem lässt sich auf einfache Art und Weise die Frequenz einer Schwingung (in BPM) messen. Hierfür tippt man auf das Hand-Symbol. Je länger die Messung dauert, desto genauer ist das Ergebnis („Average“).



Foto: D. Schulz

Versuchsaufbau mit Holzkugel als Pendel

Versuchsdurchführung

1. Bestimme die Eigenfrequenz f_0 des Pendels mithilfe der App.
2. Stelle die Eigenfrequenz f_0 in der App ein. Schaltet den Föhn bei jedem Signal des Metronoms kurz ein und versetzt dem Pendel einen Luftstoß.
3. Untersucht nun, wie die maximale Amplitude y_{max} des Pendels von der Frequenz f der Luftstöße abhängt. Verändert dafür schrittweise die Frequenz f in der App. Achtet darauf, dass der Föhn dabei immer die gleiche Entfernung zum Pendel hat.

→ Wenn ihr nicht zurechtkommt, nehmt euch eine **Tippkarte!**

Aufgaben

1. Beschreibt eure Beobachtungen der Versuche.
2. Stellt die Beobachtungen aus 3. in einem $f - y_{max}$ -Diagramm dar. Eine Diagrammvorlage gibt euch euer Lehrer.
3. Fasst eure Ergebnisse abschließend in einem kurzen Text zusammen. Lest dazu den Infotext „**Resonanz**“ und verwendet folgende Fachbegriffe.



Resonanz

Amplitude

erzwungene Schwingung

Energie

Eigenfrequenz

Erregerfrequenz

M 3 Stimmgabel und Lautsprecher

Schülerversuch

🕒 Vorbereitung: 5 min

🕒 Durchführung: 25 min

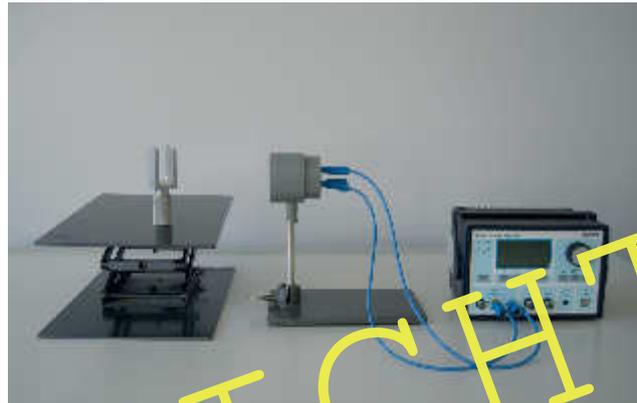
Materialien

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Stimmgabel mit Halterung | <input type="checkbox"/> Lautsprecher und Kabel |
| <input type="checkbox"/> Frequenzgenerator | <input type="checkbox"/> Gummihammer |

Versuchsvorbereitung

Stimmgabeln können in Schwingungen versetzt werden, indem man sie mit einem Hammer anschlägt. Sie schwingen dann mit ihrer **Eigenfrequenz** f_0 , die auch auf jeder Stimmgabel steht.

Wenn man die Stimmgabel filmen und den Film in Zeitlupe abspielen würde, dann sähe man, dass die beiden Zinken der Gabel Schwingungen ausführen. Je stärker man die Stimmgabel anschlägt, desto größer ist die **Amplitude** y_{max} der Schwingung und desto lauter ist der erzeugte Ton.



Die Stimmgabel wird mit dem Lautsprecher beschallt.

Mit einem Frequenzgenerator kann man Töne mit beliebigen Frequenzen erzeugen. Macht euch mit seiner Funktionsweise vertraut, verändert die Frequenz und die Lautstärke des Tons.

Versuchsdurchführung

- Schlagt eine Stimmgabel mit dem Gummihammer unterschiedlich stark an und vergleicht die Unterschiede in der Lautstärke (Stimmgabel dicht ans Ohr halten).
- Stellt am Frequenzgenerator die Eigenfrequenz f_0 der Stimmgabel ein. Haltet sie dicht vor den Lautsprecher. Schaltet ihn dann ab und untersucht, ob und wie stark die Stimmgabel „angeregt“ wurde.
- Untersucht nun die Auswirkungen auf die Amplitude y_{max} , wenn ihr die Frequenz des Frequenzgenerators etwas erhöht bzw. verringert.

→ Wenn ihr nicht zurechtkommt, nehmt euch eine **Tippkarte!**

Aufgaben

- Beschreibt eure Beobachtungen der Versuche.
- Stellt die Beobachtungen aus 3. in einem $f - y_{max}$ -Diagramm dar. Eine Diagrammvorlage gibt euch euer Lehrer.
- Fasst eure Ergebnisse abschließend in einem kurzen Text zusammen. Lest dazu den Infotext „**Resonanz**“ und verwendet folgende Fachbegriffe.



Resonanz

Amplitude

erzwungene Schwingung

Energie

Eigenfrequenz

Erregerfrequenz

M 6 Federschwingung

Schülerversuch

⌚ Vorbereitung: 10 min

⌚ Durchführung: 25 min

Materialien

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Feder mit Massestück und Stativ | <input type="checkbox"/> Motor mit einstellbarer Drehzahl und Drehteller |
| <input type="checkbox"/> Schnur | <input type="checkbox"/> Papp-Bögen |
| <input type="checkbox"/> Umlenkrolle | |

Versuchsvorbereitung

Ein Federpendel (genauer: das System bestehend aus Massestück und Feder) hat eine Frequenz, mit der es schwingt, wenn es ausgelenkt und losgelassen wird – seine **Eigenfrequenz** f_0 .

Versuchsdurchführung

- Hängt die Feder mit dem Massestück mithilfe eines Fadens an eine Scheibe, die an einem Motor befestigt ist (siehe Abb.). Versetzt das System in Schwingung, indem ihr den Motor einschaltet. Stellt die Drehfrequenz so ein, dass ihr eine maximale Amplitude erreicht.
- Befestigt einen Papp-Bogen am Massestück. Bringt die Feder dann erneut mit genau der gleichen Drehfrequenz wie aus Versuch 1. zum Schwingen.

Aufgaben

- Beschreibt eure Beobachtungen aus den Versuchen 1 und 2. Vergleicht sie.
- Skizziert die $t-y$ -Graphen beider Versuche in einem Diagramm. Eine Diagrammvorlage gibt euch euer Lehrer.

→ Wenn ihr nicht zurechtkommt, nehmt euch eine **Tippkarte!**



Foto: M. Czekalla

Der Faden verbindet über eine Rolle die Feder mit der Drehscheibe.

- Fasst eure Ergebnisse abschließend in einem kurzen Text zusammen. Lest dazu den Infotext „**Resonanz**“ und verwendet folgende Fachbegriffe.

Resonanz

Amplitude

erzwungene Schwingung

Energie

Eigenfrequenz

Erregerfrequenz

Dämpfung

M 9 Tippkarten zu den Schülerversuchen

Tippkarte zu M 2: Pendel und Föhn

- Habt ihr zu Beginn genau die Eigenfrequenz f_0 des Pendels in B'Metronome (oder Pro Metronome) eingestellt?
- Habt ihr die Frequenz in der App dann in sehr kleinen Schritten (max. ± 1 Hz) erhöht bzw. verringert und nach jedem Schritt immer beobachtet, wie sich diese Veränderung auf die Amplitude auswirkt?



Wenn sich die Amplitude während der Messungen ändert, notiert jeweils die maximal erreichte Amplitude. Beschreibt außerdem, wie sich die Amplitude ändert!

Tippkarte zu M 3: Stimmgabel und Lautsprecher

- Könnt ihr beschreiben, wie die Amplitude der schwingenden Stimmgabel mit ihrer Lautstärke zusammenhängt?
- Habt ihr die Frequenz am Frequenzgenerator dann in sehr kleinen Schritten erhöht bzw. verringert und nach jedem Schritt die Lautstärke der Stimmgabel überprüft?
- Habt ihr die Stimmgabel dabei immer (gleich) dicht vor den Lautsprecher gehalten und sie nachher immer (gleich) dicht an das Ohr gehalten?



Tippkarte zu M 4: Schwingende Stäbe

- Habt ihr zu Beginn genau die Eigenfrequenz f_0 des Pendels in B'Metronome (oder Pro Metronome) eingestellt?
- Habt ihr die Frequenz in der App ausgehend von f_0 in sehr kleinen Schritten erhöht bzw. verringert?
- Habt ihr nach jedem Schritt immer gewartet, wie sich diese Veränderung auf die Amplitude auswirkt?



Tippkarte zu M 5: Gekoppelte Pendel

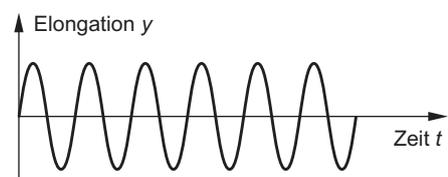
- Habt ihr euch an die Formel für die Schwingungsdauer T eines Fadenpendels erinnert? Schaut ggf. in der Formelsammlung nach! Mit dem Zusammenhang $f_0 = \frac{1}{T}$ könnt ihr nun eine Formel für die Eigenfrequenz f_0 aufstellen.
- Habt ihr mit dieser Formel begründet, dass die Eigenfrequenz f_0 nur von der Länge l des Pendels abhängt? Formuliert einen Je-desto-Satz!



Tippkarte zu M 6: Federschwingung

Erinnert ihr euch an das t-y-Diagramm einer Schwingung wie hier abgebildet?

Stellt euch vor, dass es sich hierbei um die Schwingung ohne Pappschild handelt. Überlegt, was sich ändert, wenn man das Pappschild anbringt, und stellt dies mit einem neuen Graphen im gleichen Diagramm dar.



Erläuterungen und Lösungen

Erläuterung zum Film (Einstieg)

In dem Filmbeitrag marschiert ein Spielmanszug mehrmals über eine Hängebrücke. Erst wenn die Eigenfrequenz getroffen sowie die Schwingungsdämpfer unter der Brücke blockiert werden, gerät sie in starke Schwingungen.

Zeigen Sie im Laufe der Doppelstunde zwei Ausschnitte aus dem Filmbeitrag, einen in der Einstiegsphase und einen am Ende. Nach dem Einstieg mit Material **M 1** zur Straßenverkehrs-Ordnung, das Sie vorab auf Folie kopiert haben, wird von den Schülern wahrscheinlich erkannt, dass die Brücke durch marschierende Menschen in Schwingungen geraten könnte. Zeigen Sie daraufhin den 1. Ausschnitt (06:20–07:00), in dem Musiker im Gleichschritt laufen, die Brücke jedoch nicht schwingt. Hierdurch werden die Schüler dazu gebracht, mit der Frequenz und ggf. der Dämpfung zu argumentieren. Den 2. Ausschnitt (07:00–11:11) zeigen Sie in der Sicherungsphase. Hier marschieren die Musiker erneut in der Eigenfrequenz (diese wird ab 05:00 gemessen), die Dämpfer sind blockiert und die Brücke gerät in starke Schwingungen. Falls Sie genügend Zeit haben, können Sie am Ende der Doppelstunde auch den kompletten Filmbeitrag zeigen.

M 2 Pendel und Föhn

■ Bei der Versuchsdurchführung können **Schwebungen** auftreten, wobei die Amplitude y_{max} des Pendels sich periodisch ändert, was ihre Messung erschwert. In diesem Fall sollen die Schüler die maximal erreichte Amplitude notieren. Eine Beschreibung der Schwebung ist nichtsdestotrotz lohnenswert und kann als **Differenzierung** dienen, obgleich solche Schwebungen schwer zu beobachten sein dürften, da man den Föhn dazu schon sehr exakt ein- und ausschalten müsste.

Lösungen

Zu 1 und 3.: Durch die Anregung mit Luftstößen führt das Pendel eine erzwungene Schwingung aus. Die Frequenz der Luftstöße ist dabei die Erregerfrequenz f . Wenn f genau der Eigenfrequenz f_0 des Pendels entspricht, wird seine Amplitude y_{max} am größten. In diesem Fall liegt **Resonanz** vor und es wird am meisten Energie von dem Föhn auf die Schwingung übertragen. Je mehr die Erregerfrequenz nun nach oben oder nach unten von f_0 abweicht, desto geringer wird die Amplitude und desto weniger Energie wird in Schwingungsenergie des Pendels umgewandelt.

Zu 2.: individuelle Lösung

M 3 Stimmgabel und Lautsprecher

■ Bei diesem Versuch besteht eine Schwierigkeit darin, mit der Amplitude der Stimmgabel zu argumentieren, obwohl diese mit dem bloßen Auge nicht sichtbar ist. Zahlreiche Videos auf **YouTube**, die eine Stimmgabel in Nahaufnahme und Zeitlupe zeigen, können der Veranschaulichung dienen. Geben Sie dafür „**tuning fork slow motion**“ bei YouTube ein.