Einführung der Wellenlehre mit Hilfe eines Kontrabasses

Hans - Otto Carmesin
Hohenwedeler Weg 136, 21682 Stade
Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Str. 40, 21680 Stade
Fachbereich Physik, Universität Bremen, 28334 Bremen

Kurzfassung
Der Kontrabass bietet die Möglichkeit, die Wellenlehre im Schuljahrgang 12 fächerübergreifend, problemlösend, entdeckenlassend, anhand eines kognitiven Konflikts, mit Schülerexperimenten und durch Beobachtung mit Auge und Ohr so einzuführen, dass die in den Rahmenrichtlinien vorgesehenen Lernziele auch zeitlich effektiv erreicht werden. Hier berichte ich über eine Unterrichtseinheit, die in einem Grundkurs im Zusammenhang mit einem Unterrichtsversuch und in einem Leistungskurs erprobt wurden.

1. Einleitung

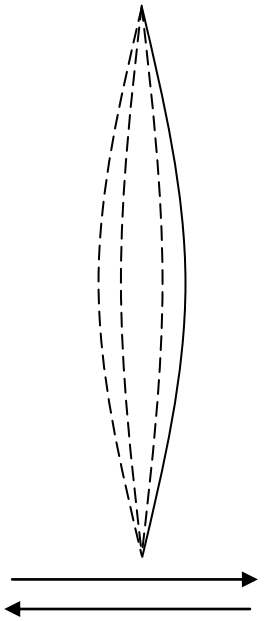
Die Einführung der Wellenlehre mit Hilfe des Kontrabasses bietet eine Fülle von Vorteilen: Die Schüler können die wesentlichen Beobachtungen unmittelbar mit ihren Sinnen anstellen. Es freut sie, wenn sie mit einem Kontrabass und sonst einfachsten experimentellen Mitteln neuartige, auch zahlenmäßige Zusammenhänge selbst aufdecken können. Einige können an ihre Erfahrungen mit Musikinstrumenten anknüpfen. Die Musik wirkt im Physikunterricht meist motivierend. Schüler können durch einen kognitiven Konflikt sowie problemlösend lernen und dabei die wesentlichen Zusammenhänge effektiv entdecken.
Dieser Bericht beruht auf einer Unterrichtseinheit, die in einem Grundkurs sowie in einem Leistungskurs Physik im Schuljahrgang 12 am Gymnasium durchgeführt und zusätzlich als zweite Staatsexamensarbeit bearbeitet wurde [1].

2. Entdeckungen am Kontrabass

Zunächst machten die Schüler am Kontrabass durch unmittelbares Sehen und Hören erste Entdeckungen:

a. Die Saite schwingt hin und her, s. Abb. 2.
b. Die schwingende Saite hat eine bauchige Form, s. Abb. 1 und 2.
c. Mehrere Schwingungsbäuche sind möglich. Dabei entsteht eine Wellenform, s. Abb. 3 und 4.
d. Die Form wiederholt sich nach zwei Schwingungsbäuchen, s. Abb. 3 und 4. Diese Wiederhollänge nennen wir Wellenlänge λ.
e. Die Tonhöhe hängt nur von der Wellenlänge ab, s. Abb. 5.
f. Je größer die Wellenlänge, desto tiefer ist der Ton.

Hier stellte sich die Frage, wie der Ton von der Wellenlänge zahlenmäßig abhängt.



Alternierende Bewegungsrichtungen der Saite

Abb. 2: **Bewegung der Grundschwingung**: Schüler können die bei der Grundschwingung auftretenden Formen und Bewegungen der Saite mit bloßem Auge erkennen.

3. Messungen am Kontrabass

Bei den Entdeckungen am Kontrabass stießen die Schüler auf die Frage, wie die Tonhöhe von der Wellenlänge abhängt. Zur Untersuchung erhielten sie einen Frequenzgenerator mit Lautsprecher. Sie planten sofort den Versuch und führten ihn durch: Für jeden am Kontrabass gespielten Ton stellten sie den Frequenzgenerator so ein, dass sie von beiden Schallquellen die gleiche Tonhöhe hörten. Die Frequenz f wurde am Generator abgelesen. So untersuchten die Schüler mehrere Oktaven und erkannten, dass die Produkte aus Frequenz und Wellenlänge $f \cdot \lambda$ eine Konstante ergeben, bei statistischen Abweichungen bis 6%.

Abb. 1: **Grundschwingung**: Zur Einführung der Wellenlehre ist der Kontrabass besonders geeignet, da Schüler wesentliche Beobachtungen unmittelbar durch Sehen und Hören anstellen können: Die Wellenform ist wegen der langen Saite und der besonders niedrigen Frequenzen direkt erkennbar. Auch ist das transversale Schwingen gut zu sehen. Ferner können die Schüler anhand der gehörten Tonhöhe mit Hilfe eines Frequenzgenerators mit einem Lautsprecher die Frequenz erschließen.

Abb. 3: **Erzeugung von zwei Schwingungsbäuchen**: Durch sanftes Berühren der Saite lässt sich ein Schwingungsknoten mit beidseitig schwingender Saite erzielen. Dabei bestimmt der Abstand des Fingers vom Saitenanfang die halbe Wellenlänge, s. Abb. 4. Auch hier erkennen die Schüler deutlich die Wellenform.

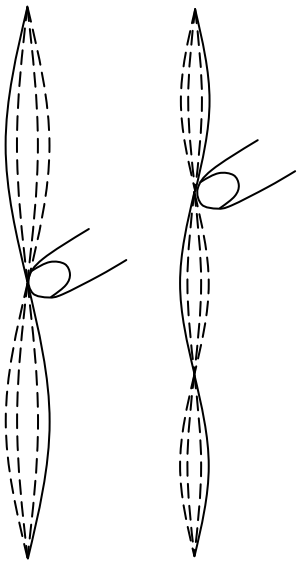


Abb. 4: **Erzeugung von mehreren Schwingungsbäuchen**: Durch sanftes Berühren der Saite haben wir im Unterricht verschiedene Wellenlängen hergestellt. Die Schüler haben hier entdeckt, dass sich die Form nach zwei Schwingungsbäuchen wiederholt. Diese Wiederhollänge haben wir als Wellenlänge λ festgelegt.

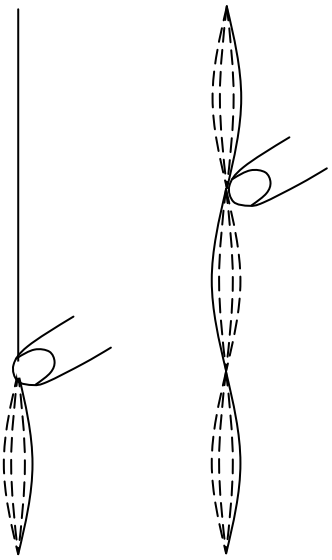
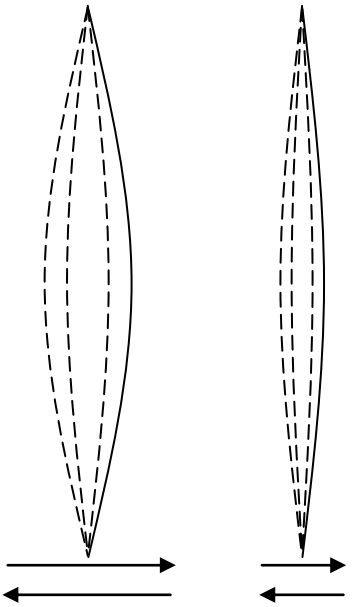


Abb. 5: **Erzeugung eines kurzen Schwingungsbauches**: Durch festes Drücken der Saite haben wir im Unterricht Schwingungsbäuche verschiedener Länge hergestellt. Dabei haben die Schüler entdeckt, dass die Tonhöhe nur von der Länge der Schwingungsbäuche abhängt, nicht aber von deren Anzahl oder deren Amplitude. Je größer die Wellenlänge λ, desto tiefer ist der Ton.



Alternierende Bewegungsrichtungen der Saite

Abb. 6: **Kognitiver Konflikt**: Die entdeckte Konstante $f \cdot \lambda$ ist wegen der Einheit m/s eine Geschwindigkeit. Die Schüler vermuten die der einzig sichtbaren Bewegung, der Bewegung der Saite. Doch beim Abnehmen der Amplitude der Saite bleiben die Frequenz f, die Wellenlänge λ sowie deren Produkt $f \cdot \lambda$ gleich, während der Weg der Saite und, wegen gleich bleibender Periodendauer $T = 1/f$, auch die Geschwindigkeit der Saite abnehmen.

4. Kognitiver Konflikt

Nachdem die Schüler eine Konstante $f \cdot \lambda$ gefunden hatten, wollten sie auch wissen, was diese bedeutet. Sie merkten, dass die Einheit m/s ist und es sich vermutlich um eine Geschwindigkeit handeln sollte. Es wurde sowohl im Grundkurs als auch im Leistungskurs vorgeschlagen, dass es sich um die Geschwindigkeit der Bewegung der Saite handeln könnte. Das ist nicht verwunderlich, denn es ist die einzige erkennbare Bewegung, s. Abb. 1 und 2. Nach einiger Überlegung, im Grundkurs auch mit Lernhilfen, merkten die Schüler, dass beim Abnehmen der Amplitude der Saite die Frequenz sowie die Wellenlänge und damit auch deren Produkt $f \cdot \lambda$ unverändert bleiben, während die Geschwindigkeit der Saite abnimmt, s. Abb. 6. Daher kann die Konstante $f \cdot \lambda$ nicht die Geschwindigkeit der Saite sein. Damit erkannten die Schüler einen Widerspruch zu ihrem Basiskonzept und wollten nun erst recht wissen, welche Geschwindigkeit das Produkt $f \cdot \lambda$ darstellt.

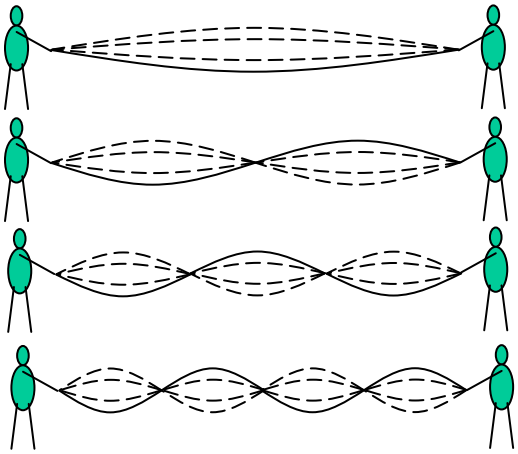


Abb. 7: **Modellversuch**: Zum Entdecken der Bewegung der Geschwindigkeit f·λ führten wir ein Schülerexperiment durch. Jede Gruppe erhielt eine etwa 5 m lange Schraubenfeder. Zunächst stellten die Schüler die gleichen räumlichen und zeitlichen Schwingungsmuster her, wie sie am Kontrabass beobachtet hatten. Mit einer Stoppuhr und einem Metermaß wurden f und λ gemessen. So wurde bestätigt, dass auch hier das Produkt f·λ eine Konstante darstellt.

5. Entdeckung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Zum Entdecken der Bewegung der Geschwindigkeit f·λ führten wir ein Schülerexperiment durch, s. Abb. 7. Zunächst sollten die Schüler mit der Schraubenfeder die Bewegung der Saite nachahmen, die Produkte f·λ bestimmen sowie deren Konstanz bestätigen, s. Abb. 7. Das gelang ohne Schwierigkeiten und ergab f·λ = 12 m/s. Anschließend sollten sie nach einer Bewegung suchen, deren Geschwindigkeit das Produkt f·λ sein könnte. Nach einigem Probieren entdeckten sie einen waagerecht verlaufenden Einzelbauch und bestimmten dessen Geschwindigkeit, s. Abb. 8. Vier Gruppen bestimmten für die Einzelbäuche die Geschwindigkeiten 13 m/s, 13,4 m/s, 10,7 m/s sowie 11,3 m/s. Damit hatten die Schüler die fortschreitende Bewegung entdeckt und erkannt, dass deren Ausbreitungsgeschwindigkeit c gleich dem Produkt aus Frequenz und Wellenlänge ist:

$$c = f \cdot \lambda$$

6. Entdeckung der fortschreitenden Welle

Die Schüler wurden gebeten, mit den Schraubenfedern eine fortschreitende Welle zu erzeugen, die eine Form wie die der Saite hat. Das gelang ihnen, s. Abb. 9.

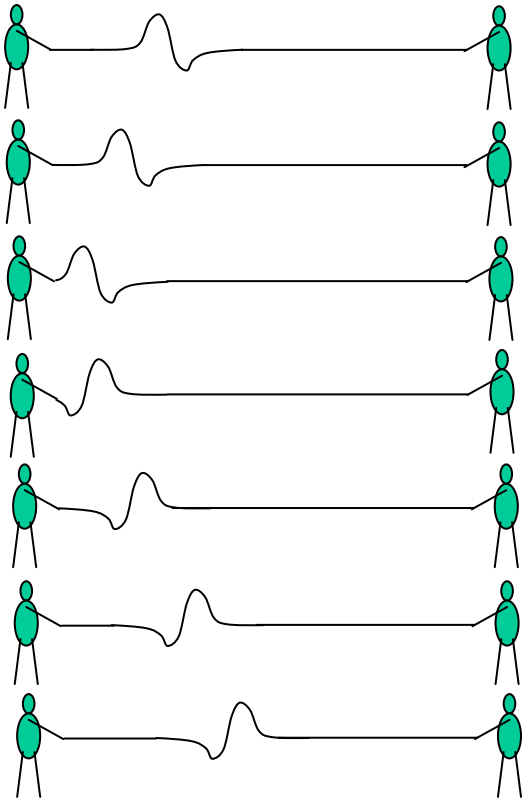


Abb. 8: **Fortlaufender Einzelbauch**: Auf ihrer Suche nach einer Bewegung zur Geschwindigkeit f·λ entdeckten die Schüler fortlaufende Einzelbäuche. Diese waren zu schnell, als dass man deren Laufzeit für die Strecke zwischen zwei Enden der Schraubenfeder leicht mit der Stoppuhr messen könnte. Da entdeckten die Schüler die Reflexion der Einzelbäuche an den Enden der Schraubenfeder. Sie ließen einen Einzelbauch mehrmals hin und her wandern, stoppten die benötigte Zeit und bestimmten so die Geschwindigkeit.

7. Einführung der Wellengleichung

Die Beobachtungen der Saite, s. Abb. 1-4, sowie der Schraubenfeder, s. Abb. 7 und 9, legen eine sinusförmige Welle nahe. Die Schüler erarbeiteten mit Hilfe eines Arbeitsblattes die Wellengleichung für eine sinusförmige nach rechts fortschreitende Welle:

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

Abb. 9: **Fortlaufende Welle**: Den Schülern gelang mit der Schraubenfeder eine fortlaufende Welle zu erzeugen. Dazu bewegt nur ein Schüler den Arm. (Nach der ersten Reflexion kann man bis zur zweiten Reflexion eine stehende Welle erkennen. Dann entsteht bei zufälliger Anregungsfrequenz meist ein kompliziertes Bewegungsmuster.)

8. Synthese stehender Wellen durch fortlaufende

Die Schüler untersuchten rechnerisch die Überlagerung einer nach rechts fortschreitenden Welle, siehe obige Gleichung, und einer reflektierten Welle:

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

Sie vereinfachten die Summe mit einem Additionstheorem und erhielten eine Wellengleichung einer stehenden Welle:

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

Dieser Zusammenhang ist auch am Modellexperiment beobachtbar, s. Abb. 9. Weil die Beobachtung hierzu etwas Übung erfordert, habe ich hier den rechnerischen Weg bevorzugt.

9. Diskussion

Der Unterricht hat gezeigt, dass der Kontrabass für Experimente gut geeignet ist. Dazu tragen folgende Faktoren bei:

- Die Schüler können die Bewegung der Saite sehen, da Schwingungen um 20 Hz vom Auge noch aufgelöst erkennbar sind.
- Beim Streichen entsteht ein relativ geringer Anteil an Oberschwingungen; daher hatten die Schüler nie Probleme mit dem Einstellen des Frequenzgenerators nach Gehör und die Wellenform wies für sie auf die Sinusfunktion hin, s. Abb. 1 und 3.
- Alle quantitativen Untersuchungen liefern sehr deutliche und daher eindeutige Ergebnisse.
- Ein Modellexperiment mit einer 5 m langen Schraubenfeder als Modellsaite bietet sich an, durch welches die Schüler fortschreitende Einzelbäuche und Wellen entdecken können.

Der Kontrabass hatte als imposantes und wohlklingendes Musikinstrument eine motivierende Wirkung auf die Schüler. Er begünstigt einen problemlösenden und entdeckenlassenden Physikunterricht, der effektiv zum Erreichen der Lernziele der Wellenlehre [2] führt. Der geplante kognitive Konflikt hat sich in verschiedenen Lerngruppen als tragfähig und wirkungsvoll erwiesen. Die Schüler entwickeln eine differenzierte Vorstellung von den bei Wellen ablaufenden Bewegungen, auch die Schnelle, die Geschwindigkeit der Saite, wird behandelt.

Insgesamt bietet dieser Zugang die Einbindung der Alltagswelt, Fächerübergriff zur Musik, Selbstständiges Lernen, die Entwicklung differenzierter Beobachtung mit Augen und Ohren sowie die Analyse und Synthese verschiedener Bewegungsmuster, unterstützt durch einen kognitiven Konflikt.

Literaturhinweise

[1] Fabian, H.: Einführung der Beziehung c=λ·f mit Hilfe von stehenden Wellen bei Saiteninstrumenten. Ein Unterrichtsversuch in einem Grundkurs 12 im Fach Physik an einem Gymnasium. Studienseminar Stade 2002.

[2] Ahlswede, R. u.a.: Rahmenrichtlinien für das Gymnasium – gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule – gymnasiale Oberstufe, das Fachgymnasium, Abendgymnasium, das Kolleg, Physik, Niedersächsisches Kultusministerium, Schroedel, Hannover 1997.

Danksagung

Ich danke Hans Fabian für eine anregende Zusammenarbeit im Grundkurs Physik und dem Musiklehrer Andreas Veit, s. Abb. 1 und 3, für die freundliche Unterstützung mit seinem Kontrabass.

H.-O Carmesin: Einführung der Wellenlehre mit Hilfe eines Kontrabasses. Tagungs-CD zur Physik - Didaktik - Tagung der DPG, 2003.