Messung von Beschleunigungen mit einer Bogenwasserwaage im Physikunterricht einer 11. Klasse

Hans – Otto Carmesin

Hohenwedeler Weg 136, 21682 Stade
Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 136, 21680 Stade
Fachbereich Physik, Universität Bremen, 28334 Bremen

Kurzfassung
Eine Bogenwasserwaage kann leicht aus einem Aquarienschlauch gebaut werden. Sie ist strukturell ähnlich zum Bogengangsystem des menschlichen Gleichgewichtssinnes im Innenohr. Mit einer Bogenwasserwaage konnten Schülerinnen und Schüler in einem Unterrichtsversuch Linear- und Radialbeschleunigungen messen und den Messfehler teils unter 2% bringen. Auch konnten sie Drehbeschleunigungen erfassen. Hier berichte ich über Bau und Funktionsweise der Bogenwasserwaage sowie über eine durchgeführte Unterrichtseinheit.

1. Einleitung

Im Physikunterricht der Klassenstufe 11 wird die newtonsche Mechanik eingeführt. In diesem Zusammenhang ist der Begriff Beschleunigung grundlegend. Hier sollen Schüler diesen Begriff dadurch besonders gut mit ihren Erfahrungen vernetzen, dass sie verschiedene Beschleunigungen erleben, zugleich mit ihrem Gleichgewichtssinn im Innenohr spüren und gleichzeitig mit einer ähnlich dem menschlichen Gleichgewichtssinn aufgebauten Bogenwasserwaage messen. Hier berichte ich über Bau, Funktionsweise und Anwendungsmöglichkeiten des Gerätes sowie über eine Unterrichtseinheit, die ich mit einer 11. Klasse durchgeführt habe.

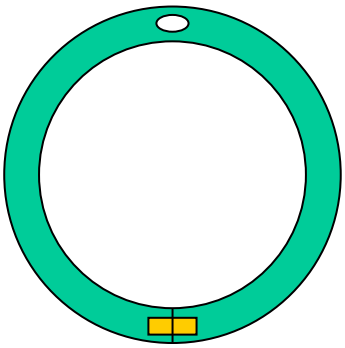

Abbildung 1: Bogenwasserwaage: Grün: Aquarienschlauch. Messingfarben: Verbindungsröhrchen. Weiße Ellipse: Luftblase.

2. Bau einer Bogenwasserwaage

Die Bogenwasserwaage, siehe Abbildung 1, wird meist am Armgelenk wie eine Armbanduhr getragen. Daraus ergibt sich, dass man am besten einen Klassensatz mit unterschiedlichen passenden Größen herstellt. Als Material verwendet man ein Stück Aquarienschlauch und ein passendes kurzes Stück Messingrohr zur Verbindung der beiden Enden des Schlauchstücks. Der Schlauch wird mit Wasser gefüllt, in das, zur Optimierung der Oberflächenspannung, ein Tropfen eines Geschirrspülmittels beigegeben wurde. Dabei wird zur Anzeige eine Luftblase im Schlauch belassen. Am Schlauch wird durch einen permanenten Folienschreiber eine Ruhelage markiert. Auch erfolgen Gradmarkierungen bis +/- 90° zur Winkelmessung um die Ruhelage.

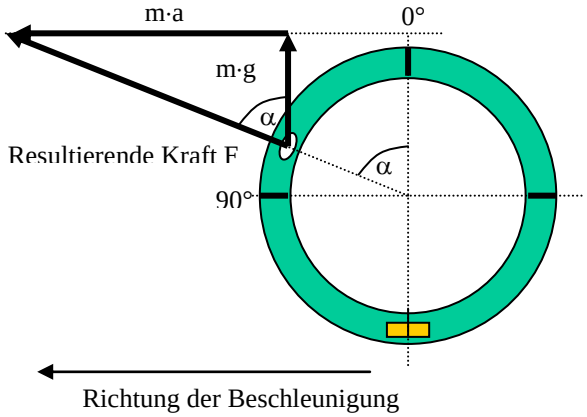

Abbildung 2: Messung der Linearbeschleunigung: Die Bogenwasserwaage wird so gehalten, dass die Ruhelage 0° oben ist und dass der waagerechte Durchmesser (90°) in Richtung der Beschleunigung zeigt. Die Luftblase verdrängt Wasser. Dadurch greifen an der Blase die Auftriebskraft m·g nach oben und eine analoge Kraft m·a nach links an. Die Richtung der resultierenden Kraft F wird durch die Luftblase angezeigt und in Form eines Winkels α abgelesen. Die Auswertung, siehe Text, ergibt $a = g \cdot \tan \alpha$.

3. Messung der Linearbeschleunigung a

Im Prinzip wird die Linearbeschleunigung dadurch gemessen, dass die Erdbeschleunigung als Referenz verwendet wird, siehe Abbildung 2. Die Bogenwas-

serwaage wird so gehalten, dass die Ruhelage 0° oben ist und dass der waagerechte Durchmesser (90°) in Richtung der Beschleunigung zeigt. Die Luftblase verdrängt Wasser einer Masse m. Daher verursacht die Erdbeschleunigung g die auf die Blase wirkende Auftriebskraft m·g nach oben. Neben der Erdbeschleunigung gibt es hier noch die Linearbeschleunigung a nach links. Diese verursacht, wie die Erdbeschleunigung, eine Kraft (Scheinkräfte eingeschlossen) auf die Luftblase. Der Betrag dieser Kraft ist, wie bei der Erdbeschleunigung, das Produkt aus Masse und Beschleunigung, m·a. Die Kraft ist, wie die Auftriebskraft, parallel zur Beschleunigung gerichtet. Die resultierende Kraft F ist schräg nach links oben gerichtet, siehe Abbildung 2. Sie schließt mit der Senkrechten einen Winkel α ein. Der Tangens von α ist gleich dem Quotienten aus m·a durch m·g, $\tan \alpha = a/g$. Auflösen ergibt $a = g \cdot \tan \alpha$. Zum Ablesen des Winkels α sind Markierungen an der Bogenwasserwaage angebracht, s.o.

4. Messung einer Linearbeschleunigung

Im Rahmen der Unterrichtseinheit führten wir eine Exkursion in den Heidepark durch. Bei der Hinfahrt mit der Heidebahn kamen Schüler auf die Idee die Beschleunigung des Zuges beim Anfahren in einem Bahnhof zu messen, siehe Abbildung 3. Sie bestimmten den Winkel $\alpha = 3°$. Ihre Auswertung ergab die Beschleunigung $a = g \cdot \tan \alpha = 0{,}5\ m/s^2$. Sie folgerten, dass der Zug zum Beschleunigen von 0 auf 100 km/h die Zeit 55,6 s benötigt. Zum Vergleich ergibt sich für ein Auto, das in 10 s von 0 auf 100 km/h beschleunigt der Winkel $\alpha = 15{,}8°$

Abbildung 3: Heidebahn: Auf der Exkursion in den Heidepark bestimmten die Schüler bei der Hinfahrt für die Heidebahn die Beschleunigung 0,5 m/s^2 beim Anfahren.

5. Messung einer Zentripetalbeschleunigung

Fährt man in einem Karussell, so wird die Zentripetalbeschleunigung alias Radialbeschleunigung a_r wie eine Linearbeschleunigung zum Zentrum gemessen. Die Schüler bestimmten für das Round Up, siehe Abbildung 4, in waagerechter Lage den Winkel $\alpha = 70°$, und die Umlaufdauer T = 3,45 s. Den Radius 8m hatten wir dem Internet entnommen. Die gemessene Zentripetalbeschleunigung bestimmten die Schüler zu $a_r = g \cdot \tan \alpha = 26{,}95\ m/s^2$.

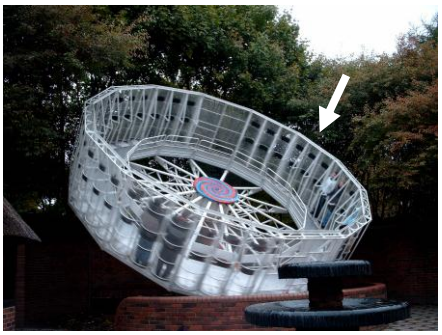

Abbildung 4: Round Up: Die Schüler bestimmten die Zentripetalbeschleunigung mit der Bogenwasserwaage als Linearbeschleunigung zum Zentrum. Wurde die Bogenwasserwaage am Handgelenk getragen, so kam eine gewisse Ungenauigkeit durch Bewegungen des Arms relativ zum Karussell zustande. Das genaueste Ergebnis, $\alpha = 70°$, wurde erzielt, indem die Bogenwasserwaage mit einer Hand an eine Trennwand (Pfeil) gehalten wurde. Hierbei wurde beobachtet, dass die Luftblase zu Beginn und am Ende der Fahrt genau in der Ruhelage war. Das bestätigte das gelungene Fixieren der Bogenwasserwaage am Karussell.

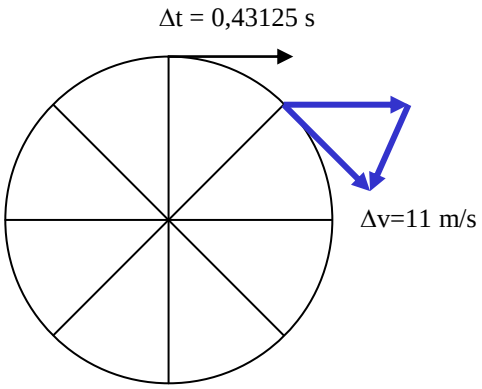

Abbildung 5: Bestimmung der Zentripetalbeschleunigung des Round Up aus $a = \Delta v/\Delta v$.

6. Theorietisch Bestimmung des Messergebnisses

Das Zustandekommen der gemessenen Zentripetalbeschleunigung $a_r = 26{,}95\ m/s^2$ sollte durch die allgemeine Formel $a = \Delta v/\Delta t$ für eine Beschleunigung a erklärt werden. Die Schülerinnen und Schüler merkten, dass die Geschwindigkeitsänderung Δv nur durch die Änderung der Richtung der Geschwindigkeit zustande kommen kann, da der Betrag $v = 2\pi r/T = 14{,}6\ m/s = 52{,}5\ km/h$ konstant ist. Zur näherungsweisen zeichnerischen Lösung wurde das Round Up auf einem Arbeitsblatt in 8 gleiche Sektoren unterteilt, siehe Abbildung 5. Die Schüler berechneten $\Delta t = T/8 = 0{,}43125$ s und bestimmten Δv

= 11 m/s zeichnerisch. Sie folgerten $a = \Delta v/\Delta v = 25{,}9\ m/s^2$ und waren mit der Übereinstimmung mit dem Messergebnis 26,95 m/s^2 zufrieden. Hier war keine wesentliche Lernhilfe nötig, denn die Vorgabe der 8 Teile war lediglich eine Vereinbarung über den Grad der Genauigkeit.

7. Entdecken der Formel $a_r = \omega \cdot v$

Als nächstes sollte eine Formel zur Berechnung der Zentripetalbeschleunigung aus der Bahngeschwindigkeit und der Winkelgeschwindigkeit hergeleitet werden. Ausgangspunkt war eine Zeichnung der Geschwindigkeitsänderungen aus Abbildung 5 in einem einzigen regelmäßigen Achteck, siehe Abbildung 6, auf einem Arbeitsblatt. Die Schüler bestimmten die Summe der Beträge der Geschwindigkeitsänderungen näherungsweise als Kreisumfang: $8\ \Delta v \approx 2\pi v$. Daraus folgt für die Zentripetalbeschleunigung $a_r = 8\ \Delta v/T \approx 2\pi v/T = \omega \cdot v = 26{,}5\ m/s^2$. Die Schüler bemerkten, dass die Näherung beliebig genau wird, wenn man die Umlaufzeit T in eine immer größer werdende Zahl gleicher Teile teilt. Sie folgerten, dass die hergeleitete Formel daher genau gilt.

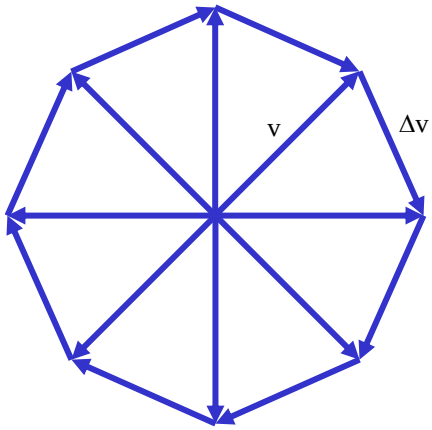

Abbildung 6: Darstellung von 8 Geschwindigkeitsvektoren mit Betrag v mitsamt entsprechenden Änderungen mit Betrag Δv für das Round Up für die Zeiten T/8, 2T/8, 3T/8, 4T/8, 5T/8, 6T/8. 7T/8 und 8T/8.

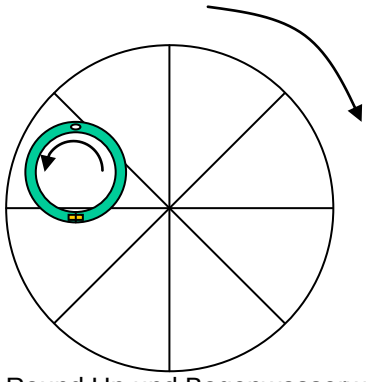

Abbildung 7: Round Up und Bogenwasserwaage beim Anfahren im Uhrzeigersinn. Die entgegengesetzte Bewegung der Flüssigkeit in der Bogenwasserwaage weist auf die Erhaltung des Drehimpulses hin.

8. Drehbeschleunigung

Hält man im Round Up beim Anfahren im Uhrzeigersinn die Bogenwasserwaage waagerecht, so kann man beobachten, dass die Luftblase sich gegen den Uhrzeigersinn dreht, siehe Abbildung 7. Das kann als Tendenz zur Erhaltung des Drehzustandes gedeutet werden.

Abbildung 7: Die 3 Bogengangsorgane im Gleichgewichtssinn des Menschen im Innenohr.

9. Strukturgleichheit zum Gleichgewichtsorgan des Menschen

Das Gleichgewichtsorgan des Menschen beinhaltet drei Bogengangsorgane, siehe Abbildung 8. Für diese ist die Drehbeschleunigung der adäquate Reiz. Sie tasten die drei Raumrichtungen ab.

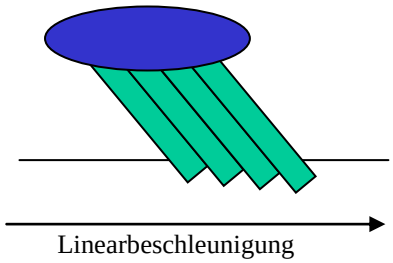

Abbildung 8: Im Innenohr des Menschen befinden sich die Statolithenorgane. Grün: Stabförmige Komponenten, die sich neigen können und dabei elektrische Signale im Nervensystem auslösen [1]. Blau: tropfenförmige Masse, in die als Gewichtsstücke Kristalle eingelagert sind. Bei einer Linearbeschleunigung neigen sich die stabförmigen Komponenten entsprechend der Trägheitskraft.

Im Innenohr des Menschen wird auch die Linearbeschleunigung erfasst. Diese ist der adäquate Reiz für die Statolithenorgane, siehe Abbildung 8. Auch die Erdbeschleunigung ist für diese Organe ein adäquater Reiz. Daher sind diese Organe wichtig für den aufrechten Gang. Abweichungen eines Schülers mit geschlossenen Augen aus der Senkrechten können leicht mit einem Laserpointer aufgezeichnet und anschließend analysiert werden. So kann die Leistungsfähigkeit der Statolithenorgane von Schülern

untersucht werden. Im Unterricht stellte ich beide Organe in einem Lehrervortrag vor. Die Schüler bemerkten mühelos die Strukturgleichheit und auch die Unterschiede.

10. Diskussion

Die Bogenwasserwaage lässt sich leicht und sehr kostengünstig bauen. Sie ermöglichte hier die Messung einer erlebten Zentripetalbeschleunigung mit einem Messfehler von 2%. Eine ähnliche Messung wäre auf einem schnelleren Karussell, das auf einem typischen Kinderspielplatz zu finden ist, sicher auch möglich.

Die Schüler haben begeistert an der Exkursion, in der auch weitere hier nicht besprochene Messungen und Untersuchungen durchgeführt wurden, teilgenommen und die Auswertungen mit hoher Motivation und Selbstständigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse der Mitarbeit waren überdurchschnittlich. Das Klausurergebnis zu dieser Thematik war etwas besser als das zu anderen Themen. Die Parallelen zum menschlichen Gleichgewichtssinn waren durch die Strukturgleichheit für die Schüler offensichtlich. Auch die Unterschiede bei der Bestimmung der Linearbeschleunigung wurden von den Schülern leicht erkannt und formuliert. Die Analogie zu Sinnesorganen interessierte die Schüler erwartungsgemäß besonders [2].

Die Bogenwasserwaage stellt überhaupt keine „Black Box“ für die Schülerinnen und Schüler dar und ist zudem ein Gegenstand aus der Alltagswelt [3] und daher didaktisch besonders wertvoll [4].

11. Literatur

[1] R. Schmidt und G. Thews: Physiologie des Menschen. 26. Auflage. Springer, Berlin – Heidelberg – New York 1995.

[2] H.-O. Carmesin, Einführung des Energiebegriffs mit Hilfe menschlicher Sinnesorgane. In: Tagungs-CD Fachdidaktik Physik, Deutsche Physikalische Gesellschaft, 2001, Deutsche Physikalische Gesellschaft.

[3] H.-O. Carmesin, Einführung der Wellenlehre mit Hilfe eines Kontrabasses. In: Tagungs-CD Fachdidaktik Physik, Deutsche Physikalische Gesellschaft, 2003, Deutsche Physikalische Gesellschaft. ISBN 3-936427-71-2.

[4] H. Muckenfuß: Lernen im sinnstiftenden Kontext. Cornelsen, Berlin 1995.

Carmesin, Hans-Otto: Messung von Beschleunigungen mit einer Bogenwasserwaage im Physikunterricht einer 11. Klasse. In: Nordmeier, Volker; Oberländer, Arne (Hrsg.): Tagungs-CD Fachdidaktik Physik, 2004. ISBN 3-86541-066-9