

Schülervorstellungen zu Wellen

- Konzeptwechsel mit Hilfe des hypothesengeleiteten Experimentierens -

Sebastian Mendel^{†*}, Joachim Hemberger[†], André Bresges^{*}

*Institut für Physikdidaktik, Universität zu Köln, Gronewaldstrasse 2, 50931 Köln, [†]II Physikalisches Institut, Universität zu Köln, Zülpicher Str. 77, 50937 Köln

Mendel@ph2.uni-koeln.de, Andre.Bresges@uni-koeln.de, Hemberger@ph2.uni-koeln.de

Kurzfassung

Der Wellenbegriff ist in der Physik, insbesondere der Schulphysik, von zentraler Bedeutung. Er findet sich sowohl in der Mechanik, Akustik, Optik, Elektrizität als auch der Quantenmechanik wieder.

In einer qualitativen Studie wurden Schülerinnen und Schüler mit Hilfe halbstrukturierter Interviews und offener Fragebögen zu Wellenphänomenen wie etwa Ausbreitungsgeschwindigkeit, Überlagerung und Dämpfung befragt. Es zeigten sich typische Muster in den Antworten der Schüler, die mit den von DiSessa formulierten „Primitives“ wie „Working harder“, „Dying away“, oder „Actuating Agency“ vereinbar sind. Zusätzlich ist erkennbar, dass Schülerinnen und Schüler sich mechanischer Denkmodelle analog dem newtonschen Korpuskelmodell bedienen, welche mit dem physikalischen Wellenmodell jedoch häufig nicht übereinstimmen.

In einer Lerneinheit wird dazu ein an einem konstruktivistischen Lernzyklus angelegter Lernprozess durchlaufen. Im Fokus des Lernprozesses steht das hypothesengeleitete Experimentieren. Mit Hilfe von qualitativen und quantitativen Methoden wird erhoben wie weit die Lernenden den Konzeptwechsel zum physikalisch richtigen Wellenmodell ansteuern oder erreichen. Die Forschungsmethoden, insbesondere Videoprotokolle und Interviews, sollen den Verlauf und die Interaktionen dokumentieren und Ursache/Wirkungszusammenhänge aufklären.

1. Einordnung in die Forschungssituation

In vielen Teilgebieten der Physik, insbesondere der Mechanik, Elektrizität und Optik wurden zahlreiche Studien zu Schülervorstellungen unternommen (vgl. [1]). Einige wenige Studien wurden auch zum Thema Wellen durchgeführt. Hier sind vor allem die Studien Maurines [2], Linder [3], Wittmann [4,5] und Tongchai [6,7] zu nennen. Im deutschen Sprachraum ist die Arbeit von Osewold [8] zu erwähnen, jedoch wurde in diesen Studien meist nur der Status quo erhoben. Ziel dieser Arbeit soll es sein, zum einen in einer qualitativen Studie, mit Hilfe von Leitfadeninterviews und offenen Fragebögen bereits bekannte Schülervorstellungen für den deutschen Sprachraum und insbesondere den Standort Köln zu bestätigen und um neue Schülervorstellungen zu ergänzen. Zum anderen soll in einer Lerneinheit ein an einem konstruktivistischen Lernzyklus angelegter Lernprozess durchlaufen werden in dessen Fokus das hypothesengeleitete Experimentieren steht. Mit Hilfe von qualitativen und quantitativen Methoden wird erhoben wie weit die Lernenden den Konzeptwechsel zum physikalisch richtigen Wellenmodell ansteuern oder erreichen. Die Forschungsmethoden, insbesondere Videoprotokolle und Interviews, sollen den Verlauf und die Interaktionen dokumentieren und Ursache/Wirkungszusammenhänge aufklären. Um Schülervorstellungen von Wellen verstehen und einordnen zu können soll als Grundgerüst DiSessas Denkmodell [9] dienen. DiSessa sieht Wissen als

Konstrukt sogenannter P-Prims (phenomenological primitives). Diese P-Prims sind kleine, logisch gebildete Blöcke, die aus Alltagserfahrungen entstehen und uns Grundannahmen für den Ausgang allgemeiner Situationen geben. DiSessa sieht den Hauptunterschied zwischen einem Novizen und einem Experten erstens in der Auswahl der notwendigen P-Prims und zweitens in deren richtiger Strukturierung.

2. Qualitative Vorstudie

Die Teilnehmer der qualitativen Vorstudie waren Schülerinnen und Schüler der Klassen 8 bis 13 der Schulformen Realschule, Gesamtschule und Gymnasium. Die Teilnehmergruppe war absichtlich sehr inhomogen gewählt, da möglichst viele verschiedene Vorstellungen und Ansichten aufgedeckt werden sollten. Es erwies sich als sehr sinnvoll auch Schüler aus der Mittelstufe in diese Studie mit einzubeziehen, da sich ihre Antworten als „reiner“ und intuitiver zeigten. Die Oberstufenschüler ließen in ihren Aussagen oft eine Überlagerung von intuitiven Vorstellungen und Schulwissen erkennen.

Die Vorstudie bestand aus 10 Leitfadeninterviews und 15 offenen Fragebögen. Es wurden Fragen zur Ausbreitungsgeschwindigkeit, Dämpfung, Überlagerung von Wellenpulsen, sowie das Verhalten von Schallwellen gestellt. In dieser Arbeit sollen die Wellenphänomene Ausbreitungsgeschwindigkeit und Überlagerung näher herausgestellt werden.

2.1 Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellenpulsen

Die Schülerinnen und Schüler wurden befragt, wie man die Zeitdauer des in Abb. 1 gezeigten Wellenpulses bis zum Erreichen der Wand verkürzen kann. Der Wellenpuls wird durch eine Aufwärts-/ Abwärtsbewegung mit der Hand generiert.

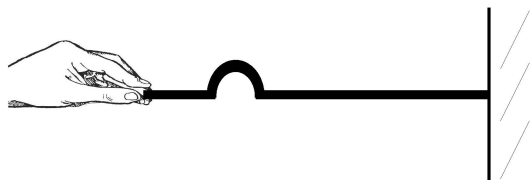


Abb. 1: Wellenpuls auf einer Seilwelle

Fast alle Schülerinnen und Schüler machten die Erzeugung des Wellenpulses, also die Handbewegung, als entscheidenden Parameter für die Ausbreitungsgeschwindigkeit verantwortlich. Am häufigsten wurde die Geschwindigkeit der Aufwärts-/ Abwärtsbewegung als entscheidender Faktor der Ausbreitungsgeschwindigkeit angeführt. Hierzu zwei exemplarische Auszüge aus den Leitfadeninterviews.

Interviewer: ...und warum soll die Geschwindigkeit der Hand sich auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit auswirken?

Befragter A: weil ja dann der Impuls eigentlich größer sein müsste den die Welle überträgt. [...] wenn man eine höhere Energie hat dann geht das komplett, sagen wir mal ohne Verlust in die Welle über ja dann müsste doch auch die Gesamtenergie der Welle größer sein. das ist doch dann in der Ausbreitungsgeschwindigkeit. ja...

Auch in dem folgenden Auszug wird die schnellere Handbewegung als Grund für die höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit genannt.

Interviewer: ...welche Möglichkeiten hat man damit der Puls schneller an der Wand ankommt?

Befragter B: Ich weiß nicht genau wie ich es mache. Ich nehme an mit mehr Geschwindigkeit den Puls losschicken, also die Bewegung schneller ausführen. Vielleicht noch mit mehr Kraft. mhh. also dass man einen größeren Schwung gibt... [...]und wenn ich die Bewegung, also die Anfangsbewegung schneller mache dann muss sie ja in der Folge auch schneller durch das Seil laufen.

Diese beiden Interviewauszüge zeigen, dass die Befragten ein äquivalentes Denkmodell zur newtonschen Mechanik aufweisen. Das gleiche Phänomen lässt sich aus der newtonschen Mechanik ableiten, denn je kräftiger ein Gegenstand geworfen wird, desto schneller fliegt er. Eben diese Modelle implizieren für die Lernenden, dass eine schnellere Handbewegung auch eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit zur Folge hat. Die beiden Befragten begreifen nicht, dass sich die Handbewegung aus-

schließlich auf die Oszillationsgeschwindigkeit, welche senkrecht zur Ausbreitungsgeschwindigkeit verläuft, auswirkt. In besonderem Maße fällt auf, dass die Begriffe Kraft, Impuls, Energie und Schwung nicht genügend differenziert, bzw. sogar synonym verwendet werden. Dieses Problem ist jedoch in der Physikdidaktik bekannt und wird zum Beispiel in [10] ausgiebig diskutiert.

Ebenfalls häufig wurde die Amplitudenhöhe als entscheidender Faktor der Ausbreitungsgeschwindigkeit genannt. Die Befragten begründeten dies zum einen ähnlich wie oben, indem sie der größeren Amplitudenhöhe „mehr Kraft“ bzw. „einen größeren Impuls“ zusprachen. Eine weitere Begründung wird im folgenden Interviewauszug erläutert.

Interviewer: ... warum kannst du dir vorstellen dass er [der Wellenpuls] dann schneller ankommt?

Befragter C: weil ja der Weg den er zurücklegen muss viel kleiner ist, weil ja dieser Berg wird ja praktisch immer kleiner.

Interviewer: ok. also der Weg bis zur Wand ist ja derselbe, egal wie du die Bewegung machst. [...]. Warum kommt er jetzt schneller an wenn du die Bewegung kleiner machst?

Befragter C: ja dieser Puls geht ja immer hoch und runter und für dieses hoch und runter braucht es ja immer auch ne Zeit und um so weniger es halt hoch und runter gehen muss, desto schneller ist es halt.

Es wird deutlich, dass der Befragte C das physikalische Wellenmodell nicht ausreichend verstanden hat. Gemäß der Formel Geschwindigkeit gleich Wegstrecke geteilt durch Zeit, begründet er, dass eine kürzere Wegstrecke auch eine geringere Zeitdauer bedeutet, welche der Wellenpuls benötigt, um die Wand zu erreichen. Die Formel ist per se natürlich richtig, jedoch bei der Ausbreitung des Wellenpulses falsch angewendet. Der Befragte C erkennt den Unterschied zwischen der Oszillationsgeschwindigkeit und der Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht tiefergehend.

2.2 Überlagerung von Wellenpulsen

Die Schülerinnen und Schüler wurden zur Überlagerung von Wellenpulsen befragt. Ebenso wie bei der Ausbreitungsgeschwindigkeit herrschte bei den meisten Schülern eine sehr mechanische Denkweise im Sinne der newtonschen Mechanik vor. Die Überlagerung der Wellenpulse wurde nicht als störungsfreie Überlagerung, sondern vielmehr als Stoßprozess interpretiert.

Im ersten Teil wurden die Schülerinnen und Schüler befragt was passiert, wenn sich zwei entgegenkommende Wellenpulse, etwa auf einem Seil, wie in Abb. 2, überlagern. Besonders interessant waren hierbei der Zeitpunkt der maximalen Überlagerung und das Verhalten der Wellenpulse kurz nach der Überlagerung.

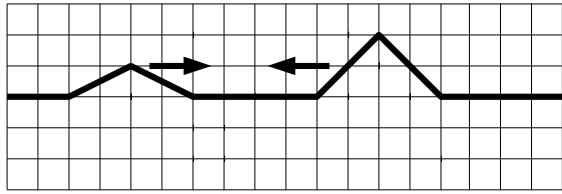


Abb. 2 Überlagerung von zwei Wellenpulsen

Die Addition der Wellenpulse zum Zeitpunkt der maximalen Überlagerung wurde von einigen Schülerinnen und Schülern richtig interpretiert. Die meistgenannte falsche Antwort war eine Überlagerung des größeren Wellenpulses über der Kleineren.

Interviewer: ...wie könntest Du Dir das vorstellen genau zu dem Zeitpunkt [der maximalen Überlagerung]?

Befragter: Dann würde man nur den Großen [Wellenpuls] sehen.

Interviewer: Nur den Großen, und der Kleine wäre...

Befragter: Der wäre sozusagen da drin.

In dem Interviewauszug wird klar, dass der Schüler das Superpositionsprinzip nicht anwendet. Er stellt sich die beiden Wellenpulse übereinander gezeichnet vor und das Ergebnis davon ist allein der große Wellenpuls. Auslöser könnte die Alltagsbeobachtung sein, dass kleinere Objekte am Strand von einer Welle überspült werden und nach Ablauf der Welle wieder auftauchen. Auch hier wird deutlich, dass Schülerinnen und Schüler Wellen zumindest teilweise als Einzelobjekte verstehen. Auch Wittmann berichtet in seiner Studie [4], dass die Befragten mit dem Prinzip der Superposition, bei dem die jeweiligen Auslenkungen Punkt für Punkt addiert werden, größere Schwierigkeiten haben.

Noch transparenter wurden Vorstellungen der Schüler, als sie die Situation kurz nach dem Zeitpunkt der maximalen Überlagerung beschreiben sollten. Die meisten Schülerinnen und Schüler verwendeten in ihren Antworten das Modell des Stoßprozesses. Die am häufigsten genannte nicht korrekte Vorstellung war die Folgende

Befragter: [...] es kann ja sein dass sich diese beiden Größen voneinander subtrahieren und dass sie dann in die Richtung [links] laufen, da der Impuls [linker Puls] ja anscheinend stärker ist als dieser hier [rechter Puls].

Interviewer: [...] und jetzt solltest du das Bild nochmal eine Sekunde später [nach dem Zeitpunkt der maximalen Überlagerung] zeichnen. Wie würde das Bild aussehen?

Befragter: dann würde ich diese beiden [Wellenpulse] voneinander subtrahieren und in diese Richtung (links) laufen lassen. [...] weil die sich gegenseitig diesen Puls abnehmen oder die Größe abnehmen laufen die dann in die Richtung [links] weil der Impuls ja stärker ist und stärker in diese Richtung [links] läuft als dieser hier.

Der Befragte ordnet den Wellenpulsen Eigenschaften, wie einen Impuls bzw. eine Masse zu. In der Folge beschreibt er einen Stoß bei dem während des Stoßprozesses die Impulse voneinander subtrahiert werden und der größere Impuls somit eine Art „Restimpuls“ behält. In einer weiteren Aussage wird durch die Quantifizierung der Aussage diese Vorstellung noch deutlicher.

Befragter: Also wenn man sich jetzt vorstellt die eine [Welle] hat die Wellenkraft 2 und die andere [Welle] 4 oder so, die prallen aufeinander, dann ist sozusagen am Ende 2 übrig.

Der Befragte erkennt in der Aufgabe nicht das Modell der störungsfreien Überlagerung, sondern vermutet einen Stoß bei dem die Pulse „aufeinander prallen“. Wie oben erwähnt, wird auch in diesem Beispiel der Begriff der Kraft, hier „Wellenkraft“, nicht richtig verwendet.

Eine weitere Schülvorstellung baut auf der zuvor genannten Vorstellung auf. So beschreibt ein Befragter die Situation nach dem Zeitpunkt der maximalen Überlagerung wie folgt.

Befragter: ja dann müsste ja im Grunde genommen die höhere Welle die andere mit in die eigentliche Richtung tragen oder. Also nicht aufheben.

Interviewer: also wenn du das Bild zeichnen würdest, [...]Wie wird das Bild denn jetzt nach zwei oder nach drei Sekunden aussehen?

Befragter: ..., dass vielleicht die höhere Welle in die eigentliche Richtung also sich weiterdreht also die andere umlenkt

Interviewer: ok das heißt also die kleine Welle würde nachher....

Befragter: wäre anders herum, also wäre auf der großen Welle und würde in die entgegengesetzte Richtung

Interviewer: ok und der Wellenberg insgesamt wäre dann so groß wie bei der Überlagerung? oder wie groß ist der dann?

Befragter: ja der schwächt sich ja dann irgendwann wieder ab aber am Anfang würde ich schon sagen, dass der so groß ist wie beide zusammen.

Interviewer: ok das heißt die große Welle reißt die kleine irgendwie mit?

Befragter: ja

Der Befragte bewertet die Überlagerung der beiden Pulse als eine Art inelastischen Stoß. Beim inelastischen Stoß zweier Körper „verhaken“ sich diese und bewegen sich in Richtung des Körpers, welcher vor dem Stoß den höheren Impuls hatte. Dieses Modell verwendet der Befragte bei der Überlagerung der beiden Wellenpulse. Beim Zusammenstoß addieren sie sich und laufen in die Bewegungsrichtung des größeren Wellenpulses weiter.

2.3 Zusammenfassung

In den meisten Antworten der Schülerinnen und Schülern ist ein sehr mechanisches Wellenmodell zu erkennen, welches mit der newtonschen Mechanik in großen Teilen übereinstimmt. Den Schülerinnen und Schülern ist meist nicht klar, dass die Welle -nur kleine Auslenkungen und ein nicht dispersives Medium vorausgesetzt- eine lokale Störung des umgebenden Mediums ist und somit etwa die Ausbreitungsgeschwindigkeit allein von den Eigenschaften des Mediums abhängt. Ein Großteil der Befragten macht jedoch die Erzeugung des Wellenpulses, also die Aufwärts-/ Abwärtsbewegung der Hand, für die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Wellenpulses verantwortlich. Ebenso findet sich dieses mechanische Wellenmodell der Schülerinnen und Schüler auch bei der Überlagerung von Wellenpulsen wieder. Auch hier werden den Wellenpulsen Eigenschaften wie Impuls bzw. Masse zugeschrieben. Die Überlagerung wird als Stoßprozess verstanden bei welchem sich die Wellenpulse abstoßen oder auslösen.

2.4 Mögliche Auswirkungen auf den Aufbau von Konzepten in der Wellenoptik

Der newtonschen Korpuskeltheorie nach besteht Licht aus kleinen Teilchen, sogenannten Korpuskeln. Diese werden von leuchtenden Körpern geradlinig emittiert. Je heller die Lichtquelle desto höher die Geschwindigkeit der Korpuskeln. Diese Vorstellung ist nicht vereinbar mit der messbaren Erkenntnis einer konstanten Lichtgeschwindigkeit c , und entspricht damit einer historischen Fehlvorstellung von der Ausbreitung des Lichtes.

Der Aufbau einer solchen Fehlvorstellung ist gut erklärbar durch P-Prims, die bei den Schülern in den o.g. Interviews deutlich geworden sind. Wellen wurden als Einzelobjekte (Korpuskeln) verstanden, deren Bewegungsgeschwindigkeit in Zusammenhang mit einem Impuls stehen, der vom Auslösenden der Welle in das Seil übertragen wurde. Hier besteht eine Symmetrie zum angenommenen Zusammenhang zwischen Korpuskelgeschwindigkeit und Energieinhalt beim newtonschen Modell.

Eine frühzeitige Aufklärung und Diskussion der Schülervorstellung bei der Einführung der mechanischen Welle kann nicht nur zum Aufbau einer Zutreffenden Vorstellung von mechanischen Wellen beitragen. Es besteht ebenso die Möglichkeit, bei der Einführung des Konzeptes der elektromagnetischen Welle wieder auf die gleiche Diskussion zurückzugreifen, und damit ein erhöhtes Bewusstsein für das mögliche Auftreten des gleichen Fehlkonzeptes in der wesentlich Wellenoptik zu erzeugen. Damit kann der Aufbau einer tragfähigen Modellvorstellung in der vergleichsweise abstrakten Wellenoptik möglicherweise entscheidend vorbereitet werden. Es

können hiermit wichtige Grundlagen für am 2. Physikalischen Institut der Universität zu Köln bereits etablierte Techniken der Mikrowellenspektroskopie von Festkörpern via Puls- Echo- Methoden geschaffen werden.

3. Hauptstudie

In der qualitativen Vorstudie wurden die Wellenmodelle der Schülerinnen und Schüler diagnostiziert, gesammelt und kategorisiert. Diese Erkenntnisse werden gewinnbringend eingesetzt, um es Schülerinnen und Schülern zu ermöglichen leichter von ihrem Wellenmodell zum physikalisch richtigen Wellenmodell zu gelangen. In dieser Studie wird versucht den durchaus nicht trivialen Brückenschlag zwischen der Forschung und dem Schulalltag zu schaffen. Es soll nicht nur irgendeine Lerntheorie auf den Kontext Schule angewendet werden, ebenso sollen aus der Anwendung heraus Rückschlüsse und Erkenntnisse gewonnen werden, welcher wiederum ihrerseits zu einer Weiterentwicklung der Lerntheorie führen. In der Lerneinheit wird dazu ein an einem konstruktivistischen Lernzyklus angelegter Lernprozess durchlaufen. Die Lerneinheit ist jedoch nicht rein statisch angelegt. Vielmehr wird durch sorgfältige Analyse des Verlaufs der Lerneinheit, indem Interaktionen der Betroffenen dokumentiert und Ursache/Wirkungszusammenhänge aufklärt werden, Erkenntnisse und Anregungen gesammelt und die Lerneinheit dementsprechend verändert. Dieser Prozess verläuft zyklisch, sodass sich die Lerneinheit, im Sinne des Lernenden und des Lehrenden, sukzessive verbessert. Durch die Durchführung, Modifikation und Entwicklung der Lerneinheit in echten Unterrichtssituationen sollen sowohl Einsichten in die realen Lehr-Lernprozesse der Schülerinnen und Schülern in der Schule ermöglicht werden als auch echte Handlungsleitlinien für das Lehrpersonal vor Ort geschaffen werden

4. Lernzyklus des hypothesengeleiteten Experimentierens

Der zentrale Punkt des Lernzyklus stellt das hypothesengeleitete Experimentieren dar. Die Schülerinnen und Schüler überprüfen in Kleingruppen an selbst konzipierten Experimentierstationen die aus ihrem jeweiligen Wellenmodell begründeten Hypothesen. Durch das Verifizieren bzw. Falsifizieren der Hypothesen am Experiment soll den Schülerinnen und Schülern der Konzeptwechsel zum physikalisch richtigen Wellenmodell leichter gelingen. Durch den selbsttätig handelnden Umgang mit Wellenphänomenen wird Wissen, in Form der P-Prims, im Sinne DiSessas besser organisiert bzw. strukturiert und ist somit zweckmäßiger reproduzierbar. Die an einen konstruktivistischen Lernzyklus angelehnte Lerneinheit ist in Abb.3 zu sehen.

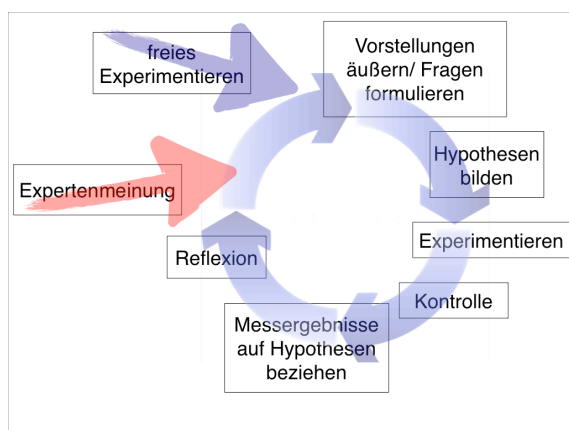


Abb. 3 Zyklische Lerneinheit des hypothesengeleiteten Experimentierens

Zu Beginn machen sich die Schülerinnen und Schüler durch freies Experimentieren mit den Experimentierstationen vertraut und entwickeln eventuell schon erste Experimentierideen. Anschließend werden im Plenum Schülervorstellungen zum Wellenmodell geäußert und gesammelt. Hierbei kann ein anonymes Verfahren gewählt werden, um die Schüler nicht einzuschüchtern und zu gewährleisten, dass die Schülerinnen und Schüler sich trauen ihre Vorstellungen frei zu äußern. Aus den Schülervorstellungen heraus werden Forschungsfragen formuliert. Dieser Teil des Zyklus ist sehr zentral, da hier zum einen die Schülervorstellungen von der Lehrperson identifiziert und diagnostiziert werden, zum anderen sich die Schülerinnen und Schüler ihrer eigenen Vorstellungen bewusst gemacht werden. Die Vorstellungen können nur geändert und aufgebrochen werden, wenn sich die Schülerinnen und Schüler ihrer Vorstellungen bewusst werden. Danach werden aus den gesammelten Vorstellungen und Forschungsfragen Hypothesen gebildet. Diese werden am Whiteboard festgehalten. Ebenso werden Entscheidungen für ein konkretes Experimentierdesign diskutiert und am Whiteboard fixiert. Anschließend wird das Experiment durchgeführt, wobei klar entschieden wird wer in der Gruppe welche Aufgabe übernimmt. Die Gruppe kontrolliert daraufhin, ob sie wirklich das gemessen hat, was zuvor geplant wurde. Die erhaltenen Messergebnisse werden nun auf die zuvor gebildeten Hypothesen bezogen. In einer reflexiven Phase analysiert die Gruppe, ob sie ihre Hypothesen verifiziert oder falsifiziert haben. In dieser Phase kann auch eine Metareflexion erfolgen, in der sich die Gruppe darüber klar wird was sie bisher getan hat und warum sie wie vorgegangen ist. Es ist aus Studien (vgl. [11]) bekannt, dass Schülerinnen und Schüler beim Experimentieren oft das sehen was sie gerne sehen möchten. Um zu verhindern, dass eventuell falsch postulierte Hypothesen im Experiment bestätigt werden, wird an dieser Stelle eine Expertenmeinung eingebracht. Der Experte in Form eines Wissenschaftlers präsentiert nun seine Hypothesen.

Der Experte soll den Schülerinnen und Schülern gegenüber jedoch als gleichberechtigt dargestellt werden. Deshalb muss er zusammen mit den Schülerinnen und Schülern den Lernzyklus noch einmal durchlaufen.

5. Literatur

- [1] Duit, Reinders: Bibliography - STCSE. Students' and Teachers' Conceptions and Science Education, <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>
- [2] Maurines, L. (1992): Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. In: International Journal of Science Education, 14, 279-293
- [3] Linder, C. J. (1993): University physics students' conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation. In: International Journal of Science Education, 6, 655-662
- [4] Wittmann, M., Steinberg, R. N., Redish, E. F. (1999): Making sense of how students make sense of mechanical waves. In: The Physics Teacher, 37, 15-21
- [5] Wittmann, M. C. (2002): The object coordination class applied to wave pulses: Analysing student reasoning in wave physics. In: International Journal of Science Education, 1, 97-118
- [6] Tongchai, A., Sharma, M. D., Johnston, I. D., Arayathanikul, K., Soankwan, C. (2009): Developing, Evaluating and Demonstrating the Use of a Conceptual Survey in Mechanical Waves. In: International Journal of Science Education, 18, 2437-2457
- [7] Tongchai, A., Sharma, M. D., Johnston, I. D., Arayathanikul, (2009): Consistency of students' conceptions of wave propagation: Findings from a conceptual survey in mechanical waves. In: Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 2, 11
- [8] Osewold, D. (2007): Konzepte zur mechanischen Welle -eine historisch-didaktische Rekonstruktion. Beiträge zur Didaktischen Rekonstruktion, 17
- [9] DiSessa, A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. Cognition and Instruction, 10, 105-225
- [10] Wilhelm, T. (2005). Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung. In: Studien zum Physik- und Chemielernen, 46
- [11] Duit, R. (1989). Vorstellung und Experiment - Von der eingeschränkten Überzeugungskraft experimenteller Beobachtungen. In: Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie, 48, 319-321