



# DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

„Qualitative Untersuchung der Unterrichtssequenz zum  
Thema Interferenz“

verfasst von / submitted by

Nicole Lea Loydl

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2019

Studienkennzahl lt. Studienblatt /  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

UA 190 412 406

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Lehramtsstudium UniStG

UF Physik UniStG

UF Mathematik UniStG

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Dr. Lana Ivanjek

## **Abstract**

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden die Unterrichtsmaterialien zum Thema Interferenz, die von einer Forschungsgruppe in Zagreb entwickelt worden sind, in einer Klasse in Wien erprobt. Die Materialien wurden auf Deutsch übersetzt und anschließend in einer siebten Klasse eingesetzt. Nach jeder Stunde wurde ein halboffenes Interview mit ausgewählten Schülerinnen und Schülern geführt, um die Wirksamkeit der Materialien einschätzen zu können. Die Unterrichtsstunden wurden ebenfalls beobachtet und zwar hinsichtlich der Schwierigkeiten, die die Lernenden haben, und inwiefern die Materialien zu einem besseren Verständnis beitragen. Die Interviews sprechen die wichtigen Konzepte der Wellenoptik an und eine Analyse bezüglich des Verständnisses wurde durchgeführt. Das Verständnis wurde kategorienbasiert in Farbcodes eingeordnet und analysiert. Der Einsatz der Materialien verlief vielversprechend, denn das Verständnis der Interviewten hat sich im Laufe des Unterrichts zum Großteil verbessert. Es werden ein paar Vorschläge für die Überarbeitung des Lehrpersonenskripts gemacht. Außerdem werden Anregungen gegeben, die den praktischen Einsatz im Unterricht erleichtern könnten.

## **Abstract**

During the work on this thesis, teaching materials concerning the topic of interference which were developed by a physics education research group in Zagreb were put to the test within a school class in Vienna. The materials were translated into German and applied in a 7<sup>th</sup> grade school class (with students aged 17 to 18). Directly after each lesson, semi-structured interviews were conducted with selected students to assess the efficiency of the teaching materials. Additionally, the lessons were observed with regard to the students' difficulties and the way in which the materials lead to a better understanding. The interviews addressed the most important concepts of wave optics and an analysis was undertaken concerning the understanding of the topic. Based on categories, the understanding was classified into colour codes and analysed. The usage of the materials appeared promising because the majority of the interviewed students displayed a better understanding of the topic in the course of the lessons. A few suggestions for an edit of the teacher script are made to facilitate the practical application.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich beim Erstellen meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Mein Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf für die Begutachtung meiner Diplomarbeit und die konstruktive Kritik im Rahmen des DiplomandInnenseminars.

Besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Frau Dr. Lana Ivanjek für den Vorschlag dieses interessanten Themas, die wohlwollende Zusammenarbeit sowie die fachliche Unterstützung während des Entstehungsprozesses dieser Arbeit.

Mein Dank gilt Frau Mag. Dr. Marianne Korner dafür, dass sie den praktischen Einsatz der Materialien im Unterricht ermöglicht und ihre Erfahrungen eingebracht hat.

Mein Dank gilt den Schülerinnen und Schülern, die sich für die Interviews zur Verfügung gestellt haben.

# Inhaltsverzeichnis

1. Theoretischer Hintergrund und Zielsetzung.....	5
1.1. Schülervorstellung und Physikunterricht .....	5
1.2. Schülervorstellungen zur Natur der Naturwissenschaften und zur Interferenz .....	9
1.3. Andere Unterrichtskonzepte .....	11
1.4. Halbstrukturierte Interviews nach dem Unterricht.....	12
2. Materialentstehung, Unterrichtskonzept und praktischer Einsatz in Wien.....	14
2.1. Materialentstehung.....	14
2.2. Das Konzept der ersten zwei Themenblöcke im Detail.....	15
2.3. Einsatz des Unterrichtsmaterials in Wien .....	21
3. Unterrichtsbeobachtungen .....	22
3.1. Erste Stunde .....	22
3.2. Zweite Stunde.....	31
3.3. Dritte Stunde .....	39
3.4. Vierte Stunde.....	48
3.5. Fünfte Stunde .....	58
3.6. Zusammenfassung der Beobachtungen im Hinblick auf ihre Relevanz für die Konzepte.....	64
3.7. Feedback der Lehrperson.....	66
3.8. Feedback der Schülerinnen und des Schülers.....	69
3.9. Gedanken zu den Feedbacks .....	71
4. Interviewanalyse .....	74
4.1. Analyse der einzelnen Konzepte aus der Tabelle.....	78
4.2. Zusätzliche Konzepte.....	116
5. Fazit und Ausblick.....	122
6. Literaturverzeichnis.....	126
7. Abkürzungsverzeichnis .....	127
8. Abbildungsverzeichnis.....	128
Anhang A. Übersichtstabelle .....	129
Anhang B. Interviews mit den Schülerinnen und dem Schüler .....	130
Anhang C. Interview mit der Lehrkraft.....	190

## 1. Theoretischer Hintergrund und Zielsetzung

Im Rahmen meiner Diplomarbeit soll ein an der Uni Zagreb entwickeltes Unterrichtskonzept zum Thema Interferenz konzeptuell untersucht werden. Nach einem kurzen Überblick über die didaktische Bedeutung des Schülervorverständnisses im Allgemein sollen einige spezielle Schülervorstellungen zur Interferenz und zur Natur der Naturwissenschaften zusammengestellt werden, die für die Untersuchung relevant sind. Dann wird kurz auf andere Unterrichtskonzepte, die bereits zu dem Thema entwickelt worden sind, eingegangen. Es folgt eine Darstellung der Methode der Akzeptanzanalyse beziehungsweise der Akzeptanzbefragung, wie sie im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführt wurde. Im Anschluss wird das Unterrichtskonzept anhand des Lehrpersonenskripts und der Arbeitsblätter vorgestellt. Es folgen die Unterrichtsbeobachtungen zu den fünf Stunden, die in einem Wiener Gymnasium gehalten worden sind. Anschließend wird das Feedback der Lehrperson und der Lernenden zusammengefasst. Im nächsten Abschnitt erfolgt eine Analyse der Interviews, die mit ausgewählten Schülerinnen und Schülern geführt worden sind. Dabei werden dreiunddreißig Konzepte bezüglich des Grades des Verständnisses analysiert. Im letzten Teil soll abschließend betrachtet werden, wie das Unterrichtskonzept bei den Lernenden angekommen ist. In diesem Zusammenhang sollen auch etwaige Verbesserungsvorschläge für die Materialien einfließen.

### 1.1. Schülervorstellung und Physikunterricht

Bei der Planung des Physikunterrichts ist neben der Sachanalyse auch das Einbeziehen der Lernvoraussetzungen der Schülerinnen und Schüler unverzichtbar.

Es genügt nicht den Inhalt fachlich korrekt und anschaulich darzustellen, weil Lernen ein aktiver Prozess ist. (vgl. SVPH 2018: 2f) Es ist unmöglich, Wissen direkt weiterzugeben oder zu übernehmen, denn Lernen im Physikunterricht erfolgt konstruktivistisch. Das heißt, dass die Lernenden ihre Sinneseindrücke und die angebotenen Informationen eigenständig auf individuelle Weise verarbeiten müssen. Sinnzusammenhänge müssen konstruiert werden. Ein Bezug zum bereits vorhandenen Wissenssystem muss hergestellt werden, wodurch es erweitert oder auch umstrukturiert wird. (vgl. SVPH 2018: 24ff) Nach Jean Piaget gibt es bei der Entwicklung von Wissensstrukturen zwei Mechanismen, nämlich die Assimilation und die Akkommodation, das heißt entweder werden neue Informationen in vorhandene Strukturen eingepasst oder die vorhandenen Strukturen werden neu überdacht und umstrukturiert. Da der kognitive Aufwand bei der Akkommodation viel größer ist, müssen die Lernenden gute

Gründe für einen Konzeptwechsel haben. Ein Konzeptwechsel erfolgt langsam und schrittweise. (vgl. SVPH 2018: 27ff) Die Lehrkraft muss die Lernenden davon überzeugen, dass die neue Theorie ein physikalisches Phänomen besser erklärt als die alltägliche Vorstellung. Dafür empfiehlt es sich im Unterricht zu thematisieren, wie man naturwissenschaftliche Erkenntnisse gewinnt. „Lernende müssen verstehen, dass ihre Vorstellungen hypothetische Konstrukte sind und wie sie überprüfen können, ob ihre Modelle tatsächlich mit dem Verhalten der Welt übereinstimmen.“ (SVPH 2018: 32) In diesem Zusammenhang ist auch die Entwicklung der metakognitiven Fähigkeiten der Lernenden wichtig. Sie sollen verstehen, wie sie Wissen erwerben und ihre kognitiven Fähigkeiten nutzen können. Wer denkt, dass in der Physik vor allem Phänomene beschrieben werden und nicht erkennt, dass sie aus verknüpften und belegten Theorien besteht, wird sich beim Lernen auf das Auswendiglernen und Aneinanderreihen von Fakten konzentrieren und nicht versuchen sich sein eigenes Wissenssystem zu organisieren. (vgl. SVPH 2018: 34f)

Damit Lernen möglich ist, muss die Lehrkraft einen geeigneten Rahmen und ein passendes Lernangebot schaffen, das den Lernprozess vorstrukturiert. Denn bei einem offenen, selbstentdeckenden Gruppenunterricht besteht die Gefahr, dass die Lernenden unerwünschte, weil unphysikalische Erklärungsansätze entwickeln, die oft sehr stabil sind. (vgl. WW 1996: 254) Deshalb ist es für die Entwicklung erfolgreicher Unterrichtseinheiten essentiell, das Schülervorverständnis zu berücksichtigen. Der übergeordnete Denkraum, die Art, wie man etwas aufgrund der vorhandenen Alltagserfahrungen deutet und wie man zu Lösungen kommt, beeinflusst die individuelle Auseinandersetzung mit dem Lerninhalt. Weil die zu erwartenden Schülervorstellungen und die physikalisch gültigen Vorstellungen einander oft nicht decken, entstehen Lernschwierigkeiten. Durch gezielt eingesetzte Denkaufgaben aus Schülervorstellungstests kann man die Schülervorstellungen fest machen und hinterfragen, indem man mit den Schülerinnen und Schülern ins Gespräch kommt. (vgl. SVPH 2018: 4f.)

Eine besondere Bedeutung kommt auch der Sprache zu. Man muss nicht nur neues fachsprachliches Vokabular lernen, sondern Begriffe haben in der Alltagssprache und in der Fachsprache oft unterschiedliche Bedeutungen. Im Zuge der historischen Entwicklung der Wissenschaft wurden die umgangssprachlichen Begriffe in der Fachsprache immer mehr präzisiert und gegenüber anderen Begriffen schärfer abgegrenzt. Je präziser ein fachsprachlicher Begriff ist, desto vorteilhafter ist das für die wissenschaftliche Auseinandersetzung. (vgl. SVPH 2018: 13) Deshalb ist die Genauigkeit beim Sprechen wichtig. Man muss zwischen der Alltagssprache und der Fachsprache wechseln. Dazu braucht man gut ausgewählte Definitionen bestimmter Worte, um ihre Bedeutung nicht zu verfälschen. Dieser Punkt wird im Unterricht allerdings oft vernachlässigt. Wie in

Untersuchungen gezeigt wurde, sind visuelle Darstellungen für die Kommunikation der wissenschaftlichen Ideen in der Klasse essentiell. (vgl. WSH 2015: 315)

Eine Tatsache ist auch, dass sich Schülervorstellungen schwer verändern lassen. Es gibt zwei Konzepte, wie man mit Schülervorstellungen umgehen kann. Meistens bietet es sich an, an vorhandene Schülervorstellungen anzuknüpfen und sie im Sinne eines kontinuierlichen Lernweges auszubauen beziehungsweise umzudeuten, seltener sollte man die Schülervorstellungen direkt ansprechen und sie den physikalisch gültigen Vorstellungen gegenüberstellen. Die von den Schülerinnen und Schülern entwickelten Konzepte sollen als eigenständige Leistung respektiert werden, ohne sie jedoch als gleichwertig stehen zu lassen. Auch in der konkreten Unterrichtssituation muss die Lehrperson jeweils entscheiden, ob sie die Schülervorstellungen explizit thematisiert oder nur die physikalische korrekte Erklärung gibt. (vgl. SVPH 2018: 6f)

Will man ein schlagartiges Umdenken erreichen, muss man eine Lernumgebung schaffen, bei der bei den Lernenden ein kognitiver Konflikt erzeugt wird, der dann durch einen Konzeptwechsel aufgelöst wird. Die Lehrperson wählt gezielt ein Experiment aus, bei dem aufgrund der zu erwartenden Schülervorstellungen falsche Vorhersagen getroffen werden. Die Vorhersagen werden schriftlich festgehalten und nicht bewertet. Nach der Durchführung des Experiments sucht man eine Erklärung für den Verlauf des Experiments und die falschen Vorhersagen. Diese Methode sollte sparsam eingesetzt werden, weil sie einige Nachteile hat. Wenn die Lehrperson zu Prognosen auffordert, werden dadurch Schülervorstellungen aktiviert, die sonst gar nicht aktiviert worden wären. Außerdem erinnern sich die Lernenden oft an die falschen Prognosen, auch nachdem die richtige Lösung erarbeitet wurde. Manchmal sehen die Lernenden beim Experiment den Unterschied gar nicht, weil sie beobachten, was sie erwarten. Oft reicht ein einziges Experiment nicht aus, um einen Konzeptwechsel zu erreichen. Vor allem leistungsschwächere Schülerinnen und Schüler sind verunsichert und entwickeln eine negative Sicht auf sich und die Schule, weil sie den kognitiven Konflikt nicht auflösen können. Diese Vorgehensweise ist auch sehr zeitintensiv. (vgl. SVPH 2018: 42ff)

Deshalb sollen Aufbaustrategien häufiger eingesetzt werden. Man geht davon aus, dass Lernende mehrere unterschiedliche Vorstellungen gleichzeitig haben und je nach Situation eine andere Erklärung aktiviert wird. Beim Lernen geht es also auch darum, das richtige Wissenselement (p-prim) zu aktivieren und es dann richtig anzuwenden. Das bedeutet für die Gestaltung des Unterrichts, dass die Einheit dahingehend aufgebaut werden muss, dass das Auftreten von Lernschwierigkeiten durch die Aktivierung ungeeigneter Vorstellungen vermieden wird und gleichzeitig für den Lernprozess geeignete Vorstellungen aktiviert werden. Die Einführung physikalischer Grundideen sollte unter direkter Anleitung der

Lehrperson erfolgen, für die Anwendungen eignet sich dann eine offene Lernumgebung. (vgl. SVPH 2018: 51f) „Die didaktische Aufgabe besteht demnach darin, ein Lernangebot sowie Experimente zu entwickeln, mit denen durch geeignete Schlüsselreize anknüpfungsfähige vorunterrichtliche Vorstellungen aktiviert werden.“ (SVPH 2018: 51)

Es gibt drei Varianten von Aufbaustrategien: Umgehen, Anknüpfen und Umdeuten. Bei der ersten Variante wird das physikalische Konzept rasch eingeführt. Erst wenn es sicher angewendet werden kann, wird es mit den vorhandenen Schülervorstellungen verglichen. Bei der zweiten Variante knüpft man an ausbaufähige Vorstellungen an und entwickelt sie weiter oder verändert sie. Bei der dritten Variante sagt man den Lernenden absichtlich nicht, dass ihre Vorstellungen aus physikalischer Sicht falsch sind, nur dass man in der Physik andere Begriffe benutzt. So werden sie ermutigt.

Oft werden Analogien verwendet. Eine spezielle Form sind Überbrückungsstrategien. Man stellt eine Verbindung zwischen einer bereits richtig verstandenen Ankersituation zu einer noch nicht richtig verstandenen Zielsituation her, indem man eine Überbrückungssituation dazwischenschaltet. (vgl. SVPH 2018: 51ff)

Bei Aufbaustrategien treten Schülervorstellungen oft im Laufe des Unterrichtsgeschehens zu Tage. Das geschieht aber nur in einem Lernklima, wo sich die Lernenden trauen, ihre Vorstellungen zu äußern. Die Lehrperson muss die Schülervorstellungen erkennen, um sie aufgreifen und nachfragen zu können. Die physikalischen Konzepte können aber auch erst nachträglich mit den Schülervorstellungen verglichen werden. Um miteinander ins Gespräch zu kommen, ist es notwendig, dass die Lehrperson ein vertrautes Lehr-Lern-Klima schafft, in dem man offen diskutieren kann und Fehler machen darf. (vgl. SVPH 2018: 56ff)

Nachdem man in der Fachdidaktik die große Bedeutung der Schülervorstellungen für erfolgreiches Lernen erkannt hatte, begann man die Schülervorstellungen in breitem Rahmen zu erforschen. Dabei werden unterschiedliche Datenerhebungsverfahren verwendet wie zum Beispiel schriftliche Tests, Interviews und Unterrichtsmitschnitte. (vgl. SVPH 2018: 17) Da die Lernenden ihre Vorstellungen selten verbalisieren können, kann man nur indirekt aus ihren Äußerungen und aus der Art und Weise, wie sie Aufgaben bearbeiten, auf die zugrundeliegenden Schülervorstellungen schließen. Es sind also „Als-ob-Vorstellungen“. Man interpretiert, dass die Vorgehensweise der Lernenden aufgrund einer bestimmten Schülervorstellung erfolgt. (vgl. SVPH 2018: 9)

## 1.2. Schülervorstellungen zur Natur der Naturwissenschaften und zur Interferenz

Abgesehen von speziellen Schülervorstellungen zu bestimmten Themenbereichen gibt es auch themenübergreifende Denkrahmen, die eine entscheidende Rolle spielen und das Physiklernen erschweren. Dazu gehören Vorstellungen die Natur der Naturwissenschaften betreffend. Die Lernenden denken, dass Physiker ihr Wissen aus den Ergebnissen von Experiment ableiten. Diese empiristische Sichtweise wird im Physikunterricht oft durch die Art und Weise, wie Experimente eingesetzt werden, verstärkt. Diese Vorstellung wirkt sich auch darauf aus, wie Physik gelernt wird. Physikalisches Wissen wird als fix und als sachlogisch nicht anders denkbar einfach übernommen. Die notwendige Kreativität der Wissenschaftler und die oft langwierigen kontroversen Aushandlungsprozesse zwischen den Wissenschaftlern werden hierbei völlig ignoriert. (vgl. SVPH 2018: 11) Theorien und Gesetze werden nicht in der Natur gefunden oder bilden sie einfach ab, sondern werden von der Physik konstruiert und überprüft. Naturwissenschaftliches Wissen entsteht in einem dynamischen, kreativen Akt des Nachdenkens, Schlussfolgerns und der Theoriebildung einerseits und des Messens, Beobachtens und Experimentierens andererseits, wobei beides aufeinander bezogen ist. (vgl. SVPH 2018: 277)

Die Lernenden stellen sich Theorien als etwas vor, das vorläufig ist, als Vermutungen, die leicht veränderbar sind. Sie können zu Gesetzen heranreifen, die ein bis zur Sicherheit gereiftes Wissen enthalten. Modelle sind für sie oft wie Flugzeugmodelle, das heißt möglichst genaue materielle Abbildungen. (vgl. SVPH 2018: 277f)

Tatsächlich gilt Wissen, das von Naturwissenschaften hervorgebracht wird, in der Wissenschaftstheorie grundsätzlich als vorläufig, weil es nicht gemäß den Regeln der Logik oder Mathematik etwa durch vollständige Induktion bewiesen werden kann. Auch Theorien und Gesetze, die aktuell anerkannt werden, müssen nicht für immer gelten. Naturwissenschaftliches Wissen kann unterschiedliche Formen annehmen. Theorien, wie zum Beispiel die Wellentheorie des Lichts, haben erklärenden Charakter, das heißt, sie führen einzelne Phänomene auf übergeordnete Prinzipien zurück und sollen empirisch abgesichert sein.

Gesetze und Regeln beschreiben empirische Regelmäßigkeiten und stehen oft mit Theorien, die diese erklären, in engem Zusammenhang. Modelle beschreiben die Eigenschaften eines physikalischen Systems im Hinblick auf den Zusammenhang jener Elemente, die man als funktional für das System annimmt. Sie basieren am Anfang auf guten Ideen, sollten sich aber später anhand ihrer Prognosen empirisch überprüfen lassen. Zudem verwendet man

deshalb durchaus auch unterschiedliche Modelle, je nachdem in welchem Zusammenhang es zu Erklärungen beitragen und es Prognosen ermöglichen soll. (vgl. SVPH 2018: 277)

Im Folgenden sollen die Schülervorstellungen, auf die die Forschung beim Thema Interferenz gestoßen ist, zusammengestellt werden.

Lernenden fällt es schwer zu verstehen, dass sich nur die Auslenkungen der beiden Wellenzüge überlagern und man durch Addition die resultierende Amplitude an jedem Ort bestimmen kann. Lernende verstehen unter Interferenz vielmehr nur die Extreme, nämlich Auslöschung oder Verdopplung. Deshalb ist für sie unverständlich, dass destruktive Interferenz auch nur zu einer Abschwächung führen kann. Manche Lernende verwechseln die Interferenz mit einer Verstärkung. Beim Doppelspaltexperiment denken manche Schülerinnen und Schüler, dass jeder Spalt für sich ein Interferenzbild erzeugt oder jeder die Hälfte davon. Die wenigsten Lernenden verstehen auch nach dem Unterricht, dass das Interferenzphänomen mit dem Gangunterschied erklärt werden kann. (vgl. SVPH 2018: 200-204)

Auch viele Studierende in fortgeschrittenen Semestern haben noch ein Problem zu erkennen, unter welchen Bedingungen das Teilchenmodell beziehungsweise das Wellenmodell für Licht angewendet werden soll. Außerdem fehlt ihnen ein funktionales Verständnis für diese beiden Modelle. In diesem Zusammenhang wurden der Gangunterschied, die Phasendifferenz und die Verbindungen zwischen diesen beiden Konzepten als wichtige Lernschwierigkeiten mit Konzepten der Physik identifiziert. (vgl. WHSM 1999: 5)

Studierende haben oft kein Modell, mit dem sie die Interferenzeffekte bei zwei Punktquellen beziehungsweise am Doppelspalt beschreiben können. Oft wird auch das Prinzip der Superposition nicht richtig angewendet. (vgl. WHSM 1999: 6)

Vielen Studierenden ist die zentrale Rolle des Gangunterschieds oder der Phasendifferenz nicht bewusst, wenn es darum geht, die Interferenzeffekte zu begründen (vgl. WHSM 1999: 6). Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass ein genügend schmaler Spalt nicht als Punktquelle erkannt wird. Das ist aber grundlegend, wenn man das Interferenzmuster bei einem Doppelspalt beschreiben will. Jeder Spalt ist eine Punktquelle, die Wellenfronten aussendet und diese interferieren miteinander. Wenn einer der beiden Spalte abgedeckt würde, dann wäre der Schirm daher gleichmäßig hell, weil dann keine Interferenz stattfinden kann. (vgl. WHSM 1999: 7)

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass nicht richtig zwischen der geometrischen Optik und der Wellenoptik unterschieden wird. Das führt dazu, dass dann ein Hybridmodell

verwendet wird. Man erkennt diese Lernschwierigkeit zum Beispiel daran, dass Studierende zum Schluss kommen, dass nur ein halbes Interferenzmuster zu sehen ist, wenn ein Spalt abgedeckt wird. (vgl. WHSM 1999: 8)

Eine weitere Schwierigkeit zeigt sich beim Erkennen der Abhängigkeiten des Interferenzmusters von den Eigenschaften eines optischen Systems. Den Studierenden fällt es schwer, die Parameter festzulegen, die verändert werden müssen, um das Interferenzmuster in bestimmter Weise zu verändern. (vgl. WHSM 1999: 8)

Wenn die Lernschwierigkeiten bezüglich des Wellenmodells nicht angesprochen werden, dann können diese bestehen bleiben und es besteht die Gefahr, dass das Verständnis von komplexeren Themen wie der Wellennatur des Lichts oder das Photonenmodell des Lichts dadurch verhindert oder verkompliziert wird. (vgl. WHSM 1999: 14)

### 1.3. Andere Unterrichtskonzepte

Nachdem man die Schülervorstellungen erforscht hatte, erfolgten in einem weiteren Schritt die Erarbeitungen von Unterrichtskonzeptionen, die darauf aufbauten. (vgl. SVPH 2018: 15) Für den Bereich der Wellenoptik spielen die Tutorien, die die Arbeitsgruppe Physikdidaktik der University of Washington, Seattle seit den 1970er Jahren für verschiedene Themen der Oberstufenphysik entwickelt hat, eine wichtige Rolle. Es wurden Materialien erstellt, mit deren Hilfe sich die Lernenden angeleitet durch Tutoren weitgehend selbstständig Wissen aneignen können. Zusätzlich wurden Begleitmaterialien für die Lehrenden entwickelt. (vgl. SVPH 2018: 205)

Ausgangspunkt war einerseits, dass Lernende auch nach dem Optikunterricht kein prinzipielles Verständnis dafür zeigen, welche Phänomene mit dem Teilchenmodell beziehungsweise mit dem Wellenmodell besser beschrieben werden können und andererseits, dass man bei Lernenden Verständnisschwierigkeiten bei den Konzepten zum Gangunterschied, zum Phasenunterschied und deren Abhängigkeit geortet hat. Deshalb wurde ein Unterrichtsgang erarbeitet, der sie beim Lernen unterstützt. (vgl. WHSM 1999: 5) Die Lernenden schaffen es oft nicht zu erkennen, dass es vom Gangunterschied eines Punktes zu den Quellen abhängt, ob sich die Wellen an dem Punkt in Phase oder Gegenphase befinden. Das ist aber entscheidend für die Bestimmung der Interferenz. Selbst Studierende haben oftmals kein geeignetes Wellenmodell, das sie anwenden können oder das als Grundstein für eine Weiterentwicklung dienen kann. Somit können sie auch keine Voraussagen treffen oder Erklärungen geben, die die Interferenz betreffen. Sie haben auch

große Schwierigkeiten beim Verstehen grundlegender Konzepte wie Wellenlänge, Weglängendifferenz oder Phasendifferenz. (vgl. AHVM 1999: 891)

Im Rahmen der Physiktutorien soll zuerst ein Verständnis für das Wasserwellen-Modell entwickelt werden, weil es weniger abstrakt ist und die Interferenz leicht zu beobachten ist. Dann erfolgt die Verbindung zum Doppelspalt-Experiment, bei dem man das Interferenzmuster des Lichts beobachten kann. (vgl. WHSM 1999: 6) In der Folge werden auch die Interferenz am Dreifachspalt beziehungsweise am Mehrfachspalt und die verschiedenen Abhängigkeiten untersucht. (vgl. WHSM 1999: 10) Es ist sehr wichtig, dass den Lernenden die Möglichkeit gegeben wird, sich den Stoff Schritt für Schritt anzueignen und die Begründungen durchzugehen. So können die wichtigen Konzepte entwickelt und angewendet werden. Wenn den Lernenden diese Möglichkeit gegeben wird, können sie ihr Verständnis signifikant verbessern und sogar ein Verständnis für sehr schwierige Themen entwickeln. Es gibt Hinweise darauf, dass die Zeit, die verwendet wird, um ein gutes qualitatives Verständnis zu entwickeln, signifikant zu einer Verbesserung bei der Lösung quantitativer Probleme beiträgt. (vgl. WHSM 1999: 14)

Rainer Müller und Hartmut Wiesner zeigen in ihrem Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik den Wellen-Teilchen-Dualismus des Lichts im Interferometer (vgl. MW: 17- 23), wo das Licht in zwei Teilstrahlen aufgespalten wird. Sie laufen dann auf verschiedenen Wegen bis sie von einem zweiten Strahlteiler wieder zusammengeführt werden. Aufgrund der Gangunterschiede sieht man ein Interferenzmuster auf dem Schirm. Sie greifen hierbei auf Computersimulationen zurück. Wenn man das Laserlicht durch eine Zahl von Graufiltern schickt, wird es abgeschwächt und man kann das Experiment mit einzelnen Photonen durchführen. Erst mit der Zeit entsteht auf dem Detektor durch die einzelnen nachgewiesenen Photonen wieder ein kreisförmiges Interferenzmuster. Dadurch zeigt sich, dass weder das Wellenmodell noch das Teilchenmodell allein zur Erklärung dieses Experiments ausreicht. „Eine befriedigende Erklärung muss Elemente beider Modelle in sich vereinigen.“ (MW: 20)

#### 1.4. Halbstrukturierte Interviews nach dem Unterricht

Die auf Basis der Schülervorstellungen neu entwickelten Unterrichtsmaterialien können mit Hilfe mündlicher Verfahren getestet werden. Dazu zählen Einzelinterviews, die in der Form von halb-strukturierten Interviews geführt werden. Die Person, die das Interview führt, orientiert sich hierbei an einem Leitfaden, von dem sie aber abweichen kann, um nachzufragen, wenn nicht klar ist, was der oder die Interviewte genau meint. Bei den

Befragungen werden auch Bilder, Skizzen oder Experimente unterstützend eingesetzt. Die Interviews werden aufgezeichnet, transkribiert und analysiert. (vgl. SVPH 2018: 17)

Eine Unterrichtssequenz kann als erfolgreich gesehen werden, wenn es gelingt, dass die Lernenden „die physikalische Sicht als ernstzunehmende Alternative akzeptieren können, auch wenn noch Vorbehalte bestehen bleiben.“ (WW 1996: 255) Das zeigt sich darin, dass sie sich zum Beispiel auf ein Modell einlassen und damit arbeiten und argumentieren.

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden Interviews als Analysemittel genutzt. Die Lehrkraft hat im Regelunterricht das Konzept durchgeführt und nach jeweils einer Unterrichtseinheit wurden dieselben drei Schülerinnen interviewt. Nur nach der vierten Stunde wurde von den Interviews abgesehen, weil in dieser Stunde kaum neuer Stoff dazugekommen ist. Die Fragen zur vierten und fünften Unterrichtsstunde wurden gemeinsam nach der fünften Stunde gestellt. Im Vorfeld wurden die Interviewfragen festgelegt und es wurden auch schon teilweise Fragen überlegt, die gestellt werden sollten, wenn die Schülerinnen und Schüler keine Antwort geben können. Der interviewenden Person steht es dennoch frei noch zusätzliche Fragen zu stellen, falls die Erklärungen der Schülerinnen und Schüler noch nicht ganz klar sind oder auch kleine Hilfestellungen zu geben, damit die Frage beantwortet werden kann. Die Interviews wurden aufgezeichnet, transkribiert und analysiert. Die Datenanalyse erfolgt kategorienbasiert (vgl. WSH 2015: 318) mittels einer Tabelle, die in Farbcodes den Grad des Verständnisses der Befragten wiedergibt. Die ausgewählten Konzepte wurden genau analysiert und im Hinblick auf die Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und die Indikatoren, die angeben, ob jemand das Konzept verstanden hat oder nicht wie etwa das Weglassen von Informationen, überprüft. Die Unterrichtssequenzen selbst wurden beobachtet und ebenfalls aufgezeichnet. Es folgte eine Analyse im Hinblick auf die Konzepte. Der Vorteil dieser modifizierten Akzeptanzbefragung ist die direkte Anbindung an den Unterricht. Durch die Unterrichtsbeobachtung gibt es ein umfangreicheres Material, das zusätzlich ausgewertet werden kann. Es können Erkenntnisse gewonnen werden, die ihrerseits wieder im Unterricht direkt umgesetzt werden können.

## 2. Materialentstehung, Unterrichtskonzept und praktischer Einsatz in Wien

Zunächst soll darauf eingegangen werden, in welchem Rahmen das Unterrichtskonzept und die Materialien dazu entwickelt worden sind. Dann wird das Konzept anhand einer Zusammenfassung des Lehrpersonenskripts und der Arbeitsblätter überblicksmäßig vorgestellt. Schließlich erfolgt eine Beschreibung des praktischen Einsatzes der Materialien.

### 2.1. Materialentstehung

Im Rahmen des Projekts „Investigate“ wurde von der Gruppe für Didaktik der Physik in Zagreb ein Unterrichtskonzept zur Wellenoptik erarbeitet. Die Personen, die an der Erstellung der Materialien mitgearbeitet haben, sind Maja Planinic, Ana Sušac, Karolina Matejak, Lana Ivanjek und Katarina Jeličić. Ziel des erstellten Konzepts ist es eine Lernumgebung zu entwickeln, mit deren Hilfe die Kenntnisse in Wellenoptik und das wissenschaftliche Denken gefördert werden. Das forschungsbasierte Unterrichtsmaterial soll das „scientific reasoning“ und das konzeptuelle Wissen im Bereich Wellenoptik verbessern.

Das Konzept umfasst die gesamte Wellenoptik mit den einzelnen Themen in folgender Reihenfolge: Wellen- und Teilchennatur des Lichts, Interferenz von Wasserwellen und Licht, optisches Gitter, Beugung am Spalt und am Hindernis und die Polarisation des Lichts.

Das komplette Konzept soll ab Herbst in Schulen in Kroatien erprobt werden. Es wird Tests geben, in denen es um die Wellenoptik und das wissenschaftliche Denken geht, um die Wirksamkeit einschätzen zu können und das Konzept zu evaluieren. Alle notwendigen Materialien für die Versuche werden den Schulen zu Verfügung gestellt, da die Physiksäle nicht mit allem ausgestattet sind, was benötigt wird. Zusätzlich sollen in einer Schule in Österreich die ersten zwei Themenblöcke erprobt werden. Hierbei geht es auch um die Frage, wie das Konzept in die Unterrichtsplanung passt.

## 2.2. Das Konzept der ersten zwei Themenblöcke im Detail

Die Schülerinnen und Schüler sollen nach der ersten Einheit das historische Dilemma der Diskussion über Wellen- oder Teilchennatur des Lichts beschreiben können und den Unterschied zwischen dem klassischen Teilchenmodell und dem Wellenmodell erklären können. Im Zusammenhang damit soll auch in der Klasse darüber diskutiert werden, wie man entscheiden kann, welches von zwei kompetitiven Modellen in der Physik besser geeignet ist. Ein weiteres Ziel ist es, die grundlegenden Wellenkonzepte auf die schematische Darstellung einer Kreiswelle mit Wellenfronten anwenden zu können. Ein wichtiger Begriff, den die Schülerinnen und Schüler erklären können sollen, sind die kohärenten Quellen. Ausgangspunkt ist das Konzept der Interferenz der mechanischen Kreiswellen, das verstanden werden soll. Die Schülerinnen und Schüler sollen die Bedingungen für konstruktive und destruktive Interferenz benennen und erklären können, um dann in der Folge die Interferenz beim Laserlicht besser zu verstehen. Die Bedingung für die Interferenz soll auch in Beispielen angewendet werden können. Das gesamte Unterrichtskonzept soll dazu beitragen, dass die Schülerinnen und Schüler ihre Fähigkeit des wissenschaftlichen Denkens weiterentwickeln.

Die erste Stunde beginnt mit einem Theorieinput der Lehrkraft, der den geschichtlichen Hintergrund zur Diskussion über die Natur des Lichts liefern soll. In der Engagephase sollen Newton und Huygens erwähnt werden, welche Konzepte sie vertraten und ihre wichtigsten Bücher dazu. Die Schülerinnen und Schüler sollen überlegen, wie man entscheiden kann, welches dieser beiden Modelle besser geeignet ist und darüber in der Klasse diskutieren. Die Diskussion soll zu dem Ergebnis führen, dass entschieden werden kann, welches Modell besser geeignet ist, wenn es ein Phänomen gibt, das nur eins der Modelle beschreibt. Dieses Phänomen soll gemeinsam herausgefunden werden. Zu diesem Zweck werden zwei Videos gezeigt, eines zur Wechselwirkung der Teilchen und eines zu der der Wellen. Die Schülerinnen und Schüler sollen ihre Beobachtungen beschreiben und die Lehrkraft führt daraufhin die Interferenz als ein Phänomen ein, in dem sich Teilchen und Wellen unterscheiden. Sie tritt nicht bei Teilchen, sondern nur bei Wellen auf. Nach dieser Erkenntnis wird eine 2D Simulation einer Kreiswelle gezeigt (<http://www.falstad.com/ripple/>), die wichtigsten Begriffe werden geklärt und es wird betont, dass eine Abbildung immer nur einen bestimmten Zeitpunkt darstellt. Die Täler werden als gestrichelte Linien und die Berge als volle Linien definiert, um die Kommunikation in der Klasse zu erleichtern. Ein weiterer wichtiger Punkt ist es zu besprechen, wie groß die Auslenkung der Welle zwischen Tal und Berg ist. Der Begriff der Wellenlänge wird definiert. In der Simulation wird die Frequenz verändert und die Schülerinnen und Schüler sollen aus ihren Beobachtungen den

Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge ableiten. Die Formel, die diese beiden Größen verbindet, soll in Erinnerung gerufen werden. Dann werden die Schülerinnen und Schüler an den Begriff der Kohärenz herangeführt. Sie sehen zwei Abbildungen von Quellen und sollen die Eigenschaften, die bei beiden gleich sind, benennen. Dadurch erkennen die Lernenden, was Kohärenz bedeutet und dass kohärente Quellen die Bedingung dafür sind, dass Interferenz überhaupt beobachtet werden kann. Dann schwingen die zwei Quellen als Gedankenexperiment gleichzeitig auf einer Wasseroberfläche und die Schülerinnen und Schüler sollen überlegen, wie die resultierende Auslenkung der Welle aussieht und somit auf den Begriff der Superposition kommen. Im Folgenden wird die erste Forschungsfrage formuliert: *Wie lautet die Bedingung für konstruktive Interferenz in einem Punkt und wie lautet die Bedingung für destruktive Interferenz in einem Punkt?* Die Schülerinnen und Schüler sollen sie mithilfe des Arbeitsblatts 1 beantworten, indem sie das Bild von zwei Quellen, die Wellenfronten aussenden, untersuchen. An diesem Punkt wird das erste Arbeitsblatt ausgeteilt. Auf diesem Arbeitsblatt sind Wellenfronten, die durch zwei Punktquellen erzeugt werden, abgebildet.

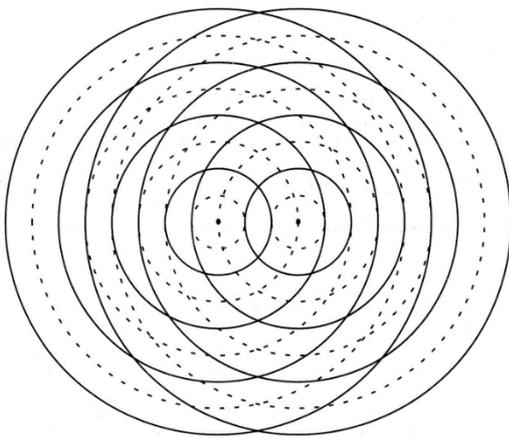
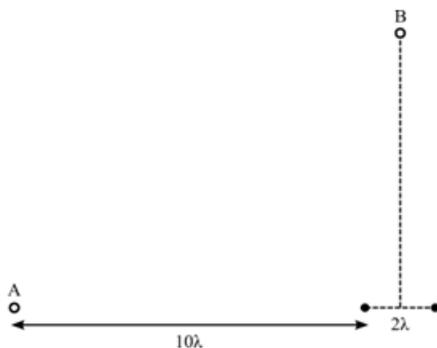


Abb.1: zwei kohärente Quellen, die Wellenfronten aussenden

Die Schülerinnen und Schüler sollen den Abstand zwischen den Quellen als Vielfaches der Wellenlänge ausdrücken und die Auslenkung an gewissen Stellen angeben. Die Auslenkungen maximal oberhalb und maximal unterhalb der Gleichgewichtslage und die Auslenkung Null sollen in jeweils verschiedenen Farben in der Abbildung eingezeichnet werden. Es soll eine Überlegung angestellt werden, wie sich die Auslenkung der markierten Punkte mit der Zeit verändert. Auch die Bewegung des Wassers soll explizit in die Überlegungen miteinbezogen werden. An dieser Stelle wird die Gruppenarbeit kurz unterbrochen, um in der Klasse die 2D Simulation nochmals anzusehen und die Antworten zu diskutieren. Dann geht es am Arbeitsblatt 1 weiter. Die Schülerinnen und Schüler sollen Punkte, an denen die Wasseroberfläche in Ruhe bleibt und an denen die Auslenkung der

Wasseroberfläche maximal ist, auswählen, und jeweils den Abstand des Punktes zu den einzelnen Quellen in Wellenlängen angeben und dann die Differenz zwischen den erhaltenen Abständen bilden. So werden die Schülerinnen und Schüler an den Begriff des Gangunterschieds herangeführt und dieser wird auch auf dem Arbeitsblatt definiert. Im Folgenden sollen die Schülerinnen und Schüler versuchen eine Formel für die destruktive und die konstruktive Interferenz aufzustellen. Die Punkte konstruktiver und destruktiver Interferenz werden ebenfalls auf dem Arbeitsblatt definiert. Die Linien konstruktiver und destruktiver Interferenz werden eingezeichnet und es soll die Wasserbewegung entlang dieser Linien besprochen werden. Die Ergebnisse werden dann in der Klasse verglichen, wobei besonderer Wert auf die Konzepte der konstruktiven und destruktiven Interferenz gelegt wird. Im letzten Teil der Einheit werden die Knotenlinien betrachtet, indem eine Folie mit Kreiswellen auf ein Blatt Papier mit Kreiswellen gelegt wird. Sie stellen zwei kohärente Punktquellen dar. Die Folie soll von den Schülerinnen und Schülern verschoben werden. Ein Zusammenhang zwischen den Knotenlinien und dem Abstand zwischen den Quellen wird abgeleitet. Das Arbeitsblatt 2 wird ausgeteilt. Es ist bei zwei verschiedenen Aufgaben die Interferenz an jeweils zwei Punkten zu bestimmen.



**Abb.2:** Beispiel zur Bestimmung von Interferenz

Der Punkt B liegt entlang der Mittellinie genau zwischen den zwei Quellen und der Punkt A liegt auf einer Horizontalen zu den Quellen. Die Abstände zwischen den zwei Quellen und der Abstand von A werden bei den Aufgaben verändert. Die Eingangsfrage wird nochmals gestellt und die Schülerinnen und Schüler sollen einen Vorschlag machen, wie man entscheiden kann, welches Modell das Licht besser beschreibt. Es soll die Interferenz genannt werden. Sie ist das Phänomen, das nur bei der Superposition von Wellen, aber nicht bei der Kollision von Teilchen auftritt. Wenn man bei Licht Interferenz beobachten könnte, müsste man für die Beschreibung das Wellenmodell wählen, weil es in diesem Fall besser passt.

Ziel der zweiten geplanten Einheit ist es, dass die Schülerinnen und Schüler das Interferenzbild von zwei Punktquellen beschreiben können. Das Auftreten des

Interferenzbildes des Lichts soll mit der Interferenz von Wasserwellen in Verbindung gebracht und mithilfe des mechanischen Wellenmodells beschrieben werden können. Die Rolle der kohärenten Quellen bei der Entstehung des Interferenzbildes soll begriffen werden. Der Weg der Lichtwellen aus den kohärenten Quellen beim Young'schen Doppelspaltversuch soll erklärt werden können und der Einfluss des Experiments auf die historische Debatte bezüglich der Wellen- oder Teilchennatur des Lichts soll bewusst gemacht werden. Indem sich die Schülerinnen und Schüler intensiv mit dem Experiment auseinandersetzen, soll ihr wissenschaftliche Verständnis entwickelt werden. Das Modellieren und die Bedeutung des Experiments beim Testen von Modellen soll verstanden werden. Sie sollen ihr Wissen in eigenen Worten sowohl schriftlich als auch mündlich physikalisch korrekt wiedergeben können.

Die Diskussion über die Natur des Lichts, die mit den Modellen von Newton und Huygens verbunden ist, wird wiederaufgegriffen. Als Unterscheidungsmöglichkeit wird das Phänomen Interferenz genannt. Die Schülerinnen und Schüler sollen Vorschläge machen, wie man überprüfen kann, ob das Licht Interferenz zeigt oder nicht. Es werden im Folgenden zwei Demonstrationsexperimente durchgeführt. Es wird zuerst über die Schülererwartungen gesprochen, dann werden die Beobachtungen mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert und erläutert. Beim ersten Experiment werden zwei Taschenlampen verwendet, deren Lichtkegel sich überlappen. Beim zweiten Experiment wird Laserlicht zuerst ohne und dann mit Doppelspalt auf einen Schirm gerichtet und das Muster beobachtet. Beim zweiten Teil des Laserlichtexperiments handelt es sich um den Young'schen Doppelspaltversuch. Die meisten Schülerinnen und Schüler erwarten sich erfahrungsgemäß zwei Punkte auf dem Schirm und kein Interferenzmuster. Das Muster soll von den Schülerinnen und Schülern beschrieben werden, wobei im Besonderen auch die Entfernungen zwischen den nebeneinanderliegenden Linien betrachtet werden sollen, weil die Äquidistanz charakteristisch für das Interferenzbild ist. Es folgt die nächste Forschungsfrage: *Wie entsteht so ein Interferenzmuster?* Die Antwort soll an Hand des Arbeitsblattes 3 erarbeitet werden. Dabei sollen sich die Schülerinnen und Schüler mit der Wasserwellenanalogie behelfen und einen Zusammenhang zur Interferenz bei den Wasserwellen herstellen.

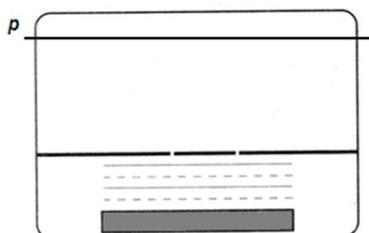
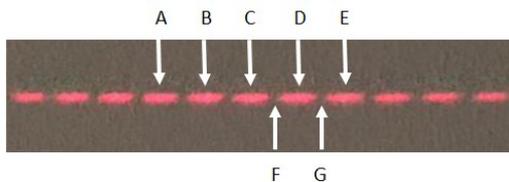


Abb.3: Analogie zu Wasserwellen mit Linie p

Sie sollen zuerst in kleinen Gruppen einzeichnen, wie sich Wasserwellen nach zwei identischen schmalen Spalten ausbreiten. Im nächsten Schritt bekommen die Schülerinnen und Schüler dann eine vergrößerte Abbildung, auf der sowohl die Ausbreitung der Wellen als auch eine Linie  $p$  eingezeichnet sind. Die Schülerinnen und Schüler sollen nun mit den Farben, die sie schon in der vorigen Stunde verwendet haben, die Linien konstruktiver und destruktiver Interferenz einzeichnen und auf der Linie  $p$  die Punkte, an denen es zu konstruktiver Interferenz beziehungsweise destruktiver Interferenz kommt, kennzeichnen. Für jeden dieser Punkte soll der Gangunterschied bestimmt werden. Im Folgenden sollen die Gangunterschiede maximaler destruktiver und maximaler konstruktiver Interferenz insgesamt betrachtet werden und daraus eine allgemeine Formel aufgestellt werden. Anschließend wird wieder zum Thema Licht übergegangen. Auf der Rückseite des Arbeitsblattes 3 geht es um Licht beim Durchgang durch zwei schmale Spalte. Das Muster, das auf dem Schirm zu sehen ist, ist ebenfalls abgebildet und ein paar Punkte sind mit Buchstaben versehen. Das Phänomen soll als Interferenzmuster erkannt und benannt werden, indem das Lichtexperiment am Doppelspalt mit dem Wasserwellenexperiment in Verbindung gesetzt wird. Es soll herausgefunden werden, dass die Linie  $p$  dem Schirm entspricht. Auf der Abbildung der Wasserwellen sollen auf der Linie  $p$  die Punkte, die in der Abbildung des Interferenzmusters des Laserlichts mit Buchstaben gekennzeichnet sind, eingezeichnet werden. Die Punkte werden auch die Punkte maximaler und minimaler Intensität genannt. Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den Experimenten mit Wasserwellen und Laserlicht sind gefragt und eine Erklärung für die Entstehung des Interferenzbilds bei Laserlicht soll gegeben werden. Der Gangunterschied der Punkte, die in der Abbildung gekennzeichnet sind, soll bestimmt werden, wobei die Mitte des Schirms an einem gewissen Punkt vorgegeben ist. Die Ergebnisse werden in der Klasse besprochen. Die Erkenntnisse werden nochmals mit den zwei Experimenten mit den Taschenlampen beziehungsweise mit dem Laserlicht in Verbindung gesetzt. Die Experimente unterscheiden sich durch das Vorhandensein oder Nicht-Vorhandensein kohärenter Quellen. Die Schwierigkeit kohärente Lichtquellen zu erhalten wird thematisiert. Die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass Interferenz ein typisches Wellenphänomen ist, das mit dem Teilchenmodell nicht beschrieben werden kann. Am Ende der Stunde werden zwei konzeptuelle Aufgaben gestellt. Zum einen soll eine wahre Aussage zur Interferenz des Lichts gefunden werden und zum anderen sollen die konstruktive und die destruktive Interferenz in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt werden.

In der dritten Einheit geht es darum, dass die Schülerinnen und Schüler beschreiben können, wovon das Interferenzbild von zwei Punktquellen beim Licht abhängt. Sie sollen die Formel  $s = \frac{\lambda \cdot a}{d}$  erklären und anwenden können. Neben dem wissenschaftlichen Denken werden hier

ebenfalls die experimentellen Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler weiterentwickelt, im Besonderen die Fähigkeit des systematischen Beobachtens und Beschreibens eines Experimentes. Sie sollen ihr Wissen in eigenen Worten in korrekter physikalischer Weise mündlich und schriftlich wiedergeben können. Das Phänomen Interferenz soll noch genauer untersucht werden und Abhängigkeiten sollen mathematisch beschrieben werden. Die Forschungsfragen lauten: Forschungsfrage 1: *Wie hängt der Abstand zwischen den Linien/Maxima vom Abstand zwischen den Spalten ab?* Forschungsfrage 2: *Wie hängt der Abstand zwischen den Linien/Maxima vom Abstand zwischen den Spalten und dem Schirm ab?* Forschungsfrage 3: *Wie hängt der Abstand zwischen den Maxima von der Wellenlänge des Lichts ab?* In der Engage-Phase wird der Young'sche Doppelspaltversuch nochmals als Demonstrationsexperiment gezeigt. Die Schülerinnen und Schüler beschreiben das Interferenzbild am Schirm und stellen Überlegungen an, wovon der Abstand zwischen den Interferenzlinien abhängen kann.



**Abb. 4:** Interferenzmuster Laser

Im Folgenden sollen die Schülerinnen und Schüler in Gruppen durch das Arbeitsblatt 4 angeleitet untersuchen, inwiefern die Abstände der Interferenzlinien vom Abstand des Schirms vom Doppelspalt und vom Abstand der Spalte im Doppelspalt abhängen. Die Schülerinnen und Schüler haben eine Skizze des Versuchsaufbaus auf ihren Arbeitsblättern und sollen im Schülerexperiment herausfinden, welche Parameter gleich bleiben und welche verändert werden müssen. Es sollen jeweils drei Messungen durchgeführt und die Werte in eine Tabelle eingetragen werden. Danach soll überlegt und auch aufgeschrieben werden, was aus den Messungen gefolgert werden kann. Nach dem Besprechen der Ergebnisse der Schülerexperimente wird die Abhängigkeit der Abstände der Interferenzlinien von der Wellenlänge als Demonstrationsexperiment gezeigt. Die Lehrkraft erklärt, dass genaue Messungen eine direkte Proportionalität ergeben. Zusammen wird die Formel  $s = \frac{\lambda a}{d}$  aufgestellt. Der letzte Teil des Arbeitsblatts 4 beschäftigt sich mit der Erklärung der erhaltenen Abhängigkeiten in Analogie zu dem Modell für mechanische Wellen. Es wird mit einer Folie und einer Abbildung gearbeitet, auf denen Wellenfronten, die von zwei kohärenten Punktquellen ausgehen, gesehen werden können. Die Folie soll bewegt werden und es soll überlegt werden, wo der Schirm in diesem Fall wäre. Die Linie in der Mitte soll betrachtet werden und eine Vermutung angestellt werden, ob diese Linie hell oder dunkel ist und aus welchem Grund. Es soll die Wellenlänge anhand des Interferenzbildes bestimmt

werden und beschrieben werden, was dafür gemessen werden muss und welche mathematische Abhängigkeit man dafür braucht. Es wird die Frage gestellt, wie man das Resultat überprüfen kann. Das Arbeitsblatt 4 wird abschließend in der Klasse besprochen.

### 2.3. Einsatz des Unterrichtsmaterials in Wien

Das Lehrpersonenskript und die Arbeitsblätter wurden vom Kroatischen ins Deutsche übersetzt. Die Unterrichtssequenz wurde in der AHS des Schulzentrums Friesgasse, in der Friesgasse 4 im 15. Bezirk durchgeführt. Dafür hat sich freundlicherweise die Lehrerin der 7b und 7c zur Verfügung gestellt. Die Schülerinnen und Schüler der beiden Klassen gehen in den Realzweig mit dem Fach Darstellende Geometrie. Die Lehrkraft ist erfahren und hat die Materialien im Vorfeld bekommen, um sich vorbereiten zu können und sich den Ablauf der Stunden einzuprägen. Für die ersten zwei Themenblöcke ist ein Zeitrahmen von drei Stunden geplant, wobei schon vermutet wurde, dass die erste Stunde mehr Zeit in Anspruch nehmen könnte. In der österreichischen Klasse wurden insgesamt fünf Stunden benötigt, wobei der letzte Teil des Arbeitsblattes 4 nicht mehr zum Einsatz gekommen ist. Der zeitliche Ablauf war folgendermaßen:

Stunde	Datum	Uhrzeit	geplante Einheit im Konzept
1	Fr, 29.03.2019	08:00-08:50 Uhr	Erste Einheit
2	Do, 04.04.2019	12:55-13:45 Uhr	Erste Einheit
3	Fr, 05.04.2019	08:00-08:50 Uhr	Erste Einheit und zweite Einheit
4	Di, 09.04.2019	11:55-12:45 Uhr	Zweite Einheit und Beginn der dritten Einheit
5	Fr, 12.04.2019	08:00-08:50 Uhr	Dritte Einheit

Die erste geplante Einheit hat zwei volle Unterrichtsstunden in Anspruch genommen, wobei das zweite Arbeitsblatt als Hausübung gegeben worden ist und der letzte Teil der Einheit am Beginn der dritten Stunde besprochen wurde. Die geplante zweite Einheit hat fast zwei Stunden in Anspruch genommen, wobei das Schülerexperiment für die letzte Einheit noch vorbesprochen werden konnte. Die dritte Einheit ist sich dann bis auf den letzten Teil des Arbeitsblattes in einer Stunde ausgegangen.

### 3. Unterrichtsbeobachtungen

Im Rahmen der Arbeit wurden die fünf Unterrichtsstunden beobachtet und aufgezeichnet. In der Folge werden sie beschrieben und analysiert. Abweichungen vom Lehrpersonenskript, die das Verständnis der Konzepte beeinflussen könnten, werden festgehalten und Aussagen der interviewten Lernenden im Unterricht werden besonders berücksichtigt. Am Ende wird noch auf das Feedback der Lehrkraft und der Lernenden eingegangen.

#### 3.1. Erste Stunde

Die erste Stunde fand am Freitag, den 29.03.2019 in der ersten Stunde von 08:00-08:50 Uhr statt. Anwesend waren 17 Schülerinnen und Schüler, davon 8 Mädchen und 9 Burschen.

Zuerst beschreibt die Lehrkraft das Licht als sehr komplexes Phänomen, das lange Zeit „wahnsinnige Schwierigkeiten“ in seiner Beschreibung gemacht hat. Im 17. Jahrhundert gab es „zwei konkurrierende Modelle“ nämlich das Teilchenmodell von Newton und das Wellenmodell von Huygens. Die Frage ist, ob sich das Licht wie ein Teilchen oder wie eine Welle verhält, beziehungsweise wie man in der Physik prinzipiell entscheiden kann, „ob ein Modell besser passt oder nicht“.

Im Unterschied zum Skript geht die Lehrperson nicht weiter auf die Errungenschaften der beiden Physiker ein. Sie erklärt nicht näher, welche Phänomene Newton beziehungsweise Huygens beschreiben konnten oder wie Newtons Vorstellung vom Licht war.

Auf die Frage, wie man entscheiden kann, ob ein Modell passt oder nicht, werden von den Schülerinnen und Schülern im Lehrer-Schüler-Gespräch mehrmals das „Experiment“, der Begriff der Logik und ob „mehr Daten“ und „genauere Daten“ gesammelt werden können, als Entscheidungshilfen genannt. Die Lehrperson will wissen, wie man sich eine Verbindung zwischen Experiment und Daten in diesem Zusammenhang vorzustellen hat. Eine Schülerin meint, dass man es daran sehen kann, ob beim Experiment wirklich das herauskommt, was man haben möchte, beziehungsweise ob das Ergebnis das ist, was man erwartet hat und das auch durch die Daten in gewisser Weise bestätigt wird. Die Lehrkraft bekräftigt, dass man ein Modell braucht, das die Daten „logisch erklären“ kann. Im Zusammenhang mit dem Licht muss man ein Phänomen finden, das entweder nur mit dem Wellenmodell, oder nur mit dem Teilchenmodell erklärbar ist. Dann kann man eine Entscheidung treffen, was Licht ist, indem man feststellt, welche Theorie passender ist. Sie machen sich nun auf die „Suche nach solchen Phänomenen“.

In dieser Sequenz hat die Lehrkraft mit den Schülerinnen und Schülern in ausreichendem Rahmen besprochen, wie man in der Physik damit umgeht, dass es unterschiedliche Modelle gibt und wie man herausfinden kann, welches besser passt. Es wurden einige Ideen gesammelt und ich hatte auch den Eindruck, dass die meisten Schülerinnen und Schüler hier wirklich konstruktiv nachgedacht haben und einen Vorschlag dazu machen konnten. Die Hauptaussage, dass man ein Phänomen finden muss, das nur zu einem der Modelle passt, wurde auch gut herausgearbeitet. Die Frage, ob es so ein Phänomen überhaupt geben kann, wurde nicht gestellt.

Als nächstes schaut sich die Lehrkraft mit der Klasse an, „was Teilchen machen“ beziehungsweise „was Wellen machen“. Bei dem Video zu den Teilchenkollisionen sagt die Lehrkraft, dass diese schon bekannt sind und möchte von den Lernenden, dass sie die wesentlichen Punkte zur Simulation in ihr Heft schreiben.

Die Schülerinnen und Schüler hatten ihre Sachen teilweise noch nicht ausgepackt, wodurch eine gewisse Unruhe entstand. Der Beginn der Simulation kam für einige etwas zu schnell und ich bin mir nicht ganz sicher, ob wirklich alle die Simulation gewissenhaft mitverfolgen konnten. Hier hätte man etwas mehr Zeit geben können.

Die Lehrkraft zeigt die Simulation 1 zur Teilchenkollision über den Beamer und stoppt nach den einzelnen Kollisionen. Sie fragt in die Klasse und lässt die Simulation beschreiben. Eine Schülerin beschreibt die erste Kollision gleicher Teilchen und stellt fest, dass die Teilchen gleich groß sind und gleiches Volumen haben, worauf die Lehrkraft den Schluss zieht, dass die Teilchen vermutlich dieselbe Masse haben sollen. Die zweite Kollision wird gezeigt, es wird nach dem Unterschied zur ersten gefragt und schließlich werden nochmals die ersten beiden wiederholt. Dann folgt gleich die dritte Kollision. Ein Schüler murmelt, er würde das gerne nochmal sehen, aber er meldet sich nicht. Die Lehrkraft wiederholt den Begriff des „zentralen Stoßes“ im Zusammenhang mit den ersten drei Kollisionen und erwähnt, dass jetzt ein bisschen etwas anderes kommt. Die Klasse sieht die letzte Kollision. Es werden alle Kollisionen in der Klasse besprochen. Die Schülerinnen und Schüler werden dabei einbezogen, wobei der erste Schüler in seiner Erklärung unterbrochen wird und die Lehrkraft kurz zusammenfasst, dass man einen „zentralen Stoß mit Kugeln gleicher Masse“ sieht und „das heißt, die eine Kugel kickt die andere weg“. Die nächste Schülerin (S2) erklärt, dass bei der zweiten Kollision unterschiedlich große Teilchen aufeinanderprallen und „die kleine wurde ganz schnell weggekickt“. Das bejaht die Lehrkraft. Bei der dritten Kollision erwähnt ein Schüler, dass die eine Kugel weiterrollt und die kleinere zurückrollt. Die Lehrkraft beschreibt die vierte Kollision als „dezentralen Stoß“, bei dem „die eine Kugel auch die andere wegkickt“.

Die Simulation wird sehr genau mit den Lernenden erarbeitet. Meiner Meinung nach hätte man die Stöße in diesem Zusammenhang nicht so genau wiederholen müssen. Denn die Simulation sollte nur noch einmal verdeutlichen, dass sich die Bewegung der Teilchen nach einer Kollision verändert, die Teilchen aneinander abprallen und sich nicht überlagern. Vielleicht ist das Wesentliche durch die Erklärungen sogar etwas in den Hintergrund gerückt. Man hat hier auch schon den Zeitdruck gemerkt, weil nicht alle Schülerinnen und Schüler ausreden durften, sondern von den Aussagen ausgehend das Wesentliche schnell zusammengefasst wurde. Ich glaube, dass ohne den Arbeitsauftrag, Notizen zu machen, der Nutzen dieser Übung vielleicht größer gewesen wäre.

Anschließend wird die Simulation 2 der Wellenkollision hergezeigt. Die Lehrkraft sagt im Vorhinein, dass hier „Seilwellen“ abgebildet werden. Während das Video läuft, erarbeitet die Lehrkraft gemeinsam mit der Klasse, was beobachtet werden kann. Die Ausbreitungsrichtung der Wellen wird festgestellt, eine läuft „von links nach rechts“ und die zweite „von rechts nach links“. Dazwischen fragt die Lehrkraft öfters nach, ob die Schülerinnen und Schüler das auch sehen. Zur dritten Welle werden zwei Fragen gestellt: „Was ist da dargestellt?“ und „Wie kann man das beschreiben?“ Ein Schüler beschreibt, dass zwei Wellen „zusammen zu einer großen Welle“ werden. Das wird durch die Lehrkraft bestätigt und sie fügt hinzu, dass die Wellen vor der Kollision genauso aussehen wie nach der Kollision. Wellen können „einander durchdringen“ oder, wie man auch sagt, sich überlagern. Das Prinzip der Superposition wird angesprochen. Die Wellen überlagern sich oder superponieren und laufen dann wieder auseinander. Es stellt sich die Frage, worin hier nun „der große Unterschied zu den Teilchenkollisionen“ liegt. Die Schülerinnen und Schüler sehen, dass die Wellen unverändert weitergehen und die Geschwindigkeiten beibehalten werden.

Die Aufbereitung des Videos mit der Klasse hat meiner Meinung nach sehr gut funktioniert. Dadurch, dass man das Video die ganze Zeit sehen konnte, konnten die Aussagen unmittelbar nochmals mit dem Video in Verbindung gebracht werden. Der Unterschied zur Teilchenkollision war trotzdem noch etwas schwer zu definieren. Die einzigen zwei Lernenden, die sich gemeldet haben, sind eine Schülerin und ein Schüler mit besonders guten Leistungen in Physik. Da bleibt die Frage, ob die anderen Schülerinnen und Schüler den Unterschied auch erkannt haben. Denn in der Klasse war es sehr leise und ich habe sehr viele verwirrte Gesichter bemerkt.

Das zweite Video zur Wellenkollision (Anm. Simulation 3), wieder mit Seilwellen, wird auf Wunsch der Schülerinnen und Schüler zweimal gezeigt und es wird nach dem Unterschied zum ersten Video gefragt. Die Lehrkraft zeigt das Video beim zweiten Durchlauf langsamer, „Schritt für Schritt“ und stoppt bei einem „interessanten“ Zeitpunkt. Eine Schülerin beschreibt

die Unterschiede zwischen den beiden Videos zu den Seilwellen: Beim ersten Video ging die mittlere Welle nach oben und bei diesem hier geht sie nach unten. Bei der untersten Welle gleichen sich die hohen und niedrigen fast aus, aber trotzdem bleiben zwei Hügel, „weil das hohe größer ist als das tiefe“. Die Lehrkraft bestätigt das und wiederholt, dass die letzte Welle im zweiten Video ein bisschen nach oben ausgelenkt ist. Sie stellt die Frage: „Was passiert im Augenblick der Kollision“, oder eigentlich „nicht im Augenblick“, denn das „ist eigentlich ein ausgedehnter Zeitraum“? Eine Schülerin sagt, dass es zu konstruktiver Interferenz kommt. Die Lehrkraft bekräftigt das, die „Wellen überlagern sich und addieren sich“ und im zweiten Video komme es dabei fast zur Auslöschung. Das Phänomen, dass sich „Wellen einmal addieren“ und „einmal subtrahieren können“, nenne man Interferenz. „Das können nur Wellen“.

Das zweite Video wurde auch mit der Klasse besprochen, aber es wurde nicht durchgehend gezeigt. Die Erklärung der Überlagerungen fand ich gut und die Lehrkraft hat mit ihrer Stimme, das Wort „nur“ besonders betont, was ich auch sehr wichtig finde. Auch die Auswahl des zweiten Videos finde ich im Hinblick auf die „Beinahe-Auslöschung“ sehr gut, weil die Überlagerung meiner Meinung nach damit besser thematisiert werden kann. Der Begriff „subtrahieren“ ist in diesem Zusammenhang allerdings irreführend.

Die Simulation 4 zeigt eine Kreiswelle, die von einer Punktquelle ausgeht. Die Schülerinnen und Schüler sollen ihre Beobachtungen ins Heft schreiben. Die Simulation wird zuerst in zwei Dimensionen und dann in drei Dimensionen hergezeigt. Ein Schüler wird drangenommen, um seine Beobachtungen zusammenzufassen: „Von einem Punkt aus gehen in alle Richtungen Wellen“. Die Lehrkraft möchte wissen, was die hellen und die dunklen Linien sein könnten. Eine Schülerin antwortet mit „Berg“ und „Tal“. „Was ist zwischen Wellenberg und Wellental?“ Eine Schülerin nennt den „Höhenunterschied“. Die Lehrkraft gibt als Antwort „aha, ok, das auch“, aber sie möchte noch einen Begriff hören. Daraufhin antwortet ein Schüler mit „Amplitude“. Die Lehrkraft fasst noch einmal zusammen, dass der Unterschied zwischen Berg und Tal gesucht wird, da korrigiert sich der Schüler und sagt, dass hier die „doppelte Amplitude“ gesucht wird. Die Lehrkraft bestätigt das und fragt, welcher Höhenunterschied einer Amplitude entspricht. Ein Schüler gibt an, dass es der Abstand des Bergs zur x-Achse ist. Die Lehrkraft bejaht das, aber wendet ein, dass es hier keine x-Achse gibt, und stattdessen der Begriff der waagrechten Oberfläche beziehungsweise der Nullpunkt oder die Nulllage besser wäre. Es ist wichtig, dass sie sich auf Begriffe einigen und sie definiert die schwarzen Bereiche als Täler und die hellen als Berge. Diese breiten sich über die „ruhige Wasseroberfläche“ aus. Der Begriff der Wellenfront wird eingeführt und die Wellenfronten werden auf der Simulation gezeigt. Nun sollen die Schülerinnen und Schüler dieses Bild der Simulation in ihrem Heft skizzieren mit ein paar Linien und dazu die Begriffe,

die damit in Zusammenhang stehen, aufschreiben. Ein paar Begriffe würden die Schülerinnen und Schüler schon kennen, aber sie sollten im Heft stehen, damit sie wüssten, dass sie hier verwendet würden. Auf der schwarzen Linie seien alle Wellentäler und auf der hellen Linie alle Wellenberge. Die Lehrkraft erklärt den Schülerinnen und Schülern die korrekte Sprechweise: „Diese Linien, die wir sehen, verbinden Punkte gleicher Phase“.

Beim Starten der Simulation hat ein Schüler gesagt, dass das „cool“ aussieht. Dieser Schüler hat zunächst interessiert zugesehen, aber als dann die vielen Fragen kamen, ging sein Interesse etwas zurück. Die Schwingungsphasen werden zwar durchbesprochen, aber es fallen nur die Begriffe Tal und Berg. Der Nullpunkt wird im Zusammenhang mit der Amplitude erwähnt, aber nicht, dass er genau zwischen den zwei Phasen Berg und Tal liegt. Die Begriffe Maximum und Minimum, die im Skript an dieser Stelle vorkommen, werden ganz weggelassen. Das ist möglicherweise auch besser, weil so eher vermieden wird, dass die maximale Auslenkung bei den Tälern als Minimum gesehen wird. Die Wellenfront wurde auf der Simulation gezeigt, aber dann nicht sprachlich mit den Kreisen, auf denen Punkte gleicher Phase liegen, verbunden. Die Lehrkraft hebt das Wort „Phase“ beim Sprechen deutlich hervor. Das ist eine sehr gute Möglichkeit, den Lernenden deutlich zu machen, welcher Begriff hier besonders wichtig ist.

Die Lehrkraft macht das Lehrpersonenskript auf und zeigt den Lernenden das Standbild einer Kreiswelle. Sie erklärt, dass hier die abstrakte Darstellung „zeichnerisch einfacher heruntergebrochen“ wurde und will wissen, wo hier die Quelle ist. Viele Schülerinnen und Schüler zeigen auf. Ein Schüler vermutet die Quelle bei dem Punkt in der Mitte. Die Lehrkraft fragt, was die strichlierten Linien sein könnten. Eine Schülerin nennt die Berge, und kurz darauf auch die Täler als Möglichkeit. Die Lehrkraft weist die Schülerinnen und Schüler darauf hin, dass sie sich nun auf eine „Sprechweise einigen“ müssten, „was Berg ist und was Tal ist“. Die durchgezogenen Linien werden als Wellenberge definiert. Somit sind die vollen Linien die Wellenberge und die strichlierten Linien die Wellentäler. Die Schülerinnen und Schüler sollen eine Skizze in ihr Heft zeichnen und die entsprechenden Linien mit Berg und Tal beschriften.

Die Simulation hätte angehalten werden und nicht das Bild aus dem Skript hergezeigt werden sollen, was aber kein großes Problem ist. Es hat sich sehr gut ergeben, dass eine Schülerin zuerst die strichlierten Linien als Berge definieren wollte und als keine Antwort von Seiten der Lehrkraft kam, noch die Täler als weitere Möglichkeit angegeben hat. Das zeigt, dass zumindest diese Schülerin erkannt hat, dass man die Linie sowohl als Berge als auch als Täler definieren könnte, das heißt, dass Berge und Täler maximale Auslenkungen sind. Ausgehend von dieser Wortmeldung konnte die Lehrkraft auch sehr gut dazu überleiten, dass es wichtig ist, sich auf eine Sprechweise zu einigen. Zu diesem Zeitpunkt waren die

meisten Schülerinnen und Schüler noch sehr interessiert dabei, nur ein paar waren etwas unruhig. Besonders eine Gruppe von drei Mädchen in der letzten Reihe hat sehr viel getratscht und nicht gut aufgepasst, obwohl zwei davon doch auch im Unterricht aufgezeigt haben.

Die Lehrperson gibt eine kurze Beschreibung der Abbildung: Es ist kein Schnittbild zu sehen, sondern man blickt „aus der Vogelperspektive“ auf die Wellen. Es ist ein Bild, also ist die Welle nur „zu einem bestimmten Zeitpunkt“ zu sehen. Im Vergleich dazu zeigt die Simulation ein Wellenbild, das sich immer verändert. Dann möchte sie wissen, was sich bei der Abbildung aus der Vogelperspektive zwischen den Bergen und Tälern, also „zwischen den Linien“ befindet. Die Schülerinnen und Schüler bekommen kurz Zeit zum Nachdenken und murmeln und besprechen ihre Vermutungen. Ein Schüler, den die Lehrperson aufruft, meint, dass seine Antwort ohnehin „nicht richtig“ sei. Die Lehrkraft meint, dass sie das nicht weiß, nimmt dann aber eine Schülerin dran, die sagt, dass zwischen den Linien die Übergänge sind, also „Aufschwünge und Abschwünge“. Die Lehrkraft bestätigt das und beschreibt die Übergänge, „vom Berg über die Nulllage zum Tal hinunter und wieder hinauf zur Nulllage und zum Berg und so weiter“. Sie sagt, dass man zwischen den Linien der Berge und Täler noch eine weitere Linie einzeichnen könnte, nämlich eine für die Nulllage. Das sollte man „im Hinterkopf“ behalten, dass es „dazwischen auf und ab geht“.

Hier werden die vorher fehlenden Informationen nachgereicht, sowohl die Tatsache, dass die Abbildung nur einen bestimmten Zeitpunkt zeigt, als auch die genauere Beschreibung der Nulllage. Mir fehlt hier aber noch, dass die Nulllage einer Auslenkung von Null entspricht, und somit als Minimum bezeichnet werden kann, genau zwischen Berg und Tal liegt und die Definition der Berge und Täler als Maxima. Auch der Begriff Elongation wird ausgelassen und die Amplitude an diesem Punkt nicht als die maximale Auslenkung definiert. In der Nachdenkphase, was sich zwischen Berg und Tal befindet, haben eigentlich alle in ihren Gruppen miteinander intensiv über die Frage diskutiert, was möglich wäre und ich habe hier keine anderen Gesprächsthemen heraushören können. Vielleicht hat die Erwähnung der möglichen zusätzlichen Linien für die Nulllage einige verwirrt, in dem Sinne, dass sie bisher doch noch die strichlierten Linien als Nulllagen gesehen haben. Das Auf- und Abgehen in die Erklärung einzubeziehen finde ich gut.

Als nächstes wird die Frage aufgeworfen, wie man so einer Abbildung einer Kreiswelle eine „Information über die Wellenlänge entnehmen“ kann. Ein Schüler erklärt, dass es „vom äußersten Ring, den man sieht“, abhängt, vom „Abstand“. Die Lehrkraft fragt nach, welchen Abstand der Schüler meint. Daraufhin antwortet er den Abstand „zwischen Berg und Berg oder Tal und Tal“. Die Lehrkraft möchte wissen, welche Linien auf der Abbildung damit gemeint sind. Der Schüler antwortet „die durchgezogenen“. Die Lehrkraft erklärt die

Wellenlänge in der Abbildung im Falle der durchgezogenen Linien. Die Schülerinnen und Schüler sollen notieren: „Der Abstand zwischen den durchgezogenen Linien liefert uns die Wellenlänge“. Die Lehrkraft fragt nach, wieso das nicht auch der Abstand zwischen den strichlierten Linien tut. Eine kurze Stille entsteht und ein Schüler meint „auch“. Die Lehrkraft stimmt zu und lässt den Satz noch ergänzen: „oder der Abstand zwischen den strichlierten Linien“.

Der Begriff der Wellenlänge hätte auch, wenn er schon bekannt war, noch genauer gemacht werden können. Mir fehlte die Konkretisierung, dass eine Wellenlänge der Abstand zwischen zwei benachbarten durchgezogenen beziehungsweise strichlierten Linien ist. Die Nachfrage zu den strichlierten Linien fand ich sehr gut, man hat gemerkt, dass die Klasse kurz verwirrt war, aber dann langsam erkannt hat, dass das auch möglich ist.

Als nächstes wird die zweidimensionale Simulation der Wasserwellen erneut hergezeigt und die Frequenz dabei erhöht. Der Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Frequenz soll von den Schülern und Schülerinnen schriftlich festgehalten werden. In der Simulation wird die Frequenz zuerst sehr niedrig angesetzt und dann stark erhöht. Die Abbildung wird so angehalten, dass die Wellenlänge bei beiden Frequenzen noch gut erkennbar ist. Ein Schüler sagt, „die Wellenlänge ist kleiner“ und „mit höherer Wellenlänge ist mehr Energie drin, ist es nicht irgendwie diese eine Formel  $E = h \cdot f$ “? Die Lehrkraft zeigt auf die Abbildung und sagt, „das ist die Wellenlänge“. Der Schüler sagt daraufhin bei höherer Frequenz ist die Wellenlänge kleiner. Die Lehrkraft fragt noch einen anderen Schüler. Dieser Schüler liest aus seinen Notizen vor, „je höher die Frequenz, desto geringer die Wellenlänge“. Ein weiterer Schüler wird gefragt und gibt dieselbe Antwort. Die Lehrperson stellt fest, dass der Zusammenhang „indirekt proportional“ ist. Um ein „zahlenmäßiges Ergebnis“ bekommen zu können, müsse man noch einen anderen Zusammenhang herstellen. Sie erwähnt die „Wellengrundgleichung aus der Wellenlehre“. Eine Schülerin nennt die Formel  $f = \frac{c}{\lambda}$ . Die Lehrkraft bestätigt das und wiederholt die Formel umgeformt zu  $c = \lambda \cdot f$  mit der Wellengeschwindigkeit  $c$ .

Die Idee, die Simulation so anzuhalten, dass die Frequenzänderung auch im Standbild ersichtlich ist, fand ich sehr gut. So haben sich die Schülerinnen und Schüler sicher leichter getan, den Unterschied auch wirklich zu sehen. Ich fand auch die Art und Weise, wie die Schülerinnen und Schüler an die Formel herangeführt wurden, sehr gut. Bei der Frage nach dem Zusammenhang haben sehr viele Lernende aufgezeigt, was zeigt, dass noch viele mitgedacht haben und die Frage aus der Abbildung heraus beantworten konnten.

Im nächsten Schritt wird die Abbildung der zwei kohärenten Quellen aus dem Lehrpersonenskript am Beamer hergezeigt. Die Frage wird direkt aus dem Skript

übernommen, statt zwei wird der Begriff beide Quellen verwendet: „Folgende Bilder zeigen zwei Wellenquellen, die im gleichen Moment und im gleichen Medium aufgenommen sind. Was kann man über diese beiden Quellen sagen?“ Die Schülerinnen und Schüler bekommen kurz Zeit zum Nachdenken. Sie sollen die Quellen in ihr Heft skizzieren und dazuschreiben, welche Informationen sie aus diesen Abbildungen entnehmen können. Die Lehrkraft betont nochmals, dass die beiden Quellen zum gleichen Moment und im gleichen Medium aufgenommen worden sind. Welche Aussage könne man nun treffen? Eine Schülerin sagt, dass die Quellen die „gleiche Frequenz“ und die „gleiche Wellenlänge“ haben. Die Lehrkraft bestätigt das, wiederholt das Gesagte und möchte noch eine Information bezüglich des Zeitpunktes. Sie fragt, was man „über die Phase“ sagen kann. Das sei der neue Begriff, der oft unklar ist, aber er sage etwas „über die Zeit“ aus, „wann was wo stattfindet“. Ein Schüler wird aufgerufen und sieht die Quellen als „phasengleich“. Die Lehrkraft nimmt Bezug auf das Bild und wiederholt, dass sie „phasengleiche Quellen haben, die die gleiche Wellenlänge und damit natürlich auch die gleiche Frequenz haben“. Dem Bild kann man aber keine Information über die Amplitude entnehmen, man sieht hier nur Berge und Täler. Die Lehrkraft zeigt dabei auf die entsprechenden Linien. „Wenn zwei Quellen so wie in der Abbildung dieselbe Wellenlänge emittieren, dieselbe Frequenz haben, dieselbe Phasenlage haben und dieselbe Amplitude haben, dann heißen sie kohärent“. Die Schülerinnen und Schüler schreiben das auf und die Lehrkraft erklärt, dass sie hier einen „anderen Zugang“ zu dem Begriff haben und fragt nach, ob noch alle den Begriff kohärent schreiben können.

Im Vergleich zum Skript wurde nicht so genau auf die Phase eingegangen. Die Aussage, dass die ersten vollen Linien jeweils denselben Abstand zu den Quellen haben und dass das bedeutet, dass die Quellen gleichzeitig den Wellenberg emittiert haben, fehlte. Das wäre noch ein wichtiger Punkt gewesen. Bei dem Bild der zwei Quellen wirken die Schülerinnen und Schüler sehr interessiert. In einer Reihe fragt jemand einen anderen Schüler, ob er einen Unterschied sieht. Bei der Frage nach der Phase zeigt nur ein Schüler, der eher viel in Physik weiß, auf. Daher glaube ich, dass auch eine ausführlichere Erklärung mit dem Wellenberg, der zur selben Zeit emittiert wird, hilfreich gewesen wäre.

Anschließend wird die Frage gestellt, wie es aussieht, wenn auf einer „Wasseroberfläche zwei kohärente Quellen gleichzeitig schwingen“. Die Klasse ist still. Die Schülerinnen und Schüler sollen sich zum Beispiel zwei Quellen in einem „Wasserbottich“ vorstellen. Es wird Stellen geben, wo konstruktive Interferenz auftritt, aber die Frage ist, was ganz allgemein geschehen wird. Die Schülerinnen und Schüler sollen sich an die Animation mit den Seilwellen erinnern. Ein Schüler antwortet, die Wellen werden sich treffen und sich dann wieder auseinanderbewegen. Die Lehrkraft präzisiert, sie bewegen sich auf einander zu,

überlagern sich und „es wird Superposition stattfinden“. Wenn Berg auf Berg treffe, hätten die Wellen die doppelte Amplitude. Was passiere aber in einem „Zwischenzustand“, wenn zum Beispiel die eine Welle mit der halben Amplitude auf die andere Welle auch mit der halben Amplitude treffe, also die Elongation bei beiden eine halbe Amplitude sei? Ein Schüler antwortet, dass es eine „ganze Amplitude“ wird. Die Lehrkraft erklärt, dass man die Auslenkungen immer addieren kann. Es könne somit zur Verstärkung, also zu konstruktiver Interferenz oder zur Auslöschung, also zu destruktiver Interferenz kommen. Diese Begriffe seien schon bekannt.

Im Skript sollte an diesem Punkt nochmals die Simulation gezeigt werden. Das wurde hier nicht gemacht, aber ich glaube, es war auch nicht unbedingt für das Verständnis notwendig. Der Begriff der Elongation wird nun in die Klasse geworfen, ohne dass er nochmals erklärt wird.

Das Arbeitsblatt 1 wird ausgeteilt, die Forschungsfrage dazu wird als solche benannt und aus dem Lehrpersonenskript vorgelesen: „Wie lautet die Bedingung für konstruktive Interferenz in einem Punkt und wie lautet die Bedingung für destruktive Interferenz in einem Punkt?“ Die Schülerinnen und Schüler sollen das Arbeitsblatt 1 in Gruppen bearbeiten und noch zumindest die erste Seite machen, wenn es sich ausgeht, auch die Punkte C und D auf der zweiten Seite. Die Lehrkraft teilt die Zettel aus und weist darauf hin, dass es drei Seiten, aber zwei Blätter sind. Sie erklärt kurz, dass es darum geht, dass die Schülerinnen und Schüler „messen“ sollen, „wie groß die Abstände“ sind, „die Wellenlängen“ „und so weiter“. Die Schülerinnen und Schüler arbeiten circa fünf Minuten. Dann kündigt die Lehrkraft an, das Blatt nächste Stunde zu besprechen, weil die Stunde fast aus ist.

Die Zeit für die ersten Aufgaben war sehr knapp bemessen. Bei der Anzahl der Seiten hat man bei einigen Schülerinnen und Schülern etwas Unmut bemerkt. Aber sie haben trotzdem bis zum Ende der Stunde noch konzentriert weitergearbeitet.

Zusammenfassend möchte ich festhalten, dass mir die erste Stunde im Allgemeinen gut gefallen hat. Wir haben uns schon im Vorhinein gedacht, dass sich die ganze erste Einheit nicht in einer Unterrichtsstunde ausgehen wird. Die Schülerinnen und Schüler waren im Großen und Ganzen sehr interessiert, nur ein paar Schülerinnen waren etwas unkonzentriert. Die Anzahl der Simulationen war vielleicht etwas zu hoch. Jede Animation ist zwar gut ausgewählt, aber in der Unterrichtssequenz folgen sie vielleicht etwas zu knapp hintereinander. Ich hatte das Gefühl, dass das die Schülerinnen und Schüler ermüdet hat, was ich nachvollziehen kann. Bei den Fragen, die man aus den Abbildungen relativ klar beantworten konnte, haben viele aufgezeigt. Bei den Fragen nach den Zusammenhängen haben sich eher Schülerinnen und Schüler gemeldet, die mehr in Physik wissen. Am Anfang

eines Stoffgebietes muss es natürlich viel Input geben, auf dem man aufbauen kann. Das ist für Lehrende und Lernende eine Herausforderung. Durch mehrmaliges Wiederholen und selbstständige Auseinandersetzung mit dem Stoff angeleitet durch Arbeitsblätter werden mehr Schülerinnen und Schüler die neuen Informationen richtig einordnen und vernetzen können und ihr Wissen wird sich mit der Zeit festigen. Einige können gleich mitreden und mitdenken und andere brauchen etwas Zeit. Das ist in jedem Fach so. Ich glaube, dass hier das Tempo gut gewählt war. Ich fand es anfangs schade, dass zu Beginn so wenig auf Newton und Huygens eingegangen wurde. Aber das kommt daher, dass das Programm für die erste Stunde ohnehin schon sehr dicht war. Außerdem wurde das in der Stunde zwischen der vierten und fünften Unterrichtssequenz nachgeholt. Die Abbildung der kohärenten Quellen hätte noch genauer besprochen werden können, wie sich auch bei den Interviews gezeigt hat.

### 3.2. Zweite Stunde

Die zweite Stunde fand am Donnerstag, den 04.04.2019 in der sechsten Stunde von 12:55-13:45 Uhr statt. Es waren 19 Schülerinnen und Schüler anwesend, davon 9 Mädchen und 10 Burschen.

Am Anfang der Stunde bekommen die Schülerinnen und Schüler fünf Minuten Zeit, um wieder in das Thema hineinzukommen und das Arbeitsblatt 1 bis zum Punkt E, das heißt bis zur Klassendiskussion im Lehrpersonenskript, zu vervollständigen. Eine Schülerin (S2) fragt, ob Fragen gestellt werden können, weil sie nicht weiß, was Auslenkung in diesem Zusammenhang bedeuten soll. Die Lehrkraft geht zu ihr und beantwortet ihre Frage. Die Auslenkung sei zum Beispiel „zwischen Amplitude und Nullpunkt“. Die Schülerin erkennt das auch als Tal und Berg und zeigt der Lehrkraft, wo sich diese befinden. Die Lehrkraft bestätigt ihr das, zeigt ihr noch ein paar Möglichkeiten und sagt, dass es um die Auslenkung der Welle zwischen diesen Punkten geht.

In dieser Phase konnte man klar erkennen, dass die Schülerinnen und Schüler Zeit brauchen, um wieder in das Thema hineinzufinden. Am Anfang haben sie sich meiner Meinung nach etwas schwergetan und waren sehr unruhig, aber das hat sich bald gegeben und man hat dem allgemeinen Gemurmel Wortfetzen, die zum Thema passen, entnehmen können.

Das Arbeitsblatt wird gemeinsam in der Klasse diskutiert. Beginnend mit der ersten Reihe werden die Schülerinnen und Schüler der Reihe nach aufgerufen. Die Frage nach dem

Abstand der Quellen auf der Abbildung wird von der ersten Schülerin mit drei Lambda halbe beantwortet. Die Lehrerin wiederholt, dass die Antwort als ein Vielfaches der Wellenlänge angegeben werden soll und dass Lambda von schwarzer zu schwarzer Linie oder von strichlierter Linie zu strichlierter Linie ist. Damit ist „ein Abstand zwischen schwarzer und strichlierter Linie ein halbes Lambda“ und wenn sie zählen, sind das 1,2,3, wie die Schülerin gesagt hat. Also ist das Ergebnis  $\frac{3}{2}\lambda$  oder anders ausgedrückt drei Mal  $\frac{\lambda}{2}$ .

Diese Frage wurde richtig beantwortet und ich finde es sehr gut, dass die Lehrkraft nochmals die Definition der Wellenlänge mithineinnimmt, wobei mir wieder die genaue Bezeichnung von einer vollen beziehungsweise strichlierten Linie zur benachbarten vollen beziehungsweise strichlierten Linie gefehlt hat. Den meisten Lernenden ist das vermutlich klar, aber ich finde es besser, sich trotzdem immer ganz exakt auszudrücken. Auch dass auf die verschiedenen Sprechweisen eingegangen wird, finde ich ganz gut, denn die Schülerinnen und Schüler sagen es nun einmal alle anders und so wissen sie, dass sie aber trotzdem das Gleiche meinen.

Zu Punkt B, in dem die Auslenkungen an verschiedenen Schnittpunkten der Wellen gefragt sind, gibt die nächste Schülerin als Antwort, dass man, wenn Wellenberg auf Wellenberg trifft, „zweimal die Amplitude“ hat. Die Lehrkraft bestätigt das, wiederholt die Antwort und bringt den Begriff Auslenkung hinein. Die Schülerin erklärt weiter, dass bei Wellental auf Wellental ebenfalls „zweimal die Amplitude“ ist, „nur in die andere Richtung“. Die Lehrkraft bestätigt dies wieder und sagt, dass es damit „Minus zwei Mal die Amplitude“ ist. Die Schülerin fährt fort, dass die Auslenkung „0 mal Lambda ist, also 0“, wenn ein Wellenberg auf ein Wellental trifft. Wenn die Amplituden der Wellen nicht gleich wären, würden sich die Wellen gegenseitig nicht aufheben, sagt der nächste Schüler. Die Lehrkraft fragt nach, ob sie dann beim dritten Punkt (Wellenberg trifft auf Wellental) nicht wirklich 0 wären, im Gegensatz zum vorigen Beispiel mit den gleichen Amplituden. Der Schüler bejaht das. Aber die Lehrkraft möchte das noch genauer wissen. Der Schüler meint, es ist ein „bisschen größer“. Da unterbricht ihn die Lehrkraft und fragt nach, wie viel genau, „dieses Bisschen“ könne man ausrechnen. In der Klasse hört man das Wort „Differenz“. Die Lehrkraft greift das Wort auf, fragt nach, wer das gesagt hat. Die Differenz wird überbleiben. Wenn ein Wellenberg auf einen Wellenberg trifft, wäre es die „Summe der Amplituden und bei Tal auf Tal genauso“. Aber bei C wird es „jetzt spannend“.

Punkt B wurde hier sehr gut beantwortet und durch das Nachfragen der Lehrkraft wurden die Antworten der Schülerinnen und Schüler noch detaillierter und damit klarer und verständlicher. Hier sollten meiner Meinung nach keine Verständnisprobleme auftreten. Ich könnte mir nur vorstellen, dass einige Lernende die Frage mit den unterschiedlichen

Amplituden nur qualitativ beantwortet haben, anstatt mit Zahlen. Hier muss man noch klären, was erwartet wird, qualitativ, beschreibend oder mit Zahlen. Wenn man etwas Bestimmtes erwartet, müsste man das auf dem Arbeitsblatt noch präzisieren. Ich halte es aber auch für möglich, dass man die Schülerinnen und Schüler hier zuerst ganz frei entscheiden lässt, da man die Ergebnisse später in der Klasse ohnehin vergleicht und dann alle Lösungen thematisieren kann. Allerdings ist hier die Verwendung des Begriffs Differenz wieder irreführend.

Im nächsten Punkt C sollen die Schnittpunkte der Wellen in verschiedenen Farben markiert werden. Ein Schüler wiederholt, welche Auslenkungen der Wellen er mit welchen Farben gekennzeichnet hat. „Bei den schwarzen, wo Tal auf Berg trifft, bei den grünen trifft ein Tal auf ein Tal und bei den roten ein Berg auf einen Berg“. Die Lehrkraft fragt nach, wo diese schwarzen Punkte liegen. Darauf kommt die Antwort, wo Tal auf Berg trifft. Nach nochmaligem Nachfragen kommt keine Antwort und die Lehrkraft erklärt, dass die einen „Punkte auf einer waagrechten Linie“ liegen, worauf der Schüler mit „Aja“ antwortet. Die anderen Punkte liegen auf so „x-förmigen“ Linien. Die Lehrkraft erklärt weiter, dass die roten Punkte die sind, die „maximal oberhalb der Gleichgewichtslage“ liegen und somit die „Schnittpunkte zwischen zwei schwarzen Kreisen“ sind. Bei den grünen Punkten suche man die „Schnittpunkte der strichlierten Kreise“, da dort Tal auf Tal trifft. Eine Schülerin in der Klasse fragt, was mit „schwarzen Kreisen“ gemeint ist und ein Schüler antwortet ihr daraufhin, dass es die „durchgezogenen Kreise“ sind.

Bei dieser Aufgabe haben sich die Schülerinnen und Schüler meiner Meinung nach insofern etwas schwergetan, weil sie teilweise den Zusammenhang zwischen Berg, Tal, Nulllage und maximaler und minimaler Auslenkung nicht herstellen konnten. Für diesen Punkt hätte eine Lösung mit den eingezeichneten Punkten und in der Folge auch mit den Linien konstruktiver und destruktiver Interferenz sicherlich geholfen. Diese könnte man mit dem Beamer projizieren. Dieser Wunsch wurde sowohl von der Lehrkraft als auch von einer Schülerin in den Interviews geäußert.

Die Lehrkraft zeigt nun nochmals die Simulation 4 der letzten Stunde, bei der eine Quelle Kreiswellen aussendet, diesmal mit zwei Quellen, denn vielleicht kann man da die Punkte „besser sehen“, als es die Schülerinnen und Schüler im Moment haben. Die „Quellen haben den falschen Abstand“. Die Lehrkraft versucht den Abstand der Quellen möglichst entsprechend dem in der Abbildung der Schülerinnen und Schüler einzustellen. Sie erwähnt, dass eine bessere Simulation gut wäre, bei der der Abstand besser eingestellt werden kann. Das Bild sieht zwar nicht genau wie die Abbildung der Schülerinnen und Schüler aus, aber sie zeigt, welche Linien den Linien in der Simulation entsprechen.

Die Lehrkraft setzt erst hier die Simulation ein, im Arbeitsblatt steht, dass sie beim ganzen Vergleich verwendet werden soll. Das wäre vermutlich etwas anschaulicher gewesen. Problematisch ist, dass die Quellen in der Simulation und auf dem Arbeitsblatt verschiedene Abstände haben, weil das das gemeinsame Besprechen und Vergleichen verkompliziert. Die bereits oben angesprochene Abbildung für den Beamer wäre hier die einfachere Lösung. Punkt D wurde in der Klasse noch nicht verglichen, obwohl das vor dem Bearbeiten des Punkts E vorgesehen gewesen wäre.

Die Schülerinnen und Schüler haben nun Zeit Punkt E des Arbeitsblatts zu behandeln. Es werden verschiedene Schnittpunkte der Abbildung betrachtet. Zum einen sollen Punkte, bei denen die Wasseroberfläche in Ruhe bleibt, genauer untersucht werden. Es soll erklärt werden, warum der Punkt nicht denselben Abstand zu den beiden Quellen haben kann, welchen Abstand er zu den beiden Quellen hat und wie groß die Differenz zwischen den Abständen ist. Der Gangunterschied wird eingeführt und die Schülerinnen und Schüler sollen versuchen eine Formel für die Bedingung für destruktive Interferenz aufzustellen. Zum anderen sollen die Lernenden Punkte mit maximaler Auslenkung betrachten und die Bedingung für konstruktive Interferenz mit einer Formel ausdrücken. Die Linien konstruktiver und destruktiver Interferenz sollen eingezeichnet werden und es wird diskutiert, wie sich die Wasseroberfläche entlang dieser Linien verhält. Die Lehrkraft wiederholt noch die wesentlichen Punkte, nämlich, dass die Abbildung A angeschaut werden soll, dass Punkte in Ruhe gesucht und deren Entfernung zu den Quellen studiert werden sollen. Insgesamt können die Schülerinnen und Schüler diesen Punkt dreizehn Minuten lang bearbeiten. Nach circa drei Minuten ermahnt sie die Lehrkraft, dass sie mehr über die Wellen diskutieren sollen. Sie geht durch und als sie sieht, dass jemand noch nichts ausgefüllt hat, fragt sie nach. Die Schülerin war letzte Stunde nicht da. Die Lehrkraft erklärt ihr die Abbildung nochmals, auch welche Linien dem Berg und dem Tal entsprechen und dass man hier ein momentanes Bild sieht. Eine andere Schülerin fragt, welchen Punkt sie auswählen soll, die Lehrkraft sagt ihr, dass sie das selbst entscheiden darf. Nach neun Minuten fragt ein Schüler, ob sie das Arbeitsblatt weitermachen sollen. Daraufhin sagt die Lehrkraft für die ganze Klasse, dass der Punkt E bis zum Ende des Arbeitsblattes geht. Die Lehrkraft gibt mir die Rückmeldung, dass die Klasse ganz gute Ergebnisse bringt und dass man beim Arbeitsblatt genau lesen muss.

Die Schülerinnen und Schüler haben größtenteils sehr konzentriert am Arbeitsblatt gearbeitet. Die Gruppen haben untereinander diskutiert und es gab auch Schülerinnen und Schüler, die anderen etwas erklärt haben.

Um halb zwei wird das Arbeitsblatt weiter verglichen. Für den Punkt D wird eine Schülerin (S2) aufgerufen und gefragt, was passiert, wenn man bei der Abbildung A, dem momentanen

Bild, „die Zeit laufen lässt“. Die Schülerin nimmt als Beispiel den Berg, dieser ist „im nächsten Zeitpunkt ein Tal“, dann wieder ein Berg, also ist die „Auslenkung maximal, minimal und wieder maximal“. Die Lehrkraft bestätigt das und gibt ein anschauliches Beispiel dazu. Ein „Korken, der auf einer Welle schwimmt, würde runter, rauf, runter, rauf gehen“. Was passiert aber, wenn ein Wellenberg auf ein Wellental trifft? Die Schülerin sagt, dass dort die Auslenkung immer 0 ist und das Wasser somit in Ruhe bleibt. Die Lehrkraft erklärt, dass die schwarzen Punkte „immer in Ruhe“ bleiben, die roten und grünen Punkte „wechseln sich ab und schwingen“, wenn sich die Welle ausbreitet.

Die Erklärung der Schülerin ist sehr anschaulich, was vielleicht auch damit zu tun hat, dass die Lehrkraft länger mit dieser Gruppe gesprochen hat. Allerdings wurde der Begriff der Auslenkung hier falsch verwendet. Die Auslenkung ist bei Berg und Tal maximal oberhalb oder unterhalb der Nulllage und nicht maximal und minimal. Diese Aussage fördert wiederum die Denkweise, dass das Minimum dem Schnittpunkt Tal auf Tal entspricht. Der Vergleich mit dem Korken trägt sicher zum Verständnis bei. Den Hinweis auf die zuvor markierten Punkte und die genaue Erklärung, welche sich wie bewegen, finde ich an dieser Stelle sehr gut. Man merkt an der Art des Umgangs mit den Materialien, dass sich die Lehrkraft hier schon eingearbeitet hat. Beim Interview hat die Lehrkraft angegeben, sich erst ab der dritten Stunde mit dem Material wirklich wohl gefühlt zu haben. Diesbezüglich ist mir beim Auftreten der Lehrkraft nichts aufgefallen, aber beim Umgang mit den Materialien und beim Erklären der Zusammenhänge habe ich doch Unterschiede bemerkt. Sie hat zum Beispiel nicht mehr so oft ins Skript geschaut. Allerdings hat sie den Punkt D erst nach der Klassendiskussion verglichen. Anderenfalls wären bei Punkt E vielleicht nicht so viele Fragen aufgekommen.

Bei Punkt E begründet ein Schüler die Frage, warum ein Punkt, an dem die Wasseroberfläche in Ruhe bleibt, nicht denselben Abstand zu beiden Quellen haben kann, wie folgt: „Weil die Quellen phasenverschoben sind“. Die Lehrkraft fragt nach, was phasenverschoben ist und der Schüler formuliert seine Antwort um und sagt, dass die „Quellen nicht den gleichen Ursprung“ haben. Auf die Frage, wer noch etwas anderes hat, sagt eine Schülerin (S3), dass der „Abstand ein geringerer als von Quelle zu Quelle ist“, wenn Wellenberg und Wellental sich treffen, wenn man das „abmisst“. Die Lehrkraft fragt noch nach, ob man das anders formulieren könnte. Ein Schüler sagt, dass es deshalb ist, weil die „Punkte in einer Waagrechten liegen“. Ein anderer Schüler fügt hinzu, dass die „Punkte immer denselben Abstand zu den Quellen“ haben und die Wellen „sich gleich schnell ausbreiten“ und dadurch immer nur Wellenberg und Wellental auf einander treffen.

Bei diesem Punkt war am Ende nicht ganz klar, wie die Antwort wirklich lautet, weil die Schülerinnen und Schüler sehr verschiedene Formulierungen gewählt haben. Hier hat mir

eine abschließende Zusammenfassung der Meldungen mit dem erwarteten Ergebnis gefehlt. Es fehlt mir hier die Erklärung, dass ein Punkt, an dem Berg auf Tal trifft, nicht gleich weit von den Quellen entfernt sein kann, weil die Quellen kohärent sind. Die Wellen haben deshalb die gleiche Phase, was bedeutet, dass beide Quellen am Beginn gleichzeitig entweder einen Berg oder ein Tal aussenden. Wenn die Wellen den gleichen Weg zurücklegen, treffen sie sich später immer mit gleicher Phase und verstärken sich. Nur wenn die Wellen in Gegenphase sind, können Berg und Tal zusammentreffen. Das kann nur der Fall sein, wenn der Punkt verschieden weit von den Quellen entfernt ist. Das braucht man als Basis, um später gut erklären zu können, warum eine konstruktive oder destruktive Interferenz auftritt. Das hat vor allem Probleme beim Arbeitsblatt 2 gemacht, da dieser Zusammenhang nicht verstanden worden ist.

Die Entfernung des Punkts zur linken Quelle wird von einem Schüler mit  $2,5$  benannt und der Abstand zur rechten Quelle beträgt  $4$ . Auf die Frage nach der Differenz dieser Abstände, rechnet der Schüler  $1,5$  aus. Die Lehrkraft fragt, ob jemand etwas anderes hat. In der Klasse hört man viele „ich“, „ich auch“. Die Lehrkraft sagt, dass das schon passt, da jeder einen anderen Punkt auswählen konnte. Sie wiederholt das Beispiel des ersten Schülers und fragt eine Schülerin nach ihren Zahlen. Die Schülerin (S1) hat die Abstände  $1\lambda, \frac{3\lambda}{2}$  und damit eine Differenz von  $\frac{1}{2}\lambda$ . Die Lehrkraft fragt nach weiteren Beispielen. Eine Schülerin gibt die Abstände  $\frac{1}{2}\lambda$  und  $2\lambda$  an, damit dann eine Differenz von  $1,5$ . Sie bemerkt, dass dieses Ergebnis schon genannt worden ist. Die Lehrkraft sagt, sie hat also auch dasselbe Ergebnis wie die erste Gruppe und nimmt einen Schüler (S4) für Punkt b) dran, wo verschiedene Punkte ausgewählt werden sollen, an denen die Wasseroberfläche in Ruhe bleibt und der Gangunterschied bestimmt werden soll. Dieser Schüler hat einen „Gangunterschied von  $0,5\lambda$ “ herausbekommen. Die Lehrkraft fragt nach einer Verallgemeinerung, um die Bedingung für destruktive Interferenz auszudrücken. Wie kann man das „in Gangunterschieden ausdrücken“? Es wurden speziell schon  $0,5\lambda$  und  $1,5\lambda$  erwähnt. Eine Schülerin (S1) hat mit Funktionen gearbeitet und die Formel  $f(\lambda) + e\left(\frac{\lambda}{2}\right) = 0$  aufgestellt. Diese Formel fasst sie in Worte und erklärt, dass die Funktionen „phasenverschoben um ein halbes“ sind. Die Lehrkraft sagt, dass es gut ist, dass sie mit Wellenfunktionen gearbeitet hat. „Der Gangunterschied ist sozusagen die Weglänge in Vielfachen von Lambda ausgedrückt und ihre Differenz“. Dann sollen die Schülerinnen und Schüler aufzählen, „welche Differenzen hier auftreten können, wenn die Wasseroberfläche in Ruhe bleibt“. Als Antworten kommen von einem Schüler  $0,5\lambda$  und  $1,5\lambda$ . Die Frage, ob es noch mehr Möglichkeiten gibt, verneint der Schüler. Die Lehrkraft fragt, was passiert, „wenn man weiter weg geht“. Eine Schülerin gibt als Antwort, das  $0,5$  fache. Die Lehrkraft sagt darauf „jein“, es

seien Abstände von 0,5 oder 1,5 oder 2,5 und so weiter. „Also immer ein ganzes Lambda und ein halbes dazu, nicht die Vielfachen von 0,5, denn die geraden Vielfachen fallen raus“. Daher blieben nur die ungeraden Vielfachen von  $\frac{\lambda}{2}$  über, also so, dass „immer ein halbes Lambda überbleibt“. Sie geht zum Whiteboard und erarbeitet mit den Schülern und Schülerinnen die Formel für die Bedingung für destruktive Interferenz. Sie erklärt, dass eine gerade Zahl mit  $2n$  dargestellt wird, wobei  $n$  aus den natürlichen Zahlen ist, also 1,2,3,4. So eine Zahl sei immer gerade, immer ungerade sei die Zahl, wenn man zu  $2n$  eins dazuzähle, also seien die ungeraden Vielfachen von  $\frac{\lambda}{2}$  somit  $(2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ . Sie fragt dann nach der Argumentation für die Punkte, bei denen die Auslenkung maximal ist, also konstruktive Interferenz herrscht, egal ob Berg oder Tal. Der Gangunterschied ist die „Differenz der Weglängen“. Der Schüler, der gefragt wird, hat keine Antwort darauf, eine Schülerin schlägt vor, dass „alle geraden Vielfachen von Lambda“ gesucht sind. Auf Nachfragen zählt sie als Möglichkeiten 1,2,3,4 auf. Die Lehrkraft sagt, dass das nicht die geraden Vielfachen sind, „sondern schlicht und einfach die Vielfachen von Lambda“. Sie wiederholt nochmals die Bedingung für die destruktive Interferenz und schreibt den Begriff zur entsprechenden Formel auf das Whiteboard. Für die konstruktive Interferenz schreibt sie  $n \cdot \lambda$  auf das Whiteboard und gibt mündlich die Beispiele  $1\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  und  $4\lambda$ .

Diese Punkte wurden meiner Meinung nach sehr gut durchbesprochen, da viele Beispiele von verschiedenen Lernenden gesammelt wurden und auch klar gemacht wurde, dass es auf die gewählten Punkte ankommt. Die Erarbeitung der Formeln für die Bedingungen der destruktiven und konstruktiven Interferenz erfolgte Schritt für Schritt und alles wurde auch am Whiteboard festgehalten. Obwohl die Vorschläge der Schülerinnen und Schüler nicht ganz genau waren, wurden sie nicht gleich zurückgewiesen, sondern durch das Aufzählen von Beispielen konnten sie selbst herausfinden, wie sie ihr Gesagtes umformulieren müssen. Dieses Aufzählen der Beispiele wird auch im Skript angeregt. Die Formel der Schülerin ist sehr gut und zeigt, dass sie sich wirklich auskennt, sie konnte sie auch sehr gut in Worte fassen und begründen, warum sie das gemacht hat. Die verschiedenen Definitionen des Gangunterschieds waren ziemlich kompliziert. Eine einfachere Definition wäre: der Gangunterschied ist ein ganzzahliges Vielfaches oder ein ungerades halbzahliges Vielfaches der Wellenlänge.

Für den letzten Punkt auf dem Arbeitsblatt müssen sich die Schülerinnen und Schüler die Abbildung A nochmals anschauen. Linien sollen eingezeichnet werden, dafür müssen sie einerseits die Punkte konstruktiver und andererseits die Punkte destruktiver Interferenz verbinden. Wo bleibt die Wasseroberfläche in Ruhe, wo „schaukeln“ sich die Wellen auf? Die Lehrkraft zeigt die Simulation, erwähnt, dass es in der Simulation nicht genauso wie bei den

Schülern und Schülerinnen aussieht, weil der „Abstand der Wellenquellen nicht stimmt“, aber es sieht ähnlich aus. Die Punkte destruktiver Interferenz liegen hier „auf einer Linie“ und bei den Lernenden auf einer „waagrechten Linie“. „Die Punkte konstruktiver Interferenz kann man auch durch Linien verbinden.“ Die Lehrkraft zeigt, welche Linien das in der Simulation sind. Die Schülerinnen und Schüler schreiben und zeichnen.

Hier werden im Unterschied zur Anweisung auf dem Arbeitsblatt nur die Linien eingezeichnet ohne nochmals zu erklären, wie die Wasserbewegung entlang dieser Linien verläuft. Es wird zwar gefragt, wo das Wasser in Ruhe bleibt oder es sich aufschaukelt, aber es wird nicht genug auf die ganzen Linien eingegangen. Es wäre sehr wichtig gewesen, den Aspekt, dass das Wasser entlang der ganzen Linien in Ruhe bleibt beziehungsweise sich bewegt, zu betonen. Dadurch wird vielleicht die statische Vorstellung verstärkt, denn es wird nicht noch einmal darauf eingegangen, dass die Abbildung nur eine Momentaufnahme zeigt. Entlang der Linien ist überall konstruktive oder destruktive Interferenz, nicht nur dort, wo sich die Halbkreise schneiden. Dadurch, dass einige Schülerinnen und Schüler schon die Linien eingezeichnet haben oder noch etwas anderes gemacht haben, haben nicht alle zur Simulation geschaut und deshalb nicht gesehen, welche Linien die Lehrkraft erwähnt hat. Das kann an dem Zeitdruck liegen, aber hier wäre etwas Wartezeit gut gewesen, sodass auch wirklich alle zuhören und zusehen können.

Jetzt bekommen die Schülerinnen und Schüler noch das Arbeitsblatt 2, um ihr „eben erworbenes Wissen“ anzuwenden. Es bleiben noch fünf Minuten bis zum Läuten. Zwei Minuten vor Ende der Stunde sagt die Lehrkraft, dass die Schülerinnen und Schüler diese Minuten noch nutzen sollen und das Arbeitsblatt bis morgen fertig machen sollen. Als Bonus bekommen die, die es erledigt haben, eine gute Mitarbeit eingetragen. Es wird nachgefragt, was die Quellen sind. Die Lehrkraft hält fest, dass die „zwei kleinen Punkterln“ die Quellen sind. In einer Aufgabe haben sie einen Abstand von  $2\lambda$  und in der anderen einen Abstand von  $\frac{3}{2}\lambda$ . Ein Schüler sagt „Ah“. Die Lehrkraft fasst noch einmal zusammen, dass herausgefunden werden soll, ob in den Punkten A und B konstruktive oder destruktive Interferenz ist.

Das Arbeitsblatt 2 ging sich leider nicht mehr aus, aber die Schülerinnen und Schüler konnten zumindest schon damit beginnen. Damit ist die Stunde, die ursprünglich als eine geplant war, nach zwei Stunden fast fertig. Die Quellen auf dem Arbeitsblatt 2 sollten vielleicht wieder mit 1 und 2 beschriftet werden, um klar ersichtlich zu machen, wo die Quellen sind. Der Verweis auf das Arbeitsblatt hat im Lehrpersonenskript leider gefehlt, das muss noch eingefügt werden.

### 3.3. Dritte Stunde

Die dritte Stunde fand am Freitag, den 05.04.2019 in der ersten Stunde von 8:00-8:50 Uhr statt. Es waren insgesamt neunzehn Schülerinnen und Schüler anwesend, davon neun Mädchen und zehn Burschen.

Am Beginn der Stunde kontrolliert die Lehrkraft, wer die Aufgabe für heute, also das zweite Arbeitsblatt der letzten Stunde, gemacht hat und schreibt es sich auf. Viele haben es gemacht. Bei dem Arbeitsblatt 2 musste man für zwei Punkte die Art der Interferenz bestimmen. Der Abstand zwischen den Quellen und der Abstand einer Quelle zum horizontal dazu verschobenen Punkt A waren gegeben.

Hier fehlt mir das Vergleichen des Arbeitsblatts in der Klasse. Ich kann mir nicht vorstellen, dass es alle richtig haben. Außerdem haben einzelne Schülerinnen und Schüler die Hausübung nicht gemacht und so bleibt ihr Arbeitsblatt unausgefüllt. Gerade diese Aufgabe war sehr schwierig und gibt Aufschluss über den Grad des Verständnisses, vor allem, wenn man die Interferenz in Punkt B bestimmen soll, der gleich weit von beiden Quellen entfernt ist. Diese Aufgabe ist nicht durch Berechnen, sondern durch Überlegen zu lösen. Das wäre auch ein guter Anknüpfungspunkt gewesen, die Zusammenhänge am Anfang der Stunde zu wiederholen. Vor allem den Zusammenhang zwischen Entfernung, Phase und Gangunterschied kann man mithilfe des Arbeitsblattes noch einmal gemeinsam durchdenken.

Bei den Interviews ist mir nämlich aufgefallen, dass der Begriff des Gangunterschieds noch nicht ganz klar war und deshalb habe ich die Lehrkraft gebeten, den Begriff am Anfang der Stunde noch einmal zu wiederholen.

Die Lehrkraft wiederholt den Begriff des Gangunterschieds und macht dazu eine Skizze an der Tafel. Es gibt zwei Quellen und zu einem beliebigen Punkt zeichnet sie die Verbindungslinien ein und unterteilt sie in Wellenlängen. Man muss hier die Strecken abmessen, die Strecke kann man in Zentimeter, in Millimeter oder auch in Vielfachen von Wellenlängen ausdrücken. In ihrem Beispiel ist die eine Strecke  $8\lambda$ . Die zweite Strecke beträgt  $7\lambda$ . Die Frage nach dem Gangunterschied beantwortet ein Schüler mit einem Lambda. Die Lehrkraft schreibt auch die Rechnung dazu auf die Tafel  $8\lambda - 7\lambda = 1\lambda$ . Sie erklärt nochmals, dass man „geometrisch die Längen der Verbindungslinien“ anschaut und sich die Differenz der Längen in Vielfachen von Lambda berechnet. Somit ist Lambda so etwas wie eine andere Maßeinheit.

Die Tatsache, dass die Schülerinnen und Schüler die Berechnung aufgeschrieben sehen, finde ich gut. Die Einführung von Lambda als Maßeinheit war sicher auch hilfreich.

Die Schülerinnen und Schüler bekommen nun die Abbildung einer Quelle, von der Wellenfronten ausgehen, einmal auf Papier und einmal auf einer Folie. Die Lehrkraft erklärt, dass die konzentrischen Kreise die Wellenfronten von zwei kohärenten Quellen darstellen sollen. Die Quellen seien in Phase und am gleichen Ort. Sie sollten die Knotenlinien untersuchen und sich anschauen, was passiert, wenn sie die beiden Bilder langsam auseinanderziehen. Die Lehrkraft teilt die Schülerinnen und Schüler in Gruppen ein und teilt die Materialien aus. Nach circa zwei Minuten sagt die Lehrkraft, dass ein Schüler die Folie nicht drehen, sondern die Bilder auseinanderschieben soll. Man soll „beschreiben, wie der Abstand der beiden Quellen die Anzahl der Knotenlinien beeinflusst“. Eine Schülerin fragt nach, was Knotenlinien sind. Die Lehrkraft sagt, dass sie das gestern erst gemacht haben, das seien die Punkte, die verbunden wurden und zwar die Punkte, die an den Stellen, an denen sich die Kreise kreuzen, eingezeichnet worden waren. Nach weiteren eineinhalb Minuten fragt die Lehrkraft beim Durchgehen, was die Schülerinnen und Schüler herausbekommen haben. Dann sagt sie laut, dass es schon die meisten haben und wiederholt noch einmal die Fragestellung. Eine Schülerin bemerkt, dass sich die Punkte verschieben und auf die Frage, was für einen Einfluss das auf die Knotenlinien hat, sagt sie, je größer der Abstand ist, desto mehr Knotenlinien gibt es. Die Lehrkraft wiederholt dieses Erkenntnis.

Im Unterrichtskonzept bildet diese Aufgabe den Abschluss der ersten Unterrichtseinheit. Bei diesem Lernschritt kann einem sehr Vieles bezüglich der Knotenlinien klar werden, da man durch die Folie ein sehr gutes Bild von ihnen hat. Ich bin mir nicht sicher, ob sich wirklich alle Schülerinnen und Schüler diese Linien gut angesehen haben. Ich habe in der Klasse nicht so viele Gesichter gesehen, die ein „Aha- Erlebnis“ hatten. Entweder war es für sie schon vorher klar oder sie haben es nicht gesehen. Der Schüler, der die Folie gedreht hat, anstatt die Bilder auseinanderzuziehen, hat nach der Ermahnung der Lehrkraft das richtige gemacht, aber nicht sehr interessiert gewirkt, obwohl er sich sonst immer häufig meldet. Man hätte vielleicht noch mehr auf das, was die Schülerinnen und Schüler sehen können, eingehen sollen, damit sich dieses Bild für die Zukunft einprägt.

Nach dem Vergleich der Gruppenarbeit wurde auf die Eingangsfrage, welches Modell sich nun für Licht besser eignet, das Teilchenmodell von Newton oder das Wellenmodell von Huygens, eingegangen. Die Lehrkraft fragt, ob es einen Vorschlag gibt oder auf welcher Basis man entscheiden könnte, welches Modell besser passt. Die Klasse bleibt still, dann zeigt eine Schülerin auf (S1). Wenn sich zwei Lichtstrahlen kreuzen, würden die Teilchen nach Newtons Modell voneinander abprallen, „aber das tut Licht nicht, es geht unverändert weiter“. Deswegen würde die Schülerin das Wellenmodell für Licht bevorzugen. Die Lehrkraft schlägt vor zu schauen, ob sich Lichtstrahlen durchdringen und somit Superposition zeigen.

Eine andere Möglichkeit wäre es noch zu schauen, ob Licht Interferenz zeigt, da die Schülerinnen und Schüler die Interferenz als typisches Wellenphänomen kennengelernt haben. Die Klasse wird verdunkelt. Die Lehrkraft schaltet eine Taschenlampe ein und borgt sich als zweite Lichtquelle die Handytaschenlampe eines Schülers aus. Sie zeigt das Experiment auf dem Boden im Gang zwischen den Sitzreihen. Ein paar Schülerinnen und Schüler stehen auf, um das Experiment sehen zu können. Die Lehrkraft hält beide Lichtquellen auf den Boden gerichtet und dreht dann eine Lichtquelle weg. Sie erklärt dabei, dass die Lichtquelle genauso erhalten bleibt und die Existenz der einen Lichtquelle nichts an dem Lichtkegel, den die andere Quelle wirft, ändert. Das ist das Experiment, das die Schülerin vorher vorgeschlagen hat. Da sich die Lichtquellenstrahlen überlappen, ohne einander zu beeinflussen, zeigt das Licht hier Teilchencharakter.

Die Unterrichtssituation war hier etwas schwierig, da nach der gestellten Frage in der Klasse komplette Stille herrschte und nicht einmal ein Geflüster zu hören war. Entweder war die Fragestellung nicht klar genug formuliert, niemand hatte eine Idee oder die Zeit zum Nachdenken war zu kurz. Die Schülerin, die sich dann gemeldet hat, ist eine Schülerin, die im Unterricht sehr gut mitkommt und auch schon weiterführende Ideen, wie die Wellenfunktionen in der vorigen Stunde, geäußert hatte. Die Lehrkraft hat die Antwort, die im Skript formuliert ist, dann selbst gegeben. Allerdings glaube ich auf Grund des allgemeinen Schweigens nicht, dass der Vorschlag von der Klasse noch gekommen wäre. Der Schluss, den die Lehrkraft aus dem Experiment mit den Taschenlampen gezogen hat, entspricht meiner Meinung nach aber nicht ganz dem, was die Schülerin vorgeschlagen hat. Weil sich die Taschenlampenstrahlen nicht beeinflussen und somit nicht aneinanderprallen, sondern unverändert weitergehen, spricht das laut Aussage der Schülerin für die Welle. Da das Experiment mit einer Taschenlampe und einer Handytaschenlampe gemacht wurde, konnte man die zweite Lichtquelle des Handys nicht so gut sehen. Das Problem war, dass die zweite Taschenlampe einen sehr schlecht fokussierten Strahl hatte, aber die Lehrkraft hat schnell reagiert und sich eine Handylampe ausgeborgt. Das Gesetz der geometrischen Optik, wonach sich die sich überlappenden Lichtkegel unabhängig voneinander ausbreiten, wurde nicht als solches betitelt, wie es im Skript angegeben ist. Der Sinn dahinter wurde schon erklärt.

Der Physiker Young hat 1801 ein Experiment durchgeführt. Die Schülerinnen und Schüler sollen herauskommen, um das Experiment besser zu sehen. Die Lehrkraft erklärt die Komponenten des Aufbaus. Die Lichtquelle ist ein Laser und er fällt auf einen Schirm. Was sehen die Schülerinnen und Schüler? Eine Schülerin antwortet, dass sie einen Punkt sieht. Die Lehrkraft bestätigt das, man sieht einen Lichtpunkt. Was sieht man aber auf dem Schirm, wenn man das Laserlicht auf zwei Spalte richtet, an denen dann quasi „jeweils eine

punktförmige Lichtquelle entsteht“? Sie zeigt das Experiment her und möchte, dass die Schülerinnen und Schüler genau beschreiben, was sie sehen. Manche kommen näher und schauen, die Lehrkraft fordert immer wieder alle auf genauer zu schauen und näher zu kommen. Eine Schülerin sieht drei Striche, eine andere sieht, dass diese unterteilt sind und wieder eine andere Schülerin, dass die Linien innerhalb strichliert sind. Die Lehrkraft fragt, ob das bei jedem Strich der Fall ist. Die Schülerinnen und Schüler sollen beschreiben, wie der mittlere Strich aussieht. Daraufhin kommt als allgemeines Gemurmel aus der Klasse: heller, dicker. Die Lehrkraft fragt nach, wo überhaupt der mittlere Strich ist. Eine Schülerin zeigt den Strich am Schirm. Ein Schüler beschreibt, dass der mittlere Strich unterteilt ist. Die Lehrkraft sagt, der Strich ist unterteilt und dass es ein Hell-Dunkel-Muster gibt, aber nur beim mittleren Strich. Rechts und links sieht man einen anderen Effekt, den sie erst später besprechen werden. Worauf kann das Muster zurückgeführt werden? Eine Schülerin (S1) fragt, ob das auf die Interferenz zurückzuführen ist. Die Lehrkraft meint eventuell und sagt, dass sie nun gesehen haben, dass Licht interferiert und bittet die Schülerinnen und Schüler Platz zu nehmen.

Dieses Experiment ist eine der Schlüsselstellen der Unterrichtssequenz. Für dieses Experiment hat sich die Lehrkraft leider nur etwas mehr als vier Minuten genommen. Die Bedeutung dieses Experiments hätte mehr hervorgehoben werden können und ich glaube nicht, dass wirklich alle Schülerinnen und Schüler das Interferenzmuster am Schirm gesehen haben, weil sie zu weit weg gestanden sind und das Muster zu kurz hergezeigt wurde. In der letzten Stunde können sie zwar selbst in Gruppenarbeiten dieses Muster genau betrachten, aber es wäre meiner Meinung nach für das Aha-Erlebnis sehr wichtig, dass alle Lernenden das Muster sehen, im Kopf behalten und mit der Interferenz in Verbindung bringen. Leider hat die Lehrkraft vor dem zweiten Experiment mit dem Doppelspalt nicht gefragt, was die Schülerinnen und Schüler glauben, was man auf dem Schirm sehen wird. Sie hat die Vermutungen der Schülerinnen und Schüler nicht gesammelt oder sie auch nur nachdenken lassen, was der Unterschied zwischen dem ersten Experiment, bei dem das Laserlicht direkt auf den Schirm gerichtet wird und dem zweiten Experiment, bei dem das Laserlicht durch den Doppelspalt geht, ist. Das ist sehr schade, da diese Vermutungen besonders interessant gewesen wären, da die Schülerinnen und Schüler meistens erwarten, dass zwei Lichtpunkte am Schirm erscheinen. Im Nachhinein kann das leider auch nicht mehr erfragt werden und ich konnte leider nicht intervenieren, da alles so schnell gegangen ist. Es wurde auch nicht besprochen, wie das Muster aussehen müsste, wenn es Interferenz gibt und wie, wenn das nicht der Fall wäre. Wenn sich die Schülerinnen und Schüler das Muster nacheinander angesehen hätten, wäre es effizienter gewesen. Denn die Antworten der Schülerinnen und Schüler haben eigentlich zu nichts geführt und die Lehrkraft musste dann selbst den Begriff des Hell-Dunkel-Musters einführen. Der Laser wurde meiner Meinung nach dann zu schnell

abgedreht und das Experiment beendet. Der Frage, ob das Muster auf Interferenz zurückzuführen ist, wird zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Sie wird nicht diskutiert. Vielmehr spricht die Lehrperson im nächsten Satz schon vom Interferenzmuster.

Die Schülerinnen und Schüler sollen sich nun das Experiment im Heft notieren. Wenn Laserlicht auf einen Schirm fällt, dann sieht man einen Punkt und wenn es auf zwei Spalte trifft, sieht man am Schirm ein Hell-Dunkel-Muster. Dieses soll auch skizziert werden. Eine Schülerin (S2) fragt nach, was das für eine Spalte oder für ein Plättchen war. Die Lehrkraft zeigt das Dia her und erklärt, dass bei den schwarzen Flächen des Dias kein Licht durchkommt und bei den zwei Linien, den zwei Spalten, kann das Licht durchgehen. Sie gibt das Dia durch, damit es sich die Schülerinnen und Schüler ansehen können. Es wird zum Interferenzmuster zurückgegangen. Was können die Schülerinnen und Schüler „über die Entfernung der Hell-Dunkel-Linien sagen“? Eine Schülerin (S2) sagt, dass sie im gleichen Abstand sind. Die Lehrkraft fragt noch ein paar Schülerinnen und Schüler, ob sie das auch gesehen haben. Die Frage wurde eigentlich schon von der einen Schülerin beantwortet, aber die Lehrperson ist sich nicht sicher, ob es alle mitbekommen haben. Eine Schülerin sagt, sie müssen gleichmäßige Abstände haben. Die Lehrkraft bestätigt das und sagt, die Linien sind im gleichen Abstand, macht eine Skizze an der Tafel und benennt das im Folgenden als Interferenzbild. Die Lehrkraft erklärt, dass man von zwei Spalten oder von Doppelspalt reden kann.

Die Idee den Lernenden das Dia zu erklären, weil es sie interessiert hat, ist sehr gut und auch, dass es durchgegeben wird und es sich alle anschauen können. Da können sie sich sicher mehr darunter vorstellen, als wenn sie nur den Begriff Doppelspalt hören. Die Skizze des Interferenzmusters an der Tafel kommt meiner Meinung nach etwas spät, da vielleicht schon manche eine falsche Skizze ins Heft gemacht haben und diese wieder ausbessern müssen. Die Erwähnung, dass Doppelspalt und zwei Spalte dasselbe ist, finde ich sehr gut und wichtig.

Es stellt sich die Frage, wie das Interferenzbild entsteht und was es mit der Darstellung der Wasserwellen zu tun hat. Dafür gibt es ein drittes Arbeitsblatt und eine vergrößerte Abbildung mit zwei kohärenten Quellen und den Wellenfronten, die sie aussenden. Die Schlitze sieht man da „nicht sehr gut“ und sie werden deshalb von der Lehrkraft hergezeigt. Die Schlitze sind die Doppelspalte, an denen die Wellen entstehen. Die Schülerinnen und Schüler sollen sich das wie einen „Schnitt durchs Dia“ vorstellen. Es ist eine „schwarze Linie, die durch zwei durchlässige Punkte unterbrochen“ wird. Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten die erste Seite des Arbeitsblattes 3. Es soll zuerst eine Skizze von Wasserwellen, die durch einen Doppelspalt gehen, gezeichnet werden. Dann werden auf der vergrößerten Abbildung in schwarzer Farbe die Linien destruktiver Interferenz und in roter Farbe die Linien

konstruktiver Interferenz eingezeichnet. Es gibt eine Linie  $p$  als Analogon zum Schirm im Laserexperiment. Auf dieser Linie  $p$  sollen die Schnittpunkte mit den Linien destruktiver und konstruktiver Interferenz markiert werden und die jeweiligen Gangunterschiede bestimmt werden. Dann sollen diese nach konstruktiver und destruktiver Interferenz geordnet werden und allgemeine Formeln für die Bedingungen aufgestellt werden. Die meisten Schülerinnen und Schüler arbeiten konzentriert, einige lesen es in der Gruppe vor. Nach fünfzehn Minuten sagt die Lehrkraft, dass die Skizze der Kreiswellen nicht so genau sein muss und dass sie dann auf der vergrößerten Abbildung arbeiten sollen. Eine Minute später fragt die Lehrkraft eine Gruppe, warum sie noch immer keine Knotenpunkte eingezeichnet hat und fordert sie auf sich zu beeilen. Während der Gruppenarbeit ist es in der Klasse abwechselnd lauter und dann wieder leise. Die Lehrkraft geht durch und sagt, dass manche schon die Linien verbinden können, weil sie ja wissen, dass die Punkte auf einer Linie liegen. Das wiederholt sie einige Male, auch, dass rot und schwarz verwendet werden soll. Alle werden aufgefordert mitzuarbeiten. Ein Schüler fragt, wie zwei gleichzeitig an der vergrößerten Abbildung arbeiten sollen. Eine Schülerin (S1) zählt in der vergrößerten Abbildung 1,2,3 und 1,2,3,4,5,6,6  $\frac{1}{2}$  und sagt, man muss die abziehen, zeigt auf die Abbildung und sagt, das minus dem zweiten, kommt dann drauf, dass das Ergebnis negativ wird und sagt, dass sie in umgekehrter Richtung rechnen müssen, weil sie sonst ein negatives Lambda haben. Die Gruppe zählt weiter. Elf Minuten, nachdem die Schülerinnen und Schüler begonnen haben, das Arbeitsblatt zu bearbeiten, erklärt die Lehrkraft einer Gruppe, dass Berg und Berg, aber auch Tal auf Tal konstruktive Interferenz ist. Sie zeigt der Gruppe die Linien destruktiver Interferenz und konstruktiver Interferenz. Berg und Tal ist die destruktive Interferenz. Die Schnittpunkte gleicher Kreise seien konstruktive und die verschiedener Kreise seien destruktive Interferenz. Dann sagt sie anderen, dass sie nicht gut gelesen haben. Außerdem sollen sie nur eine einzige Linie einzeichnen, sonst werden sie da nicht fertig. In der nächsten Gruppe erwähnt sie wieder, dass da steht, dass Linien einzuzichnen sind, die Punkte sind zu viel Arbeit. Warum sind noch keine roten und schwarzen Linien eingezeichnet? Das Arbeitsblatt kann man sonst in zehn Minuten machen und jetzt haben sie bisher schon zehn Minuten dafür gebraucht. Einige zählen und berechnen den Gangunterschied, nummerieren sich die Punkte zum Beispiel den Punkt 7. Die Lehrkraft erklärt noch einer Gruppe, dass die destruktive Interferenz die Auslöschung ist, also Berg und Tal und dass bei der konstruktiven die Linien einzuzichnen sind und nicht die Punkte. Nachdem die Schülerinnen und Schüler fünfzehn Minuten an dem Arbeitsblatt gearbeitet haben, richtet sich die Lehrkraft an alle und sagt, dass sie klarstellen möchte, was schon in den Aufgaben gestern gelernt wurde. Sowohl das Aufeinandertreffen von Berg und Berg als auch das von Tal und Tal ist konstruktive Interferenz. Gestern hatte die Klasse ein „statisches Bild“ und sie haben gehört, dass die Wellen auseinander laufen. Gestern hatten

sie die „Punkterl am Anfang“ und am Ende haben sie gelernt, dass die Punkte nach außen laufen und damit Linien werden. Deswegen ist es „nicht einsichtig“, warum die Schülerinnen und Schüler „mit dem Einzeichnen von Punkterln begonnen haben“. Sie haben nur ein momentanes Bild und die Wellen gehen nach außen, daher kann man sich die Linien schnell einzeichnen. Eine Schülerin fragt ihre Mitschülerinnen, ob sie von den Quellen ausgehen müssen. Die Lehrkraft geht weiter durch und sagt, dass es reicht von einer schwarzen Linie und von einer roten Linie den Gangunterschied zu bestimmen. Eine Schülerin fragt die Lehrkraft, ob die ja nicht auch von beiden Quellen weggehen. Die Lehrkraft verneint das und erklärt, dass das ein Punkt konstruktiver Interferenz ist, für den der Gangunterschied zur Quelle bestimmt werden soll. Die Schülerin sagt, ach so nicht auf der Linie? „Nein, nicht auf der Linie, der Gangunterschied ist der Abstand zur Quelle, also der unterschiedliche Abstand zur Quelle“. Die Schülerin gibt ein überraschtes „Oh“ von sich. Eine Gruppe zählt gemeinsam von eins bis sieben und eine Schülerin fragt die anderen, ob man da auch so springen kann. Sie kommen auf den Abstand  $1/2$ . Die Lehrkraft sagt, sie sollen sich einen Punkt konstruktiver Interferenz markieren und dann die beiden Abstände zur Quelle anschauen.

Die optionale Simulation wurde an der Stelle nicht hergezeigt. Das an sich war meiner Meinung nach kein Problem. Das Huygens'sche Prinzip wurde in dem Zusammenhang nicht erwähnt, denn das wäre laut der Lehrkraft ein Problem gewesen, weil sie das Huygens'sche Prinzip im Unterricht noch nicht besprochen haben. Sie dachte, dass es in diesem Unterrichtskonzept vorkommt. Die Gruppenarbeit an diesem Arbeitsblatt brachte einiges an Problemen mit sich. Viele Schülerinnen und Schüler haben zu genau skizziert. An der vergrößerten Abbildung haben die Gruppen unterschiedlich gut zusammengearbeitet. Eine Gruppe hatte aber anscheinend ziemliche Schwierigkeiten damit, da ein Schüler gefragt hat, wie man auch nur zu zweit daran arbeiten soll. Im Allgemeinen fände ich es sehr gut, wenn am Ende jede und jeder eine vergrößerte Abbildung hat, um sie zu den restlichen Aufzeichnungen zu geben und damit jede und jeder das vollständige Material hat. An den vielen Nachfragen merkt man, dass einigen der Begriff des Gangunterschieds oder zumindest die Berechnung davon noch nicht ganz klar ist und dass auch die Begriffe der konstruktiven und destruktiven Interferenz noch nicht richtig im Gedächtnis verankert sind. Die destruktive Interferenz wird manchmal immer noch dem Kreuzungspunkt Tal auf Tal zugeordnet. Die Linien wurden von vielen nicht gleich eingezeichnet, sondern zuerst wieder die Punkte. Das wäre an und für sich kein Problem, da sie wissen, was sie bei dieser Aufgabe machen sollen und sie mit dieser Methode genauso ans Ziel kommen, nur etwas langsamer. Wegen des großen Zeitdrucks wurde allerdings darauf gedrängt, dass dieser Zwischenschritt ausgelassen wird. Eine Schülerin möchte den Gangunterschied entlang der Knotenlinie bestimmen. Dieses Problem kann vielleicht durch das Nichtbesprechen des Arbeitsblattes 2 vergrößert worden sein. Der Spezialfall des Punktes A, der horizontal zu den

Quellen liegt, könnte hier zu Verwirrungen geführt haben. Vielleicht würde es auch zum besseren Verständnis beitragen, wenn man zwischen den Bezeichnungen Linie und Knotenlinie klar unterscheidet. Die Knotenlinie verbindet die Knotenpunkte, die mit den Wellenfronten entlang dieser „weiterlaufen“. Problematisch ist die Anweisung der Lehrkraft nur eine Linie konstruktiver und destruktiver Interferenz einzuzichnen. Es gibt dann zu wenige Punkte auf der Linie  $p$ , was es erschwert, die Analogie zum Interferenzbild des Lichts auf dem Schirm zu erkennen.

Um mir eine Schwierigkeit bei dem Arbeitsblatt zu verdeutlichen, nämlich dass die Schülerinnen und Schüler entlang der Linie der konstruktiven beziehungsweise destruktiven Interferenz den Gangunterschied berechnen, sind die Lehrkraft und ich zu einer Gruppe von Schülern gegangen und die Lehrkraft hat mit ihnen einige Punkte besprochen.

Die Lehrkraft zeigt auf einen Punkt konstruktiver Interferenz und fragt: „Was für ein Punkt ist das hier auf der Linie  $p$ “? Der Schüler antwortet, dass hier zwei Berge sind, also konstruktive. Die Lehrkraft bestätigt, dass es ein Punkt konstruktiver Interferenz ist und erklärt, dass es an einem anderen Punkt genauso ist, weil die Wellen weiterlaufen. Wie kann man dann für die konstruktive und destruktive Interferenz den Gangunterschied bestimmen? Der andere Schüler sagt, dass man zählt, wie viele Wellenlängen es sind. Die Lehrkraft sagt, dass das nicht so ist, man muss „zuerst die Verbindungslinie zur einen und zur anderen Quelle“ einzeichnen und dann „diese Längen vergleichen“. Der Schüler sagt, dass man das dann einfach nur abmessen muss und die Lehrkraft sagt, nein, nicht die Länge von der Linie. Der andere Schüler sagt, dass sie das nicht tun, sondern sie nur die Schichten „drüberzählen“ wollen. Die Lehrkraft sagt, dass sie zuerst die Linie einzeichnen müssen, an der sie messen wollen. Der Schüler antwortet, dass sie das aber doch auch so abzählen können, bis sie bei dem Punkt sind. Der andere Schüler sagt zu ihm, dass das auch so geht, aber dass sie es anders gemacht haben und eigentlich eh so, nur ohne die Linien einzuzichnen. Die Lehrkraft sagt darauf Ok, „natürlich kann man auch so zählen“. Der Schüler fragt, ob sie auch einen Punkt nehmen sollen, der nicht ganz auf der Linie  $p$  liegt. Die Lehrkraft fragt nach, ob das einen Unterschied macht. Der Schüler erklärt, dass sie Punkte auf der  $p$ -Linie nehmen sollen also gehört dieser nicht dazu. Die Lehrkraft sagt, dass der Punkt natürlich dazugehört, weil das nur ein momentanes Bild ist und die Wellen ja auslaufen und „ein paar Sekundenbruchteile später dieser Knotenpunkt dorthin gewandert“ ist. „Deswegen hat man ja Linien gemacht“. Daraufhin sagt der Schüler nur Ok. Die Lehrkraft sagt zu mir, dass sie oft die Länge der Linien und nicht den Abstand zur Quelle bestimmt haben.

An diesem Beispiel sieht man, dass diese zwei Schüler einerseits schon verstanden haben, was sie machen, aber andererseits nicht erkannt haben, dass auch die Punkte, die nicht

ganz auf der p-Linie liegen, dazugehören. Meiner Meinung nach haben die Schüler nach dem Gespräch noch verwirrter gewirkt. Am Anfang waren sie noch sicher in ihren Berechnungen und dann wurden die Antworten immer zaghafter und fragender. Ihre Art den Gangunterschied zu berechnen war richtig, aber nicht ganz so, wie es sich die Lehrkraft vorgestellt hat. Sie hätten die Linien zu den zwei Quellen einzeichnen und abmessen sollen. Aber sie haben die Wellenlängen zu den zwei Quellen abgezählt, ohne die Linie, entlang der sie gezählt haben, einzuzeichnen. Meiner Meinung nach ist das genauso gut, wie wenn sie die Linien abmessen. Ich sehe hier das Problem nicht. Etwas anderes ist es, dass nicht erkannt wurde, dass nicht nur dann Interferenz vorliegt, wenn der Knotenpunkt genau auf der Linie p liegt, sondern sich die Welle weiterbewegt und es deshalb an all den Punkten, wo die Linien konstruktiver beziehungsweise destruktiver Interferenz die Linie p schneiden, Interferenz gibt und der Gangunterschied entlang dieser Linien immer derselbe ist.

Ungefähr einundzwanzig Minuten nachdem die Gruppenarbeit begonnen hat, fängt die Lehrkraft zu vergleichen an. Zuerst fragt sie die Klasse noch, warum nicht Punkte, sondern Linien eingezeichnet werden. Eine Schülerin erklärt, dass man die Punkte schon auf den Linien hat, also dass man auch weiß, wo die Punkte sind, wenn man die Linien hat. Die Lehrkraft möchte noch etwas Anderes hören. Ein Schüler antwortet daraufhin, dass die Punkte sich bewegen. Die Lehrkraft wiederholt das und erklärt, dass sie ein momentanes Bild von einer Wellenfront, die langsam rausläuft, haben. Das heißt, dass auf der Linie in diesem Augenblick, in dem das abgebildet wird, nur ein paar Knotenpunkte vorhanden sind, aber einen Augenblick später der Knotenpunkt ja weiterläuft und das heißt, dass „alle Punkte irgendwann mal Knotenpunkte“ sind. Sie sollten Punkte konstruktiver und destruktiver Interferenz suchen und den Gangunterschied bestimmen. Die „destruktive Interferenz ist dort, wo eine schwarze Linie die p-Linie schneidet, egal ob da in dem Augenblick gerade eine Kreuzung von zwei eingezeichneten Kreislinien“ ist oder nicht. Bei den roten Punkten ist es genauso. Es ist ein Punkt konstruktiver Interferenz, egal ob in dem Augenblick, den die Abbildung zeigt, Wellenberg auf Wellenberg oder Tal auf Tal genau dort aufeinandertrifft, weil der Knotenpunkt ein paar Augenblicke später schon dorthin gewandert ist. Welche Werte haben die Schülerinnen und Schüler für den Gangunterschied ermittelt? Eine Schülerin (S3) beantwortet diese Frage mit  $-2$  und  $+2$  und fragt nochmal nach, ob man bei Delta eh das eine von dem anderen abziehen muss. Die Lehrkraft beantwortet die Frage mit ja. Daraufhin erklärt die Schülerin ihren Rechengang. Sie haben einen schwarzen Punkt ausgewählt und dieser war  $7\text{cm}$  von Quelle 1 und  $9\text{cm}$  von Quelle 2 entfernt. Also wäre das ja  $-2$ . Sie ist sich nicht ganz sicher, ob das Minus stimmen kann und auch in der Klasse gibt es dazu unterschiedliche Meinungen. Die Lehrkraft sagt, dass das Minus egal ist, da man den Abstand an sich positiv angibt. Aber das Ergebnis soll noch in einem Vielfachen der Wellenlänge angegeben werden. Daraufhin fragt die Sitznachbarin (S2) der vorigen

Schülerin, ob das in Lambda ist. Nach der Bestätigung durch die Lehrkraft sagt sie nur ach so. Die Lehrkraft sagt, dass sie Lambda ja aus ihrer Abbildung entnehmen können, indem sie messen. Eine andere Schülerin sagt, sie haben  $1,5\lambda$  herausbekommen. Eine andere Gruppe ebenfalls und auch die Gruppe, die am Anfang nur ausgemessen hat, hat nun dieses Ergebnis. Die Lehrkraft gibt diesen Wert als Beispiel für einen Gangunterschied für einen Punkt destruktiver Interferenz an. Bei einem anderen Punkt werden sie einen anderen Wert herausbekommen, aber was werden die Schülerinnen und Schüler bei jedem Punkt destruktiver Interferenz erwarten? Eine Schülerin stellt fest, dass es etwas mit Komma 5 sein muss. Die Lehrkraft bestätigt und wiederholt das, es muss also „ein halbzahliges Vielfaches der Wellenlänge“ sein. Diese Bedingung haben sie schon gestern aufgestellt. Für die Punkte konstruktiver Interferenz ist eine Möglichkeit Null. Es wird gefragt, was man hier sonst erwarten würde. Ein Schüler beantwortet das mit etwas Geradem, ein anderer mit einem geraden Vielfachen. Die Lehrkraft gibt noch Beispiele von  $0,1,2$  und  $3\lambda$ .

Das Vergleichen und gleichzeitige Wiederholen von schon Gelerntem finde ich sehr gut. Ich hatte den Eindruck, dass hier vor allem zwei Gruppen sehr gut mitgearbeitet haben, aber die anderen hatten auch ihre Ergebnisse auf den Arbeitsblättern stehen. Es wird versucht, nochmals auf das Problem, das die Schülerinnen und Schüler mit der p-Linie und den Linien destruktiver und konstruktiver Interferenz hatten, einzugehen. Die Bedingung für den konstruktiven und den destruktiven Gangunterschied wurde herausgearbeitet und genau besprochen. Allerdings sind die Formulierungen der Schülerinnen und Schüler nicht immer ganz korrekt und bleiben so im Raum stehen. Die Bearbeitung der zweiten Seite des Arbeitsblattes geht sich in dieser Stunde nicht mehr aus.

#### 3.4. Vierte Stunde

Die vierte Stunde fand am Dienstag, den 09.04.2019 von 11:55 bis 12:45 Uhr statt. Es waren 15 Schülerinnen und Schüler anwesend, davon 6 Mädchen und 9 Burschen.

Bisher wurde vom Arbeitsblatt 3 nur die erste Seite gemacht und besprochen, nun sollen die Schülerinnen und Schüler die zweite Seite in kleinen Gruppen bearbeiten und die vergrößerte Abbildung von einer Wasserwelle, die durch einen Doppelspalt geht, soll wieder zur Hilfe genommen werden. Sie haben dafür circa zwölf Minuten Zeit. Auf der zweiten Seite wird das Laserexperiment genauer behandelt. Das Phänomen Interferenz soll erkannt und benannt werden und in Verbindung zu dem Wasserwellenexperiment gesetzt werden. Der Schirm soll mit der Linie p gleichgesetzt werden und die Punkte, die am Interferenzmuster des Lasers eingezeichnet sind, sollen auch auf der Linie p in der Abbildung der

Wasserwellen eingezeichnet werden. Die jeweiligen Gangunterschiede sollen bestimmt werden. Die Entstehung des Interferenzmusters des Lichts auf dem Schirm soll erklärt werden.

Ein Schüler sagt zu seinem Sitznachbarn, dass er sich nicht mehr erinnern kann. Dieser erklärt ihm daraufhin kurz, dass die erste Seite das Experiment mit den Wasserwellen war. Zwei Schüler sagen, dass sie sich etwas schwertun und ich helfe ihnen kurz. Ich erkläre ihnen nochmals, dass sie die Punkte auf der Linie p auf der vergrößerten Abbildung mit den Punkten des Laserexperiments in Verbindung bringen sollen. Es sind die Punkte auf der Linie p, an denen die Linien destruktiver und konstruktiver Interferenz die Linie p schneiden. Man sieht zwar beim Laser dazwischen nichts, aber das Bild auf dem Schirm zeigt dasselbe Ergebnis, wie das bei den Wasserwellen auf der Linie p. Der Schüler stellt fest, dass die Linie p nichts ändert. Ich stimme ihm zu und bekräftige nochmals, dass man die Linie p irgendwohin setzen könnte. Der Schüler fragt nach, was denn nun die Linie p überhaupt ist, ein Hindernis oder was soll es sein? Ich erkläre, dass sie dem Schirm im Lichtexperiment entspricht. Er fragt, ob dann da auch ein Interferenzmuster entsteht, es ist ja keine Interferenz wie bei Wasser. Ich sage darauf, dass hier schon auch ein Interferenzmuster entsteht, weil es ja auch konstruktive und destruktive Interferenz gibt. Die vergrößerte Abbildung soll ihnen nur als Hilfestellung dienen, diese zwei Experimente in Verbindung zu setzen. Das leuchtet dem Schüler ein. Er fragt, was sie bei der Frage aufschreiben sollen, ob die Experimente in Verbindung gesetzt werden können. Einfach nur ja, man kann? Ja, aber zusätzlich sollen noch Gemeinsamkeiten bei den zwei Experimenten notiert werden. Die Linie p ist der Schirm, antwortet der Schüler. Sie schreiben es auf. Ich frage nach, wie man die Striche und das dazwischen beim Lichtexperiment in Verbindung mit der Abbildung der Wasserwellen setzen kann. Sie erkennen, dass es, wenn ein Strich kommt, jeweils eine Überschneidung gibt. Ich bestätige das, wenn wir eine konstruktive Interferenz haben, entspricht das einem hellen Bereich und bei destruktiver Interferenz dem dunklen Bereich. Die Schüler bestätigen das und auf die Frage, ob ihnen die Sache klarer ist, antworten sie mit ja und dass sie es schon besser verstehen. Bei weiteren Fragen sollen sie sich melden.

Ein anderer Schüler sagt im Hintergrund, da ist der Abstand, der dunkel ist, auch die Auslöschung. Die Lehrkraft fragt, ob noch immer niemand fertig ist. Die Schülerinnen und Schüler können noch weiterarbeiten. Die Lehrkraft erklärt einer Mädchengruppe, dass das Licht durch zwei Spalte geht und dass der Gangunterschied von dem Punkt zu einem Spalt und zu dem anderen Spalt ist und dann die Differenz davon. Die Lehrkraft bestätigt ihnen, dass C in der Mitte ist und fragt nach, wo die anderen Punkte sind und wie die Gangunterschiede aussehen.

Ein Schüler (S4) zählt die Wellenlängen für den Gangunterschied des Punktes C ab. Er kommt bei beiden Strecken auf dasselbe Ergebnis und erkennt, dass hier genau die Mitte ist und der Gangunterschied deswegen ja Null sein muss.

Die Lehrkraft wiederholt mit einer Mädchengruppe, welche Vielfachen sie bei der roten Linie (Anm. Linie konstruktiver Interferenz) erwarten. Ein Mädchen antwortet mit den ganzen Vielfachen. Daraufhin sollen sie überlegen, welche Gangunterschiede bei den Buchstaben A bis D (Anm. Punkte konstruktiver Interferenz) in Frage kommen. Die Lehrkraft zeigt auf die einzelnen Punkte. Bei C ist es Null, weil es da gerade durchgeht, bei den andern können es nur die 1,2,3,4,5,6,7 Lambda sein.

Ein Schüler braucht Hilfe beim Beantworten der Frage nach der Erklärung des Unterschieds zwischen den zwei Experimenten.

Die Lehrkraft wiederholt bei einer Burschengruppe, dass die hellen Punkte einen Gangunterschied von  $n \cdot \lambda$  haben, die Frage ist nur, wie hoch  $n$  ist. Sie hilft ihnen mit ein paar Fragen weiter: Welcher Punkt entspricht C? Wie hoch ist dort der Gangunterschied? Sie stellt auch noch einmal fest, dass „der Gangunterschied der Unterschied zwischen dieser Länge und dieser Länge“ ist und zeigt dabei auf die entsprechenden Linien auf der vergrößerten Abbildung. Der Schüler sagt für den Punkt C ist der Gangunterschied also Null. Die Lehrkraft bestätigt das und fragt nach, welchem Punkt der Punkt D entspricht und bekommt die richtige Antwort. Ein Mädchen erklärt den anderen, wo die Punkte B, F und G sind und dass der Punkt F zwischen C und B liegt. Allerdings ist F nicht oben, sondern unten auf der Abbildung, was die Lehrkraft ausbessert und auch auf der Abbildung zeigt. Das ist ein momentanes Bild und die Welle läuft, das heißt, dass entlang der ganzen Linie Auslöschung ist. Ein Schüler fragt nach, ob das also auch auf der Linie p gilt, die Lehrkraft bestätigt das und erwähnt noch, dass es am Schnittpunkt der Linie mit der Linie p ist. Der Schüler versteht das nicht ganz und die Lehrkraft erläutert, dass sie wissen, dass die Buchstaben A - D Punkte konstruktiver Interferenz sind und sie durch die Formel für konstruktive Interferenz wissen, dass es nicht viele Möglichkeiten für die Gangunterschiede gibt.

Ein Schüler (S4) misst mit dem Lineal einen Gangunterschied aus, er bekommt einmal 7 und einmal 8 heraus, also ist der „Abstand eine Wellenlänge“. Bei D ist somit der Gangunterschied eins, also muss es bei B auch eins sein. Der Nachbar fragt nach, ob er sich da sicher ist. Der Schüler antwortet darauf „jaja“.

Die Lehrkraft erklärt einer Gruppe nochmals wie man den Gangunterschied herausfinden kann. Sie zeigt den Schülerinnen und Schülern, wo die Spalte sind und welche Distanzen sie abmessen müssen. „Der Unterschied von diesen Längen ist der Gangunterschied“. Bei B ist

ein Abstand kürzer, als der eben gemessene und die Gruppe weiß, was prinzipiell für konstruktive Interferenz in Frage kommt.

Ich habe gesehen, dass sich ein paar Schüler nicht auskennen und habe gemeinsam mit der Lehrperson so gut wie möglich versucht ihnen zu helfen. Ich glaube, dass es viel bringt und mehr Klarheit schafft, wenn man zwischen den Gruppen herumgeht und individuell Hilfestellung gibt. Ein Problem bei einer Gruppe war auch, dass sie keine vergrößerte Abbildung hatte, weil der Kollege, der das Arbeitsblatt mitgenommen hatte, nicht da war. Im Grunde zeigt sich hier wieder, dass es natürlich viel besser wäre, wenn jede und jeder eine Abbildung für sich hätte, aber die Kopierkosten sprechen dagegen. Außerdem wird so natürlich auch die Zusammenarbeit in der Gruppe gefördert. Vielleicht könnte man nach der Stunde eine Lösung elektronisch zur Verfügung stellen. Die Lehrkraft hat mir zwischendurch kurz gesagt, dass es sehr schwierig ist, hier zu entscheiden, wie viel Arbeitszeit man geben soll. Wenn man den Schülerinnen und Schülern mehr Zeit gibt, brauchen sie dann wahnsinnig lange, aber wenn man weniger Zeit gibt, schreiben sie dann dafür nur irgendetwas hin. Was man beim Überarbeiten der Materialien berücksichtigen sollte, ist die Beschriftung der Arbeitsblätter. Im Skript sollte deutlicher hervorgehoben werden, wann ein Arbeitsblatt eingesetzt werden soll. Einige Lernende haben sich in den Gruppen ein paar Dinge nochmals erklärt, wenn zum Beispiel jemand nicht da war. Das hat sehr gut funktioniert, finde ich. Der Gangunterschied musste leider wieder fast allen Gruppen erklärt werden, was zeigt, dass der Begriff immer noch nicht ganz sitzt, obwohl sich die Klasse schon sehr intensiv damit auseinandergesetzt hat.

Nach circa sechzehn Minuten Arbeitszeit möchte die Lehrkraft die zweite Seite des Arbeitsblatts 3 vergleichen. Die Schülerinnen und Schüler sollen der Reihe nach die Fragen beantworten. Die Lehrkraft liest die erste Fragestellung vor: Welches Phänomen erkennst du auf der Abbildung? Ein Schüler beantwortet das mit „Lichtinterferenz“. Die Antwort wird durch die Lehrkraft bestätigt und die zweite Frage nach dem Bezug zum Wasserwellenexperiment beantwortet ein Schüler mit hell ist Tal auf Tal und Berg auf Berg und dunkel ist Tal auf Berg. Die Lehrkraft betont nochmals, dass die Schülerinnen und Schüler aufpassen müssen, denn auch „Tal auf Tal ist hell“ und das ist eine Verstärkung. Die konstruktive Interferenz, also Berg auf Berg und Tal auf Tal bei den Wasserwellen, entspricht den hellen Punkten beim Licht und „Berg auf Tal entspricht beim Licht den dunklen Stellen“. Die Lehrkraft liest die nächste Frage vor: Was entspricht in diesem Experiment der Linie p aus dem vorigen Experiment? Ein Schüler antwortet, dass die Linie p die Fläche ist, wo das Licht auftrifft. Die Lehrkraft will noch den Zusammenhang zum Realexperiment wissen, woraufhin der Schüler noch hinzufügt, dass es die Linie ist, wo alle Punkte auftreffen. Die Lehrkraft sagt, es ist der Schirm. Auf der vergrößerten Abbildung geht die Linie p von Punkt A bis D, wie eine

Schülerin feststellt. Die Lehrkraft stimmt zu. Das ist die ganze „Linie mit den Lichtpunkten“. Den nächsten Punkt - das Einzeichnen der Punkte A bis F in die vergrößerte Abbildung - kann man nicht gut im Plenum vergleichen, aber die Lehrkraft hat das schon zuvor in den Gruppen besprochen. Die Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen dem Wasserwellenexperiment und dem Lichtexperiment beschreibt eine Schülerin so: Ein Unterschied ist, wenn man einen Lichtstrahl hat und dann kein Lichtstrahl käme, ist ja dennoch Licht da. Die Lehrkraft möchte, dass die Schülerin das noch einmal erklärt, weil sie das nicht ganz verstanden hat. Die Schülerin sagt daraufhin: Wenn man zwei Lichtquellen hat und bei der ersten ein Lichtstrahl ist, aber bei der zweiten kein Lichtstrahl, dann ist dennoch Licht auf dieser Stelle. Die Lehrkraft sagt darauf ach so, das werden wir später besprechen. Ein Schüler hat noch eine Antwort. Er sagt, dass er sich nicht sicher ist, aber dass sich die Wasserwelle in alle Richtungen ausbreitet, aber das Licht nur in eine bestimmte Richtung. Ein anderer Schüler sagt, dass hell-dunkel-hell-dunkel ist halt dasselbe, wie konstruktiv-destruktiv. Die Lehrkraft sagt zu beiden Meldungen ok und fügt hinzu, dass es mal hohe und mal weniger hohe Wellen gibt und hell und dunkel beim Lichtexperiment. Sie liest aus dem Skript die erwartete Antwort vor: „Die hellen Linien beim Interferenzbild sind die Folge von konstruktiver Interferenz des Lichts und die dunklen Linien sind die Folge der destruktiven Interferenz. Bei Wasserwellen sehen wir die Wellen und das Interferenzbild an der Oberfläche des ganzen Mediums (die Linien der konstruktiven und destruktiven Interferenz) und beim Licht sehen wir nicht, was zwischen den Quellen und dem Schirm passiert. Wir sehen nur das Bild, das entsteht, wenn das Licht auf den Schirm trifft und das sind die Interferenzlinien auf dem Schirm.“ Sie betont nochmals, dass man beim Wasser die ganze Oberfläche sieht und beim Lichtexperiment nur die zwei Punktquellen und das Interferenzmuster, aber nichts dazwischen. Beim nächsten Punkt wird der Gangunterschied bestimmt. Ein Schüler gibt als Antwort für Punkt A zwei. Zwei was möchte die Lehrkraft wissen. Gleich verbessert sich der Schüler auf zwei Lambda. Auch die restlichen Punkte werden von dem Schüler vorgelesen: Bei B ist es ein Lambda, bei C ist es Null, bei D wieder ein Lambda, bei E wieder zwei Lambda, bei F sind es 0,5 Lambda und bei G 1,5 Lambda. Die Lehrkraft bestätigt nach jedem Punkt die Antwort und fasst zusammen, dass bei A,B,C,D die ganzzahligen Vielfachen die Lösung sind, und das wird 0,1,2,3 sein, weil es ja immer mehr wird und mehr Möglichkeiten gibt es dann da nicht. Die Bedingung für die konstruktive Interferenz soll nochmals formuliert werden. Ein Schüler beginnt: Also wenn Tal auf Tal... Die Lehrkraft fragt, ob er das mit dem Gangunterschied formulieren kann. Die Lehrkraft möchte den Gangunterschied bei konstruktiver Interferenz wissen und als der Schüler nichts antwortet, fragt sie einen anderen Schüler, ob er ihm helfen kann. Dieser sagt ganzzahlig. Die Lehrkraft will das genauer wissen. Der Schüler fügt hinzu Vielfaches und nach kurzer Pause noch von Lambda. Die Lehrkraft bestätigt und wiederholt das nochmals. Bei der

destruktiven Interferenz gibt eine Schülerin (S3) als Antwort, dass es ein halbzahliges Vielfaches von Lambda ist. Die Lehrkraft betont, dass es nur die ungeraden halbzahligen Vielfachen sind, weil die geraden wieder die ganzzahligen werden. Die Lehrkraft sagt, dass sie sich nicht sicher ist, ob das Folgende letzte Stunde ganz klar war, oder ob es etwas untergegangen ist: Wenn man einen Laserstrahl durch zwei Schlitze schickt, ist es dasselbe, wie wenn man zwei punktförmige Lichtquellen hat. Wir sehen Interferenz. Bei dem anderen Experiment mit den zwei Batterielampen oder Handylampen haben sie „zwei mehr oder minder punktförmige Lichtquellen“ und wenn man die aufeinander schickt, sieht man keine Interferenz, sondern nur einen hellen Lichtfleck. Denn „immer wenn es so ein hell-dunkel-Muster gibt, ist Interferenz im Spiel“. Wieso es aber bei den Batterielampen zu keiner Interferenz kommt, könnten die Schülerinnen und Schüler schon prinzipiell kombinieren. Sie fragt einen Schüler (S4), ob er das probieren möchte. Er vermutet, dass es mit der Phasenverschiebung und mit der Wellenlänge zusammenhängt. Die Lehrkraft stimmt zu. Sie richtet die Frage, wie denn der Unterschied in der Wellenlänge bei Batterielampen und Laserlicht ist, an alle. Nachdem sich niemand meldet und es in der Klasse sehr ruhig bleibt, fügt die Lehrkraft noch hinzu, dass sie keine Zahl will, sondern nur eine Größer- oder Kleiner-Beziehung. Ein Schüler sagt, dass Laser dieselbe Farbe, dieselbe Wellenlänge und dieselben Phasenlagen haben. Die Lehrkraft zählt nochmals auf, der Laser hat eine Farbe, eine Wellenlänge und eine Phasenlage. Die Batterielampe hat alle Wellenlängen, weil sie alle Farben hat und dazu alle Phasenlagen, sie ist nicht kohärent. Das ist der Unterschied. Die Schülerinnen und Schüler sollen notieren, dass es eine gute Voraussetzung für Interferenz ist, „wenn man zwei punktförmige Lichtquellen hat, die aus demselben Strahl erzeugt werden und monochromatisches Licht, also Laserlicht einer Farbe, hat“. Das Taschenlampenlicht ist nicht kohärent, es gibt zwar schon auch Interferenz, „aber sie ist nicht beobachtbar, weil das Muster so schnell wechselt“, dass wir es nicht sehen können. Damit wir also das Interferenzbild sehen können, muss es statisch sein, „es darf sich nicht mit der Zeit verändern und dafür brauchen wir kohärentes Licht“.

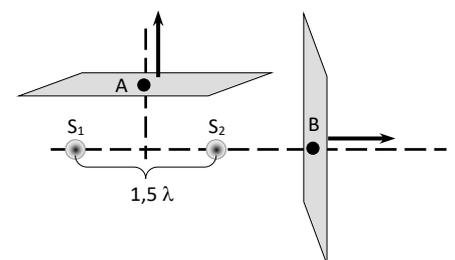
Das Vergleichen des Arbeitsblatts fand ich sehr gut. Es hat zwar vergleichsweise viel Zeit eingenommen (circa 10 Minuten), aber es wurde gut auf die Antworten der Schülerinnen und Schüler eingegangen. Obwohl sie der Reihe nach drangenommen wurden, ging es sehr gut, weil alle etwas dazu sagen konnten. Wenn eine Antwort mal nicht ganz gestimmt hat, war das für die Schülerin oder den Schüler auch nicht peinlich, weil in der Klasse ein kollegiales Klima herrscht. Alle gehen miteinander respektvoll um. Der Schüler, der sich nicht sicher war, wurde von einem anderen Schüler unterstützt, die Lehrkraft hat offen zugegeben, die eine Antwort nicht ganz verstanden zu haben. Die Schülerinnen und Schüler bekamen meistens Zeit nachzudenken und ihre Antworten zu ergänzen. Der Schüler, der auf den Unterschied zwischen Batterielampe und Laserlicht gekommen ist, hat meiner Meinung nach

gezeigt, dass die Unterrichtsmaterialien bei ihm angekommen sind. Die Schülerinnen und Schüler haben beim Vergleichen den Eindruck erweckt, dass sie die Aufgaben gut verstanden und auch richtig beantwortet haben. Die Frage nach Ähnlichkeiten und Unterschieden beim Wasser- und Lichtexperiment war etwas schwerer zu beantworten, aber ich finde es trotzdem wichtig, dass diese Frage gestellt wird, weil die Schülerinnen und Schüler zum Nachdenken angeregt werden. Denn die Analogie Wasserwellen und Lichtwellen zielt ja auf die Welle als mathematisches Hilfsmittel zur Beschreibung und Berechnung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ab. (vgl. SVPH 2018: 197f) Der Vergleich soll „das mathematische Objekt Welle“ veranschaulichen, „nicht aber die elektromagnetische Strahlung selbst“ (SVPH 2018: 197). Mit mehr Zeit wären die Lernenden vielleicht auch auf die Antwort gekommen. Wie die Lehrkraft die Klärung des Unterschieds zwischen dem Experiment mit den Batterielampen und dem mit dem Laserlicht angegangen ist, fand ich auch sehr gut.

Als nächstes werden die beiden Fragen, die am Ende des zweiten Teils des Lehrpersonenskripts stehen, an die Wand projiziert und kleine Zettel werden ausgeteilt. (Anm. die fettgedruckten Antworten zeigen hier die richtige Antwort an)

1. Welche Aussage über die Interferenz des Lichts aus zwei kohärenten Quellen ist wahr?
  - A. Die Interferenz passiert nur auf dem Schirm.
  - B. Die Interferenzlinien sind voneinander gleich weit entfernt.**
  - C. Falls der Gangunterschied ein ungerades ganzes Vielfaches der Wellenlänge beträgt, wird man destruktive Interferenz sehen.
  - D. Falls die Quellen kohärent sind, ist die Interferenz immer konstruktiv.
  
2. Die Abbildung zeigt zwei kohärente Quellen  $S_1$  und  $S_2$  mit der Wellenlänge  $\lambda$ . Sie sind  $1,5\lambda$  voneinander entfernt. Die Quellen sind in Phase. Auf der Abbildung sind die Linien gestrichelt eingezeichnet, an denen die Schirme bewegt werden. In den Punkten A und B kommt es zur Interferenz. Was werden wir auf den Schirmen in den Punkten A und B beobachten, wenn wir die Schirme so bewegen, wie es die Pfeile zeigen?

- a) Die Interferenz ist in beiden Punkten ständig konstruktiv.
- b) Die Interferenz ist in beiden Punkten ständig destruktiv.
- c) Im Punkt A ist die Interferenz ständig konstruktiv und in Punkt B ständig destruktiv.**



- d) Im Punkt A ist die Interferenz ständig destruktiv und im Punkt B ständig konstruktiv.
- e) In beiden Punkten wechseln sich die konstruktive und die destruktive Interferenz ab, je nach der Entfernung von den Quellen.

Die Schülerinnen und Schüler sollen ihre Antworten jeweils auf eine Seite des Zettels schreiben. Es werden gleichzeitig beide Fragen gezeigt und von den Schülerinnen und Schülern bearbeitet. Ein Schüler fragt, ob nur eine Aussage richtig ist, weil es bei der zweiten Frage nicht dabeisteht. Es ist sehr still in der Klasse. Nach zweieinhalb Minuten will die Lehrkraft die Antwort auf die erste Frage vergleichen. Die Schülerinnen und Schüler sollen ihre Kärtchen in die Höhe heben. Einige Schülerinnen und Schüler fragen, ob sie noch eine Minute haben können. Die Lehrkraft gibt nochmals zweieinhalb Minuten dazu. Dann ist Schluss und die Klasse fängt zu murmeln an. Für die erste Frage werden die Kärtchen gehoben. Die Lehrkraft sagt, dass B richtig ist. Da auch ein paar Schülerinnen und Schüler C gewählt haben, erklärt sie, dass ein ungerades ganzes Vielfaches ja  $1,3,5,7$   $\lambda$  bedeutet und es da „nichts Besonderes“ gibt. Die destruktive Interferenz ist schon ein ungerades Vielfaches, aber der halben Wellenlänge. Bei der zweiten Frage ist C richtig. Die Kärtchen werden zur späteren Auswertung eingesammelt, deshalb schreiben die Schülerinnen und Schüler noch Frage 1 und 2 auf die Zettel.

Die Fragen sind eigentlich recht gut gegangen. Bei der ersten Frage habe ich mir schon gedacht, dass einige auch die Antwort C wählen werden. Es wäre interessant, ob sie die Frage nur nicht genau gelesen haben oder ob das mit dem halbzahligen und ganzzahligen noch nicht gut verankert ist. Die Antwort A wurde auch einmal gewählt. Diese Person hat die Interferenz anscheinend noch nicht verstanden. Insgesamt waren die Antworten bei Frage 1:  $1 \times A$ ,  $10 \times B$ ,  $4 \times C$ ,  $0 \times D$ . Es waren 15 Schülerinnen und Schüler anwesend, also haben zwei Drittel die Frage richtig beantwortet, vier Fünftel haben die Antwort C und ein Fünftel hat die Antwort A gewählt.

Bei der zweiten Frage war ich mir selbst unsicher, ob ich sie gut formuliert habe. Aber anscheinend war sie gut formuliert, wie man aus den richtigen Antworten und der Aussage der Lehrkraft schließen kann. Es hat bei der Angabe allerdings gefehlt, dass nur eine Antwort richtig ist. Diese Frage wurde folgendermaßen beantwortet:  $0 \times A$ ,  $0 \times B$ ,  $9 \times C$ ,  $6 \times D$  und  $0 \times E$ . Hier sind zwar nur zwei Antwortmöglichkeiten gewählt worden, aber die Erfolgsquote war um eine Person geringer. Drei Fünftel gaben die richtige Antwort C und zwei Fünftel eine falsche Antwort, nämlich D. Bei dieser Antwort war ich auf das Ergebnis sehr gespannt, denn das Arbeitsblatt 2 war ja nicht in der Klasse verglichen worden. Deshalb hätte die Antwort sehr

unklar sein können. Ich habe mir erwartet, dass auch der Punkt E als Antwort gegeben wird. Aber da wurde ich positiv überrascht, denn anscheinend war allen Schülerinnen und Schülern mittlerweile klar, dass entlang einer Linie nur konstruktive oder destruktive Interferenz herrschen kann. Die Antwort D zeigt mir allerdings, dass das Arbeitsblatt 2 verglichen hätte werden müssen. Denn mir ist in den Interviews aufgefallen, dass die Schülerinnen und Schüler vor allem mit dem Punkt B ihre Schwierigkeiten haben. Die gleiche Entfernung des Punkts zu beiden Quellen und daher der Gangunterschied von  $0 \text{ } \lambda$  entlang der ganzen Linie ist eine sehr wichtige Erkenntnis, die auch zum Verständnis der weiteren Aufgaben beiträgt. Hier finde ich es schade, dass auf die Begründung für diese Antwort nicht eingegangen worden ist und nicht zumindest hier erklärt wurde, wie das funktioniert. Diese Frage wurde auch noch einmal genau so beim Test gestellt. Da waren 20 Schülerinnen und Schüler anwesend und die Frage wurde von 8 Personen falsch beantwortet. Also circa ein Drittel der Klasse hat den Zusammenhang immer noch nicht verstanden. Für die Präsentation der beiden Fragen muss noch eine Folie erstellt werden, damit die Fragen nicht aus dem Lehrerskript gezeigt werden müssen.

Als nächstes bittet die Lehrkraft alle Schülerinnen und Schüler herauszukommen. Sie fragt, ob sie noch wissen, wie der Physiker heißt, der den Doppelspaltversuch erfunden hat. Ein Schüler schlägt den Namen Kohärent vor. Da keine andere Antwort kommt, wiederholt die Lehrkraft, dass der Physiker Young geheißen hat. Bei fast allen Schülerinnen und Schülern ist ein „ach ja“ zu hören. Die Lehrkraft erinnert an die Ausgangsfrage: Welches Modell beschreibt das Licht besser, das Wellen- oder das Teilchenmodell? Sie haben das Wellenmodell kennen gelernt und für Licht genau untersucht. Sie scheinen auf einem guten Weg zu sein. Die Lehrkraft zeigt den Doppelspaltversuch nochmals her und erklärt, dass man hier das Interferenzbild sieht und hebt hervor, welchen Ausschnitt sie sich genau anschauen werden. Es ist ein Linienmuster. Was fällt dabei ins Auge, was ist die wichtigste Eigenschaft dieses Musters? Ein Schüler gibt an, dass das Muster strichliert ist. Die Lehrkraft bestätigt das und fragt nach, was man über diese Striche aussagen kann. Ein anderer Schüler erinnert sich, dass sie denselben Abstand haben. Die Lehrkraft wiederholt nochmal den Fachbegriff äquidistant, denn das heißt ja gleiche Abstände. Sie werden nun erforschen, wovon die Abstände der Linien abhängen. Die Lehrkraft dreht den Laser ab und bittet die Klasse sich wieder hinzusetzen.

Ich finde es sehr gut, dass sich die Lehrkraft nochmals, wenn auch nicht viel (circa eine Minute) Zeit genommen hat, das Experiment zu wiederholen, die wichtigsten Fakten zusammenzufassen und auch zu erläutern, was genau im Folgenden untersucht werden wird.

Die Lehrkraft fragt die Klasse, wie die Zusammenhänge ausschauen könnten, wovon der Abstand der Linien abhängen könnte. Zuerst sollen die Schülerinnen und Schüler noch notieren, dass die äquidistanten Abstände eine der wichtigsten Eigenschaften des Interferenzbildes beim Laser sind. Die Schülerinnen und Schüler sollen jetzt Vermutungen anstellen, wovon diese Abstände abhängen könnten. Ein Schüler sagt, es komme auf die Entfernung an, wenn es zum Beispiel weiter weg ist, werden die Abstände größer. Die Lehrkraft sagt, dass es von der Entfernung abhängen kann und notiert an der Tafel den Begriff „Vermutungen“, den auch die Schülerinnen und Schüler in das Heft schreiben sollen. Sie möchte wissen, welchen Abstand der Schüler genau meint, dieser erwidert, den Abstand des Lasers vom Schirm, ein anderer Schüler meint vom Ursprung. Die Lehrkraft fragt, ob sie wirklich den Abstand des Lasers vom Schirm meinen. Ein anderer Schüler nennt daraufhin den Abstand des Schirms und der Platte, eine Schülerin den von der Quelle (S3). Ein Schüler meint, dass es der Abstand vom Schirm zum Dings sein könnte. Die Lehrkraft fragt nach und ein anderer Schüler beantwortet die Frage mit dem Abstand zum Doppelspalt, ein Mädchen mit dem zur Platte. Die Lehrkraft bestätigt, dass der Doppelspalt richtig ist und schreibt als erste Vermutung „Abstand Spalte-Schirm“ an die Tafel. Sie benennt diesen Abstand gleich mit  $a$  wie Abstand. Sie macht eine Skizze mit einem Laser, den Spalten und einem Schirm und zeichnet den Abstand  $a$  auch zwischen Spalten und Schirm ein. Welche Vermutung gibt es noch? Da sagt ein Schüler, dass er noch eine Frage zum Doppelspalt hat, ob das ein Glas oder so war. Die Lehrkraft zeigt das Dia nochmals her, „es ist im Prinzip eine schwarzgefärbte Fläche, wo kein Licht durchkommt“. In diese „sind zwei dünne Linien eingraviert“. Der Laser, der durchgeht ist ein „fetter Strahl“ und wird außer an den zwei Linien abgeschirmt. Er kommt nur durch die zwei dünnen Linien durch und dort entstehen dann zwei punktförmige Lichtquellen. Dann werden weitere Vermutungen gesammelt. Ein Schüler schlägt vor, dass der Abstand der Linien im Interferenzmuster von der Größe der Linien im Doppelspalt abhängen könnte. Nachdem die Lehrkraft nachfragt, was der Schüler mit der Größe der Linien meint, formuliert er das Gesagte um und sagt, wie der Abstand zu denen ist. Die Lehrkraft fragt nach, ob er den Abstand der Linien meint. Der Schüler bestätigt das und wiederholt die Vermutung. Das ist eine gute Vermutung. Es könnte nämlich auch die Breite der Linien sein, aber sie haben es mit dünnen Linien zu tun. Die Lehrkraft schreibt als zweite Vermutung „Abstand der Linien im Doppelspalt“ auf und benennt diesen Parameter mit dem Buchstaben  $d$ . Sie zeigt das schematisch mit ihren Händen und zeichnet in der Folge den Doppelspalt an die Tafel. Sie kennzeichnet den Abstand zwischen den Spalten mit  $d$ . Was würde noch Sinn machen? Sie nimmt ein Mädchen (S1) dran, das die Wellenlänge nennt. Die Lehrkraft bestätigt, dass es eventuell von der Wellenlänge abhängen kann und schreibt als dritte Vermutung „Wellenlänge  $\lambda$ “ auf die Tafel. Nächstes Mal werden die Schülerinnen und Schüler erforschen, wovon die Abstände der Linien abhängen. Die ersten

zwei Punkte werden sie selbst erforschen und den dritten Punkt wird ihnen die Lehrkraft als Demoexperiment zeigen. Dann bekommt man eine schöne Formel. Als die Lehrkraft die Stunde beenden will, fragt ein Schüler noch, ob es nicht auch vom Winkel abhängig sein kann. Die Lehrkraft greift das noch auf und sagt, dass das Muster auch anders aussehen wird, wenn die Platte schief steht. Aber das werden sie nicht untersuchen. Trotzdem schreibt sie die Vermutung [Winkel, Breite der Spalte] in eckiger Klammer unter die Vermutungen und betont nochmals, dass nur die oberen untersucht werden und die in der eckigen Klammer nicht.

Diese Vorgangsweise, bei der mit den Schülerinnen und Schülern gemeinsam die Vermutungen erarbeitet und festgehalten werden, hat mit sehr gut gefallen. Die Vorschläge, was experimentell untersucht werden soll, sind mit ein wenig Hilfestellung durch die Lehrperson eigentlich von den Schülerinnen und Schülern gekommen. Es ist auch sehr gut, dass die Lernenden jetzt bereits eine Übersicht haben, mit der sie das nächste Mal gleich in die Experimente starten können. Die Skizze und die dazugehörigen Bezeichnungen an dieser Stelle einzuführen, erleichtert den Einstieg und das Verstehen des Arbeitsblatts, das für die nächste Stunde geplant ist.

### 3.5. Fünfte Stunde

Die fünfte Stunde fand am Freitag, den 12.04.2019 in der ersten Stunde von 8:00-8:50 Uhr statt. Es waren 18 Schülerinnen und Schüler anwesend, davon 8 Mädchen und 10 Burschen. Zwischen der vierten und fünften Einheit fand eine weitere Physikstunde statt. Diese Stunde wurde genutzt, um das Wellenmodell von Huygens und das Teilchenmodell von Newton noch genauer zu besprechen. Es waren nur sehr wenige Schülerinnen und Schüler anwesend.

Die Lehrkraft fragt zuerst, welche Fragestellungen letztes Mal gemeinsam entwickelt worden sind: Welche drei Dinge sollen heute untersucht werden? Ein Schüler sagt der Abstand von Spalt zu Schirm und der Abstand vom Doppelspalt. Die Lehrkraft möchte das anders formuliert haben, die Proportionalitäten und Abhängigkeiten. Was ist die charakteristische Eigenschaft beim Interferenzmuster? Die Abstände sind gleich, antwortet ein Schüler. Genau, das sind die „äquidistanten schwarzen Linien im hellen Balken“. Auf die Frage nach der Forschungsfrage vom letzten Mal antwortet eine Schülerin (S2), „wovon die abhängen“. Die Lehrkraft präzisiert, dass sie wissen wollen, „wovon der Abstand der Linien abhängt“. Sie haben drei Vermutungen aufgeschrieben und noch zwei andere, die nicht untersucht werden. Ein Schüler (S4) antwortet, dass der Abstand von der Wellenlänge abhängt. Die

Lehrkraft formuliert um, es gehe genauer um die Wellenlänge des Lichts im Verhältnis zum Linienabstand und wie sich die Wellenlänge auf den Linienabstand auswirke. Das ist eine bessere Formulierung. Der erste Schüler hat das zwar auch schon gemeint, aber nicht exakt mit den Verhältnissen ausgedrückt. Eine Schülerin (S3) fügt hinzu, dass es vom Abstand Doppelspalt zum Schirm abhängt. Die Lehrkraft erwähnt, dass das schon gesagt wurde, aber wiederholt es nochmals im Zusammenhang mit der Linienabhängigkeit. Ein Schüler sagt noch, dass es wichtig ist, wie dicht die Linien zueinander sind. Auf Nachfrage, welche Linien er meint, fügt er hinzu, die zwei Spalte. Die Lehrkraft betont nochmals den Begriff der Abhängigkeiten und sagt, dass es um die Abhängigkeit der Dichte der Linien im Doppelspalt zu den Linienabständen im Interferenzmuster geht. Sie teilt das Arbeitsblatt aus und sagt, dass die Schülerinnen und Schüler nun die Punkte A und B in Gruppen bearbeiten sollen. Bei diesen sollen sie die Abhängigkeiten des Abstands der Linien im Interferenzmuster von dem Abstand des Schirms zum Doppelspalt und dem Abstand der Linien des Doppelspalts, experimentell bestimmen. Zum Punkt C (Abhängigkeit des Abstands der Linien im Interferenzmuster von der Wellenlänge) wird die Lehrkraft ein Demonstrationsexperiment zeigen. Sie teilt die Klasse in sechs Gruppen ein.

Der Einstieg in die Stunde war etwas schwierig, weil die Klasse erst wieder in das Thema finden musste. Die Lehrkraft hat sich sehr bemüht und viele Hilfestellungen gegeben. Die exakte Formulierung mit Bezug auf die Abhängigkeiten ist den Schülerinnen und Schülern anscheinend sehr schwergefallen.

Die Schülerinnen und Schüler beginnen ihr Material zusammenzusuchen und den Versuch aufzubauen. Die Materialien sind von der Lehrkraft und mir schon vor dem Unterricht vorbereitet worden. Die Schülerinnen und Schüler nehmen aber nicht immer die richtige Anzahl an Materialien heraus und dadurch entsteht etwas Chaos. Die Lehrkraft erklärt daraufhin, dass jede Gruppe einen Reiter mit Schlitz für den Schirm und einen Reiter ohne Schlitz für die Blende mit dem Dia haben soll. Sie sollen „mit dem Stativmaterial den Laser so positionieren, dass er durch die Spalte leuchtet“. Zweieinhalb Minuten später fügt sie hinzu, dass die Doppelspalte senkrecht eingebaut werden sollen und verdunkelt den Raum. Die Schülerinnen und Schüler arbeiten an den Experimenten. Eine Schülerin fragt ihre Kolleginnen, was das a auf dem Arbeitsblatt ist. In der Gruppe erkennen sie, dass die Lichtquelle auf konstanter Position bleibt und sie den Doppelspalt bewegen müssen. Eine andere Schülerin fragt nochmals, was mit a und s auf dem Arbeitsblatt gemeint ist. Die Lehrkraft erwidert darauf, dass sie das letzte Stunde aufgeschrieben haben und dass das im Heft steht. Eine Schülerin (S3) fragt, ob das der Abstand zwischen Schirm und Doppelspalt war. Die Lehrkraft bestätigt das und die Schülerin fragt darauf, was s war. Auf die Antwort der Lehrkraft sagt die Schülerin, dass es also die äqui, äqui ... . Die Lehrkraft vervollständigt das

Wort äquidistant, es sind die schwarzen Linien im Interferenzmuster. Sie fragt noch einige Gruppen, ob sie die „Bebuchstabung noch im Kopf“ haben. Eine andere Gruppe schaut die Bezeichnungen in ihrem Heft nach. Eine Schülerin (S1) einer anderen Gruppe stellt fest, dass der Abstand des Schirms von einem halben Meter schwer zu realisieren ist, weil die optische Bank nicht lange genug ist. Zehn Minuten nach Beginn der Gruppenarbeit fragt die Lehrkraft, wie weit die Schülerinnen und Schüler sind. Sie sind noch nicht fertig, nach zwei Minuten gibt sie den Hinweis, dass die Schülerinnen und Schüler mit dem Geodreieck arbeiten und messen sollen. Sie teilt noch zusätzlich Maßbänder aus. Eine Schülerin fragt, ob der Unterschied wirklich so winzig sein soll, er ist nur so ein Millimeter bei ihnen. Während der Gruppenarbeit kommt die Frage auf, wie groß der Spaltenabstand ist. Das schaue ich inzwischen auf der CD des Experimentierkastens (Photonics Explorer) nach und die Lehrkraft kann die Werte nachliefern und schreibt sie an die Tafel  $d_1 = 80 \mu m$  und  $d_2 = 200 \mu m$ . Sie wiederholt, dass ein Mikrometer  $10^{-6}$  Meter sind. Für den Punkt B haben die Schülerinnen und Schüler nun die zwei Zahlen für den Spaltabstand. Man hört eine Schülerin schon in Abhängigkeiten formulieren („einerseits wird das weniger und andererseits wird das größer“). Ein Schüler erkennt einen Zusammenhang und gibt ein erstauntes „Ah“ von sich. Ein Schüler merkt an, dass es sehr schwer abzumessen ist und ein anderer, dass das Muster etwas verschwommen ist. Eine Gruppe von Schülern hebt den Laser mit der Hand an, damit er durch den Doppelspalt geht, obwohl das Bild dadurch etwas zittrig wird. Eine Gruppe nimmt die Wand als Schirm. Siebenundzwanzig Minuten nach Beginn des Experiments fragt eine Gruppe, ob sie schon abbauen soll. Die Lehrkraft vergewissert sich, dass alle fertig sind und sagt kurz darauf, dass schon alle die Laser ausschalten und abbauen sollen.

Das Experiment hat bei allen gut funktioniert. Am Anfang wäre es vielleicht hilfreich gewesen genau zu sagen, welche Materialien jede Gruppe genau braucht. Das könnte man vielleicht auch individuell je nach Geräteausstattung auf dem Arbeitsblatt vermerken, beziehungsweise am Anfang diesbezüglich klare Anweisungen geben. So gab es dann auf einmal ein paar Reiter zu wenig und man hatte keine Übersicht, welche Gruppe welche Materialien hat. Auch ein paar gute Tipps zur Vorgehensweise beim Messen, hätte die Arbeit erleichtert und Zeit gespart. Ein guter Tipp wäre gewesen, auch die Wand als Schirm zu verwenden und ein Blatt Papier bereit zu halten und die Muster dort aufzuzeichnen. Vielleicht sollte man das Arbeitsblatt im Hinblick darauf noch ergänzen. So haben, glaube ich, nicht alle Gruppen wirklich gemessen, sondern nur versucht, qualitativ einen Unterschied zu sehen. Die Abstände konnten bei einigen Gruppen nicht gut unterschieden werden, da sie zu gering waren. Die Gruppe, die den Laser mit den Händen hochgehalten hat, war sehr kreativ, auch wenn sie sich sehr bemühen mussten, dass ihre Hände nicht zittern. So konnten sie aber den Punkt ausfindig machen, an dem der Laser durch den Doppelspalt geht

und dementsprechend das Material aufbauen. Beim Durchgehen habe ich bemerkt, dass zwei Gruppen ein sehr scharfes Bild des Interferenzmusters bekommen haben und bei ein paar anderen Gruppen das Muster eher verschwommen war. Insgesamt hat es den Schülerinnen und Schülern aber meiner Meinung nach schon gut gefallen, dass sie etwas selbst ausprobieren konnten und viele Gruppen waren wirklich ganz intensiv mit dem Experiment beschäftigt und haben engagiert diskutiert und herumprobiert. Nur eine Mädchengruppe hat etwas viel geplaudert und ist nicht so gut vorangekommen.

Das Experiment, das die Schülerinnen und Schüler selbst machen durften, hat inklusive Auf- und Abbau circa neunundzwanzig Minuten gedauert. Die Lehrkraft führt nun das Demoexperiment durch, das sie vor der Stunde schon fertig am Lehrertisch aufgebaut hat. Für die dritte Fragestellung hat sie einen recht leistungsfähigen Laser, den die Schülerinnen und Schüler nicht in die Hand nehmen dürften. Daher zeigt sie das Experiment vor. Davor möchte sie noch wissen, was die Schülerinnen und Schüler bei den ersten beiden Fragen herausbekommen haben, also welche Abhängigkeiten sie feststellen konnten. Eine Schülerin (S1) beschreibt, dass je größer der Abstand, desto größer der Abstand der schwarzen Linien. Die Lehrkraft sagt, dass sie bemerkt hat, dass schon viele Gruppen mit Proportionalitäten gearbeitet haben und im Experiment gesehen haben, dass in diesem Fall eine direkte Proportionalität vorliegt. Sie fragt in die Klasse, ob alle ungefähr herausbekommen haben, dass bei doppeltem Abstand eine doppelte Entfernung der schwarzen Linien entsteht. „Was passiert mit den schwarzen Linien am Schirm“, wenn man den „Spaltdurchmesser auf dem Dia“ vergrößert? Ein Schüler (S4) sagt, dass die Linien näher zusammenrücken. Die Lehrkraft wiederholt das und stellt fest, dass man hier eine indirekte Proportionalität vermuten kann. Da sie nur zwei Messpunkte haben, könnte es also theoretisch auch was anderes sein, aber es sei der beste Tipp. Sie möchte nun den Zusammenhang formuliert haben, mit  $s$  proportional zu diesem Parameter. Eine Schülerin sagt, dass  $s$  kleiner wird, wenn  $d$  größer wird. Die Lehrkraft bestätigt das, aber fragt nach, wie man das „formal“ beschreiben könnte. Ein Schüler sagt,  $s$  ist indirekt proportional zu  $d$ . Die Lehrkraft sagt daraufhin, ja  $s$  ist proportional zu  $1/d$ . Jetzt werden sie sich anschauen, wie das mit der Wellenlänge zusammenhängt.

Diese Erarbeitung der Proportionalitäten war sehr gut, man hätte aber auch fragen können, ob die Schülerinnen und Schüler wirklich Zahlenwerte gemessen haben, die das so bestätigen können. Es haben sich damit zwar viele schwergetan, aber vielleicht haben doch einige einen Weg gefunden, wie sie das abmessen können. Es wurden Lernende aus verschiedenen Gruppen drangenommen, so fühlten sich alle Gruppen angesprochen und man konnte auch nochmals sehen, dass alle Gruppen Ergebnisse erzielt haben. Das

Benennen des Abstands der Spalte als Spaltdurchmesser auf dem Dia ist etwas unglücklich gewählt.

Die Lehrkraft erklärt, dass der Laser „grün und rot kann“ und fragt, wo der Unterschied liegt. Als keine Antwort aus der Klasse kommt, sagt die Lehrkraft, sie möchte nur einen Zusammenhang hören. Sie möchte wissen, ob die Wellenlänge beim grünen Laserlicht größer oder kleiner als beim roten Laserlicht ist. Nun hört man es in der Klasse murmeln. Ein Schüler meint fragend, dass Rot größer ist. Eine Schülerin denkt, dass Grün eine kleinere hat. Ein Schüler wiederum glaubt, dass Grün eine größere Wellenlänge hat. Zwei Schülerinnen sind sich uneinig, die eine meint größer, die andere kleiner. Die Lehrkraft stellt abschließend fest, dass grünes Licht eine kleinere Wellenlänge hat. Eine Schülerin (S3) gibt darauf ein erstauntes „Was“ von sich. Die Lehrperson erklärt, dass es aber mehr Energie und eine größere Frequenz hat. Nach dieser Aussage hört man viele „Aah“ in der Klasse. Die Schülerinnen und Schüler sollen sich notieren, dass Grün eine kleinere Wellenlänge hat als Rot. Die Lehrkraft schaltet zuerst das rote Laserlicht ein. Sie fordert die Schülerinnen und Schüler auf aufzustehen, um das Interferenzmuster an der Wand sehen zu können. Sie fragt nach, ob es auch alle sehen können. Sie macht das rote Laserlicht aus und schaltet das grüne an. Damit man den Unterschied besser sehen kann, schaltet sie nun das rote Laserlicht dazu und fordert die Schülerinnen und Schüler auf, doch herauszukommen und ihr zu sagen, welche Linien des Interferenzmusters weiter auseinander liegen. Viele nennen das rote Laserlicht. Die Lehrkraft bestätigt das. Sie zählt fünf rote Interferenzlinien ab, zeigt ihnen den Abstand und im Vergleich dazu den Abstand von fünf Interferenzlinien beim grünen Licht. Sie schaltet den Laser aus und die Schülerinnen und Schüler sollen wieder Platz nehmen.

Die Frage nach dem Unterschied zwischen der Wellenlänge von rotem und von grünem Licht, hat alle Schülerinnen und Schüler zum Denken angeregt, aber erst als die Lehrkraft gesagt hat, dass sie nur einen größer/kleiner Zusammenhang möchte. Da haben wirklich alle Schülerinnen und Schüler miteinander diskutiert und sie waren sich auch sehr uneinig. Die Antwort der Lehrkraft hat einige überrascht, aber durch die zusätzliche Erklärung mit der Energie und der Frequenz haben sie sich sozusagen wieder beruhigt und erkannt, dass sie nicht ganz falsch lagen, sondern nur die Zusammenhänge verwechselt haben. Das war eine sehr gute Maßnahme, um alle auf das Experiment zu fokussieren. Das Experiment wurde circa zwei Minuten besprochen, aber die Zeit hat hier gereicht, damit die Schülerinnen und Schüler erkennen, wie die Interferenzmuster zusammenhängen. Dafür ist der Laser, der beide Farben zeigen kann, optimal. Wenn man das nicht hat, kann man die Linien an der Wand von den Schülerinnen und Schüler nachzeichnen lassen und dann vergleichen. Das

funktioniert auch gut, denn das habe ich auch schon selbst ausprobiert, obwohl es etwas länger dauert.

Die Lehrkraft möchte nun die dritte Proportionalität von den Schülerinnen und Schülern hören. Sie schreibt an die Tafel, dass sie schon gefunden haben, dass  $s$  proportional zu  $a$  und indirekt proportional zu  $d$  ist. Sie schreibt an die Tafel: A:  $s \sim a$  und B:  $s \sim \frac{1}{d}$ . Die Großbuchstaben stehen jeweils für das Experiment, aus dem sie diesen Zusammenhang schlussfolgern können. Beim dritten Experiment haben sie  $s$  proportional zu was bekommen? Bei Rot war der größere Abstand. Eine Schülerin antwortet  $s$  ist proportional zu  $\lambda$ . Die Lehrkraft bestätigt das und schreibt an die Tafel C:  $s \sim \lambda$ . Diese drei kann man nun zu einer „schönen Formel“ zusammenfassen. Die Lehrkraft kehrt nun zum Arbeitsblatt zurück. Beim Demonstrationsexperiment haben sie nichts abgemessen, aber die Schülerinnen und Schüler sollen die Proportionalität auf dem Arbeitsblatt notieren. Die Lehrkraft liest den nächsten Punkt vor: Was könnt ihr aus diesen Messungen folgern? Im nächsten Punkt soll die mathematische Formel aufgeschrieben werden. Man kann diese Zusammenhänge zu einer Formel zusammenfassen, ein Schüler (S4) sagt diese sehr leise, die Lehrkraft sagt genau, schreibt an die Tafel und liest dabei auch vor  $s = \frac{a \cdot \lambda}{d}$ .

Die gemeinsame Erarbeitung der Formel hat gut funktioniert, die Schülerinnen und Schüler haben mitgeschrieben und konnten nachvollziehen, wie man zu dieser Formel kommt. Deshalb wurde auch nichts nachgefragt.

Die Schülerinnen und Schüler sollen im Anschluss noch mit der Seite vier des Arbeitsblattes 4 zur Analogie zu Wasserwellen beginnen und die ersten vier Fragen beantworten.

Sie haben noch mit dem Arbeitsblatt 4 begonnen. Kurz danach habe ich mich verabschiedet und mich für die Zusammenarbeit bedankt. Insgesamt hatte ich den Eindruck, dass sie von dieser Stunde sehr viel mitgenommen haben.

### 3.6. Zusammenfassung der Beobachtungen im Hinblick auf ihre Relevanz für die Konzepte

An dieser Stelle sollen noch einmal wichtige Ergebnisse, die sich aus den Unterrichtsbeobachtungen gewinnen lassen, zusammengefasst werden. Einerseits werden Abweichungen des Unterrichts vom Lehrpersonenskript betrachtet, wenn sie zu Verständnisschwierigkeiten führen könnten, andererseits werden die Unterrichtssequenzen, in denen es um die Konzepte geht, die Gegenstand der Interviews sind, nochmals zusammengestellt.

In der ersten Stunde standen viele Begriffsklärungen im Vordergrund, wie kohärente Quellen, die einheitliche Kennzeichnung von Berg und Tal in allen weiteren Abbildungen. Es wurde grundlegend besprochen, wie Teilchen und Wellen wechselwirken und die dazu passenden Simulationen von den Schülerinnen und Schülern in eigenen Worten beschrieben. In dieser Stunde haben sich die Schülerinnen und Schüler nicht sehr schwergetan, wobei aufgefallen ist, dass sie sich nicht ganz korrekt ausdrücken können und die Beschreibungen noch nicht sehr fachsprachlich ausfallen. In der zweiten Stunde haben die Schülerinnen und Schüler am Anfang viel Zeit gebraucht, um in das Thema zurückzufinden. Beim Bearbeiten des Arbeitsblatts 1, bei dem der Gangunterschied eingeführt worden ist, haben sie sich nicht mehr so leichtgetan, was man auch daran erkannt hat, dass der Gangunterschied in den folgenden Stunden immer wieder erklärt werden musste. Hier zeigt sich, dass die Lernenden oft Schwierigkeiten haben, sobald sie Zusammenhänge herstellen sollen, auch wenn ihnen die einzelnen Begriffe, wie sie in der ersten Stunde eingeführt beziehungsweise wiederholt worden sind, vergleichsweise einfach erscheinen.

Im Unterricht schaffen es die Schülerinnen und Schüler nicht, die Eingangsfrage, wie man in der Physik entscheiden kann, welches von zwei Modellen besser passt, für den konkreten Fall zu beantworten. Eine Schülerin (S1) zeigt allerdings einen guten Ansatz, indem sie vorschlägt, dass man ein Experiment durchführt, bei dem man zwei Lichtstrahlen sich kreuzen lässt. Allerdings ist ihre Schlussfolgerung nicht ganz richtig, was von der Lehrperson übergangen wird. (vgl. B3: 40) Auch, dass Interferenz das Phänomen ist, welches Welle und Teilchen unterscheidet, äußert im Unterricht die Lehrperson. (vgl. B3: 40) Die Bedingung für Interferenz wird im Lehrpersonenskript und dementsprechend auch im Unterricht erst am Ende explizit angesprochen (vgl. B4: 52f), deshalb gibt es hier auch Probleme bei den Interviews. Auf die Frage nach der Bedingung für Kohärenz kommen hingegen viele richtige Antworten aus der Klasse. (vgl. B1: 28f) Da ein Schüler auf der Abbildung der beiden kohärenten Quellen sofort erkennt, dass sie phasengleich sind, wird auf den „neuen Begriff“

nicht weiter eingegangen. Hier wäre es im Rückblick meines Erachtens notwendig gewesen, nachzufragen, woran genau er das in der Abbildung erkennen kann. Das wird im Lehrpersonenskript genauer ausgeführt. Die Begriffe gleiche Phase und Gegenphase spielen im Zusammenhang mit dem Verständnis des Gangunterschieds eine wichtige Rolle. Hier könnte eine der Ursachen liegen, warum der Gangunterschied vielen Schülerinnen und Schülern lange Zeit so große Probleme machte. Das Konzept Gangunterschied soll von den Lernenden eigenständig mit Hilfe des Arbeitsblattes 1 erarbeitet werden. Deshalb fehlt im Lehrpersonenskript ein Vorschlag, wie man den Gangunterschied erklären soll. Das führt dazu, dass von der Lehrperson im Zuge des Unterrichts beim Vergleichen der Arbeitsblätter oder bei den Hilfestellungen im Rahmen der Gruppenarbeiten viele verschiedene Erklärungen gegeben werden, die zum Teil sehr kompliziert und unklar formuliert sind. (vgl. B2: 36f, B3: 39, 44, B4: 49f) Was zusätzlich verwirrt hat, ist, dass die Lehrkraft darauf bestanden hat, dass die Schülerinnen und Schüler beim Bestimmen des Gangunterschieds „messen“. Die Möglichkeit des Abzählens der „Sprünge“ wurde auch von vielen Schülerinnen und Schülern genutzt, aber von der Lehrperson nicht als gleichwertige Alternative akzeptiert. Um den Gangunterschied auf der Abbildung von zwei kohärenten Quellen zeigen zu können, sollte nicht nur mit den Simulationen gearbeitet werden, sondern es sollte zusätzlich noch eine Vorlage für den Beamer zur Verfügung gestellt werden, weil das das Vergleichen erleichtert. Während man in der Klasse gemeinsam wiederholt zu einer korrekten Formulierung der Bedingung für destruktive Interferenz und der Bedingung für konstruktive Interferenz gelangte (vgl. B2: 36f, B3: 47, B4: 52), wurde im Unterricht auf die Frage, wie man die Bedeutung von den Vielfachen der Wellenlänge für die Interferenz begründen kann, nicht explizit eingegangen. Das hängt auch damit zusammen, dass das Arbeitsblatt 2 als Hausübung gegeben und in der Klasse nicht verglichen wurde. Insofern wird nicht ausreichend klargestellt, dass entlang einer Knotenlinie immer destruktive beziehungsweise konstruktive Interferenz herrscht, weil alle Knotenpunkte den gleichen Gangunterschied haben, da sich dort die Wellen immer mit Gegenphase beziehungsweise mit gleicher Phase treffen, denn die Entfernung der Knotenpunkte zu der einen beziehungsweise zur anderen Quelle ist für jeden gleich. Da die Wellen weiterlaufen, ist auch an allen Punkten entlang der Linien, an denen im Augenblick kein Schnittpunkt der Wellen liegt, Interferenz. Auch beim Vergleichen der Punkte D und E auf dem Arbeitsblatt 1, wo es um das Einzeichnen der Knotenlinien mit Minima und Maxima geht und die Wasserbewegung analysiert werden soll, werden der gleiche Gangunterschied und die Wasserbewegung entlang der Linien nicht genau genug besprochen. (vgl. B2: 34, 37) Dem Young'schen Doppelspalt Versuch wird im Unterricht nicht die Bedeutung gegeben, die ihm meines Erachtens zukommt. (vgl. B3: 41f) Außerdem werden die Schülererwartungen vor dem Experiment, wie das im Lehrpersonenskript vorgesehen ist, nicht eingeholt. Deshalb erkennen die Schülerinnen und

Schüler das Hell-Dunkel-Muster nicht von selbst, sondern müssen von der Lehrperson darauf hingewiesen werden. Damit geht ein wichtiges Erfolgserlebnis verloren und das Muster prägt sich nicht ein. Dass eine Schülerin (S1) als möglichen Grund für das Muster die Interferenz nennt, wird nicht genug gewürdigt. Die Ähnlichkeiten bei der Interferenz bei Wasser und Licht werden von den Lernenden genannt. (vgl. B4: 51) Der Zusammenhang Berg auf Berg beziehungsweise Tal auf Tal und die hellen Stellen auf dem Schirm bei konstruktiver Interferenz und Tal auf Berg und die dunklen Stellen bei destruktiver Interferenz wird von den Schülerinnen und Schülern formuliert. Der Unterschied, dass man die Interferenz auf der gesamten Wasserfläche, aber beim Laser-Experiment nur auf dem Schirm beobachten kann, muss aus dem Skript vorgelesen werden. (vgl. B4: 51) Ein Schüler sagt, dass sich die Wasserwellen in alle Richtungen ausbreiten. Eine Schülerin erwähnt das Taschenlampenexperiment, das für den Teilchencharakter des Lichts spricht. (vgl. B4: 51) Das Experiment, bei dem die Abhängigkeiten des Abstands der Linien des Interferenzbildes von Licht vom Spaltenabstand im Doppelspalt, vom Abstand des Doppelspalts zum Schirm und von der Wellenlänge untersucht wurden und das Aufstellen der Formel haben den Schülerinnen und Schülern so gut wie keine Probleme bereitet. (vgl. B4: 56f, B5: 57- 62)

### 3.7. Feedback der Lehrperson

Laut der Lehrkraft ist der größte Unterschied des neuen Konzepts im Vergleich zu anderen, dass in der Schulpraxis meist ein „Beugungs-Interferenz-Mischmasch erzeugt“ wird. Sie sieht schon länger die Notwendigkeit diese Themen einzeln zu behandeln, aber hatte bisher noch keine Idee für die Umsetzung. Deshalb hebt die Lehrkraft die getrennte Behandlung des Themas Interferenz als sehr positiv hervor. Ein weiterer Punkt, der der Lehrkraft sehr gut gefallen hat, waren die Arbeitsblätter „abgesehen davon, dass der Zeitrahmen deutlich gesprengt wurde oder in meiner Umsetzung ich ihn deutlich gesprengt habe“.

Beim Unterrichten selbst hat sich die Lehrkraft in den ersten zwei Stunden noch nicht so wohl gefühlt. Sie unterrichtet schon einige Jahre in der Schule, weshalb sie schon ihre eigene Art dieses Thema zu behandeln entwickelt hat und das „quasi schon so auswendig gelernt“ hat. Dadurch musste sie für diese Unterrichtssequenz umlernen und sich das neue Skript einprägen. Am Anfang hat sie sich etwas schwer getan sich zu merken, wann genau welche Frage oder Argumentation kommt oder auch was nicht vorweggenommen werden darf. Sie hat sich ihrer Meinung nach genug Zeit für die Vorbereitung genommen, aber dann gemerkt, dass es doch zu wenig war, um die Sequenz wirklich ganz im Kopf zu haben und

sich ganz wohl zu fühlen. Deshalb hat sie in den ersten zwei Stunden öfters auf die Vorbereitung schauen müssen, weil sie keine Fehler machen wollte.

Bezüglich des Skripts oder auch des „Drehbuches“, wie es von der Lehrkraft genannt wird, wurde die Ausführlichkeit als positiv hervorgehoben. Sie hat es auch als Vorschlag angenommen und ihre Formulierungen der Situation entsprechend angepasst. Als negativ wird empfunden, dass das Skript eine „Spur zu fragend-entwickelnd“ ist. Das ist ein Gegensatz zum Regelunterricht der Lehrkraft. Im Allgemeinen ist ihr Unterricht anders aufgebaut: „Informationsblock, kleinerer Arbeitsauftrag oder sonst was und weniger diese Einzelfragen“, die in die Klasse hineingestellt werden.

Was die Einschätzung der Lehrkraft betrifft, inwiefern die Schülerinnen und Schüler von diesem Konzept profitiert haben, wird eine positive Bilanz gezogen. Die Lehrkraft meint, dass die Schülerinnen und Schüler „am Anfang nicht so genau gewusst haben, worauf wir abzielen“. Es war ihrer Meinung nach „am Anfang sehr detailliert“ und darin sieht sie eine Gefahr, weil die Schülerinnen und Schüler die Wichtigkeit der Aufgaben nicht erkennen, wenn sie so einfach sind. Wenn „sich das dann doch relativ schnell zu einem großen Ganzen zusammensetzt“, haben die Schülerinnen und Schüler das Gelernte vom Anfang vielleicht schon wieder vergessen und können nicht mehr nachvollziehen, wie sie zu diesem Ganzen gekommen sind. Bezüglich der Schwierigkeit und Detailliertheit der Aufgaben ist es „hier ganz einfach schwierig die Balance zu halten“. Denn einerseits sollen die Schülerinnen und Schüler mitkommen, aber andererseits sollen sie nicht den roten Faden und die Aufmerksamkeit verlieren. Diesen etwas zu leicht gewählten Schwierigkeitsgrad am Anfang hat sie bei einigen Schülerinnen und Schülern an „so körpersprachlichen Signalen beziehungsweise an einzelnen Wortmeldungen: naja das ist ja so, und naja, ist eh klar, also diese Wortfetzen, die man erfasst, wenn man bei Gruppenarbeiten durchgeht“ erkannt.

Die Lehrkraft beantwortet die Frage, wie sie die Simulationen der ersten Stunde beurteilt: „Es kam mir vor, dass den Schülern oder mir, vielleicht wars auch nur mir nicht ganz klar, was die Simulationen jetzt eigentlich sollten oder was sie mit dem Text zu tun haben“. An dieser Stelle äußert die Lehrperson auch einen Verbesserungsvorschlag. Auf den Arbeitsblättern sollte es einen Punkt geben, bei dem „man zum Beispiel beschreiben lässt, was in dieser Simulation eigentlich gezeigt wird. Also nicht nur, was man aus dieser Simulation lernt“. Zu den Simulationen wird auch angemerkt, dass es ein relativ großer Zeitaufwand ist, die vielen Links zu kopieren und die Dokumente zu öffnen.

Die Lehrperson meint auch, die Schülerinnen und Schüler „haben sich nicht wahnsinnig schwergetan“. Dadurch, dass die Vermittlung des Lernstoffes sehr kleinschrittig war, so in

der Art eines „Masterylearnings, wo man eben so lang die Sachen macht, bis alle alles verstanden haben“ hat das gut funktioniert. Es wird dadurch aber vielleicht verhindert, dass die Schülerinnen und Schüler die unterschiedliche Wichtigkeit erkennen. Das Interesse der Schülerinnen und Schüler war nach der Einschätzung der Lehrkraft durchaus gegeben. Ein Problem beim Unterricht mit Arbeitsblättern ist, dass manche schneller sind als andere und die dann nicht wissen, was sie machen sollen, wenn sie fertig sind. Andere wiederum könnten sich aus einem anderen Grund langweilen, nämlich, weil sie überfordert sind und es vielleicht an einem Wort scheitert, dass sie die Aufgabenstellung verstehen.

Verbesserungswürdig wäre die Art, wie die Materialien zur Verfügung gestellt wurden. Es ist laut der Lehrkraft einerseits wirtschaftlich schwierig, weil so viele Zettel mit hohen Kopierkosten verbunden sind und andererseits didaktisch problematisch, weil die Schülerinnen und Schüler nicht mit so einer hohen Anzahl an Papieren umgehen können. Es gibt zusätzlich noch Notizen im Heft und da können sie die vielleicht nicht mehr richtig zuordnen. Ein Vorschlag wäre es, eine Art Skript herauszugeben, in dem sich die Schülerinnen und Schüler auch Notizen machen können oder eventuell auch die Materialien online zur Verfügung zu stellen.

Im ersten Teil des Lehrpersonenskripts hat der Verweis auf Arbeitsblatt 2 gefehlt. Bei den Simulationen in der ersten Stunde stehen im Skript sehr viele „Wie-Fragen“. Ein Verbesserungswunsch der Lehrkraft wäre es, diese Fragen teilweise mit Operatoren umzuschreiben, denn im „kompetenzorientierten Unterricht“ kommt man von diesen Fragen weg. „Ich denk mir, also die sind erstens mal ein bisschen unklar und zweitens die W-Fragen zeichnen nicht aus, auf welchen Aspekt die Schüler achten sollen“. Außerdem sind es die Schülerinnen und Schüler jetzt auch schon anders gewohnt. Der Wunsch nach einem extra Dokument mit den Bildern und konzeptuellen Fragen wurde geäußert. Bei der ersten Einheit betrifft das die Abbildungen der kohärenten Quellen und bei der zweiten Einheit die konzeptuellen Fragen. Beides wurde im Unterricht von der Lehrkraft aus dem Word-Dokument des Lehrpersonenskripts heraus geöffnet, was dazu geführt hat, dass die Schülerinnen und Schüler schon etwas vorlesen konnten beziehungsweise, dass bei den Fragen die Antworten, die fettgedruckt waren, rasch umformatiert werden mussten. Außerdem fehlte bei der zweiten der konzeptuellen Fragen in der zweiten Unterrichtseinheit, die Anweisung, dass die richtige Antwort anzukreuzen ist. Bei der dritten Einheit wurde laut der Lehrkraft nicht auf eine Lernschwierigkeit eingegangen, die häufig vorkommt, nämlich, dass am Schirm auch dann ein heller Punkt ist, wenn sich dort gerade kein Schnittpunkt der Wellen mit konstruktiver Interferenz befindet. Damit haben sich dann die Schülerinnen und Schüler ziemlich schwergetan.

Die dritte geplante Unterrichtseinheit ist laut der Lehrkraft sehr gut gegangen. Sie war etwas kompakter und auch nicht zu lang. Es ist relativ schwierig für die Schülerinnen und Schüler, wenn die Hälfte der geplanten Einheit in einer und die andere Hälfte in der nächsten Stunde stattfindet, „das zerfällt dann relativ rasch“. Ein allgemeiner Hinweis ist auch die Seitenzahl auf die Arbeitsblätter zu schreiben, denn wenn die Blätter herunterfallen sollten, kann man die Seiten schneller wieder zusammenfinden.

### 3.8. Feedback der Schülerinnen und des Schülers

Schülerin 1 hat die Arbeitsblätter als sehr positiv hervorgehoben, da sie das im Unterricht in dieser Form noch nicht gehabt haben. „Das Selbstvertiefen“ und dass sie „selbst was arbeiten konnten“ fand die Schülerin gut. Es war auch nach ihrer Einschätzung alles ganz klar, nach der zweiten Stunde war sie sich diesbezüglich nicht mehr so sicher. Generell gab es von ihrer Seite beim Interview keine Fragen, die sie am Ende noch stellen wollte. Sie findet es schade, dass sie nicht ganz fertig geworden sind und meint dass sie das entweder „länger durchmachen“ oder ein „bisschen mehr reinquetschen“ hätten sollen. Bei dem Schülerexperiment ist ihrer Meinung nach nicht immer etwas weitergegangen, weil sie „untereinander tratschen“ und das bei solchen Gruppenarbeiten dann Überhand nimmt. Sie findet, dass es vielleicht besser gewesen wäre, wenn die Lehrkraft das Experiment gezeigt hätte. Sie findet es gut, dass „der Stoff immer wieder wiederholt wurde“ aber sie denkt auch, dass das von der Zeit her mit dem Lehrplan schwierig werden könnte und sie zu langsam waren. Sie ist sich nicht sicher, ob man für die Themen so viel Zeit zur Verfügung hat. Insgesamt habe ich den Eindruck, dass dieser Schülerin die Sequenz sehr gut gefallen hat und sie einen sehr guten Überblick hat. Sie hätte sich sicher auch noch gerne weiter mit dem Thema beschäftigt.

Schülerin 2 findet die Arbeitsaufträge auf den Arbeitsblättern sehr gut. Das Vergleichen in der Klasse findet die Schülerin sehr wichtig, denn so werden offene Fragen beantwortet und „dann kennt sich jeder aus“. Allerdings gehört sie zu den Lernenden, die etwaige Fragen, die auftauchen, auch während der Gruppenarbeit stellen. Sie hat zum Beispiel nicht genau gewusst, was mit „Auslenkung“ gemeint war und hat nachgefragt. Der Wunsch, dass eine Abbildung mit den eingezeichneten Punkten und Linien konstruktiver und destruktiver Interferenz mit dem Beamer projiziert wird, wurde geäußert. Denn wenn die Lehrkraft das nur sagt, „dann weiß ich nicht genau, was jetzt wo hingehört und dann komm ich immer ein bisschen durcheinander und dann tun sich wieder Fragen auf und das ist so ein Kreislauf“. Was das Schülerexperiment betrifft, hätte sie es auch besser gefunden, wenn die Lehrkraft das Experiment gezeigt hätte und sie gleichzeitig das Arbeitsblatt ausgefüllt hätten, denn

„dann ist man hundertprozent sicher, dass man das richtig hat“. Sie mag zwar Experimente, aber nicht so sehr in Gruppen. Man weiß dann nicht „welche Werte man jetzt genau nehmen muss“ und „es ist schwieriger fürs Lernen zu Hause“. Allgemein hat der Schülerin die Sequenz gut gefallen und sie fand es besonders interessant ihre Lehrkraft einmal in einem „anderen Unterricht zu sehen“. Die Arbeitsblätter war sie nicht gewohnt, weil sie sonst alles selbst ins Heft schreiben, aber sie fand es gut so etwas einmal auszuprobieren. Ich glaube, der Schülerin hat die Unterrichtssequenz insgesamt gut gefallen, wobei ich den Eindruck hatte, dass ihr Interesse in der dritten und vierten Stunde ein bisschen nachgelassen hat, aber in der letzten Stunde wieder angestiegen ist. Bei ihr sind auch während des Interviews Fragen aufgetaucht, die sie einfach gestellt hat und durch meine zusätzlichen Erklärungen hat sie die Zusammenhänge dann auch besser verstanden.

Schülerin 3 fand die erste Stunde „sehr angenehm gestaltet“, da man zuerst die Theorie erklärt bekommen hat und sie dann auch noch selbst in den Arbeitsblättern angewendet hat. Das erste Arbeitsblatt hat ihr sehr gut gefallen und war auch „sehr gut verständlich“. Sie hat am Beginn der zweiten Stunde eine „Unruhe“ in der Klasse bemerkt, „weil nicht jeder am selben Stand war“. Nicht alle waren schon gleich weit am Arbeitsblatt oder mussten auch erst wieder in das Thema finden. Aber so etwas ist „eh ganz normal“ und ist nicht an den Materialien gelegen. Sie hat dann in der dritten Stunde mit Schülerin 2 bei der Bearbeitung des Arbeitsblatts Schwierigkeiten gehabt die Gangunterschiede zu bestimmen. Das hatte damit zu tun, dass sie die „Sprünge“ gezählt haben und nicht genau gewusst haben, welchen Weg sie gehen müssen. Andererseits hat es sie aber auch verwirrt, weil der Arbeitsauftrag von der Lehrkraft nicht ganz klar war und sie unter anderem gefragt hat, warum sie „kein Lineal draußen“ haben. Die Schülerin findet, dass das Schülerexperiment gut geklappt hat, der Aufbau und die Zusammenarbeit haben gut funktioniert und „dieses Mal hat sich auch jeder gut ausgekannt“, denn die Anweisungen der Lehrkraft waren „klarer formuliert“. Ihr haben auch die Arbeitsblätter gut gefallen, dass man sie „immer mithat“ und sich auch was ergänzen konnte, wenn man wollte. Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass „jeder auch dasselbe hat“, das ist sonst nicht so bei ihnen, weil nicht jeder dasselbe im Heft stehen hat. Man konnte wirklich gut mit den Arbeitsblättern arbeiten. Im Allgemeinen glaube ich, dass auch dieser Schülerin die Sequenz gut gefallen hat. Sie hat vielleicht nicht immer gleich alles verstanden, aber hat sich sehr bemüht und auch nachgefragt und im Endeffekt schließlich sogar manches besser verstanden als andere.

Schüler 4 fand die Stunden sehr angenehm und alles auch sehr verständlich. Er würde sich wünschen die Blätter in kompakterer Weise zu bekommen, zum Beispiel beidseitig bedruckt. Wie der Stoff vermittelt wurde, war ganz gut. Er ist gut mitgekommen, aber er glaubt, dass manche sich schwergetan haben und dass man dann „nicht Druck machen“ soll, sondern es

„langsam angehen“ und „nochmal wiederholen“ soll. Sonst bekommen diese Schülerinnen und Schüler nur noch mehr Schwierigkeiten. Ich glaube, diesem Schüler hat die Sequenz ebenfalls gut gefallen und er war interessiert bei der Sache. Er hat sich auch nicht sehr schwergetan, wobei er manche Fragen nicht ganz exakt oder nur zum Teil richtig beantworten konnte.

### 3.9. Gedanken zu den Feedbacks

Mir persönlich ist der Schwierigkeitsgrad nicht zu einfach oder auch die fragend-entwickelnde Methode nicht als zu eintönig vorgekommen. Sowohl bei meinen Beobachtungen in der Klasse als auch bei den geführten Interviews gab es immer wieder Punkte, bei denen sich die Schülerinnen und Schüler nicht ganz sicher waren. In den Interviews konnten vergleichsweise einfachere Fragen, wie die nach der Definition der Wellenlänge nicht sicher oder auch nicht korrekt beantwortet werden. Auch in der Klasse habe ich bei den im Plenum gestellten Fragen einige verwirrte Gesichter gesehen oder auch stille Phasen des Nachdenkens erlebt, die zeigen, dass nicht alle Fragen so einfach zu beantworten waren. Nach meiner Einschätzung lag die Unruhe einiger Schülerinnen und Schüler nicht an der mangelnden Aufmerksamkeit, weil der Stoff zu leicht war, sondern an ihrer Verwirrung aufgrund des Zeitdrucks oder weil sie etwas noch nicht genau verstanden hatten. Bei vereinzelt Schülerinnen und Schülern war schon die mangelnde Aufmerksamkeit ein Punkt. Aber ich denke nicht, dass sie sich über etwas anderes unterhalten haben, weil die Fragen zu einfach waren, denn sie hatten dann Schwierigkeiten beim Bearbeiten des Arbeitsblattes, wie ich bemerkt habe.

Bei den Simulationen ist meiner Meinung nach im Lehrpersonenskript schon ausreichend angeführt, warum man sich diese anschaut. Was man aber verbessern könnte, ist, dass man nicht so viele Simulationen hintereinander zeigt. Denn diese große Anzahl an Simulationen hintereinander ist mir selbst etwas zu viel vorgekommen. Da könnte man den Vorschlag, die Simulation beschreiben zu lassen, aufgreifen. Wenn jede Schülerin und jeder Schüler die Simulation auch schriftlich kurz festhalten würde, fände ich das sehr gut. So geht dieses Wissen nicht verloren. Gleichzeitig folgen die Simulationen dann nicht in zu kurzen Abständen. Es wäre auch praktisch, dem Lehrpersonenskript noch ein Dokument hinzufügen, in dem alle Simulationen aufgelistet sind, damit diese schnell im oder vor dem Unterricht geöffnet werden können.

Das Interesse war meiner Beobachtung nach bei den meisten Schülerinnen und Schülern vorhanden. Das Problem mit den Arbeitsblättern besteht natürlich, aber bei

Verständnisfragen kann die Lehrkraft unterstützend eingreifen. Wenn Schülerinnen und Schüler früher fertig sind, könnte man diese bitten, den anderen zu helfen oder sich inzwischen leise zu beschäftigen oder noch zusätzlich etwas zum Thema herauszufinden.

Den Vorschlag einer Anfertigung eines Skripts für die Lernenden finde ich persönlich sehr gut. So hätten die Schülerinnen und Schüler alle Materialien übersichtlich geordnet und könnten sich dort auch ihre Notizen dazu machen. Es müsste natürlich etwas anders aufgebaut sein zum Beispiel mit einem Verweis auf die Simulationen dazwischen. Ein Vorteil ist auch, dass der Einstieg für Schülerinnen und Schüler, die gefehlt haben, einfacher ist. Die Materialien online zur Verfügung zu stellen finde ich in dem Fall nicht so gut, da viel auf den Arbeitsblättern eingezeichnet werden muss. Das wird meiner Meinung nach immer noch am besten mit der Hand auf Papier funktionieren. Zum Beispiel kann man am Computer das Papier nicht mit der Folie überlagern und verschieben, um die Knotenlinien zu sehen.

Im Lehrpersonenskript gibt es meines Erachtens einige Anknüpfungspunkte, anhand derer man thematisieren kann, dass die Abbildung nur eine Momentaufnahme zeigt. Die Simulationen verdeutlichen das zusätzlich. Im Arbeitsblatt 1 wird in den Punkten D und E auf die Wasserbewegung eingegangen. Auch Arbeitsblatt 2 eignet sich dazu, die Interferenz anhand der Knotenlinien zu thematisieren.

Die extra Dokumente mit den Bildern und Links zu den Simulationen würden für die Lehrkraft sicher vieles vereinfachen. Da das aber der erste Probelauf in einer Schule war, musste zuerst ein Augenmerk auf die rasche Übersetzung und die allgemeine Stimmigkeit der Materialien und Arbeitsblätter gelegt werden. Deshalb wäre sich das zeitlich nur sehr schwer ausgegangen, ist aber ein guter Vorschlag für die Zukunft.

Das Feedback der Schülerinnen und Schüler zeigt mir, dass sie es nicht gewohnt sind, mit Arbeitsblättern konfrontiert zu werden und dadurch vielleicht auch etwas länger damit gebraucht haben. Aber es herrscht darüber Konsens, dass die Bearbeitung der Arbeitsblätter interessant war. Im Allgemeinen hat ihnen allen die Unterrichtssequenz gut gefallen, weil es einmal etwas anderes war. Der Aufbau der Materialien hat zu ihrem Verständnis beigetragen. Als positiv wird empfunden, dass alle dieselben Materialien zur Verfügung haben und nicht jede und jeder etwas anderes ins Heft schreibt und sie auch genügend Möglichkeiten haben, selbst zu arbeiten. Die Unsicherheit, ob man auch alle Aufgaben in der Gruppe richtig löst, wird als unangenehm empfunden, weswegen die Möglichkeit nachfragen zu können und ein genaues Vergleichen der Resultate einen wichtigen Stellenwert haben. Während es der Einser-Schülerin teilweise zu langsam weitergegangen ist, hatte der Einser-Schüler den Eindruck, dass der Zeitdruck für schwächere Lernende zu groß war. Ich finde es interessant, dass das Schülerexperiment so unterschiedlich bewertet worden ist. Die eine

Schülerin ist mehr für Demoexperimente, die andere Gruppenarbeiten gegenüber reserviert, beide hätten das Experiment lieber von der Lehrkraft gesehen. Die dritte Schülerin wiederum war von dem Schülerexperiment sehr begeistert und hat meiner Meinung nach auch am meisten davon mitgenommen. Man sieht, dass verschiedene Schülerinnen und Schüler unterschiedliches brauchen, damit sie etwas gut verstehen und man sie anspricht. Deswegen finde ich es auch gut, dass es in dieser Sequenz Methodenvielfalt gibt und auch ein Schülerexperiment eingeplant ist. Mit einer weiten Bandbreite an Methoden kann man am ehesten alle Schülerinnen und Schüler irgendwann erreichen und ich glaube, diese Sequenz hat das ganz gut geschafft. Die Schülerinnen gaben der Lehrkraft noch als Feedback, dass die Interviews viel zu ihrem Verständnis beigetragen haben.

## 4. Interviewanalyse

Wie im Kapitel 1.4. beschrieben, wurden mit vier ausgewählten Schülerinnen und Schülern halboffene Interviews geführt, um ihr Verständnis der Konzepte zu überprüfen. Schülerin 1 (im Folgenden S1) ist eine Einserschülerin, Schülerin 2 (im Folgenden S2) hat einen Zweier in Physik und Schülerin 3 (im Folgenden S3) einen Dreier. Der vierte Schüler (im Folgenden S4) ist ein Einserschüler und wurde einmal zu ausgewählten Fragen aus den ersten drei Interviews befragt. Da S2 krank war, wurde sie zu den Stunden 3-5 an einem Termin interviewt. Der Zeitplan sah folgendermaßen aus:

Fr, 29.03.2019	Erste Unterrichtseinheit
Mi, 03.04.2019	Interviews mit S1, S2, S3
Do, 04.04.2019	Zweite Unterrichtseinheit
Do, 04.04.2019	Interviews mit S1, S2, S3
Fr, 05.04.2019	Dritte Unterrichtseinheit
Mo, 08.04.2019	Interviews mit S1, S3
Di, 09.04.2019	Vierte Unterrichtseinheit
Mi, 10.04.2019	Interview mit S4
Fr, 12.04.2019	Fünfte Unterrichtseinheit
Fr, 12.04.2019	Interviews mit S1, S2, S3

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Konzepte aufgelistet und der Grad des Verständnisses der Schülerinnen und Schüler ist mit einer Farbe gekennzeichnet. Die grüne Farbe gibt ein gutes Verständnis an, die gelbe Farbe ein mittelmäßiges und bei roter Farbe haben die Befragten das Konzept nicht verstanden. Wenn das Konzept bei einer Person horizontal schraffiert ist, wurde diese Frage nicht gestellt. Wenn ein Feld schraffiert und mit einer Farbe unterlegt ist, hat sich die Person zu diesem Konzept nur im Unterricht geäußert. Einige Fragen wurden wiederholt gestellt, in dem Fall wurde die Zelle geteilt. Die erste Farbe zeigt das Verständnis beim ersten Mal und die zweite Farbe das Verständnis beim zweiten Mal.

Nr.	Konzept	S1	S2	S3	S4
1	In der Physik unterscheiden wir zwischen Modellen. Wenn ein Phänomen nur mit einem Modell beschrieben werden kann, ist dieses zu bevorzugen.	Green	Yellow	Red	Green
2	Interferenz ist ein Modell, das Wellen und Teilchen unterscheidet.	Green	Red	Yellow	Red
3	Die Überlagerung von Wellen wird Interferenz genannt.	Red	Green	Yellow	Red
4	Kohärente Quellen sind eine wichtige Bedingung für das Sehen eines Interferenzbildes.	Yellow	Red	Red	Yellow
5	Kohärente Quellen sind Quellen, die Wellen mit gleicher Amplitude, gleicher Frequenz, gleicher Wellenlänge und gleichen Phasen emittieren.	Green	Yellow	Red	Green
6	Die Wellenlänge ist die Entfernung zwischen zwei benachbarten Wellenbergen oder Wellentälern.	Green	Yellow	Green	Hatched
7	Der Gangunterschied ist der Unterschied der Entfernungen des jeweiligen Punktes zu den beiden Quellen.	Red	Yellow	Red	Green
8	Der Gangunterschied wird anhand einer Abbildung erklärt.	Green	Red	Yellow	Green
9	Als Bedingung für destruktive Interferenz muss der Gangunterschied ein ungerades halbzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein.	Green	Yellow	Red	Green
10	Als Bedingung für konstruktive Interferenz muss der Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein.	Green	Red	Red	Green
11	Da die Quellen kohärent sind, ist in einem Punkt konstruktiver Interferenz ein Gangunterschied in ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge zu erwarten und in einem Punkt destruktiver Interferenz ein Gangunterschied in ungeraden halbzahligen Vielfachen der Wellenlänge.	Yellow	Red	Red	Green
12	Eine Linie mit Minima wird in einer Abbildung zweier kohärenter Quellen, die Wellen emittieren, skizziert.	Yellow	Green	Yellow	Red

Nr.	Konzept	S1	S2	S3	S4
13	Das Wasser bewegt sich bei den Minima nicht, es bleibt in Ruhe.				
14	Eine Linie mit Maxima wird in einer Abbildung zweier kohärenter Quellen, die Wellen emittieren, skizziert.				
15	Das Wasser bewegt sich bei den Maxima abwechselnd hinauf und hinunter.				
16	Eine Wellenlänge, die als die Entfernung benachbarter Wellenberge oder Wellentäler definiert ist, wird in einer Abbildung gezeigt.				
17	Die Amplitude, die als Entfernung zwischen der Nulllage und der maximalen Auslenkung definiert ist, wird in einer Abbildung gezeigt.				
18	Interferenz kann man mit einem Experiment, bei dem ein Doppelspalt mit schmalen Spalten verwendet wird, zeigen.				
19	Bei zwei Taschenlampen kann keine Interferenz beobachtet werden, da sie keine kohärenten Quellen sind.				
20	Das Experiment (mit dem roten Laser und einem Doppelspalt), das in der Klasse gemacht wurde, wird beschrieben.				
21	Es entstehen helle und dunkle Streifen im Doppelspaltexperiment, da es konstruktive und destruktive Interferenz gibt.				
22	Das Interferenzmuster, das beim Experiment mit dem Laser und dem Doppelspalt beobachtet werden kann, wird skizziert.				
23	Es gibt bei Wasser und bei Licht konstruktive Interferenz und destruktive Interferenz.				
24	Bei Wasserwellen sieht man die Interferenz auf der ganzen Oberfläche, beim Laser sieht man nur die Interferenzlinien auf dem Schirm.				
25	Die Bedingungen für Maxima und Minima bei Interferenz von Wasser und Licht sind gleich.				

Nr.	Konzept	S1	S2	S3	S4
26	Der Gangunterschied eines Punktes konstruktiver Interferenz wird in einer Abbildung des Interferenzmusters des Lasers bestimmt.				
27	Der Gangunterschied eines Punktes destruktiver Interferenz wird in einer Abbildung des Interferenzmusters des Lasers bestimmt.				
28	Das Interferenzbild des Lasers hängt vom Spaltenabstand der Spalte im Doppelspalt, dem Schirmabstand zum Doppelspalt und der Wellenlänge ab.				
29	Wenn der Spaltenabstand verringert wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden, vergrößert sich der Abstand zwischen den Interferenzlinien.				
30	Wenn die Wellenlänge verringert wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden, verringert sich der Abstand zwischen den Interferenzlinien.				
31	Wenn der Schirmabstand zum Doppelspalt verringert wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden, verringert sich der Abstand zwischen den Interferenzlinien.				
32	Die Formel für den Abstand der Interferenzlinien im Interferenzmuster bei Licht lautet $s = \frac{\lambda a}{d}$ .				
33	Der Abstand der Interferenzlinien ist gleich die Wellenlänge mal dem Schirmabstand dividiert durch den Spaltenabstand.				

Im Folgenden werden die Konzepte der Reihe nach genau analysiert und Begründungen für die Wahl des Grades des Verstehens bei den einzelnen Schülerinnen und dem Schüler gegeben. Es wird nach möglichen Ursachen für das Missverstehen gesucht und gegebenenfalls werden Verbesserungsvorschläge für die Materialien gemacht. Den Anfang bilden jeweils die Bezeichnung des Konzepts und die Frage, die dazu in den Interviews gestellt wurde. Nach der Besprechung der Konzepte werden noch ein paar weitere Arbeitsaufträge, die die Interviewten bekommen haben, angeführt und eine über die Materialien hinausgehende Frage, die zeigen soll, wie sie das Gelernte anwenden können.

#### 4.1. Analyse der einzelnen Konzepte aus der Tabelle

Konzept 1: In der Physik unterscheiden wir zwischen Modellen. Wenn ein Phänomen nur mit einem Modell beschrieben werden kann, ist dieses zu bevorzugen.

Interviewfrage aus Interview 1: Wie kann man in der Physik entscheiden, welches von mehreren Modellen ein Phänomen am besten beschreibt?

S1 hat diese Frage so beantwortet, dass man „anhand von Experimenten mal schaut, stimmt das Modell überhaupt“ und wenn man feststellt, dass dieses Experiment „keinen Einfluss auf mein Modell“ hat, muss man das Modell ändern. Bei der Frage, wie man zwischen mehreren Modellen entscheiden kann, hat S1 alte und neue Modelle verglichen. Bei dem neuen Modell gibt es Erkenntnisse, die beim alten noch nicht bekannt waren, aber das alte Modell ist deswegen nicht falsch, sondern „nur noch nicht so ausgeprägt oder in anderen Teilen vielleicht ausgeprägter“. Der Schülerin ist bewusst, dass das Wissen, das Naturwissenschaften generieren, historisch gewachsen und wissenschaftstheoretisch vorläufig ist. Sie weiß auch, dass verschiedene Modelle nebeneinander existieren können und dass sie empirisch überprüfbar sein müssen. (vgl. SVPH 2018: 277f)

S2 stellt zwar auch den Zusammenhang mit Experimenten her, so wie es in der Klassendiskussion gemacht wurde, aber sie ist sich beim Beantworten der Frage sehr unsicher, was man an der fragenden Antwort „durch Experimente?“ und nach einer Pause „und durch Probieren?“ gemerkt hat. Sie hat noch hinzugefügt, dass man aus den Experimenten feststellen kann, ob sich ein Modell besser eignet als ein anderes. Danach ist nichts mehr dazu gekommen. Diese Schülerin gibt wieder, was im Unterricht gesagt wird, ihre Unsicherheit und Kürze sind aber ein Indiz dafür, dass kein tiefgründiges Verstehen vorhanden ist, deswegen meine Entscheidung für ein mittelmäßiges Verständnis. Sie ist auch der Ansicht, dass man in der Naturwissenschaft durch Probieren zu Wissen gelangen kann. (vgl. SVPH 2018: 279)

S3 konnte sich nicht mehr an die Klassendiskussion erinnern und hat auch den Begriff Phänomen am Anfang nicht einordnen können, was man an der Frage „Phänomen im Sinne von?“ erkennen kann. Als Hilfestellung wurde gefragt, wie man entscheiden könnte, ob für das Licht das Wellenmodell oder das Teilchenmodell besser passt. Darauf gab S3 die Antwort, ob das mit den Tälern und Bergen zusammenhängt. Es wurde weiter gefragt, wie man dann eine Entscheidung treffen kann, wenn bei Licht noch ein anderes Modell vorgeschlagen wird. Daraufhin sagt S3, dass sie sich nicht mehr erinnern kann. Hier ist erkennbar, dass die Diskussion in der Klasse nicht haften geblieben ist, und kein Verständnis für das Wesen der Naturwissenschaften vorhanden ist.

S4 sagt, dass man mehrere Modelle ausprobiert und schaut, welches die „besten Ergebnisse oder die meisten Ergebnisse, die man verwenden könnte“ bringt und das Phänomen somit am besten beschreibt. Er sagt, dass es kein bestes Modell gibt, sondern jedes „seine eigene Präferenz“ hat. Als Beispiel gibt er noch das Wellenmodell und das Teilchenmodell bei Licht an. Dieser Schüler hat die naturwissenschaftliche Vorgehensweise im Kern erfasst. Er geht sogar darauf ein, dass jedes Modell seine Vorteile hat und es eine Reihe von Ergebnissen braucht, um eine Entscheidung treffen zu können.

Konzept 2: Interferenz ist ein Modell, das Wellen und Teilchen unterscheidet.

Interviewfrage aus Interview 1: Durch welches Phänomen unterscheiden sich Wellen von Teilchen?

Interviewfrage aus Interview 3: Ist das Licht Welle oder Teilchen und durch welche Erkenntnis kannst du das begründen?

Zu diesem Konzept wurde im Interview 1 und im Interview 3 eine Frage gestellt. Das Verständnis der Schülerinnen hat sich in diesem Punkt nicht verändert.

S1 hat beim ersten Interview Teilchen und Wellen korrekt nach den Merkmalen, die in den Videos der ersten Stunde beobachtet werden konnten, unterschieden. Teilchen prallen ab und geben „ihren Impuls weiter“, wenn sie gegeneinander stoßen. Wellen haben konstruktive und destruktive Interferenz, wenn sie sich überlagern und sind danach „nicht irgendwie verändert“. Hier ist das Wichtigste auf den Punkt gebracht. Sie unterscheidet bei der Beschreibung auch zwischen Aufeinanderstoßen und Überlagern. Im dritten Interview erklärt S1, dass man „nicht sagen kann, ob Licht Welle oder Teilchen ist“. In manchen Momenten passt das eine Modell besser und in anderen Momenten das andere Modell. Als Beispiel gibt sie zwei Lichtstrahlen, die sich berühren. Diese sind „danach unverändert“ und das „würde für diese Wellentheorie sprechen“. Diese Äußerung hat sie auch im Unterricht gemacht (vgl. B3: 40) Aber sie sagt auch „es ist keine Welle in dem Sinne einer Welle“. Hier sieht man,

dass die Schülerin erkennt, dass Licht mit beiden Modellen beschrieben werden kann, es aber von der Situation abhängt, welches Modell besser passt. Sie führt das darauf zurück, dass Wellen superponieren und dann unverändert weiterlaufen, während sich die Bewegung der Teilchen nach einer Kollision verändert. Sie benennt allerdings nicht die Interferenz als das Phänomen, das den entscheidenden Unterschied ausmacht. Sie deutet auch an, dass Licht keine mechanische Welle ist.

S2 hat sich nicht mehr daran erinnern können, glaubt aber, dass es etwas mit der Bewegung zu tun hatte. Auf den Hinweis, dass sie dazu Videos gesehen haben, hat sie gesagt, dass diese so schnell hintereinander waren. Sie versucht es zusammzusetzen, „Video zu Wellenlänge“ oder „war das so eine Abbildung“, aber es gelingt nicht. Hier sieht man, dass manche Schülerinnen und Schüler sich nicht mehr im Detail erinnern können, wenn die Stunde schon länger zurückliegt. Bei S1 war das nicht der Fall, aber hier hat sich das ausgewirkt. Ein anderer Grund könnte sein, dass die Videos in schneller Abfolge gezeigt wurden und deshalb vielleicht nicht alle richtig zugesehen haben. (vgl. B1: S. 23ff) Im dritten Interview gibt die Schülerin als Begründung, dass Licht eher eine Welle ist, denn „man sagt ja auch die Wellenlänge eines Lichts“. Sie erwähnt auch, dass sie Versuche gemacht haben, um herauszufinden, was sich besser eignet, und Welle herausbekommen haben. Die erste Begründung stützt sich nur auf den Begriff Wellenlänge, was noch keine Begründung ist. Allerdings hat sie auch erkannt, dass sie dazu Versuche gemacht haben, und bei ihnen das Wellenmodell besser passt, aber sie hat nicht erwähnt, wodurch sie das feststellen konnten. Das Phänomen der Interferenz wird nicht erwähnt.

S3 konnte beschreiben, dass sich Teilchen zurückstoßen und wenn ein kleineres und ein größeres aufeinandertreffen, „das kleinere schneller“ weitergeht. Die Wellen „gehen quasi im Gleichschritt“, sie haben gleiche Frequenzen und Phasen und dadurch entstehen die Berge und Täler. S3 konnte beschreiben, wie sich Teilchen und Wellen verhalten, aber hat die beiden Modelle nicht miteinander in Beziehung gesetzt. Ein Missverständnis ist auch, dass Berge und Täler nur entstehen, wenn die Wellen gleiche Frequenzen und Phasen haben. Aber im Vergleich zu S2 ist hier wesentlich mehr Verständnis vorhanden. Beim dritten Interview wurde das Wellenmodell für das Licht gewählt, weil „wenn das Licht sich kreuzt“, dann „blockiert's nicht, sondern geht durch“. Hier ist die Begründung nicht so detailliert, wie beim ersten Interview. Das Wellenmodell wurde wie schon bei S1 auf Grund der Tatsache, dass Lichtstrahlen beim Überlagern nicht aufeinanderprallen und dann unverändert weiterlaufen, gewählt.

S4 wurde nur einmal zu dem Konzept befragt, nämlich mit der Frage aus Interview 1. Wellen können sich „nur in einem bestimmten Medium ausbreiten“ und die Teilchen können sich „frei bewegen“. S4 sieht als Grund, dass die Wellen „einen Ausgangspunkt, eine Quelle“

haben und die Teilchen „keine Quelle“ brauchen. Der Schüler hat hier nicht verstanden, dass es um die Frage geht, wie Teilchen wechselwirken beziehungsweise wie Wellen wechselwirken. Es wird kein Bezug zur Interferenz oder zu den gesehenen Videos hergestellt.

### Fazit zu den Konzepten 1 und 2

Insgesamt kann man bei dieser Frage sagen, dass die Schülerinnen und Schüler keine Verbindung zum Phänomen Interferenz hergestellt haben. Die Videos sind zumindest der Hälfte im Gedächtnis geblieben und auch richtig beschrieben worden. Im Unterricht wurden diese auch sehr ausführlich, wenn auch in etwas schneller Abfolge bearbeitet und es wurde aus den Simulationen der Schluss gezogen, dass nur Wellen interferieren können: Das Phänomen, dass sich „Wellen einmal addieren“ und „einmal subtrahieren können“, nennt man Interferenz. „Das können nur Wellen“. (vgl. B1: 25) Das Phänomen der Interferenz wurde meiner Meinung nach deutlich hervorgehoben, aber anscheinend kann diese Erkenntnis nicht oft genug wiederholt werden. Auch dass der Nachweis von Interferenz beim Licht der Grund für die Überlegungen und Experimente ist, weil das für das Wellenmodell sprechen würde, ist den Lernenden nicht wirklich klar.

Konzept 3: Die Überlagerung von Wellen wird Interferenz genannt.

Interviewfrage aus Interview 1: Wie würdest du denn Begriff Interferenz definieren?

S1 meint, „zwei Wellen verändern irgendwie ihren Zustand“ und dieser Zustand wird positiv oder negativ beeinflusst. Bei S1 ist ein rudimentäres Grundwissen vorhanden, aber sie gibt keine genaue Definition.

S2 definiert die Interferenz als „Überlagerung von Wellen oder die Überschneidung“. Das ist richtig.

S3 sagt zuerst, dass „Wellenfronten aufeinanderstoßen“, verbessert sich dann aber dahingehend, dass sich Wellen nicht rückstoßen, „sondern übereinander gleiten“ und sie am Anfang und am Ende gleich aussehen. Dazwischen wirft sie ein „dass man diese Linien quasi dann verbindet oder sie sich kreuzen“. Das passt nicht zur Definition, aber sie hat erkannt, dass es etwas damit zu tun hat, dass sich die Wellen überlagern.

S4 gibt an, dass er diesen Begriff „nicht definieren“ kann. Er nennt die destruktive und konstruktive Interferenz als Beispiele. Ein spontaner Versuch der Definition ergibt: „wenn

sich eine Art von irgendwas, wenn sich zwei Sachen einfach treffen“. Dieser Versuch ist zu ungenau, weil weder Wellen noch Überlagerung genannt werden.

### Fazit zu Konzept 3

Für Interferenz konnte S2 die beste Definition geben und S4 konnte Interferenz nicht einmal ansatzweise erklären. Das hat überrascht, da der Schüler sonst sehr viel weiß und auch Zusammenhänge erkennen kann. Entweder hat sich der Schüler mit der Definition nicht genau auseinandergesetzt oder er hat zu kompliziert gedacht. Im Lehrpersonenskript gibt es nur die Erklärung, dass „Interferenz ein Phänomen ist, in dem sich Teilchen und Wellen unterscheiden. Nur Wellen können interferieren, Teilchen nicht.“

Konzept 4: Kohärente Quellen sind eine wichtige Bedingung für das Sehen eines Interferenzbildes.

Interviewfrage aus Interview 1: Welche Bedingung ist notwendig, damit Interferenz überhaupt auftreten kann?

Im Zuge meiner Arbeit ist mir aufgefallen, dass diese Frage schlecht formuliert ist. Denn es wird als Antwort nicht nur erwartet, dass sich Wellen überlagern, sondern auch, dass die Quellen kohärent sind. Deshalb müsste die korrekte Frage lauten: „...“, damit man Interferenz überhaupt beobachten kann.“

S1 gibt als Antwort, „sie sind phasengleich, ich bin mir jetzt nicht sicher“. S1 ist sehr unsicher beim Beantworten und kann in diesem Zusammenhang nur den Begriff der Phase nennen und im Folgenden die Gleichheit der Phasen. Sie sagt aber nicht, was sie mit „sie“ meint.

S2 erklärt, dass Wellen notwendig sind und eine Bewegung von diesen. Bei Nachfrage, welche Quellen gebraucht werden, antwortet sie fragend „Lichtquellen zum Beispiel“. Sie fügt noch hinzu „Materialien wie Wasser oder Seile“ und dass es verschiedene Wellen gibt. Auf die Nachfrage, welche Eigenschaft der Wellen wichtig ist, kommt wieder die Begründung, dass sie beweglich sein müssen. Diese Schülerin weiß zwar, dass Interferenz ein Wellenphänomen ist, stellt aber auf Nachfrage keinen Bezug zur Kohärenz der Quellen her.

S3 gibt als Bedingung die Wasserwellen und „dass kein Wind ist oder so“. Auf die Frage, wie die Quellen aussehen, fragt sie nach, ob die Kreisquellen gemeint sind und sagt auf die Bestätigung hin, dass sie „in einer Linie sein“ müssen und „ungefähr gleich groß vielleicht“. Die Schülerin stellt wie S2 keine Verbindung zur Kohärenz her. Die Bedingung, dass kein Wind sein darf, ist sehr interessant, weil es einem zeigt, dass diese Schülerin hier

anscheinend alltagsbezogen denkt. Kreiswellen kann man an der Wasseroberfläche eines Teichs nur gut sehen, wenn es windstill ist.

S4 gibt an, dass man „zwei Quellen, die Wellen aussenden“ braucht. Die Wellen treffen sich „an einem bestimmten Zeitpunkt oder an bestimmten Ort“ und „dann entsteht halt Interferenz“. Auf Nachfrage, was das Besondere an den Quellen ist, erklärt er, dass sie „gleich sind oder in ihren Phasen gleich“. Der Schüler stellt die Beziehung zu den Quellen her, aber nennt den Begriff der Kohärenz nicht.

#### Fazit zu Konzept 4

Der Begriff der Kohärenz wurde zwar im Unterricht definiert (siehe Konzept 5), aber der Begriff wurde nicht unmittelbar damit in Zusammenhang gebracht, dass die Kohärenz der Quellen notwendig ist, damit Interferenz beobachtet werden kann. Auch im Lehrpersonenskript wird an dieser Stelle der Zusammenhang zwischen Interferenz und Kohärenz nicht explizit hergestellt, sondern es wird besprochen, was passiert, wenn zwei kohärente Wellenquellen gleichzeitig schwingen. So kommt man schon auf die Interferenz, aber vielleicht gehört bereits hier ein Satz eingefügt, dass Interferenz immer auftritt, wenn Wellen superponieren, aber kohärente Quellen eine Bedingung dafür sind, dass man Interferenz auch sehen kann.

Konzept 5: Kohärente Quellen sind Quellen, die Wellen mit gleicher Amplitude, gleicher Frequenz, gleicher Wellenlänge und gleichen Phasen emittieren.

Interviewfrage aus Interview 1: Was bedeutet der Begriff kohärent?

S1 beantwortet diese Frage nicht ganz sicher mit gleich großen Wellenbergern und gleich großen Wellentälern. Auf Nachfrage welche Größe dadurch gleich ist, antwortet sie mit der Amplitude und fügt auch noch die Wellenlänge hinzu, die gleich ist. Diese Schülerin hat auf Nachfrage zwei Bedingungen nennen können. Die Phasengleichheit hat sie zwar schon im vorigen Punkt erwähnt, aber nicht mit der Kohärenz in Verbindung gebracht. Die Frequenz wird nicht erwähnt. Im Vergleich zu den anderen Interviewten hat S1 hier mehrere Merkmale benennen können, deswegen wurde hier die Farbe Grün gewählt.

S2 ist sich sehr unsicher beim Beantworten dieser Frage. Es kommt die Rückfrage, ob es das „im Gleichschritt“ war, „also es muss parallel ablaufen vielleicht“. Oder auch gleichzeitig. Auf die Frage welche Größen dann gleich sind, kommt die Amplitude als Antwort. Als gefragt wird, was noch damit zusammenhängt, bietet die Schülerin die konstruktive und die

destruktive Interferenz als Möglichkeit an. Diese Schülerin war sich sehr unsicher, auf Nachfrage hat sie aber den Begriff der Amplitude genannt. Als sie dann die Interferenz erwähnt hat, hat man erkannt, dass sie keine Zusammenhänge zwischen den Begriffen Interferenz und Kohärenz bilden kann.

S3 hat den Begriff der Kohärenz mit der Interferenz in Zusammenhang gebracht, wenn auch unsicher, da sie nachgefragt hat, ob das miteinander zu tun hat. Daraufhin hat sie eher das Phänomen der Interferenz beschrieben, als Bedingungen für die Kohärenz gegeben. „Wenn der Berg sich quasi, quasi sich verdoppelt, weil sie auf einander treffen?“ Auf die Nachfrage, wann sich der Berg verdoppelt, welche Größen da gleich sein müssen, antwortet sie damit, dass „beide zum gleichen Zeitpunkt dort sein“ müssen. Das hat wiederum mehr mit Konzept 11 (Begründung der Bedeutung von Vielfachen der Wellenlänge bei Interferenz) zu tun, das sie hier anscheinend verstanden hat, obwohl sie diesen Zusammenhang später nicht mehr herstellen konnte.

S4 beantwortet diese Frage mit „wenn äh zwei Wellen dieselbe Amplitude, dieselbe Wellenlänge und phasengleich sind“. Er ist sich außerdem sicher, dass es drei Punkte waren, aber weiß nicht, ob er schon alle aufgezählt hat. Er zählt nochmals „phasengleich, gleiche Wellenlänge“. Da wird nachgefragt, was mit der Wellenlänge noch zusammenhängt. Die Energie wird als Antwort gegeben. S4 hat hier die Bedingungen ohne Nachfragen gleich selbst aufgezählt. Die Frequenz ist dem Schüler nicht mehr eingefallen.

### Fazit zu Konzept 5

Im Unterricht wurde dieser Begriff mit der Abbildung der zwei kohärenten Kreiswellen aus dem Lehrpersonenskript gemeinsam mit der Klasse erarbeitet. Die Schülerinnen und Schüler haben selbst erkannt, dass dieselbe Frequenz und dieselbe Wellenlänge vorherrschen und auf Nachfrage, wie es mit der Phase aussieht, auch die gleiche Phase abgeleitet. Die Lehrkraft hat noch den Begriff der Amplitude hinzugefügt und die Schülerinnen und Schüler eine Definition in ihr Heft schreiben lassen: „Wenn zwei Quellen so wie in der Abbildung dieselbe Wellenlänge emittieren, dieselbe Frequenz haben, dieselbe Phasenlage haben und dieselbe Amplitude haben, dann heißen sie kohärent“. (B1: 29) Das Lehrpersonenskript schlägt folgende Definition vor: „Quellen, die Wellen mit gleichen Amplituden, Wellenlängen, Frequenzen und Phasen emittieren, nennen wir kohärente Quellen“. Die Bedingung für Kohärenz wurde eigentlich gut erarbeitet, aber war den Schülerinnen und Schülern doch noch nicht ganz klar. Es wäre hier vielleicht gut, einen Satz wie „Damit Interferenz beobachtet werden kann, brauchen wie kohärente Quellen“, hinzuzufügen, da das vorige Konzept, das mit diesem zusammenhängt, noch weniger verstanden worden ist.

Konzept 6: Die Wellenlänge ist die Entfernung zwischen zwei benachbarten Wellenbergen oder Wellentälern.

Interviewfrage aus Interview 1: Wie würdest du eine Wellenlänge definieren?

S1 hat diese Frage gleich beantwortet: „Wellenlänge ist von einem Berg zum anderen oder von einem Tal zum anderen Tal“. Diese Definition ist etwas ungenau, da ein „anderer Berg“ jeder Berg sein könnte und nicht unbedingt der benachbarte. Auf einer Abbildung mit Kreiswellen konnte S1 die Wellenlänge richtig zeigen. Daher wurde die Farbe Grün gewählt.

S2 erklärt zuerst, dass Wellen „immer Täler und Berge“ haben und die Wellenlänge „immer dieser Abstand dazwischen“ ist. Diese Definition ist nicht richtig, da man ihr nicht wirklich entnehmen kann, welcher Abstand gemeint ist und wenn am ehesten der der halben Wellenlänge zwischen Berg und Tal. Auf einer Abbildung der Kreiswellen konnte S2 die Wellenlänge richtig zeigen. Sie hat nochmals Berge und Täler gezeigt und dann als Beispiel für die Wellenlänge von einem Tal zum benachbarten Tal gezeigt. Dazu hat sie aber wieder „von einem bis zum nächsten“ gesagt, ohne ihre Aussage zu präzisieren. S2 kann die Wellenlänge nur mit Hilfe der Abbildung definieren, daher wurde die Farbe Gelb gewählt.

S3 gibt fragend an „also muss man von einem Berg zum anderen Berg die Wellenlänge abmessen“. Diese Definition ist wie bei S1 ungenau. Auf der Abbildung kann S3 die Wellenlänge korrekt zeigen. Deswegen wurde hier die Farbe Grün gewählt.

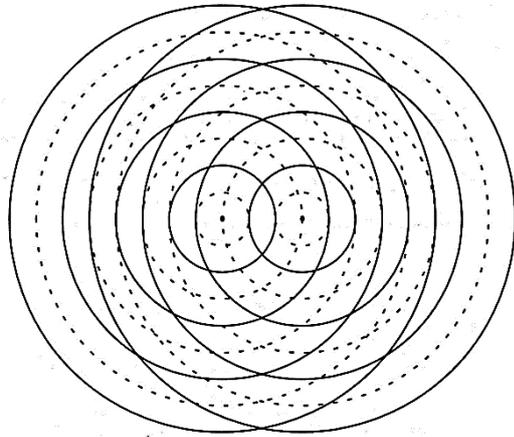
### Fazit zu Konzept 6

Im Unterricht wurde die Wellenlänge nicht sehr ausführlich besprochen. Die Schülerinnen und Schüler sollten sich den Satz „Der Abstand zwischen den durchgezogenen Linien liefert uns die Wellenlänge oder der Abstand zwischen den strichlierten Linien“ notieren. (vgl. B1: 27f) Ein Schüler hatte zuvor als Antwort „zwischen Berg und Berg oder Tal und Tal“ gegeben, ohne den hier wichtigen Begriff benachbart zu nennen. Die Lehrkraft hat ihn nicht ergänzt, sondern die Wellenlänge nur auf der Abbildung gezeigt. Im Lehrpersonenskript wird darauf eingegangen, dass die Entfernung zwischen benachbarten Tälern oder Bergen der Wellenlänge entspricht. Hier war die Abweichung vom Skript der Grund für die ungenaue Definition in den Interviews. Da die Wellenlänge auf der Abbildung richtig gezeigt werden konnte, hatte das allerdings keine Auswirkung auf das Verständnis.

Konzept 7: Der Gangunterschied ist der Unterschied der Entfernungen des jeweiligen Punktes zu den beiden Quellen.

Interviewfrage aus Interview 2: Wie definierst du den Gangunterschied?

Interviewfrage aus Interview 3: Wie definierst du den Gangunterschied?



S1 erklärt hier statt dem Gangunterschied die Interferenz. Sie definiert auf der Abbildung die Täler und die Berge als die strichlierten und dunklen Striche. „Konstruktive Interferenz ist, dass es halt höher raufgeht“ und wenn Berg und Tal aufeinander treffen die „destruktive Interferenz und da ist es dann flach sozusagen“. Sie gibt gleich am Anfang an, dass sie sich da nicht ganz sicher ist. Im nächsten Interview gibt sie zunächst an, dass der Gangunterschied „der Abstand zwischen den zwei Quellen ist“. Aber sie ist sich überhaupt nicht sicher und äußert das auch. Als Hilfestellung wurde eine Zusatzfrage gestellt: „Wie kann man von einem gewissen Punkt den Gangunterschied bestimmen?“. Daraufhin sagt sie, dass man sich einen Punkt aussucht, an dem sich „die Wellen schneiden und die Abstände zwischen jeder Quelle misst“. Das ist eine Verbesserung zum vorigen Interview, da sie nicht mehr die Interferenz mit dem Gangunterschied verwechselt. Es ist zwar nicht präzise formuliert, aber es ist schon mehr Verständnis da, deswegen wechselte der Grad des Verständnisses des Konzeptes hier von Rot zu Gelb.

S2 setzt den Gangunterschied mit dem Punkt, an dem sich die Wellen treffen gleich und setzt sogar auch noch die Quellen mit den Wellen gleich. Sie fragt nach, ob das „im Sinne von, die Differenz?“ gemeint ist. Sie zählt einige Punkte konstruktiver Interferenz auf und zeigt sie in Abbildung A. Auf die nochmalige Frage, wie sie den Gangunterschied beschreiben würde, antwortet S2 „es ist immer, also die Auslenkung maximal und minimal und so weiter“. Der Begriff des Gangunterschieds ist hier auch noch nicht klar. Im nächsten Interview hat S2 mit der richtigen Beschreibung begonnen, wie der Gangunterschied bestimmt werden kann. Man bestimmt den Gangunterschied „bis zu den Quellen“. Auf Nachfrage, was dann noch fehlt, kommt gleich von der Schülerin selbst, dass bei beiden

Quellen der Abstand bestimmt wird und dann noch die Differenz bestimmt werden muss. Bei dieser Schülerin hat sich das Verständnis von Rot zu Grün verändert.

S3 definiert den Gangunterschied kurz und bündig als „die Differenz der Wellenlängen“ und zeigt auch gleich ein Beispiel auf der Abbildung. Dem kann man entnehmen, dass die Schülerin offensichtlich Weglängen, nicht Wellenlängen meint. Sie kann auf der Abbildung zeigen, wie man den Gangunterschied ermittelt. Interessant ist, dass S3 beim nächsten Interview auf diese Frage mit „das weiß ich irgendwie bis heute nicht“ geantwortet hat. Während sie bei der ersten Befragung als einzige halbwegs zeigen konnte, wie man den Gangunterschied feststellen kann, hat sie kein Verständnis dafür entwickelt, was er bedeutet. Das Interview 2 fand statt, nachdem die Schülerinnen und Schüler das Arbeitsblatt 1 in Gruppen bearbeitet hatten. Da wurde der Gangunterschied praktisch ermittelt. Vor dem Interview 3 hat die Lehrkraft im Laufe des Unterrichts viele verschiedene Definitionen für den Gangunterschied gegeben. Das hat möglicherweise für Verwirrung gesorgt und die Schülerin wusste nicht mehr, welche passt oder welche sie sich merken sollte.

S4 erklärt und zeigt den Gangunterschied gleichzeitig. „Dieser Punkt P ist von der Quelle eins halt eine bestimmte Anzahl von, ein bestimmtes Vielfaches von der, von der Wellenlänge entfernt und ein anderes bestimmtes Vielfaches von äh, von der Quelle zwei entfernt und der Unterschied, also die Differenz äh, Unterschiede ist dann äh der Gangunterschied, also der Unterschied der Entfernung von den zwei Quellen“. Dieser Schüler hat das Konzept des Gangunterschieds verstanden. Das Wort Differenz aus dem Unterricht wird kurz eingeworfen, aber dann wird es durch den Begriff Unterschied ersetzt. Das passt viel besser und man hat gemerkt, dass sich der Schüler auskennt. Auch wenn viele verschiedene Definitionen im Unterricht vorkommen, kann er sich seine eigene zusammenstellen.

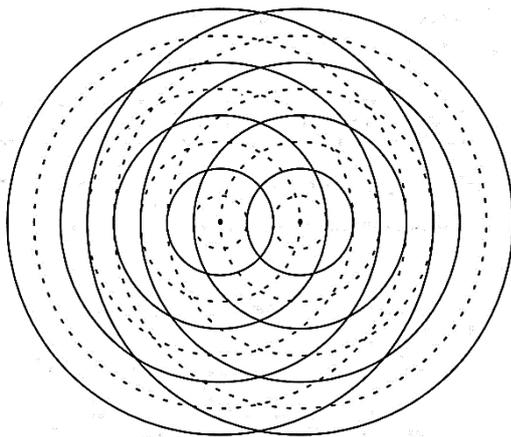
### Fazit zu Konzept 7

Im Unterricht gibt die Lehrkraft viele verschiedene zum Teil sehr komplizierte Erklärungen für den Gangunterschied: „Der Gangunterschied ist sozusagen die Weglänge in Vielfachen von Lambda ausgedrückt und ihre Differenz“ (B2: 36). Man schaut sich „geometrisch die Längen der Verbindungslinien“ an und berechnet dann die Differenz der Längen in Vielfachen von Lambda. (vgl. B3: 39) „Gangunterschied von dem Punkt zu einem Spalt und zum anderen Spalt und dann die Differenz davon“ (B4: 49). „...“, der Gangunterschied ist der Abstand zur Quelle, also der unterschiedliche Abstand zur Quelle“. (B3: 44) „der Gangunterschied der Unterschied zwischen dieser Länge und dieser Länge“, (B4: 49) „Der Unterschied von diesen Längen ist der Gangunterschied“. (B4: 50) Diese Vielzahl an Erklärungen für den

Gangunterschied war vielleicht mitunter verwirrend für die Klasse. Man hat gemerkt, dass noch nicht alle etwas mit dem Begriff anfangen können, was man sogar noch in der Stunde vier bemerken konnte, da bei der Gruppenarbeit wieder fast allen Gruppen der Gangunterschied erklärt werden musste. (vgl. B4: 50) Auf dem Arbeitsblatt 1 wird zwar bei Punkt E. b) der Begriff des Gangunterschieds eingeführt, aber vielleicht sollte auch im Lehrpersonenskript noch eine Definition für den Gangunterschied eingefügt werden, damit man sich als Lehrperson daran orientieren kann. Eine Variation in der Formulierung sollte hier eher vermieden werden, da dieser Begriff eine besonders große Schwierigkeit bei den Lernenden darstellt.

Konzept 8: Der Gangunterschied wird anhand einer Abbildung erklärt.

Interviewfrage aus Interview 2: Such dir einen Punkt aus und bestimme den Gangunterschied von diesem Punkt zur Quelle!



S1 beginnt richtig, zeigt auf der Abbildung einen Punkt destruktiver Interferenz und bestimmt den Abstand des Punktes zu den einzelnen Quellen in Vielfachen der Wellenlänge, indem sie abzählt. Auf Nachfragen nennt sie dann den Unterschied zwischen den beiden Abständen und somit den Gangunterschied. Bei der Gruppenarbeit hat diese Schülerin ihren Kolleginnen erklärt, wie man zum Gangunterschied kommt. (vgl. B3: 43f) Man erkennt, dass sie die Bestimmung des Gangunterschieds bei der Gruppenarbeit verstanden hat.

S2 will den „Gangunterschied von diesem Punkt zur Quelle“ bestimmen. Diese Aussage ist falsch, aber im Weiteren redet sie gleich von zwei Quellen und beschreibt, ob ein Berg oder Tal von den Quellen ausgesendet wurde. Sie bestimmt auch die einzelnen Abstände zu den Quellen in Vielfachen der Wellenlänge, aber erst auf Nachfragen berechnet sie den Unterschied. Die Berechnung war falsch, da sie eineinhalb Wellenlängen und eine Wellenlänge hatte und einen Unterschied von einer Wellenlänge berechnet hat. Sie hat sich

einen Punkt destruktiver Interferenz ausgesucht, aber einen Gangunterschied bekommen, der nur bei konstruktiver Interferenz möglich ist. Das hätte ihr deshalb auffallen sollen.

S3 hat sich etwas schwerer getan den Gangunterschied auf der Abbildung zu bestimmen. Es mussten ein paar Hilfestellungen gegeben werden, wie viele Wellenlängen der Punkt von der anderen Quelle entfernt ist und wie dann der Unterschied zwischen den Abständen ist, aber der Gangunterschied wurde schließlich richtig berechnet. Deshalb wurde hier die Farbe Gelb gewählt. Im Unterricht hat sie die Abstände auch mit dem Lineal ausgemessen und hat nachgefragt, warum da ein negatives Ergebnis herauskommt. (vgl. B3: 47)

S4 zeichnet einen Punkt P ein und erklärt, dass dieser Punkt ein Vielfaches der Wellenlänge von jeweils beiden Quellen entfernt ist und dass der Unterschied zwischen den Entfernungen der Gangunterschied ist. Dazu zeigt er auch auf die richtigen Punkte und die Quellen.

### Fazit zu Konzept 8

In den Interviews wurde der Gangunterschied von den Lernenden mithilfe des Abzählens der Wellenlänge in  $\lambda$  ermittelt. Mit etwas Unterstützung sind alle zu einem Ergebnis gekommen. Der Gangunterschied als ein Vielfaches von  $\lambda$  ergibt sich hier gleichsam von selbst. Im Unterricht drängt die Lehrperson die Schülerinnen und Schüler zum Abmessen. Meines Erachtens erschwert das aber zu begreifen, dass der Gangunterschied ein Vielfaches von  $\lambda$  ist.

Konzept 9: Als Bedingung für destruktive Interferenz muss der Gangunterschied ein ungerades halbzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein.

Interviewfrage aus Interview 2: Wie lautet der Gangunterschied für destruktive Interferenz?

Interviewfrage aus Interview 3: Wie lautet die Bedingung für die konstruktive und die destruktive Interferenz bei zwei Punktquellen?

S1 denkt kurz nach und beantwortet dann die Frage mit einem halben Vielfachen. Sie kann auch die Formel, die sie im Unterricht dazu aufgestellt haben wiedergeben „das war dieses zwei n plus eins mal  $\lambda$  halbe“. Auf die Nachfrage, ob sie diese auch in eigene Worte fassen kann, erklärt S1 die Formel. Die „ $\lambda$  Halbe“ sagen einem, dass bei destruktiver Interferenz „es immer irgendwas mit halben ist“ und „davor ist ein Ausdruck, damit ich nur die ungeraden“ aussuche. Diese Schülerin hat die Bedingung für die destruktive Interferenz sehr gut verstanden und auch die Formel sowohl formal als auch in eigenen Worten sehr gut beschreiben können. In der zweiten Unterrichtsstunde hat S1 eigenständig versucht eine

Formel für die Bedingung der destruktiven Interferenz anzugeben. Sie hat dabei mit Funktionen gearbeitet und ist so auf die Formel  $f(\lambda) + e\left(\frac{\lambda}{2}\right) = 0$  gekommen. Sie hat diese auch beschrieben und erklärt, dass die Funktionen „phasenverschoben um ein halbes“ sind. Hier zeigt sich das sehr gute Verständnis dieser Schülerin. (vgl. B2: 36) Beim nächsten Interview hingegen antwortet sie auf die Frage mit „bei destruktiv muss es phasenverschoben sein“. Sie definiert nicht genau, was „es“ ist, beziehungsweise was genau sie meint. Allerdings liegt sie mit ihrer Aussage auch nicht ganz falsch, sie hätte nur noch ausformuliert gehört. Da hätte ich noch nachfragen können. Durch die ungenaue Formulierung ist hier ihr Verständnis mit mittelmäßig gekennzeichnet.

S2 beantwortet diese Frage kurz und auch gleich in Verbindung mit der konstruktiven Interferenz. Zur destruktiven Interferenz sagt sie, „das mit dem eine ganze Wellenlänge plus eine halbe“. Diesen Zusammenhang hat sich S2 richtig gemerkt und kann ihn auch wiedergeben. Im nächsten Interview erklärt S2 auch zusätzlich, dass destruktive Interferenz auftritt, „wenn Tal auf Berg trifft“. Auf die Nachfrage wie die Vielfachen der Wellenlängen damit in Zusammenhang stehen, erklärt sie, dass es bei der destruktiven Interferenz die halbzahligen Vielfachen sind. Hier erklärt die Schülerin die destruktive Interferenz zunächst sehr gut und kann auch bei den Vielfachen die halbzahligen und die ganzzahligen zuordnen. Es war zwar nicht ganz präzise, da die ungeraden halbzahligen Vielfachen gesucht sind. Trotzdem ist das Verständnis schon recht gut.

S3 versteht zuerst nicht, was destruktive Interferenz ist. Sie zeigt auf der Abbildung einen Abstand und sagt „destruktiv ist ähm quasi wenn von hier zu hier“. Auf nochmaliges Fragen weiß sie keine Antwort, „ist das nicht von Wellental zu Wellen“. Daraufhin zeige ich ihr ein Minimum und benenne es als solches. Sie hat aber nicht erkannt, dass es dabei um einen Punkt geht und fragt wieder „von hier zu hier?“. Ich erkläre dann, dass bei einem Minimum ein Berg auf ein Tal trifft und sie beendet den Satz mit „das ist dann die destruktive“. Daraufhin erkennt sie das Minimum und sagt auch, dass die Auslenkung Null ist. Im Folgenden gibt sie noch zwei Beispiele für den Gangunterschied zu einem Punkt auf der Abbildung. Nachdem erst nach meiner Erklärung zwei Beispiele gegeben werden konnten und kein Versuch einer Definition der Bedingung erfolgte, wurde hier die Farbe Rot gewählt. Beim zweiten Interview hat S3 zunächst erklärt, dass die destruktive Interferenz vorliegt, wenn „ein Wellenberg und ein Wellental aufeinandertrifft“. Sie erwähnt auch, dass dort „die Welle in Ruhe“ ist. Auf Nachfragen welche Vielfachen der Wellenlänge hier wichtig sind, antwortet sie mit „halbzahlig“. Diese Antwort hat sie auch in der vierten Unterrichtsstunde gegeben: ein halbzahliges Vielfaches von Lambda (vgl. B4: 52). Die Lehrkraft hat sie ausgebessert und gesagt, dass es nur die ungeraden halbzahligen Vielfachen sind, allerdings hat die Lehrperson selbst am Ende der dritten Stunde auch nur halbzahlige

Vielfache gesagt (vgl. B3: 47). Vielleicht hat das dazu geführt, dass die Schülerin sich gedacht hat, dass es nicht so wichtig ist, wenn es nicht immer betont wird. Ihr Verständnis für dieses Konzept hat sich sehr gebessert, von keinem Verständnis zu gutem Verständnis. Auch dass sie den Begriff der destruktiven Interferenz zuerst erklärt und auch die Wasserbewegung miteinbezieht, finde ich sehr gut, das zeigt, dass sie die destruktive Interferenz schon viel besser verstanden hat.

S4 erklärt zuerst die destruktive Interferenz „wenn sich Wellental und Wellenberg treffen“. Er fügt gleich hinzu, dass es „ein ungerades Vielfaches, halbes Vielfaches“ von der Wellenlänge ist. Davor hat er kurz gesagt, dass ein Vielfaches von  $n$  gemeint ist, aber hat sich sofort ausgebessert. Dieser Schüler hat dieses Konzept sehr gut verstanden und konnte ohne Nachfragen die richtige Antwort formulieren.

Im Unterricht wurde dieses Konzept sowohl mit Hilfe des Arbeitsblattes 1 selbstständig in Kleingruppen als auch anhand von Simulationen gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern erarbeitet und im Unterricht laufend thematisiert, wiederholt und angewendet.

Konzept 10: Als Bedingung für konstruktive Interferenz muss der Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein.

Interviewfrage aus Interview 2: Wie lautet der Gangunterschied für konstruktive Interferenz?

Interviewfrage aus Interview 3: Wie lautet die Bedingung für die konstruktive und die destruktive Interferenz bei zwei Punktquellen?

S1 zeichnet als Beispiel einen Punkt auf der Abbildung ein und erklärt, dass der eine Abstand zur Quelle ein  $\lambda$  ist und der andere zwei  $\lambda$ , „also ist der Unterschied ein ganzes  $\lambda$ “. Das wurde richtig erklärt und auf die Nachfrage, wie der Gangunterschied für konstruktive Interferenz generell lautet, kommt die richtige Antwort „das ist immer ein Vielfaches von  $\lambda$ . Also ein ganzes Vielfaches.“ Dieses Konzept hat S1 sehr gut verstanden. Im nächsten Interview hingegen erklärt sie nur, dass es bei „konstruktiv halt phasengleich“ ist. Sie definiert nicht genau, was sie mit „es“ meint oder wie die Interferenz mit den Vielfachen der Wellenlänge zusammenhängt. Deswegen wurde hier die Farbe Gelb im Vergleich zur ersten viel besseren Erklärung gewählt.

S2 erklärt, dass „konstruktive ist das mit den Vielfachen“ aber sagt nicht genau welche Vielfachen sie meint, wohingegen sie die destruktive Interferenz im selben Satz sehr detailliert erklärt, deswegen wird hierfür die Farbe Rot gewählt. Im nächsten Interview erklärt S2 zunächst, dass die konstruktive Interferenz vorherrscht, „wenn zwei Wellenberge aufeinandertreffen oder Täler“. Auf die Nachfrage, wie das mit den Vielfachen der

Wellenlänge zusammenhängt, gibt sie gleich als richtige Antwort, dass „die ganzzahligen sind bei konstruktiven“. Hier hat sich das Verständnis wesentlich verbessert und wechselt von keinem zu gutem Verständnis.

S3 fragt zuerst nach, ob das „zwischen Berg und Berg“ wäre. Auf die Bestätigung hin überlegt sie laut, ob es „eins oder eineinhalb“ ist. Sie zeigt dabei auf einen Punkt, der von beiden Quellen einen Abstand von einem halben  $\lambda$  hat. Aber statt den Unterschied zwischen den Abständen zu betrachten, zählt sie diese zusammen: „aber ich glaub es ist eher ein  $\lambda$ , weil hier ist ein halbes und hier ist ein halbes“. Ich zeige ihr einen anderen Punkt konstruktiver Interferenz und frage, wie es bei diesem aussieht. Den einen Abstand gibt sie richtig mit einem  $\lambda$  und ein halbes an, aber den zweiten Abstand kann sie unmittelbar nicht bestimmen, denn „die Quelle ist ja schräg unten“. Auf nochmaliges Nachfragen kann sie zaghaft den richtigen Abstand von zweieinhalb  $\lambda$  abzählen. Ich fasse zusammen, dass sie besprochen haben, dass es einmal ein ungerades halbzahliges Vielfaches ist und einmal ein ganzzahliges Vielfaches, darauf sagt S3 aber nur „genau“. Hier erkennt man, dass sie das Konzept noch nicht verstanden hat. Im nächsten Interview erklärt sie genauso wie S2, dass die „konstruktive Interferenz ist quasi, wenn die Welle dann ausschlägt, also ein Wellenberg auf ein Wellenberg oder ein Wellental auf ein Wellental“ mit noch etwas genauerer Definition der konstruktiven Interferenz und unter Einbeziehen der Wasserbewegung. Auf die Nachfrage, wo die ungeraden halbzahligen Vielfachen und die ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge vorliegen, antwortet sie richtig mit „ganzzahlig ist die konstruktive“. Das Verständnis dieser Schülerin hat sich verbessert von keinem Verständnis zu gutem Verständnis.

S4 gibt als Bedingung für die konstruktive Interferenz an, dass der Gangunterschied „n mal  $\lambda$ , also n mal die Wellenlänge“ ist. Er gibt hier aber nicht an, was genau n ist.

Konzept 11: Da die Quellen kohärent sind, ist in einem Punkt konstruktiver Interferenz ein Gangunterschied in ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge zu erwarten und in einem Punkt destruktiver Interferenz ein Gangunterschied in ungeraden halbzahligen Vielfachen der Wellenlänge.

Interviewfrage aus Interview 2: Warum ist das genau ein Vielfaches oder ein ungerades halbzahliges Vielfaches von der Wellenlänge? (Anm. das Vielfache des Gangunterschieds bei konstruktiver und destruktiver Interferenz)

S1 antwortet vom Sinn her richtig, aber drückt sich nicht physikalisch korrekt aus. Sie sagt, dass es damit zusammenhängt, dass „sie halt entweder phasengleich oder phasenverschoben“ sind, aber definiert nicht genau, was „sie“ sind. Auf die Nachfrage, wann

phasengleich und phasenverschoben zutrifft, gibt sie richtig an, dass bei konstruktiver Interferenz die Phasengleichheit wichtig ist und bei destruktiver Interferenz „wenn's unterschiedlich ist“. Wegen der ungenauen Ausdrucksweise wird hier nur ein mittelmäßiges Verständnis erkannt.

Bei S2 ist bei diesem Konzept kein Verständnis vorhanden. Sie versteht die Frage zuerst nicht. Ich versuche sie durch verschiedene Punkte destruktiver und konstruktiver Interferenz zu einer Begründung zu führen. Sie erkennt einen Punkt konstruktiver Interferenz und kann auch definieren, dass bei destruktiver Interferenz Berg auf Tal trifft. Allerdings hat sie auf die Frage nach den Vielfachen „entweder ganzzahlig“ oder „halbzahlig“ angegeben, aber wieder gemeint, dass sie es nicht versteht. Beim nächsten Beispiel eines Punkts kann sie den Gangunterschied nicht selbstständig ausrechnen, sondern muss kleinschrittig hingeführt werden.

S3 gibt darauf als Antwort „wenn quasi, weil die Wellenlänge von Minima zu Minima hier eine, also ganzzahlig, eine Wellenlänge ist und dadurch eine ganze Zahl ist. Und von destruktiven Punkten, die in Ruhe sind, ist es hier ein halbes, also hier nur Halbzahlige“. Diese Antwort ist sehr verworren, es ist zwar ein möglicher Ansatz zu erkennen, aber das Verständnis ist zu rudimentär. Im Unterricht hat sie auf die Frage, warum ein Punkt in Ruhe nicht denselben Abstand von beiden Quellen haben kann, geantwortet, dass „der Abstand ein geringer als von Quelle zu Quelle ist“, wenn sich Wellenberg und Wellental treffen, wenn man das „abmisst“. Hier hat sie auch eine falsche Schlussfolgerung gezogen, da es nicht vom Abstand zwischen den beiden Quellen abhängt, warum ein Punkt in Ruhe nicht den gleichen Abstand zu den Quellen haben kann. Sie wird hier nicht von der Lehrkraft ausgebessert. (vgl. B2: 35)

S4 trifft hier eine richtige Aussage zu dem Konzept. Er kann als einziger eine Begründung geben, warum bestimmte Vielfache bei destruktiver und konstruktiver Interferenz auftreten. „Es gibt ja Wellental und Wellenberg und die sind halt phasenverschoben, nicht gleich weit entfernt und daher ist es eigentlich logisch, dass es unterschiedlich ist.“ Die Formulierung ist zwar etwas umständlich, aber der Schüler zeigt den Kern der Sache auf und beantwortet die Frage so, dass man erkennen kann, dass er ein gutes Verständnis für dieses Konzept entwickelt hat.

### Fazit zu Konzept 11

Im Lehrpersonenskript wird nach der Besprechung des Arbeitsblattes 1 die Interpretation der Bedingung für konstruktive und destruktive Interferenz angeregt. Es soll auch erklärt werden,

warum der Gangunterschied wichtig ist. Auch Phase und Gegenphase werden hier erwähnt. Darauf wird im Unterricht nicht konkret eingegangen und auch das Arbeitsblatt 2, das diese Thematik vertieft, wird nur als Hausübung gegeben und nicht gemeinsam verglichen. Deshalb wurde dieses Konzept im Unterricht nicht explizit vermittelt. Nur die Frage aus dem Arbeitsblatt 1 E. a), die am ehesten in diese Richtung geht, wurde in den Gruppen und gemeinsam besprochen. Im Unterricht wurden auf die Frage, warum ein Punkt, bei dem die Wasserfläche in Ruhe ist, nicht von beiden Quellen gleich weit entfernt sein kann, viele verschiedene Antworten gegeben: „Weil die Quellen phasenverschoben sind“, „weil der Abstand ein geringerer als von Quelle zu Quelle ist“ (Anm. von S3), „weil die Punkte in einer Waagrechten liegen“, weil „die Punkte immer denselben Abstand zur Quelle“ haben und die Wellen „sich gleich schnell ausbreiten“ und dadurch nur Berg auf Berg oder Tal auf Tal aufeinander treffen. Die Aussagen wurden im Unterricht von der Lehrkraft nicht kommentiert, sie hat nur weitere Antworten gesammelt oder nach Umformulierungen gesucht. Hier wäre es sehr wichtig gewesen, die Antworten zu besprechen und zwar dahingehend, dass die Schülerinnen und Schüler am Ende wissen, welche der Antworten richtig ist. (vgl. B3: 35) Wie man in den Interviews sieht, hat nur ein Schüler, der sonst auch sehr gut in Physik ist, diesen wichtigen Zusammenhang verstanden. Dass die Quellen phasenverschoben sind, ist eine falsche Aussage, denn die Quellen sind kohärent und somit phasengleich. In der ersten Aussage wird aber von phasenverschobenen Quellen ausgegangen. Das wäre sehr wichtig gewesen zu präzisieren. Dass die Punkte auf einer Waagrechten liegen, stimmt auch nicht ganz, sie liegen auf einer Knotenlinie und hier hätte das aufgegriffen und nochmal betont werden können, da das auch nicht von allen verstanden worden ist. Die letzte Aussage kommt schon sehr nahe an eine richtige Antwort heran und gehört nur nochmals genauer formuliert, sodass alle mitdenken können. So sind aber alle Antworten als mögliche richtige Antworten im Raum stehen geblieben.

Konzept 12: Eine Linie mit Minima wird in einer Abbildung zweier kohärenter Quellen, die Wellen emittieren, skizziert.

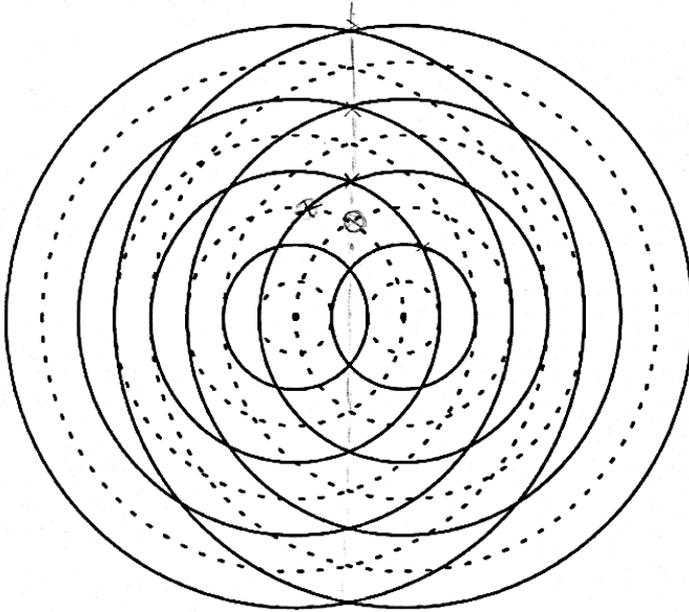
Interviewfrage aus Interview 2: Skizziere eine Linie, wo Minima sind. (Zum Einzeichnen Abbildung A)

S1 zeichnet zuerst einen Punkt ein, an dem sich ein Wellenberg und ein Wellenberg treffen und sagt auch „Minima sind zum Beispiel da, wo sich die Täler treffen“.

I2, S1

**ABBILDUNG A**

Die Abbildung veranschaulicht Wellenfronten, die durch zwei Punktquellen erzeugt werden.



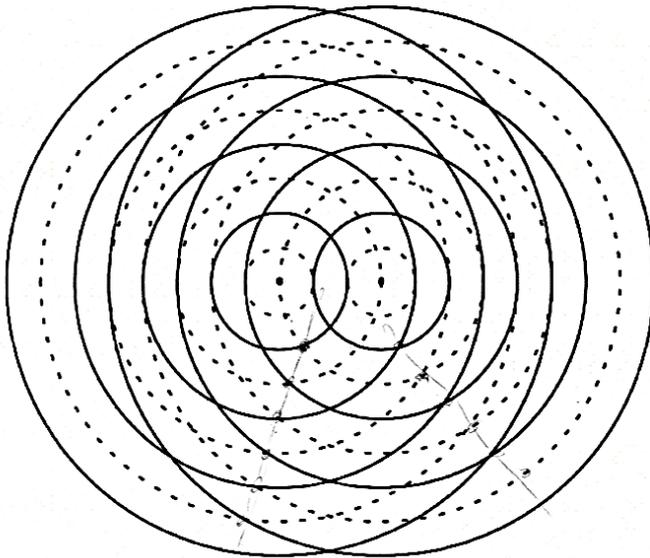
Nach einer Umformulierung der Frage „wo die Auslenkung minimal ist?“ kann sie eine richtige Antwort geben, „das ist das wo halt destruktive Interferenz passiert“. Nachdem nach Umformulierung der Frage eine richtige Antwort gegeben werden konnte, aber keine Linie eingezeichnet wurde, kann hier ein teilweises Verständnis für das Konzept gesehen werden.

S2 fragt nach, ob die Minima da sind, „wo 0 ist oder wo kleiner, also Minima“. Sie hat zwar zuerst eine falsche Vermutung, wo Minima liegen, aber sie fragt nach, weil sie sich nicht ganz sicher ist. Auf die Erklärung, dass die Minima eine minimale Auslenkung bedeuten, zeichnet sie einen Punkt ein, an dem sich Wellenberg und Wellental treffen. Auf die Nachfrage, ob sie auch eine Linie einzeichnen kann, zeichnet sie die Linie richtig in die Abbildung ein. Diese Schülerin hat das Konzept verstanden.

I2,52

**ABBILDUNG A**

Die Abbildung veranschaulicht Wellenfronten, die durch zwei Punktquellen erzeugt werden.

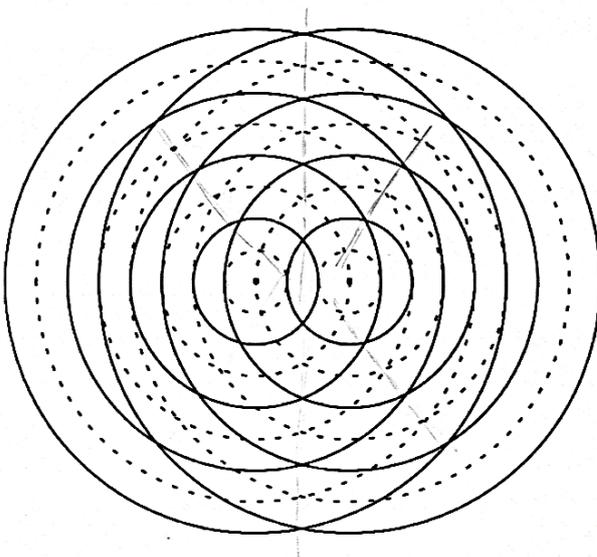


S3 erklärt, „es wär ein Strich durch und so ein X hier und hier“. Sie zeichnet die Linien auf der Abbildung ein.

I2,53

**ABBILDUNG A**

Die Abbildung veranschaulicht Wellenfronten, die durch zwei Punktquellen erzeugt werden.

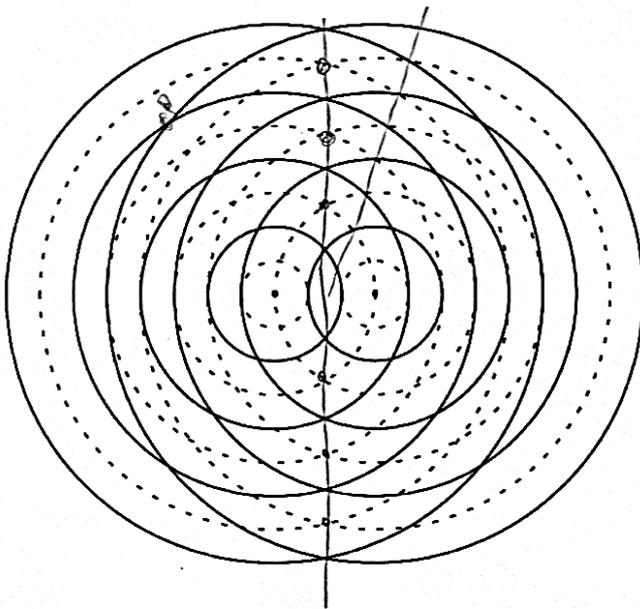


Dabei zeichnet sie aber nur Linien konstruktiver Interferenz ein, deswegen hat sie das Konzept nicht verstanden. Sie erklärt auch, dass da Minima sind und dazwischen die Maxima.

S4 setzt hier Minima mit maximaler Auslenkung unter der Nulllage also mit konstruktiver Interferenz gleich „Minima ist, wenn Wellental auf Wellental trifft“. Er zeigt einen Punkt dazu auf der Abbildung (Anm.: einen Punkt konstruktiver Interferenz Tal auf Tal).

**ABBILDUNG A**

Die Abbildung veranschaulicht Wellenfronten, die durch zwei Punktquellen erzeugt werden.



Auf Nachfrage, ob das ein Minimum oder ein Maximum ist, definiert er die strichlierten Linien als Wellentäler und erklärt nochmals „die Minima sind an den Punkten, wo sich zwei Wellentäler treffen. Und auf der Linie sind halt noch die Wellen, äh die Maxima“ und zeichnet eine Linie konstruktiver Interferenz ein. S4 hat dieses Konzept genauso wie S3 falsch verstanden. Erst auf Nachfrage, wo eine Linie destruktiver Interferenz ist, zeichnet er eine Linie destruktiver Interferenz ein und erklärt auch, dass hier „Wellental auf Wellenberg“ trifft.

Konzept 13: Das Wasser bewegt sich bei den Minima nicht, es bleibt in Ruhe.

Interviewfrage aus Interview 2: Skizziere eine Linie, wo Minima sind. Wie ändert sich da die Wasserbewegung?

S1 erklärt „bevor die Quelle, also bevor halt irgendwas kommt, ist mal halt flach“. Etwas umständlich formuliert meint sie, dass die Wasseroberfläche in Ruhe bleibt, bevor die Quellen zum Schwingen beginnen. „Dann nähert sich halt ein Berg und ein Tal und

deswegen bleibt das weiter flach, weil sie sich auslöschen“. Diese Formulierung ist korrekt und gibt den Kern des Konzepts wieder.

S2 gibt als Antwort „die Wasserbewegung ist da Null und bleibt auch Null, also die Auslenkung ist Null“. Diese Antwort ist richtig, auch wenn sie nicht so gut formuliert ist.

S3 hat hier die Minima und Maxima vertauscht, deswegen wurde die Frage umformuliert „wenn sie sich auslöschen, wie ändert sich da die Wasserbewegung“? Die Schülerin antwortet hierauf, dass „das Wasser ja komplett in Ruhe“ ist. Diese Antwort ist richtig, aber wäre mit der Zwischenfrage nicht so gekommen, deswegen wird hier nur ein mittelmäßiges Verständnis erkannt.

S4 erkennt richtig, „es bleibt in Ruhe“.

Konzept 14: Eine Linie mit Maxima wird in einer Abbildung zweier kohärenter Quellen, die Wellen emittieren, skizziert.

Interviewfrage aus Interview 2: Skizziere eine Linie, wo nur Maxima sind. (Einzeichnen auf Abbildung A)

S1 zeichnet ein paar Punkte auf der Abbildung ein, aber nur solche, an denen sich Wellenberg und Wellenberg treffen. (Anm. der eingezeichnete Punkt Wellenberg auf Wellenberg wurde bereits zu Konzept 12 eingezeichnet) Sie zeichnet auch die Linie ein. „Da kommt dann halt ein Berg und ein Berg und der Punkt wird doppelt so hoch angehoben wie ein Berg oder halt doppelt so tief nach unten versetzt“. Hier erklärt sie auch die Auslenkung der Welle beim Treffen von Wellental und Wellental, aber benennt das nicht in dieser Weise. Der Berg wird „angehoben“ oder „nach unten versetzt“. Die Linie wurde richtig eingezeichnet, aber das Verständnis, dass Tal und Tal genauso zu den Maxima gehört, ist noch nicht ganz vorhanden, deswegen wurde hier ein mittelmäßiges Verständnis gewählt.

S2 zeichnet die Linie auf der Abbildung richtig ein, zuerst ein paar Punkte, an denen sich sowohl Berg und Berg als auch Tal und Tal treffen und dann die Linie durch diese Punkte.

S3 hat diese Frage bei Konzept 12 mitbeantwortet, da sie die Minima und Maxima falsch verstanden hat. Sie zeichnet nur Linien konstruktiver Interferenz ein und benennt diese als Minima. Sie erklärt, dass entlang dieser Linien Minima sind und dazwischen die Maxima.

S4 hat die Linien konstruktiver Interferenz eingezeichnet, allerdings auf die Frage, wo eine Linie mit Minima ist. Dementsprechend hat er diese beiden Konzept 12 und 14 nicht verstanden.

Konzept 15: Das Wasser bewegt sich bei den Maxima abwechselnd hinauf und hinunter.

Interviewfrage aus Interview 2: Skizziere eine Linie, wo nur Maxima sind. Wie ändert sich die Wasserbewegung?

S1 antwortet darauf „sie springt halt zwischen ganz hoch und ganz tief hin und her“. Diese Antwort ist richtig.

S2 erklärt, dass es „entweder bei den Bergen hoch und dann wieder äh runter und hoch und runter, also immer so abwechselnd und so weiter“ geht. Diese Antwort ist richtig und auch gut formuliert.

S3 erklärt hier allerdings sehr fragend, dass „ein Minima wird zu einem Maxima, das heißt die Auslenkung wird verändert?“. Es geht „von Minima auf Maxima, aber die Welle bewegt sich trotzdem weiter“. Sie fügt noch hinzu „also ohne irgendeine Interferenz“. Diese Aussage ist falsch und zeigt, dass die Schülerin ein vollkommen wirres Verständnis von diesem Konzept hat.

S4 erkennt richtig, dass „es halt einmal hoch und einmal runter“ geht.

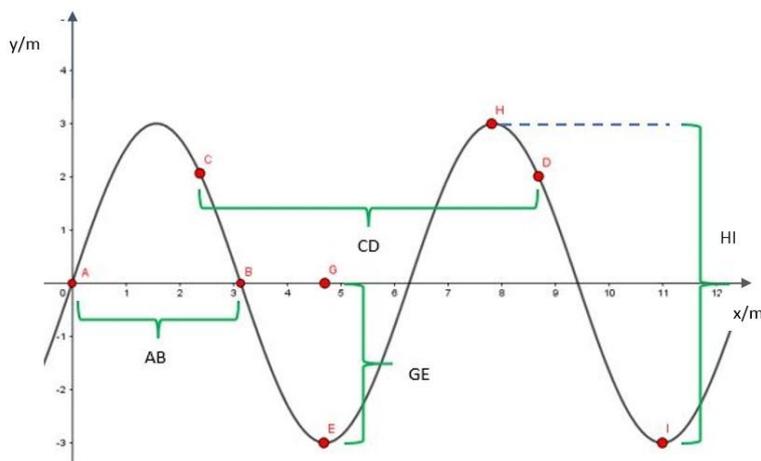
#### Fazit zu den Konzepten 12 bis 15

Bei den Konzepten 12 bis 15 zeigt sich bei allen Lernenden, dass ihnen die beiden Begriffe Minimum und Maximum im Zusammenhang mit der Interferenz nicht geläufig sind, wobei die Minima noch mehr Probleme zu machen scheinen. Es stellt sich die Frage, woran das liegen könnte. Im Lehrpersonenskript wird anhand einer Simulation beobachtet, wie eine schwingende Quelle am Wasser Wellenberge und Wellentäler verursacht. An jedem Punkt wechseln sich mit der Zeit die Schwingungsphasen Maximum – Nulllage – Minimum – Nulllage- Maximum und so weiter ab. Hier wird das „Tal“ als Minimum bezeichnet, was missverständlich sein könnte. Im Unterricht wird das aber an dieser Stelle nicht übernommen. Überhaupt wird da hauptsächlich von Berg und Tal gesprochen. (vgl. B1: 26) Im Lehrpersonenskript wird kurz darauf erklärt, dass sich die Welle von einem Maximum nach oben zu einem Maximum nach unten verändert und man in der Mitte eine Auslenkung von Null hat. Der Begriff Minimum wird nicht erwähnt. Im Arbeitsblatt 1 sollen bei Punkt C Stellen mit Auslenkung der Wasseroberfläche gleich Null, maximal oberhalb und maximal unterhalb der Gleichgewichtslage markiert werden. Der Begriff Minimum kommt nicht vor. Eine Schülerin (S2) sagt bei der Besprechung des Punktes D auf dem Arbeitsblatt 1, wo es um die Veränderung der Wasseroberfläche in einem Punkt mit der Zeit geht, dass der Berg

„im nächsten Zeitpunkt ein Tal“ ist, dann wieder ein Berg, also die „Auslenkung maximal, minimal und wieder maximal“. Die Lehrperson illustriert das: Ein „Korken, der auf einer Welle schwimmt, würde runter, rauf, runter, rauf gehen“. Die roten und grünen Punkte „wechseln sich ab und schwingen“. Die Schülerin sagt auch noch, dass die Auslenkung null ist und das Wasser in Ruhe bleibt, wenn Tal auf Berg trifft. (vgl. B2: 34) Der Ausdruck minimale Auslenkung fällt nicht. Insgesamt ist das Vokabular hier alles andere als klar und es ist nachvollziehbar, dass es bei den Interviews Schwierigkeiten gegeben hat. Deshalb kam bei S1 und S2 auch eine richtige Antwort, nachdem Minima in minimale Auslenkung umformuliert worden war. Die Beschreibung der Wasseroberfläche macht nur S3 ein Problem. Deshalb dürfte es sich hier bei S1 und S2 weniger um ein Verständnisproblem, als um ein Problem mit der Bezeichnung handeln. Was die Maxima betrifft, sind Verständnisprobleme zu beobachten. Abgesehen von S2 wird Tal auf Tal nicht als Maximum erkannt oder sogar als Minimum bezeichnet. Die Beschreibung der Wasserbewegung macht außer bei S3 keine Probleme. Neben der schon angesprochenen Lösung zur Abbildung für den Beamer könnte hier vielleicht eine kleine Übersichtstabelle mit den Begriffen helfen.

Konzept 16: Eine Wellenlänge, die als die Entfernung benachbarter Wellenberge oder Wellentäler definiert ist, wird in einer Abbildung gezeigt.

Interviewfrage aus Interview 3: Welche Entfernung entspricht einer Wellenlänge?



S1 erklärt zuerst, dass die Wellenlänge „von einem Berg zum anderen oder halt von einem Tal zum anderen“ ist. Diese Formulierung ist nicht ganz exakt, es fehlt wieder der benachbarte Berg oder das benachbarte Tal wie in Konzept 6. Aber auf die Frage, welchem Abstand das in der Abbildung entspricht, gibt sie die richtige Antwort „CD, weil das derselbe Punkt ist“.

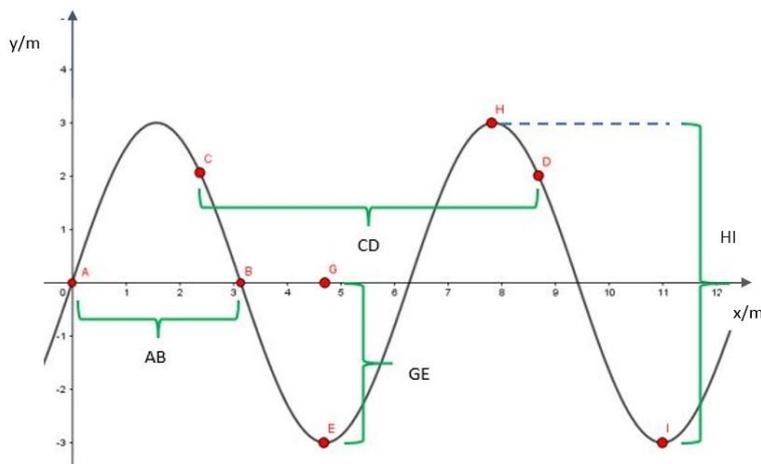
S2 erklärt auch zunächst, dass eine Wellenlänge „von Hügel zu Hügel“ geht. Diese Antwort schließt das Wort benachbart auch nicht ein, aber beim Nachfragen welchem Abstand eine Wellenlänge in der Abbildung entspricht, zeigt sie auf den Abstand CD, der richtig ist.

S3 benennt die Abstände „AB und CD“ als Wellenlänge. CD würde stimmen, aber der Abstand AB entspricht nur einer halben Wellenlänge. Deswegen wurde dieses Konzept nicht verstanden.

S4 gibt richtig als Antwort „C bis D, also CD“.

Konzept 17: Die Amplitude, die als Entfernung zwischen der Nulllage und der maximalen Auslenkung definiert ist, wird in einer Abbildung gezeigt.

Interviewfrage aus Interview 3: Wie würdest du die anderen Abstände benennen?



S1 sagt „HI ist die Amplitude“ und benennt dann den Abstand GE als halbe Amplitude. Sie hat hier die doppelte Amplitude als eine Amplitude und die einfache Amplitude als eine halbe benannt. Dieses Konzept hat sie nicht verstanden.

S2 erklärt, dass beim Abstand HI angezeigt wird „das ist so der Ausschlag oder wie hoch, also wie stark es ist“ und die Hälfte davon ist bei GE. Das benennt sie als Amplitude. Sie sagt nicht genau, welchem Vielfachen der Amplitude die Abstände ihrer Meinung nach entsprechen, sondern nur, dass GE die Hälfte von HI ist. Deswegen wird hier ein mittelmäßiges Verständnis gegeben.

S3 sagt „GE wär die Amplitude, HI wäre dann die zweifache Amplitude“. Diese Aussage ist richtig, dieses Konzept hat die Schülerin verstanden.

S4 gibt an, „GE ist die Amplitude“, „HI ist die doppelte Amplitude, also nach oben und nach unten“. Diese Aussage ist richtig.

### Fazit zu Konzept 17

Die Schwierigkeit hier ist, dass die doppelte Amplitude auch als Amplitude bezeichnet wird. Im Lehrpersonenskript werden die Amplitude als maximale Auslenkung und die Elongation als alle anderen Auslenkungen definiert. Auch im Unterricht wird das genau durchbesprochen. Der Begriff der doppelten Amplitude wird gesucht, indem die Lehrkraft fragt, was zwischen Wellenberg und Wellental ist. Daraufhin antwortet ein Schüler zwar zuerst falsch, dass die Amplitude gesucht ist, auf Nachfragen der Lehrkraft bessert er sich aber aus und sagt, dass die doppelte Amplitude gesucht ist. Der Begriff der einfachen Amplitude wird von einem Schüler als der Abstand von Berg zu x-Achse benannt. Die Lehrkraft ergänzt, dass hier der Begriff der Nulllage besser ist, da sie keine x-Achse haben. (vgl. B1: 25) Festzuhalten ist, dass Wellenlänge und Amplitude zwar laut Lehrpersonenskript im Unterricht besprochen, aber nicht auf einer Abbildung gezeigt wurden.

Konzept 18: Interferenz kann man mit einem Experiment, bei dem ein Doppelspalt mit schmalen Spalten verwendet wird, zeigen.

Interviewfrage aus Interview 3: Wie kann man die Interferenz des Lichts zeigen?

S1 drückt sich in ihrer Antwort etwas unklar aus, „wenn man Licht irgendwie sich kreuzen lässt“ kann man die „destruktive und konstruktive Interferenz zeigen“. Die Erklärung ist sehr ungenau. Das Verständnis wird daher als mittelmäßig eingestuft.

S2 nennt das Experiment, das sie im Unterricht durchgeführt haben „mit diesem Laser durch die äh Doubleslits“. Sie hat den Experimentaufbau richtig nennen können.

S3 erwähnt zuerst die Wellenfronten im Zusammenhang mit der Interferenz. Aber dann überlegt sie, wie es beim Licht ist und erinnert sich an den Versuch aus dem Unterricht. „Man lässt quasi einen Laser durch, äh, so eine Spalte hindurch, durch eine, durch zwei Spalte um genau zu sein“. Sie bessert sich gleich auf die zwei Spalte aus und erwähnt auch noch, dass man die Interferenz mit diesem Experiment zeigen kann.

S4 fragt nach, ob er das Experiment beschreiben soll und nennt daraufhin den richtigen Aufbau mit Laser und Doppelspalt, durch den das Licht geht.

Konzept 19: Bei zwei Taschenlampen kann keine Interferenz beobachtet werden, da sie keine kohärenten Quellen sind.

Interviewfrage aus Interview 3: Mit welchen zwei Experimenten habt ihr das (Anm. Interferenz überprüfen) gemacht?

S1 beschreibt das Experiment mit den Taschenlampen. Die Lehrkraft hat „am Boden geleuchtet“ hat und dann „mit einer zweiten dazu“ und es hat sich „nicht irgendwie verändert“. Der Boden wurde auch „beleuchtet, wenn nur eine da war“. Auf die Frage, ob sich die Lichtkegel beeinflusst haben, antwortet S1, dass sie glaubt, dass das nicht so war. Die Frage, ob das für oder gegen Interferenz spricht, sagt sie „eigentlich gegen“. Die Schülerin hat das Experiment mit den Taschenlampen verstanden und zieht auf Nachfrage auch die richtige Schlussfolgerung.

S2 beantwortet die Frage, was passiert, wenn man zwei Batterielampen verwendet, indem sie erklärt, dass die Taschenlampen nicht interferieren, „aber eigentlich schon, aber man erkennt's nicht“. Die Schülerin hat die Schlussfolgerung für die Interferenz richtig gezogen und auch die Erklärung der Lehrkraft in ihre Antwort miteinbezogen.

S3 hat die Frage, ob sie Interferenz bei den Taschenlampen gesehen haben mit ja beantwortet. „Der Schatten“ wurde „verstärkt, quasi die Helligkeit auch des Lichtes“. Diese Schülerin hat offenbar das beobachtet, was ihren Erwartungen entsprochen hat. Als Lehrkraft sollte man sich deshalb bewusst machen, dass das unterschiedliche Vorverständnis der Lernenden und der Lehrenden auch bedingt, dass bei Experimenten Phänomene anders beobachtet werden und man deshalb zu anderen Lösungen und Erklärungen kommt. (vgl. SVPH 2018: 9) Auch bei Konzept 24 gibt S3 später an, beim Laserexperiment einen Strahl zwischen Quellen und Schirm gesehen zu haben. (vgl. SVPH 2018: 9)

S4 wurde gefragt, was passiert, wenn man zwei Batterielampen verwendet. Er erklärt daraufhin, dass „die zwei Batterielampen“ „komplett ident sein“ müssen, „damit Interferenz auftreten kann“. Wenn sie nicht ident sind, „tritt halt trotzdem äh Interferenz auf, aber es ist halt so schnell, dass wir es nicht mit unserem Auge sehen können“. Dieser Schüler hat eine sehr gute Beschreibung des Experiments gegeben. Im Unterricht wurde die Frage gestellt, warum es keine Interferenz bei den Taschenlampen geben könnte. S4 hat richtig vermutet, dass es mit der Phasenverschiebung und der Wellenlänge zusammenhängt. Dieser Schüler konnte aus dem Gelernten die richtigen Schlüsse ziehen. (vgl. B4: 52)

Konzept 20: Das Experiment (mit dem roten Laser und einem Doppelspalt), das in der Klasse gemacht wurde, wird beschrieben.

Interviewfrage aus Interview 3: Mit welchen zwei Experimenten habt ihr das (Anm. Interferenz überprüfen) gemacht?

S1 beschreibt das Experiment so, dass es einen Laser gibt, der „durch so eine Spalte irgendwie“ gestrahlt ist. Man hat dann gesehen, „dass es halt Stellen gab, wo es sehr hell war und dann wieder welche wo's gar nicht war“. Diese Schülerin erwähnt nicht, dass es ein Doppelspalt war, durch den der Laser geschickt wurde, was aber ein wesentliches Detail ist. Ebenfalls denkt sie, dass bei den dunklen Stellen gar kein Licht ist. Deswegen wurde hier nur ein mittelmäßiges Verständnis festgestellt.

S2 erklärt den Aufbau des Experiments richtig, ein Laser geht durch die Doubleslits. Das Licht wird „nicht aufgespalten, aber man hat eben diese schwarzen Abstände in den einzelnen Lichtlinien gesehen“. Sie versucht einen Vergleich mit dem Taschenlampenexperiment. Es ist beim Laser anders, „das ist eher so gebundene“, aber sie wusste nicht genau, wie sie das erklären soll. Hier wurde das Konzept nicht verstanden.

S3 kann richtig erklären, wie das Experiment aufgebaut ist und dass man damit Interferenz zeigen kann. Der Laser geht durch zwei Spalte durch. „Das hab ich nämlich nicht ganz verstanden, warum dann diese Striche kamen“. Diese Schülerin hat das Konzept noch nicht verstanden, aber ist sich dessen im Gegensatz zu S2 auch bewusst.

S4 erklärt richtig, dass bei dem Experiment ein roter Laserstrahl durch einen Doppelspalt geht und dass man „zwei gleiche kohärente äh Lichtquellen“ bekommt. Er erwähnt auch, dass es einen „Schirm, worauf das Licht fällt“, gibt und dass man dort beobachten kann „wo es Lichtstellen gibt und schwarze, wo das Licht nicht sichtbar ist“. Ebenfalls erkennt er, dass sich dieses Muster abwechselt. S4 konnte das Experiment sehr gut erklären und auch die Tatsache, dass an den schwarzen Stellen, das Licht nicht da ist, sondern sich die Wellen dort auslöschen, hat er richtig erkannt.

Ein Grund dafür, dass sich die Schülerinnen beim Beschreiben des Experiments schwer getan haben, könnte sein, dass sich die Lehrkraft zu wenig Zeit für dieses wichtige Experiment genommen hat und die Lernenden das Interferenzmuster auf dem Schirm nicht wirklich selbst als solches identifizieren konnten.

Konzept 21: Es entstehen helle und dunkle Streifen im Doppelspaltexperiment, da es konstruktive und destruktive Interferenz gibt.

Interviewfrage aus Interview 3: Warum entstehen beim Experiment mit dem Doppelspalt helle und dunkle Bereiche auf dem Schirm?

S1 begründet das so, dass „die hellen sind halt dort, wo halt konstruktive Interferenz auftritt und die dunklen halt, wo destruktive Interferenz auftritt. Diese Schülerin hat das richtig erkannt und dieses Konzept verstanden.

S2 nennt die Interferenz als Grund. Auf die Frage wie man das mit der Abbildung A der Wasserwellen vergleichen kann, sagt sie „die dunklen sind die destruktive Interferenz und die konstruktive wären die hellen Bereiche“. Diese Schülerin hat das auch richtig erkannt und dieses Konzept verstanden.

S3 gibt an, dass sie das nicht weiß und auch „nicht verstanden“ hat.

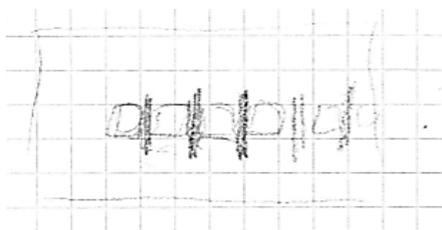
S4 erklärt das mit der Interferenz als Grund. „An den hellen Stellen, wo man das Licht sieht, trifft Wellental auf Wellental und Wellenberg auf Wellenberg“ und bei den „dunklen Stellen ist es halt so Wellental auf Wellenberg oder Wellenberg auf Wellental“. Dieser Schüler erklärt auch mit dem Aufeinandertreffen von Berg und Tal noch einmal ganz genau, wie man zur Interferenz kommt. Er hat das Konzept verstanden.

Konzept 22: Das Interferenzmuster, das beim Experiment mit dem Laser und dem Doppelspalt beobachtet werden kann, wird skizziert.

Interviewfrage aus Interview 3: Skizziere genau, wie das Interferenzbild des Lichts auf einem Schirm aussieht!

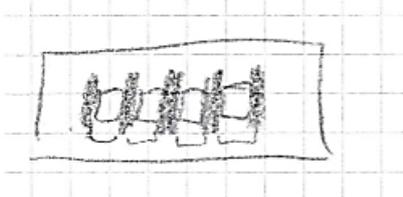
Interviewfrage aus Interview 5: Skizziere ein Interferenzbild und beschreibe es mit eigenen Worten!

S1 skizziert und erklärt, dass es „eine hell beleuchtete Zeile“ gibt und „dann halt dazwischen nichts“. „Die waren immer gleich groß“, auch wenn das auf ihrer Skizze nicht so aussieht. „Die sind gleich groß und dazwischen war’s aber halt schwarz“ und das hat sich wiederholt. Die dunklen sind „auch gleich groß und treten halt in regelmäßigen Abständen auf“. Die Erklärung des Interferenzbilds ist vom Sinn her gut, aber die Bezeichnungen sind etwas schwammig, eine hell beleuchtete Zeile und die dunklen Lichtstellen werden wieder als „nichts“ bezeichnet.



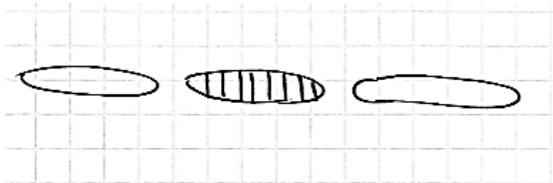
In der Skizze sieht man, dass sie die hellen Stellen als Quadrate zeichnet und dazwischen dünnere und länglichere schwarze Streifen für die dunklen Stellen. Im Gegensatz zu dem Interferenzbild, wie sie es auch im Unterricht gesehen haben, gibt es nicht sehr viele Gemeinsamkeiten, außer, dass sich Hell und Dunkel abwechseln. Im nächsten Interview, das nach dem Schülerexperiment stattgefunden hat, ändert sich die Skizze des

Interferenzbilds nur dahingehend, dass es eingerahmt wird, sozusagen der Schirm gezeichnet wird, und dass die Quadrate der hellen Stellen länglicher werden.



Sie erklärt, dass „das schwarze ist halt die destruktive Interferenz und das andere ist die konstruktive Interferenz“. Sie erklärt auch, dass es gleich groß und gleich weit entfernt sein soll. Sie sagt im Vergleich zum vorigen Interview nicht mehr, dass an den dunklen Lichtstellen nichts ist, sondern schwarz.

S2 fragt, ob sie das „ganze Experiment oder nur das auf dem Schirm“ aufzeichnen soll. Sie sagt, bevor sie zum Zeichnen beginnt, dass sie auch „dieselben Abstände“ hatten. Sie zeichnet und erklärt: „innerhalb jeder Punkte war, also längliche Ellipsen waren im selben Abstand hell und dunkle Flächen, Spaltabstände“.



Die Schülerin zeichnet drei Ellipsen auf und innerhalb der mittleren Ellipse, zeichnet sie in gleichen Abständen längliche schwarze Linien ein. Sie hat verstanden, dass die Linien äquidistant sind und dass sozusagen nur die mittlere Ellipse Interferenz zeigt. Darauf wurde auch im Unterricht hingewiesen. (vgl. B3: 41) Dieses Bild sieht aber im Vergleich zum Experiment, dass die Lernenden zu dem Zeitpunkt auch schon selbst durchgeführt haben, ganz anders aus.

S3 erklärt, dass es „so Streifen“ sind und „dann ist immer eins heller als der andere Strich“ und skizziert.



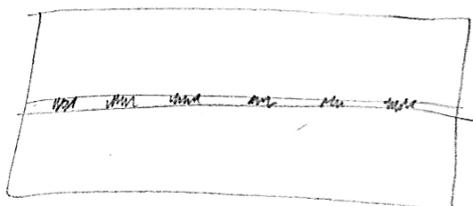
Die Abstände sind ihrer Meinung nach immer gleich, aber sie überlegt, ob es nicht auf „die zwei Spalte“ ankommt. Aber auf Nachfrage, wie es in ihrem Fall war, also beim Demonstrationsexperiment, erklärt sie, „die Striche sind länger, als die Spalten auf jeden Fall“ und die Spalten und die Striche müssen „ein gleiches Verhältnis haben“. Sie zeichnet

als Einzige waagrechte Linien, die noch am ehesten dem gesehenen Muster entsprechen. Es wird auch richtig eingezeichnet, dass die einen Linien etwas breiter als die anderen sind. Die Erklärung ist zwar etwas schwammig, aber der Sinn dahinter stimmt. Ein Problem ist hier, dass sie für den Begriff der Linien hier auch Spalte verwendet. Im nächsten Interview verändert sich die Zeichnung nur im Hinblick darauf, dass sie genauer und wirklich äquidistante Linien gezeichnet hat, die sie beim vorigen als solche nur deklariert hat, da sie sich verzeichnet hat.



Sie erklärt nochmal richtig den Ablauf des Experiments und dass es „immer gleich langer Strich, also gleich lange Striche mit den gleich langen Abständen zwischen den Strichen“ sind. Das ist hier gut erklärt und auch die verwirrende Bezeichnung der Linien als Spalte unterlässt sie, aber sie benennt wiederum die Linien destruktiver Interferenz als Abstände. Sie hat den Sinn hinter dem Konzept verstanden und schafft es vor allem das Interferenzbild beide Male gut zu skizzieren.

S4 erkennt als einziger sofort, dass weiter unten am Fragebogen schon ein Interferenzmuster abgebildet ist. Das hätte ich im Rückblick auf eine neue Seite geben sollen, aber dadurch dass es den Schülerinnen nicht aufgefallen ist, ist es mir auch erst da so richtig bewusst geworden, dass die Platzierung der Abbildung nicht gut gewählt war. Er zeichnet es auf und erklärt, dass es einen Schirm gibt „und hier ist die Linie“.



An den weißen Stellen ist „das Licht da“ und die Abstände zwischen den schwarzen Balken „sind halt immer gleich“. Es ist interessant, dass der Schüler hier die Linie  $p$  ins Spiel bringt. Das zeigt, dass er eine Analogie zu den Wasserwellen herstellen kann und sich die Erkenntnisse aus dem vorher Gelernten ableitet.

### Fazit zu Konzept 22

Während S1 und S2 erklären können, warum das Muster auf dem Schirm entsteht, fällt es ihnen schwer, es zu skizzieren. Das überrascht, weil sie es nicht nur beim Demonstrationsexperiment und dem Schülerexperiment wiederholt gesehen haben, sondern

sie es auch in ihr Heft skizziert haben. Die Lehrkraft hat das Interferenzbild auch noch zusätzlich an der Tafel skizziert. (vgl. B3: 43) S3 versteht zuerst nicht, wie es zu dem Muster kommt, aber sie kann skizzieren, was sie gesehen hat. S4 hat bei keinem der beiden Konzepte Schwierigkeiten.

Konzept 23: Es gibt bei Wasser und bei Licht konstruktive Interferenz und destruktive Interferenz.

Interviewfrage aus Interview 3: Was sind **Ähnlichkeiten** bei der Interferenz von Wasserwellen und bei der Interferenz von Licht und was sind Unterschiede?

S1 nennt als Gemeinsamkeit „dass eben Interferenz auftritt“ und überlegt dann gleich wegen Unterschieden weiter. Damit wiederholt sie aber nur die Antwort, die schon in der Fragestellung vorkommt.

S2 beantwortet die Frage so, dass „diese konstruktive und destruktive Interferenz“ sehr ähnlich ist. Im Gegensatz zu S1 erwähnt sie aber, dass es destruktive und konstruktive Interferenz ist. Bei den Wasserwellen ist das „so quasi doppelt“ und beim Licht „ist einfach Licht und kein Licht, also hell und dunkel“. Sie bessert sich gleich auf hell und dunkel aus.

S3 stellt fest „am Anfang und am Ende sind sie beide äh gleich“. Dann geht sie schon weiter zu den Unterschieden. Diese Antwort greift die Superposition auf. S3 hat hier scheinbar den Wellencharakter des Lichts erkannt.

S4 erklärt hier, dass es zu einer konstruktiven Interferenz kommt, wenn ein Wellental auf ein Wellental oder ein Wellenberg auf einen Wellenberg trifft und beim Aufeinandertreffen von Wellenberg und Wellental gibt es destruktive Interferenz „und das ist gleich mit der Wasserwelle“. S4 erläutert hier die Gemeinsamkeit sehr gut und zeigt, dass er das Konzept verstanden hat.

Konzept 24: Bei Wasserwellen sieht man die Interferenz auf der ganzen Oberfläche, beim Laser sieht man nur die Interferenzlinien auf dem Schirm.

Interviewfrage aus Interview 3: Was sind **Ähnlichkeiten** bei der Interferenz von Wasserwellen und bei der Interferenz von Licht und was sind **Unterschiede**?

S1 weiß keine Unterschiede. Daraufhin bekommt sie eine Hilfestellung, was sie erkennen kann, wenn sie sich die Experimente bildlich vorstellt und sie vergleicht. Sie antwortet „vielleicht, dass die konstruktive Interferenzphase sozusagen größer ist als die destruktive?“.

Auf Nachfrage, ob man beim Laser etwas dazwischen sieht, antwortet sie etwas schwammig „beim Laser sieht man dazwischen ja praktisch nicht, also. Dass da halt konstruktive Interferenz auftritt. Und beim Wasser ist halt Wasser dort, aber es ist halt nur gerade“. Diese Aussage stimmt, mit dem Ausdruck des „gerade“ Seins, könnte die Schülerin meinen, dass sie die Wasserwellen eigentlich nur in zwei Dimensionen gesehen haben. Da die Formulierungen etwas verworren sind und erst auf Nachfrage eine Antwort gegeben werden konnte, wird hier ein mittelmäßiges Verständnis gewählt.

S2 antwortet darauf zuerst „es ist Wasser, es ist Licht“, aber dass sie es nicht wirklich weiß. Auf die Nachfrage, wie es ist, wenn sie sich die Experimente ansieht, zum Beispiel zwischen Quelle und Schirm beim Laserexperiment, kommt als Antwort „also die Entfernung ist viel weiter beim Licht, von der Quelle. Diese Antwort bezieht sich auf die Experimente im Unterricht. S2 zeigt hier kein Verständnis für das Konzept, weil die Weite oder Nähe von den Quellen keinen Einfluss darauf hat, ob es Interferenz gibt.

S3 sagt, dass Wasserwellen „ein Hoch und Tief“ haben und Licht nicht. „Aber es gibt keine Amplituden“. Das zeigt, dass die Schülerin das Konzept einer Welle nicht verstanden hat oder es nicht mit diesen Experimenten in Verbindung setzen kann. Auf die Frage nach dem Unterschied zwischen dem Experiment mit Wasserwellen und mit Licht antwortet sie: „Wasser hört irgendwann mal auf, die Welle, und der Laserstrahl würde bei bestimmten Bedingungen unendlich weit gehen“. Daraufhin wurde als weitere Zwischenfrage gestellt, ob man überall Interferenz sieht oder warum man das überhaupt sieht. Die Schülerin scheint verwirrt und fragt nach „beim Licht?“ und nach einer Pause, „die Interferenz?“. Die nächste Zwischenfrage ist, „wo haben wir die (Anm. Interferenz) gesehen?“. Es kommt keine Antwort. Es wird nachgefragt, worauf man die im Unterricht gesehen hat. Die Schülerin fragt nochmals, ob das „beim Licht?“ gemeint ist. Ich frage, wo der Laser hingeleuchtet hat und die Schülerin antwortet „durch diese Spalte“. Ich frage nochmals, worauf der Laser geleuchtet hat und sie sagt „auf einen, so einen Schirm“. Sie stellt fest „und da kann man's ablesen“. Auf eine Bestätigung hin, sagt sie erstaunt „ah ok“. Ich frage, ob sie dazwischen auch etwas sehen kann, beim Laserexperiment. „Wenn man genau hinschaut, könnte man so einen Strahl erkennen“. Auf die Zwischenfrage, wo man beim Wasser etwas sieht oder ob das überall gleich ist, sagt S3 dass es „auf eine bestimmte Zeitspanne auch begrenzt“ ist und ist still. Hier sieht man, dass sie keine schlüssige Antwort auf das Konzept geben kann und dieses nicht verstanden hat. Es wirkt jetzt wieder fast so, als würde sie zum ersten Mal hören, dass man bei Licht das Interferenzmuster am Schirm sehen kann.

S4 sagt zuerst, dass er das leider vergessen hat. Aber auf die Nachfrage, was ist, wenn er sich das generell ansieht, fällt es ihm gleich wieder ein. Man merkt, wie er sich darüber freut,

er sagt oft „jetzt weiß ich's“. Dann erklärt er ganz richtig „bei den Wasserwellen sieht man den kompletten Ablauf und beim Licht sieht man es nur auf dem Schirm, wie es aussieht“.

Bei den beiden Konzepten haben sich eigentlich alle Schülerinnen sehr schwergetan. Auf die Frage nach Ähnlichkeiten und Unterschieden bei der Interferenz von Wasserwellen und Licht konnte aber auch im Unterricht niemand eine gute Antwort geben. (vgl. B4: 51) Die Lehrkraft hat dann die Antwort aus dem Lehrpersonenskript vorgelesen.

Konzept 25: Die Bedingungen für Maxima und Minima bei Interferenz von Wasser und Licht sind gleich.

Interviewfrage aus Interview 3: Die Bedingung für Minima und Maxima sind die gleich oder verschieden?

S1 überlegt etwas und sagt dann, „ich glaub schon, dass die gleich sind“. Sie kommt hier auf die richtige Schlussfolgerung.

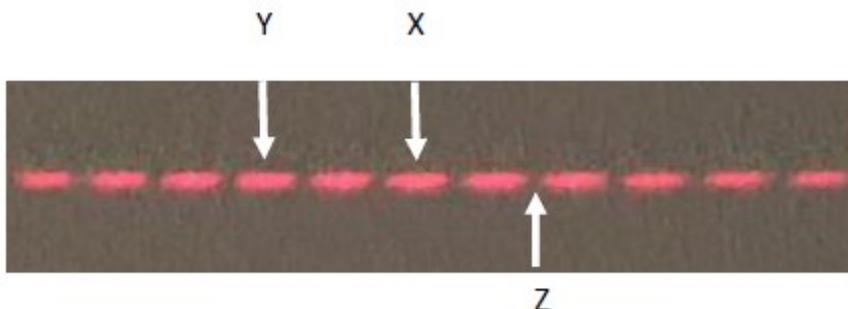
S3 sagt, „sehr wahrscheinlich verschieden“, aber dass sie hier nur raten würde. Da merkt man auch, dass sie dieses Konzept noch nicht verstanden hat, wie die vorigen zwei Konzepte, die eng damit zusammenhängen.

S4 erklärt die Gleichheit der Bedingung für Maxima und Minima schon in Konzept 23. (s.o.)

Konzept 26: Der Gangunterschied eines Punktes konstruktiver Interferenz wird in einer Abbildung des Interferenzmusters des Lasers bestimmt. (Punkt Y)

Interviewfrage aus Interview 3: Folgende Abbildung zeigt ein Interferenzbild am Schirm.

Punkt X zeigt die Mitte des Schirms. Wie groß ist der Gangunterschied im Punkt Y und im Punkt Z?



S1 erklärt zuerst, dass der „Abstand von Wellenberg zu Wellenberg ist ja mal  $\lambda$ “. Daraus schussfolgert sie richtig, dass zu „Y zwei  $\lambda$ “ Gangunterschied vorliegt.

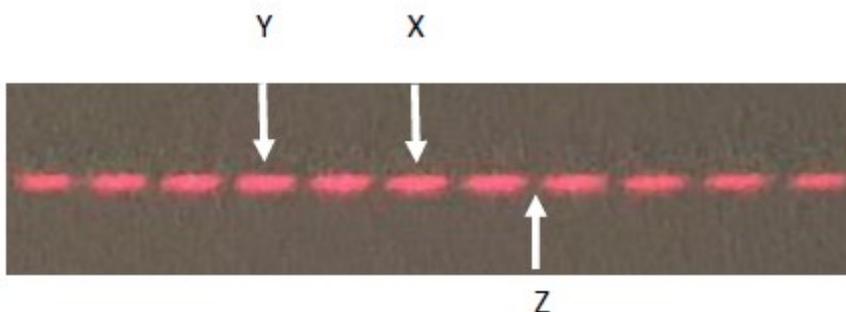
S2 benennt den Gangunterschied in Y zunächst als „ganzzahlige“ und auf Nachfrage, ob sie auch eine Zahl dafür angeben kann, nennt sie richtig „zwei“ und zeigt auf den entsprechenden Punkt. Eine kleine Ungenauigkeit ist hier das Weglassen der Wellenlänge.

S3 zeigt auf den Punkt und erklärt, dass hier ein Gangunterschied „mit den vollen Zahlen“ vorliegt. Auf die Frage, ob sie auch eine Zahl nennen kann, sagt sie richtig „zwei  $\lambda$ “.

S4 gibt den Gangunterschied in Punkt Y richtig mit „zweimal  $\lambda$ “ an. Im Unterricht hat dieser Schüler beim Bearbeiten des Arbeitsblatts 3 den Gangunterschied in seiner Gruppe berechnet. Er hat mit Hilfe eines Lineals die Entfernungen abgemessen und sie zu Längen von acht und sieben Wellenlängen bestimmt und dadurch einen Gangunterschied von einer Wellenlänge herausbekommen. Ohne nachmessen zu müssen, ist er auch auf den zweiten Punkt auf der Linie p, der denselben Gangunterschied hat, gekommen. Ein Kollege hat ihn gefragt, ob er sich sicher ist und er hat darauf jaja geantwortet. (vgl. B4: 50) Daran sieht man, dass dieser Schüler dieses Konzept schon sehr gut verstanden hat und Zusammenhänge herstellen kann.

Konzept 27: Der Gangunterschied eines Punktes destruktiver Interferenz wird in einer Abbildung des Interferenzmusters des Lasers bestimmt. (Punkt Z)

Interviewfrage aus Interview 3: Folgende Abbildung zeigt ein Interferenzbild am Schirm. Punkt X zeigt die Mitte des Schirms. Wie groß ist der Gangunterschied im Punkt Y und im Punkt Z?



S1 benennt den Gangunterschied in Z richtig mit „eineinhalb“.

S2 benennt den Gangunterschied in Z zunächst als „halbzahlige“ und auf Nachfrage, ob sie auch eine Zahl dafür angeben kann, nennt sie richtig „eineinhalb“ und zeigt auf den entsprechenden Punkt. Eine kleine Ungenauigkeit ist hier das Weglassen der Wellenlänge.

S3 zeigt auf den Punkt Z und fragt, ob es hier destruktiv ist. Sie erklärt dann weiter, dass hier „kein  $n$  quasi, sondern ein  $n$  halbe“ vorliegt und der Gangunterschied in diesem Punkt „mit den halben Zahlen“ ist. Auf die Frage, ob sie eine genaue Zahl angeben kann, nennt sie richtig „eineinhalb“.

S4 gibt den Gangunterschied im Punkt Z richtig mit „eins Komma fünf Lambda“ an.

Das Ablesen des Gangunterschieds aus dem Interferenzmuster des Lichts ist für alle Lernenden klar.

Konzept 28: Das Interferenzbild des Lasers hängt vom Spaltenabstand der Spalte im Doppelspalt, dem Schirmabstand zum Doppelspalt und der Wellenlänge ab.

Interviewfrage aus Interview 5: Von welchen Parametern hängt das Interferenzbild am Schirm ab?

S1 erklärt, dass das Interferenzbild am Schirm davon abhängt, „wie weit ähm dieser Doppelspalt von dem Schirm entfernt ist“, „von der Wellenlänge“ und „von dem Abstand von diesen Doppelspalten“. Sie hat alle drei Parameter, die sie beim Experimentieren überprüft haben, aufgezählt.

S2 zählt auch die untersuchten Parameter richtig auf, aber nicht so flüssig wie S1, „von dem Abstand der Doppelspalten“, „wie weit der Schirm von dem Doppel, von dem Dia entfernt ist und von der Wellenlänge“.

S3 zählt die Parameter, die im Experiment überprüft wurden auch richtig auf und setzt diese mit den Buchstaben, die in der Stunde gegeben wurden, in Zusammenhang. Sie sagt „von dem Abstand zwischen den zwei Spalten“, „von dem Dia zum Schirm“ und „von der Wellenlänge“. Vor dem Aufzählen der Wellenlänge hat sie noch festgestellt, dass die Lichtquelle nicht bewegt wird, aber da die Wellenlänge verändert wird. Hier merkt man, dass sich die Schülerin die Parameter aus dem Experiment herleitet, indem sie sich das Experiment mit seinem Aufbau vorstellt.

Konzept 29: Wenn der Spaltenabstand verringert wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden, vergrößert sich der Abstand zwischen den Interferenzlinien.

Interviewfrage aus Interview 5: Was wird passieren, wenn der Spaltenabstand kleiner wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden? Wird sich der Abstand zwischen den Linien des Interferenzbildes vergrößern oder verkleinern?

S1 beantwortet diese Frage richtig und selbstsicher mit „er wird sich vergrößern“.

S2 behilft sich bei der Frage mit den Proportionalitäten. Sie hat sich hier gemerkt, dass eine indirekte Proportionalität vorliegt. Sie sagt zuerst nur allgemein „das heißt äh je größer desto kleiner“ und auf Nachfrage, wie das ist, wenn sich der Spaltenabstand verkleinert, kommt die richtige Antwort „wird's größer“.

S3 skizziert sich das Experiment zum Beantworten der Frage und schreibt auch die Buchstaben der Parameter, die verändert werden dazu. Sie verwechselt im Interview den Spaltabstand und den Schirmabstand beim Beantworten der Frage. In sich wird die Frage nach der Abhängigkeit vom Spaltabstand richtig beantwortet „wenn  $d$  kleiner wird, werden die Spalten größer“, allerdings ist der Begriff der Spalten hier falsch gewählt, weil sie den Abstand der Interferenzlinien meint. Sie zeichnet sich dazu in ihrer Skizze etwas ein und zeigt auch auf die richtigen Parameter.



S4 wurde zu diesem Konzept nicht interviewt, aber im Unterricht nach diesem Zusammenhang gefragt und er hat richtig gesagt, dass die Linien näher zusammenrücken, wenn der Spaltenabstand größer wird. (vgl. B5: 60)

Konzept 30: Wenn die Wellenlänge verringert wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden, verringert sich der Abstand zwischen den Interferenzlinien.

Interviewfrage aus Interview 5: Was wird passieren, wenn die Wellenlänge kleiner wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden? Wird sich der Abstand zwischen den Linien des Interferenzbildes vergrößern oder verkleinern?

S1 beantwortet diese Frage richtig und selbstsicher mit „er wird sich verkleinern“.

S2 fragt nach, ob der grüne Laser die größere Wellenlänge hat, weil sie das glaubt, aber sich nicht mehr ganz sicher ist. Daraufhin sage ich, dass der grüne Laser eine kleinere Wellenlänge hat. Sie leitet sich die Abhängigkeit aus dem Experiment der Stunde her und überlegt laut, „der rote hatte trotzdem größere Abstände“ und daher „je kleiner, desto kleiner“. Damit hat sie die Frage richtig beantwortet und auch gezeigt, dass sie die Zusammenhänge nicht nur auswendig gelernt hat, sondern sich ihre Erkenntnisse aus den Experimenten herleiten kann und somit ein sehr großes Verständnis für dieses Konzept hat.

S3 stellt fest, dass man die Wellenlänge „mit der Art des Lichts“ verändert und sie den roten und grünen Laser hatten. Sie hat sich gemerkt, dass der grüne Laser eine geringere Wellenlänge hat. Sie setzt das mit dem Experiment in Verbindung „bei einer höheren Wellenlänge waren die Abstände geringer, bild ich mir ein, zwischen den Interferenzlinien als beim Grünen quasi“. Diesen Zusammenhang hat sich die Schülerin aus dem Experiment falsch gemerkt. Das könnte sein, weil es sich um das Demonstrationsexperiment handelt und sie das Experiment nicht in der Gruppe durchgeführt und nicht genau genug gesehen hat.

Konzept 31: Wenn der Schirmabstand zum Doppelspalt verringert wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden, verringert sich der Abstand zwischen den Interferenzlinien.

Interviewfrage aus Interview 5: Was wird passieren, wenn der Schirm näher an den Doppelspalt rückt und die anderen Parameter gleich gehalten werden? Wird sich der Abstand zwischen den Linien des Interferenzbildes vergrößern oder verkleinern?

S1 beantwortet diese Frage richtig und selbstsicher mit „dann verkleinert sich's auch“.

S2 antwortet hier gleich richtig mit „auch verkleinern“.

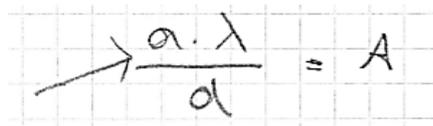
S3 beantwortet diese Abhängigkeit richtig, allerdings bei der Frage nach dem Spaltenabstand. Wenn das Dia näher zum Schirm gestellt wird, „dann werden die Spaltenabstände auch kleiner“. Sie skizziert sich das Experiment, benennt die Komponenten und schreibt die Abkürzungen dazu und bestätigt sich so nochmals ihre Vermutung. Der Zusammenhang wurde richtig hergestellt, allerdings wurde der Abstand der Interferenzlinien hier fälschlicherweise mit „Spaltenabstände“ bezeichnet.

Konzept 32: Die Formel für den Abstand der Interferenzlinien im Interferenzmuster bei Licht

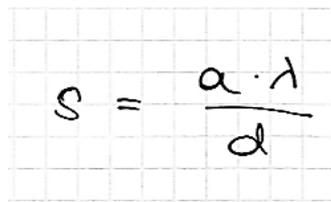
lautet  $s = \frac{\lambda a}{d}$ .

Interviewfrage aus Interview 5: Kannst du eine Formel aufschreiben, die diese Parameter verbindet?

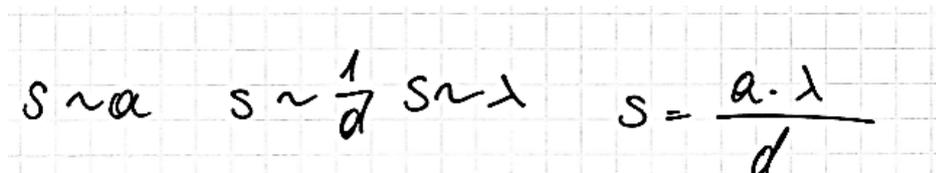
S1 kann die Parameter, die sie beim Experiment untersucht haben, nämlich den Schirmabstand, den Spaltenabstand und die Wellenlänge richtig in Zusammenhang setzen, aber sie schreibt kein ist gleich und hat die Formel nicht vervollständigt. Auf Nachfragen „ist gleich was?“ ist sie zuerst verwirrt und weiß nicht, was gemeint ist „Ahm, ist gleich?“ und nach einer kurzen Nachdenkphase erklärt sie, dass hier die „Entfernung von den Interferenzauf tretenden“ fehlt. Sie fügt ein großes A als Abkürzung dafür in der Formel ein und hat somit die Formel richtig aufgestellt. Da das wichtige Detail des Abstands der Interferenzlinien gefehlt hat und erst auf Nachfragen hinzugefügt wurde, wird hier ein mittelmäßiges Verständnis gewählt.


$$\rightarrow \frac{a \cdot \lambda}{d} = A$$

S2 schreibt die Formel mit den Parametern, wie sie in der Stunde gewählt waren, richtig auf und erkennt, dass es dasselbe mit den Proportionalitäten ist, was sie vorher beantwortet hat, nur verbunden.


$$s = \frac{a \cdot \lambda}{d}$$

S3 schreibt die Formel mit den Parametern, wie sie in der Stunde gewählt wurden, richtig auf und verbindet ihre Überlegungen ebenfalls mit den Proportionalitäten.


$$s \sim a \quad s \sim \frac{1}{d} \quad s \sim \lambda \quad s = \frac{a \cdot \lambda}{d}$$

S4 wurde zu diesem Konzept zwar nicht interviewt, aber er hat im Unterricht als die Frage nach der Formel das erste Mal von der Lehrperson gestellt wurde, sofort die richtige Antwort gemurmelt. (vgl. B5: 62)

Konzept 33: Der Abstand der Interferenzlinien ist gleich die Wellenlänge mal dem Schirmabstand dividiert durch den Spaltenabstand.

Interviewfrage aus Interview 5: Kannst du eine Formel aufschreiben, die diese Parameter verbindet? Beschreibe sie mit eigenen Worten!

S1 beschreibt alle Parameter mit den richtigen von ihnen im Unterricht gewählten Definitionen. „a ist die Entfernung von dem Doppelspalt zum Schirm“, „Lambda ist die Wellenlänge und d ist der Abstand zwischen den Doppelspalten“.

S2 beschreibt die Parameter a (Schirmabstand) und d (Spaltenabstand) nicht. Bei der Wellenlänge bezeichnet sie das geschriebene Lambda mit Gamma. Auf die Frage, was der Buchstabe s ist, sagt sie ungenau „Abstand“. Auf die Nachfrage, welchen Abstand sie meint, sagt sie richtig, es ist „der Abstand zwischen den Linien des Interferenzbilds“.

S3 beschreibt richtig mit „s ist direkt proportional zu a, s ist indirekt proportional zu d und wieder s direkt proportional zu ähm Lambda“. Sie schreibt sich diese Proportionalitäten auch einzeln auf. Sie schreibt die Formel auf und sagt „s ist gleich a mal Lambda durch d“. Die Parameter wurden im Interview schon mehrmals richtig beschrieben und deswegen nicht nochmals erfragt.

#### Fazit zu den Konzepten 28 bis 33

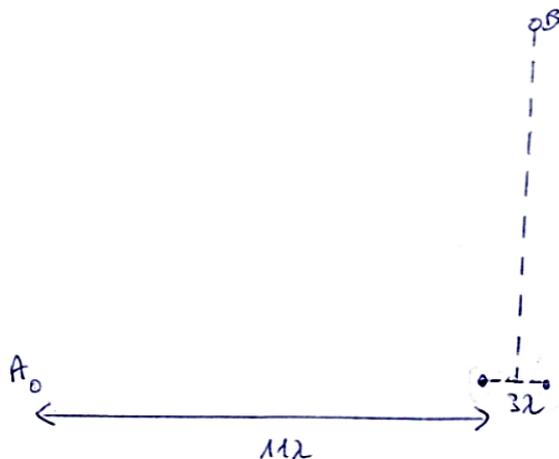
Die Konzepte 28 bis 33 wurden insgesamt recht gut verstanden, vielleicht auch, weil sie ein überschaubares, in sich abgeschlossenes Thema umfassen. Während S1 sehr knapp und wie aus der Pistole geschossen antwortet, stellen S2 und S3 einen Bezug zum Schülerexperiment beziehungsweise zum Demonstrationsexperiment her, wobei sich S3 dazu auch etwas aufzeichnet. Für diese beiden Schülerinnen war das Durchführen der Versuche besonders wichtig, um die Abhängigkeiten zu verstehen.

#### 4.2. Zusätzliche Konzepte

Hier werden noch Aufgaben, die im Laufe der Interviews gestellt wurden, aber nicht unmittelbar im Unterricht gemacht wurden, besprochen. Zum einen geht es um das Arbeitsblatt 2, das nicht verglichen worden ist und zum anderen um ein zusätzliches Beispiel und weiterführende Fragen, die Auskunft geben sollen, ob die Lernenden ihr Wissen auch in anderen Kontexten anwenden können.

Es wird eine Frage ähnlich wie auf Arbeitsblatt 2 gestellt: Es sind zwei Quellen gegeben, die einen Abstand von drei Lambda haben. Der Punkt A liegt in einer waagrechten Linie zu den zwei Quellen und ist von der ersten Quelle elf Lambda entfernt. Punkt B liegt genau zwischen den beiden Quellen.

Interviewfrage in Interview 2: Wie kannst du bestimmen, ob es in den Punkten A und B konstruktive oder destruktive Interferenz gibt? Denke laut und beschreibe deine Gedankengänge!



S1 beantwortet richtig, dass in Punkt A konstruktive Interferenz herrscht. Die Begründung ist nur halb vollständig, denn sie sagt, dass „vierzehn Lambda ein ganzes Vielfaches von Lambda ist“. Das stimmt, aber nur weil die Quellen auch ein ganzes Vielfaches auseinander liegen, sie hat hier den Gangunterschied nicht „fertig bestimmt“. Das heißt also, sie hat nur die Entfernung des Punktes A zur zweiten Quelle bestimmt, aber nicht den Gangunterschied. Eine Möglichkeit ist auch, dass sie einfach den Gangunterschied entlang der Knotenlinie bestimmt hat, wie das auch im Unterricht von manchen Schülerinnen und Schülern gemacht wurde. (vgl. B3: 44) Für Punkt B gibt sie auch konstruktive Interferenz an und erklärt sehr gut: „Weil jeder Punkt, den ich mir auf der Linie aussuche, gleich weit entfernt von den beiden Quellen ist und somit sind sie phasengleich in jedem Punkt und dann ist da entweder so ein ganz, ganz hoher Berg oder ein ganz, ganz tiefes Tal“.

S2 gibt als Antwort für Punkt A destruktive Interferenz, weil es „elf und ungerade“ ist. Sie verwechselt hier ungerade halbzahlige und ungerade Vielfache miteinander. Auch sie bestimmt den Gangunterschied entlang der Linie. In Punkt B meint sie, dass konstruktive Interferenz herrscht, aber sie ist sich „unsicher“ und hat „keine Ahnung“ wie sie das begründen könnte. So gesehen hat sie bei Punkt B nur richtig geraten.

S3 meint, dass in Punkt A „eher konstruktiv als destruktiv“ vorherrscht. Sie begründet das so, dass der Dreier „ganzzahlig“ ist und dann „elf durch drei“ „nicht ganzzahlig, also es ist kein ganzzahliges Vielfaches“, aber es sich „sehr wahrscheinlich mit Kommazahlen ausgehen“ wird und es dadurch eine konstruktive Interferenz ist. Die Erklärung ist sehr wirr. Sie bestimmt den Gangunterschied entlang der Knotenlinie und sie könnte eine Wellenlänge für drei  $\lambda$  halten. In Punkt B ist „nicht angegeben wie die Quellen“ sind. Auf die Frage, wie man die Interferenz trotzdem bestimmen kann, fragt sie, ob man „übertragen“ kann oder „die Strecke und abmessen“. Danach stellt sie gleich fest, dass „wenn's nicht angegeben wäre“ muss man „vektoriell eben ermitteln oder so was“. S3 kann die Interferenz in den Punkten nicht richtig bestimmen, sie rät zwar bei Punkt A richtig, aber die Begründung ist nicht nachvollziehbar. Sie beginnt die Zahlen, die angegeben sind zu dividieren und sieht dennoch eine konstruktive Interferenz auch wenn bei dieser Division keine ganze Zahl herauskommt. Bei Punkt B hat sie keinen Vorschlag gemacht, weil die Angabe ihrer Meinung nach nicht vollständig war.

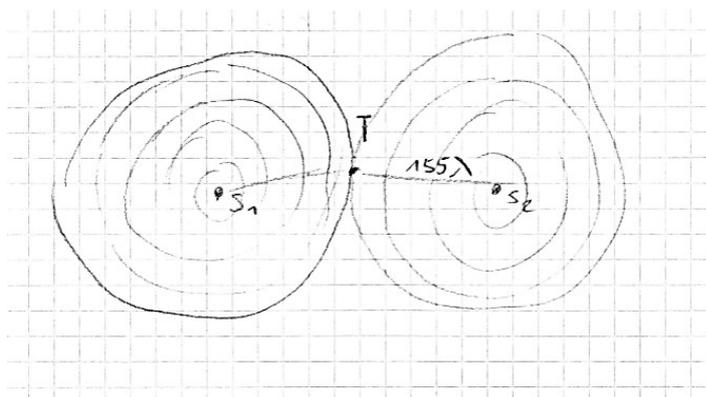
S4 erklärt kurz, dass in Punkt A konstruktive Interferenz ist, „weil das halt ein  $n$  von  $\lambda$  ist“. Das stimmt. In Punkt B ist laut dem Schüler „das Umgekehrte“. Dafür wird keine weitere Begründung gegeben. Das ist falsch. Aber zuvor im Unterricht hat er in der vierten Stunde zur Berechnung des Punkts C beim Laserexperiment in der Mitte des Schirms die Wellenlängen für den Gangunterschied abgezählt. Er ist auf dasselbe Ergebnis gekommen und hat selbst erkannt, dass dort ja die Mitte des Schirms ist und deswegen der Gangunterschied Null sein muss. Dieser Schüler hat mit der Zeit erkannt, dass der Gangunterschied in der Mitte zwischen den Quellen Null ist (vgl. B4: 49), obwohl es im Unterricht nicht extra erwähnt wurde. Er ist durch die Bearbeitung des Arbeitsblatts 3 zu dieser Erkenntnis gekommen.

Man sieht, dass nur S1 verstanden hat, wie man die Interferenz auch ohne Zahlenangaben bestimmen kann, wenn der Punkt gleich weit von beiden Quellen entfernt ist. Für Punkt A haben die beiden Lernenden, die sonst auch sehr viel in Physik verstehen, die konstruktive Interferenz richtig angegeben, aber die Erklärung von S1 ist unvollständig und auch S4 verwendet den Begriff Gangunterschied nicht. Es wäre wichtig gewesen, das Arbeitsblatt 2 mit den beiden Spezialfällen im Unterricht zu besprechen, denn so haben vermutlich die meisten den Gangunterschied nicht verstanden.

Eine weitere Aufgabe, die S1 und S3 im Interview 3 lösen sollten, war folgende:

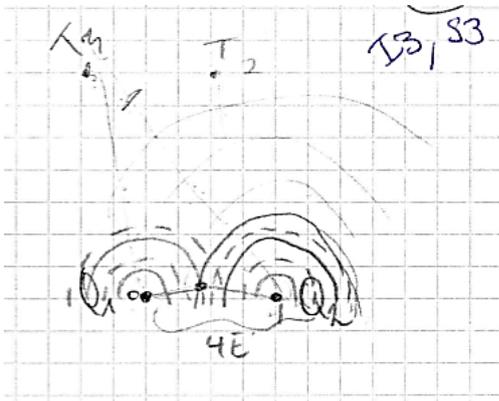
Interviewfrage aus Interview 3: Zwei kohärente Lichtquellen  $S_1$  und  $S_2$  emittieren die Wellen mit der Wellenlänge  $\lambda$  und Amplitude  $A$ . Die Wellen treffen sich im Punkt T. Der Gangunterschied zwischen  $S_1T$  und  $S_2T$  beträgt  $155\lambda$ . Wie groß wird die Amplitude in Punkt T sein? Skizziere, wie du dir das vorstellst!

S1 erkennt gleich, dass es sich um konstruktive Interferenz handelt, weil „es ist ein ganzzahliges Vielfaches“. Sie überlegt kurz, wie sie die Amplitude bestimmen kann und erklärt dann, dass diese „zweimal die Amplitude in Punkt T beträgt“. Sie skizziert zwei Punktquellen und nur die Berge, um die Darstellung zu vereinfachen. An einem Punkt, an dem sich die Berge schneiden, zeichnet sie den Punkt T ein. Der Punkt T hat von beiden Quellen ungefähr den gleichen Abstand, aber sie erklärt, das „schaut jetzt gleich groß aus, aber die Differenz zwischen den beiden ist dann eben zum Beispiel 155 Lambda“. Die Schülerin hat das Konzept sehr gut verstanden und es auch gut in ihrer Skizze umsetzen können.



S3 überlegt zuerst, wie man von der Wellenlänge auf die Amplitude kommt, kann sich aber nicht erinnern und kann „das jetzt nicht wirklich ausführen“. Auf die Nachfrage, ob sie eine konstruktive oder destruktive Interferenz erkennen kann, sagt sie nach kurzem Überlegen, dass es konstruktive Interferenz ist. Sie wird noch gefragt, wie die Amplitude bei konstruktiver Interferenz aussieht. S3 rät zunächst, dass sie sich halbiert und meint, dass sie keine Ahnung hat. Auf nochmaliges Nachfragen, was denn bei der konstruktiven Interferenz passiert, fällt ihr ein, dass die Amplitude größer wird, weil der Ausschlag höher wird. Auf die Frage, wie hoch der Ausschlag ist, antwortet sie sehr zaghaf und fragend „doppelt so hoch?“. Mit vielen Nachfragen hat sie die Frage beantworten können. In der Skizze musste sie auch angeleitet werden zuerst die zwei Quellen zu zeichnen, aber als sie die Quellen aufzeichnet, fällt ihr wieder ein, wie sie das Beispiel aufzeichnen kann und sie zeichnet die Berge und Täler ein. Sie nimmt einen Punkt als Beispiel, sagt, dass sie jetzt das Ganze versteht und erklärt, dass man die „Wellenlängen“ abmisst. Sie hat zwar in diesem

Zusammenhang irgendeinen Punkt konstruktiver Interferenz gewählt und keinen Bezug mehr zu dem Punkt T, der im Beispiel gegeben war, gezogen, aber sie hat sich mit dem Konzept inzwischen angefreundet.



Weiters wurde eine Interviewfrage zum Arbeitsblatt 5, das sich nicht mehr ganz im Unterricht ausgegangen ist, gestellt. Eine Folie mit einer Quelle, die Kreiswellen aussendet, wird zu einer zweiten dazu kohärenten Quelle verschoben. Die Knotenlinien sollen betrachtet werden und es soll bestimmt werden, ob die Linie in der Mitte hell oder dunkel ist und warum das so ist.

Interviewfrage aus Interview 5: Wäre die Linie in der Mitte hell oder dunkel und warum?

S1 überlegt und gibt an, dass die Linie in der Mitte dunkel ist, weil es mit „einem Strich beginnt, einem Strich aufhört und das heißt, das in der Mitte ist dann gestrichelt und das ist eine destruktive Interferenz, beziehungsweise schwarz“. Auch wenn es im Interview 2 so war, dass die Schülerin verstanden hat, dass konstruktive Interferenz herrscht, wenn ein Punkt gleich weit entfernt von beiden Quellen ist, kann sie dieses Wissen hier nicht anwenden.

S2 gibt an, dass sie endlich verstanden hat, „was Knotenlinien sind“. Es ist erfreulich, dass sie das Konzept im Zuge des Unterrichts verstanden hat. Sie bemerkt richtig, dass es mehr Knotenlinien werden, wenn die Quellen weiter aus einander rücken. Auf die Frage, wie die Linie in der Mitte aussieht, bewege ich die Folie hin und her, zeige, welche Linie gemeint ist und die Schülerin gibt an, dass die Linie hell ist. Es wird nachgefragt, was wir entlang der Linien haben und sie antwortet richtig, „da trifft immer Berg auf Berg und Tal auf Tal, also konstruktive“. S2 hat dieses Konzept jetzt sehr gut verstanden.

S3 erklärt gleich richtig, dass in der Mitte „eine konstruktive Interferenz“ ist „und das wär eine helle Linie“. Die Schülerin hat dieses Konzept nun auch verstanden.

Während die zwei Schülerinnen, die das Konzept mit dem Punkt in der Mitte bei Arbeitsblatt 2 gar nicht verstanden haben, nun die richtige Antwort geben können, kann S1 ihr Wissen überraschenderweise bei der neuen Aufgabenstellung nicht anwenden. Dieser Punkt wurde im Unterricht nicht sehr oft erwähnt und verlangt daher, eine eigenständige Auseinandersetzung mit der Aufgabe und eine neue Herangehensweise, die sie noch nicht hatten.

## 5. Fazit und Ausblick

Insgesamt ist der Einsatz der Materialien im Unterricht vielversprechend verlaufen. In den Interviews konnte eine zumeist positive Entwicklung des Verständnisses beobachtet werden und vor allem die Konzepte der letzten Stunde wurde von den Interviewten auf Anhieb sehr gut aufgenommen. Ein Konzept, das vor allem Schwierigkeiten gemacht hat, war erwartungsgemäß das des Gangunterschieds. Es hat viel Zeit und Mühe gekostet, aber am Ende wurden die Lernenden mit diesem Konzept allmählich vertraut. „Ziel des Physikunterrichts ist es, dass die Schülerinnen und Schüler im Laufe ihrer Schulzeit ein Wissenssystem zur Physik entwickeln, das möglichst gut zu der Theorie passt, die Expertinnen und Experten verwenden.“ (SVPH 2018: 26) Das wurde für den Themenbereich Interferenz mit diesem Unterrichtskonzept erreicht. Sowohl die Lehrkraft als auch die Lernenden haben die Unterrichtssequenz positiv bewertet und auch in der Klasse wurde fleißig mitgearbeitet.

Als besonders positiv hervorgehoben hat die Lehrperson, dass bei diesem Unterrichtskonzept die Interferenz und die Beugung nicht gemeinsam, sondern nacheinander unterrichtet werden, wie es sonst in der Schulpraxis nicht üblich ist. So kann das „Beugungs-Interferenz-Mischmasch“ vermieden werden. Die Arbeitsblätter waren gut aufbereitet und sind in der Klasse gut angekommen. Die Lehrkraft begrüßt auch die Ausführlichkeit des Skripts, vor allem für die erste Einheit.

Obwohl das Unterrichtskonzept sehr gut durchgeplant ist, konnten beim ersten praktischen Einsatz in einer Klasse ein paar Hürden beobachtet werden, für die im Folgenden mögliche Verbesserungsvorschläge gemacht werden sollen.

Der Zeitrahmen wurde mit fünf statt drei Stunden deutlich gesprengt und selbst da konnten nicht alle Arbeitsblätter in der Klasse gemacht und durchbesprochen werden. Das ergibt sich daraus, dass Arbeitsblätter anders als bei Tutorien in der Schule traditionellerweise verglichen werden und das auch der Wunsch der Schülerinnen und Schüler ist. Sie wollen wissen, ob alles richtig ist, weil sie das für die Prüfung brauchen. Diese Zeit muss also nach der Gruppenarbeit für jedes Arbeitsblatt eingeplant werden. Wenn ein Arbeitsblatt nicht in einer Stunde fertig gemacht werden kann, geht viel Zeit verloren, bis die Schülerinnen und Schüler wieder in das Thema hineinflinden. Dahinter steht auch ein organisatorisches Problem, denn in der Oberstufe sollte es Doppelstunden in Physik geben. Das würde vieles vereinfachen. In Zukunft sollte man für das Konzept sechs Stunden einplanen, damit man nicht so durchhetzen muss. Da die Unterrichtssequenz sehr durchdacht und kleinschrittig

aufgebaut ist, empfiehlt es sich nicht, irgendetwas wegzulassen, denn jeder Schritt ist für die Entwicklung des Verständnisses wichtig:

1. Stunde	Theorie
2. Stunde	Arbeitsblatt 1
3. Stunde	Arbeitsblatt 2 + Folie verschieben + Eingangsfrage + 2 Demoexperimente
4. Stunde	Arbeitsblatt 3
5. Stunde	Schülerexperiment + Arbeitsblatt 4 (Teil1)
6. Stunde	Arbeitsblatt 4 (Teil 2)

Die Lehrperson ist mit der Art der Darbietung der Materialien unzufrieden, weil sich Schülerinnen und Schüler mit so vielen Zetteln und zusätzlichen Notizen im Heft schwer auf Prüfungen vorbereiten können, weil sie erst alles zusammensuchen müssen. In Zukunft könnte ein Lernendenskript mit Raum für Notizen und Verweisen auf die Simulationen angeboten werden. Das Problem der hohen Kopierkosten könnte man durch eine Online-Version in den Griff bekommen, was mir aber im Unterricht nicht wirklich praktikabel erscheint, weil sehr viel eingezeichnet und mit Folien gearbeitet wird. Überhaupt liegt bei dem Unterrichtskonzept der Schwerpunkt naturgemäß auf der Entwicklung des Verständnisses, bei einem Einsatz in der Klasse ist aber auch die Sicherung des Lernertrags wichtig. Die Schülerinnen und Schüler brauchen etwas, womit sie später wiederholen und lernen können. Eine Anregung wäre es hier zum Beispiel eine Übersichtstabelle mit den wichtigsten Informationen zum Gangunterschied zu erstellen. Hier ist auch gleichzeitig das wichtigste Vokabular aufgelistet. (s. Anhang A.: 124)

Die Lehrperson merkt auch an, dass bei der Kleinschrittigkeit der rote Faden verloren gehen könnte. Das ist mir im Zusammenhang mit der Eingangsfrage, wie man in der Physik entscheiden kann, welches Modell besser passt, aufgefallen. Zwischen der Fragestellung und einer möglichen Antwort lagen über zwei Unterrichtsstunden und die Schülerinnen und Schüler kamen zu keinem Schluss. Man sollte hier die wesentlichen Diskussionsbeiträge vom Einstieg kurz schriftlich festhalten, damit man sie beim Wiederaufgreifen schnell in Erinnerung rufen kann. So könnten die Lernenden vielleicht den Zusammenhang herstellen und einen Lösungsvorschlag anbieten.

Ein Punkt, der mir besonders aufgefallen ist, ist der, dass die Lernenden sich fachlich nicht sehr korrekt, beziehungsweise nur sehr stockend, ausdrücken können. Es ist nicht immer leicht zu unterscheiden, ob es sich um Verständnisschwierigkeiten oder um Probleme bei einer fachsprachlichen Beschreibung handelt. Eine physikalisch korrekte Ausdrucksweise wird auch bei den leistungsstarken Lernenden nicht erreicht. Das zeigt, wie schwierig es ist das zu etablieren. Das liegt auch daran, dass die Verwendung der Begriffe im Unterricht oft nicht konsequent durchgehalten wird. Ein Beispiel dafür ist die in Kapitel 4 bei den Konzepten 12 bis 15 angesprochene Problematik bezüglich der Begriffe Minimum und Maximum. Selbst bildliche Darstellungen, wie zum Beispiel die des Interferenzmusters können nicht oft genug eingesetzt werden, weil sie selbst nach oftmaligem Betrachten nicht richtig verankert sind. Das sieht man daran, dass es manchen Lernenden Schwierigkeiten macht, sie aus dem Gedächtnis zu skizzieren, wie bei Konzept 22 in Kapitel 4 näher beschrieben ist. Auf weitere Lernschwierigkeiten, die sich bei den Interviews gezeigt haben, wird in Kapitel 4 genauer eingegangen.

In der Praxis ist auch deutlich geworden, wie wichtig die Erstellung von eigenen Dokumenten mit den Links zu den Simulationen, den konzeptuellen Fragen, den Forschungsfragen und den Lösungen zu den Abbildungen der Arbeitsblätter ist, die man sonst schwer gemeinsam besprechen kann. Das sollte beim nächsten Einsatz der Unterrichtssequenzen zur Verfügung gestellt werden. Ins Lehrpersonenskript muss eine deutliche Bezeichnung der Simulationen und Arbeitsblätter eingefügt werden und es muss klar gekennzeichnet sein, welche wo eingesetzt werden sollen. Im Lehrpersonenskript werden sprachliche Fehler korrigiert und die Formatierung wird verbessert.

An dieser Stelle sollen auch noch konkrete, inhaltliche Änderungsvorschläge für die Materialien beschrieben werden, die das Entwickeln eines Verständnisses für die Konzepte unterstützen könnten.

Bei Arbeitsblatt 2 ist es auch wichtig zu besprechen, dass der Gangunterschied aller Punkte entlang einer Linie gleich ist und warum konstruktive Interferenz vorliegt, wenn der Punkt denselben Abstand von den Quellen hat. Im Lehrpersonenskript sollte eine Definition für den Gangunterschied angegeben werden, die als verbindlich gilt, damit nicht eine Vielzahl an verschiedenen Definitionen die Lernenden verwirrt. Das hat vor allem bei S3 dazu geführt, dass sie den Gangunterschied beim ersten Interview noch gut erklären konnte und sich bei den folgenden Interviews dann immer unsicherer wurde, wie sie diesen definieren kann. Ein Vorschlag für eine Definition wäre zum Beispiel: Der Gangunterschied ist der Wegunterschied eines Punktes zu den Quellen in Vielfachen von  $\lambda$  ausgedrückt.

Bei Arbeitsblatt 1 könnte der letzte Arbeitsauftrag von Punkt E als eigener Punkt F gekennzeichnet werden und um die Frage nach dem Gangunterschied ergänzt werden, um nochmals zu betonen, dass entlang einer Linie konstruktiver oder destruktiver Interferenz immer der gleiche Gangunterschied vorliegt. Für Arbeitsblatt 1 soll eine Lösung für die Abbildung der kohärenten Kreiswellen erstellt werden, in der die gefragten Punkte und die Linien destruktiver und konstruktiver Interferenz eingezeichnet sind. Hier gäbe es die Möglichkeit die Linie p schon früher kurz einzuführen und mit den Lernenden gemeinsam zur Erkenntnis zu gelangen, dass sich auf der Linie p Schnittpunkte der destruktiven und der konstruktiven Interferenz abwechseln. So könnte im Laserexperiment die Entstehung des Hell-Dunkel-Musters vielleicht leichter erkannt und verstanden werden. Die Funktion des Experiments mit den Taschenlampen ist den Schülerinnen und Schülern im Unterricht nicht klar gewesen. Es wäre vielleicht besser, hier schon vor dem Experiment gemeinsam zu überlegen, was man sehen könnte, wenn es Interferenz gibt und was, wenn nicht. Nach dem Experiment könnte man fragen, ob die Schülerinnen und Schüler deshalb schon Interferenz ausschließen können. Man könnte gemeinsam zu dem Schluss kommen, dass man das nicht kann, denn das Fehlen der kohärenten Quellen könnte der Grund sein, warum kein Interferenzmuster zu beobachten ist. Somit könnte man besser zum Laserexperiment überleiten, bei dem man jetzt zwei kohärente Quellen verwendet. Bei Arbeitsblatt 4 könnte man noch ein Blatt Papier und ein Geodreieck zu den Materialien hinzufügen, damit die Interferenzmuster abgezeichnet werden und die Abstände zwischen den Interferenzlinien gemessen werden können. Der letzte Arbeitsauftrag bei Punkt C bei dem die Abhängigkeiten in Verbindung gebracht werden sollen, sollte der Übersichtlichkeit halber als eigener Punkt D gekennzeichnet werden.

Es wäre wichtig, auch die Konzepte, die in Zagreb zu weiteren Themen der Wellenoptik entwickelt worden sind, an Wiener Schulen einzusetzen und halbstrukturierte Interviews durchzuführen, damit ein komplettes Unterrichtskonzept zur Wellenoptik auch im deutschsprachigen Raum zur Verfügung steht.

## 6. Literaturverzeichnis

Schecker, Wilhelm, Hopf, Duit, Fischler, Haagen-Schützenhofer, Höttecke, Müller, Wodzinski (2018). Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis (Hrsg. Schecker, Wilhelm, Hopf, Duit). Berlin: Springer Spektrum

Wosilait, Heron, Shaffer, McDermott (1999). Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. In: Phys. Educ. Res., Am. J. Phys. Suppl., Vol. 67, No. 7, July 1999. S.5-S.15

Wiesner, Wodzinski (1996). Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen. In: Duit, Rhöneck: Lernen in den Naturwissenschaften. IPN. S.250-274

Jung, Wiesner (1990). Akzeptanzbefragungen zu den Bereichen "Sehen" und "Farben" der elementaren Optik. In: Wiebel (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie. Alsbach: Leuchtturm-Verlag. S.278-280

Wiener, Schmeling, Hopf (2015). Can Grade-6 students understand quarks? Probing acceptance of the subatomic structure of matter with 12-year-olds. In: European Journal of Science and Mathematics Education Vol. 3, No. 4, 2015. S.313-322

Ambrose, Heron, Vokos, McDermott (1999). Student understanding of light as an electromagnetic wave: Relating the formalism to physical phenomena. In: Am. J. Phys., Vol. 67, No. 10, October 1999. S. 891-898

McDermott, Shaffer (2009). Tutorien zur Physik. London: Pearson Studium

[www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt\\_materialien/milq/lehrtext\\_x\\_pdf](http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/milq/lehrtext_x_pdf)  
am 1.9.19

## 7. Abkürzungsverzeichnis

### B: Beobachtungen

SVPH: Schecker, Wilhelm, Hopf, Duit, Fischler, Haagen-Schützenhofer, Höttecke, Müller, Wodzinski (2018). Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis (Hrsg. Schecker, Wilhelm, Hopf, Duit). Berlin: Springer Spektrum

WHSM: Wosilait, Heron, Shaffer, McDermott (1999). Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. In: Phys. Educ. Res., Am. J. Phys. Suppl., Vol. 67, No. 7, July 1999. S.5-S.15

WW: Wiesner, Wodzinski (1996). Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen. In: Duit, Rhöneck: Lernen in den Naturwissenschaften. IPN. S.250-274

JW: Jung, Wiesner (1990). Akzeptanzbefragungen zu den Bereichen "Sehen" und "Farben" der elementaren Optik. In: Wiebel (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie. Alsbach: Leuchtturm-Verlag. S.278-280

WSH: Wiener, Schmeling, Hopf (2015). Can Grade-6 students understand quarks? Probing acceptance of the subatomic structure of matter with 12-year-olds. In: European Journal of Science and Mathematics Education Vol. 3, No. 4, 2015. S.313-322

AHVM: Ambrose, Heron, Vokos, McDermott (1999). Student understanding of light as an electromagnetic wave: Relating the formalism to physical phenomena. In: Am. J. Phys., Vol. 67, No. 10, October 1999. S. 891-898

MS: McDermott, Shaffer (2009). Tutorien zur Physik. London: Pearson Studium

MW: [www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt\\_materialien/milq/lehrtext\\_x\\_pdf](http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/milq/lehrtext_x_pdf)

## 8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: zwei kohärente Quellen, die Wellenfronten aussenden aus den Arbeitsblättern

Abbildung 2: Beispiel zur Bestimmung von Interferenz aus den Arbeitsblättern

Abbildung 3: Analogie zu Wasserwellen mit Linie p aus den Arbeitsblättern

Abbildung 4: Interferenzmuster Laser aus den Arbeitsblättern

# Anhang A. Übersichtstabelle

Bei kohärenten Quellen			
	konstruktive Interferenz		destruktive Interferenz
	maximale Auslenkung oberhalb der Gleichgewichtslage	<b>Berg auf Berg</b> = Schnittpunkte voller Linien	minimale Auslenkung Auslenkung von 0
	<b>Maxima</b>	Verstärkung	<b>Minima</b>
	maximale Auslenkung unterhalb der Gleichgewichtslage	<b>Tal auf Tal</b> = Schnittpunkte strichlierter Linien	<b>Berg auf Tal</b> = Schnittpunkt einer vollen und einer strichlierten Linie
	schwingt auf und ab		in Ruhe
<b>Wasseroberfläche</b>	ganzes Vielfaches von Lambda		ungerades <del>halbzahliges</del> Vielfaches von Lambda
<b>Gangunterschied</b>	Wellen am Schnittpunkt und entlang der Knotenlinie		in Gegenphase
	<b>Formel</b> $n \cdot \lambda$ mit $n \in 0,1,2,3, \dots$		$(n + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ mit $n \in 0,1,2,3, \dots$
<b>Interferenzmuster Licht</b>	helle Linien		dunkle Linien

## Anhang B. Interviews mit den Schülerinnen und dem Schüler

### Interviewfragen Stunde 1, Schülerin 1

I: Also die erste Frage wär: Wie kann man in der Physik entscheiden, welches von mehreren Modellen ein Phänomen am besten beschreibt?

1: Ok, also ähm, ich glaube, es ist so, dass man anhand von Experimenten mal schaut, stimmt das Modell überhaupt und wenn man dann merkt beim Experiment, ja, das funktioniert ja ganz anders und es hat überhaupt keinen Einfluss auf mein Modell, dann muss man's halt irgendwie ändern.

I: Ja.

1: Also ja.

I: Mhm genau. Und ja, wenn man mehrere hat?

1: Wenn man mehrere hat, ich mein, ich glaub, es gibt auch immer ein altes und ein neues und beim neuen ist dann doch irgendwas noch dabei, was man damals noch nicht wusste, ahm ja, aber ich glaube, das alte ist ja nicht falsch, es ist einfach nur noch nicht so ausgeprägt oder in anderen Teilen vielleicht ausgeprägter, ja.

I: Ja. Ahm dann durch welches Phänomen unterscheiden sich Wellen von Teilchen?

1: Ok, also wenn Teilchen gegen einander stoßen, dann prallen sie irgendwie ab oder geben halt ihren Impuls weiter und wenn Wellen sich sozusagen überlagern, dann haben sie diese destruktive oder konstruktive, konstruktive Interferenz und danach sind sie aber wieder normal.

I: Mhm

1: Und sind nicht irgendwie verändert oder so.

I: Ja genau. Ja, wie würdest du den Begriff Interferenz definieren?

1: Ähm, Interferenz. (kurze Pause). Also hm. Ähm irgendetwas also zwei Wellen verändern irgendwie ihren Zustand und beeinflussen den entweder positiv oder negativ.

I: Mhm.

1: So würd ich das... Ja.

I: Ja. Ja passt ja. Ähm, welche Bedingung ist notwendig, damit Interferenz überhaupt auftreten kann?

1: Ah, die müssen ja irgendwie eine bestimmte Phase haben, sie müssen (kurze Pause). Sind sie phasengleich, ich bin mir jetzt nicht sicher. Ahm.

I: Kein Problem

1: Oja, ich glaub, sie müssen phasengleich oder so sein, damit das auftreten kann.

I: Mhm. Genau, also die Quellen müssen

1: Genau ja.

I: Ja genau. Was bedeutet jetzt der Begriff Kohärenz?

1: Also, Kohärenz ist, dass, ich glaub, die ganzen Wellenberge gleich groß sind und auch die Täler gleich groß.

I: Mhm.

1: .. und dass es nicht abnimmt mit der Zeit, sondern.

I: Und was haben sie dann für eine Größe?

1: Also die Amplitude ist immer gleich.

I: Genau.

1: Ja, ahm und auch die Wellenlänge ist gleich.

I: Ja genau. Super ja. Wie würdest du eine Wellenlänge definieren?

1: Also, Wellenlänge ist von einem Berg zum anderen oder von einem Tal zum anderen Tal.

I: Kannst du mir das noch auf der Abbildung zeigen? Also ein Beispiel?

1: Also, wenn wir jetzt sagen, dass... Ja, die schwarzen Linien sind die Berge, dann ist halt der Abstand von einem Berg zum anderen die Wellenlänge.

I: Ja.

1: Also die sich immer wiederholt praktisch.

I: Mh. Ja, genau. Gut, ist dann eigentlich eh schon die letzte Frage, ob generell alles klar war in der Stunde oder ob du noch irgendwelche Fragen hast?

1: Ich glaub, es war alles ganz klar und ja und auch, dass wir selbst was arbeiten konnten, das Selbstvertiefen, das war gut. Ja.

I: Ok, dann vielen Dank.

1: Das wars schon?

I: Ja, das ist jetzt recht schnell gegangen, ja.

## Interviewfragen Stunde 1, Schülerin 2

I: Wie kann man in der Physik entscheiden, welches von mehreren Modellen ein Phänomen am besten beschreibt?

2: Ahm durch Experimente?

I: Mh.

2: Und durch Probieren?

I: Ja.

2: Und falls sich ein neues Modell besser eignet, also so ergibt sich das, also aus Experimenten.

I: Mh.

2: Würd ich sagen.

I: Ok. Durch welches Phänomen unterscheiden sich Wellen von Teilchen?

2: Ah ok. Hm. Ahm. Boah, was war das? Das weiß ich nicht mehr, ich glaub in ihrer vielleicht in ihrer Bewegung, na das hab ich vergessen.

I: Was habt ihr denn zum Beispiel in den Videos gesehen?

2: Mh ja? Das war ziemlich schnell hintereinander.

I: Ok.

2: Also wir haben einmal die, wir haben ein Video zur Wellenlänge gesehen oder war das so eine Abbildung? Ah ist schon ein bisschen länger her.

I: Ja, ist kein Problem. Ok, wie würdest du den Begriff Interferenz definieren?

2: Ahm, Interferenz. Ahm das ist die Überlagerung von Wellen oder die Überschneidung würd ich sagen.

I: Ja. Welche Bedingung ist notwendig, damit Interferenz überhaupt auftreten kann?

2: Ahm naja. Wellen? (lacht)

I: Ja.

2: In dem Sinn (lacht) und ahm eine Bewegung.

I: Mh.

2: Also ja.

I: Welche Quellen brauchen wir dafür?

2: Lichtquellen zum Beispiel?

I: Ja, zum Beispiel.

2: Oder Materialien wie Wasser oder Seile oder kein ich weiß nicht, es gibt verschiedene Wellen.

I: Oder welche Eigenschaften müssen die haben, die Wellen, dass sie überhaupt interferieren können?

2: Sie müssen beweglich sein.

I: Mh. Ja, was bedeutet der Begriff kohärent?

2: Ahm. Das war das also im Gleichschritt? also es muss parallel ablaufen vielleicht.

I: Mh.

2: Oder generell gleichzeitig, also wir haben uns das so gemerkt mit dem Gleichschritt.

I: Mh, ja ok.

2: Ja, das weiß ich noch, so ungefähr.

I: Was muss dann gleich sein bei den Wellen, welche?

2: Die Amplitude.

I: Ja genau. Und was hängt noch damit zusammen?

2: Also es kann eine konstruktive und eine destruktive Interferenz geben.

I: Mh.

2: Hängt das damit zusammen?

I: Ja das hat auf jeden Fall auch damit zu tun, ja das passt schon ja. Gut, ahm wie würdest du eine Wellenlänge definieren?

2: Also Wellen haben immer Täler und Berge.

I: Mh.

2: Und hier immer dieser Abstand dazwischen.

I: Ja, könntest du mir auch eine Wellenlänge zeigen, irgendeine?

2: Also ich nehm an das ist das Tal (zeigt auf strichlierte Linie)

I: Mh.

2: und das ist der Berg (zeigt auf durchgezogene Linie)

I: Ja.

2: und das ist immer von einem bis zum nächsten, oder?

I: Ja. Also von einem Tal bis zum nächsten Tal.

2: Genau, genau.

I: Genau. Ja sonst äh generell war in der Stunde alles klar oder hast du noch Fragen? Möchtest du noch was zur Stunde sagen?

2: Ahm, also von, zum Aufbau direkt?

I: Ja, oder generell, ob alles klar war, oder irgendwas, was du noch anbringen möchtest?

2: Ah ja, ich fand das schon auch gut mit den Arbeitsaufträgen danach.

I: Mh.

2: Nur wir hatten nicht mehr so viel Zeit dafür irgendwie und es wurde dann auch im Endeffekt nicht erklärt, ich weiß nicht, ob wir nächste Stunde noch dazu kommen?

I: Ja, das.

2: Aber ich mag's gern, wenn diese Arbeitsaufträge gemeinsam gemacht werden, weil dann kennt sich wirklich jeder aus und das ist so mein..

I: Ok, mh ja. Super, dann vielen Dank.

2: Das wars?

I: Ja, danke schön.

## Interviewfragen Stunde 1, Schülerin 3

I: Wie kann man in der Physik entscheiden, welches von mehreren Modellen ein Phänomen am besten beschreibt?

3: Ähm, (kurze Pause) Phänomen im Sinne von?

I: Zum Beispiel, dass Wellen oder Teilchen äh, ob das Wellen- oder das Teilchenmodell jetzt das Licht besser beschreibt, wie könnte ich das entscheiden?

3: Äh ist das nicht von den Tälern und Bergen?

I: Genau, oder nur so ganz generell: Wenn ich jetzt ein Modell hab...

3: Mhm

I: ... und dann ein anderes Modell, woher weiß ich jetzt, welches dieses Phänomen am besten beschreibt?

3: Hmm...

I: Wie könnt ich das entscheiden? Da habt ihr so ein bisschen geredet, dass man irgendwas messen kann und ...

3: Äh, da kann ich mich jetzt nicht mehr erinnern.

I: Ok, ja kein Problem ok. Durch welches Phänomen unterscheiden sich Wellen von Teilchen?

3: Ähm, ah ist das mit den Teilchen, das mit dem Zurückstoßen?

I: Genau ja.

3: Ok, ok. Naja, wie gesagt, Wellen sind, gehen quasi im Gleichschritt, sind ja pha also, also haben eine bestimmte Frequenz.

I: Mh

3: Und Phasen dadurch und dadurch entstehen Berge und Täler und bei Teilchen kommt's zur Abstoßung und zur ähm quasi, wenn ein größeres Teilchen und ein kleineres äh aufeinanderstoßt, dass das kleinere schneller äh weitergeht.

I: Mh, ja genau. Äh, wie würdest du den Begriff Interferenz definieren?

3: Das ist zum Beispiel, wenn Wellenfronten aufeinanderstoßen, aber dadurch, dass Wellen nicht quasi sich nicht rückstoßen oder so, sondern übereinander gleiten...

I: Mh.

3: Ähm und sich nicht tangieren, äh schaut's am Anfang also so aus, dass man diese Linien quasi dann verbindet oder sie sich kreuzen, aber am Ende äh sind die Wellenfronten gleich wie am Anfang.

I: Mh genau. Ja. Welche Bedingung ist notwendig, damit Interferenz überhaupt auftreten kann?

3: Ähm, also man braucht, also bei Wasserwellen zum Beispiel?

I: Mh.

3: Ähm, ist es notwendig, dass kein Wind ist oder so und oder irgendwie ähm Bedingung, also Bedingungen? Mh.

I: Ja, das ist eh auch schon eine gute.

3: Ah ok.

I: Oder sonst, wenn man die Quellen anschaut, wie müssen die zueinander sein oder wie müssen die ausschauen?

3: Die Quellen? Also meinst du jetzt zum Beispiel Kreisquellen?

I: Genau. Wie müssen die ausschauen?

3: Die müssen in einer Linie sein, oder?

I: Genau ja.

3: Ähm und ungefähr gleich groß vielleicht.

I: Ja, ja, ok. Was, was bedeutet der Begriff kohärent?

3: Ist das nicht eh auch, hat das nicht mit der Interferenz zu tun?

I: Ja, genau.

3: Aber ist das dann, wenn Quellen quasi sich nicht, wenn's nicht irritierend ist, dass zwei Wellen übereinander? Oh, ist das, wenn der Berg sich quasi, quasi sich verdoppelt, weil sie auf einander treffen?

I: Und wann verdoppelt sich der Berg?

3: Äähm..

I: Weil ahm, da müssen sie ja beide zum gleichen Zeitpunkt dort sein, die Berge.

3: Ähm das ist, ah da gab's eh dieses Video, ähm nein, kann ich mich nicht mehr erinnern.

I: Ok.

3: Also nicht so genau.

I: Ok. Wie würdest du eine Wellenlänge definieren?

3: Ähm. Muss man da nicht von einem Berg, also man muss von einem Berg zu einem anderen Berg die Wellenlänge abmessen.

I: Genau. Könntest du mir da noch eine zeigen, auf der Abbildung?

3: Eine Wellenlänge?

I: Ja.

3: Ähm, wär das dann nicht von quasi, wenn man die Punkte also die strichlierte als Berg sehen würde

I: Mh.

3: ... wär das hier.

I: Ja.

3: ... und eben hier wo die Überkreuzungen von den Bergen.

I: Genau. Und genau eine Wellenlänge wäre dann wo, wenn ich von hier ausgehe?

3: Von hier?

I: Ja.

3: Bis hier.

I: Genau.

3: Ok, ok.

I: Sonst ja, war in der Stunde alles klar oder hast du noch Fragen zu der Stunde allgemein?

3: Mh. Nein, aber ich fand, ich hab mir nie wirklich schwer getan mit dem Thema Wellen

I: Mh.

3: Also wir haben's auch letztes Jahr ähm schon durchgenommen.

I: Ok.

3: Aber ich fand die Stunde sehr angenehm gestaltet, dadurch dass man quasi erklärt bekommen hat vorher und dann angewendet hat.

I: Ok.

3: Das mag ich zum Beispiel sehr persönlich gerne, wenn man nicht alles gleichzeitig machen muss.

I: Ja, mh.

3: Ja.

I: Super, dann danke schön.

3: Gerne.

## Interviewfragen Stunde 2, Schülerin 1

I: Wie definierst du den Gangunterschied und kannst du mir ein Beispiel auf der Abbildung zeigen?

1: Ok. Also, ich glaub. Ich bin mir jetzt nicht ganz sicher, was Gangunterschied ist, aber ich glaub, das ist halt, also irgendwie halt die dunklen äh Striche, sagen wir jetzt, sind jetzt mal die Berge und die strichlierten sind die Täler. Und das ist halt, wenn sie gegeneinander treffen halt diese konstruktive Interferenz ist, dass es halt höher raufgeht, wenn Tal und Berg aneinander treffen und ist dieses, diese destruktive Interferenz und da ist es dann flach sozusagen. Ja. Und wenn zwei Täler aufeinandertreffen, dann macht es noch ein tieferes Tal eigentlich, ja.

I: Ja. Such dir einen Punkt aus und bestimme den Gangunterschied von diesem Punkt zur Quelle!

1: Ok. Irgendeinen Punkt, oder?

I: Ja, kannst du frei wählen und auch einzeichnen.

1: Ok, dann nehmen wir (überlegt) den dort, wo destruktive Interferenz auftaucht.

I: Mh.

1: Und da sind's, ahm, eineinhalb Lambda und da von der anderen Quelle aus sind's zwei.

I: Genau und wie ist dann der Unterschied zwischen den beiden, das ist dann der Gangunterschied.

1: Ein halbes Lambda.

I: Genau, super. Wie lautet generell der Gangunterschied für die destruktive Interferenz?

1: Also ahm es ist immer ein (kurze Pause), ein halbes Vielfaches. Äh genau. Es ist ahm, das war dieses zwei n plus ein mal Lambda halbe und ja.

I: Genau. Und wie würdest du das noch in Worten beschreiben?

1: Also Lambda halbe steht halt mal dafür, dass, wenn ich jetzt destruktive Interferenz hab, dass es immer irgendwas mit halben ist und das davor ist ein Ausdruck, damit ich nur die ungeraden mir aussuche.

I: Genau, mh. Wie lautet der Gangunterschied für konstruktive Interferenz?

1: Ok, ähm. Das da (zeichnet einen Punkt in der Abbildung ein). Da wär's ein Lambda und zwei Lambda, also der Unterschied ist ein ganzes Lambda, ja.

I: Ja. Und generell, wie wär der Gangunterschied für konstruktive Interferenz?

1: Das ist immer ein Vielfaches von Lambda. Also ein ganzes Vielfaches.

I: Ja. Mh. Und warum ist das genau ein Vielfaches oder ein ungerad halbzahliges Vielfaches von der Wellenlänge?

1: Also weil. Also dann sind sie halt entweder phasengleich oder phasenverschoben und das hängt damit zusammen.

I: Und bei welcher sind sie phasengleich?

1: Also phasengleich sind's dann, wenn's halt konstruktiv ist und wenn's unterschiedlich ist, sind sie äh destruktiv.

I: Mh, gut. Skizziere eine Linie, wo Minima sind. Wie ändert sich da die Wasserbewegung?

1: Ok, also Minima sind zum Beispiel da, wo sich die Täler treffen, also hier, würd ich sagen.

I: Oder, wo die Auslenkung minimal ist?

1: Ah, das ist da eben, das ist das wo halt ähm destruktive Interferenz passiert, weil da bleibt das ewig flach.

I: Genau. Ja, wie ändert sich da die Wasserbewegung?

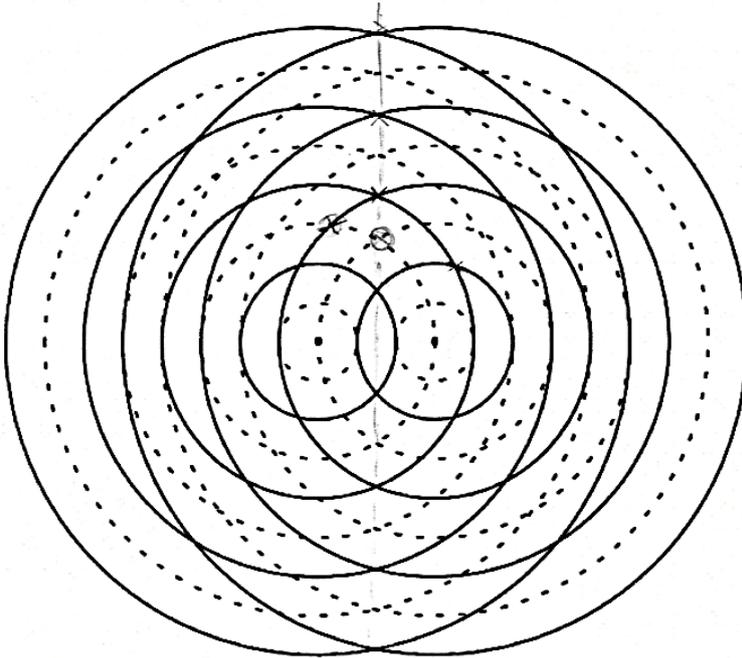
1: Also bevor die Quelle, also bevor halt irgendwas kommt, ist mal halt flach und dann nähert sich halt ein Berg und auch ein Tal und deswegen bleibt das weiter flach, weil sie sich auslöschen.

I: Genau, ja. Skizziere eine Linie, wo nur Maxima sind. Wie ändert sich die Wasserbewegung?

I2,51

**ABBILDUNG A**

Die Abbildung veranschaulicht Wellenfronten, die durch zwei Punktquellen erzeugt werden.



1: (zeichnet und erklärt) So, das ist zum Beispiel da oder da, so das ist eine Linie. So, also da kommt dann halt ein Berg und ein Berg und der Punkt wird doppelt so hoch angehoben wie ein Berg oder halt doppelt so tief nach unten versetzt.

I: Mh genau. Und wie ändert sich da die Wasserbewegung? Kannst du das vielleicht noch anders ausdrücken, wie sich die Wasserbewegung verändert?

1: Also sie springt halt zwischen ganz hoch und ganz tief hin und her.

I: Ja genau. Und jetzt hab ich da noch eine Frage zu dem Arbeitsblatt, das ihr jetzt am Ende noch bekommen habt.

1: Mh.

I: Es ist jetzt, weil ihr's noch nicht ganz besprochen habt, nur so eine reine Interessensfrage, wie ihr da darüber nachdenkt. Wie kannst du bestimmen, ob es konstruktive oder destruktive Interferenz in den Punkten A und B gibt? Denke laut und beschreibe deine Gedankengänge!

1: Also. Ich würde mal sagen, dass es zu Punkt A konstruktiv ist, weil vierzehn Lambda ein ganzes Vielfaches von Lambda ist. Und bei dem anderen ist es (kurze Pause) eigentlich auch konstruktiv, weil jeder Punkt, den ich mir auf der Linie aussuche, gleich weit entfernt von den beiden Quellen ist und somit sind sie phasengleich in jedem Punkt und dann ist da entweder so ein ganz, ganz hoher Berg oder ein ganz, ganz tiefes Tal.

I: Mh ja, perfekt. Gut ja, dann zum Abschluss noch: War in der Stunde alles klar? Hast du noch Fragen oder generell irgendwas zur Stunde noch?

1: Ich glaube, es war alles klar.

I: Irgendwas, was du noch dazu sagen möchtest?

1: (kurze Pause) Ich glaub nicht.

I: Ob die Arbeitsblätter gepasst haben?

1: Ich glaub, es war ganz gut, dass wir, also wir haben das davor jetzt noch nie so gemacht, dass wir Blätter kriegen und die Frau Professor sagt „Macht's das mal“, sondern davor ist's halt immer so, sie steht halt vorne und erzählt uns halt, wie das so ist und stellt halt schon Fragen, aber wir haben jetzt so nicht in dem Sinne so eine reine Ausarbeitung von uns gehabt.

I: Mh, ok. (kurze Pause) Super, dann sag ich vielen Dank. Danke schön.

1: Bitte.

## Interviewfragen Stunde 2, Schülerin 2

I: Wie definierst du den Gangunterschied, kannst du mir ein Beispiel auf der Abbildung zeigen?

2: Ok, also Gangunterschied im Sinne von, die Differenz? Von denen?

I: Ja.

2: Ok. Also das sind die Quellen äh und ein Gangunterschied wär zum Beispiel da, wo sie sich treffen also. Ähm, zum Beispiel hier trifft eine, ein Berg auf ein Tal.

I: Mh.

2: Und das geht halt immer so weiter.

I: Ja, genau.

2: Oder Tal, oder Berg auf Berg und dann wieder Tal auf Tal und Berg auf Berg.

I: Mh genau. Und wie wär dann der Gangunterschied, wie würdest du den in Worten beschreiben?

2: Es ist immer, also die Auslenkung maximal und minimal und so weiter, würd ich sagen.

I: Ok. Ja, such dir einen Punkt aus und bestimme den Gangunterschied von diesem Punkt zur Quelle!

2: Ok, ahm. Angenommen wir nehmen (überlegt) diesen Punkt.

I: Mh, kannst ihn ruhig einzeichnen, genau.

2: Und äh. Gangunterschied von diesem Punkt zur Quelle, ok ähm, das ist die Quelle. Und das ist auch die Quelle. Hier von dieser Quelle aus haben wir das Tal und von hier den Berg.

I: Mh.

2: Und (kurze Pause) da, soll ich rechnen? Also?

I: Ja, wie du das machen würdest.

2: Ok, also ähm. Hier also eine halbe, also eine ganze Wellenlänge und hier wärs eineinhalb Wellenlängen.

I: Mh, genau und wie wär dann der Unterschied?

2: Also eine Wellenlänge?

I: Ja, genau.

2: Ok.

I: Ok. Wie lautet der Gangunterschied für destruktive Interferenz?

2: Ähm, das ist immer, also die konstruktive ist das mit dem Vielfachen und die destruktive ist das mit dem eine ganze Wellenlänge plus eine halbe.

I: Mh, genau. Dann haben wir dann eh schon die vierte Frage eigentlich auch. Warum ist das genau ein Vielfaches oder halbzahliges Vielfaches von der Wellenlänge?

2: Weil es immer unterschiedlich sein muss, oder ich versteh die Frage nicht ganz.

I: Wo wär denn da zum Beispiel konstruktive Interferenz, in welchem Punkt?

2: Ähm. Hier zum Beispiel.

I: Ja, genau.

2: Oder hier, oder hier.

I: Ja, genau.

2: Und in denen, wo Bergtal auf Welle trifft, äh auf Bergtal. Nein Wellental (lacht) auf Bergwelle trifft, ist äh destruktiv.

I: Genau ja. Und wie ist der Abstand von diesem Punkt zu den Quellen? Wie war das mit den Vielfachen, wie hängt das zusammen?

2: Äh ja, also entweder ganzzahlig, also das Vielfache oder halbzahlig. Und bei den, häh ich versteh's nicht irgendwie.

I: Ahm. Du hast dir ja vorher hier ausgerechnet, dass es ein halbes Lambda ist und das ist eine destruktive.

2: Ja.

I: Und wie wär das zum Beispiel in diesem Punkt?

2: In dem?

I: Ja, bei diesem destruktiven.

2: Mh, wärs von hier aus 1, 2.

I: Ja.

2: Und von hier 1, 2 und ein halbes.

I: Und wie ist da der Unterschied?

2: Mh.

I: Zwei und zweieinhalb hast du gesagt.

2: Also auch ein halbes.

I: Genau ja. Gut. Skizziere eine Linie, wo Minima sind. Wie ändert sich da die Wasserbewegung?

2: Ok, ahm. Im, Moment, ok. Im, also wo 0 ist oder wo kleiner, also Minima also?

I: Also wo Minima sind, also wo eine minimale Auslenkung ist, also wo Berg auf Tal trifft, ist das.

2: Ok, das heißt, das haben wir dann eh eigentlich schon hier.

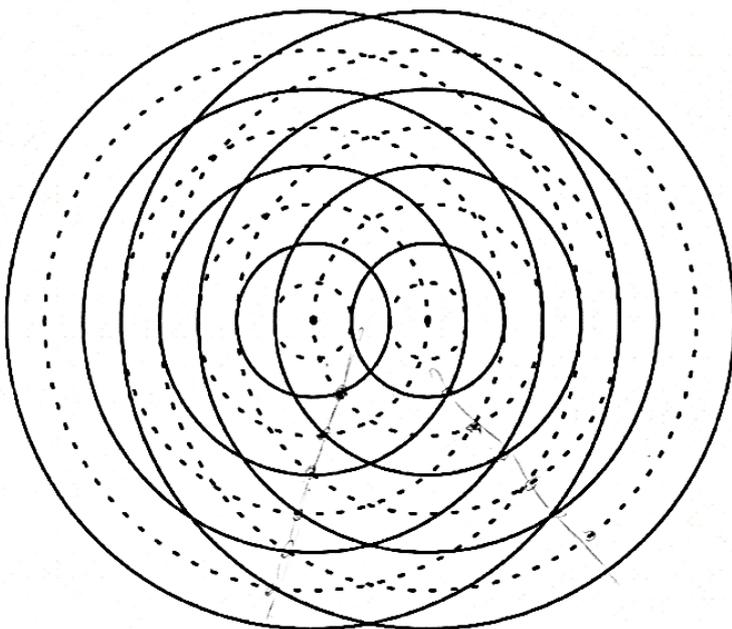
I: Genau, und kannst du noch die Linie konstruieren dazu?

2: So (zeichnet).

I 2, S 2

**ABBILDUNG A**

Die Abbildung veranschaulicht Wellenfronten, die durch zwei Punktquellen erzeugt werden.



I: Ja, genau. Wie ändert sich da die Wasserbewegung?

2: Die Wasserbewegung ist da Null und bleibt auch Null, also die Auslenkung ist Null.

I: Genau. Skizziere eine Linie, wo nur Maxima sind. Wie ändert sich da die Wasserbewegung?

2: Das wär dann hier (zeichnet ein) und da ähm ist es entweder bei den Bergen hoch und dann wieder äh runter und hoch und runter, also immer so abwechselnd und so weiter.

I: Ja. Genau. Dann noch zu dem Arbeitsblatt, das ihr jetzt am Schluss noch bekommen habt, dieses hier.

2: Mh.

I: Das ist jetzt nur eine reine Interessensfrage, weil ihr das jetzt noch nicht verglichen habt. Wie kannst du bestimmen, ob es konstruktive oder destruktive Interferenz in den Punkten A und B gibt?

2: Also das ist elf und ungerade.

I: Mh.

2: Dann würd ich mal meinen, dass das destruktiv ist, also von der Welle aus, also von den Wellen aus gesehen, ist das ein Punkt auf einer, wenn da destruktive Interferenz ist.

I: Mh ok. Und im Punkt B?

2: Ähm. Da würd ich dann sagen, dass es konstruktiv ist.

I: Kannst du noch irgendwas dazu sagen, warum du das glaubst?

2: Ja, dadurch dass wir das jetzt noch nicht so definiert haben, bin ich mir unsicher, also.

I: Ist kein Problem. Einfach was du dazu denkst und sonst, ja.

2: Ähm. (kurze Pause) Keine Ahnung.

I: Ok, ja und dann eigentlich noch: war in der Stunde alles klar? Hast du noch Fragen? Möchtest du generell noch was zur Stunde sagen?

2: Also ich find's gut, dass wir das so verglichen haben am Schluss, deswegen waren auch nicht wirklich Fragen ahm und die, die ich hatte, hab ich auch währenddessen einfach gefragt. Also ich wusste jetzt nicht genau, was sie mit Auslenkung meint, das hab ich nachgefragt, ähm. Und das Einzige, was nur wär, das projiziert oder aufgeschrieben zu

sehen, weil dann sagt sie irgendwas und dann weiß ich nicht genau, was jetzt wo hingehört und dann komm ich immer ein bisschen durcheinander und dann tun sich wieder Fragen auf und das ist so ein Kreislauf.

I: Ok. Vielleicht irgendwie eine Auflösung von den Linien und von den Punkten oder so?

2: Mh. Genau.

I: Von den farbigen auch?

2: Ja.

I: Ok. Sonst? Ok passt, dann danke schön!

## Interviewfragen: Stunde 2, Schülerin 3

I: Wie definierst du den Gangunterschied und kannst du mir ein Beispiel auf der Abbildung zeigen?

3: Ahm Gangunterschied ist, wenn quasi die Differenz der Wellenlängen, ähm zum Beispiel von hier auf hier.

I: Mh.

3: Hätt ich jetzt gesagt.

I: Ja, ok. Such dir irgendeinen Punkt aus und bestimme dann den Gangunterschied von dem Punkt zu der Quelle!

3: Genau von hier zu hier wär zum Beispiel ein halbes Lambda.

I: Mh, genau. Und zur anderen Quelle? Wie viel wär das?

3: Das wär ein ganzes, ein halbes, das wären zwei Lambda.

I: Und dann der Unterschied zwischen den beiden?

3: Wär ein Halb.

I: Ein Halb genau. Wie lautet der Gangunterschied für destruktive Interferenz?

3: Destruktiv ist ähm wenn quasi hier zu hier.

I: Generell nur für die destruktive. Was ist bei der destruktiven Interferenz mit den Wellen, was passiert da?

3: Ahso ist das nicht von Wellental zu Wellen ähm zu (kurze Pause).

I: Da sind die Minima, was ist dort?

3: Von hier zu hier? Oder von hier zu hier?

I: Das ist, wenn ein Berg auf ein Tal trifft.

3: das ist dann destruktive.

I: Genau das ist dann die destruktive.

3: Also äh konstruktiv ist hier.

I: Genau.

3: Aja stimmt, weil hier wird ja, ist die Auslenkung größer oder kleiner und hier ist die Null.

I: Ja.

3: Genau stimmt. Also Gangunterschied zwischen hier und hier wär auch ein halbes Lambda.

I: Mh.

3: Und von hier und hier wären ähm eineinhalb, oder?

I: Ja.

3: Ok.

I: Mh. Und wie ist das Ganze, also wie lautet der Gangunterschied für konstruktive Interferenz?

3: Eben das wär zwischen Berg und Berg?

I: Mh.

3: Wär das dann nicht, also. Entweder es ist eins oder eineinhalb, aber ich glaub es ist eher ein Lambda, weil hier ist ein halbes und hier ist ein halbes.

I: Mh genau. Und wie ist das von hier zur Quelle? Zu den zwei Quellen?

3: Von hier zur Quelle?

I: Von diesem Punkt, denn du dir vorher gesucht hast?

3: Ein Lambda und hier, aber die Quelle ist ja schräg unten.

I: Genau ja. Das ist ein Lambda, das hast du richtig gesagt.

3: Das heißt ein Lambda und ein halbes?

I: Mh. Und zur anderen Quelle?

3: Wär ein Lambda und noch ein Lambda und wieder ein halbes. Also zweieinhalb.

I: Mh genau super. Genau ihr habt ja dann noch besprochen, dass es bei einem ein halbzahliges Vielfaches und beim anderen das ganzzahlige ist.

3: Genau.

I: Genau. Und kannst du noch erklären, warum das genau ein Vielfaches oder ein halbzahliges Vielfaches von der Wellenlänge ist?

3: Wenn quasi, weil die Wellenlänge von Minima zu Minima hier eine, also ganzzahlig, eine Wellenlänge ist.

I: Mh.

3: Und dadurch eine ganze Zahl ist. Und von destruktiven also Punkten, die in Ruhe sind, ist es hier ein halbes, also hier sind nur Halbzahlige.

I: Mh.

3: Ist ein halbzahliges Vielfaches.

I: Ja. Skizziere eine Linie, wo Minima sind. Wie ändert sich da die Wasserbewegung?

3: Quasi hier?

I: Mh.

3: Also es wär so ein Strich durch und so ein X hier und hier.

I: Kannst ruhig auch alle einzeichnen, du kannst auf dem Blatt zeichnen, was du möchtest.

3: (zeichnet und erklärt) Ok. Ähm und hier durch, ah nein, oja das ist auch noch.

I: Mh.

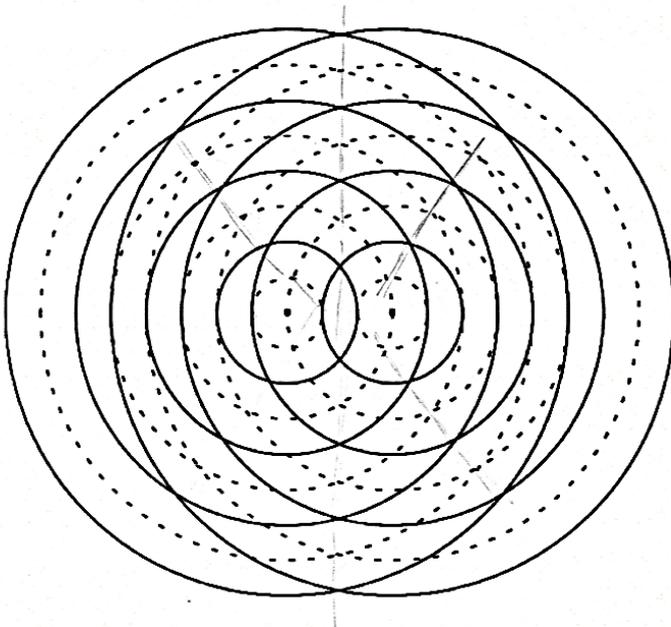
3: (zeichnet und erklärt) Hier und das wär dann so ein Knick theoretisch. Ähm. Ups. Hier und hier.

I: Genau.

12,53

**ABBILDUNG A**

Die Abbildung veranschaulicht Wellenfronten, die durch zwei Punktquellen erzeugt werden.



3: Das sind alle Minima also und dazwischen sind eben die Maxima dann.

I: Wie ändert sich die Wasserbewegung?

3: Die Wasserbewegung. Naja ein Minima wird zu einem Maxima, das heißt die Auslenkung wird verändert?

I: Mh.

3: Eben von Minima auf Maxima, aber die Welle bewegt sich trotzdem weiter.

I: Mh.

3: Als ohne irgendeine Interferenz. Also ja.

I: Mh. Und wenn sie sich auslöschen bei den Punkten dazwischen, wie ändert sich da die Wasserbewegung?

3: Da ist das Wasser ja komplett in Ruhe.

I: Mh.

3: Also das geht die Welle weiter und hier nicht, weil es sich quasi eben auslöscht.

I: Mh. Genau, das ist jetzt zu dem Arbeitsblatt, das ihr jetzt bekommen habt. Das habt ihr noch nicht besprochen.

3: Ja, wir haben das eh schon gemacht.

I: Ok. Kannst ruhig auch laut mitüberlegen. (die Fragen passen da jetzt nicht mehr ganz.)

3: Mh.

I: Wie kannst du bestimmen, ob es konstruktive oder destruktive Interferenz in den Punkten A und B gibt?

3: Genau, konstruktive sind ja die halbzahlig, weil hier, ah nein das sind die destruktiven, die halbzahlig, weil hier äh, da nur eine halbe Wellenlänge ist. Das heißt wenn hier, das ist ein Dreier?

I: Ja.

3: Wenn hier ein Dreier ist ganzzahlig und ein Dreier wär ein ganz, also drei, also elf durch drei, weiß jetzt nicht, aber das ist nicht ganzzahlig, also es ist kein ganzzahliges Vielfaches, es würd sich sehr wahrscheinlich mit Kommazahlen ausgehen und deswegen würde ich eher sagen, das ist eine konstruktive ähm Interferenz oder ähm, würde eher konstruktiv als destruktiv sagen.

I: Und in welchem Punkt? In A oder in B?

3: In A.

I: In A? Mh ok.

3: Na weil bei B ist ja nicht angegeben wie die Quellen.

I: Wie könnte man das herausfinden?

3: Hm. Man könnte es übertragen vielleicht? Die Strecke und abmessen?

I: Mh.

3: Wenns nicht angegeben wäre, dann so oder vektoriell eben ermitteln oder so was.

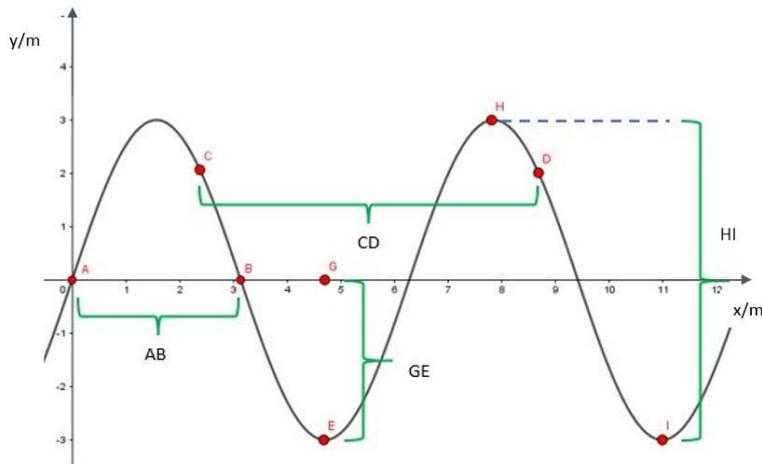
I: Ok. Genau. Ja, dann nochmal die Frage, ob alles klar war in der Stunde, ob du noch Fragen hast, oder etwas zur Stunde noch sagen möchtest?

3: Mh nein, ähm ich fand die Stunde relativ gut. Also auch die Arbeitszettel waren wieder sehr gut verständlich, also für mich. Es waren nur eben die ähm Unruhe auch in der Klasse, weil nicht jeder am selben Stand eben war. Nicht jeder hatte D und C schon, manche waren weiter als andere und man musste erst wieder reinkommen ins Thema. Aber das ist eh ganz normal, also, nichts was irgendwie von den Fragen komisch war.

I: Ok super. Dann vielen Dank!

## Interviewfragen Stunde 3, Schülerin 1

I: Welche Entfernung entspricht einer Wellenlänge?



1: Also die Wellenlänge ist von einem Berg zum anderen oder halt von einem Tal zum anderen.

I: Genau. Und welcher von diesen grünen Abständen ist das?

1: Zum Beispiel CD, weil das derselbe Punkt ist.

I: Wie würdest du die anderen Abstände benennen?

1: So also HI ist die Amplitude, ähm GE ist die halbe Amplitude und AB ist die halbe Phase.

I: Mh, genau. Wie beeinflusst der Abstand der Quellen voneinander die Anzahl der Knotenlinien und die Abstände zwischen ihnen?

1: Ok also ähm, wenn die weiter weg sind, haben sie, glaub ich, mehr Knotenlinien und wenn sie näher sind, dann halt nicht. Ähm ja.

I: Mh. Und welche Abstände haben die, hast du dir das noch gemerkt?

1: Ein Vielfaches der Wellenlänge?

I: Ob sie einfach weniger weit, also ob sie näher beieinander sind oder weiter weg? Nichts so genaues.

1: Also, wenn sie weiter weg sind, haben sie halt mehr Knotenpunkte, das ja.

I: Ja, ok. Ist das Licht Welle oder Teilchen und durch welche Erkenntnis kannst du das begründen?

1: Ähm also, ich glaub, dass man nicht sagen kann, ob Licht Welle oder Teilchen ist. Es gibt halt nur ähm Momente, wo halt das Wellenmodell besser ist als das Teilchenmodell und umgekehrt. Ähm zum Beispiel eben, wenn zwei Licht ahm strahle sich ähm ja also berühren praktisch, sind sie danach unverändert, das heißt, das würde für diese Wellentheorie sprechen.

I: Mh.

1: Aber es ist auch keine Welle in dem Sinne einer Welle so, ja.

I: Ja, ok. Wie kann man die Interferenz des Lichts zeigen und warum?

1: Also ähm ja, wenn man zwei, ähm hm. Wenn man Licht irgendwie sich kreuzen lässt, dann kann man eben diese destruktive und konstruktive Interferenz zeigen. Ähm ja.

I: Mit welchen zwei Experimenten habt ihr das gemacht?

1: Also da war so ein Laser und den haben wir durch so eine Spalte irgendwie strahlen lassen und da hat man halt gesehen, dass es halt Stellen gab, wo es sehr hell war und dann wieder welche wo's gar nicht war, also wo nichts war praktisch.

I: Mh. Und bei den Taschenlampen, war da auch Interferenz?

1: Bei den Taschenlampen? (überlegt) Da war's, ja. Da hat sie am Boden geleuchtet, aber es hat sich, dann hat sie mit einer zweiten dazu und das hat sich jetzt nicht irgendwie verändert oder so. Es hat auch den Boden beleuchtet, wenn nur eine da war.

I: Hat sich das irgendwie beeinflusst, diese zwei Lichtkegel?

1: Eigentlich nicht, glaub ich.

I: Ok. Und würd das dann für Interferenz oder gegen Interferenz sprechen?

1: Eigentlich gegen.

I: Genau, mh. Nochmal, wie definierst du den Gangunterschied?

1: Ähm, ich glaube, (kurze Pause) oh Gott. Ich bin mir jetzt gar nicht sicher, ob das ähm. Irgendwie wie der Abstand zwischen den zwei Quellen ist, obs das war oder nicht, es könnte sein.

I: Ja, es hat mit den Quellen und mit dem Abstand zu tun. Aber von einem gewissen Punkt.

1: Mh.

I: Wie kann man von einem gewissen Punkt den Gangunterschied bestimmen?

1: Ah, das war ähm, wenn man einen gewissen Punkt sich halt aussucht auf einer, wo sich irgendwie die Quellen also die Wellen schneiden und die Abstände zwischen jeder Quelle misst.

I: Mh. Wie lautet die Bedingung für die konstruktive und die destruktive Interferenz bei zwei Punktquellen?

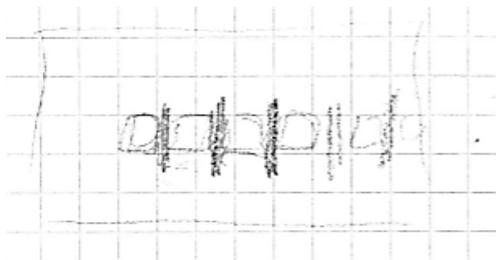
1: Also bei destruktiv muss es phasenverschoben sein und bei konstruktiv halt phasengleich. Ja.

I: Mh ja. Warum entstehen beim Experiment mit dem Doppelspalt helle und dunkle Bereiche auf dem Schirm?

1: Also die hellen sind halt dort, wo halt konstruktive Interferenz auftritt und die dunklen halt, wo destruktive Interferenz auftritt.

I: Genau. Skizziere genau, wie das Interferenzbild des Lichts auf einem Schirm aussieht!

1: (skizziert und erklärt dabei) Also das war, hm. Also das sah dann halt ungefähr so aus das Blatt und wir haben das gesehen, da war eine hell beleuchtete Zeile und dann halt dazwischen nichts und die waren halt immer gleich groß auch wenn das nicht so aussieht, aber die sind gleich groß und dazwischen wars aber halt schwarz.



I: Mh.

1: Ja und es hat sich halt wiederholt.

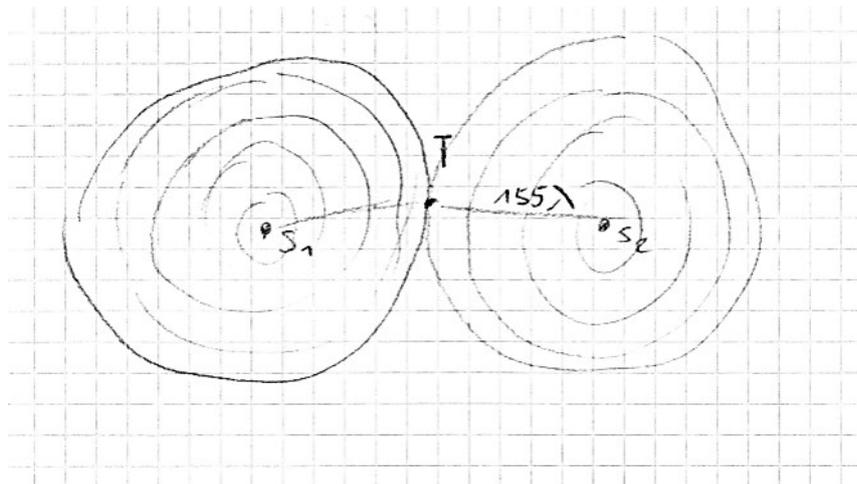
I: Genau und wie sieht das aus, also die sind gleich groß die hellen Stellen und die dunklen?

1: Die dunklen treten halt auch, also sind, glaub ich, auch gleich groß und treten halt in regelmäßigen Abständen auf.

I: Mh. Zwei kohärente Lichtquellen  $S_1$  und  $S_2$  emittieren die Wellen mit der Wellenlänge  $\lambda$  und Amplitude  $A$ . Die Wellen treffen sich im Punkt  $T$ . Der Gangunterschied

zwischen  $S_1T$  und  $S_2T$  beträgt  $155 \lambda$ . Wie groß wird die Amplitude im Punkt T? Und skizziere, wie du dir das vorstellst!

1: Ok (überlegt). Also, das heißt, es ist ein ganzzahlig Vielfaches, das heißt, es ist mal ähm konstruktive Interferenz, ähm und (leiser) und genau das heißt, wie kann ich das mit der Amplitude? (wieder in normaler Lautstärke). Also die Amplitude ist eben zweimal die Amplitude in Punkt T und skizziere ja also (skizziert). Da ist halt  $S_1$  und da ist  $S_2$  und, wenn das jetzt mal nur die Berge sind, weil das ist ja konstruktive Interferenz (skizziert die Berge). Und dann da, da berührt es sich dann und da ist halt T. Es schaut jetzt gleich groß aus, aber die Differenz zwischen den beiden ist dann eben zum Beispiel  $155 \lambda$ . Ähm, ja. Ja.



I: Ja, mh. Was sind Ähnlichkeiten bei der Interferenz von Wasserwellen und bei der Interferenz von Licht und was sind Unterschiede?

1: Ok, also ähm. (überlegt) Also, ich glaub, Gemeinsamkeiten sind, dass eben Interferenz auftritt, das gibt's sozusagen. Aber Unterschiede? (überlegt) hm.

I: Wenn du zum Beispiel dieses Bild mit diesem vergleichst, was ist da ein Unterschied? Oder wenn du dir bildlich vorstellst, die Wasserwellen und das Laserexperiment, das ihr angeschaut habt?

1: Vielleicht, dass die konstruktive Interferenzphase sozusagen größer ist als die destruktive?

I: Mh, ja. Und generell, was sieht man auch so dazwischen sozusagen beim Laser?

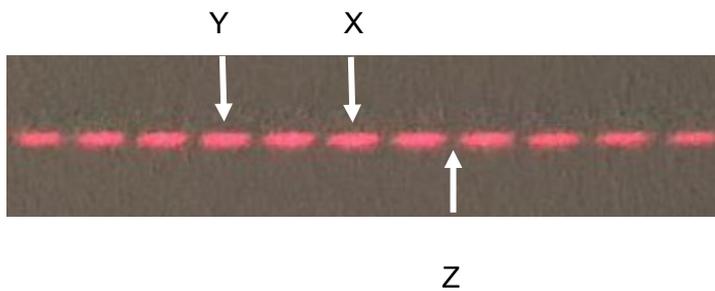
1: Beim Laser sieht man dazwischen ja praktisch nichts, also. Dass da halt konstruktive auftritt. Und beim Wasser ist halt Wasser dort, aber es ist halt nur gerade.

I: Genau. Und die Bedingung für Minima und Maxima sind die gleich oder verschieden?

1: Ähm, hm (überlegt). Ich glaub schon, dass die gleich sind.

I: Ja, genau. Folgende Abbildung zeigt ein Interferenzbild am Schirm. Punkt X zeigt die Mitte des Schirms. Wie groß ist der Gangunterschied im Punkt Y und im Punkt Z?

1: Ok so, also. X liegt ja bei einer ähm konstruktiven Interferenz. Also wir haben ja einen Wellenberg und dort ja auch. Das heißt der Abstand von Wellenberg zu Wellenberg ist ja Mal  $\lambda$  und daher sind's von X zu Y zwei  $\lambda$  und von X zu Z sind's halt eineinhalb.



I: Ja, und zum Abschluss noch: War in der Stunde alles klar? Hast du noch Fragen? Möchtest du noch was zur Stunde sagen?

1: Nein, ich glaub nicht, hat gepasst.

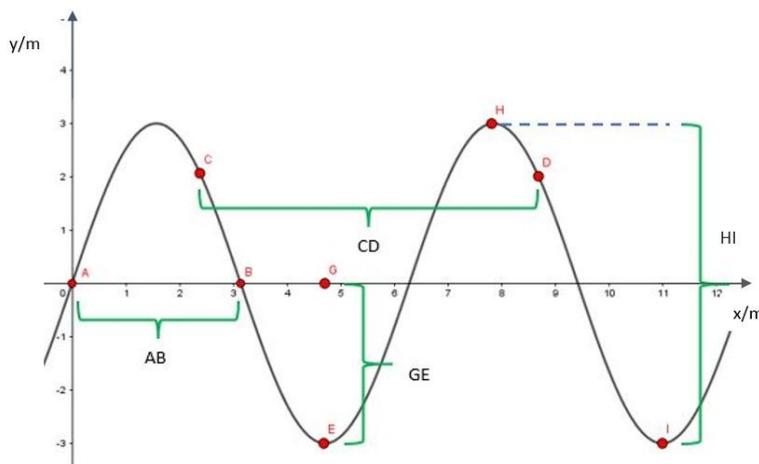
I: Super, vielen Dank.

1: Bitte.

### Interviewfragen Stunde 3, Schülerin 2

Die Schülerin war am Tag der Interviews für die dritte Stunde leider krank, deswegen wurde das Interview nach der letzten Stunde nachgeholt. Die Fragen 11 und 14 wurden im Unterschied zu den Interviews mit den anderen beiden Schülerinnen herausgenommen.

I: Welche Entfernung entspricht einer Wellenlänge?



2: Ähm, von Hügel zu Hügel würd ich sagen.

I: Und von diesen Abschnitten?

2: Von hier bis hier. (zeigt auf CD)

I: Mh. Wie würdest du die anderen benennen?

2: Ähm, das wär eine halbe Wellenlänge (zeigt auf AB), ähm das ist so der Ausschlag oder wie hoch, also wie stark es ist (zeigt auf HI) und das wär eben die Hälfte (zeigt auf GE). Amplitude, oder?

I: Genau. Wie beeinflusst der Abstand der Quellen voneinander die Anzahl der Knotenlinien und die Abstände zwischen ihnen?

2: Was sind Knotenlinien?

I: Das sind. Wenn du da schaut, sieht man das jetzt gut, diese hellen Linien (die Abbildung des letzten Arbeitsblatts mit der Folie). Das passt schon, ist jetzt schon wieder länger her. Ist das Licht Welle oder Teilchen? Durch welche Erkenntnis kannst du das begründen?

2: Also ich würde eher Welle sagen, man sagt ja auch die Wellenlänge eines Lichts. Ähm ja. Warum, ja wir haben ja diese Versuche gemacht, was sich eben besser eignet, Welle oder Teilchen und ja Welle.

I: Wie kann man die Interferenz des Lichts zeigen?

2: Ähm. Naja, wir haben das eben versucht mit dem äh, mit diesem Laser durch die äh Double-slits ähm Dias und ja. Und warum, also es wurde quasi, es wurde nicht aufgespalten, aber man hat das eben diese schwarzen Abstände in den einzelnen Lichtlinien gesehen.

I: Genau und was passiert, wenn man zwei Batterielampen verwendet?

2: Ähm, die also sie interferieren nicht, aber eigentlich schon, aber man erkennt's nicht ähm und weil ja das ist, weil naja, ich weiß nicht, beim Laser ist das anders, das ist eher so gebundene, ich kanns nicht gut erklären eigentlich.

I: Das passt schon, so wie du es erklärst. Wie definierst du den Gangunterschied?

2: Ähm. Der Gangunterschied, das war. Das ist auch schon länger her. Das war eben eh hier (zeigt auf die Abbildung), bei diesen Wellen, Wasserwellen.

I: Wo wär das zum Beispiel?

2: Ähm. (überlegt) Äh Moment. Da diese. Ah nein, anderes. Eben wenn, wo sich die kreuzen, also der Abstand.

I: Zum Beispiel? Hier von dem Punkt, wie würde man da den Gangunterschied bestimmen?

2: Bis zu den Quellen.

I: Mh genau. Und was macht man dann? Wenn ich jetzt bis da bestimmt hab?

2: Ich hab zum Beispiel hier die Quelle und dann mach ich dasselbe bis hier (zeigt auf die andere Quelle) und dann die Differenz.

I: Ja, genau. Wie lautet die Bedingung für konstruktive und destruktive Interferenz bei zwei Punktquellen?

2: Die konstruktive Interferenz ist zum Beispiel, wenn zwei Wellenberge aufeinandertreffen oder Täler und die destruktive ist, wenn Tal auf Berg trifft.

I: Genau. Und wie ist das mit dem halbzahlig und ganzzahlig?

2: Die ganzzahligen sind bei konstruktiven und die destruktiven äh die halbzahligen bei der destruktiven Interferenz.

I: Warum entstehen beim Experiment mit dem Doppelspalt helle und dunkle Bereiche auf dem Schirm?

2: Ähm, das ist die Interferenz.

I: Genau. Und wenn man's damit vergleicht? (zeigt auf die Wasserwellenabbildung)

2: Also, die dunklen sind die destruktive Interferenz und die konstruktive wären die hellen Bereiche. Also ja.

I: Mh ja. Skizziere genau, wie das Interferenzbild des Lichts auf einem Schirm aussieht!

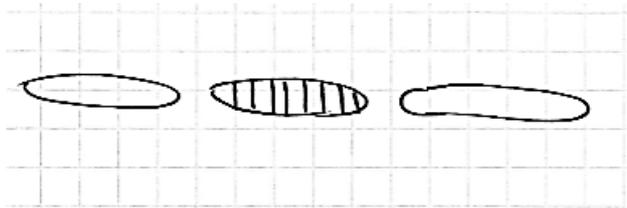
2: Soll ich's aufzeichnen?

I: Ja.

2: Ja also, soll ich das ganze Experiment, oder nur das auf dem Schirm?

I: Nur das auf dem Schirm.

2: Die hatten auch dieselben Abstände, glaub ich (zeichnet).



I: Mh.

2: (zeichnet weiter) Und innerhalb jeder Punkte war, also länglichen Ellipsen waren im selben Abstand hell und dunkle Flächen, Spaltabstände.

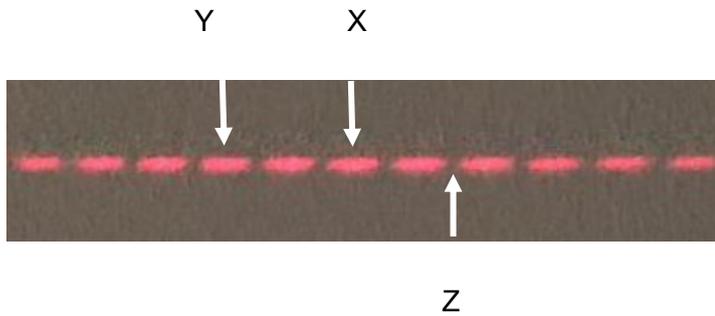
I: Mh. Genau. Was sind Ähnlichkeiten bei der Interferenz von Wasserwellen und bei der Interferenz von Licht und was sind Unterschiede?

2: Ähm naja, also. Wie gesagt, diese konstruktive und die destruktive Interferenz ist sehr ähnlich, weil es sind eben hier auch, das trifft aufeinander und das ist so quasi doppelt und hier ist einfach Licht und kein Licht, also dunkel und hell. Ähm Unterschiede. Ähm naja, es ist Wasser, es ist Licht, ich kann's nicht irgendwie und sonst weiß ich nicht wirklich.

I: Und vom Anschauen her? Vom Licht zwischen Quelle und Schirm?

2: Es ist viel weiter, also die Entfernung ist viel weiter beim Licht, von der Quelle.

I: Genau, mh. Folgende Abbildung zeigt ein Interferenzbild am Schirm. Punkt X zeigt die Mitte des Schirms. Wie groß ist der Gangunterschied im Punkt Y und im Punkt Z?



2: Mh. Das wär eine ganzzahlige (zeigt auf Y) und das ist eine halbzahlige (zeigt auf Z)?

I: Genau, könntest du auch noch eine Zahl dafür geben?

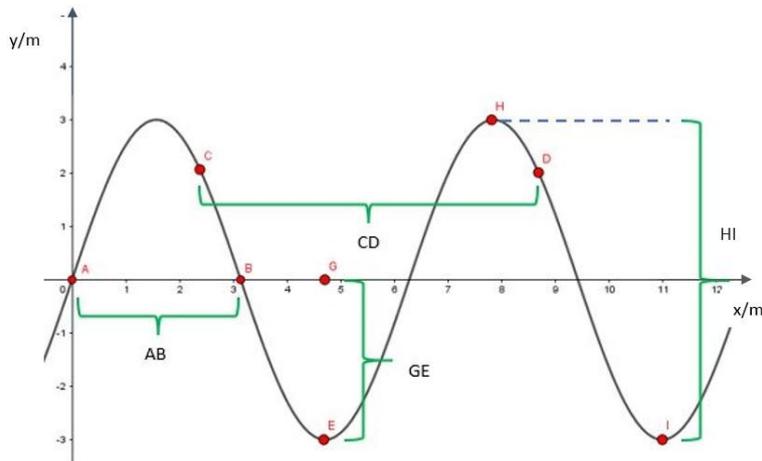
2: Ähm, eins, zwei (Y) und eineinhalb (Z).

I: Genau, ja.

### Interviewfragen Stunde 3, Schülerin 3

I: Welche Entfernung entspricht einer Wellenlänge?

3: Ähm. AB und CD.



I: Mh und wie würdest du die anderen Abstände benennen?

3: Ähm. GE wär die Amplitude, HI wär dann die zweifache Amplitude.

I: Genau. Wie beeinflusst der Abstand der Quellen voneinander die Anzahl der Knotenlinien und die Abstände zwischen ihnen?

3: Ähm ist das nicht bei der Amplitude, je geringer, desto ähm mehr Wellen gibt's quasi, also desto mehr Knotenlinien.

I: Mh genau. Was sind Knotenlinien?

3: Ist das nicht wie oft die, also hier zum Beispiel, wenn die Welle die x-Achse berührt quasi.

I: Mh. Ist das Licht Welle oder Teilchen? Durch welche Erkenntnis kannst du das begründen?

3: Naja. Hier ist es also. Generell Licht ist eine Welle, weil sich ähm, also wenn das Licht sich kreuzt, ähm da blockiert's nicht, sondern geht durch.

I: Mh, genau. Wie kann man die Interferenz des Lichts zeigen und warum?

3: Ähm, die Interferenz. Ist das nicht auch das mit den Wellenfronten zum Beispiel? Also.

I: Ja.

3: Aber des Lichts? Haben wir diesen Versuch dann gemacht?

I: Mh.

3: Ähm, man lasst quasi einen Laser durch, äh, so eine Spalte hindurch, durch eine, durch zwei Spalte um genau zu sein, und das hab ich nämlich nicht ganz verstanden, warum dann diese Striche kamen, aber halt mit dem Experiment kann man das zeigen.

I: Mh. Und dann habt ihr noch das Experiment mit den Taschenlampen gehabt.

3: Mh.

I: Habt ihr da auch Interferenz gesehen oder ... ?

3: Ja, weil der Schatten quasi, der wurde (Pause) ähm verstärkt, quasi die Helligkeit auch des Lichtes, aber ja.

I: Wie definierst du den Gangunterschied?

3: Das weiß ich irgendwie bis heute nicht.

I: Ist ok. Wie lautet die Bedingung für die konstruktive und die destruktive Interferenz bei zwei Punktquellen?

3: Destruktive Interferenz ist, wenn quasi ein Wellenberg und ein Wellental aufeinandertrifft und dort ist die Welle in Ruhe. Und konstruktive Interferenz ist quasi, wenn die Welle dann ausschlägt, also ein Wellenberg auf ein Wellenberg oder ein Wellental auf ein Wellental.

I: Genau. Und weißt du noch, wie das mit der Wellenlänge war? Mit halbzahlig und ganzzahlig?

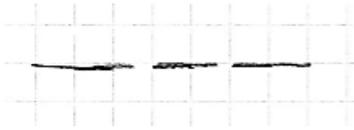
3: Ähm, ganzzahlig ist die konstruktive Interferenz und destruktive ist halbzahlig.

I: Warum entstehen beim Experiment mit dem Doppelspalt helle und dunkle Bereiche auf dem Schirm?

3: Das weiß ich nicht, also das hab ich nicht verstanden.

I: Skizziere genau, wie das Interferenzbild des Lichts auf einem Schirm aussieht!

3: Also es hat so Streifen. (skizziert) Also so und dann ist immer eins heller als der andere Strich.



I: Und wie sind die Abstände zwischen den Strichen?

3: Die sind immer gleich, also kommt auf die zwei Spalten an, oder? Oder ist das immer so?  
Ich glaub, es kommt auf die Spalten an.

I: Und bei eurem Fall, den ihr gesehen habt?

3: Da also, die sind, die Striche sind länger als die Spalten auf jeden Fall, aber ups die Spalten müssten ja und die Striche müssten eben ein gleiches Verhältnis haben.

I: Mh. Zwei kohärente Lichtquellen  $S_1$  und  $S_2$  emittieren die Wellen mit Wellenlänge  $\lambda$  und Amplitude  $A$ .

3: Mh.

I: Die Wellen treffen sich im Punkt T. Der Gangunterschied zwischen  $S_1T$  und  $S_2T$  beträgt  $155 \lambda$ . Wie groß wird die Amplitude im Punkt T und skizziere, wie du dir das vorstellst!

3: Ähm, (Pause) wie man von der Wellenlänge auf die Amplitude kommt. Da gibt's eine Formel, aber an die kann ich mich nicht erinnern, also könnt ich das jetzt nicht wirklich ausführen.

I: Und wenn du dir das ansiehst, ist das konstruktive oder destruktive Interferenz?

3: Von zwei kohärenten Lichtquellen, das  $155\lambda$ ?

I: Ja.

3: Das wär äh konstruktiv.

I: Genau und wie groß ist die Amplitude bei der konstruktiven Interferenz? Was passiert da?

3: Sie halbiert sich? Keine Ahnung.

I: Was passiert bei der konstruktiven Interferenz?

3: Aso, die wird größer, also erhöht, weil der Ausschlag höher wird.

I: Genau. Und wie hoch genau?

3: (zaghaft) Doppelt so hoch?

I: Genau ja und wie stellst du dir das ungefähr vor?

3: Quasi, wenn das zum Beispiel ein Wellenberg jetzt so ist und ein anderer genau gleicher, das quasi wenn das so hier oben ist, 1,2,3 wird's so erhöht. Dann ist eben die Amplitude doppelt so groß.

I: Und dann noch mit den zwei Quellen und einem Punkt, wie stellst du dir das vor?

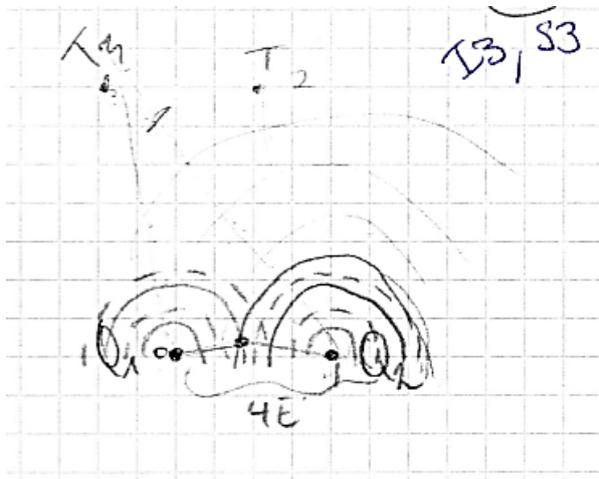
3: Aber ich versteh das mit dem Punkt nicht.

I: Kannst du mal die zwei Quellen aufzeichnen?

3: Wenn zum Beispiel. (zeichnet)

I: Du kannst auch in einem neuen beginnen.

3: (zeichnet) hier eine Quelle hab und ähm hier eine Quelle und hier. Aso, aja da gab's dieses Diagramm, genau, genau. Da gab's quasi hier (zeichnet). Und da müssten sie sich hier und ebenso weiter, ups. Und wenn wir jetzt zum Beispiel den Punkt hier nehmen, das war ja eine konstruktive Interferenz und ah jetzt versteh ich das Ganze. Äh, misst man quasi hier die Wellenlängen ab und hier auch.



I: Genau.

3: Und wenn's ein bisschen weiter entfernt ist, wird und quasi genau in der Mitte zwischen den zwei, ähm zwischen dem Abstand, wenn das, ups wenn das jetzt vier Einheiten oder vier Lam, was auch immer, vier Einheiten beträgt und der Punkt hier T bei 2 wär, hätten sie genau die gleiche Entfernung, also die beiden Quellen.

I: Ja genau. Was sind Ähnlichkeiten bei der Interferenz von Wasserwellen und bei der Interferenz von Licht? Was sind die Unterschiede?

3: Mh. Am Anfang und am Ende sind sie beide äh gleich, also so wie sie vorher davor auch waren, ähm und Unterschiede. Naja. Wasser, also Wasserwellen haben auch ein Hoch und Tief quasi, hm. Aber es gibt keine Amplituden, würd ich jetzt mal sagen.

I: Ok. Und generell, wenn du dir anschaust, Wasser und den Laserstrahl, was ist da der Unterschied?

3: Naja, Wasser hört irgendwann mal auf, die Welle, und der Laserstrahl würde bei bestimmten Bedingungen unendlich weit gehen.

I: Würden wir bei jedem Punkt Interferenz sehen oder warum sehen wir das überhaupt?

3: Mh. Beim Licht?

I: Mh.

3: Die Interferenz?

I: Wo haben wir die gesehen?

3: still

I: Einfach nur wo, auf welchem Ding haben wir das gesehen?

3: Beim Licht?

I: Ja. Wo hat der Laser hingeleuchtet?

3: Eben durch diese Spalte.

I: Genau und worauf?

3: Auf einen, so einen Schirm quasi.

I: Genau.

3: Und da kann man's ablesen.

I: Mh.

3: Ah ok.

I: Sieht man dazwischen auch was?

3: Ja, also wenn man genau hinschaut, könnte man so einen Strahl erkennen halt.

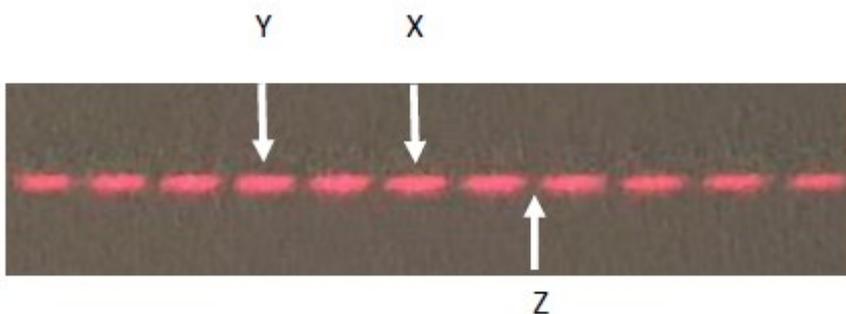
I: Mh. Und beim Wasser, sieht man da auch dazwischen nicht so gut oder ist das überall gleich?

3: Mh, naja. Es ist auf eine bestimmte Zeitspanne auch begrenzt, und... (still). Mh.

I: Und die Bedingung für Minimum und Maximum, glaubst du sind die gleich oder verschieden bei Licht und Wasser?

3: Mh, sehr wahrscheinlich verschieden, aber das war jetzt nur so ein, würde ich jetzt eigentlich eher nur raten.

I: Ok. Folgende Abbildung zeigt ein Interferenzbild am Schirm. Punkt X zeigt die Mitte des Schirms. Wie groß ist der Gangunterschied im Punkt Y und im Punkt Z?



3: Mh. Hier hätten wir quasi, wär das dann destruktiv? (zeigt auf Punkt Z)

I: Mh.

3: Weil hier ist ähm kein  $n$  quasi, sondern ein  $n$  halbe, ähm das heißt, der Gangunterschied wär hier eben mit diesen mit den halben Zahlen und hier mit den vollen Zahlen.

I: Könntest du auch eine genaue Zahl angeben?

3: Mh. Wär das dann zwei Lambda? Und das eineinhalb?

I: Genau.

3: Ok.

I: Ja. War in der Stunde alles klar? Hast du noch Fragen? Möchtest du noch was sagen?

3: In der Stunde haben wir relativ lang von, mit diesen Wellen, also mit dem Abmessen von den Quellen gebraucht.

I: Mh.

3: Ähm, weil der Arbeitsauftrag auch nicht von der Frau Professor ganz klar war.

I: Ok.

3: Ähm und die Berechnung, quasi das Ablesen der Gangunterschiede auch nicht. Weil zum Beispiel ich und meine Partnerin haben eben versucht die Sprünge abzulesen, aber man könnte ja so gehen und dann, weiß dann halt nicht, wenn zum Beispiel hier ein Punkt ist T Drei (zeichnet ein), ähm und bräuchte man den Abstand von hier und hier und wenn man das mit Sprüngen abzählen müsste, könnte man ja zuerst so gehen und dann so, dann wärn's aber mehr Sprünge, als wenn man so quasi, also quasi so geht und dann hier einsetzt oder so. Das war nicht ganz klar, wie man das abmisst, die Wellenlänge.

I: Mh.

3: Aber sonst. Der Versuch war auch irgendwie ein bisschen, aber vielleicht war das auch so, weil's die erste Stunde war und so und niemand wirklich wach war. Aber sonst hat alles gepasst.

I: Also, da kann man eh von dem Punkt zu dem P abzählen.

3: Mh.

I: Berg, also die Wellenlängen, also von durchgezogenen zu durchgezogenen 1,2 und so weiter zählt.

3: Ja.

I: Und von hier noch zur anderen Quellen

3: Mh.

I: und dann ist der Unterschied zwischen diesen zwei Zahlen...

3: Die Wellenlänge.

I: ...dann der Gangunterschied.

3: Ist der Gangunterschied, ok.

I: Und daraus kannst du dann sagen, ob konstruktiv oder destruktiv.

3: Mh. Aber zum Beispiel, wenn das hier jetzt so weitergehen würde.

I: Ja.

3: Ähm, müsste man da einfach nur schräg die Wellen, also die Schritte quasi abzählen in Lambda, einfach nur bis hier oder nur bis hier?

I: Genau, bis zur Quelle zurück.

3: Aber wär das dann ein halbes, oder? Das wär dann ein halbes Lambda.

I: Genau, das wär dann sozusagen deine gepunktete Linie, also deine gestrichelte.

3: Ja, genau.

I: Du liest dann daraus eins und dann.

3: Ok, und manchmal kann man quasi so oder so, also das war uns zumindest noch nicht klar. Aber ich hab's eh auch mit der \_\_\_\_ (Anm: Schülerin 2) gemacht, also vielleicht ist das gar kein so unwichtiges Detail.

I: Mh. Also von dem einen Punkt, also ich hab's auch immer so mit Abzählen gemacht, man kann's eben auch mit Messen machen.

3: Ja, weil die Frau Professor meinte dann, wieso haben wir kein Lineal draußen und so.

I: Mh. Also es geht mit Zählen auch.

3: Ok, gut.

I: Passt, dann vielen Dank!

3: Bitte.

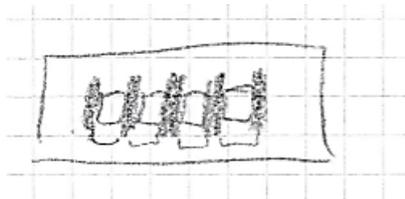
## Interviewfragen Stunde 5, Schülerin 1

I: Skizziere ein Interferenzbild und beschreibe es mit eigenen Worten!

1: Auch so von oben, wo man die Welle so sieht oder wirklich mit...

I: Vom Licht, was man auf dem Schirm sieht.

1: Ah ok. Der Schirm (zeichnet). So. Und das schwarze ist halt die destruktive Interferenz und das andere ist die konstruktive Interferenz. Und das sollte gleich groß und gleich weit entfernt sein.



I: Mh genau. Perfekt. Von welchen Parametern hängt das Interferenzbild am Schirm ab?

1: Also es hängt davon ab, wie weit ähm dieser Doppelspalt von dem Schirm entfernt ist.

I: Mh.

1: Außerdem hängt es halt von der Wellenlänge ab und von dem Abstand von diesen Doppelspalten.

I: Genau. Was wird passieren, wenn der Spaltenabstand kleiner wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden? Wird sich der Abstand zwischen den Linien des Interferenzbildes vergrößern oder verkleinern?

1: Er wird sich vergrößern.

I: Mh ok, ja. Dann was wird passieren, wenn die Wellenlänge kleiner wird und die anderen Parameter gleich bleiben?

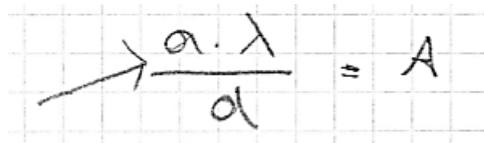
1: Er wird sich verkleinern.

I: Und was wird passieren, wenn der Schirm näher an den Doppelspalt rückt?

1: Dann verkleinert sich's auch.

I: Ok genau, gut. Kannst du eine Formel aufschreiben, die diese Parameter verbindet? Und beschreibe sie mit eigenen Worten!

1: (schreibt die Formel auf) Ok. Also  $a$  ist die Entfernung von dem Doppelspalt zum Schirm,  $\lambda$  ist die Wellenlänge und  $d$  ist der Abstand zwischen den Doppelspalten.


$$\rightarrow \frac{a \cdot \lambda}{d} = A$$

I: Genau und was haben wir damit noch, ist gleich was?

1: Ahm, ist gleich?

I: Du kannst auch nur den Namen davon sagen, muss jetzt nicht genau der Buchstabe sein.

1: (überlegt) Ist halt die Entfernung von den (Pause) Interferenzauf tretenden (Pause).

I: Genau von den Linien.

1: Nennen wir das  $A$  für Abstand. (fügt es in der Formel hinzu, siehe Anhang)

I: Ok, ja passt super. Dann würd ich kurz zu dem Arbeitsblatt gehen. Ich weiß nicht, ob ihr schon etwas davon gemacht habt oder nicht.

1: Wir haben begonnen.

I: (sucht den Zettel heraus) Was siehst du, wenn du das Bild verschiebst?

1: (verschiebt) Also es entstehen so Striche, so entlang (zeigt entlang der Linien). Und das ist eben da, wo diese destruktive Interferenz auftritt.

I: Genau.

1: Ja.

I: Passt, genau. Wo wäre der Schirm in diesem Fall?

1: Der Schirm? Ah, wär der? Naja, so würd ich irgendwie sagen. Aso man sieht, nein. Ah nein, der Schirm müsste eigentlich so am Rand der Welle sein, weil dann sieht man nämlich konstruktiv, destruktiv, konstruktiv, destruktiv (zeigt mit dem Stift jeweils darauf) und so weiter.

I: Mh.

1: Und genau das sieht man ja am Schirm auch.

I: Genau, mh. Wäre die Linie in der Mitte hell oder dunkel und warum?

1: Die Linie in der Mitte. (überlegt). Die wäre, (überlegt) die wäre dunkel, weil es mit einem, in diesem Fall halt einem Strich, beginnt und einem Strich, äh einem Strich beginnt, einem Strich aufhört, so und das heißt, das in der Mitte ist dann gestrichelt und das ist eine destruktive Interferenz, beziehungsweise schwarz.

I: Mh, ok. Ja. Wie würdest du die Wellenlänge der Wellen anhand des Interferenzbildes bestimmen?

1: Also ist von einem schwarzen Strich zum anderen.

I: Und aus diesem Bild?

1: Aso, aus diesem. Äh ja, von einem, von einer konstruktiven zur anderen konstruktiven Interferenz.

I: Genau. Das heißt, was müsstest du dafür messen?

1: Äh, entweder man macht's mit diesen Gangunterschieden oder man misst einfach zwischen den beiden Wellenbergen oder Maxima.

I: Ja, genau. Gut, dann haben wir's schon fast. War in der Stunde alles klar? Hast du noch Fragen?

1: Wir sind nicht ganz fertig geworden, das fand ich ein bisschen blöd.

I: Mh.

1: Also, das hätten wir vielleicht länger durchmachen sollen. Oder ein bisschen mehr reinquetschen. Und ich fand auch, dass bei den Experimenten manchmal nichts weiter gegangen ist.

I: Ok.

1: Also vielleicht wär's besser gewesen, wenn die Frau Professor das vorne gemacht hätte. Weil dann ist es erstens schneller aufgebaut, zweitens weiß sie genau, was sie tun muss und wo sie was anschrauben muss und drittens, wir tratschen untereinander (lacht). Das ist Priorität und ähm ja, bei der Frau Professor wär das halt schneller gegangen.

I: Ok ja. Mh. Danke. Wie hat dir diese Unterrichtssequenz gefallen, generell die ganze? Waren die Experimente zu leicht oder zu schwer, die Arbeitsblätter? Und wie ist es dir dabei gegangen?

1: Ähm.

I: Generell ein Feedback so dazu.

1: Also ich fand's gut, dass wir Arbeitsblätter hatten, wir hatten noch nie Arbeitsblätter. Äh, ich fand's auch gut, dass der Stoff immer wieder wiederholt wurde, aber ich glaube, wenn man jetzt so einen Lehrplan hat und über das ganze Jahr mehrere Themen macht, war's irgendwie zu langsam. Wir haben das ur genau gemacht, deswegen glaub ich, dass man's jetzt halt auch gut kann, aber ich weiß nicht, ob man so viel Zeit zur Verfügung hat für Themen.

I: Mh. Das stimmt natürlich ja.

1: Ich mein, ich weiß nicht, vielleicht funktioniert das, aber mir kam's so rüber, als hätten wir's jetzt ewig gemacht und ich weiß nicht, wenn die Frau Professor das nur so in Worten zusammengefasst hätte, so ganz ganz kurz.

I: Mh ja. Das stimmt natürlich. Super ja. Dann vielen Dank!

1: Das ist es?

I: Ja, das war's auch schon von heute, ja.

1: Ok.

## Interviewfragen Stunde 5, Schülerin 2

Die Schülerin wurde am gleichen Tag zur Stunde 3 und zur Stunde 5 interviewt, da sie beim vorigen Termin krank war. Deswegen wurde die Frage 1 ausgelassen.

I: Von welchen Parametern hängt das Interferenzbild am Schirm ab?

2: Ah das, was wir heute gemacht haben.

I: Mh.

2: Ähm, also. Von der Entfernung, ah ja, von dem Abstand der Doppelspalten, also Doppel ja

I: Ja, passt eh.

2: Genau. Äh dann, wie weit der Schirm von dem Doppel (sehr abgehakt), von dem Dia entfernt ist und von der Wellenlänge, haben wir auch gesagt.

I: Mh. Was wird passieren, wenn der Spaltenabstand kleiner wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden? Wird sich der Abstand zwischen den Linien des Interferenzbildes vergrößern oder verkleinern?

2: Ähm das war die indirekte, also war indirekt proportional.

I: Mh.

2: Das heißt äh je größer desto kleiner.

I: Genau, also wenn die Spalten kleiner werden, dann?

2: ... wird's größer.

I: Wird der Abstand größer, mh. Was wird passieren, wenn die Wellenlänge kleiner wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden? Wird sich der Abstand zwischen den Linien des Interferenzbildes vergrößern oder verkleinern?

2: Das war mit dem grünen und mit dem roten Laser. Der grüne Laser hat die (überlegt), hat die größere Wellenlänge, glaub ich, oder umgekehrt, das hab ich nicht so ganz.

I: Der grüne hat die kleinere Wellenlänge.

2: Ok. Der grüne hat die kleinere. (liest die Frage nochmals laut vor) Wenn die Wellenlänge kleiner wird, blablabla. Genau und der rote hatte trotzdem größere Abstände.

I: Mh,

2: Das heißt je kleiner, desto kleiner.

I: Genau ja. Was wird passieren, wenn der Schirm näher an den Doppelspalt rückt und die anderen Parameter gleich gehalten werden? Wird sich der Abstand zwischen den Linien des Interferenzbildes vergrößern oder verkleinern?

2: Ähm auch verkleinern.

I: Mh.

2: Weil's auch indirekt? proportional war. Also je näher der Schirm am Doppelspalt, desto äh kleiner der Abstand der Linien.

I: Mh. Ist kompliziert zum Umschreiben. Kannst du eine Formel aufschreiben, die diese Parameter verbindet? Beschreibe sie mit eigenen Worten!

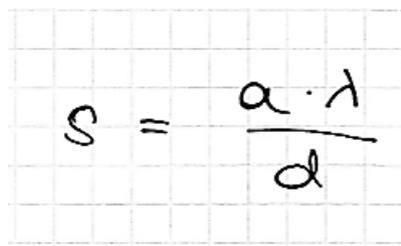
2: Ähm. Also das, was ich jetzt eigentlich eh die ganze Zeit gesagt habe, mit dem direkt und indirekt.

I: Ja.

2: Nur halt verbunden. Also das war, was haben wir denn (überlegt), was suchen wir den eigentlich? Warte. Ich muss nur die Parameter. Also es war immer s, oder?

I: Genau.

2: s ist gleich ähm, dann was war direkt? Das war a und Gamma, das war die Wellenlänge und durch d (schreibt die Formel auf).


$$s = \frac{a \cdot \lambda}{d}$$

I: Und was war das s?

2: s war der Abstand, oder?

I: Ja, und zwischen was?

2: Der Abstand zwischen den Linien des Interferenzbildes.

I: Genau. Dann hier noch ganz kurz. Habt ihr das noch in der Stunde begonnen?

2: Ja, das war ganz am Schluss.

I: Ja.

2: Da haben wir das so nach rechts und nach links ziehen müssen.

I: Genau. Und was merkt man da, wenn man das schiebt?

2: Es werden immer mehr Knotenlinien, oder ja.

I: Ja, genau.

2: Jetzt weiß ich, was Knotenlinien sind (lacht).

I: Wäre die Linie in der Mitte hell oder dunkel? Und warum?

2: Ähm, die Linie in der Mitte?

I: Ja genau, die hier. (zeigt darauf)

2: Die wär (überlegt).

I: (schiebt die Folie hin und her)

2: Mh. Die wär hell auch.

I: Mh genau. Und was haben wir da entlang dieser Linie? Ich weiß nicht, sieht man das gut?

2: Da trifft immer Berg auf Berg und Tal auf Tal, also konstruktive.

I: Mh genau. Wie würdest du die Wellenlänge der Welle anhand vom Interferenzbild bestimmen?

2: (überlegt) Die Wellenlänge?

I: Würde dir was einfallen? Das habt ihr noch nicht gemacht, das ist nur interessehalber.

2: Naja, ich würde zur, schauen von, von Punkt zu Punkt, also von Bergknoten zu dem nächsten oder zum Tal, oder äh zum zur Quelle, oder ich weiß es nicht mehr. Aber ich glaub schon so. Also eines ist nur ein, ein Gamma.

I: Ok. Und wieder war in der Stunde alles klar? Hast du noch Fragen?

2: Ähm, ich fand's schon gut, dass jeder das Experiment probieren konnte. Nur ich persönlich find das immer viel besser, wenn der Lehrer das macht und dann alles, was am

Zettel steht, gleichzeitig beantwortet, weil dann ist man hundertprozent sicher, dass man das richtig hat.

I: Mh.

2: Ähm. Deswegen mag ich Schülerexperimente, ich mag schon gern Experimente, aber nicht so in Gruppen.

I: Mh.

2: Weil man sich nie sicher ist, welche Werte man jetzt genau nehmen muss und so.

I: Ok.

2: Es ist schwieriger fürs Lernen zu Hause dann.

I: Ok ja, verstehe. Und jetzt eine abschließende Frage. Wie hat dir diese Unterrichtssequenz generell gefallen? Waren die Experimente zu leicht, zu schwer? Oder generell, wie ist es dir dabei gegangen? Deine Gedanken einfach dazu.

2: Also ich fand das alles eigentlich sehr interessant mal. Also die Frau Professor \_\_ auch in mit einem anderen Unterricht zu sehen und das fand ich eigentlich ziemlich cool. Ähm, die Arbeitsblätter bin ich überhaupt nicht gewohnt, also das ist, weil wir schreiben normalerweise alles immer selber ins Heft und kriegen nie wirklich Arbeitsblätter. Ähm ja, fand ich auch gut eigentlich mal, das so zu sehen. Also ich fand, die Unterrichtssequenz hat mir eigentlich gut gefallen.

I: Super, dann vielen Dank!

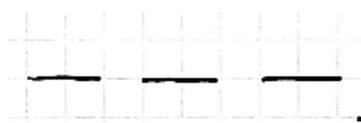
## Interviewfragen Stunde 5, Schülerin 3

I: Skizziere ein Interferenzbild und beschreibe es mit eigenen Worten!

3: Also hier, oder?

I: Da, auf dem Zettel.

3: Ok. (zeichnet) Ähm. Also das ist, wenn quasi ein Laserstrahl durch ähm Spalten quasi durchgeschossen wird und auf einem Bild also auf einem Schirm aufgefangen oder quasi ähm abgebildet wird. Und es sind immer gleich lange Strich, also gleich lange Striche mit den gleich langen Abständen zwischen den Strichen.



I: Mh genau. Von welchen Parametern hängt das Interferenzbild am Schirm ab?

3: Ähm von dem Abstand zwischen den zwei Spalten, also es sind Doppelspalten, das hab ich vergessen vorher. Von den zwei Spalten auf diesem Dia, von dem Dia zum Schirm und warte  $a$  war das,  $d$  war das dazwischen und ja das war's, weil die Lichtquelle wird ja nicht bewegt und von der Wellenlänge.

I: Ja, genau.

3: Genau.

I: Was wird passieren, wenn der Spaltenabstand kleiner wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden?

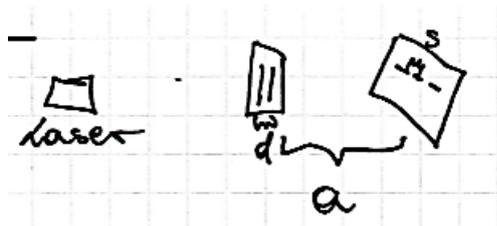
3: Mh.

I: Wird sich der Abstand zwischen den Linien des Interferenzbildes vergrößern oder verkleinern?

3: Also, wenn wir jetzt zum Beispiel die das Dia also weiter von dem, von dem Bildschirm verkleinert, also nein, näher zum Schirm hingeben, dann werden die Spaltenabstände auch kleiner. Das heißt

I: Du kannst es ruhig auch skizzieren, wenn du möchtest.

3: (zeichnet) Das heißt, quasi wenn hier das Dia ist und hier der Schirm, werden die kleiner, wenn der Abstand  $a$  auch kleiner wird, also genau.



I: Mh. Dasselbe, wenn der Doppelspalt näher zusammenrückt?

3: Näher zusammen. Ähm, das wird, dann werden die Spalten größer. Also quasi wenn  $d$  (zeichnet) kleiner wird, werden die Spalten größer. Das heißt äh wenn  $s$ ,  $s$  kleiner wird, wird  $d$  größer.

I: Ok, ja. Und was wird passieren, wenn die Wellenlänge kleiner wird und die anderen Parameter gleich gehalten werden?

3: Die Wellenlänge verändert man mit dem, mit dem Licht.

I: Mh.

3: Also mit der Art des Lichts. Da hatten wir diesen grünen und den roten Laser.

I: Genau.

3: Und da war die Wellenlänge vom grünen Laser geringer als die vom roten. Und bei einem, bei einer höheren Wellenlänge waren die Abstände geringer, bild ich mir ein, zwischen den äh Interferenzlinien als beim Grünen quasi.

I: Mh, ja genau. Kannst du eine Formel aufschreiben, die diese Parameter verbindet? Beschreibe sie mit eigenen Worten!

3: Ahm.  $s$  ist direkt proportional zu  $a$ ,  $s$  ist indirekt proportional zu  $d$  und wieder  $s$  direkt proportional zu ähm  $\lambda$ . Wäre die Formel (schreibt auf)  $s$  ist gleich  $a$  mal  $\lambda$  durch  $d$ .

$$s \sim a \quad s \sim \frac{1}{d} \quad s \sim \lambda \quad s = \frac{a \cdot \lambda}{d}$$

I: Mh genau, passt. Dann da ganz kurz, ich weiß nicht, ob ihr da schon wirklich noch dazugekommen seid. Was bemerkst du, wenn du die Folie da hin- und herschiebst?

3: Nach rechts? Also hier steht zum Beispiel nach rechts. Dann rücken natürlich die Quellen näher zueinander und es werden mehr Interferenzlinien, also es entstehen mehr Interferenzlinien. Weil hier zum Beispiel ist konstruktive Interferenz und hier destruktive und hier ist eben wieder konstruktiv und jetzt entsteht hier wieder konstruktiv und die destruktive ist jetzt nach oben gewandert und die konstru... äh die destruktiven von vorher sind jetzt hier die konstruktive, quasi das löscht sich hier natürlich auch selbst aus.

I: Ja, genau. Wäre die Linie in der Mitte hell oder dunkel?

3: Ähm. In der, jetzt ist in der Mitte ähm eine konstruktive Interferenz und das wär eine helle Linie.

I: Genau. Wie würdest du die Wellenlänge der Wellen anhand des Interferenzbildes bestimmen?

3: Mh. Ähm ist das nicht mit dem Abzählen der Lambdasprünge quasi. Das heißt, es kommt auch immer vom Abstand der Wellenquellen zusammen. Ähm ja. Also zum Beispiel hier ist jetzt eineinhalb Lambda. Weil das ist eins und noch ein halbes.

I: Was würdest du noch messen, um dir die Wellenlänge dann zu bestimmen?

3: Mh.

I: Den Abstand hast du schon gesagt.

3: Mh. (überlegt). Ich weiß nicht.

I: Das habt ihr auch nicht mehr gemacht. War in der Stunde jetzt alles klar? Hast du noch irgendwelche Fragen?

3: Ähm. Also Fragen hab ich keine. Aber es, ich wollt nur sagen, dass es mit dem Aufbau noch ganz gut geklappt hat und auch die Zusammenarbeit im Team mit den Schülern war auch kein Problem und dieses Mal hat sich auch jeder ausgekannt von, also, weil die Instruktionen von der Frau Professor auch klarer formuliert waren. Ja.

I: Generell, wie hat dir die ganze Unterrichtssequenz gefallen? Waren die Experimente zu leicht, zu schwer? Wie ist es dir dabei gegangen? Oder generell noch irgendetwas?

3: Ich fand's immer gut, dass man die Arbeitsblätter immer mithat, also quasi immer mithaben musste. Weil man konnte sich davor natürlich auch was auf, also noch was zusätzlich ergänzen und so ähm, weil jeder auch dasselbe hatte. Das ist bei uns beim Hefttext, wenn wir normal arbeiten nicht so, da hat immer jemand was anderes und weil's

doch sehr chaotisch ist manchmal mit der Frau Professor. Aber das ist eh kein Problem. Und dann hat immer jeder dieselben Fragen gehabt und nur selten unterschiedliche Antworten.

I: Mh ok.

3: Das war relativ angenehm. Aber sonst war alles, konnte man gut mit den Arbeitsblättern arbeiten eigentlich.

I: Super, das freut mich. Dann danke schön!

3: Kein Problem!

## Interviewfragen Auswahl, Schüler 4

Dieses Interview wurde mit einem Schüler nach der vierten Unterrichtseinheit gehalten. Es enthält eine Auswahl an Fragen aus den vorigen drei Interviews.

I: Wie kann man in der Physik entscheiden, welches von mehreren Modellen ein Phänomen am besten beschreibt?

4: Man schaut eben, man probiert halt mehrere Modelle aus und welches die äh besten Ergebnisse oder die meisten Ergebnisse, die man verwenden könnte, hergeben, wird halt als bestes sozusagen äh beschrieben. Weil es gibt kein bestes, weil zum Beispiel beim Licht kann man ja zwischen Teilchen und äh Wellenmodell unterschieden und ja. Jedes hat halt seine eigene Präferenz.

I: Ja genau. Durch welches Phänomen unterscheiden sich Wellen von Teilchen?

4: Äh, das äh Wellen sich halt nur in einem bestimmten Medium ausbreiten können, glaub ich. Und die Teilchen sich halt frei bewegen können. Also, ich kanns nicht wirklich gut erklären, aber. Wellen haben halt, haben halt so einen Ausgangspunkt, eine Quelle und Teilchen brauchen keine Quelle.

I: Genau, ja. Wie würdest du den Begriff Interferenz definieren?

4: Interferenz würd ich, würd ich nicht definieren können. Weil es gibt halt destruktive und konstruktive Interferenz, aber definieren würd ich's jetzt nicht können. Ich würd einfach sagen, wenn sich eine Art von irgendwas, wenn sich zwei Sachen einfach treffen, würd ich einfach jetzt so sagen spontan.

I: Ja. Welche Bedingung ist notwendig, damit Interferenz überhaupt auftreten kann?

4: Man braucht halt zwei Quellen, die Wellen aussenden und diese müssen sich dann an einem bestimmten Zeitpunkt oder an bestimmten Ort dann halt treffen und dann entsteht halt Interferenz.

I: Und was ist das Besondere an diesen Quellen?

4: Das sie äh halt gleich sind oder in ihren Phasen gleich.

I: Mh. Genau, passt. Was bedeutet der Begriff kohärent?

4: Das ist wenn äh zwei Wellen dieselbe Amplitude, dieselbe Wellenlänge und phasengleich sind, glaub ich. Es waren drei Sachen, aber ich weiß jetzt nicht, ob das schon alle drei waren.

I: Ja , aber.

4: Phasengleich, gleiche Wellenlänge und.

I: Was hängt noch mit der Wellenlänge zusammen?

4: Äh, die Energie, die die Welle hat.

I: Zum Beispiel, oder auch die Frequenz.

4: Aja, die Frequenz.

I: Aber das hast du damit eigentlich eh auch schon mit dem allen gesagt. Ja, wie definierst du den Gangunterschied, kannst du mir ein Beispiel auf der Abbildung zeigen?

4: Ah, zum Beispiel der Gangunterschied, nehmen wir mal, welcher Punkt ist jetzt da gut. Diesen Punkt. Und diesen Punkt nennen wir jetzt mal P (schreibt auf) und dieser Punkt P ist von der Quelle eine bestimmte Anzahl von, ein bestimmtes Vielfaches von der, von der Wellenlänge entfernt und ein anderes bestimmtes Vielfaches von äh, von der Quelle zwei entfernt und der Unterschied, also die Differenz äh, Unterschiede ist dann äh der Gangunterschied, also der Unterschied der Entfernung von den zwei Quellen.

I: Perfekt. Wie lautet der Gangunterschied für destruktive Interferenz?

4: Destruktiv ist ja, wenn sich Wellental und Wellenberg treffen. Also ich glaub das war das äh, ein ungerades Vielfaches, halbes Vielfaches von n, ah nein von der Wellenlänge, ja.

I: Ja genau. Wie lautet der Gangunterschied für konstruktive Interferenz?

4: Also der ist n mal Lambda, also n mal die Wellenlänge.

I: Mh. Warum ist das genau ein Vielfaches oder ein halbzahliges Vielfaches von der Wellenlänge?

4: Äh, weil, weil äh es halt konstruktive und destruktive. Nein, es gibt ja Wellental und Wellenberg und die sind halt phasenverschoben nicht gleich weit entfernt und daher ist es eigentlich logisch, dass es unterschiedlich ist.

I: Mh. Skizziere eine Linie, wo Minima sind. Wie ändert sich die Wasserbewegung?

4: Minima ist wenn Wellental auf Wellental trifft.

I: Wo ist das in der Abbildung?

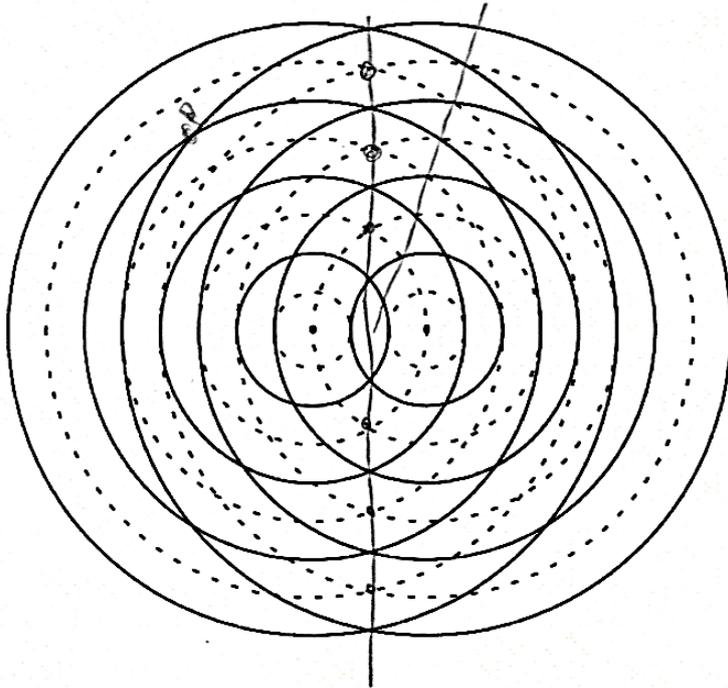
4: In der Abbildung wär's hier und

I: Sind das jetzt die Minima oder die Maxima?

4: Äh, ja wir müssen eigentlich zuerst äh entscheiden, was ein Wellenberg und was ein Wellental ist. Also ich würd mal sagen strichliert sind Wellentäler und die Minima sind an den Punkten, wo sich zwei Wellentäler treffen. Und auf der Linie sind halt auch noch die Wellen, äh die Maxima.

**ABBILDUNG A**

Die Abbildung veranschaulicht Wellenfronten, die durch zwei Punktquellen erzeugt werden.



I: Mh. Und eine Linie wo destruktive Interferenz ist, wo ist das zum Beispiel?

4: Das. Welches, destruktiv?

I: Ja, destruktiv.

4: Ist halt, ich kanns jetzt nicht ganz genau machen, aber trifft es halt, wenn Wellental auf Wellenberg.

I: Wie ändert sich da die Wasserbewegung?

4: Da bleibt sie einfach gleich.

I: Was passiert dann mit dem Wasser an der Stelle? Bewegt sich das oder ist es in Ruhe, oder?

4: Es bleibt in Ruhe.

I: Und an dieser Linie, mit den Maxima und Minima?

4: Da geht es halt einmal hoch und einmal runter.

I: Genau. Das ist wieder so wie auf dem Arbeitsblatt.

4: Oh Gott.

I: Sonst ist es auch kein Problem. Wie sieht die Situation in Punkt A aus? Ist dort ein Maximum oder ein Minimum, also konstruktive oder destruktive Interferenz und warum ist das so? Hier sind die zwei Quellen.

4: Hier sind die zwei Quellen und das ist ein elf vom Lambda?

I: Genau. Da elf Lambda und da dazwischen haben wir drei Lambda.

4: Ok, also müsste es äh destruktiv, was war nochmal destruktiv. Destruktiv war ein ungerades halbes Vielfaches von  $n$ .

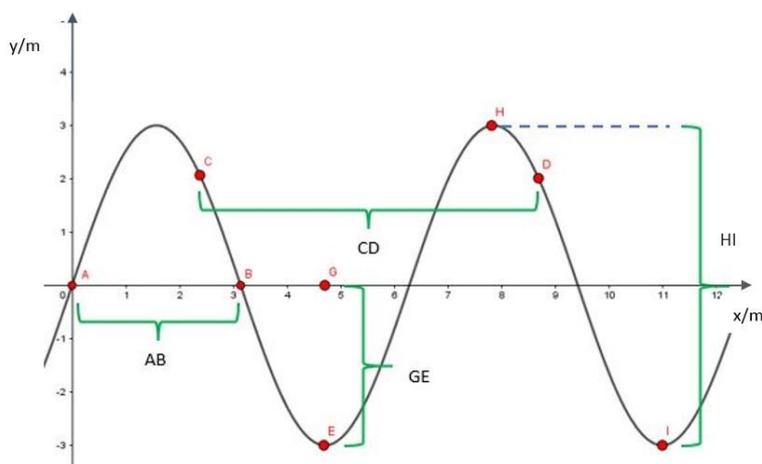
I: Mh.

4: Also ist es jetzt konstruktiv, weil das halt ein  $n$  von Lambda ist und in B wär halt das Umgekehrte.

I: Genau passt. Also haben wir in A konstruktiv und in B?

4: Destruktiv.

I: Destruktiv. Gut. Welche Entfernung entspricht hier einer Wellenlänge? Von diesen Buchstabenpaaren?



4: Welche, welche Entfernung? Also von diesen Punkten hier?

I: Ja, von diesen vier Punkten.

4: Also ich würd sagen C bis D, also CD.

I: Mh. Was kann man über die anderen Entfernungen sagen?

4: GE ist die Amplitude und ist es, ja HI ist die doppelte Amplitude, also nach oben und nach unten und das ist, glaube ich, eine halbe Wellenlänge, AB ist eine halbe Wellenlänge.

I: Genau. Ist das Licht Welle oder Teilchen und durch welche Erkenntnis könntest du das begründen?

4: Ähm, wir haben das schon in der Schule gemacht. Also sag ich jetzt mal, man kann es mit beidem vergleichen, weil wir haben erst mal Wellen gemacht und ich würd sagen, äh wenn wir zwei Lichtquellen haben, äh äh gibt es keine Interferenz mal so, aber außer man hat schon Bewegungen, also so äh mit der Welle kann man es beschreiben, weil die Welle breitet sich auch in alle Richtungen aus und ja.

I: Mh, ok. Wie kann man die Interferenz des Lichts zeigen und warum?

4: Soll ich da das Experiment nochmal beschreiben?

I: Ja, zum Beispiel.

4: Man hat so einen Laser, so einen roten Laserstrahl und so einen Doppelspalt durch den das Licht dann kommt, und weil äh die Spalten dünner sind als der Laser wird das Laserlicht halt gespalten und man bekommt dann äh zwei gleiche kohärente äh Lichtquellen also eine Lichtquelle wird dann zu zwei. Hinter dem Spalt, hinter den zwei Spalten gibt es dann noch so einen Schirm, worauf das Licht dann fällt und man kann am Schirm halt beobachten, wo es Lichtstellen gibt und schwarze, wo das Licht nicht sichtbar ist und dann halt nochmal Licht und dann wieder schwarz und dann wechselt sich das halt ab.

I: Genau. Und du hast eh schon richtig erkannt, dass beim Laserexperiment das Interferenzbild ersichtlich wird.

4: Ja.

I: Was passiert dann, wenn man die zwei Batterielampen verwendet?

4: Äh. Die zwei Batterielampen müssen halt komplett ident sein, damit Interferenz auftreten kann, wenn sie nicht äh äh ident sind, tritt halt trotzdem äh Interferenz auf, aber ist halt so schnell, dass wir es nicht mit unserem Auge sehen können.

I: Genau. Warum entstehen beim Experiment mit dem Doppelspalt helle und dunkle Bereiche auf dem Schirm?

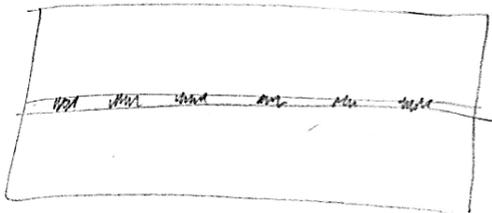
4: Äh, wegen der Interferenz halt. Es gibt äh an den hellen Stellen, wo man das Licht sieht, trifft Wellental auf Wellental und Wellenberg auf Wellenberg und bei den äh dunklen Stellen ist es halt so Wellental auf Wellenberg oder Wellenberg auf Wellental.

I: Genau. Skizziere genau, wie das Interferenzbild des Lichts auf einem Schirm aussieht!

4: Ist eigentlich genau das da unten.

I: Kannst eh auch da dazu zeichnen.

4: (zeichnet und erklärt) Hier ist so der Schirm und hier ist die Linie. Die weißen Stellen sind jetzt wo das Licht da ist. Die Abstände zwischen den äh schwarzen Balken sind halt immer gleich und ja.



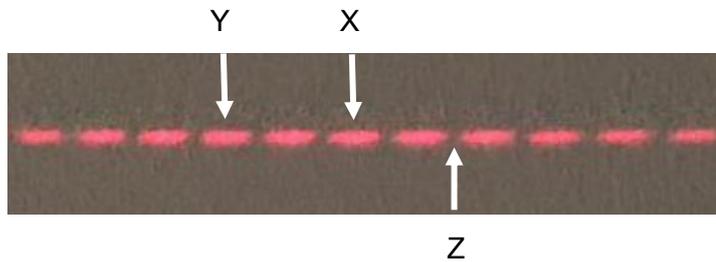
I: Ja. Was sind Ähnlichkeiten bei der Interferenz von Wasserwellen und bei der Interferenz von Licht und was sind Unterschiede?

4: Gleich ist es halt, dass äh, wenn Wellental auf Wellental trifft es zu einer konstruktiven äh Interferenz kommt und genauso halt mit Wellenberg auf Wellenberg, aber wenn es äh, ein Wellenberg auf Wellental trifft, ist es halt eine destruktive Interferenz und das ist gleich mit der Wasserwelle. Und Unterschiede sind zum Beispiel dass äh, weiß ich jetzt gar nicht mehr, ich hab das jetzt leider vergessen.

I: Macht nichts. Zum Beispiel, wenn du's dir generell ansiehst?

4: Ah, ja ja jetzt weiß ich's, ich weiß es wieder, ich weiß es wieder. Bei der Wasserwelle sieht man den kompletten Ablauf und beim Licht sieht man es nur auf dem Schirm, wie es aussieht.

I: Mh. Genau. Folgende Abbildung zeigt ein Interferenzbild am Schirm. Punkt X zeigt die Mitte des Schirms. Wie groß ist der Gangunterschied im Punkt Y und Z?



4: Y ist ein äh zweimal Lambda würd ich mal sagen und Z ist äh eins Komma fünf Lambda, ist äh der Gangunterschied.

I: Genau ja. Generell, war in den Stunden alles klar? Hast du noch irgendwelche Fragen? Oder möchtest du generell etwas zu dem ganzen Konzept sagen?

4: Äh die Stunden waren eigentlich recht angenehm und ich hab auch alles mitgekriegt. Aber ich finde, das mit den Blättern halt, ein bisschen nicht unnötig, aber man hätte das viel kompakter machen können und äh einfach statt drei A4 Blätter halt alles auf zwei Blätter machen können oder doppelt bedruckt ja, aber sonst hat alles gepasst.

I: Ok und sonst von der Menge her, war's auch zu viel von den Arbeitsblättern, oder?

4: Von den Blättern selbst war's viel.

I: Aber vom Inhalt?

4: Aber vom Stoff, vom Inhalt war's eigentlich ganz gut. Nur, ich glaub, es hatten manche Schwierigkeiten und da sollte man halt nicht Druck machen, damit sie dann noch mehr, in noch mehr Schwierigkeiten kommen, sondern es halt langsam angehen und nochmal wiederholen.

I: Ok, dann vielen Dank!

## Anhang C. Interview mit der Lehrkraft

### Interview mit der Lehrkraft

I: Inwiefern unterscheidet sich die Unterrichtssequenz, die durch die Materialien vorgegeben wurde, von der Art und Weise, wie Sie das Thema üblicherweise behandeln?

L: Ja, also der größte Unterschied ist der, dass eben die Interferenz ohne Beugung behandelt wird. Ähm, das ist etwas, also die Notwendigkeit sehe ich, dass man das machen muss und das wollte ich auch, das war ein Plan von mir, das immer zu machen, nur hat mir die Idee gefehlt, wie man das wirklich umsetzen kann. Also in der Schule wird oft so ein Beugungs-Interferenz-Mischmasch erzeugt und ich denk mir, das sind eben zwei getrennte Phänomene und ich denk mir, dass das gut wäre, wenn man die eben getrennt behandelt. Meistens wird dann erst nur die Beugung am Gitter gemacht, die ja wieder anders ist und äh ja, insofern hat mir das gut gefallen, dass da wirklich einmal etwas behandelt wurde, das nur die Interferenz zum Thema hat.

I: Wie ist es Ihnen persönlich beim Unterrichten gegangen? War das Skript zu umfangreich, zu detailliert?

L: (lacht). Ja, also ich hab mir am Anfang recht schwer getan, weil ich viele Sachen einfach so im Kopf hab und dann so aus dem Kopf heraus unterrichte, also dadurch dass ich halt schon mehrere Dienstjahre habe, hab ich viele Sachen schon öfters unterrichtet und hab das quasi schon so auswendig gelernt. Also ich kenn genau meine Pfade, die es gibt, die Optionen, wo man abzweigen kann und sonst was und dadurch, dass das eben ein fremdes Skriptum war, hab ich das erst quasi lernen müssen. Ich hab dann die ganze Stunde oder die ganze Sequenz im Kopf und wie dann genau die Argumentationen waren und an welcher Stelle genau welche Frage gestellt wurde, das hab ich mir am Anfang nicht so recht damerkt. Also ich hab schon versucht quasi in der Lehrervorbereitung, dieses Skriptum zu lernen, ähm ich hab mir auch, denk ich, genügend Zeit dafür genommen oder ich hab mir gedacht, ich hätte mir genügend Zeit dafür genommen. Im Endeffekt war's dann aber so, dass ich dann, die Sequenz nicht genug im Kopf hatte, um mich ganz wohl zu fühlen. Also in den ersten Stunden hab ich dann noch recht viel auf die Vorbereitung schauen müssen, weil ich keinen Fehler machen wollte, was in welcher Reihenfolge kommt, was an welcher Stelle kommt, was ich noch nicht vorwegnehmen darf oder soll. Bei den letzten Unterrichtseinheiten ist es mir dann besser gegangen, dann war ich besser drinnen, da hab ich mich persönlich wohler gefühlt. Also wir haben ja mal kurz geredet, ob man's gemerkt hat oder nicht, das ist ein

anderes Thema. Aber wie gesagt, so die, ich glaub, wie viele Stunden haben wir jetzt gebraucht, ich glaub vier?

I: 5 haben wir gebraucht.

L: Also die ersten zwei hab ich mich jetzt nicht so super wohl gefühlt, aber dann ist es eigentlich gegangen. Aber wie gesagt es liegt vor allem daran, dass ich die ganze Choreographie nicht so im Kopf hatte, ja.

I: War es zu viel Text Ihrer Meinung nach oder passt das so?

L: Also nein, die Unterrichtsvorbereitung selbst, die hat mir eigentlich gut gefallen. Also ich denk mir, wenn da ein Text vorgeschlagen ist, was ich die Schüler fragen soll oder so, ist es ein Textvorschlag und wenn ich das anders formuliere, dann formulier ich's eben anders, wenn's halt vielleicht anders hineinpasst. Aber ich hab das schon gut gefunden, dass das so detailliert ist, ja. Und ich würd mir auch oft von Studenten, wenn sie grad am Anfang zum Unterrichten beginnen, wünschen, dass sie so detailliert planen und wirklich ein Drehbuch quasi aufschreiben für die Stunde. Was ich noch anmerken möchte: Wenn ich dieses, ich nenn's jetzt mal Drehbuch, befolgt hab, wars mir eine Spur zu fragend-entwickelnd. Also ich würde das weniger machen oder ich glaube, dass ich das in meinem Unterricht weniger mache. Sozusagen Informationsblock, kleinerer Arbeitsauftrag oder sonst was und weniger diese Einzelfragen hineinstellen, also in die Klasse hineinstellen.

I: Haben sich die Schülerinnen und Schüler Ihrer Erfahrung nach in dieser Sequenz eher leicht oder schwer getan? Woran konnten Sie das erkennen? Gab es Abschnitte, die Ihnen in dieser Hinsicht besonders aufgefallen sind? Was war hilfreich?

L: Ja, ich denk mir, dass sie am Anfang nicht so genau gewusst haben, worauf wir abzielen oder worauf es eigentlich abzielt. Und es war am Anfang sehr detailliert und ich hab manchmal das Gefühl, wenn Sachen sehr, sehr detailliert gefragt und erarbeitet werden, dann glauben die Schüler, das ist eh so einfach ist, weil jede dieser kleinen Aufgaben babyleicht ist. Und dann setzt sich das aber relativ schnell zu einem großen Ganzen zusammen und dann hat man vielleicht die am Anfang erarbeiteten Kenntnisse wieder vergessen. Dann stehen die Schüler und Schülerinnen auf einmal vor so etwas und sagen ups, wie kommen wir jetzt eigentlich dazu. Ich glaube, ist hier ganz einfach schwierig die Balance zu halten. Wie detailliert mach ich die Aufgabenstellung, wie einfach mach ich die einzelnen Punkte? Wie schwierig mach ich sie? Also einerseits, dass die Schüler zwar mitkommen und das erarbeiten können, aber andererseits, dass sie sozusagen nicht den Faden verlieren oder nicht so dieses Interesse verlieren oder sagen wir nicht Interesse, die

Aufmerksamkeit verlieren. Oder dass sie die Notwendigkeit sehen, dass sie jetzt wirklich aufmerksam sein müssen, weil jetzt etwas zu einem großen Ganzen zusammengesetzt wird. Wenn man bei den Details nicht mitkommt, ist auf einmal das große Ganze nicht erfassbar. Woran ich das erkennen konnte? Ich würd sagen, eher an so körpersprachlichen Signalen beziehungsweise an einzelnen Wortmeldungen: naja das ist ja so, und naja, ist eh klar, also diese Wortfetzen, die man erfasst, wenn man bei Gruppenarbeiten durchgeht.

I: Mir ist zum Beispiel aufgefallen, dass in der ersten Stunde mit den vielen Simulationen, dass da die Aufmerksamkeit schon ein bisschen runtergegangen ist. Aber ich weiß nicht, ob das nur ich so gefunden hab, oder?

L: Ja also das mit den Simulationen hab ich als extrem anstrengend empfunden, weil ich vor der Stunde die ganzen Dokumente öffnen musste mit den ganzen Links und das rüberkopieren musste und so weiter, also das war relativ viel Aufwand in der Pause vor der Stunde und es kam mir vor, dass den Schülern oder mir, vielleicht wars auch nur mir nicht ganz klar, was die Simulationen jetzt eigentlich sollten oder was sie mit dem Text zu tun haben. Also ich kann mir vorstellen, dass man dann in den Arbeitsblättern vielleicht irgendeinen Punkt macht, dass man zum Beispiel beschreiben lässt, was in dieser Simulation eigentlich gezeigt wird. Also nicht nur, was man aus der Simulation lernt, wir sehen das und wir sehen das, da waren eh einige Fragestellungen, sondern dass man zuerst die Simulation ein bisschen beschreibt.

I: Haben sich ihre Schülerinnen und Schüler eher leicht oder eher schwer getan bei dem Ganzen? Können Sie das ungefähr einschätzen?

L: Also ich denk mir, sie haben sich nicht wahnsinnig schwergetan. Also das war schon sehr kleinschrittig, so im Hinblick auf ein Masterylearning, wo man eben so lang die Sachen macht, bis alle alles verstanden haben. In der Hinsicht hat das ganz gut funktioniert, ja.

I: Wie haben die Schülerinnen und Schüler auf diese Unterrichtssequenz reagiert? Glauben Sie, dass sie interessiert, gelangweilt, überfordert ... waren, konzentriert mitgearbeitet haben?

L: Wie gesagt, dieses extrem Kleinschrittige verhindert vielleicht manchmal, dass sie sehen, wie wichtig die Sachen sind. Interessiert hat's denk ich schon. Es waren die Arbeitsblätter sehr lange. Speziell die erste Stunde ist überhaupt nicht in einer Unterrichtseinheit zu machen, das ist locker eine Doppeleinheit, würd ich mal sagen. Weil die Schüler dann auch zum Bearbeiten der Arbeitsblätter relativ lange gebraucht haben. Es ist halt immer irgendwie dasselbe, dass wir unterschiedliche Arbeitstempi haben, dass halt manche schon fertig sind und so what, was machen wir jetzt. Und manche haben so gar keinen Plan, die könnte es

unter Umständen auch langweilen, weil sie eben überfordert sind, weil sie nicht genau wissen, was sie jetzt tun sollen und es manchmal so an Kleinigkeiten scheitert, wie dass sie ein Wort nicht verstehen und nicht wissen, wo sie jetzt genau hinschauen sollen oder so. Ja, aber im Großen und Ganzen, abgesehen davon, dass der Zeitrahmen deutlich gesprengt wurde oder in meiner Umsetzung ich ihn deutlich gesprengt habe, denk ich, dass die sehr gut gemacht sind die Arbeitsblätter, ja. Um zur fünften Frage zu gehen, die haben mir schon gut gefallen.

I: Dann stell ich die noch kurz. Was hat Ihnen persönlich gut gefallen?

L: Eben diese Behandlung des Themas Interferenz ohne Beugung, dass man nicht zwei Phänomene vermischt, wo so ein Wischiwaschimischnasch rauskommt bei den Schülern, sondern diese Trennung.

I: Welche Verbesserungsvorschläge hätten Sie für die Materialien?

L: Prinzipiell ist es so, dass es in der Schule schwierig ist mit so wahnsinnig vielen Kopien zu arbeiten, also das fängt damit an, dass wir enorm hohe Kopierkosten haben, wo der Schulerhalter dann einfach sagt Wahnsinn und wieso und das gibt's ja nicht, das ist der eine Aspekt, der wirtschaftliche. Der andere ist der, dass die Schülerinnen und Schüler diese Blätter nicht gut verwalten können, die haben dann so einen Paken Papier und wissen nicht so recht wohin damit und wenn da dazwischen Notizen im Heft sind, weiß man nicht genau, zu welchem von diesen vielen Blättern aus dem Stapel jetzt die eine Notiz gehört, also das ist ein bisschen schwierig. Ich weiß nicht, was man da genau macht. Eventuell so eine Art Skriptum rausgeben, wenn man diese Sequenz unterrichtet, mit der Möglichkeit an manchen Stellen Notizen zu machen, dass sie überhaupt quasi kein zusätzliches Heft mehr führen müssen, das wär eine Möglichkeit. Es gibt immer wieder Schüler, das sind relativ wenige, die online ein Heft führen, also ein elektronisches Heft führen, also dass man diese Sachen eventuell auch elektronisch zur Verfügung stellt. Das hab ich in dieser Gruppe nicht eingerichtet, aber es gibt auch die Möglichkeit, das über dieses edumoodle oder sonst irgendwelche Plattformen zu machen. Das wär eine Möglichkeit. Zu den Materialien haben wir schon einiges gesagt. (schaut sich die Materialien am Computer an). Es hat, soweit ich weiß, bei der ersten Stunde ein Verweis auf ein Arbeitsblatt gefehlt oder es hat ein Arbeitsblatt gegeben, wo in diesem Drehbuch für die Stunde kein Verweis war.

I: Stimmt, da war nur das zweite Arbeitsblatt erwähnt.

L: Genau. Und wenn wir da noch bei der ersten Stunde sind, ich rede gerade von den Simulationen auf Seite zwei. Da sind so viele Wie-Fragen. Wie wechselwirken die Teilchen,

wie wechselwirken die Wellen, was können wir beobachten, eventuell, dass man das versucht mit den Operatoren ein bisschen zu umschreiben, also beschreibe oder arbeite den Unterschied heraus oder irgend so etwas. Also wir sind halt jetzt im kompetenzorientierten Unterricht, der jetzt seit einigen Jahren modern ist, in allen Gegenständen modern ist, von diesen „W-Fragen“ ein bisschen weggekommen. Ich denk mir, also die sind erstens mal ein bisschen unklar und zweitens die W-Fragen zeichnen nicht aus, auf welchen Aspekt die Schüler achten sollen. Zweitens sind die Schüler das jetzt doch schon gewohnt, weil es in allen Gegenständen stattfindet und da könnte man eben hier vielleicht die Fragen etwas mit Operatoren umschreiben.

I: Vielleicht, die Bilder auch noch auf ein extra Dokument draufgeben, oder hat das für Sie gepasst?

L: Ja, irgendwo war da was, ich glaub, es war eh dieses Bild hier auf Seite drei von der ersten Unterrichtseinheit, das hätte ich herzeigen müssen, weil da steht das mit den konzentrischen Wellen. Folgende Bilder zeigen Quellen im selben Moment, was könnt ihr... Genau, das muss ich herzeigen können. Also ich hab mir im Unterricht so geholfen, dass ich das Worddokument geöffnet hab und dann halt eben vergrößert hab, was aber dazu geführt hat, dass die Schüler dann teilweise im Skriptum weiterlesen konnten. Es war nicht möglich, das alles genau auszublenden. Das ist glaub ich noch einmal der Fall gewesen bei einer anderen Stunde. Zur Stunde zwei am Schluss war diese konzeptuelle Frage. Ich hab's dann aus dem Worddokument am Beamer projiziert, dann hab ich aber schnell das fettgedruckte rauslöschen müssen (lacht), weil das war ja schon die Antwort. Also es fehlt die Anweisung, wähle die richtige Antwort oder kreuze das richtige an oder so irgendwas.

I: So, dass auch klar ist, dass nur eine Antwort richtig ist?

L: Nein, das muss gar nicht sein, es können auch zwei Antworten richtig sein oder sonst was. Es ist die Frage, was sie dann beobachten und so weiter.

I: Glauben Sie, dass die Fragestellung klar war so in dem Sinne, wie sie hier steht?

L: Ich würd dann eben noch sagen, kreuze die richtige oder kreuze die richtigen Antworten an. Oder wähle die richtigen Antworten.

I: Weil da hab ich mir persönlich auch beim Formulieren schwer getan.

L: Aso.

I: Aber es sind größtenteils eh auch die richtigen Antworten gekommen.

L: Ja, ich hab das beim Test nochmal gefragt, da können wir dann schauen. Da Stunde drei. Eines ist eine große Lernschwierigkeit gewesen bei den Schülern. Das hat mir die Frau Professor Ivanjek eh auch gesagt, dass das die Schüler nie so richtig verstehen und auf diese eine Lernschwierigkeit ist im Material in meiner Wahrnehmung nicht eingegangen geworden oder ich hab's nicht entdeckt und zwar die Lernschwierigkeit ist die, wenn man am Doppelspalt das Wellenmuster zeichnet und dann auch die Linien der sagen wir konstruktiven Interferenz einzeichnet und man den Schirm eingezeichnet hat und wenn sich diese Wellen nicht genau am Schirm treffen, dass trotzdem am Schirm ein heller Punkt ist und zwar weil... Ich kann's Ihnen auch aufzeichnen (zeichnet auf). Ich zeichne jetzt nur die Berge und hier ist der Schirm und dann konstruiere ich hier zum Beispiel die Linien der konstruktiven Interferenz und dann hat man den Schnittpunkt der Wellen da und hier hat man den Schnittpunkt der Wellen, hier ist der Schirm. Dass der helle Punkt nicht hier ist sondern hier am Schirm, weil das ja eine Momentaufnahme ist und weil sich ja die Wellen irgendwie wegbewegen.

I: Stimmt, darauf wurde eigentlich nicht eingegangen. Das war glaube ich auch eine Schwierigkeit, wie sie das selber eingezeichnet haben, dass sie dann mit dem A, B, C diese Punkte nicht entdeckt haben.

L: Ja, also es waren ja zuerst die Knotenpunkte einzuzeichnen, das ist noch völlig ok und wenn man dann quasi die Knotenlinie einzeichnet, dass man da vielleicht noch einmal auf die Simulation zurückgeht zum Beispiel. In der Simulation da hat man ja nicht nur das momentane Bild, sondern die Wellen breiten sich wirklich aus, da hat man dann den zeitlichen Verlauf und dass man da quasi irgendwie noch einmal eine Schleife einführt. Die Knotenpunkte, die sind eben das momentane Bild und jeder Knotenpunkt läuft weiter und auf der ganzen Linie ist konstruktive Interferenz.

I: Ja, stimmt.

L: Also dass man sozusagen die zeitliche Komponente da ein bisschen besser reinbringt. Ich glaub, das war's aber im Wesentlichen, was ich da zu den Materialien sagen wollte. Das letzte, das geht relativ gut und smooth die letzte Stunde und die ist auch überhaupt nicht zu lang.

I: Aus dieser Stunde haben sie auch sehr viel mitgenommen, das hat man gemerkt.

L: Ja, vielleicht weil's auch ein bisschen kompakter war oder so irgendwie. Es ist halt für die Schüler, glaub ich, immer ein bisschen schwierig, wenn die Sachen aus Zeitgründen, oder weil man halt nicht gut geplant hat oder weil ich halt die Zeit nicht gut gemanagt habe oder keine Ahnung was, die Gründe lassen wir jetzt offen. Wenn aus irgendwelchen Gründen die

Hälfte in einer Stunde ist und die andere Hälfte in der anderen Stunde, das ist dann einfach irrsinnig schwierig, das zerfällt dann relativ rasch. Und bei der ersten Stunde, ersten Unterrichtseinheit haben wir ja gewusst, dass sie sehr, sehr dicht gepackt ist und da hab ich probiert sehr streng, also den Zeitplan sehr gut zu befolgen und da wirklich sehr genau zu sein. Ich hab oder wir haben die Stunde ganz pünktlich begonnen und wirklich die fünfzig Minuten ausgenützt und nicht wir kommen zwei Minuten später und dann muss man erst den Computer hochfahren und sonst was, das war alles schon in der Pause erledigt und es ist trotzdem nicht gegangen, diese Stunde durchzubringen, weil eben auch das Arbeitsblatt so lange gedauert hat.

I: Ja, das stimmt. Und dann brauchen sie natürlich wieder um reinzukommen in der nächsten Stunde.

L: Genau, da braucht man dann wieder um reinzukommen.

I: Und auch natürlich die Beschriftungen von den Arbeitsblättern, die war vorher nicht da, die müssen auch gemacht werden.

L: Ja richtig. Zumindest die Seitenzahlen in die Arbeitsblätter einfügen, das hab ich aber eh teilweise gemacht, weil, wenn ich dann fünf Kopien hab und stellen Sie sich vor, ich lass den Stapel fallen, nicht mal das, dass nur ein Windstoß kommt oder so keine Ahnung. Die Arbeitsblätter müssen unbedingt nummeriert werden und auch ich hab das glaub ich irgendwo in die Fußzeile geschrieben, Arbeitsblatt 1, Arbeitsblatt 1, Seite 1 und so weiter.

I: Das Praktische sieht man dann erst.

L: Ja genau. Das sind so die Kinderkrankheiten, das sieht man dann erst durch den Gebrauch, ja.

I: Sonst noch etwas?

L: (überlegt). Ich glaub nein, das war's jetzt so im Wesentlichen.