

Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik
Erwin-Schrödinger-Straße, 67663 Kaiserslautern

**Entwicklung von Multimedien zu
Realexperimenten für die
Physiklehre
—
Bereich Optik**

Wissenschaftliche Prüfungsarbeit für das Lehramt an Gymnasien
in
Didaktik der Physik

von
Stefan Altherr

**Angefertigt am Fachbereich Physik der Universität Kaiserslautern
bei Herrn Prof. Dr. Hans Jörg Jodl**

Mai 2003

Kurzfassung

Multimediale Lernelemente erhalten in der Physiklehre im Allgemeinen und im Früheinstieg ins Physikstudium (FiPS) Fernstudiengang der Universität Kaiserslautern eine immer größere Bedeutung. Mit ihnen können in einem ersten Schritt die Versuche, die im Rahmen der Präsenzveranstaltungen zur Experimentalphysik durchgeführt werden, ersetzt werden. Mit weiterentwickelten Materialien ist es schließlich möglich, neue Formen der Lehre in Fern- und Präsenzveranstaltungen zu erschließen.

Solche Medien zu Realexperimenten mit dem thematischen Schwerpunkt Optik werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht und entwickelt.

Nachdem die begrifflichen Grundlagen eingeführt sind, werden vorhandene multimediale Lernelemente gesichtet. Aus dieser Recherche ergibt sich die Notwendigkeit, das Material zu evaluieren, um zum einen dem Nutzer eine bessere Auswahl zu ermöglichen sowie dem Entwickler Anhaltspunkte zur Produktion zu geben. Jedoch ist der ‚klassische‘ Kriterienkatalog so problembehaftet, dass die Entwicklung einer neuen Liste von Kriterien gerechtfertigt erscheint.

Durch die Erstellung zahlreicher Multimedien konnte eine große Anzahl von Kenntnissen gewonnen werden. Grundlegende Techniken und Vorgehensweisen bei der Produktion werden vorgestellt.

Die Präsentation von selbstentwickelten Materialien zu Themen aus dem Bereich der Optik liefert einen genaueren Einblick. Fragestellungen und Probleme werden dargelegt und die Medien abschließend bewertet.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Multimedien	3
2.1 Begriffsdefinition	3
2.2 Multimediatypen	4
2.2.1 Animation	5
2.2.2 Applet / Physlet	5
2.2.3 IBE - Interaktives Bildschirmexperiment	6
2.2.4 Remote-Laboratories	6
2.2.5 Video-Experiment	7
2.3 Einbettung von Multimedien in die Lehre	7
3. Internetrecherche	10
3.1 Allgemeines	10
3.2 Spezielle Internetseiten	11
3.3 Zusammenfassung	16
4. Multimedien in der Optik – Kriterien und Entwicklung	17
4.1 Vorbemerkungen	17
4.2 Kriterienkataloge der Evaluation	18
4.2.1 Der „klassische“ Kriterienkatalog	20
4.2.2 Probleme	21
4.3 Ein neue Liste von Kriterien	22
4.3.1 Metadaten	24
4.3.2 Motivation	24
4.3.3 Inhalt	25
4.3.4 Methode	25
4.4 Perspektiven	26
4.5 Entwicklung von Multimedien	27
4.5.1 Vorausplanung	27
4.5.2 Experimenteller Aufbau und Dreharbeiten	29
4.5.3 Nachbearbeitung	30
5. Erstellte Multimedien	37
5.1 Doppelbrechung und Polarisierung von Licht	37
5.1.1 Versuchsbeschreibung	37
5.1.2 Begründung der Versuchsauswahl	39
5.1.3 Ziele	40
5.1.4 Begründung des gewählten Multimedien-Typs	40
5.1.5 Schwierigkeiten	41
5.1.6 Beschreibung des Multimediums	41

5.1.7 Einbettung in die Lehre	43
5.1.8 Fazit	44
5.2 Das Michelson-Interferometer	45
5.2.1 Versuchsbeschreibung	45
5.2.2 Begründung der Versuchsauswahl	46
5.2.3 Ziele	47
5.2.4 Begründung des gewählten Multimedien-Typs	47
5.2.5 Schwierigkeiten	48
5.2.6 Beschreibung der Multimedien	49
5.2.7 Einbettung in die Lehre	51
5.2.8 Fazit	52
5.3 Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen zu Interferenzstrukturen	54
5.3.1 Versuchsbeschreibung	54
5.3.2 Begründung der Versuchsauswahl	55
5.3.3 Ziele	56
5.3.4 Begründung des gewählten Multimedien-Typs	56
5.3.5 Schwierigkeiten	56
5.3.6 Beschreibung des Multimediums	57
5.3.7 Einbettung in die Lehre	59
5.3.8 Fazit	59
5.4 Rayleigh-Kriterium – Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente	60
5.4.1 Versuchsbeschreibung	60
5.4.2 Begründung der Versuchsauswahl	61
5.4.3 Ziele	62
5.4.4 Begründung des gewählten Multimedien-Typs	63
5.4.5 Schwierigkeiten	63
5.4.6 Beschreibung des Multimediums	64
5.4.7 Einbettung in die Lehre	66
5.4.8 Fazit	67
5.5 1 Absorption und Streuung	68
5.5.1 Versuchsbeschreibung	68
5.5.2 Begründung der Versuchsauswahl	70
5.5.3 Ziele	71
5.5.4 Begründung des gewählten Multimedien-Typs	71
5.5.5 Schwierigkeiten	71
5.5.6 Beschreibung des Multimediums	73
5.5.7 Einbettung in die Lehre	76
5.5.8 Fazit	76
6. Zusammenfassung und Ausblick	78

Quellenverzeichnis	81
Tabellenverzeichnis	85
Abbildungsverzeichnis	85
Veröffentlichungen	87

Anhang

A1: Linkverzeichnisse	i
A2: Seiten mit multimedialen Inhalten	iii
A3: Sonstige Seiten	v
A4: Medien zur Optik	vi
B1: Ablaufschema zum Video „Doppelbrechung und Polarisation von Licht“	xii
B2: Ablaufschema zum IBE „Michelson-Interferometer – Der Aufbau“	xvi
B3: Ablaufschema zum IBE „Michelson-Interferometer – Bestimmung einer Wellenlänge“	xviii
B4: Ablaufschema zum Video „Michelson-Interferometer – Bestimmen einer Längenänderung“	xx
B5: Ablaufschema zum Video „Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen zu Interferenzstrukturen“	xxiii
B6: Ablaufschema zum Video „Rayleigh-Kriterium – Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente“	ixxx
B7: Ablaufschema zum Video „Absorption und Streuung“	xxxiii

1. Einleitung

Im Jahr 1997 wurde, um den sinkenden Studentenzahlen in der Physik an der Universität Kaiserslautern entgegenzuwirken, das Projekt **FiPS – Früheinstieg ins Physikstudium**¹ ins Leben gerufen. Dieses ermöglicht es Zivil- bzw. Wehrdienstleistenden, aber auch sonstigen Interessierten, die ersten beiden Semester des Physikstudiums als Fernstudium zu absolvieren und im Anschluss daran in die regulären Studienveranstaltungen überzugehen.

Kern der ersten beiden Semester in der Präsenzlehre sind die Vorlesungen zur Experimentalphysik. Mit Hilfe von Experimenten werden die Inhalte der Themenbereiche Mechanik, Thermodynamik, Elektrizitätslehre und Optik vermittelt.

Das Problem, diese Versuche auch für den Fernstudenten zugänglich zu machen, wurde mit Hilfe des Einsatzes neuer Medien angegangen. Im Zuge des Projektes beschäftigten sich verschiedene Arbeiten an der Universität Kaiserslautern mit der Sammlung² und Erstellung³ neuer Medien. Zwei weiterführende Dissertationen haben die Schwerpunkte Kommunikation im FiPS⁴ sowie Organisation von multimedialen Elementen⁵ zum Thema.

Darauf aufbauend soll nun hier die Entwicklung von Multimedien zu Realexperimenten für den Bereich Optik in Praxis und Theorie behandelt werden.

Dazu wird zunächst in Kapitel 2 der bereits verwendete Begriff „Multimedia“ so definiert, dass er im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden kann. Weiterhin werden als Grundlage verschiedene Multimediatypen vorgestellt, die im FiPS-Studiengang eingesetzt werden.

Bereits heute existiert eine sehr große Zahl von Simulationen, so dass ein weiterer Beitrag zu diesem Pool unnötig erscheint. Zudem ermöglicht ein realer

¹ FiPS – Früheinstieg ins Physikstudium, online im Internet: <http://www.fernstudium-physik.de> (Stand 15.05.03).

² Roth, M.: Aufbereitung von Videos für den Multimedialen Einsatz und Aspekte multimedialer Lehr-/ Lernumgebungen.

³ Groß, C.: Interaktives Lernen basierend auf Java-Applets, und Weber, P.: Produktion und Einsatz von Videofilmen in der Physikausbildung.

⁴ Schweikert, F.: Organisation und Kommunikation im Fernstudium Physik.

⁵ Roth, D.: Entwicklung, Einsatz und Organisation multimedialer Elemente im Physik-Fernstudium.

Versuchsaufbau einen viel direkteren Zugang des Lernenden zur Physik. Während simulierte Vorgänge oft undurchschaubar und abstrakt bleiben, stellen Realexperimente einen Grundbaustein zur Verständnisförderung in der Experimentalphysik-Vorlesung dar.

Aus diesen Gründen liegt das Hauptaugenmerk auf ihnen.

Die ebenfalls ‚realen‘ Remote-Controlled-Laboratories (vergleiche Kapitel 2.2.4) stellen dabei die neueste Entwicklung in diesem Bereich dar. Im Rahmen dieser Arbeit können sie jedoch aus Zeitgründen nicht mit berücksichtigt werden.

Durch die Verbindung zum FiPS-Fernstudium ergeben sich zwei weitere Schwerpunkte. Zunächst sind alle Ausführungen im Kern auf die ersten beiden Studiensemester bezogen. Spätere Lehrveranstaltungen werden ebenso wie die Sekundarstufe II nur am Rande mitbetrachtet.

Weiterhin wurde bereits sehr früh bei den Vorplanungen zu dieser Arbeit die Entscheidung getroffen, nicht einfach beliebige Multimedien zu entwickeln, sondern sich auf ein Teilgebiet der Physik zu beschränken. Der Schwerpunkt Optik bot sich dabei aus mehreren Gründen an: Die Optik ist im Bereich der Multimedien stark unterrepräsentiert. Zwar werden einige Standardthemen gleich dutzendfach angeboten (vergleiche Kapitel 3.3), doch es ist keine fachliche Breite vorhanden. Weiterhin sind nahezu ausschließlich Physlets, d.h. Simulationen mit physikalischen Inhalt, zu finden.

Als Ziel der Arbeit hat sich also die Entwicklung von Multimedien zu Realexperimenten mit dem Schwerpunkt Optik herauskristallisiert.

Eine Übersicht über bestehende Multimedien, Medienserver und Linksammlungen wird in Kapitel 3 gegeben.

Die Probleme bei der Suche nach Multimedien aufgrund fehlender bzw. schlechter Evaluation werden im folgenden Abschnitt thematisiert. Dies führt zur Entwicklung einer neuen Liste von Kriterien. In Kapitel 4 wird ein Blick auf den Produktionsablauf bei der Erstellung neuer Multimedien geworfen.

Anschließend werden in Kapitel 5 die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Multimedien vorgestellt und bewertet.

2. Multimedien

Die Bezeichnung Multimedia⁶ wird heute bedenkenlos überall benutzt. Dennoch stellt es sich als erstaunlich schwierig heraus, eine allgemein akzeptierte Definition des Begriffs zu finden. Viele, zum Teil stark voneinander abweichende, Begriffsbestimmungen lassen sich in der Literatur und im Internet finden. Andere Autoren verzichten ganz auf die Einführung des Terminus und setzen ihn als gegeben voraus.

In diesem Kapitel wird zunächst der Begriff Multimedia selbst definiert, bevor ein genauerer Blick auf die in der Lehre verwendeten Multimediatypen geworfen wird. Schließlich folgt ein kurzer Blick auf den Einsatz von Multimedien in der Lehre.

2.1 Begriffsdefinition

Wortwörtlich betrachtet hat der Begriff Multimedia den rein quantitativen Charakter „viele Medien“. Die Brockhaus Enzyklopädie beschreibt Multimedia als „aufeinander abgestimmte Verwendung verschiedener (vieler) Medien“⁷, und Medien selbst als „Vermittlungssysteme für Informationen aller Art, ihre Funktion ist der Transport von Inhalten“. Jedoch sind beide Beschreibungen als Basis für physikdidaktische Untersuchungen zu weit gefasst, da hier bereits jeder Text mit begleitenden Bildern, also jedes Lehrbuch, ein Multimedium wäre.

Es gilt nun ausgehend von dieser eher landläufigen Beschreibung eine Definition zu finden, die „diese neue Technologie von bisherigen unterscheidbar macht“⁸. Dabei wird eine Begriffserklärung gesucht, die die üblichen, in der Physiklehre benutzten Multimedien erfasst, um als Grundlage für diese Arbeit zu dienen.

Medien selbst lassen sich m.E. durch die Art der Sinnesstimulation, also den zur Reizaufnahme beim Menschen benutzten Kanal unterscheiden. Für eine

⁶ Multi- [lat.: viel], als Präfix,

Medium [lat.: das in der Mitte befindliche], allgemein Mittel, vermittelndes Element, insbesondere (in der Mehrzahl) Mittel zur Weitergabe oder Verbreitung von Informationen durch Sprache, Gestik, Mimik, Schrift und Bild (...) (aus: Meyers Enzyklopädisches Lexikon).

⁷ Brockhausenzyklopädie.

⁸ Boles, D.: Multimedia-Systeme – Begleitbuch zur Vorlesung, S. 5.

Untersuchung von Multimedien (im folgenden mit MM abgekürzt) müssen also visuelle und auditive Informationen betrachtet werden. Weitere Typen wie z.B. olfaktorische und haptische Reize spielen in der heutigen Medienwelt nur eine marginale Rolle⁹.

Ein MM sollte demnach **multimodal** sein, also verschiedene Sinne ansprechen. Zu den visuellen Medien kann man bewegte Bilder (Filme) oder Standbilder zählen. Diese lassen sich beliebig weiter aufspalten in ikonografische Darstellungen, Text etc. Akustische Reize sind z.B. Musik, Geräusche oder gesprochene Äußerungen.

Eine weitere Forderung an ein MM ist deshalb die **Multicodalität**, also die Verwendung verschiedener Formate zur Kodierung von Informationen.

Im Gegensatz zu Lehrbüchern oder reinen Hypertextstrukturen soll ein MM **dynamisch** sein. Um es weiterhin ausreichend gegen herkömmliche Medien abzugrenzen, wird zuletzt eine **elektronische Plattform** wie z.B. Computer gefordert.

Damit erhalten wir für diese Arbeit folgende Definition:

Definition: Multimedien
Multimedien sind Informationsträger, deren Inhalt multimodal, multicodal und dynamisch vermittelt wird, und die auf einer elektronischen Plattform vorliegen. Ein Multimedia spricht also verschiedene Sinne an, und die darin enthaltene Information liegt in unterschiedlichen Kodierungen vor.

2.2 Multimedientypen

Diese Definition umfasst verschiedene MM-Typen die sich gut nach zwei Merkmalspaaren unterscheiden lassen: Das erste differenziert in **interaktive** und **passive** MM.

⁹ Haptische Reize werden in der Computerindustrie in Form der sogenannten „Force-Feedback“ Eingabegeräte verwendet. Joystick oder Computermaus geben durch Erzeugung von Bewegungswiderständen oder Vibrationen Informationen an den Tastsinn weiter. Diese Techniken kommen vor allem in der Spieleindustrie zum Einsatz. In der Forschung werden diese Ansätze mit Hilfe der sogenannten „Cave“ des College of Architecture and Urban Studies am Virginia Tech College verfolgt.

Interaktive MM erlauben einen direkten Eingriff in den gezeigten Vorgang. Dies ist z.B. die Variation von Parametern bei Applets oder Interaktiven Bildschirmexperimenten. Passive MM können nur rezipiert werden, wie dies bei Videos der Fall ist.

Das zweite Ordnungsmerkmal unterscheidet zwischen **realem** und **simulierten** Vorgang. Während das erste immer auf realen Versuchsaufbauten und Ergebnissen mit allen Messfehlern und Ungenauigkeiten basiert, stellen simulierte MM die Vorgänge i.A. mathematisch dar.

	interaktiv	passiv
real	Interaktive Bildschirmexperimente / Remote-Laboratories	Video
simuliert	Applet / Physlet	Animation

Tabelle 2.1 : Multimedientypen

Im folgenden sollen die fünf in Tabelle 2.1 aufgeführten MM-Typen kurz in alphabetischer Reihenfolge vorgestellt werden.

2.2.1 Animationen (passiv / simuliert)

Bei Animationen handelt es sich um kurze „Trickfilme“, die zumeist abstrakte Vorgänge veranschaulichen sollen. Sie werden mit Hilfe von mathematischen Modellen simuliert und haben einen fest vorgegebenen Ablauf.

Ein Beispiel dafür ist die Animation von Hanns Ruder, der Reisen bei relativistischen Geschwindigkeiten dargestellt hat. Abbildung 2.1 zeigt eine Fahrt durch das Brandenburger Tor bei 95 Prozent der Lichtgeschwindigkeit¹⁰.

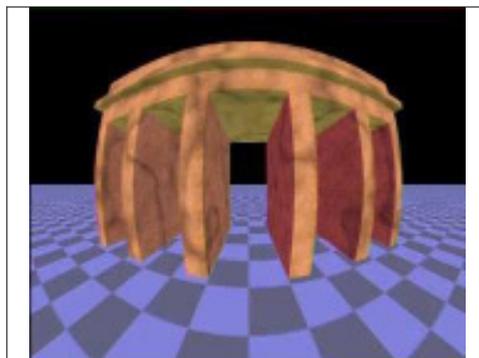


Abb. 2.1: Fahrt durch das Brandenburger Tor bei 95% der Lichtgeschwindigkeit

2.2.2 Applets / Physlets (interaktiv / simuliert)

Bei dieser sehr großen Gruppe von MM handelt es sich ebenfalls um simulierte Vorgänge und nicht um reale Experimente. Im Gegensatz zu den Animationen

¹⁰ Animationen zu Reisen bei Lichtgeschwindigkeit, online im Internet: <http://pen.physik.uni-kl.de/information/downloads/Tempolimit/ind1.html> (Stand 15.05.03).

können hier jedoch Parameter variiert werden. Dies ermöglicht ein ‚entdeckendes‘ Lernen und nicht nur ein reines Betrachten der Vorgänge.

Bei den Physlets handelt es sich um kleine, flexible Java-Programme, die - basierend auf vorgefertigten Bausteinen - die einfache Erstellung eigener physikalischer Problemstellung erlauben. (Siehe Kapitel 3.2.6)

2.2.3 IBE - Interaktive Bildschirmexperimente (interaktiv / real)

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Medien basieren IBE auf real durchgeführten Versuchen. Diese werden aufgebaut und die ablaufenden Vorgänge digital erfasst.

Einfache IBE der ersten Generation erlauben eine Variation von bis zu zwei Parametern. Diese werden in diskreten Einzelbildern erfasst und in einer Bildermatrix so angeordnet, dass sie mit Hilfe des von Daniel Roth programmierten IBE-Viewers¹¹ betrachtet werden können.

IBE der zweiten Generation werden seit 1996 von Jürgen Kirstein an der TU Berlin entwickelt¹². Das Autorensystem Shockwave von Macromedia¹³ ermöglicht die Realisierung komplexerer Systeme. Auch aufwändige Versuche können so als IBE umgesetzt werden.

Abbildung 2.2 zeigt als Beispiel den Versuch zur gedämpften Schwingung eines RLC-Gliedes¹⁴.

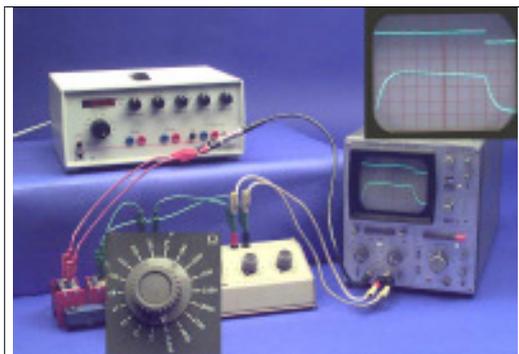


Abb. 2.2: IBE der zweiten Generation – Gedämpfte Schwingung eines RLC-Gliedes

2.2.4 Remote-Laboratories (interaktiv / real)

Die sogenannten RLabs sind eine recht neue Gruppe von MM. Sie erlauben es, einen realen Versuchsaufbau unmittelbar über das Internet zu steuern. Der

¹¹ Vgl.: Roth, D.: Entwicklung, Einsatz und Organisation multimedialer Elemente im Physik-Fernstudium, Seite 20ff.

¹² Kirstein, J.: Interactive Screen Experiments, online im Internet: <http://www.ifpl.tu-berlin.de/ibe/index.html> (Stand 15.05.03).

¹³ Macromedia Inc., online im Internet: <http://www.macromedia.com> (Stand 15.05.03).

¹⁴ FiPS-Medienserver: Gedämpfte Schwingung eines RLC-Gliedes. Online im Internet: http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter06/free/lc_gedaempft.html (Stand 15.05.03).

Benutzer sieht dabei den Versuch als Kamerabild auf einer Webseite. Bisher werden damit nur einfache Experimente realisiert.

An der Universität Kaiserslautern wurde ein Versuch zur Elektronenbeugung an einer Graphitfolie¹⁵ eingerichtet. Zwei weitere Versuche befinden sich gerade im Aufbau. Das Deutsche Museum in München bietet im Rahmen seiner Klimaausstellung die Experimente „Roboter“, „Wärmebildkamera“ (Abb. 2.3) und „Optische Pinzette“ an¹⁶. Jüngstes RLab ist ein von Leybold Didactic

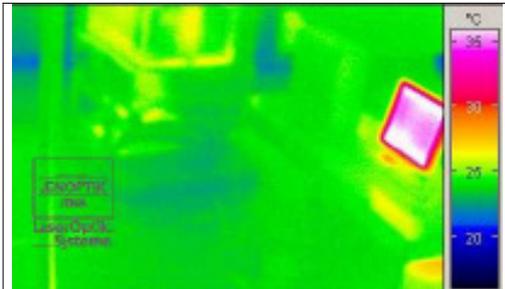


Abb. 2.3: R-Lab – Wärmebildkamera

aufgestelltes Experiment zur Ablenkung von Elektronenstrahlen im elektrischen und magnetischen Feld¹⁷.

Weitere weltweite Remote Laboratories findet man auf der Webseite „Übersicht über Fernlabore“¹⁸.

2.2.5 Video-Experimente (passiv / real)

Video-Experimente sind die ursprüngliche Form der neuen Lehrmedien. Reale Experimente werden gefilmt und didaktisch aufbereitet. Jedoch hat die Entwicklung der digitalen Filmbearbeitung die Möglichkeiten dieses Mediums in den letzten Jahren stark erweitert (siehe Kapitel 4.5.3).

Eine unmittelbare Aktivität des Betrachters ist i.A. nicht erforderlich. Jedoch ermöglichen spezielle *Messvideos* eine Auswertung der Versuchsergebnisse im Rahmen einer Übungsaufgabe.

2.3 Einbettung von Multimedien in die Lehre

Nachdem nun die verschiedenen MM-Typen kurz vorgestellt wurden, sollen hier kurz die wichtigsten Einsatzgebiete dargestellt werden.

¹⁵ Remote Controlled Laboratory – Diffraction of Electrons, online im Internet: <http://131.246.237.97/> (Stand 15.05.03).

¹⁶ remote_lab: Ein ferngesteuertes Labor im Internet, online im Internet: <http://www.remote-lab.de> (Stand 15.05.03).

¹⁷ Leybold Didactic GmbH, Remote-Lab, online im Internet: <http://remote-lab.leybold-didactic.de> (Stand 15.05.03).

¹⁸ Übersicht über Fernlabore, online im Internet: http://www.learninglab.de/i_labs/docs/Uebers_Fernlabore/uebersicht_fernlabore.html (Stand 15.05.03).

Phänomenologische Einführung:

Motivierende Einstiege und Übersichten liefern eine gute Grundlage zum Einstieg in neue Themengebiete. Ein klassisches Beispiel für einen solchen Film ist „Powers of Ten“¹⁹ von Charles und Ray Earnes aus dem Jahre 1977.

Mit diesem und anderen Filmen werden generelle Großzusammenhänge geklärt, Überblicke vermittelt und eine gemeinsame Basis für die folgenden Lehreinheiten geschaffen.

Diese Form von MM wird vorwiegend in Präsenzveranstaltungen genutzt. In Anleitungen zum Fernstudium tauchen Verweise auf diese optionalen Inhalte auf.

Lehrfilm/ Veranschaulichung:

Ein weites Feld von Aufgaben umfasst dieser Bereich von MM. In Lehrfilmen werden physikalische Vorgänge im kompletten Umfang vorgestellt und erklärt. Je nach Zielgruppe wird anhand von real durchgeführten Experimenten die komplette Theorie erarbeitet. Physlets und Animationen veranschaulichen Vorgänge auf einer stärker abstrahierten Ebene.

Diese MM werden vorwiegend beim Fern- und Selbststudium eingesetzt. In Lehrbriefen²⁰ wird die Nutzung stark empfohlen. In der Präsenzlehre eignen sie sich immer dann, wenn reale Experimente aus den verschiedensten Gründen nicht möglich oder passend sind.

Übung:

Die Erfassung von Messwerten mit anschließender Auswertung oder auch das Durchführen empirischer Untersuchungen ist mit Hilfe dieser Gruppe von MM möglich. Es eignen sich alle MM-Typen für diesen Einsatz.

Im FiPS-Studiengang ebenso wie in den Präsenzveranstaltungen der Universität Kaiserslautern sind multimediale Übungsaufgaben integriert.

Generell erfordern MM sowohl vom Lernenden als auch vom Lehrenden einen größeren Arbeitsaufwand als herkömmliche Methoden. Während klassische

¹⁹ Powers of Ten, online im Internet:
<http://www.powersof10.com> (Stand 15.05.03).

²⁰ Lernanleitungen, die im Früheinstieg ins Physikstudium (FiPS) begleitend zu Lehrbüchern benutzt werden.

Rechenaufgaben von beiden bedenkenlos akzeptiert werden, scheint man den Einsatz von MM jedes Mal rechtfertigen zu müssen.

Dies liegt vor allem daran, dass die meisten Lernenden nie zuvor mit MM konfrontiert wurden, und sich zunächst an diese neue Form gewöhnen müssen. Während dies jedoch relativ schnell geschieht, ist die Hemmschwelle der Lehrenden in den meisten Fällen deutlich höher.

Manche Dozenten lehnen den Einsatz von MM grundsätzlich ab, andere sind nur zögerlich bereit sie in der Lehre zu verwenden. Dies liegt m.E. an dem erforderlichen Zeitaufwand zur Einarbeitung. Während klassische Aufgaben fertig in Büchern und Aufzeichnungen vorliegen, verlangen MM vom Dozenten eine zeitaufwändige Suche nach dem geeigneten Medium und eine entsprechende Einbettung in den Lehrbetrieb.

Eine Übersicht über vorhandene MM und mögliche Anlaufstellen liefert Kapitel 3.

3. Internetrecherche

3.1 Allgemeines

Um eine Bestandsaufnahme der bereits existierenden MM vorzunehmen, wurde ausführlich im Internet recherchiert.

Dabei wurden neben einer allgemeinen Begutachtung vor allem folgende Punkte untersucht:

- Wie sind die MM im Internet organisiert?
- Zu welchen Themen / Versuchen existieren MM?
- Wie gut sind diese MM?
- Was wird speziell im Bereich der Optik angeboten?

Dabei macht sich bei der Suche nach MM im Internet schnell eine gewisse Ernüchterung breit. Wenige, oft schlecht sortierte Sammlungen von Filmen und Applets oder Verweisen auf andere Seiten machen das gezielte Auffinden zur Sisyphusarbeit. Die Medien sind in der Regel unkommentiert aneinandergereiht und weder alphabetisch noch systematisch geordnet. Die Linksammlungen sind ebenso eine undurchsichtige Aneinanderreihung von Verweisen, oft mit nur wenig Substanz.

Auf den meisten Seiten im Internet finden sich nur wenige MM in unterschiedlichster Qualität. Auf Grund fehlender Informationen klärt oft nur die zeitaufwändige Betrachtung der Videos oder Applets über den tatsächlichen Inhalt, dessen Qualität und Zielgruppe auf.

Prüft man die auf den ersten Blick scheinbar weit gefächerte Auswahl etwas näher, so stellt man schnell fest, dass einzelne Versuche oder Themen gleich dutzendfach in meist sehr ähnlichen MM behandelt werden, während weite Teile des physikalischen Spektrums komplett ignoriert werden. Zumeist handelt es sich bei den Medien um Versuche, die besonders leicht anschaulich dargestellt werden können. So wird z.B. in der Optik der Youngsche Doppelspalt in gut zwei Dutzend fast identischen Simulationen behandelt, bei denen die gleichen Parameter in ähnlichen Grenzen variiert werden können. Jedoch wird kein einziges Mal aufgezeigt, wie es zu dem präsentierten

Ergebnis kommt, d.h. es wird weder der physikalische Hintergrund erklärt, noch der Algorithmus, mit dem das Programm arbeitet, gezeigt.

Sehr beliebt sind ebenso Applets, die eine Optische Bank simulieren, auf die - je nach Variante - verschiedene Objekte (Lichtquellen, Spiegel, Linsen etc.) platziert und darauf verschoben werden können.

Einen weiteren großen Bereich stellen phänomenologische Betrachtungen zur Beugung an verschiedenen Objekten dar.

Ansonsten jedoch zeigt sich in der Optik über weite Themenbereiche ein auffallender Mangel an MM.

3.2 Spezielle Internetseiten

Im Rahmen der Recherche wurde schnell deutlich, dass nur wenige Internetseiten (obwohl diese noch immer in vielen Bereichen unter dem im Vorfeld erwarteten Niveau liegen) eine gesonderte Besprechung verdienen. Im Folgenden werden in alphabetischer Reihenfolge die meistversprechenden Sammlungen von Verweisen und Medien kurz besprochen:

- **FiPS Medienserver²¹**

Auf dem FiPS Medienserver der Universität Kaiserslautern liegen zur Zeit mehr als 270 Medien. Inhaltlich wird dabei vor allem der Bereich der ersten beiden Semester der universitären Ausbildung abgedeckt, d.h. man findet MM zur Mechanik, Wärme- und Elektrizitätslehre sowie zur Optik.

Dem registrierten Benutzer stehen neben den passiven MM (Videos und Simulationen) auch Applets, IBE und ein ferngesteuerter Versuchsaufbau, das sogenannte „Remote-Controlled-Laboratory“ zur Verfügung.

Die Seite bietet eine ausgefeilte Suchfunktion nach Themengebieten, MM-Typen oder Stichwörtern an. Möchte man allerdings nur stöbern, so wird man mit einer Übersichtsseite von mehr als 800 Kilobyte Größe konfrontiert, was für den normalen Internetbenutzer mit Standardmodem eine Downloadzeit von wenigstens zwei Minuten bedeutet.

²¹ FiPS Medienserver, online im Internet:

<http://fips-server.physik.uni-kl.de/medienserver/html/index.html> (Stand 15.05.03).

Bei den Videos handelt es sich zumeist um digitalisierte Einzelfilme aus der amerikanischen Serie „Physics Curriculum & Instruction“ der frühen 90er Jahre. Ergänzt werden diese durch Aufnahmen aus dem eigenen Haus, wobei eine deutliche Entwicklung von den ersten Versuchen bis hin zu aktuelleren Produkten zu erkennen ist.

Generell sind die hier zusammengetragenen Videos von ausreichender Qualität und entsprechen der Zielgruppe.

Bei den IBE handelt es sich um zwei Dutzend MM von sehr unterschiedlicher Qualität. Hier wurden Produkte von Jürgen Kirstein (TU Berlin) und aus eigener Herstellung zusammengetragen.

Die größte Gruppe von MM stellen die Applets oder Physlets dar. Diese dynamischen Simulationen decken alle vier oben genannten inhaltlichen Bereiche ab. Qualität und Anspruch verändern sich hierbei sehr stark mit der jeweiligen Anwendung.

Schließlich bietet die Seite als Realexperiment eine über das Internet fernsteuerbare Elektronenbeugungsröhre an.

Betrachtet man speziell das Thema Optik auf dem FiPS-Medienserver etwas näher, so fällt einem schnell auf, dass mit den jeweiligen Multimediatypen nur ein sehr begrenzter Bereich abgedeckt wird.

So werden von den Applets vorwiegend optische Bänke mit unterschiedlichen Komponenten sowie einfache Interferenzprinzipien simuliert. Die Videos zeigen zumeist Beugung an verschiedensten Objekten oder einfache Interferenzerscheinungen. IBE und Realexperimente kommen in der Optik fast nicht vor.

- **Leonardo: Interactive Virtual Science Museum²²**

Diese in Italien angesiedelte Sammlung von Applets bietet eine reichhaltige Auswahl. Die aufgeführten MM wechseln sehr stark in Anspruch und Qualität, so dass man (auch auf Grund einer fehlenden Bewertung) auf eine zeitintensive Suche angewiesen ist.

Thematisch wird mit über 200 Einträgen die komplette Physik bis hin zu „life science“ abgedeckt. Gut ist die Möglichkeit, sich die Medien nach

²² Leonardo: Interactive Virtual Science Museum, online im Internet: <http://www.ba.infn.it/~zito/museo/leonardo1en.html> (Stand 15.05.03).

Themengebieten sortiert anzeigen zu lassen. Zur Optik sind zur Zeit etwa zwei Dutzend Applets und Animationen aufgeführt.

- **LiLi - Physikalische LinkListenDatenbank²³**

Die physikalische LinkListenDatenbank LiLi der Universität Oldenburg bietet mehr als 150 Verweise zu Multimedien im Internet. Dabei handelt es sich hauptsächlich um reine Hypertextstrukturen und Applets. In kleinerem Umfang wird auch auf Videos und IBE verwiesen.

Eine große Anzahl der Links führt dabei zu Seiten mit eher populärwissenschaftlichem Inhalt. Einige wenige Seiten bieten jedoch einen den ersten beiden Studiensemestern angemessenen Stoff. Das Auffinden dieser Seiten wird dabei durch die vorhandene, komfortable Suchfunktion erleichtert. Sie ermöglicht eine Eingrenzung der Ergebnisse nach Thema, Medientyp, Sprache und Stichwörtern.

Zur Optik sind zur Zeit 17 Verweise vorhanden. Dabei handelt es sich ausschließlich um Texte und Simulationen. MM, die auf realen Versuchsaufbauten basieren (Video, IBE, Realexperiment), sind nicht vertreten.

- **MERLOT - The Multimedia Educational Resource for Learning and Online Teaching²⁴**

Dieses sehr umfangreiche, redaktionell bearbeitete Archiv der California State University bietet eine umfassende Zusammenstellung von MM im Internet. Ausführliche Beschreibungen zu allen Medien und Bewertungen ausgebildeter Referenten sowie anderer Benutzer erleichtern den Auswahlprozess frühzeitig und verhindern so die zeitaufwändige Betrachtung aller Suchergebnisse.

Die Datenbank verfügt über ein ausgefeiltes System zur Erfassung von Metadaten. Obwohl „Wissenschaft und Technik“ den größten Bereich der

²³ Physikalische LinkListenDatenbank, online im Internet:

<http://www.physik-multimedial.de/lili/golili/lili.php> (Stand 15.05.03).

²⁴ MERLOT – The Multimedia Educational Resource for Learning and Online Teaching, online im Internet:

<http://www.merlot.org> (Stand 15.05.03).

gesammelten Medien bildet, werden auch andere Forschungsgebiete abgedeckt.

Zur Optik sind zur Zeit 25 Datensätze erfasst. Dabei handelt es sich ausschließlich um bebilderte Texte und Simulationen. Bei letzteren werden die auch ansonsten weit verbreiteten Standard-Applets aufgeführt.

- **Multimedialer Lehr- und Lernserver Essen (MILESS)**²⁵

Der Multimediale Lehr- und Lernserver Essen (MILESS) stellt sich selbst als „Digitale Bibliothek“ vor und bietet neben reinen Textdokumenten auch multimediale Inhalte. Dabei beschränkt sich die Datenbank mit insgesamt fast 1200 Einträgen nicht auf die Physik, die mit 175 Dokumenten vertreten ist, sondern deckt das gesamte Lehrspektrum der Universität Essen ab.

Ein Durchstöbern der Dokumente ist durch die vielfältigen Sortiermöglichkeiten (z.B. nach Thema, Medientyp, AG etc.) sehr leicht und zielgerichtet möglich. Eine Suchmaske vervollständigt die sehr komfortablen Navigationsmöglichkeiten des Angebotes.

Gut 30 Dokumente des MILESS-Server sind dem Themenbereich Optik zugeordnet. Es handelt sich dabei – mit einer Ausnahme – um Texte und Applets. Die Applets decken das übliche, leicht zu realisierende Versuchsspektrum ab und sind durchweg von guter Qualität (wenn auch die Präsentation oftmals sehr verspielt und bunt daherkommt). Bei den Texten handelt es sich um Lehrtexte, die entweder aus Skripten übernommen wurden, oder aber nur kleine Teilaspekte kurz erklären.

Das einzige weitere MM ist ein sehr gutes Video, das die Kaustiken an einem Hohlzylinder zeigt.

- **Physik Online**²⁶

Die Internetseite Physik Online, die von Raimund Girwidz betreut wird, bietet neben anderen Inhalten vor allem ein ausführliches Videoarchiv. Dieses deckt die Themenbereiche Mechanik und Wärmelehre ab und bietet erste Einblicke in die Elektrizitätslehre. Die knapp 100 Videos stammen alle aus

²⁵ Multimedialer Lehr- und Lernserver Essen, online im Internet:

http://miless.uni-essen.de/servlets/SearchServlet?H_toPage=S_FB_7 (Stand 15.05.03).

²⁶ Physik Online, online im Internet:

<http://www.physik.uni-wuerzburg.de/physikonline/index.html> (Stand 15.05.03).

eigener Produktion und zeigen recht kurz und phänomenologisch die untersuchten Erscheinungen. Sie eignen sich daher vor allem begleitend zu herkömmlichen Lehrmethoden (Vorlesung, Literatur).

Zur Optik ist bisher nur ein einziges Video vorhanden, das die Interferenzerscheinungen auf einer Seifenhaut demonstriert.

- **Physlets Resource Page**²⁷

Die amerikanische ‚Physlets Resource Page‘ und ihr deutsches Pendant bieten eine große Anzahl von physikalischen Simulationsprogrammen. Das Spektrum reicht dabei von einfachen, mechanischen Experimenten (z.B. schiefer Wurf) bis hin zu quantenmechanischen Darstellungen.

Die weltweit mehreren tausend Physlets sind zum Teil auf den amerikanischen Seiten thematisch zusammengefasst. Die deutsche Seite bietet eine Suchfunktion im Betastadium an.

Die Qualität der Simulationen reicht von sehr guten, die Sinnzusammenhänge verdeutlichenden Darstellungen bis zu reinen Programmierübungen, die wenig Nutzen haben. Dennoch führen der bereits jetzt große Umfang der Sammlung sowie deren ständige Erweiterung dazu, dass zu fast jeder Fragestellung ein passendes Physlet gefunden werden kann.

Im Bereich der Optik stechen zunächst die optischen Bänke hervor, die in großer Anzahl und verschiedenen Varianten in Physlets verwirklicht wurden. An ihnen wird die Strahlenoptik verdeutlicht. Weiterhin werden unterschiedliche Interferenzphänomene sowie Welleneigenschaften in Simulationen bearbeitet.

- **Teachers´ Page Physics – Multimedia Physik**²⁸

Diese von Peter Krahrmer zusammengestellte Linksammlung zählt sicherlich zu den farbenfrohesten Seiten, die sich mit MM in der Physiklehre

²⁷ Physlets Resource Pages, online im Internet:
<http://webphysics.davidson.edu/applets/applets.html> (Stand 15.05.03), bzw.
<http://pen.physik.uni-kl.de/physlets/index.html> (Stand 15.05.03).

²⁸ Teachers´ Page Physics – Multimedia Physik, online im Internet:
<http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/~pkrahrmer/> (Stand 15.05.03).

beschäftigen. Sie unterscheidet fast 20 Untergebiete der Physik, von den klassischen Lehrthemen bis hin zu Grenzbereichen.

Zu jedem der Teilgebiete hat Kraemer über 100 weiterführende Links zu MM aller Art zusammengefasst. Dabei werden alle Typen von Medien berücksichtigt, obwohl deren Qualität von Seite zu Seite sehr stark schwankt.

Dieses sehr ausführliche Angebot ist innerhalb der einzelnen Themenbereiche nur unzureichend geordnet. Teilweise sind die Verweise zwar in Untergruppen zusammengefasst, jedoch ist dieses System weder nachvollziehbar noch sehr hilfreich. Dennoch bietet die Linksammlung alleine durch die Fülle an Verweisen einen nicht zu unterschätzenden Fundus, der aber oftmals ein längeres Suchen notwendig macht.

Im Bereich der Optik sind knapp 300 MM aufgelistet, die sich zu gut der Hälfte mit populärwissenschaftlichen Themen beschäftigen und somit für die Physiklehre nur begrenzt von Nutzen sind. Weiterhin wird sehr vielfältig auf die bereits in 3.1 erwähnten Experimente verwiesen. Trotz der schlechten Sortierung finden sich hier oft die gesuchten MM.

3.3 Zusammenfassung

Trotz der großen Anzahl von MM, die auf den hier vorgestellten Seiten angeboten werden bzw. auf die verlinkt wird, und trotz der zum Teil guten Ansätze mit thematischen Archivierungen und Suchfunktionen, ist die Internetrecherche weitgehend enttäuschend verlaufen.

Thematisch wird immer wieder der gleiche Fundus von Versuchen bedient, ohne dass sich die neueren Produkte qualitativ verbessert haben. Generell ist die Qualität der auffindbaren Videos enttäuschend. Dies liegt entweder daran, dass es sich um altes digitalisiertes Material handelt (viele Filme stammen aus den 60er und 70er Jahren), oder dass die Themen zu allgemein gehalten sind. Nur selten findet man Produkte, die ein Phänomen wirklich auf den Punkt bringen und sich damit auch begnügen.

4. Multimedien in der Optik – Kriterien und Entwicklung²⁹

4.1 Vorbemerkungen

Wie wir in Kapitel 3 gesehen haben, steht im Internet eine große Anzahl von MM zur Verfügung. Diese sind zum einen gesammelt in Medienservern oder in Form von Linklisten zu finden.

Auf der Suche nach passendem Lehrmaterial stellt man jedoch schnell fest, dass Quantität nicht Qualität impliziert. Im Gegenteil wurde festgestellt, dass viele – nur wenig geeignete – Programmierübungen zu finden sind. Dennoch versteckt sich in der Masse auch das eine oder andere wirklich gute MM, das es aufzustöbern gilt. Diese Suche gestaltet sich sehr aufwändig und vor allem zeitraubend.

Um sie effektiver gestalten und schnell gute von schlechten MM unterscheiden zu können, wurden zahlreiche Kriterienkataloge zur Bewertung von MM entwickelt. Dadurch sieht man sich auch hier zunächst einmal einer unüberschaubaren Masse von Daten gegenüber. Eine genauere Untersuchung zeigt jedoch schnell auf, dass nahezu allen Kriterienlisten grundlegende Merkmale gemein sind. Deshalb lohnt sich ein Blick auf die wichtigsten Kriterienkataloge der Evaluation.

Diese lassen sich auf referierten Servern, Linklisten, Wettbewerbsausschreibungen, Stiftungen und in entsprechender Literatur finden. Weiterhin gibt es eine große Zahl von Einzellösungen, bei denen sich weder Quellen noch Autor nachvollziehen lassen, und die deshalb hier nicht berücksichtigt werden. Im folgenden sind die wichtigsten Kriterienkataloge zusammengestellt.

²⁹ Teile dieses Kapitel wurden aus Artikeln übernommen, die bereits veröffentlicht oder zur Veröffentlichung eingereicht sind. Dies sind:

Kapitel 4.2: Altherr, S. et al.: Kriterienkatalog zur Evaluation von Multimedien, MNU, zur Veröffentlichung akzeptiert.

Kapitel 4.5.3: Altherr, S. et al.: Möglichkeiten der Nachbearbeitung von Videos für die Physiklehre, Tagungs-CD zur DPG Frühjahrstagung „Didaktik der Physik“, Augsburg 2003.

4.2 Kriterienkataloge der Evaluation

- **LiLi - Die physikalische LinkListenDatenbank**³⁰

Die von Ulrike Neemann und Saskia Tautz im Rahmen des bmb+f Projektes „Physik Multimedial“ erstellte Datenbank berücksichtigt neben rein deskriptiven Daten auch einige qualitative Merkmale. Neben allgemeinen Kommentaren (Übersichtlichkeit, inhaltliche Fehler etc.) werden auch pädagogische Kriterien (Maß an Interaktivität, Kursniveau etc.) bewertet. Die Bewertung erfolgt in Stichworten, ist aber zumeist unvollständig.

- **MERLOT - The Multimedia Educational Resource for Learning and Online Teaching**³¹

Dieses von der California State University aufgebaute Archiv besitzt einen ausführlichen Evaluationskatalog zur Bewertung von Medien. Darin werden drei Kategorien unterschieden:

In der Gruppe „Quality of Content“ werden Richtigkeit und Relevanz des Inhalts beurteilt. „Potential Effectiveness as a Teaching-Learning Tool“ untersucht Lernziele, Zielgruppe sowie die Wirkung des MM. Schließlich wird bei „Ease of Use“ pragmatisch Layout und Bedienfreundlichkeit zusammengefasst.

Die Kriterien werden sowohl benotet (ein bis fünf Sterne) als auch ausführlich in Textform bewertet.

- **Medida-Prix**³²

Die Gesellschaft für Medien in der Wissenschaft (GMW) schreibt jährlich einen Wettbewerb für Medienprojekte mit didaktischer Zielsetzung aus. Die Bewertung der eingereichten Medien erfolgt dabei in drei Schritten.

Zu den sogenannten „K.o.-Kriterien“ zählen u.a. Innovation und fachliche Korrektheit. Die „produktorientierten Kriterien“ beinhalten (neben weiteren) den didaktischen Ansatz, Motivation und Benutzerfreundlichkeit. Schließlich

³⁰ LiLi – Die physikalische LinkListenDatenbank, online im Internet:
<http://www.physik-multimedial.de/lili/golili/lili.php> (Stand 15.05.03).

³¹ MERLOT – The Multimedia Educational Resource for Learning and Online Teaching, online im Internet:

<http://www.merlot.org> (Stand 15.05.03).

³² Medida-Prix, online im Internet:

<http://www.medidaprix.org> (Stand 15.05.03).

findet eine Beurteilung „prozessorientierter Kriterien“ statt. Dies sind beispielsweise Modularität und Nachhaltigkeit.

Die Evaluation erfolgt durch eine standardisierte Beurteilung inwieweit die geforderten Kriterien erfüllt werden.

- **EUPEN - European Physics Education Network³³**

Basierend auf den vorangehenden und anderen Katalogen, Diskussionen und langjähriger Erfahrung hat eine Arbeitsgruppe (WG5) des EUPEN im Rahmen der Nacharbeiten ihres siebten Workshops 2002 in Parma den bisher aktuellsten Katalog von Kriterien zur Evaluation zusammengestellt.

Unterschieden werden vier Kategorien: zum einen die Mindestanforderungen (Benutzerfreundlichkeit, Interaktivität etc.), der Inhaltsaspekt (Korrektheit, Relevanz etc.), der Lehraspekt (Ziele, Lehreffizienz etc.) sowie technische Aspekte³⁴.

- **Lichtsteiner, H.: Lernprogramme – Was taugen sie?³⁵**

Der Autor hat eine handliche Liste von 36 Fragen entwickelt, die er vier Hauptkriterien unterstellt. Es werden „Fachliche Kriterien“, „Pädagogische Kriterien“, „(Fach-)didaktische Kriterien“ und „Programmspezifische Kriterien“ unterschieden.

- **Landesinstitut für Schule und Weiterbildung NRW: Lernen mit neuen Medien³⁶**

Das Landesinstitut bietet, basierend auf den Ergebnissen der SODIS-Expertentagung, Bewertungskriterien an, die unter Beteiligung von Landesvertretern aus elf Bundesländern sowie Vertretern aus Österreich und dem FWU zusammengestellt wurden. Die drei Hauptpunkte dabei sind „Fachliche und fachdidaktische Aspekte“, „Mediendidaktische Aspekte“ sowie „Medientechnische Aspekte“. Jede dieser Kategorien ist in vier bis

³³ EUPEN – European Physics Education Network, online im Internet: <http://informando.infm.it/MPTL/proceedings.htm> (Stand 15.05.03).

³⁴ Vgl. Altherr, S. et al.: Multimedien in der Physik – Datenbanken und Evaluationskriterien, PdN-PhiS. 3/52, S.34.

³⁵ Lichtsteiner, H.: Lernprogramme – Was taugen sie? Online im Internet: <http://home.findall.de/tk/LP-05krit.htm> (Stand 15.05.03).

³⁶ Landesinstitut für Schule und Weiterbildung NRW: Lernen mit neuen Medien, S.17-19.

sechs Unterkategorien aufgespalten, die jeweils durch bis zu elf Fragen gekennzeichnet sind. Insgesamt ergeben sich somit 65 Leitfragen zur Beurteilung von Offline- und Online-Medien.

- **Müller, J.: Konzept zur Beurteilung von Software unter besonderer Berücksichtigung des Sachunterrichts³⁷**

Als Grundgerüst zur Beurteilung von Lernsoftware werden hier vier Kategorien unterschieden. Dies sind „Technische Aspekte“, „Grafische Aspekte“, „Inhaltliche Aspekte“ sowie „Schlussbemerkungen“. Jeder Kategorie sind dabei zur Orientierung diverse Fragen als Unterpunkte zugeordnet.

Die Situation stellt sich also so dar, dass jeder seinen eigenen Kriterienkatalog mit verschiedenen Stärken und Schwächen anfertigt.

Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Ansätze³⁸ führt jedoch schnell zu dem Ergebnis, dass alle Kataloge im Kern einem ähnlichen Schema folgen.

4.2.1 Der „klassische“ Kriterienkatalog“

Die bisher üblichen Evaluationskataloge lehnen ihr Beurteilungsschema i.A. stark an schulische Didaktikkonzepte an. Es wird in den meisten Fällen unterteilt in

- Inhaltliche Kriterien
- Didaktische Kriterien
- Methodische Kriterien
- Technische Kriterien

Diese Unterteilung (und Ihre Varianten) haben den Vorteil, dass man sich sehr schnell in einer vertrauten Struktur wiederfindet, die eine zügige Benutzung des Kataloges ermöglicht.

³⁷ Müller, J.: Konzept zur Beurteilung von Software unter besonderer Berücksichtigung des Sachunterrichts.

³⁸ Vgl. Wolf, M.: Erstellung eines Kriterienkataloges zur Beurteilung von Multimedia.

Die Hauptkriterien werden dabei in Unterfragen aufgespalten. Dabei zeigt sich, dass aus der Theorie heraus entwickelte Kataloge zu sehr detaillierten Ausformulierungen führen, während praxisnahe Kataloge sich auf wenige Punkte beschränken.

4.2.2 Probleme

Wendet man die beschriebenen Evaluationskriterien auf vorhandenes Material an, so stößt man schnell auf Probleme.

Die Kataloge beinhalten oft Kriterien, die auf spezielle Multimediatypen zugeschnitten und somit nicht allgemein anwendbar sind. So lässt sich die Frage der Interaktivität gut auf Simulationen und IBE anwenden, versagt jedoch in der Regel bei Videos und Animationen als Qualitätskriterium.

Weiterhin merkt man bei der Anwendung von Bewertungsrichtlinien oft, dass sie aus theoretischen Betrachtungen heraus entstanden und wenig praxistauglich sind. So werden Kriterien angeführt, nach denen man sehr einfach und schnell ein Multimedia bewerten kann, die im Grunde aber für den Leser einer Bewertung irrelevant sind. In einer der vorgestellten Datenbanken wird die Menge der Formeln / Beschreibungen als pädagogisches Kriterium herangezogen. Dabei ist nicht ersichtlich, ob für eine gute Bewertung viele oder wenige Formeln erwünscht sind.

Kaum ein Katalog wendet sich an verschiedene Gruppen von Nutzern (Evaluierende, Lehrer, Lernende, Entwickler).

Während fast alle bestehenden Kataloge eine nahezu vollständige Erfassung der verschiedenen Qualitätsaspekte enthalten, müssen sich doch viele den Vorwurf gefallen lassen, durch ihren Umfang sehr unhandlich geworden zu sein. So enthält z.B. SODIS weit mehr als 60 Einzelkriterien zur Bewertung von MM.

Ein großes Problem bei der Benutzung vieler Zusammenstellungen ist die nicht disjunkte Formulierung der Kriterien. Oftmals werden einzelne Aspekte mehrfach berücksichtigt. So wird die ästhetische Gestaltung in Motivation, Layout und technischer Umsetzung miteinbezogen.

Weiterhin trennt fast kein Katalog beschreibende und bewertende Punkte. Deskriptive Formulierungen wie die Frage nach dem Typ des Mediums stellen kein Qualitätsmerkmal dar.

Oft tauchen auch Fragen auf, die Kriterien untereinander vergleichen. Eine Evaluation sollte jedoch absoluten Maßstäben folgen.

Schließlich finden sich zahllose so allgemein gehaltene Fragen, dass eine objektive Bewertung nicht möglich ist.

Aufgrund dieser Probleme halten es Andreas Wagner und ich für gerechtfertigt, einen weiteren Kriterienkatalog zu präsentieren. Durch die praxisnahe Evaluation verschiedener MM, Gegenüberstellung vorhandener Kriterienkataloge und mehrfaches Überarbeiten haben wir nun einen Evaluationskatalog zusammengestellt. Er ist ein Versuch, eine vollständige, gleichzeitig aber handliche Kriterienliste zu finden, die die angesprochenen Probleme wenn nicht behebt dann zumindest minimiert. Er soll einen weiteren Schritt im Prozess der Diskussion darstellen.

Dabei ist der Katalog auf einzelne multimediale Lernelemente ausgerichtet und nur unter Vorbehalt für die Beurteilung kompletter Lernumgebungen geeignet. Der Katalog wurde in einem iterativen Prozess aus theoretischen Überlegungen und praktischer Anwendung entwickelt. Anschließend wurde er mit Hans Jörg Jodl und Bodo Eckert verfeinert. Im bisher letzten Schritt wurde er Mitarbeitern der Arbeitsgruppe 5 von EUPEN in einer deutschen ebenso wie einer englischen Version vorgestellt und auch danach erneut überarbeitet.

4.3 Eine neue Liste von Kriterien

Dieser neu zusammengestellte Evaluationskatalog dient der qualitativen Bewertung von MM. Metadaten (Autor, Multimedien-Typ, etc.) werden darin nicht beschrieben. Wir sehen bei der Beurteilung von MM drei zentrale Bereiche:

Der erste umfasst dabei die Frage, ob das MM einen leichten technischen Zugang ermöglicht, und ob eine Bereitschaft zur Auseinandersetzung damit geschaffen wird. Ist der Betrachter weiter motiviert, sich mit dem MM zu beschäftigen, muss im nächsten Schritt der inhaltliche Aspekt beurteilt werden. Schließlich wird losgelöst von rein fachlichen und motivierenden Aspekten die allgemeine methodische Realisierung im Hinblick auf die Lehre untersucht.

Dieser Ansatz folgt der Herangehensweise eines Benutzers und ermöglicht es vor allem, die Fragen disjunkt und eindeutig zugeordnet zu formulieren.

Motivation	Inhalt	Methode
<ul style="list-style-type: none"> • Benutzerfreundlichkeit • Attraktivität • Klarheit in Zielsetzung und Arbeitsauftrag 	<ul style="list-style-type: none"> • Relevanz • Reichweite • Richtigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilität • Anpassung an Zielgruppe • Umsetzung • Dokumentation

Tabelle 4.1: Kriterien zur Evaluation – Übersicht

Diese zehn Punkte werden im Folgenden jeweils durch mehrere Leitfragen gekennzeichnet. Die Bewertung folgt dabei einer Notenskala von 1 (sehr gute Erfüllung des Kriteriums) bis 5 (sehr schlechte Einschätzung).

Motivation:

<p><u>Benutzerfreundlichkeit:</u> Lässt sich das MM leicht in Betrieb nehmen? Ist die Bildaufteilung klar und die Bildqualität gut? Ist die Funktion der Bedienelemente klar? Sind die Softwareanforderungen klar und im Verhältnis angemessen?</p> <p><u>Attraktivität:</u> Ist das Erscheinungsbild ansprechend? Gibt es eine motivierende Einführung? Gibt es interaktive Komponenten? Ist das Thema interessant (Alltagsbezug, Anwendung, Phänomen)? Ist das MM aktuell/ innovativ?</p> <p><u>Klarheit in Zielsetzung und Arbeitsauftrag:</u> Wird der Zweck des MM klar? Weiß der Benutzer, was von ihm erwartet wird? Gibt es eine Aufgabe zu lösen/ einen Zusammenhang zu verstehen?</p>
--

Inhalt:

<p><u>Relevanz:</u> Handelt es sich um ein wichtiges Thema? Ist der Einsatz des MM für die Thematik sinnvoll (Verständnisprobleme, dynamischer Vorgang)?</p> <p><u>Reichweite:</u> Geht das MM in die Tiefe? Ist der Inhalt breit angelegt (Spezialfall, allgemeine Übersicht)?</p> <p><u>Richtigkeit:</u> Ist das MM inhaltlich korrekt? Werden Vereinfachungen angesprochen?</p>
--

Methode:

Flexibilität:

Kann das MM in verschiedenen Lehr-/ Lernsituationen verwendet werden?
Ist inhaltlich ein flexibler Einsatz des MM möglich?

Anpassung an Zielgruppe:

Findet eine sinnvolle didaktische Reduktion statt?
Werden Fachbegriffe erklärt?
Ist die Zielsetzung angemessen?

Umsetzung:

Ist die Methode sinnvoll zur Umsetzung der Inhalte/ Ziele des MM?
Ist der gewählte MM-Typ sinnvoll?

Dokumentation:

Wird die Bedienung erklärt bzw. ist sie eindeutig?
Gibt es einen inhaltlichen Begleittext bzw. ist das MM selbsterklärend?
Wird auf weiterführendes Material verwiesen?
Gibt es Vorschläge zur Einbindung in die Lehre?

Tabelle 4.2: Kriterien zur Evaluation - Leitfragen

4.3.1 Metadaten

Metadaten wie Autor, MM-Typ, Erstellungsdatum u.a. werden in diesem Katalog nicht berücksichtigt. Diese rein deskriptiven Merkmale sollen außerhalb der drei von uns definierten Gruppen behandelt werden. Da in diesem Bereich des zu einem MM gehörenden Datensatzes nur Einzelinformationen nachgeschlagen werden, gelten hier keine Beschränkungen was Umfang und Detailgrad betrifft. Eine solche Erfassung kann also beliebig genau erfolgen, ohne den Prozess der Suche nach einem den eigenen Wünschen entsprechenden MM zu behindern.

4.3.2 Motivation

Benutzerfreundlichkeit:

Die Fragen in diesem Bereich sollen überprüfen, wie leicht es dem Erstbenutzer fällt, das MM in Betrieb zu nehmen. Hemmschwellen zur Auseinandersetzung mit dem Medium können ebenso technische Schwierigkeiten wie Verständnisprobleme sein. Wenig motivierend sind unübersichtliche Bildaufteilungen und

unklar beschriftete Bedienelemente. Auch Software, die im Vorfeld installiert werden muss, schreckt von der Verwendung des MM ab.

Attraktivität:

Eine gute Aufmachung kann niemals den inhaltlichen Aspekt von Lehrmaterial ersetzen. Dennoch steigert sie deutlich die Bereitschaft, sich mit dem Inhalt auseinanderzusetzen. Ebenso fördert ein interessantes Thema z.B. bezogen auf den Alltag des Betrachters die Aufnahmebereitschaft.

Klarheit in Zielsetzung und Arbeitsauftrag:

Die Erfahrung im FiPS Fernstudium zeigt, dass viele Medien von den Studenten nur oberflächlich genutzt werden. Ein reines „Sich-Anschauen“ statt einer intensiven Beschäftigung damit scheint die Regel zu sein. Während klassische Rechenaufgaben nur wenig in Frage gestellt werden, scheint man die Benutzung von MM bei den Lernenden rechtfertigen zu müssen. Deshalb erhöhen eine klare Zielsetzung und ein deutlicher Arbeitsauftrag die Akzeptanz der Medien enorm.

4.3.3 Inhalt

Relevanz:

Die inhaltliche Bedeutsamkeit eines MM und damit die Rolle in der Lehre wird bewertet. Auch ob der Einsatz eines MM bei den behandelten Aspekten angebracht ist.

Reichweite:

Unter der inhaltlichen Reichweite eines MM sind zwei Aspekte zusammengefasst. Zum einen die Tiefe, bis zu der der behandelte Inhalt dargestellt wird, zum anderen wie breit diese Darstellung angelegt ist.

Richtigkeit:

Dieser selbsterklärende Unterpunkt sollte zu den Bewertungskriterien gehören, bei denen ein schlechtes Ergebnis ein absolutes ‚Knock-Out-Kriterium‘ darstellt. Eine falsche oder fehlerhafte Darstellung wirkt in der Lehre kontraproduktiv.

4.3.4 Methode

Flexibilität:

Die Möglichkeit ein MM in unterschiedlichsten Lerngruppen einsetzen zu können, wertet es gegenüber eines zu stark spezialisierten Konkurrenten

deutlich auf. Ebenso sind inhaltlich weit gefächerte Einsatzmöglichkeiten ein deutlicher Pluspunkt.

Anpassung an Zielgruppe:

Die grundlegende Konzeption eines MM ist ein entscheidender Punkt, betrachtet man die resultierende Wirksamkeit. So ist eine angemessene Zielsetzung ebenso essentiell wie eine sinnvolle didaktische Reduktion des Inhalts. Ein unterforderter Lerner wird ebenso schnell das Interesse an einer weiteren Beschäftigung mit dem MM verlieren wie ein überforderter. Der unreflektierte Gebrauch von Fachtermini ist ein kritischer Stolperstein für viele Benutzer.

Umsetzung:

In dieser Unterkategorie wird die Verwirklichung der im Rahmen der Vorüberlegungen gesetzten Ziele in ein MM bewertet. Dabei ist ebenso die Struktur wie der gewählte MM-Typ selbst zu begutachten.

Dokumentation:

Alle weiterführenden Informationen, Hinweise und Materialien zum MM werden unter diesem Aspekt zusammengefasst.

4.4 Perspektiven

Im Rahmen unserer Erprobung und den immer wieder vorgenommenen Anpassungen des Evaluationskataloges hat sich das hier vorgestellte System als gut handhabbar erwiesen. Der Katalog erfüllt unserer Ansicht nach weitestgehend den Anspruch der Vollständigkeit und ist auf unterschiedlichste Formen von MM in allen naturwissenschaftlichen Fächern anwendbar. Die zu bewertenden Punkte sind klar voneinander abgegrenzt.

Dieser so gewonnene Katalog erscheint nun so weit ausgereift, dass er in deutschsprachigen ebenso wie internationalen Veröffentlichungen und Tagungen vorgestellt wird. Dabei erhoffen wir uns eine kritische Auseinandersetzung, um den Katalog darauf basierend in weiteren Überarbeitungen verbessern zu können.

Vor allem aber soll damit die Grundlage für eine Diskussion geschaffen werden, die sich mit der Suche nach einem allgemein anerkannten Bewertungsstandard beschäftigt.

Im Rahmen dieser Arbeit ermöglicht es der Katalog nun, MM nicht nur nach eigenem Gefallen zu erstellen, sondern eine objektive Bewertung durchzuführen.

4.5 Entwicklung von Multimedien

Bei der Erstellung eigener Multimedien hat sich nach einiger Zeit ein Arbeitsablauf als sinnvoll herausgestellt, der hier nun vorgestellt werden soll.

Zu Beginn gilt es eine Zielvorstellung zu entwickeln, die inhaltlich vorgibt, was mit Hilfe des Films erreicht werden soll. Ausgangspunkt hierfür sind zumeist bekannte Lernschwierigkeiten von Studenten. Dabei gilt es zu prüfen, ob ein MM diese Probleme beheben bzw. verringern kann.

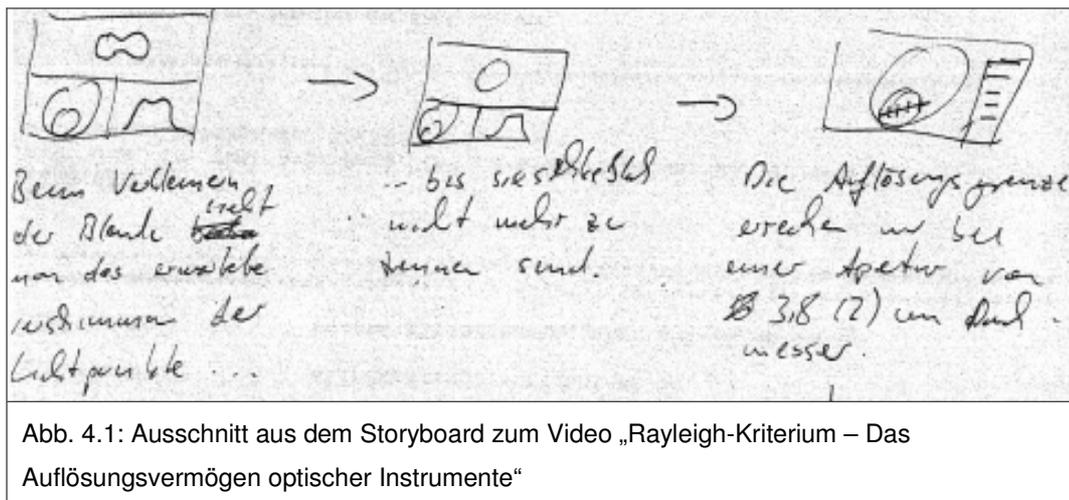
Hat man eine Idee entwickelt, so gilt es im Rahmen einer Recherche sicherzustellen, dass entsprechende Medien nicht bereits existieren. Gibt es bereits MM zum gewählten Thema, so muss man abwägen, ob sich die Erstellung eines neuen lohnt. Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn vorhandene Medien von schlechter Qualität oder mit stark abweichenden Zielen entwickelt wurden.

Die einzelnen Phasen der Entwicklung sollen nun am Beispiel der Videoproduktion dargestellt werden.

4.5.1 Vorausplanung

Hat man sich zur Produktion des neuen Mediums entschlossen, beginnt die Phase der Vorausplanung. Man muss sich mit der derzeitigen Lehrsituation zum entsprechenden Thema vertraut machen. Daraufhin kann man eine detaillierte Vorstellung davon entwickeln, was im Medium vermittelt werden soll, auf welchen Voraussetzungen aufgebaut werden kann, und welcher MM-Typ dafür geeignet ist.

Basierend auf diesen Überlegungen kann ein Drehbuch oder Storyboard entwickelt werden. Als Beispiel hierfür zeigt Abb. 4.1 einen Ausschnitt aus dem Storyboard zum Video „Rayleigh-Kriterium – Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente“.



Zu sehen ist die frühe Planung einer Sequenz aus der eigentlichen Versuchsdurchführung. Man erkennt die Dreiteilung des Bildausschnittes mit dem Blick durch das Fernrohr in der oberen Bildhälfte, der Apertur links unten, und schließlich das Intensitätsprofil durch die beiden Lichtpunkte rechts unten (Vergleiche dazu Kapitel 5.4 und Anhang B6). Unterhalb der Zeichnung ist jeweils der dazu gesprochene Text zu sehen.

Dieses Vorgehen ermöglicht bereits zu einem frühen Stadium eine sehr detaillierte Planung des Videos mit allen benötigten Einstellungen, Nachbearbeitungstechniken und Informationen. Weiterhin findet bereits hier die Planung des späteren Experiments statt. Man kann sehr frühzeitig und ohne großen Aufwand erkennen, ob eine Idee in eine Sackgasse führt, eine geplante Auswertung bzw. Herleitung mit dem vorgesehenen Aufbau nicht möglich ist, oder andere Gründe gegen die geplante Durchführung sprechen.

Hier findet auch fast die komplette didaktische Reduktion statt. Es wird entschieden, was dem Betrachter an Informationen mitgeteilt, welches Wissen vorausgesetzt und was im Detail besprochen wird.

Dieses Storyboard ist im weiteren Verlauf des Projektes einem ständigen Wandel unterworfen und wird an den aktuellen Stand der Arbeiten angepasst.

4.5.2 Experimenteller Aufbau und Dreharbeiten

Erster handwerklicher Schritt ist der Aufbau des realen Experiments. Als Basis für den Aufbau dient ein einheitlich blauer Hintergrund um nichts Ablenkendes zu zeigen (siehe Abb. 4.2).

Der eigentliche Versuchsaufbau sollte dann möglichst einfach und übersichtlich gehalten werden. Dabei sollen alle benutzten Objekte und Geräte zu sehen sein. Es gilt die üblichen Regeln wie sie auch bei Demonstrationsexperimenten zu beachten sind anzuwenden. So sollte man z.B. Kabel entsprechender Farbe benutzen.



Abb. 4.2: Hintergrund zur Filmen von Experimenten

Darüber hinaus ist die Anordnung des Versuchs für das Bildformat zu optimieren. Während man bei Präsenzveranstaltungen bedenkenlos in die Breite bauen kann, sollte hier das Bildverhältnis 5:4 genutzt werden. Weiterhin ist bereits jetzt der Raum für spätere Einblendungen einzuplanen.

Soll der Film später jedoch auch auf normalen TV-Geräten ausgegeben werden, so gilt es bereits die entsprechenden Beschränkungen zu beachten. Während der Computermonitor das komplette digitale Bildfeld mit 768 x 576 Bildpunkten darstellt, kann auf analogen TV-Geräten nur ein Ausschnitt von etwa 90% (692 x 518 Bildpunkte) dargestellt werden. Dieser Ausschnitt wird deshalb als „Bildwichtiger Teil“ bezeichnet.

Mit 652 x 490 Bildpunkten (etwa 85% des digitalen Bildfeldes) ist das sogenannte „Titelfeld“ noch enger beschränkt. Nur innerhalb dieses Bildteiles sollten Schrifteinblendungen erfolgen.

Ist der Versuch fertig aufgebaut, hat es sich als sinnvoll erwiesen, das Experiment vor dem Filmen einige Male durchzuführen, um Tücken und Schwierigkeiten kennen zu lernen und Probleme zu beseitigen. Ist man mit Ablauf und Timing zufrieden, wird der Versuch mit Hilfe entsprechender Film Lampen so ausgeleuchtet, dass alle Bereiche gut zu sehen sind und Schlagschatten vermieden werden. Bei Versuchen zur Optik sind auch des

Öfteren Aufnahmen im abgedunkelten Labor notwendig. Sind gleichzeitig Messgeräte abzulesen so erfordert dies einiges an Feinjustage bis die Kameras ein zufriedenstellendes Bild liefern.

Das eigentliche Filmen gliedert sich dann i.A. in zwei große Bereiche. Zum einen die eigentliche Versuchsdurchführung mit zum Teil mehreren zeitlich synchronisierten Kameras, zum anderen die Aufnahmen des Versuchsaufbaus, einzelner Komponenten und Vorgänge.

Mit entsprechender Erfahrung nimmt dieser Abschnitt im Vergleich zu anderen Arbeitsschritten erstaunlich wenig Zeit in Anspruch. Anschließend werden die Aufnahmen auf den Computer überspielt, so dass sie dort in digitaler Form vorliegen und entsprechend nachbearbeitet werden können.

4.5.3 Nachbearbeitung

Bei den nun folgenden Beispielen soll die Verwendung verschiedener Techniken gezeigt werden. Jedoch gilt es immer darauf zu achten, das eigentliche Ziel nicht aus den Augen zu verlieren. Vermittelt werden soll nur der physikalische Inhalt. Eine unpassende oder übertriebene Nachbearbeitung kann stören oder ablenken.

Deshalb muss es ein stetiges Anliegen sein, sich selbst und die Technik zurückzunehmen und den Inhalt in den Vordergrund zu stellen.

Es werden exemplarische Beispiele gezeigt, keine universellen Lösungen zur Produktion eines guten Lehrfilms. Die hier gezeigten Techniken gehören zu den Standardfunktionen bereits einfacher Videoschnittsoftware. Wir haben zum Nachbearbeiten das Programm Premiere 5.1 von Adobe benutzt. Dabei steht hier weniger die technische Realisierung im Vordergrund als die didaktische Einbindung. Die gezeigten Beispiele stammen alle aus der Produktion von Andreas Wagner und mir.

„Bild-im-Bild“-Einblendung:

Ein grundlegendes Problem bei der Demonstration von physikalischen Experimenten ist die Kombination verschiedener Informationen, die sich durch ihre äußeren Gegebenheiten stark unterscheiden.

D.h. bei optischen Experimenten steht z.B. das abgedunkelte Labor zum Betrachten einer Interferenzfigur im Gegensatz zur Notwendigkeit ein Messinstrument abzulesen. Ein entsprechendes Problem (wie es sich im hier gezeigten Beispiel zeigt) ist die geometrische Ausdehnung von Versuchsaufbau und physikalischem Effekt.

Beim gezeigten Beispiel (siehe Abb. 4.3) sieht man ein Bild aus dem Video „Dielektrikum im Kondensator“³⁹. Zwischen zwei in eine dielektrische Flüssigkeit getauchten Metallplatten wird eine Spannung angelegt. Man kann beobachten wie die Flüssigkeit zwischen den Platten steigt.

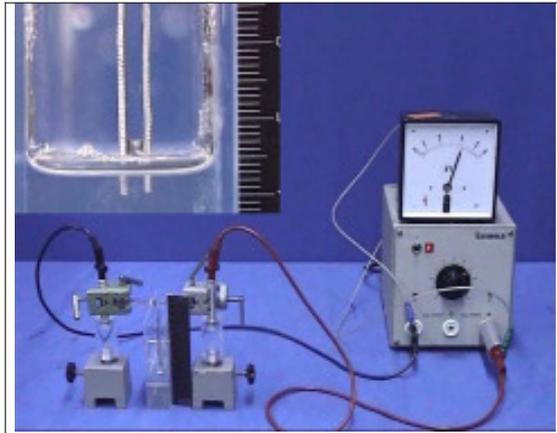


Abb. 4.3: Dielektrikum im Kondensator

Der eigentliche Versuchsaufbau, und damit das abzulesende Voltmeter, werden in der Hauptansicht gezeigt. Als Bild-im-Bild ist eine Detailaufnahme der steigenden Flüssigkeit zu sehen. Beide Informationen lassen sich nur schlecht in einer Einstellung gleichzeitig filmen.

Diese Art der Nachbearbeitung muss bereits im Vorfeld der Aufnahme geplant werden. Während zum einen der entsprechende Platz für die Einblendung vorhanden sein muss (damit nicht andere Teile verdeckt werden), wird weiterhin eine Information benötigt, die es ermöglicht, beide Teile zeitlich korrekt miteinander zu kombinieren.

Schematische Überblicke / Einblendungen:

Oft ist es in der Physiklehre notwendig Konzepte zu vermitteln, die nicht unmittelbar visuell zugänglich sind. Ein Beispiel hierfür ist der Feldbegriff. Abb. 4.4 zeigt eine Aufnahme aus dem Film „Doppelbrechung und Polarisation im Kalkspatkristall“ (siehe Kapitel 5.1).

Durch die halbtransparente Einblendung der Hauptebene und der Strahlen über die Aufnahme des realen, im Versuch benutzten Kristalls ist es möglich, Aspekte und Vorgänge aufzuzeigen, die in der realen Durchführung nicht zugänglich sind.

³⁹ Diese Video ist auf Video-CD 2 (ebenso wie alle anderen vorgestellten) enthalten. Video-CD 1 beinhaltet alle in Kapitel 5 vorgestellten Videos und IBE.

Während die Einblendung verschiedener Blickwinkel „nur“ die Übersichtlichkeit des Versuchs verbessert hat, begeben wir uns hier auf eine Ebene, die über das reale Experiment hinausgeht und ein vertieftes Verständnis ermöglicht.

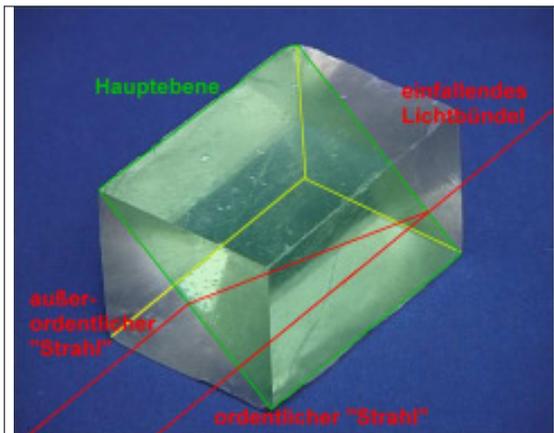


Abb. 4.4: Doppelbrechung und Polarisation im Kalkspatkristall

In anderen Fällen ist jedoch der Versuch bzw. sein Aufbau nicht so leicht zu überblicken. Dann kann es

ratsam sein, komplett auf die Realdarstellung zu verzichten und das Experiment in einer schematischen Darstellung ganz auf das Wesentliche zu reduzieren.

Im gezeigten Beispiel (s. Abb. 4.5) ist der Aufbau eines Experiments zur Untersuchung der Rayleigh-Grenze der Auflösung zu sehen (siehe Kapitel 5.4). Dieser lässt sich vor allem wegen der Größenverhältnisse nur schwer überschauen. Während die beiden beobachteten Bohrungen nur $200\mu\text{m}$ groß sind, ist der Abstand zwischen diesen und dem benutzen optischen Instrument

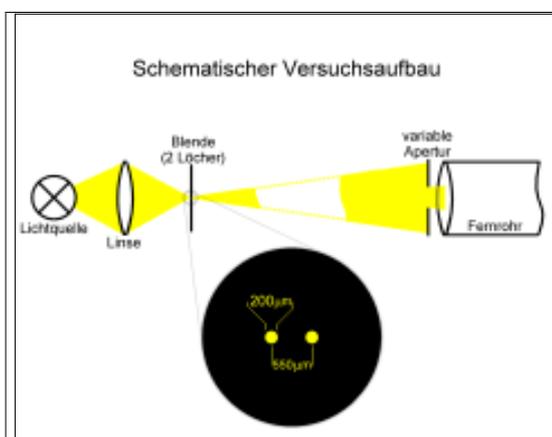


Abb. 4.5: Rayleigh-Kriterium: Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente

mit 8m etwa 40.000 mal so groß.

Da mit Lichtquelle und Linse zwei weitere Versuchskomponenten genau in der Mitte dieser Größenordnungen liegen, ist auch die Einblendung eines Bildes-im-Bild nicht ratsam.

Diese Einblendungen entstehen i.A. komplett im Zuge der Nachbearbeitung, was ein Vorausplanen nicht notwendig macht.

Zeitraffer / -dehnung:

Nachdem bisher vor allem geometrische Probleme mit Hilfe von Nachbearbeitungstechniken angegangen wurden, sollen jetzt die Möglichkeiten bei zeitlichen Abläufen betrachtet werden.

Das erste Beispiel (siehe Abb. 4.6) zeigt dabei die Versuchsdurchführung im Video „Ionenwanderung“⁴⁰. In diesem Ausschnitt sind die bisher gezeigten Möglichkeiten verschiedener Blickwinkel und Einblendungen kombiniert.

Vergleicht man jedoch die beiden Aufnahmen, die zu Beginn und in der Mitte der Versuchsdurchführung entstanden sind, so erkennt man, dass eine Zeitspanne von 10 Minuten dazwischenliegt.

Eine Darstellung dieses in Echtzeit eher unspektakulären Vorganges ist zumeist schon aus Zeitgründen nicht möglich. Durch die Raffung auf etwa eine Minute wird er übersichtlich und handlich einsetzbar.

Dies macht in der Physiklehre eine komplett neue Klasse von Experimenten zugänglich, die bisher aus Zeitgründen nicht realisierbar waren.

Andere Phänomene laufen dagegen so schnell ab, dass man als Betrachter nicht in der Lage ist, das eigentliche Geschehen zu erfassen.

Als Beispiel hierfür zeigt Abb. 4.7 eine Aufnahme zur Demonstration laminaren Strömungsverhaltens.

Bei gedehnter Zeitachse können die Wege einzelner Styroporkügelchen in

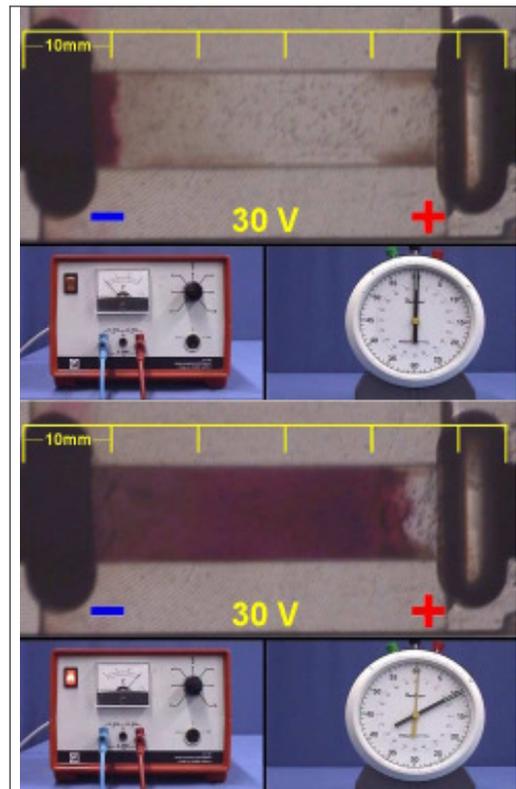


Abb. 4.6: Ionenwanderung

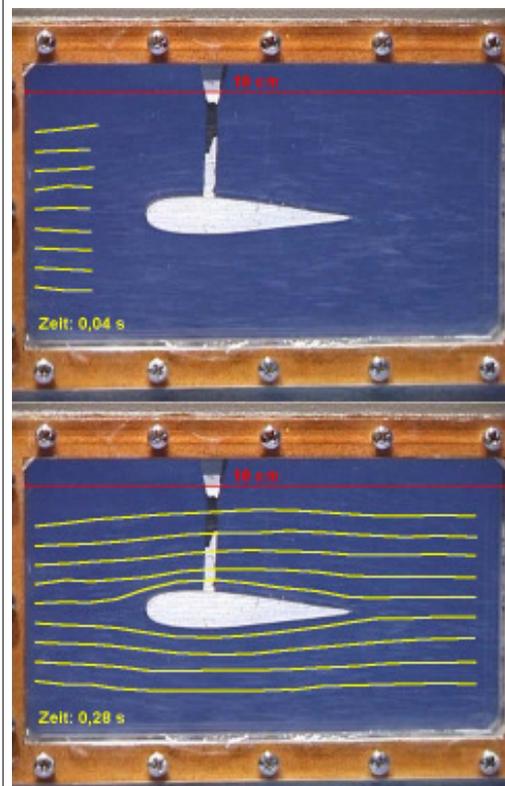


Abb. 4.7: Laminare Strömung

⁴⁰ Jodl, H.J. / Stoll, Ch.: Demonstrationsexperimente zur elektrischen Leitfähigkeit und zum Halleffekt.

der Flüssigkeit nachvollzogen und damit die Stromfäden sichtbar gemacht werden.

Man kann die Geschwindigkeit der Kügelchen und den Abstand der Fäden messen, und damit die Änderungen im Druck bestimmen.

Dies ermöglicht z.B. die Untersuchung verschiedener Flügelprofile und den Einfluss des Anstellwinkels.

Live-Datenerfassung:

Ein relativ neuer, sehr weitreichender Aspekt in der Arbeit mit Videos ist die Erfassung von Daten aus dem Bildmaterial in Echtzeit.

Damit kann man z.B. bei einem schwingenden Pendel die Auslenkung in Abhängigkeit von der Zeit bestimmen, daraus sofort Geschwindigkeit und Beschleunigung berechnen und sich in einem Phasenraumdiagramm anzeigen lassen⁴¹.

Eine ebenso lohnenswerte jedoch etwas einfachere Anwendung zeigt Abb. 4.8. Zu sehen ist ein Bild aus dem Video „Rayleigh-Kriterium: Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente“ (siehe Kapitel 5.4). Die obere Bildhälfte zeigt den Blick durch ein Teleskop auf zwei quasi-punktförmige Lichtquellen. Links unten ist die Größe der Apertur zu

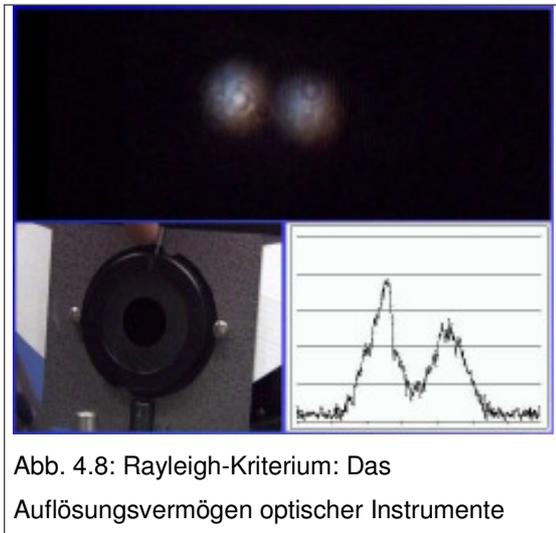


Abb. 4.8: Rayleigh-Kriterium: Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente

sehen und rechts unten die in Echtzeit bestimmte Intensität der Lichtpunkte entlang eines linearen Schnitts durch diese.

Hier wird die phänomenologische Betrachtung unmittelbar mit einer qualitativen Analyse und somit mit der aus Lehrbüchern bekannten Darstellung verknüpft. Dieser direkte Zusammenhang ermöglicht eine genaue Analyse der Daten.

Eine Erfassung von Daten direkt aus einem Videofilm heraus erfordert den Einsatz speziell dafür geschriebenen Programmen und lässt sich im Allgemeinen nicht mit der Videoschnittsoftware realisieren.

Durch die interessanten Anwendungsmöglichkeiten dieser Technik ist jedoch ein so großes Interesse entstanden, dass zahlreiche kostenlose Programme im

⁴¹ Vgl. dazu das Video „Fadenpendel“ auf Video-CD 2

Internet zu finden sind. Die Werte des hier gezeigten Diagramms wurden mit *Pixel Profile*⁴² ausgelesen.

Auswertung:

Ist der Film nicht als Mess- sondern als Demonstrationsvideo konzipiert, so stellt eine Auswertung den nächsten logischen Schritt dar.

Schritt für Schritt können hierbei mit Hilfe von Aufnahmen des Realexperiments, Diagrammen, Tabellen und Grafiken die Ergebnisse des Versuchs analysiert und bewertet werden. Das hier gezeigte Beispiel (siehe Abb. 4.9) zeigt eine Analyse der Abhängigkeit der gestreuten Lichtintensität von der vierten Potenz der Frequenz der Strahlung.

Es stammt aus dem Video zur „Absorption und Streuung“ (siehe Kapitel 5.5). Ausgehend von den im Versuch gemessenen Werten wird die Proportionalität grafisch ermittelt.

Das Erstellen einer Auswertung erfordert keine besondere Planung bei der Aufnahme des Videos. Lediglich die Werte, die sich nicht unmittelbar aus der Aufnahme

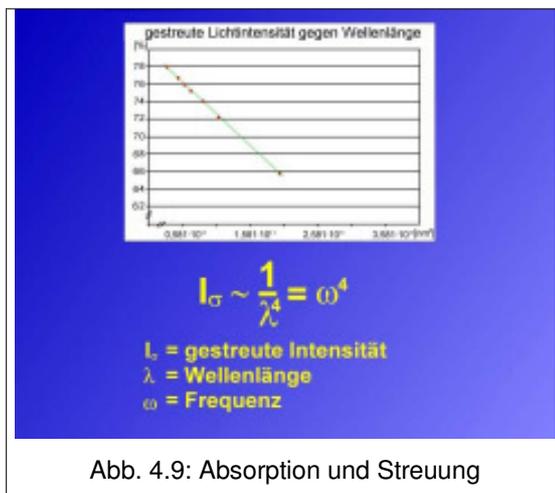


Abb. 4.9: Absorption und Streuung

ermitteln lassen, müssen bei der Durchführung notiert werden.

Luminanz und Farbsättigung:

Die Verbreitung von Videos auf nicht digitalen Medien wie z.B. Videokassetten macht eine abschließende Farbkorrektur notwendig. Während am Computer die Helligkeit in einer Spanne von 0 bis 255 angegeben werden kann, gelten diese Werte für „sendefähige Farben“ nicht mehr. Dort ist der Schwarzwert mit 16 und der Weißwert mit 235 festgelegt. Der Farbraum muss also für eine gute Wiedergabe komprimiert werden. Weiterhin ist es durch andere technische Beschränkungen notwendig, die Farbsättigung zu reduzieren.

Diese beiden Schritte lassen sich zum Abschluss der Nachbearbeitung durch Verwendung eines Filters innerhalb der Videoschnittsoftware durchführen.

⁴² Pixel Profile. Online im Internet:
<http://homepages.borland.com/efg2lab/ImageProcessing/PixelProfile.htm> (Stand 15.05.03).

Die hier vorgestellten Möglichkeiten zur Nachbearbeitung von Videoaufnahmen stellen nur einen kleinen, grundlegenden Teil der Funktionen dar, wie sie bereits einfachste Videoschnittsoftware bietet.

Mit einem bedachten Einsatz der hier gezeigten Mittel ist es möglich, weit mehr zu machen als nur Vorlesungsexperimente abzufilmen.

Es erschließen sich sowohl eine neue Klasse von Experimenten, bei denen bisher eine filmische Darstellung nur mit großem Aufwand möglich gewesen wäre, als auch erweiterte didaktische Möglichkeiten durch die Hinzunahme von geeigneten Informationen über das eigentliche Experiment hinaus.

5. Erstellte Multimedien

In diesem Kapitel sollen die im Rahmen der Arbeit entwickelten MM zur Optik vorgestellt werden. Am Anfang jedes Abschnittes steht eine physikalische Versuchsbeschreibung, die einen kurzen Überblick über die theoretischen Grundlagen des im MM gezeigten Versuchs gibt.

Anschließend wird begründet warum diese Thematik umgesetzt wurde. Dabei werden ebenso didaktische als auch technische Aspekte berücksichtigt. Zusätzlich wird hier (falls vorhanden) die bisherige Umsetzung des Themas in MM besprochen.

Danach werden die zu erreichenden Ziele geklärt, und damit auch der verwendete Medientyp begründet. Die je nach Versuch auftretenden Schwierigkeiten in Ablauf und Umsetzung werden im Folgenden aufgezeigt.

Eine mögliche Einbindung in Fernstudiengänge (hier am Beispiel von FiPS) und in Präsenzveranstaltungen wird gezeigt.

In diesem Kapitel wird verstärkt Bezug auf die Lehrbücher zur Experimentalphysik von Wolfgang Demtröder genommen, da diese an der Universität Kaiserslautern in den Präsenzveranstaltungen und im FiPS-Fernstudiengang verwendet werden.

Dem folgt eine Beschreibung des erstellten MM bevor schließlich ein Fazit jeden Teilabschnitt beschließt, wobei auch eine Beurteilung anhand des in 4.3 erstellten Evaluationskataloges erfolgt.

Die einzelnen MM werden dabei in der Reihenfolge ihrer Entstehung besprochen. Auf CD 1 sind alle Videos und IBE dieses Kapitels beigelegt.

5.1 Doppelbrechung und Polarisation von Licht⁴³

5.1.1 Versuchsbeschreibung

Unter *optischer Anisotropie* versteht man die Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Ausbreitungsrichtung des Lichtes in einem

⁴³ Teile dieses Kapitels sind zur Veröffentlichung bei der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften“ eingereicht:

Altherr, S. et al: „Multimedien in der Physikausbildung: Ein Lehrvideo zur ‚Doppelbrechung und Polarisation im Kalkspatkristall‘“.

Medium. Lässt man ein paralleles, unpolarisiertes Lichtbündel in einen Kalkspatkristall eintreten, so spaltet es sich in zwei Teilbündel auf.

Einer der Strahlen folgt in seiner Brechung dabei dem Snelliusschen Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \text{ bzw. } \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

(vergleiche Abb. 5.1). Dabei sind n_1 , n_2 die Brechungsindizes der jeweiligen Medien und c_1 , c_2 die zugehörigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten.

Dieses Lichtbündel wird als *ordentlicher Strahl* bezeichnet. Der zweite, *außerordentliche Strahl* erfährt eine davon abweichende Brechung.

Die optische Anisotropie, die beim Kalkspat besonders ausgeprägt ist,

wird durch dessen besondere Kristallstruktur bedingt (siehe Abb. 5.2). Man erkennt, dass es eine besondere Vorzugsrichtung (hier als optische Achse eingezeichnet) gibt. Diese Achse wird als optische oder kristallographische Hauptachse bezeichnet. Sie ist eine Achse hoher Symmetrie, jedoch ist keine Rotationssymmetrie gegeben, so dass ein anisotropes Kraftfeld entsteht.

Mit Hilfe des Huygensschen Prinzips lässt sich nun die Aufspaltung erklären: Für den Wellenanteil, der senkrecht zur optischen Achse polarisiert ist, hängt der Brechungsindex n_o nicht von der Ausbreitungsrichtung ab. Die Phasenfronten der Elementarwellen sind daher Kreise.

Für die parallel zur optischen Achse polarisierten Anteile unterscheiden sich die Phasengeschwindigkeiten für die Komponenten des elektrischen Feldvektors parallel bzw. senkrecht zur optischen Achse:

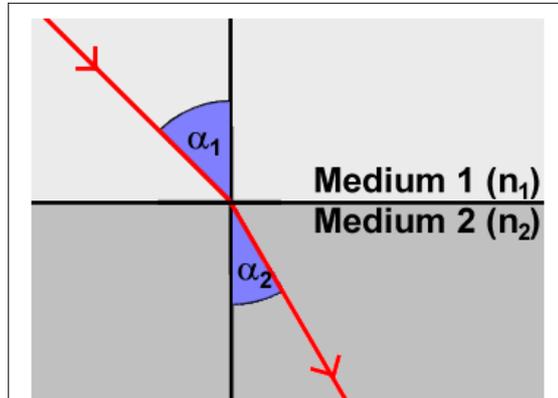


Abb. 5.1: Snelliussches Brechungsgesetz

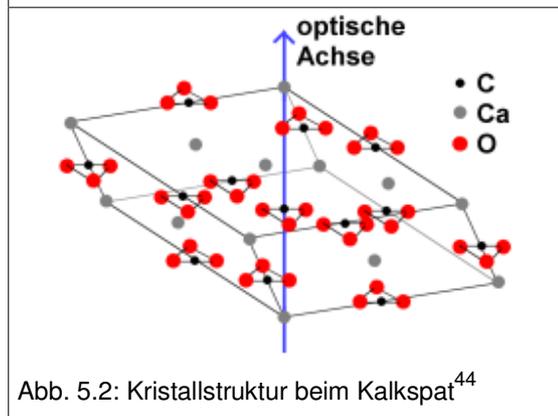


Abb. 5.2: Kristallstruktur beim Kalkspat⁴⁴

⁴⁴ Vgl. Demtröder, W.: Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik, S. 241.

$$v_{\parallel} = \frac{c}{n_{\parallel}} \text{ bzw. } v_{\perp} = \frac{c}{n_{\perp}}$$

Die Wellenfronten sind hier also Ellipsen (siehe Abb. 5.3), und die Ausbreitungsrichtung unterscheidet sich von der des ordentlichen Strahls.

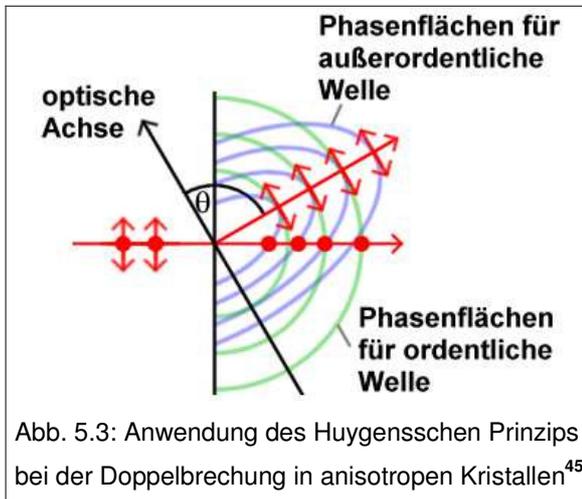


Abb. 5.3: Anwendung des Huygensschen Prinzips bei der Doppelbrechung in anisotropen Kristallen⁴⁵

Dabei ist die Abweichung von der Lage der optischen Achse abhängig. Fällt sie mit der Ausbreitungsrichtung zusammen, so findet keine Doppelbrechung statt, da beide Wellen die gleiche Phasengeschwindigkeit haben. Ist die Ausbreitungsrichtung senkrecht zur optischen Achse, so unterscheiden sich zwar die Phasengeschwindigkeiten, dennoch durchlaufen die Strahlen den Kristall auf gleichem Weg. Die beiden austretenden Lichtbündel sind senkrecht zueinander polarisiert.

5.1.2 Begründung der Auswahl

Die Doppelbrechung wird an Hochschulen im Rahmen der Vorlesung zur Experimentalphysik gelehrt. Bei den Betrachtungen zur Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Materie werden auch die nicht-isotropen Medien und damit die Doppelbrechung besprochen. In Lehrbüchern wird das Thema i.A. von der Wellengleichung ausgehend behandelt⁴⁶. Als Möglichkeit zur Polarisation von Lichtwellen wird die Doppelbrechung vor allem phänomenologisch eingeführt. Sie zählt damit zu den klassischen Standardthemen der Physik.

Bisherige MM zur Doppelbrechung gibt es nur wenige. Filmische Umsetzungen sind qualitativ unbefriedigend und rein phänomenologisch⁴⁷. Ebenso beschränken sich IBE⁴⁸ auf eine solche Darstellung. Simulationen zeigen nur

⁴⁵ Vgl. Demtröder, W.: Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik, S. 245.

⁴⁶ Vgl. Demtröder W. : Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik, S. 240 ff.

⁴⁷ Hyperphysics: „Calcite“, online im Internet:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/biref3.html> (Stand 15.05.03).

⁴⁸ FiPS-Medienserver: „Doppelbrechender Kristall“, online im Internet:

http://fernstudium-physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?search=kristall (Stand 15.05.03).

die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen, die Polarisation mit Hilfe von Polarisationsfiltern⁴⁹ oder durch Reflexion⁵⁰.

Weiterhin bot sich dieser Versuch wegen des einfachen physikalischen Versuchsaufbaus dazu an, Erfahrungen im Umgang mit der erforderlichen Technik zu erlernen.

5.1.3 Ziele

Mit dem Versuch zur Doppelbrechung sollen verschiedene Ziele erreicht werden: Zunächst soll der Betrachter mit dem eigentlichen Phänomen der Doppelbrechung vertraut gemacht werden. Von dort ausgehend werden wichtige Begriffe am Kristall verdeutlicht. Die Polarisation der austretenden Strahlen soll untersucht und in Zusammenhang mit dem Aufbau des Kristalls gedeutet werden.

Schließlich ist es ein Ziel, die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit (und damit des Brechungsindex') von der Polarisation darzustellen. Eine weitere theoretische Analyse des Vorganges (elektrischer Feldvektor, Index-Ellipsoid etc.) soll Lehrbüchern überlassen bleiben.

5.1.4 Begründung des gewählten Multimedien-Typs

Für eine rein qualitative Darstellung bieten sich IBE und Videos an, da beide das reale Experiment, gleichzeitig aber einen bewegten Vorgang zeigen und somit einer statischen Fotografie überlegen sind.

Die weiterführende Untersuchung der Polarisation der austretenden Lichtbündel wäre ebenfalls mit einem separaten IBE möglich. Da allerdings danach die Verbindung der Ergebnisse zum Aufbau des Kristalls aufgezeigt werden soll, kann nur ein Video alle Bedingungen erfüllen.

Dies ermöglicht es darüber hinaus, den direkten Zusammenhang von Versuchsaufbau und Blick durch den Analysator darzustellen, was das Experiment nachvollziehbar macht.

⁴⁹ FiPS-Medienserver: „Ausbreitung, Energietransport und Polarisation elektromagnetischer Wellen“, online im Internet:
<http://fernstudium-physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery.cgi.exe?subsubject=Das+Magnetfeld&type=Applet> (Stand: 15.05.03).

⁵⁰ Boston University: “Polarization by Reflection”, online im Internet:
http://physics.bu.edu/~duffy/semester2/c27_brewster.html (Stand 15.05.03).

5.1.5 Schwierigkeiten

Didaktisch:

Aus didaktischer Sicht war bereits sehr früh festzulegen, was genau mit dem Video erreicht werden sollte. Vor allem die spätere Auswertung erforderte viel Vorausplanung. Die phänomenologische Einführung erscheint als Einstieg notwendig, weil diese einen direkten Bezug zur Lehrbuchdarstellung herstellt.

Als schwierig erwies sich die Einschätzung, was an Kenntnissen vorausgesetzt werden kann und was genau vermittelt werden soll. Der Fokus auf das eigentliche Phänomen sollte jederzeit erhalten bleiben, gleichzeitig aber Strukturen im Kristall erklärt werden. Deshalb war es notwendig, zu jedem Zeitpunkt den Bezug zum eigentlichen Versuch zu wahren und Untersuchungen und Erklärungen nicht an abstrakten Zeichnungen durchzuführen.

Technisch:

Wie bei fast allen Versuchen der Optik ist die Beleuchtung ein kritischer Punkt beim Anfertigen der Aufnahmen. Abgesehen von den zu vermeidenden Schatten muss es hell genug sein, um den Aufbau deutlich zu erkennen, und dunkel genug, um die eigentliche Erscheinung zu beobachten.

Nachdem ein ausreichend großer Kalkspatkristall besorgt worden war, gestaltete sich der eigentliche Versuchsaufbau sehr einfach und übersichtlich. Mit den zur Verfügung stehenden Mitteln war der Übergang von der Seitenansicht zum Blick durch den Analysator nur schwer umzusetzen.

Trotz weitreichender Vorplanung gestaltete sich die Nachbearbeitung als sehr langwierig, da hierbei der Umgang mit der verwendeten Software erlernt werden musste, was unverhältnismäßig viel Zeit beanspruchte.

5.1.6 Beschreibung des Multimediums

Das Video zur Doppelbrechung startet mit einer qualitativen Einführung (siehe Abb. 5.4). Der Kalkspatkristall wird dabei über einer Schrift gedreht, so dass der Effekt in Bewegung beobachtet werden kann. Dies knüpft unmittelbar an gängige Literatur an, was einen anschaulichen und motivierenden Einstieg ermöglicht.

Der Versuchsaufbau wird mit Hilfe des „Stop-Motion“-Verfahrens nachvollzogen. Dabei werden alle Komponenten einzeln vorgestellt und in ihrer Funktion erläutert. Dies ermöglicht dem Betrachter einen einfachen Zugang zum Experiment. Die Komponenten werden jeweils vergrößert dargestellt und sind somit leicht zu identifizieren.

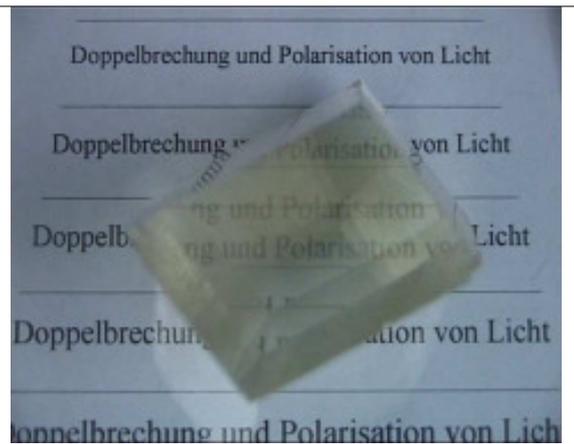


Abb. 5.4: Einführungssequenz zur Doppelbrechung

Ausgehend von der Seitenansicht des Aufbaus erfolgt nun ein direkter Schwenk zum Blick durch den Analysator, so dass für den Lernenden der unmittelbare Zusammenhang zwischen Aufbau und Ergebnis ersichtlich ist. Man erkennt deutlich, dass zwei Lichtbündel den Kalkspatkristall verlassen, obwohl nur eines eintritt.

Es wird als erstes Zwischenergebnis festgehalten, dass das Lichtbündel im Inneren des Kristalls aufgespalten wird.

Als nächstes wird nun die Polarisation der austretenden „Strahlen“ untersucht. Dazu wird der Analysator so eingestellt, dass jeweils eines der Lichtbündel ausgeblendet wird. Im Bild werden die zugehörigen Winkel grafisch festgehalten. Deutlich sind die Intensitätsveränderungen in Abhängigkeit von der Analysatorstellung zu erkennen.



Abb. 5.5: Polarisation der austretenden Lichtbündel

Am Ende der im Video durchgeführten Analyse ist eine zueinander senkrechte Polarisation der Lichtbündel zu erkennen (siehe Abb. 5.5).

Um dieses Ergebnis verstehen zu können, werden nun an dem im Versuch benutzten Kristall die wichtigen Begriffe *Hauptachse*, *ordentlicher* und *außerordentlicher Strahl* veranschaulicht.

Dies geschieht mit Hilfe halbtransparenter, dreidimensionaler Einblendungen, die schrittweise dem Kalkspat überlagert werden (siehe Abb. 5.6).

Diese Abstrakta werden zurück auf den Versuchsaufbau übertragen, so dass der Betrachter nun in der Lage ist, das Ergebnis zu verstehen und weiter zu interpretieren. Ab-

schließend werden die Beobachtungen zusammengefasst und die Ergebnisse festgehalten.

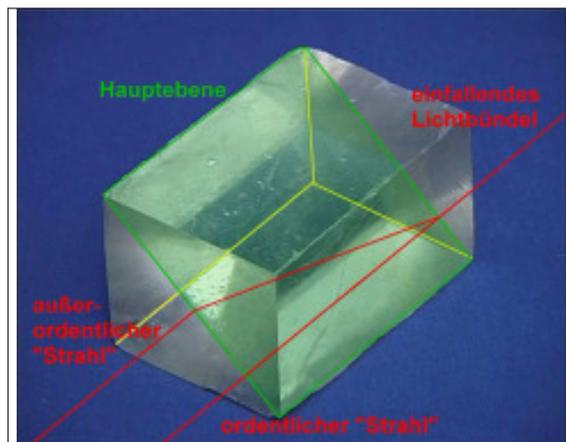


Abb. 5.6: Begriffe am Kalkspatkristall

5.1.7 Einbettung in die Lehre

Im Rahmen der Hochschullehre gehört die Untersuchung der Doppelbrechung in den Bereich der elektromagnetischen Wellen in Materie. Nachdem der allgemeine Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Wellen und dem speziellen optischen Bereich geklärt ist, werden Brechungsindex, sowie Absorption und Dispersion eingeführt. Anschließend wird das Verhalten von Wellen beim Übergang zwischen zwei Medien untersucht (Brechung, Reflexion).

Im Laufe dieses Lehrabschnittes kann das vorgestellte Video zur Einführung der Beschreibung der Lichtausbreitung in nicht-isotropen Medien genutzt werden. Damit werden auch die wichtigen Begriffe am Kristall ebenso wie eine grundlegende Anwendung zur Polarisierung von Licht eingeführt. Daran anschließen kann ein Blick auf die mikroskopische Beschreibung des Vorganges. Zur weiterführenden Bearbeitung können auf das Video aufbauende Verständnisfragen gestellt werden⁵¹.

Alternativ kann das Video auch einfach als eine motivierende Darstellung des Phänomens genutzt werden, um in ein neues Themengebiet einzusteigen.

⁵¹ Vgl. Jodl, H.J.: FiPS-Fernstudium, Experimentalphysik 2, Lehrbrief 9: „Bei welchen Einfallrichtungen auf einen nicht-isotropen einachsigen Kristall tritt keine Doppelbrechung auf?“ und „Finden Sie mit Hilfe des Videos heraus, wie die beiden Lichtbündel außerordentlicher ‚Strahl‘ und ordentlicher „Strahl“ relativ zur Hauptebene polarisiert sind.“

Im Unterricht der Sekundarstufe II dient das Video ebenso zur phänomenologische Einführung und (je nach Interesse/ Zeit) als Einstiegspunkt in weitergehende Untersuchungen.

5.1.8 Fazit

Die erste (sehr pragmatische) Zielsetzung, Erfahrungen im Umgang mit der Erstellung von MM zu erlangen, und dabei noch ein ansprechendes Produkt anzufertigen, kann als gelungen bezeichnet werden.

Zwar ist der Begriff der Hauptachse im Kristall ausreichend am hier verwendeten Exemplar verdeutlicht worden, jedoch konnte die Abhängigkeit der Lage von der Anordnung der Kristallebene, und damit die Unabhängigkeit von der äußeren Form des Kristalls nicht vermittelt werden.

Die Komponenten des Versuchsaufbaus und ihre Funktion in der Durchführung sind deutlich geworden. Die Aufspaltung des Lichtbündels sowie die Polarisation der austretenden Strahlen wurde vermittelt. Ebenso ist der Zusammenhang dieser Aufspaltung mit der Lage der Hauptachse klar geworden.

Schließlich wurde vermittelt, dass die abweichende Brechung in einer veränderten Ausbreitungsgeschwindigkeit begründet ist, also der Brechungsindex von der Polarisation abhängt.

Die nur begrenzt aussagefähige Eigen-Evaluation mit Hilfe des in 4.3 entwickelten Kriterienkataloges zeigt, dass die Stärke des MM im Bereich der Motivation liegt (siehe Tabelle 5.1). Der Lehraspekt schneidet vor allem deshalb schlechter ab, weil Verweise auf weiterführendes Material ebenso fehlen wie Vorschläge zur Einbindung in die Lehre.

<u>Evaluation</u>		
Motivation:		
Benutzerfreundlichkeit	2	1,7
Attraktivität	1	
Klarheit in Zielsetzung und Arbeitsauftrag	2	
Inhalt:		
Relevanz	2	2
Reichweite	3	
Richtigkeit	1	

Methode:		
Flexibilität	3	2,3
Anpassung an Zielgruppe	1	
Umsetzung	2	
Dokumentation	3	

Tabelle 5.1: Evaluation des Videos „Doppelbrechung und Polarisation am Kalkspatkristall“

5.2 Das Michelson-Interferometer

5.2.1 Versuchsbeschreibung

Beim Michelson-Interferometer wird ein paralleles Lichtbündel von einem Strahlteiler in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Diese durchlaufen unterschiedliche Strecken bevor sie wieder überlagert werden und miteinander interferieren.

Dies wird bei diesem Aufbau dadurch realisiert, dass der reflektierte ebenso wie der transmittierte Anteil von Spiegeln zurückgeworfen werden, erneut den Strahlteiler passieren (diesmal sind Transmission und Reflexion vertauscht) und sich schließlich auf einem Schirm überlagern (siehe Abb. 5.7)

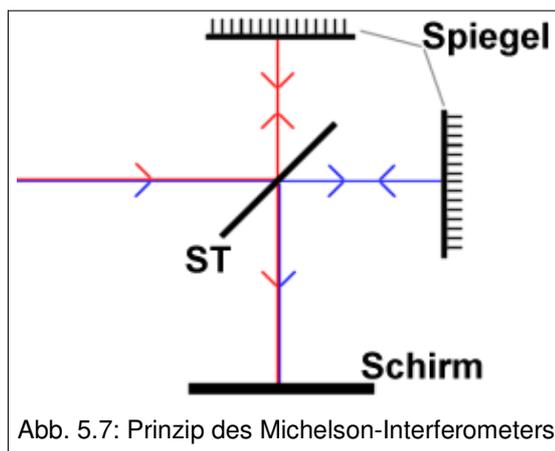


Abb. 5.7: Prinzip des Michelson-Interferometers

Beim zweiten Durchgang durch den Strahlteiler geht dabei die Hälfte der Lichtintensität verloren, da Teile der Strahlen zurück zur Lichtquelle gelenkt werden. Bei der Überlagerung der Lichtbündel entsteht nun bei Verwendung einer kohärenten Lichtquelle eine stabile Interferenzfigur.

Durch die Phasenverschiebung auf Grund der unterschiedlichen Laufweiten beider Strahlen und der leichten Divergenz entsteht ein Interferenzringsystem. Da beide Teilwellen einmal transmittiert und einmal reflektiert werden ist der Phasensprung unerheblich.

Verändert sich nun die Phasendifferenz der Lichtbündel durch Verschieben eines der Spiegel, so verändert sich entsprechend die Interferenzfigur. Nähert

man einen der Spiegel dem Strahlteiler an, so wandern die Ringe in das Zentrum der Struktur, rückt man einen Spiegel weiter weg, so wandern sie nach außen. Dabei entspricht die Verschiebung um einen Ring einer Phasendifferenz von genau einer Wellenlänge. Da die Strecke zwischen Spiegel und Strahlteiler zweimal durchlaufen wird, wurde der Spiegel dabei um die halbe Wellenlänge verschoben.

Treten bei einer Verschiebung des Spiegels um Δz , also einer Veränderung des Laufweges um $\Delta s = 2 \cdot \Delta z$ N Interferenzmaxima auf, so berechnet sich die Wellenlänge zu

$$\lambda = \frac{\Delta s}{N} = \frac{2 \cdot \Delta z}{N}.$$

Dabei darf die Wegdifferenz nicht größer als die Kohärenzlänge sein.

Bei bekannter Wellenlänge kann nun damit die Verschiebung des Spiegels durch

$$N \cdot \frac{\lambda}{2} = \Delta z$$

berechnet werden. Befestigt man den Spiegel am Ende eines Metallstabes, der durch einen Heizdraht gleichmäßig erwärmt wird, so lässt sich die Ausdehnung dieses Zylinders und damit der lineare Ausdehnungskoeffizient α leicht berechnen⁵². Dabei gilt:

$$\alpha = \frac{\Delta z}{l \cdot \Delta T} = \frac{N \cdot \lambda}{2 \cdot l \cdot \Delta T}$$

mit l der Länge des Stabes und ΔT der Temperaturdifferenz.

5.2.2 Begründung der Auswahl

Das Funktionsprinzip des Michelson-Interferometers gehört zu den grundlegenden experimentellen Anordnungen der Optik. Alle bedeutenden Begriffe der Interferenz können mit dieser anschaulichen Realisierung der Zweistrahl-Interferenz eingeführt und erläutert werden.

Dabei kann man sich bei Verwendung der einfachen Gleichungen mit den fundamentalen Größen (Wellenlänge, Phasendifferenz, Bedingungen für Maxima bzw. Minima) vertraut machen.

⁵² Vgl. Kuhn, W. (Hrsg): Handbuch der Experimentellen Physik, Sekundarbereich II, Band 3: Festkörperphysik, S. 107 ff.

Lehrbücher⁵³ ebenso wie MM zum Thema stellen das Interferometer nur mit Hilfe von schematischen Zeichnungen (s. Abb. 5.7) dar. Applets zeigen modellierte Interferenzstrukturen⁵⁴.

Die große Anfälligkeit für Erschütterungen macht den Versuch nur schwer im Lehrbetrieb durchführbar. Quantitative Ergebnisse sind wegen des unruhigen Umfelds kaum zu erzielen.

5.2.3 Ziele

Die Ziele zum Bereich Michelson-Interferometer sind umfassender als bei anderen Versuchen. Zunächst einmal sollen Aufbau und Funktionsprinzip des Versuchs verstanden werden. Aus der so gewonnenen Anschauung heraus soll eine Formel zur Verknüpfung der Anzahl der Interferenzstrukturen, der Wellenlänge des Lichtes und der Verschiebung eines der Spiegel entwickelt werden. Dazu müssen die Begriffe Wellenlänge, Phasenverschiebung sowie das Prinzip der Überlagerung von Wellen bekannt sein.

Die so gewonnene Gleichung soll in einer Messung angewendet und damit die Wellenlänge des verwendeten Lichts berechnet werden. Alternativ können auch die anderen Größen unbekannt sein. Daran anknüpfend soll eine praxisnahe Anwendung der Interferometrie demonstriert und quantitativ ausgewertet werden.

Damit werden die prinzipiellen Größen und Begriffe dieses Versuchskomplexes wiederholt und verinnerlicht.

Weiterhin ist hier eine gute Möglichkeit gegeben, sich mit dem Ablauf eines Experimentes und der anschließende Auswertung vertraut zu machen.

5.2.4 Begründung des gewählten Multimedien-Typs

Um zunächst den Aufbau des Michelson-Interferometers darzustellen, wird als Ergänzung zur schematischen Lehrbuchdarstellung ein IBE entwickelt. Darin können die einzelnen Komponenten am realen Versuchsaufbau identifiziert werden.

⁵³ Vgl. z.B. Demtröder W. : Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik, S. 299 ff, oder Niedrig, H. (Hrsg): Bergmann – Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3, S. 221 ff.

⁵⁴ Mount Holyoke College: "Michelson-Interferometer", online im Internet: <http://www.mtholyoke.edu/~mpeterso/classes/phys301/michelson.html> (Stand 15.05.03).

Um die Wellenlänge des benutzten Lasers zu bestimmen, bieten sich grundsätzlich sowohl ein IBE als auch eine Videoaufnahme an. Die Schwierigkeiten, die sich durch die große Empfindlichkeit des Versuchsaufbaus ergeben, lassen sich jedoch bei einem IBE besser bewältigen.

Beim Messen der Wellenlängenänderung muss der Spiegel nicht von Hand verschoben werden, sondern er verschiebt sich durch die thermische Ausdehnung des Metallzylinders. Dies ermöglicht einen Versuchsaufbau, der wesentlich unempfindlicher gegen Erschütterungen ist. Deshalb lässt sich dieser Versuchsteil auch im Video realisieren. Dieses bietet sich ebenso für die Veränderungen im Versuchsaufbau im Vergleich zur vorherigen Messung an, da im Gegensatz zur Wellenlängenbestimmung nicht alle Komponenten sofort zu identifizieren sind (z.B. Heizdraht).

Deshalb wurde der Komplex der Multimedien zum Michelson-Interferometer mit zwei IBE (Aufbau und Wellenlängenmessung) und einem Video (Messen einer Wellenlängenänderung) realisiert.

5.2.5 Schwierigkeiten

Didaktisch:

Bei diesem Gebiet haben sich nur wenige didaktische Schwierigkeiten ergeben. Als problematisch können sich die Formelherleitungen herausstellen, die den Lehrbüchern überlassen bleiben⁵⁵. Das IBE zum Aufbau des Interferometers stellt lediglich eine Ergänzung zu Schemazeichnungen dar und ist deshalb optional einzusetzen. Da es sich dabei nur um die technische Umsetzung eines Versuches handelt, sind sowohl Lerneffekt als auch Probleme gering. Jedoch wird damit Aufbau und Funktion der folgenden MM erläutert.

Die Bestimmung der Wellenlänge ist als IBE ebenfalls gut verständlich. Alle benötigten Informationen sind unmittelbar vorhanden. Probleme könnten bei der späteren Auswertung auftreten.

Der ebenfalls sehr kompakte Versuch zur Bestimmung der Längenänderung lässt sich leicht nachvollziehen. Der Aufbau lässt sich gut darstellen. Ebenso

⁵⁵ Vgl. z.B. Demtröder, W.: Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik, S. 299 ff.

hilft der direkte Zusammenhang von Erwärmung und Verschiebung der Interferenzstruktur dem Verständnis.

Technisch:

Beim Michelson-Interferometer handelt es sich um einen gegenüber Erschütterungen sehr empfindlichen Aufbau. Deshalb ist es bei den quantitativen Versuchsteilen notwendig, einen stabilen Aufbau zu gewährleisten. Wie bei vielen optischen Versuchen ist es schwierig die Lichtverhältnisse sowohl für die Darstellung der Interferenzfigur auf dem Schirm als auch zum gleichzeitigen Filmen des Versuchsaufbaus einzurichten. Während sich die Interferenz am besten bei komplett abgedunkeltem Raum filmen lässt, wäre beim Aufbau eine volle Beleuchtung wünschenswert. Dies erfordert einiges Experimentieren während der Aufnahme sowie bei der Nachbearbeitung.

Beim Bestimmen der Wellenlänge ist es notwendig, die Mikrometerschraube langsam und gleichmäßig zu drehen, ohne dass der Versuch dadurch erschüttert wird. Dies lässt sich durch Anbringen einer langen, gleichzeitig aber sehr leichten Stange an die Stellschraube erreichen, die später im IBE nicht zu sehen ist. Dadurch sind auch sehr feine Winkeländerungen erschütterungsfrei möglich.

Der Aufbau zum Messen der thermischen Ausdehnung ist zwar relativ stabil, dafür zeigen sich Probleme beim Heizen des Stabes. Eine thermische Isolierung gegen Halterung und Spiegel ist notwendig. Damit kann eine Erwärmung und damit Ausdehnung dieser Teile vermieden werden. Da die Temperatur nur an einer Stelle des Metallzylinders gemessen wird, kann eine homogene Erwärmung nicht vorausgesetzt werden. Um diese dennoch zu sichern, wird nur sehr langsam hochgeheizt.

5.2.6 Beschreibung der Multimedien

IBE: Michelson-Interferometer – Der Aufbau:

Dieses sehr einfache IBE zeigt den im Experiment benutzen Aufbau von oben. Dabei beschränkt sich der Bildausschnitt auf das eigentliche Interferometer. Laser und Schirm sind nicht zu sehen (siehe Abb. 5.8).

Bei Durchlaufen der Bildsequenz ist zu sehen wie der variable Spiegel seine Position ändert und damit die Wegdifferenz zustande kommt.

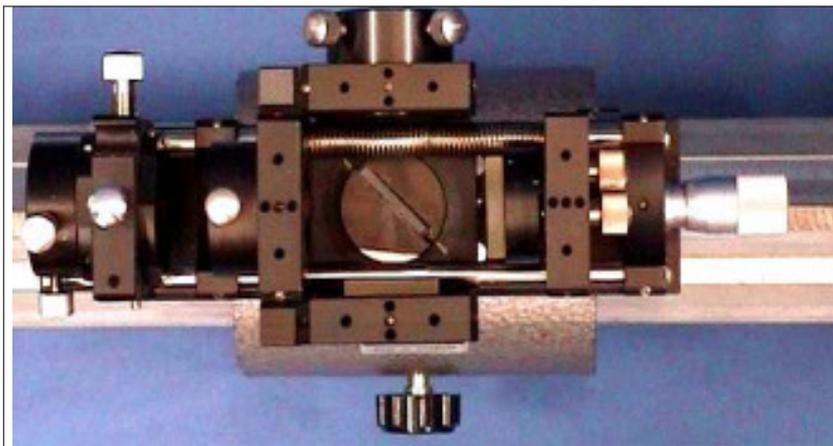


Abb. 5.8: IBE: Michelson-Interferometer – Der Aufbau

IBE: Michelson-Interferometer - Bestimmen einer Wellenlänge

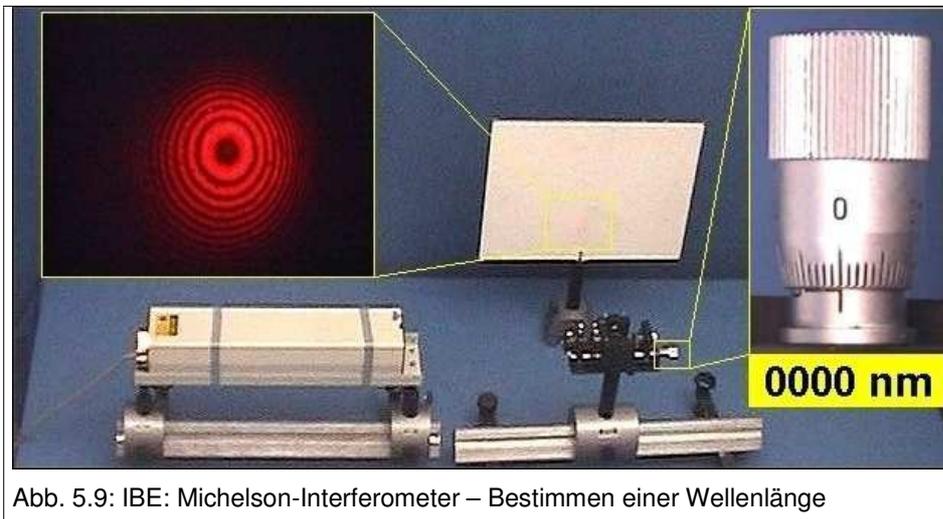


Abb. 5.9: IBE: Michelson-Interferometer – Bestimmen einer Wellenlänge

Hier ist im Bildausschnitt der komplette Versuchsaufbau des Interferometers zu erkennen. Der Laser strahlt in die vom vorherigen IBE bekannte Konstruktion und wird von dort auf den Schirm projiziert wo sich die Teilstrahlen überlagern. Diese Überlagerung ist vergrößert dargestellt, um eine gute quantitative Auswertung zu ermöglichen. Weiterhin ist die Mikrometerschraube als Detail zu sehen mit einer zusätzlichen Angabe der Verschiebung, ausgehend von 0 Nanometern als Startwert (siehe Abb. 5.9).

Im IBE kann der variable Spiegel um bis zu 4430 Nanometer in Schritten von etwas mehr als 45 Nanometer verschoben werden. Dabei kann man die Veränderung in der Interferenzstruktur beobachten und für eine spätere Auswertung auszählen.

Video: Michelson-Interferometer - Bestimmen einer Längenänderung:

Im Video wird zunächst der Versuchsaufbau als Ganzes geschildert. Laser, Interferometer und Schirm werden hervorgehoben, bevor ein Zoom die zentralen Bereiche (Interferometer, Aluminiumzylinder, Thermometer) detaillierter zeigt (siehe Abb. 5.10).

Der Strahlengang wird geschildert und der nicht sichtbare Heizdraht eingezeichnet. Bei der eigentlichen Versuchsdurchführung ist dann der zentrale Aufbau, das digitale Temperatur-Messgerät sowie die Interferenzfigur in einem vergrößerten Ausschnitt zu sehen.

Im Experiment wird nun die Temperatur im Zylinder ausgehend von $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ um insgesamt 10° erhöht (siehe Abb. 5.11). Um eine spätere Auswertung zu erleichtern und dem

Betrachter die monotone Beschäftigung zu ersparen, wird die Anzahl der durchlaufenen Interferenzringe kontinuierlich angezeigt. Dieser Ablauf wird in einer Sequenz von etwa einer Minute gezeigt.

Die Berechnung des linearen Ausdehnungskoeffizienten bleibt (ebenso wie zuvor die Bestimmung der Wellenlänge) dem Betrachter zur Übung überlassen.

5.2.7 Einbettung in die Lehre

Als grundlegendes Experiment zur Zweistrahl-Interferenz wird das Michelson-Interferometer in praktisch allen Vorlesungen zur Experimentalphysik behandelt, und ebenso in der Sekundarstufe II besprochen.

Generell kann mit den dazu angefertigten Multimedien der ganze Komplex verdeutlicht werden. Während (mit Ausnahme der Selbstlerner) das eigentliche

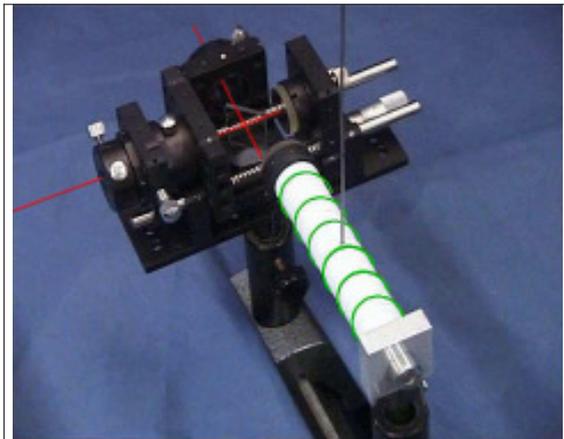


Abb. 5.10: Zentraler Bereich des Versuchsaufbaus



Abb. 5.11: Versuchsdurchführung

Prinzip im Unterricht vermittelt wird, können die Medien nun vor allem im Übungsbetrieb verwendet werden. Die quantitative Auswertung der gezeigten Vorgänge, und damit verbunden die Übung und Verdeutlichung der dazugehörigen Begriffe und Formeln, ist wohl der naheliegendste Einsatzbereich.

Aufgaben können die Erklärung des Strahlengangs im Interferometer, die Bestimmung der Wellenlänge des benutzten Lasers sowie die Berechnung des linearen Ausdehnungskoeffizienten sein⁵⁶.

5.2.8 Fazit

Die drei aufeinander aufbauenden Multimedien bilden eine anschauliche Ergänzung zur Lehrbuchdarstellung, und eignen sich vor allem für Übungsaufgaben. Damit wird dem Lernenden nicht nur das Versuchsprinzip nähergebracht, sondern auch der praktische Umgang mit den gemessenen Zahlenwerten geübt.

Die technischen Probleme bei der Erstellung der MM ließen sich alle entweder direkt bei der Aufnahme oder bei der Nachbearbeitung lösen. Die Empfindlichkeit gegenüber Vibrationen und Erschütterungen wurde dabei durch den stabilen Aufbau überwunden. Die homogene Erwärmung des Zylinders wurde durch ein langsames Aufheizen gewährleistet, der Vorgang später dann aber beschleunigt im Video gezeigt.

Was sich leider dem Zuseher nicht vermitteln lässt, ist der diffizile Umgang mit der Apparatur. So sind die Aufnahmen natürlich alle von guter Qualität. Der Umstand, dass aber bereits eine am Raum vorbeigehende Person eine Messung zunichte machen kann, verdeutlicht natürlich die Dimension der gemessenen Größen, was hier dem Betrachter kaum gezeigt werden konnte. Lediglich die fast nicht darstellbare Drehung der Mikrometerschraube bei einer Verschiebung um mehr als 4000 Nanometer deutet diesen Umstand an.

⁵⁶ Vgl. Jodl, H.J.: FiPS-Fernstudium, Experimentalphysik 2, Lehrbrief 11:

„Bestimmen Sie die Wellenlänge des im IBE verwendeten Lasers!“ und „Berechnen Sie die Längenänderung des Aluminiumzylinders und damit den linearen Ausdehnungskoeffizienten.“

Evaluiert man die drei Multimedien einzeln, so erhält man in vereinfachter Darstellung als Ergebnis:

IBE1: Der Aufbau 2,3/ 3,3/ 2,3 (Motivation/ Inhalt/ Methode)

IBE2: Messen einer Wellenlänge 1,7/ 1,7/ 2

Video: Messen einer Längenänderung 1,7/ 2/ 1,8

Es erscheint jedoch angemessener, die drei Medien entsprechend der zugrundeliegenden Konzeption als einen Block zu behandeln, wie es in Tabelle 5.2 geschehen ist.

<u>Evaluation</u>		
Motivation:		
Benutzerfreundlichkeit	1	2
Attraktivität	4	
Klarheit in Zielsetzung und Arbeitsauftrag	1	
Inhalt:		
Relevanz	2	1,7
Reichweite	2	
Richtigkeit	1	
Methode:		
Flexibilität	2	2
Anpassung an Zielgruppe	1	
Umsetzung	2	
Dokumentation	3	

Tabelle 5.2: Evaluation der MM-Einheit „Michelson-Interferometer“ bestehend aus zwei IBE und einem Video

Die MM zum Michelson-Interferometer müssen deutlich zu den weniger attraktiven gezählt werden. Effektivität und Methode sind jedoch hier die ausschlaggebenden Punkte, die einen Einsatz als Übung in den Lehrbriefen zum FiPS-Fernstudium nahe legen.

5.3 Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen zu Interferenzstrukturen

5.3.1 Versuchsbeschreibung

Um stabile Interferenzstrukturen beobachten zu können, müssen die Wellen, die sich überlagern, kohärent sein. D.h. die Phasendifferenz beider Wellen darf sich im Laufe der Beobachtungsdauer im entsprechenden Volumen nur wenig ändern. Es gibt prinzipiell nur zwei Methoden zur Erzeugung kohärenter Teilwellen. Dies ist zum einen die phasenstarre Kopplung zweier Erregerzentren, zum anderen die Aufspaltung einer Welle in Teilstrahlen die später wieder überlagert werden.

Phasenstarre Kopplung:

Will man gekoppelte Erregerzentren veranschaulichen, so bietet sich dazu eine Wasserwellenwanne an. Zwei miteinander verbundene Röhrchen erzeugen mit Luftstößen synchron Wellen, die sich in der Wasserwanne ausbreiten und überlagern. Bei stroboskopischer Beleuchtung lassen sich so stabile Interferenzstrukturen gut sichtbar machen (siehe Abb. 5.12).

Bei Lichtwellen lässt sich dies nicht so einfach realisieren⁵⁷. Man muss auf einen Fresnelschen Spiegel zurückgreifen, um damit zwei virtuelle, gekoppelte Lichtquellen zu erzeugen. Auch hiermit erhält man eine stabile Interferenzfigur. Aufgrund geometrischer Betrachtungen lässt sich zeigen, dass die Punkte gleicher Phasendifferenz auf dem Schirm auf Hyperbeln liegen⁵⁸.

Aufspaltung in Teilwellen:

Die zweite Variante folgt in Ihrem Aufbau der Schemazeichnung 5.13. Die von einer Quelle L ausgehenden Wellen werden an einem Strahlteiler (hier S_1) aufgespalten und zur Beobachtung von Interferenzen wieder

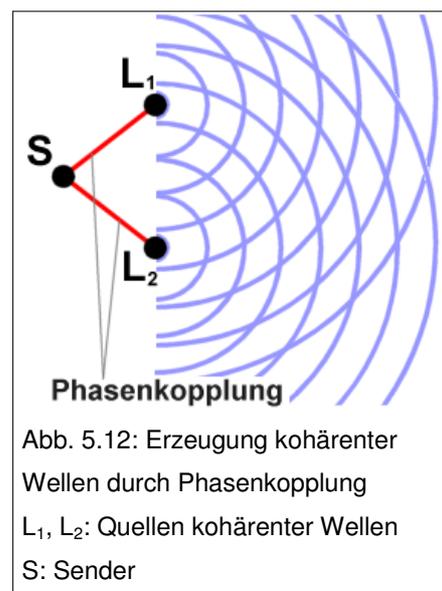


Abb. 5.12: Erzeugung kohärenter Wellen durch Phasenkopplung
 L_1, L_2 : Quellen kohärenter Wellen
 S: Sender

⁵⁷ Der Laser basiert im Prinzip auf einer Phasenkopplung, eignet sich jedoch nicht zu ihrer Demonstration.

⁵⁸ Vgl. Demtröder W. : Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik, S. 331.

überlagert. Dabei durchlaufen die beiden Teilstrahlen unterschiedliche Strecken.

Dies lässt sich bei Mikrowellen gut verwirklichen. Als Strahlteiler wählt man eine einfache Glasplatte. Der Aufbau folgt dem Prinzip des Michelson-Interferometers (siehe Kapitel 5.4). Um die Interferenz deutlich werden zu lassen, wird die im Empfänger gemessene Intensität verstärkt und über einen Lautsprecher ausgegeben.

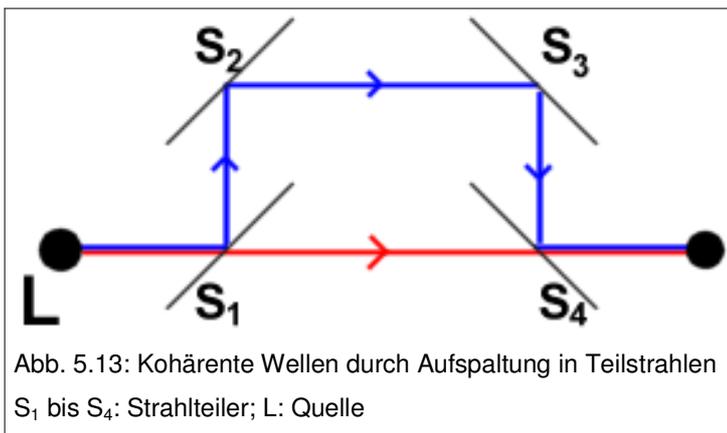


Abb. 5.13: Kohärente Wellen durch Aufspaltung in Teilstrahlen S₁ bis S₄: Strahlteiler; L: Quelle

Im sichtbaren Frequenzbereich elektromagnetischer Wellen bietet sich die Nutzung eines Michelson-Interferometers zur Darstellung dieses Prinzips an. Als Strahlteiler wird ein

Spiegel mit etwa 50 Prozent Reflexion verwendet. Die Überlagerung der Teilwellen erfolgt auf einem Schirm und kann direkt beobachtet werden.

5.3.2 Begründung der Auswahl

Kohärenz wird im Rahmen der Physik-Leistungskurse⁵⁹ angesprochen und im zweiten Semester der Experimentalphysik ausführlich als notwendige Eigenschaft elektromagnetischer Wellen zur Beobachtung stabiler Interferenzstrukturen behandelt. Oft lassen sich bei Schülern von Physik-Leistungskursen ebenso wie bei Studenten Verständnisprobleme im Bezug auf Kohärenz feststellen. Zumeist existiert nur eine ungenaue Vorstellung.

Weiterhin werden verschiedene Wellenarten (Wasserwellen, Lichtwellen, Mikrowellen etc.) zwar formal als Gesamtkonzept akzeptiert, ein tiefes Verständnis über Gründe und Folgerungen dieses Zusammenhanges wird jedoch oft nicht erreicht.

Der Aufbau einer Unterrichtseinheit an Schule oder Universität erlaubt es auf Grund zeitlicher Beschränkungen nicht, einen phänomenologischen Überblick über die Parallelen zwischen Wellenformen zu zeigen. Weiterhin werden die

⁵⁹ Vergleiche Lehrplan Physik.

Möglichkeiten einer experimentellen Realisierung von Interferenzen nicht aufgezeigt.

Bisher gibt es kaum Multimedien die sich mit Kohärenz beschäftigen. Sie wird im Gegenteil bei allen Medien zu Interferenzbeobachtungen als bekannt vorausgesetzt.

5.3.3 Ziele

Ziel des Videos ist es die in 5.3.2 aufgezählten Defizite beim Verständnis von Wellenphänomenen und Kohärenz zu verringern und damit zu einem besseren Verständnis von stabiler Interferenz beizutragen. Dies heißt konkret, dass die beiden Prinzipien der Erzeugung kohärenter Teilwellen vorgestellt und deren experimentelle Realisierung veranschaulicht werden sollen. Dabei werden unterschiedliche Wellentypen und Versuchsaufbauten gewählt, um die Wesensgleichheit der Wellen zu veranschaulichen.

Weiterhin wird eine Übersicht über Standardexperimente gegeben, die hier kurz vorgestellt werden. Die entstehenden Interferenzfiguren sollen mit dem Phänomen vertraut machen.

5.3.4 Begründung des gewählten Multimedien-Typs

Der phänomenologische Ansatz lässt nur ein Realexperiment sinnvoll erscheinen. Um einen Überblick über verschiedene Versuchsaufbauten zu geben, eignet sich nur das Video als Multimedia.

5.3.5 Schwierigkeiten

Didaktisch:

Im Film sollen vier verschiedene Experimente gezeigt werden um ein gemeinsames Konzept zu vermitteln. Dies verlangt nach einer sehr straffen Ablaufplanung. Dennoch ist es mit fast 5:30 Minuten eines der längsten Videos, die von Andreas Wagner und mir an der Universität Kaiserslautern erstellt wurden.

Es gilt, alle Versuchsaufbauten so zu beschreiben, dass der Ablauf des eigentlichen Versuchs dem Zuschauer verständlich wird. Ziel kann nicht sein, jedes experimentelle Detail zu erläutern, so dass das Experiment sofort selbst

durchgeführt werden kann. Deshalb muss man sich auf prinzipielle Funktionen und notwendige Bestandteile im Aufbau beschränken.

Die an den Spiegelkanten entstehenden Beugungserscheinungen beim Fresnel-Spiegel sind didaktisch problematisch. In ihrem Aussehen sind sie zunächst nicht von den eigentlich erwünschten Interferenzstrukturen zu unterscheiden, weshalb ein spezieller Hinweis in Bild und Ton notwendig ist.

Technisch:

Bei der Wasserwellenwanne war die stroboskopische Beleuchtung des Versuches problematisch. Nur bei einer genauen Abstimmung der Stroboskopfrequenz (50 Hz) auf die Digitalkamera (25 Hz) entstand ein flackerfreies Bild. Dies erforderte mehrere Anläufe und Feinjustierungen.

Weiterhin hat sich die Nachbearbeitung als sehr aufwändig gestaltet. Da ein Verständnis der Versuchsprinzipien im Vordergrund stand, wurden viele halbtransparente Diagramme angefertigt und den Originalbildern überlagert um den Verlauf der Wellen darzustellen.

5.3.6 Beschreibung des Multimediums

Zu Beginn des Films erfolgt zunächst ein Überblick über den weiteren Ablauf (siehe Abb. 5.14). Die beiden Prinzipien zur Erzeugung kohärenter Wellen werden eingeführt und die folgenden experimentellen Realisierungen vorgestellt.

Im ersten Teil wird die phasenstarre Kopplung zweier Quellen demonstriert. Wegen der Schwierigkeiten bei diesem Zugang werden zunächst makroskopische Wasserwellen betrachtet, die dem Lernenden einen direkten Einstieg ermöglichen, ohne auf Abstrakta zurückgreifen zu müssen.

Die Beschreibung des Versuchs-

aufbaus beschränkt sich auf die grundlegende Funktion der Bildprojektion (die Beleuchtung von oben wird über einen Spiegel auf den Schirm gelenkt) sowie

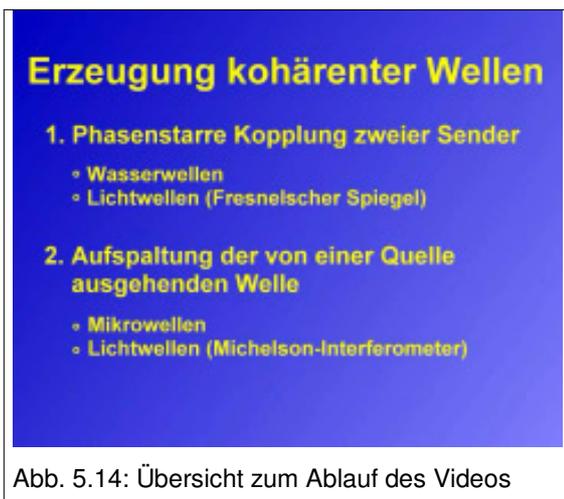


Abb. 5.14: Übersicht zum Ablauf des Videos

die miteinander gekoppelten Wellenerzeuger. Die entstehenden stabilen Interferenzfiguren werden gezeigt.

Die Realisierung dieses Prinzips im sichtbaren Frequenzbereich erfordert eine ausführlichere Einführung. Da sich die Kopplung zweier realer Lichtquellen nicht mit vertretbarem Aufwand bewerkstelligen lässt, ist man auf die Verwendung

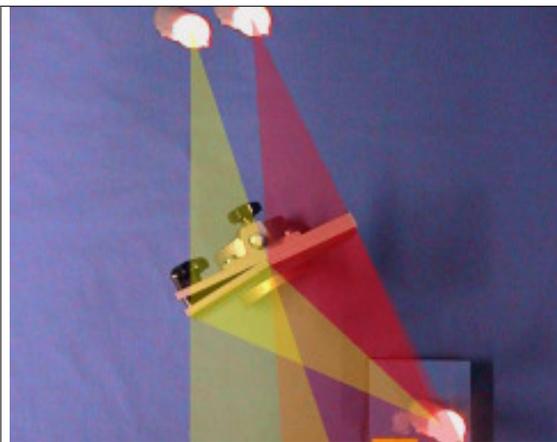


Abb. 5.15: Strahlengang beim Fresnelschen-Spiegel

virtueller Lichtquellen angewiesen. Diese Methode wird zunächst mit einer thermischen Lichtquelle und einem Fresnel-Spiegel veranschaulicht. Die Spiegelung einer Kerze an der ersten Spiegelfläche zeigt dem Beobachter eine virtuelle Kerze auf der Rückseite des Spiegels. Die zweite, zur ersten abgewinkelte Spiegelfläche erzeugt eine weitere, leicht versetzte virtuelle Lichtquelle.

Die Entstehung dieser virtuellen ‚Kerzen‘ wird mit den Mitteln der geometrischen Optik als Einblendung im Video veranschaulicht (siehe Abb. 5.15).

Anschließend wird das eigentliche Experiment unter Verwendung eines Lasers als Lichtquelle vorgestellt. Die entstehende Interferenzfigur wird gezeigt.

Den zweiten großen Block im Video bilden die beiden Versuche zur Erzeugung kohärenter Wellen mit der Hilfe von Strahlteilern. Zunächst wenden wir uns hier dem Aufbau mit Mikrowellen zu. Das zu Grunde liegende Prinzip des Michelson-Interferometers wird hier durch Einblendung der Strahlengänge in einer Ebene ausführlich veranschaulicht.

Bei der eigentlichen Versuchsdurchführung werden die Interferenzmaxima und -minima dadurch

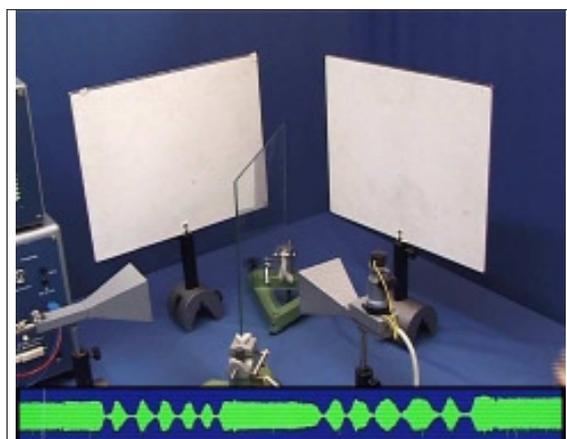


Abb. 5.16: Interferenz bei Mikrowellen

veranschaulicht, dass das Signal des Mikrowellenempfängers verstärkt und auf einen Lautsprecher gegeben wird. Gleichzeitig wird die Intensität des Signals optisch dargestellt (siehe Abb. 5.16).

Abschließend wird das gleiche Prinzip am Michelson-Interferometer mit einem He-Ne-Laser gezeigt. Der Aufbau wird nur kurz erläutert, da er im Prinzip zu dem des Versuchs mit Mikrowellen identisch ist, und nur das Material der Komponenten wechselt. Die Interferenz wird auf einem Schirm dargestellt.

5.3.7 Einbettung in die Lehre

Bei diesem Video gibt es unterschiedlichste Lehr-/ Lernsituationen, die sich für einen Einsatz anbieten. Grundsätzlich kann es immer dann gezeigt werden, wenn einer der vier darin gezeigten Versuche behandelt wird. Ebenso kann es zur Darstellung der Analogien verschiedener Wellenarten verwendet werden.

Seiner ursprünglichen Intention entsprechend ist das Medium jedoch für die Einführung in den Themenkomplex Interferenz und Beugung konzipiert. Nach einer einführenden, allgemeinen Beschreibung des Kohärenzbegriffes können damit die grundlegenden Möglichkeiten zur Erzeugung kohärenter Wellen gezeigt werden⁶⁰.

5.3.8 Fazit

Das Video zur Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen zu Interferenzfiguren verfolgt zahlreiche kleinere Ziele, die es dem Betrachter ermöglichen, sich einen Überblick über verschiedene grundlegende Experimente und Techniken der Interferenzoptik zu verschaffen.

So werden verschiedene Wellentypen (elektromagnetisch, mechanisch) gleichwertig nebeneinander gestellt, und neben EM-Wellen im optisch sichtbaren Frequenzbereich werden auch Mikrowellen eingesetzt.

Die grundlegenden Prinzipien zur Erzeugung kohärenter Wellen werden klar dargestellt. Virtuelle Lichtquellen werden erklärt, die entstehenden Interferenzstrukturen qualitativ dargestellt.

⁶⁰ Vgl. Jodl, H.J.: FiPS-Fernstudium, Experimentalphysik 2, Lehrbrief 11: „Warum wird in der Praxis kohärente Überlagerung fast immer nur mit einer einzigen Lichtquelle erreicht?“

Die Umsetzung dieses Konzeptes in einen Film ist gut gelungen. Er zeigt, wenn nötig in genügender Breite, die grundlegenden Methoden, ist jedoch, wo es möglich ist, sehr straff gehalten.

<u>Evaluation</u>		
Motivation:		
Benutzerfreundlichkeit	2	2
Attraktivität	2	
Klarheit in Zielsetzung und Arbeitsauftrag	2	
Inhalt:		
Relevanz	1	1,3
Reichweite	2	
Richtigkeit	1	
Methode:		
Flexibilität	2	2
Anpassung an Zielgruppe	1	
Umsetzung	2	
Dokumentation	3	

Tabelle 5.3: Evaluation des Videos „Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen zu Interferenzstrukturen“

Die Evaluation bescheinigt dem MM eine große Effektivität in Bezug auf die gesetzten Ziele.

5.4 Rayleigh Kriterium – Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente

5.4.1 Versuchsbeschreibung

Betrachtet man zwei Objektpunkte durch ein optisches Instrument, so lassen sich diese nach Rayleigh gerade noch voneinander trennen, wenn sie einen Winkel von

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

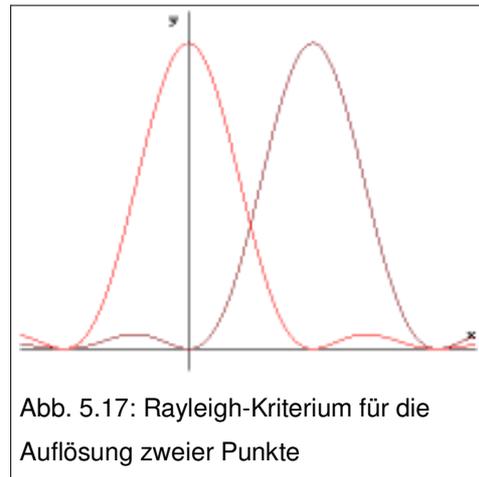
(gemessen im Bogenmaß) voneinander entfernt sind. Dabei ist λ die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und D der Durchmesser der dem Objekt

zugewandten Linse. Idealerweise betrachtet man zwei quasi-punktförmige Lichtquellen wie z.B. zwei nahe beieinander stehende Sterne.

Der Vorfaktor 1,22 ergibt sich daraus, dass die Besselfunktion, die die Intensitätsverteilung hinter einer kreisförmigen Blende beschreibt, ihre erste Nullstelle bei $x = 1,22\pi$ hat⁶¹.

Das Rayleigh-Kriterium beschreibt also den Fall, in dem das Hauptmaximum des ersten Objektes mit dem ersten Minimum des zweiten zusammenfällt (siehe Abb. 5.17).

Geometrische Betrachtungen und die Näherung für kleine Winkel liefern schließlich die Formel für den Mindestabstand x , den zwei Punkte haben müssen, damit man sie noch getrennt voneinander wahrnehmen kann:



$$x \approx 1,22 \cdot L \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Dabei ist L der Abstand zwischen Objektiv und Objekt.

Um ein Unterschreiten der Rayleigh-Grenze zu demonstrieren, muss man also entweder die beiden quasi-punktförmigen Lichtquellen näher zusammenbringen, den Abstand zwischen optischem Instrument und Objekt vergrößern oder aber die Apertur verkleinern.

Um das Experiment möglichst gut und reproduzierbar durchführen zu können, wurde die letzte Möglichkeit gewählt. Eine veränderliche Apertur lässt sich wegen der erforderlichen Präzision und Stabilität des gesamten Aufbaus am leichtesten und kostengünstigsten realisieren.

5.4.2 Begründung der Versuchsauswahl

Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente, und damit die Rayleigh-Bedingung, wird verpflichtend in Physik-Leistungskursen der gymnasialen Oberstufe⁶² besprochen und im Physikstudium im zweiten Semester in der Experimentalphysik vertieft⁶³.

⁶¹ Vgl. z.B. Joos, G.: Lehrbuch der Theoretischen Physik, S. 290, und S. 68 ff.

⁶² Vgl. Lehrplan Physik.

⁶³ Vgl. Vgl. z.B. Demtröder W.: Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik, S. 341 ff.

Damit gehört das Thema zu den Kerngebieten der Physiklehre.

Während in der Oberstufe den empirischen Beobachtungen unmittelbar die genäherte Formel folgt, wird an der Universität eine Herleitung aus theoretischen Betrachtungen zu Intensitätsverteilungen hinter beugenden Objekten genutzt, um sich dem Phänomen zu nähern.

Photographien und Intensität- / Ort-Diagramme begleiten i.A. die Lehrbuchdarstellung. Eine praktische Versuchsdurchführung zu diesem Thema findet jedoch zumeist aus zeitlichen und technischen Gründen nicht statt. Während zum einen die Vorarbeiten wie das Präparieren der Lichtquellen sowie das Justieren des optischen Instruments recht aufwändig sind, ist weiterhin noch ein hochwertiges Fernrohr oder Mikroskop notwendig.

Weiterhin gibt es bisher nur wenige MM zur Rayleigh-Bedingung. Es existieren einige numerische Simulationen zur Überlagerung zweier Beugungserscheinungen⁶⁴, sowie ein kurzer Quicktime-Film, der eine dreidimensionale Visualisierung⁶⁵ analog zum hier durchgeführten Realexperiment zeigt und es somit gut ergänzt.

5.4.3 Ziele

Im MM zum Rayleigh-Kriterium soll der Übergang von zwei getrennten quasipunktförmigen Lichtquellen zu einem verwaschenen Lichtfleck gezeigt werden.

Da dieses Thema sowohl in Sekundarstufe II als auch an der Universität besprochen wird, soll ein Versuch gezeigt werden, der sich an beide Zielgruppen wendet. Dazu ist es notwendig, sich zunächst einmal stark auf den Versuch selbst zu beschränken, und nur wenig theoretisches Umfeld zu liefern. Während sich für die gymnasiale Oberstufe eine phänomenologische Betrachtung anbietet, die im Unterricht nicht weiter vertieft werden muss, liegt in der Experimentalphysik-Vorlesung eine Verwendung des Videos als Demonstration im Anschluss an eine theoretische Herleitung nahe.

Weiterhin soll die für kleine Winkel genäherte Formel vorgestellt und erläutert werden. Das Rayleigh-Kriterium soll anhand gezielt ausgewählter Konstellationen im Versuch analysiert werden.

⁶⁴ Rayleigh Criterion, online im Internet.

<http://webphysics.davidson.edu/mjb/SESAPS2000/rayleigh3.html> (Stand 15.05.03).

⁶⁵ Raleigh Criterion: Effect of the Size of the Aperture, online im Internet:

<http://webphysics.ph.msstate.edu/jc/library/24-7a/> (Stand 15.05.03).

5.4.4 Begründung des gewählten Multimedien-Typs

Da es sich beim Übergang von zwei scharf getrennten Lichtquellen über die Rayleigh-Grenze hin zu einem verwaschenen Lichtfleck um einen dynamischen Vorgang handelt, bieten sich zunächst einmal sowohl IBE als auch Video zur multimedialen Darstellung des Phänomens an.

Jedoch erfordert der Aufbau des Experiments weiterreichende Erklärungen, die im Rahmen eines IBE nur schwer zu verwirklichen sind. Im makroskopischen Umfeld (Abstand Fernrohr—Lichtquelle; Apertur) werden mikroskopische Objekte (quasi-punktförmige Lichtquellen) untersucht, was eine ausführliche Beschreibung verlangt, und sich nur unzureichend in einem Diagramm bzw. Bild darstellen lässt.

Weiterhin erscheint die anschließende Auswertung mit Nachbearbeitung nötig, um die Zusammenhänge der im Versuch parallel ablaufenden Prozesse ausreichend zu erklären.

5.4.5 Schwierigkeiten

Didaktisch:

Vom chronologischen Ablauf des Videos her bieten sich zwei grundsätzliche Zugänge an. Die Formel zur Rayleigh-Grenze ($x \approx 1,22 \cdot L \cdot \frac{\lambda}{D}$) kann an den Anfang gesetzt und anschließend untersucht werden. Sie kann jedoch auch aus dem Versuch heraus entwickelt werden. Beides lässt sich jedoch kaum mit dem Anspruch eines MM verknüpfen, das sich sowohl an Gymnasialschüler als auch an Physikstudenten wendet.

Deshalb erscheint es angebracht, die Herleitung der physikalischen Theorie vollständig aus dem Video herauszuhalten. Es ist aus diesem Grund für einen ergänzenden Einsatz im Rahmen einer Vorlesung bzw. Unterrichtseinheit konzipiert, oder aber als Zusatz zum Eigenstudium anhand von Lehrbüchern.

Durch die Verwendung eines Schmidt-Cassegrain Teleskops kann das Zentrum der Apertur nicht mittig angebracht werden. Dies ist für die Bildentstehung zwar unerheblich, kann jedoch zu Irritationen beim Betrachter führen.

Technisch:

Die erste Herausforderung beim Aufbau des Versuches stellt sich bei der Realisierung zweier punktförmiger Lichtquellen von sehr kleinen Dimensionen,

die aber gleichzeitig von großer Präzision und hoher Lichtintensität sein müssen. Dafür sind sehr genaue Bohrungen im Mikrometerbereich in einem lichtundurchlässigen Material notwendig, wie sie nur ein(e) entsprechend ausgestattete(s) Labor/ Werkstatt durchführen kann.

Weiterhin erweist es sich als schwierig eine ausreichende Stabilität des Aufbaus zu gewährleisten, da bei der enormen Vergrößerung des Fernrohres bereits kleine Erschütterungen zu starken Veränderungen im beobachteten Bereich führen. Deshalb wird ein hochwertiges Stativ ebenso benötigt wie eine zusätzliche Absicherungen gegen Schwingungen durch Vergrößern der Masse mit Gewichten.

Ferner lässt sich ein gewisses Grundrauschen durch Hintergrundhelligkeit nicht vermeiden, was zu einem Offset, also einer konstanten Zusatzintensität im Intensität-/ Ort-Diagramm führt.

Die gleichmäßige Ausleuchtung der beiden Bohrungen war problematisch, da ein Filter wegen der daraus resultierenden Intensitätsminderung nicht benutzt werden konnte.

Die Kopplung der Digitalkamera mit dem Teleskop stellte ein weiteres Hindernis dar, das sich nur durch Anfertigung einer provisorischen Halterung lösen ließ. Dies machte den Aufbau allerdings wieder empfindlicher gegen Erschütterungen.

Ebenfalls störend wirkten sich einzelne Staubkörner auf den Spiegeln im Inneren des Teleskops aus. Die daran entstehenden Beugungserscheinungen waren nicht zu vermeiden.

5.4.6 Beschreibung des Multimediums

Um der großen Zielgruppe gerecht zu werden und nicht unmittelbar mit dem Versuchsaufbau einzusteigen, wird zunächst das generelle Objekt der Untersuchungen, die Rayleigh-Grenze und ihre Aufgabe bei der Beschreibung des Auflösungsvermögens in Worten erklärt.

Durch Darstellung der erwarteten Ergebnisse wird gleichzeitig der Blick auf die wesentlichen Elemente der Versuchsdurchführung gelenkt. Dieser Vorgriff soll das Verständnis des folgenden Videos erleichtern.

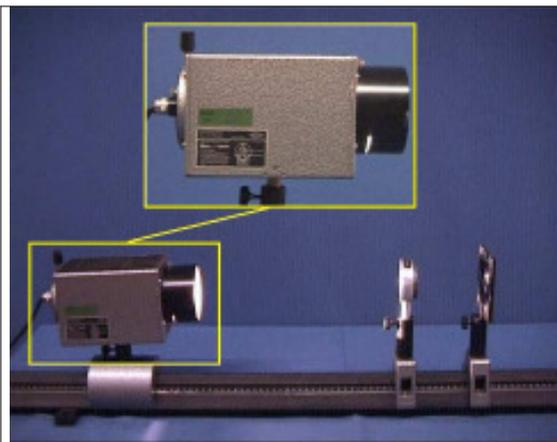


Abb. 5.18: Realisierung der Lichtquellen

Anschließend wird der Aufbau des Experiments dargestellt. Dabei wird zunächst die Realisierung der quasi-punktförmigen Lichtquellen erklärt (siehe Abb. 5.18), bevor das verwendete Fernrohr und die Apertur vorgestellt werden.

Es folgt die eigentliche Versuchsdurchführung. Da in diesem Abschnitt sowohl der Blick durch das

Fernrohr, die Apertur als auch der zweidimensionale Schnitt durch die Intensitätsverteilung gezeigt werden, beginnt diese mit einer Erklärung der Bildaufteilung. Diese Darstellungsform ermöglicht bei mehrmaligem Betrachten zum einen ein gezieltes Beobachten der gewünschten Bildinformation ohne auf eine vorgegebene Auswahl festgelegt zu sein, zum anderen gleichzeitig ein Verbinden der drei Informationen (siehe Abb. 5.19).

Dies steht im Gegensatz zum klassischen gefilmten Vorlesungsexperiment, bei dem in der Regel nur getrennte, qualitative Beobachtungen möglich sind.

Der Blick auf die mikroskopischen Bohrungen liefert dabei den phänomenologischen Aspekt der „verwischenden Lichtpunkte“. Die Apertur ermöglicht eine spätere quantitative Auswertung des Experiments, während der Intensitätsquerschnitt einen direkten Bezug zur Lehrbuchdarstellung liefert und den direkten Vergleich mit den

Theoriewerten ermöglicht. Im Zuge der nun folgenden Auswertung werden ausgewählte Zustände im Versuch gezeigt und analysiert.

Zur Einführung und Erläuterung der Auswertung wird die Situation zu Beginn des Experiments analysiert. Zu diesem Zweck erfolgt ein genauerer Blick auf das Intensität- / Ort-Diagramm, in

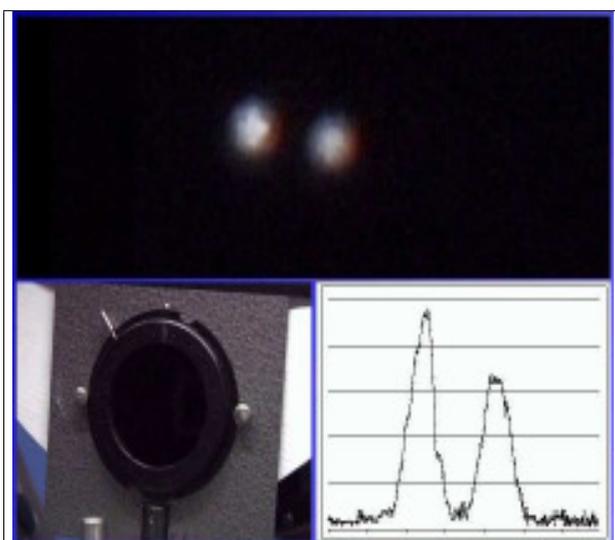


Abb. 5.19: Versuchsdurchführung

das nun die erwarteten theoretischen Kurven zweier einzelner Lichtpunkte angefittet und anschließend überlagert werden. Die beiden scharf getrennten Peaks entsprechen den theoretischen Erwartungen (siehe Abb. 5.20).

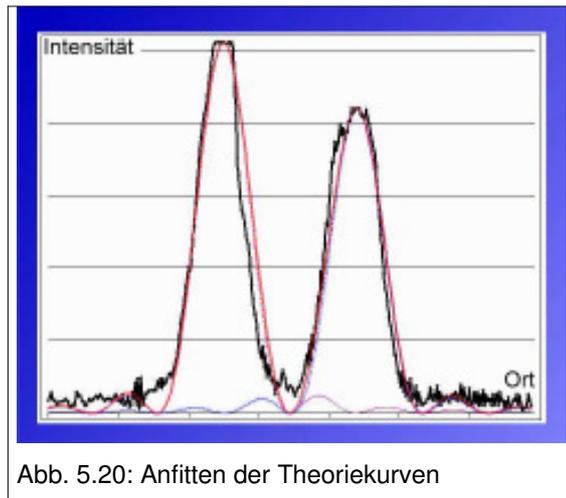


Abb. 5.20: Anfitting der Theoriekurven

Ein Verkleinern der Apertur führt zu einer Verbreiterung der Peaks und dazu, dass die Intensität zwischen

den beiden Lichtpunkten nicht mehr auf den Nullwert absinkt.

Als drittes wird nun der Punkt besonders hervorgehoben, an dem das Minimum der einen Intensitätsverteilung mit dem Maximum der anderen zusammenfällt. Dies ist die von Rayleigh definierte Auflösungsgrenze. Das Diagramm wird mit dem Bild, das sich dem Beobachter bietet, verglichen und die Öffnung der Apertur notiert.

Mit Hilfe dieser Angaben wird nun die genäherte Formel zur Rayleigh-Grenze der Auflösung überprüft.

Fasst man die Daten des Versuchsaufbaus zusammen und setzt diese ein, erhält man eine Abweichung vom Literaturwert von weniger als 5 Prozent, was im Rahmen der Messgenauigkeit die Theorie bestätigt (siehe Abb. 5.21).

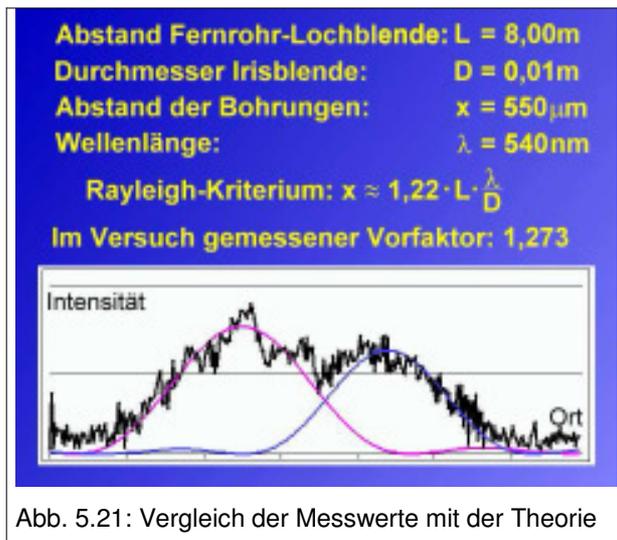


Abb. 5.21: Vergleich der Messwerte mit der Theorie

5.4.7 Einbettung in die Lehre

Im Rahmen der Optik ist die Untersuchung der Funktionsweise optischer Instrumente sowohl an der Universität als auch in der Sekundarstufe II ein wichtiger Bestandteil des Lehrplans. Hier wird nun endlich das theoretische

Wissen von geometrischer und Wellenoptik zusammengeführt und in praktische Werkzeuge umgesetzt.

Nachdem in diesem Zusammenhang die grundlegenden Prinzipien vergrößernder Apparate dargestellt wurden, gilt es nun auch die Grenzen dieser Techniken aufzuzeigen. Wesentlich ist dabei die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten.

Diese kann, falls Ausrüstung und Zeit vorhanden sind, im Realversuch gezeigt werden⁶⁶, was jedoch einiges an Vorarbeiten mit sich zieht. Man kann sie in Simulationen bzw. Animationen darstellen, oder mit Hilfe des hier vorgestellten Videos.

Weiterführende Untersuchungen können zunächst die im Video verwendete Vereinfachungen betreffen und weiter zur Besselfunktion und deren Nullstellen führen⁶⁷.

5.4.8 Fazit

Während sich der didaktische Ablauf durchaus sinnvoll und zufriedenstellend realisieren lies, waren einige technischen Probleme nicht vollständig zu lösen.

So ist die Lichtstärke der beiden quasi-punktförmigen Lichtquellen nicht identisch sondern die Maximalwerte unterscheiden sich um fast ein Sechstel. Zwar ändert dies nichts an den Ergebnissen selbst, stellt jedoch gerade für experimentell unerfahrenere Schüler gegebenenfalls ein Verständnisproblem dar.

Ferner ließen sich die leichten Schwankungen im Versuchsaufbau nicht weiter minimieren, so dass es immer noch zu kleinen Störungen kommt.

Trotzdem kann das Video als gelungen bezeichnet werden. Ein Einsatz des Films in den Vorlesungen der Experimentalphysik sowie in der Sekundarstufe II stellt eine sinnvolle Ergänzung dar.

Das Hauptziel des MM, die Demonstration der Rayleigh-Grenze der Auflösung wurde erreicht.

⁶⁶ Rueckner, W.: How to beat the Rayleigh resolution limit: A lecture demonstration.

⁶⁷ Vgl. Jodl, H.J.: FiPS-Fernstudium, Experimentalphysik 2, Lehrbrief 12:

„Welches Bild erzeugt jeder Punkt eines Gegenstands, sobald die Beugung an strahlbündelbegrenzenden Öffnungen eine Rolle spielt? Wie hängt dabei die Breite des zentralen Maximums („Beugungsscheibchen“) vom Durchmesser der maßgeblichen Blende im Strahlengang ab? Was ist das Rayleigh-Kriterium?“

<u>Evaluation</u>		
Motivation:		
Benutzerfreundlichkeit	2	1,7
Attraktivität	2	
Klarheit in Zielsetzung und Arbeitsauftrag	1	
Effektivität:		
Relevanz	1	1,3
Reichweite	2	
Richtigkeit	1	
Methode:		
Flexibilität	3	2
Anpassung an Zielgruppe	1	
Umsetzung	1	
Dokumentation	3	

Tabelle 5.4: Evaluation des Videos „Rayleigh-Kriterium – Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente“

Dieses Ergebnis bescheinigt dem Film vor allem eine große Effektivität im Einsatz.

5.5 Absorption und Streuung

5.5.1 Versuchsbeschreibung

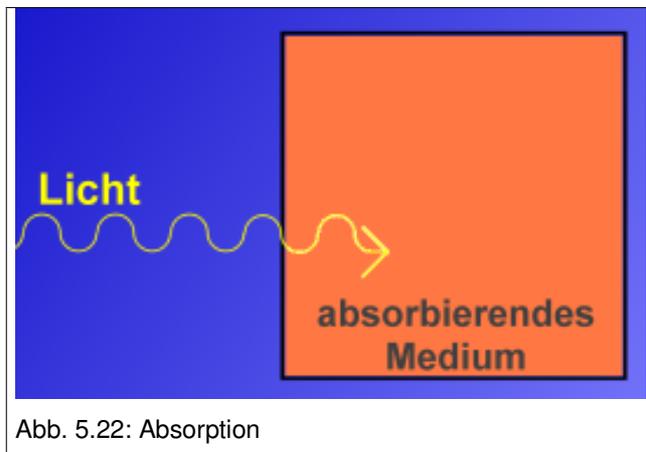
Bringt man ein Material in den Strahlengang zwischen Lichtquelle und Photometer, so gibt es verschiedene Mechanismen, die zu einer Verringerung der gemessenen Intensität führen. Bei optisch durchsichtigen Materialien wird nur ein Teil der Strahlung transmittiert, während ein anderer auf Grund der Reflexion den Detektor nicht erreicht. Das Verhalten dieser Materialien kann mit Hilfe der Brechzahl n beschrieben werden.

Bei nicht vollständig durchsichtigen Materialien wird die Intensität im Medium durch Absorption und Streuung verringert. Dieses Verhalten wird allgemein durch die Extinktionskonstante beschrieben⁶⁸.

⁶⁸ Vgl. Niedrig, H. (Hrsg.): Bergmann – Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3, S. 243 ff.

Bei der Absorption wird das eingestrahlte Licht von der Materie in eine andere Energieform umgewandelt. Dies kann zum Beispiel längerwelliges Licht⁶⁹ oder Wärme sein (siehe Abb. 5.22).

Untersuchungen zeigen, dass die Lichtintensität Φ mit der im absorbierenden Medium durchlaufenen Strecke l sinkt. Dieser Zusammenhang wird mit Hilfe des Lambertschen Absorptionsgesetzes⁷⁰ beschrieben⁷¹:



$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha_a l}$$

Dabei ist Φ_0 die ursprüngliche Intensität und α_a der materialspezifische Absorptionskoeffizient.

Bei der Streuung wird das eingestrahlte Licht aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt. Dies geschieht durch kleinste Teilchen im Medium wie z.B. Staub in der Luft oder Schwebeteilchen im Wasser (siehe Abb. 5.23). Bezeichnen wir auch hier die durchlaufene Strecke mit l , die resultierende Lichtintensität mit Φ und die ursprüngliche Lichtintensität mit Φ_0 so erhalten wir für die Streuung ein analoges Gesetz mit dem Streufaktor α_s :

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha_s l}$$

Der Streufaktor α_s ist hier das Produkt aus totalem Wirkungsquerschnitt σ und Anzahldichte der streuenden Teilchen n_0 . Der Wirkungsquerschnitt gibt dabei die wirksame Fläche pro streuendem Teilchen an, in der das Licht vollständig gestreut wird, während n_0 die Anzahldichte der streuenden Teilchen pro Volumen angibt.

⁶⁹ Vgl. Vogel, H.; Gerthsen C.: Physik, S. 572 f.

⁷⁰ In vielen Veröffentlichungen finden sich Ungenauigkeiten in der Bezeichnung. Oftmals wird das Lambertsche-Gesetz als Lambert-Beersches-Gesetz bezeichnet (und umgekehrt). Dabei beschreibt letzteres die Absorption unter Zuhilfenahme der Konzentration des durchlaufenen Mediums durch:

$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha' c l}$ mit α' einem von α_a abweichenden Koeffizienten.

⁷¹ Vgl. Demtröder, W.: Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik, S. 216 ff.

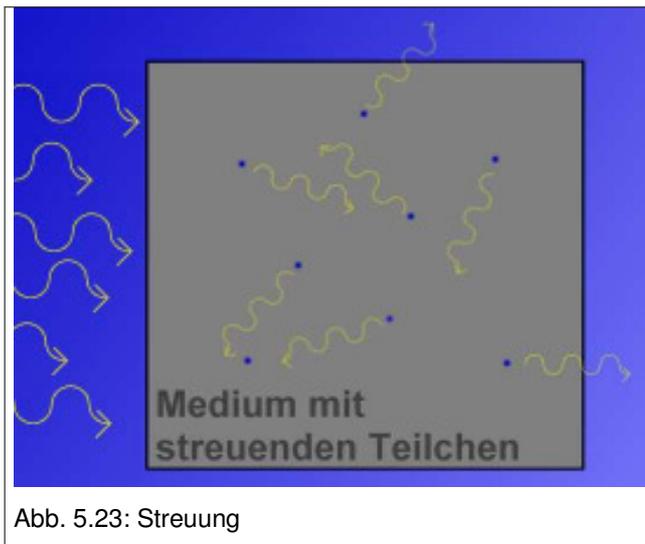


Abb. 5.23: Streuung

Da sowohl der Absorptionskoeffizient α_a als auch der Streukoeffizient α_s die Dimension m^{-1} haben, lässt sich leicht der Zusammenhang für ein Medium aufschreiben, in dem es sowohl zur Absorption als auch zur Streuung kommt:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha l}, \text{ mit}$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s.$$

Damit erhalten wir in dieser vereinfachten Betrachtung die allgemeine Extinktionskonstante α .

5.5.2 Begründung der Auswahl

Absorption und Streuung gehören im Rahmen der Vorlesung Experimentalphysik 2 zu den grundlegenden Prinzipien bei der Untersuchung des Verhaltens elektromagnetischer Wellen in Materie. Dennoch tauchen an dieser Stelle oftmals Lernschwierigkeiten auf wenn es darum geht, diese beiden Begriffe in Beziehung zueinander zu setzen. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass in fast allen einführenden Beschreibungen beide Begriffe vollständig unabhängig voneinander eingeführt werden. Bei der im allgemeinen zuerst stattfindenden Einführung der Absorption wird die Streuung als vernachlässigbar klein vorausgesetzt, während später bei der Streuung auf einen Rückblick verzichtet wird.

Es lassen sich im Internet nur wenige Umsetzungen dieser Inhalte mit Hilfe von MM finden. Vorhandene Medien untersuchen jeweils nur eines der Phänomene und sind qualitativ weitestgehend unbefriedigend⁷². Eine quantitative Untersuchung kommt nirgendwo vor.

⁷² Vgl. z.B. FiPS-Medienserver: „Rayleigh-Streuung“, online im Internet. http://fernstudium-physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?search=rayleigh (Stand 15.05.03).

5.5.3 Ziele

Erstes Ziel des erstellten MM ist zunächst die Einführung der beiden Begriffe Absorption und Streuung als Mechanismen zur Verringerung von Strahlungsintensität. Ein allgemeines Verständnis der Vorgänge sowie eine phänomenologische Vorstellung sollen gefördert werden.

In einem zweiten Schritt sollen mit Hilfe der quantitativen Untersuchungen, die den Vorgang beschreibenden Formeln hergeleitet werden. Schließlich soll die Verknüpfung beider Vorgänge erfolgen.

Was explizit nicht zu den Zielen dieses MM gehört, ist eine detaillierte Beschreibung auf atomarer Ebene sowie eine Untersuchung der zahlreichen Streumechanismen.

5.5.4 Begründung des gewählten Multimedien-Typs

Bei der Einführung neuer Begriffe ist es für den Lernenden oft einfacher sich mit realen Versuchsaufbauten zu beschäftigen als abstrakte Inhalte umzusetzen. Deshalb ist die Umsetzung innerhalb eines Realexperiments sinnvoll, was sich bei diesem Thema auch sehr schön realisieren lässt.

Zwar wird bei beiden Vorgängen jeweils nur ein Parameter variiert (Schichtdicke bei der Absorption bzw. Wellenlänge bei der Streuung), dennoch halte ich ein IBE nicht für geeignet, neue Inhalte darzustellen. Weiterhin sind IBE nicht in der Lage die beiden Phänomene miteinander zu verknüpfen. Weil darüber hinaus die Herleitung der Formeln aus dem Versuch heraus erfolgen soll, können die gesetzten Ziele nur mit einem Video erreicht werden.

5.5.5 Schwierigkeiten

Didaktisch:

Zunächst einmal wurden bei der Konzipierung des Videos einführende Lehrbücher, wie sie begleitend zur Experimentalphysik 2 Vorlesung verwendet werden, untersucht. Dabei stellte sich schnell heraus, dass die beiden betrachteten Vorgänge grundsätzlich getrennt voneinander behandelt werden. Deshalb musste zunächst einmal davon losgelöst eine eigene Zielvorstellung entwickelt werden.

Dabei wurde schnell ersichtlich, dass man nicht die ganzen Streumechanismen untersuchen oder auch nur vorstellen kann. Dabei ist es egal, ob man wirklich im Detail Mie-, Resonanz-, Ramann-, Rayleighstreuung etc. einführen möchte, oder sich mit allgemeinen Betrachtungen zu „kohärent / inkohärent“ bzw. „elastisch / unelastisch“ begnügt.

Aus diesen Gründen wurde auch auf die Einführung des Streuquerschnitts verzichtet, und nur die Abhängigkeit der Streuung von der Wellenlänge untersucht.

Auch auf eine Betrachtung im Rahmen der Quantenoptik wurde wegen des einführenden Charakters des MM verzichtet.

Was also bleibt ist die didaktische Reduktion auf zwei Phänomene, deren grundlegende Mechanismen beschrieben werden sollen.

Technisch:

Wie auch bei den anderen Versuchen zur Optik treten hier zwei generelle Probleme auf: Zum einen steht die Bestrebung, den optischen Effekt möglichst deutlich im abgedunkelten Labor zu erkennen dem Wunsch nach einem guten, ausgeleuchteten Videobild entgegen. Weiterhin machen sich Reflexionen an Geräten extrem störend bemerkbar, so dass bei den Aufnahmen zu diesem Video viel Zeit für die Optimierung der Lichtverhältnisse benötigt wurde.

Bei der Absorption musste zunächst einmal ein geeigneter Versuchsaufbau erdacht werden, da der nun verwandte Aufbau, in dem die Schichtdicke kontinuierlich vergrößert wird, nicht in der Literatur zu finden war. Die beschriebenen Varianten benutzen eine diskrete Zunahme der Schichtdicke durch Einbringen von Filtern, was den eigentlichen Vorgang nur unbefriedigend darstellt. Das so entstandene Setup hat sich als sehr stabil und praktikabel erwiesen und lieferte sehr gute, reproduzierbare Ergebnisse. Nur schwer lässt sich bei diesem Versuchsteil jedoch der (hier unerwünschte) Einfluss der Streuung abschätzen.

Bei der Streuung konnte auf ein Standardexperiment zurückgegriffen werden. Bei der Bestimmung der Abhängigkeit der Streuung von der Wellenlänge waren jedoch einige Randbedingungen mit einzuberechnen. So strahlt die benutzte Lampe nicht auf allen Frequenzen gleich stark, ebenso hat der Detektor eine frequenzabhängige Empfindlichkeit. Es mussten also durchgehend relative Intensitätsveränderungen bestimmt werden, was eine große Zahl von

reproduzierbaren Messungen mit klarer Flüssigkeit und mit der Mischung verlangt hat.

5.5.6 Beschreibung des Multimediums

Am Anfang des Videos steht eine Hinführung zum Begriff der Extinktionskonstante und deren Zusammensetzung aus Absorption und Streuung. Dazu wird zunächst der Einfluss einer klaren Scheibe, die in den Strahlengang zwischen Lichtquelle und Detektor gebracht wird, auf die Intensität untersucht. Der geringe Abfall entsteht dabei durch Reflexion an der Oberfläche und kann mit Hilfe der Brechzahl beschrieben werden.

Der als nächstes eingebrachte dunkle Filter senkt die Intensität deutlich ab. Alles was über Reflexionsverluste an der Oberfläche hinausgeht kann nicht mehr nur mit Hilfe der Brechzahl beschrieben werden, sondern erfordert die Einführung der Extinktion. Deshalb werden nun Absorption und Streuung, die beiden intensitätsmindernden Prozesse, zunächst getrennt voneinander untersucht.

Bevor jedoch der eigentliche Versuchsaufbau vorgestellt wird, wird schematisch der Vorgang der Umwandlung von sichtbarem Licht in andere Energieformen dargestellt. Dies dient zum besseren Verständnis der folgenden Sequenzen, die bereits die quantitative Auswertung vorbereiten.

Im Versuch wird der Strahl einer Halogenlampe mit einer Linse gebündelt und von einer Irisblende kollimiert (siehe Abb. 5.24). Der so entstandene, nur wenig divergente Strahl durchläuft ein Becherglas vertikal von oben nach unten, wo es durch den Glasboden wieder austritt. Dort wird die durch Luft und Glas transmittierte Lichtintensität mit Hilfe eines Photometers bestimmt. Um nun die Abhängigkeit der transmittierten Lichtintensität von der Absorberdicke untersuchen zu können, lassen wir eine Kaliumpermanganatlösung mit Hilfe eines einfachen Mechanismus kontinuierlich in das Becherglas laufen.



Abb. 5.24: Aufbau zur Untersuchung der Absorption

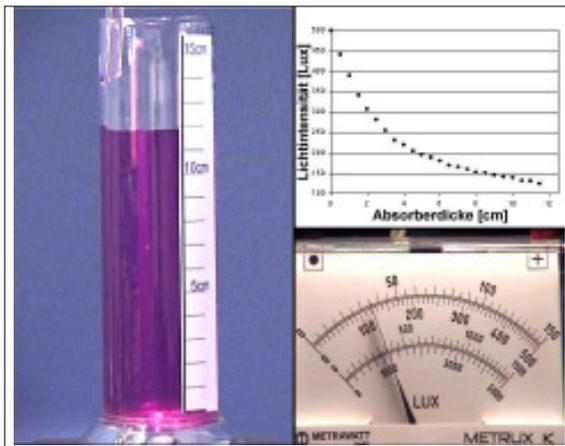


Abb. 5.25: Versuchsdurchführung „Absorption“

Während der Versuchsdurchführung sieht man das Becherglas, an dem man mit dem angebrachten Maßstab die aktuelle Absorberstrecke ablesen kann, die Anzeige des Photometers sowie ein Diagramm in der die Abhängigkeit beider Größen festgehalten wird (siehe Abb. 5.25). Es ist deutlich ein exponentieller Abfall der transmittierten Intensität zu

erkennen.

Die so gewonnenen Daten werden im Anschluss näher begutachtet. Dazu legen wir durch die Messpunkte eine Fitt-Kurve mit der Funktionsgleichung:

$$\Phi = 124,16 + 369,67 e^{-0,34x}$$

Damit wird der exponentielle Abfall der transmittierten Intensität in Abhängigkeit von der Absorberdicke beschrieben. Wir ermitteln einen Absorptionskoeffizienten α_a von 0,34 und können nun allgemein das Lambertsche Absorptionsgesetz formulieren:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha_a l}$$

Nach diesem Zwischenergebnis wenden wir uns nun der Streuung zu. Um analog zur Absorption zunächst die prinzipiellen Vorgänge der Streuung zu verdeutlichen, wird diese schematisch dargestellt.

Der nun folgende Aufbau wird nur kurz erläutert, da er im Prinzip mit dem des ersten Versuches übereinstimmt. Auch hier wird das Licht einer Lichtquelle gebündelt und von einem Photometer aufgefangen. Statt des leeren Becherglases wird jedoch hier ein wassergefülltes Glasgefäß durchlaufen (siehe Abb. 5.26).

Zur generellen Veranschaulichung der Streuung betrachten wir das Gefäß mit Wasser von der Seite im abgedunkelten Labor.

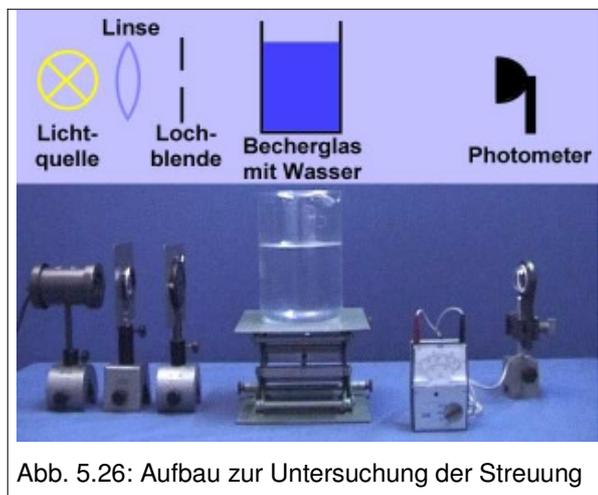


Abb. 5.26: Aufbau zur Untersuchung der Streuung

Obwohl das Lichtbündel die Flüssigkeit durchläuft ist es von der Seite aus nicht zu erkennen. Giessen wir jedoch etwas Milch hinzu, so dass ein Gemisch mit kleinsten Tröpfchen entsteht, so ist der Strahlengang deutlich durch das seitlich austretende Licht zu erkennen. Gleichzeitig sinkt die gemessene Lichtintensität deutlich ab (s. Abb. 5.27).

Als nächstes wird nun die Abhängigkeit der Streuung von der Wellenlänge untersucht. Dazu wird zunächst qualitativ zwischen rotem und blauem Licht verglichen (s. Abb. 5.28). Deutlich ist zu sehen, dass das blaue Licht stärker gestreut wird als das rote. Während beim blauen Licht nur knapp 10 Prozent der Ausgangsintensität zum Detektor gelangen, verringert sich beim roten die Intensität nur um knapp 30 Prozent.

Eine systematische Messreihe zeigt, dass die Streuung mit Zunahme der Wellenlänge abnimmt. Trägt man die Wellenlänge in vierter Potenz auf, so sieht man deutlich, dass die Streuung umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge, also proportional zur vierten Potenz der Frequenz ist:

$$\Phi_{\sigma} \sim \frac{1}{\lambda^4} = \omega^4$$

Dabei ist Φ_{σ} die aus der ursprünglichen Richtung weggestreute Intensität und λ bzw. ω die Wellenlänge, respektive Frequenz des eingestrahlten Lichtes.

Betrachtet man nun jeweils monofrequentes Licht, so lässt sich die Abschwächung der Intensität analog zur Absorption mit dem Lambertschen Gesetz der exponentiellen Intensitätsabnahme beschreiben:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha_s l}$$

mit α_s dem Streukoeffizienten, der das Produkt aus Streuquerschnitt σ und Anzahldichte der Teilchen n_0 ist.

Mit diesen beiden Ergebnissen kann nun im letzten Schritt als Ergebnis die Intensitätsabnahme in einem Medium beschrieben werden, das sowohl absorbiert

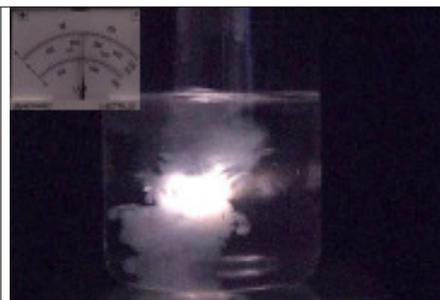


Abb. 5.27: Herstellen des Wasser-Milch-Gemisches

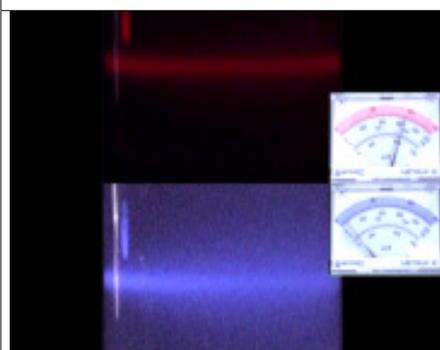


Abb. 5.28: Streuung bei unterschiedlichen Wellenlängen

als auch streut:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha l}, \text{ mit}$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s.$$

Damit ist der Schritt zurück zur Einleitung und zur Extinktionskonstante α vollzogen.

5.5.7 Einbettung in die Lehre

Im Rahmen der Betrachtungen zum Verhalten elektromagnetischer Wellen in Materie wird an der Hochschule zunächst der Brechungsindex eingeführt. Dies ist auch der Ansatzpunkt des Videos, das für einen Einsatz im unmittelbaren Anschluss an diesen Abschnitt konzipiert wurde.

Es dient dazu, Absorption und Streuung qualitativ vorzustellen und soll als Ergänzung zur theoretischen Einführung der Begriffe und der dazugehörigen mathematischen Beschreibungen verwandt werden⁷³.

Eine genauere Betrachtung der Phänomene kann daran anschließen. Dies sind dann mikroskopische Beschreibungen, eine Unterscheidung der verschiedenen Streuvorgänge, Beschreibung des Streufaktors etc.

Im Unterricht der Sekundarstufe II sollte das Video nur zur phänomenologischen Veranschaulichung verwandt werden. Eine Verwendung der gezeigten Formeln ist ebenfalls angebracht. Jedoch sollte im Allgemeinen auf Beschreibungen der Vorgänge, die über das Video hinaus gehen, verzichtet werden.

5.5.8 Fazit

Die Produktion dieses Films war stark von einer immer weiter gehenden Reduktion der Ziele gekennzeichnet. Die ursprünglichen Überlegungen gingen davon aus, nicht nur Absorption und Streuung, sondern darüber hinaus noch Brechung, Reflexion und Dispersion in einem Video umfassend einzuführen. Jedoch stellte sich schnell heraus, dass sich dies im Rahmen eines kompakten, modular einsetzbaren Videos nicht verwirklichen lies.

⁷³ Vgl. Jodl, H.J.: FiPS-Fernstudium, Experimentalphysik 2, Lehrbrief 8, Kaiserslautern 2003.

Deshalb war die zweite Überlegung die stark verwandten Phänomene, die im Video behandelt werden, ins Detail gehend zu besprechen. Jedoch zeigte sich auch hier schnell, dass dies ein weit über den eigentlichen Grundgedanken hinausgehendes Konzept ist. Es wurde die Entscheidung getroffen, Absorption und Streuung zunächst phänomenologisch an leicht verständlichen Aufbauten darzustellen, anschließend quantitativ zu erfassen und schließlich zusammenzuführen. Diese Zielsetzung entspricht dem zugrundeliegenden Konzept unserer Videoproduktion, das sich als durchaus bewährt bezeichnen lässt.

Die so gesteckte Zielsetzung kann als gut umgesetzt bezeichnet werden. Durch die Reduktion der Inhalte ist das Video in unterschiedlichsten Lehr- / Lernsituationen einsetzbar.

<u>Evaluation</u>		
Motivation:		
Benutzerfreundlichkeit	2	1,3
Attraktivität	1	
Klarheit in Zielsetzung und Arbeitsauftrag	1	
Inhalt:		
Relevanz	2	1,7
Reichweite	2	
Richtigkeit	1	
Methode:		
Flexibilität	2	2
Anpassung an Zielgruppe	1	
Umsetzung	2	
Dokumentation	3	

Tabelle 5.5: Evaluation des Videos „Absorption und Streuung“

Die (nur beschränkt aussagekräftige) Eigen-Evaluation mit Hilfe des erstellten Kriterienkataloges bescheinigt dem MM eine gute Qualität (siehe Tabelle 5.5). Als essentiell betrachte ich in dieser Bewertung die Klarheit in Zielsetzung und Arbeitsauftrag sowie die sehr gute Abstimmung auf die Zielgruppe

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Recherche in Literatur und Internet hat gezeigt, dass bis heute keine Definition des Begriffes „Multimedia“ existiert, die als Standard anerkannt ist. Während sich bestimmte Gemeinsamkeiten erkennen lassen, widersprechen sich bestehende Beschreibungen in anderen Punkten.

Deshalb wurde eine eigene Definition zur Benutzung in dieser Arbeit gegeben, die die in der Physiklehre verwendeten MM genügend eng erfasst.

Die verschiedenen Formen von Multimedien wie sie heute gebräuchlich sind wurden vorgestellt und ihre Möglichkeiten und Einsatzgebiete kurz angesprochen.

Die Akzeptanz von MM lässt sich heute als eher durchwachsen beschreiben. Während Lernende nach anfänglicher Skepsis schließlich die multimedialen Elemente annehmen, ist die Hemmschwelle bei Dozenten deutlich höher angesiedelt. Dies liegt an Problemen im Bereich der MM-Suche, der Bewertung und der bisher kaum vorgenommenen Verarbeitung in die Lehre.

Die Auswertung innerhalb des FiPS-Studienganges ergab, dass die „Mehrheit der Studenten (...) die Medien als hilfreich bzw. sehr hilfreich für ihr Physik Lernen und Verstehen“⁷⁴ angesehen haben.

Die Suche nach bestehenden Multimedien für die Physiklehre im Allgemeinen und der Optik im besonderen hat ein ernüchterndes Bild geliefert. Zwar lässt sich eine große Zahl von Medien finden, jedoch sind (zumindest über die Masse betrachtet) Qualität und inhaltliche Reichweite eher schlecht. Medienserver und Linksammlungen verfügen über unzureichende Wartung und Katalogisierung. Zwar gibt es eine große Anzahl von individuellen Kriterienkatalogen zur Evaluation von MM. Diese sind jedoch fast alle nach einem „klassischen“ Schema geordnet, wie es in der Didaktik gebräuchlich ist. Die übergeordneten Kriterien sind Inhalt, Didaktik, Methodik und Technik. Diese Kataloge verfügen neben ihren speziellen Stärken und Schwächen über eine Vielzahl von Problemen die aus dieser Struktur heraus entstehen.

⁷⁴ Roth, D.: : Entwicklung, Einsatz und Organisation multimedialer Elemente im Physik-Fernstudium, S. 39.

Die in dieser Arbeit vorgestellte neue Liste von Kriterien verfolgt einen pragmatischen Ansatz und soll die Grundlage für eine zukünftige (und bereits angelaufene) Diskussion bieten. Ziel soll es sein, einen anerkannten Standard für die Bewertung von MM zu finden.

Die Entwicklung von MM erfordert in der Umsetzung ein hohes Maß an technischen Fertigkeiten im Umgang mit Hard- und Software. Es ist offensichtlich, dass mehr Nachbearbeitung nicht zwangsläufig zu einem besseren MM führt. Doch die kontinuierliche Verbesserung der Kenntnisse in der Anwendung ermöglichen eine gezielte und effiziente Einbindung, die die Effektivität der MM anhebt.

Die produzierten und hier vorgestellten MM besitzen (basierend auf einer Bewertung mit Hilfe des vorgestellten neuen Kriterienkataloges, sowie in Rücksprachen mit Dozenten) eine durchweg gute Qualität. Eine Vielzahl von Lücken innerhalb der Lehrbriefe konnte mit ihnen ausgefüllt werden, so dass mittlerweile eine durchgehende Einbindung von MM in die Präsenzvorlesungen und in das Fernstudium möglich ist. Im derzeit neunten FiPS-Semester (SS 2003) ist jedoch erst diese Mindestforderung erfüllt. Zum einen gibt es noch viele Gebiete die nur sehr oberflächlich durch MM ergänzt werden (Elektrodynamik, Thermodynamik), zum anderen ist die didaktische und technische Qualität vieler vorhandener Medien nur mittelmäßig. Die Möglichkeiten der Neuen Medien werden erst im Ansatz genutzt.

Bisher wurden von Andreas Wagner und mir über 30 MM hergestellt, bei denen sich ein deutlicher Trend zur immer besseren Nutzung der Technik und verfeinerten didaktischen Methoden abzeichnet. Obwohl der erreichte Standard bereits als gut bezeichnet werden kann, sehe ich noch Potential, was sowohl die Umsetzung als auch die Auswahl neuer Themen betrifft.

Im Bereich der Filme, die ja den Kern dieser Arbeit bilden, wäre es interessant, sich nun ein wenig von den zentralen Lehrthemen hin zu Randgebieten der Lehre zu bewegen. In der Optik könnten dies z.B. die adaptive Optik oder die Holographie sein. Auch ein Blick von der reinen Physik zu interdisziplinären Themen ist interessant.

Ein weiteres neues Gebiet im Rahmen der Medien zu Realexperimenten bieten die ‚Remote Controlled Laboratories‘, deren Entwicklung sich noch im Anfangszustand befindet.

Ein genereller Blick in die Zukunft zeigt enorme neue Möglichkeiten. In absehbarer Zeit wird jeder Haushalt Zugang zum Internet haben. Die Bandbreite der Zugänge wird stark anwachsen und damit ist die Möglichkeit für die Entwicklung und Nutzung datenintensiverer Lernumgebungen gegeben.

Die kontinuierliche Weiterbildung über ein ganzes Arbeitsleben hinweg wird an Bedeutung noch weiter zunehmen und die Fernlehre mit der Unterstützung von MM damit weiter an Bedeutung gewinnen.

Quellenverzeichnis:

Literatur:

Alonso, M./ Finn, E.J.: Physics. Harlow: Addison-Wesley, 1992.

Boles, D.: Multimedia-Systeme – Begleitbuch zur Vorlesung. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fachbereich Informatik, Abteilung Informationssysteme. Oldenburg, 1998.

Born, M./ Wolf, M.: Principles of Optics. 4. Auflage, Oxford: Pergamon Press, 1970.

Brockhausenzyklopädie. 20. Auflage, Mannheim: F.A. Brockhaus GmbH, 1996-1999.

Dancy, M./ Christian, W./ Belloni, M.: Teaching with Physlets: Examples from Optics. In: The Physics Teacher, Volume 40, 2002.

Demtröder, W.: Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik. 2. Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 1999.

Feynman, R.P./ Leighton, R.B./ Sands, M.: Feynman Vorlesungen über Physik – Band II: Elektromagnetismus und Struktur der Materie. München: Oldenbourg-Verlag, 1987.

Gatland, I.R.: Thin lens ray tracing. In: American Journal of Physics 70 (12), 2002.

Groß, C.: Interaktives Lernen basierend auf Java-Applets, Wissenschaftliche Prüfungsarbeit für das Lehramt an Gymnasien. Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik, 1999.

Hecht, C.: Optik. 3. Auflage, München: Oldenbourg-Verlag, 2001.

Jenkins, F.A./ White, H.E.: Fundamentals of Optics. 4. Auflage, New York: McGraw-Hill Book Company, 1976.

Jodl, H.J.: FiPS Lehrbriefe zur Experimentalphysik . Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik, 2003.

Jodl, H.J./ Stoll, C.: Demonstrationsexperimente zur elektrischen Leitfähigkeit und zum Halleffekt. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Ausgabe 6, 1975.

Joos, G.: Lehrbuch der Theoretischen Physik. 15. Auflage, Wiesbaden: Aula-Verlag, 1989.

Klein, M.V.: Optics. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1970.

Kuhn, W. (Hrsg.): Handbuch der Experimentellen Physik, Sekundarbereich II, Band 3: Festkörperphysik. Köln: Aulis-Verlag, 2000.

Lehrplan für Physik, Sekundarstufe II, MSS. Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung, Mainz: 2001.

Lernen mit neuen Medien. Landesinstitut für Schule und Weiterbildung NRW, Soest 4 (1999).

Müller, J.: Konzept zur Beurteilung von Software unter besonderer Berücksichtigung des Sachunterrichts. In: Medienpädagogik – Online-Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung. 15.04.2002.

Niedrig, HG. (Hrsg.): Bergmann – Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3: Optik. 9. Auflage, Berlin: Walter de Gruyter, 1993.

Orear, J.: Physik. München: Carl Hanser Verlag, 1982.

Pérez, J.-P.: Optik. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 1996.

Roth, D.: Entwicklung, Einsatz und Organisation multimedialer Elemente im Physik-Fernstudium. Dissertation, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik, 2002.

Roth, M.: Aufbereitung von Videos für den multimedialen Einsatz und Aspekte multimedialer Lehr-/ Lernumgebungen. Wissenschaftliche Prüfungsarbeit für das Lehramt an Gymnasien, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik, 1999.

Rückner, W.: How to beat the Rayleigh resolution limit: A lecture demonstration. In: American Journal of Physics, 70(6), 2002.

Schweikert, F.: Organisation und Kommunikation im Fernstudium Physik. Dissertation, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik, 2002.

Tipler, P.A.: Physik. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1994.

Vogel, H./ Gerthsen, C.: Physik. 17. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 1993.

Weber, P.: Produktion und Einsatz von Videofilmen in der Physikausbildung. Wissenschaftliche Prüfungsarbeit für das Lehramt an Gymnasien, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik, 1999.

Wolf, M.: Erstellung eines Kriterienkataloges zur Beurteilung von Multimedia. Seminararbeit in Fachdidaktik, Universität Kaiserslautern, 2003.

Internet:

Boston University. Polarization by Reflection.

http://physics.bu.edu/~duffy/semester2/c27_brewster.html

Deutsches Museum München: remote_lab: Ein ferngesteuertes Labor im Internet.

<http://www.remote-lab.de>

FiPS – Früheinstieg ins Physikstudium. Universität Kaiserslautern.

<http://www.fernstudium-physik.de>

FiPS-Medienserver, Universität Kaiserslautern.

<http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/>

FiPS-Medienserver, Universität Kaiserslautern. Ausbreitung, Energietransport und Polarisation elektromagnetischer Wellen.

[http://fernstudium-](http://fernstudium-physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?subsubject=Das+Magnetfeld&type=Applet)

[physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?subsubject=Das+Magnetfeld&type=Applet](http://fernstudium-physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?subsubject=Das+Magnetfeld&type=Applet)

FiPS-Medienserver, Universität Kaiserslautern. Doppelbrechender Kristall.

[http://fernstudium-](http://fernstudium-physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?search=kristall)

[physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?search=kristall](http://fernstudium-physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?search=kristall)

FiPS-Medienserver, Universität Kaiserslautern. Gedämpfte Schwingung eines RLC-Gliedes.

[http://fernstudium-](http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter06/free/lc_gedaempft.html)

[physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter06/free/lc_gedaempft.html](http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter06/free/lc_gedaempft.html)

FiPS-Medienserver, Universität Kaiserslautern. Rayleigh-Streuung.

[http://fernstudium-](http://fernstudium-physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?search=rayleigh)

[physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?search=rayleigh](http://fernstudium-physik.de/medienserver/html/cgi/omsquery_cgi.exe?search=rayleigh)

Hyperphysics. Georgia State University. Calcite.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/biref3.html>

Kirstein, J.: Technische Universität Berlin, Didaktik der Physik.

<http://www.ifpl.tu-berlin.de/ibe/index.html>

Krahmer, P.: Teachers' Page Physics – Multimedia Physik.

<http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/~pkrahmer/>

Learning Lab Lower Saxony: Übersicht über Fernlabore.

http://www.learninglab.de/i_labs/docs/Uebers_Fernlabore/uebersicht_fernlabore.html

Leonardo: Interactive Virtual Science Museum

<http://www.ba.infn.it/~zito/museo/leonardo1en.html>

Leybold Didactic GmbH, Remote-Lab. URL: <http://remote-lab.leybold-didactic.de>

Lichtensteiner, H.: Lernprogramme – Was taugen sie? tipp&klick.

<http://home.findall.de/tk/LP-05krit.htm>

Macromedia Inc., Shockwave-Viewer.
<http://www.macromedia.com>

MERLOT - The Multimedia Educational Resource for Learning and Online Teaching.
<http://www.merlot.org>

Mount Holyoke College. Michelson-Interferometer.
<http://www.mtholyoke.edu/~mpeterso/classes/phys301/michelson.html>

Multimedialer Lehr- und Lernserver Essen (MILESS).
http://miless.uni-essen.de/servlets/SearchServlet?H_toPage=S_FB_7

Physik Online, Universität Würzburg.
<http://www.physik.uni-wuerzburg.de/physikonline/index.html>

Physikalische LinkListenDatenbank (LiLi), Universität Oldenburg.
<http://www.physik-multimedial.de/lili/golili/lili.php>

Physlets Resource Page. Davidson College, Departement of Physics.
<http://webphysics.davidson.edu/applets/applets.html>

Physlets Resource Page. Davidson College, Departement of Physics. Rayleigh Criterion.
<http://webphysics.davidson.edu/mjb/SESAPS2000/rayleigh3.html>

Physlets Resource Page. Davidson College, Departement of Physics. Raleigh Criterion: Effect of the Size of the Aperture.
<http://webphysics.ph.msstate.edu/jc/library/24-7a/>

Physlets, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik.
<http://pen.physik.uni-kl.de/physlets/index.html>

Pixel Profile.
<http://homepages.borland.com/efg2lab/ImageProcessing/PixelProfile.htm>

Powers of Ten.
<http://www.powersof10.com>

Remote Controlled Laboratory – Diffraction of Electrons.
<http://131.246.237.97/rlab/web/>

Ruder, H.: Animationen zu Reisen bei Lichtgeschwindigkeit.
<http://pen.physik.uni-kl.de/information/downloads/Tempolimit/ind1.html>

Tabellenverzeichnis:

Kapitel 2:

Tab. 2.1: Multimediatypen, S. 5

Kapitel 4:

Tab. 4.1: Kriterien zur Evaluation - Übersicht, S. 23

Tab. 4.2: Kriterien zur Evaluation - Leitfragen, S. 23

Kapitel 5:

Tab. 5.1: Evaluation zum Video „Doppelbrechung und Polarisation am Kalkspatkristall“, S. 44

Tab. 5.2: Evaluation der MM-Einheit „Michelson-Interferometer“ bestehend aus zwei IBE und einem Video, S. 53

Tab. 5.3: Evaluation zum Video „Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen zu Interferenzstrukturen“, S. 60

Tab. 5.4: Evaluation zum Video „Rayleigh-Kriterium – Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente“, S. 68

Tab. 5.5: Evaluation zum Video „Absorption und Streuung“, S. 77

Abbildungsverzeichnis:

Alle Bilder dieser Arbeit wurden selbst erstellt. Wurde ein Bild einem Lehrbuch nachempfunden so ist dies im Text gekennzeichnet.

Kapitel 2:

Abb. 2.1: Fahrt durch das Brandenburger Tor bei 95% der Lichtgeschwindigkeit, S. 5

Abb. 2.2: IBE der zweiten Generation – Gedämpfte Schwingung eines RLC-Gliedes, S.6

Abb. 2.3: Remote-Lab - Wärmebildkamera, S.7

Kapitel 4:

Abb. 4.1: Ausschnitt aus dem Storyboard zum Video „Rayleigh-Kriterium – Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente“, S.28

Abb. 4.2: Hintergrund zum Filmen von Experimenten, S. 29

Abb. 4.3: Dielektrikum im Kondensator, S. 31

Abb. 4.4: Doppelbrechung und Polarisation im Kalkspatkristall, S. 32

Abb. 4.5: Rayleigh-Kriterium – Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente, S. 32

Abb. 4.6: Ionenwanderung, S. 33

Abb. 4.7: Laminare Strömung, S. 33

Abb. 4.8: Rayleigh-Kriterium – Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente, S. 34

Abb. 4.9: Absorption und Streuung, S. 35

Kapitel 5:

Abb. 5.1: Snelliussches Brechungsgesetz, S. 38

Abb. 5.2: Kristallstruktur beim Kalkspat, S. 38

Abb. 5.3: Anwendung des Huygensschen Prinzips bei der Doppelbrechung in anisotropen Kristallen, S. 39

Abb. 5.4: Einführungssequenz zur Doppelbrechung, S. 42

Abb. 5.5: Polarisation der austretenden Lichtbündel, S. 42

Abb. 5.6: Begriffe am Kalkspatkristall, S. 43

Abb. 5.7: Prinzip des Michelson-Interferometers, S. 45

Abb. 5.8: IBE: Michelson-Interferometer – Der Aufbau, S. 50

Abb. 5.9: IBE: Michelson-Interferometer – Bestimmen einer Wellenlänge, S. 50

Abb. 5.10: Zentraler Bereich des Versuchsaufbaus, S. 51

Abb. 5.11: Versuchsdurchführung, S. 51

Abb. 5.12: Erzeugung kohärenter Wellen durch Phasenkopplung, S. 54

Abb. 5.13: Kohärente Wellen durch Aufspaltung in Teilstrahlen, S. 55

Abb. 5.14: Übersicht zum Ablauf des Videos, S. 57

Abb. 5.15: Strahlengang beim Fresnel-Spiegel, S. 58

Abb. 5.16: Interferenz bei Mikrowellen, S. 58

Abb. 5.17: Rayleigh-Kriterium für die Auflösung zweier Punkte, S.61

Abb. 5.18: Realisierung der Lichtquellen, S. 65

Abb. 5.19: Versuchsdurchführung, S. 65

Abb. 5.20: Anpassen der Theoriekurven, S. 66

Abb. 5.21: Vergleich der Messwerte mit der Theorie, S. 66

Abb. 5.22: Absorption, S. 69

Abb. 5.23: Streuung, S. 70

Abb. 5.24: Aufbau zur Untersuchung der Absorption, S. 73

Abb. 5.25: Versuchsdurchführung „Absorption“, S. 74

Abb. 5.26: Aufbau zur Untersuchung der Streuung, S. 74

Abb. 5.27: Herstellen des Wasser-Milch-Gemisches, S. 75

Abb. 5.28: Streuung bei unterschiedlichen Wellenlängen, S. 75

Veröffentlichungen:

Artikel

A. Wagner, S. Altherr, B. Eckert, H.J. Jodl: *Multimedia in Physics Education - a video for the quantitative analysis of the Reynolds number*. In: European Journal of Physics 2003 (24), S. 297-300.

S. Altherr, A. Wagner, B. Eckert, H.J. Jodl: *Multimedien in der Physik - Datenbanken und Evaluationskriterien*. In: Praxis der Naturwissenschaften Physik 2003 (3), S. 34-37.

S. Altherr, A. Wagner, B. Eckert, H.J. Jodl: *Kriterienkatalog zur Evaluation von Multimedien*. Zur Veröffentlichung angenommen in: Mathematisch-Naturwissenschaftlicher Unterricht.

A. Wagner, S. Altherr, B. Eckert, H.J. Jodl: *Multimedien in der Physikausbildung - Ein Messvideo zum Farbfadenversuch nach Reynolds*. Zur Veröffentlichung angenommen in: Praxis der Naturwissenschaften Physik.

S. Altherr, A. Wagner, B. Eckert, H.J. Jodl: *Multimedia in Physics Education - a video for Teaching on „Birefringence and Polarization in Calcit“*. Zur Veröffentlichung angenommen in: Physics Education.

A. Wagner, S. Altherr, B. Eckert, H.J. Jodl: *Multimedien in der Physikausbildung - Zwei Lehrvideos zum „Absorptions- und Emissionsspektrum von Natrium“*. Zur Veröffentlichung eingereicht in: Praxis der Naturwissenschaften Physik.

S. Altherr, A. Wagner, B. Eckert, H.J. Jodl: *Multimedien in der Physikausbildung - Ein Lehrvideo zur „Doppelbrechung und Polarisierung im Kalkspatkristall“*. Zur Veröffentlichung eingereicht in: Praxis der Naturwissenschaften Physik.

A. Wagner, S. Altherr, B. Eckert, H.J. Jodl: *Entwicklung von Demonstrations- und Messvideos für die Physikausbildung*. Zur Veröffentlichung eingereicht in: Physik Journal.

S. Altherr, A. Wagner, B. Eckert, H.J. Jodl: *Collecting and Evaluating Multimedia Material for Teaching Physics*. Zur Veröffentlichung eingereicht in: European Journal of Physics.

Beiträge zu Konferenzbänden

A. Wagner, S. Altherr, B. Eckert, H.J. Jodl: *Messvideos in der Physikausbildung*. Erscheint in: Tagungs-CD zur Frühjahrstagung der Abteilung „Didaktik der Physik“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2003 in Augsburg.

S. Altherr, A. Wagner, B. Eckert, H.J. Jodl: *Möglichkeiten der Nachbearbeitung von Videos für die Physiklehre*. Erscheint in: Tagungs-CD zur Frühjahrstagung der Abteilung „Didaktik der Physik“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2003 in Augsburg.

Vorträge

Frühjahrstagung der Abteilung „Didaktik der Physik“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, *Messvideos in der Physikausbildung*. Augsburg, 21.03.2003.

Frühjahrstagung der Abteilung „Didaktik der Physik“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, *Möglichkeiten der Nachbearbeitung von Videos für die Physiklehre*. Augsburg, 21.03.2003.

8th Workshop on Multimedia in Physics Teaching and Learning of the European Physical Society, *Developing Videos for an Introductory Course on Physics - Examples and Experiences for Motivation, Demonstration and Exercises*. Angemeldet für Prag, 14.-16.09.2003.

Anhang A

Auflistung der im Rahmen der Internetrecherche untersuchten Seiten. Die Seiten sind alphabetisch nach ihrem Titel geordnet. In A1 werden reine Verzeichnisse, die Links zu weiteren Seiten zusammenfassen, aufgelistet. A2 beinhaltet Seiten mit eigenen Multimedien. In A3 befindet sich eine Liste weiterer, im Laufe der Recherche besuchten Seiten, die nicht in A1 oder A2 aufgeführt sind. A4 schließlich liefert eine umfassende Auflistung einzelner, thematisch geordneter Medien zur Optik.

Alle Seiten in A1 und A2 sind mit kurzen Bemerkungen zu Umfang, Qualität und generellem Eindruck versehen. Bei Seiten, die sowohl Linkverzeichnisse als auch eigene Multimedien enthalten, wird auf die erste Erwähnung der Seite verwiesen.

Alle angegebenen Links sind auf dem Stand von Mai 2003.

A1: Linkverzeichnisse

- 01) **BUBL Information Service – University of Strathclyde**
(<http://bubl.ac.uk/>)
Großes, thematisch geordnetes Archiv mit mehr als 12000 Verweisen;
gute Suchfunktion
- 02) **Deutscher Bildungsserver**
(<http://www.bildungsserver.de/db/fachlist.html?fach=3473>)
Große Linkdatenbank, weitgehend auf Schulniveau
- 03) **Düsseldorfer virtuelle Bibliothek**
(<http://www.rz.uni-duesseldorf.de/WWW/ulb/virtbibl.html>)
Gut sortierte Datenbank zu allen Themengebieten
- 04) **Hilscher Linkdatenbank – Universität Augsburg**
(<http://www-2.physik.uni-augsburg.de/didp/index.php>)
Relativ kleine Datenbank; gute Sortiermöglichkeiten; umständliches
Begutachten der Suchergebnisse erforderlich
- 05) **Leonardo: Interactive Virtual Science Museum**
(<http://www.ba.infn.it/~zito/museo/leonardo1en.html>)
Siehe 3.2
- 06) **Lili Linklistendatenbank - Horst Schecker**
(<http://www.physik-multimedial.de/lili/golili/lili.php>)
Siehe 3.2

- 07) **Links zu Lehr- und Lernmaterialien – Universität Kaiserslautern**
(<http://kbibmp5.ub.uni-kl.de/Linksammlung/>)
Großes Archiv mit sehr guter Suchfunktion
- 08) **Merlot – California State University**
(<http://www.merlot.org/Home.po>)
Siehe 3.2
- 09) **MILESS – Physikdidaktik Erlangen**
(http://miless.uni-essen.de/servlets/SearchServlet?H_toPage=S_FB_7)
Siehe 3.2
- 10) **Multimediale elektronische Bibliothek – Universität Augsburg**
(<http://www.fh-augsburg.de/informatik/projekte/mebib/index.html>)
Ausführliches, gut sortiertes Linkarchiv
- 11) **Multimedia Physik**
(<http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/~pkrahmer/home/homep.html>)
Siehe 3.2
- 12) **Physics Education Network – Universität Kaiserslautern**
(<http://pen.physik.uni-kl.de/index.html?/information/Unterrichtsmaterial.html>)
Ausführliche Linkliste und Informationen zu verschiedensten Ressourcen
- 13) **Physik im Unterricht – Günther Rasch – Ernst-Mach-Gymnasium Haar**
(<http://www.physik-im-unterricht.de/>)
Kommentiertes Linkverzeichnis für Lehrkräfte
- 14) **Physik Online – Universität Würzburg**
(<http://www.physik.uni-wuerzburg.de/video/>)
Siehe 3.2
- 15) **Physnet – Universität Oldenburg**
(<http://physnet.uni-oldenburg.de/PhysNet/>)
Großes, weitverzweigtes Archiv zu allen physikalischen Bereichen

A2: Seiten mit multimedialen Inhalten

- 16) **7Stones - Geoffrey Dixon**
(<http://www.7stones.com/index.html>)
Professionelle Applets mit spezieller Betonung des mathematischen Aspektes
- 17) **Alpha Centauri – Harald Lesch – Bayerischer Rundfunk**
(<http://www.br-online.de/alpha/centauri/>)
Große Sammlung ausführlicher Videos, größtenteils populärwissenschaftlich
- 18) **An Introduction to Newtonian Mechanics**
(http://physicsstudio.indstate.edu/java/newtmech/m_cont_h.html)
Interaktiver Kurs zu Newtons Mechanik, begleitet von guten Applets
- 19) **Deutsches Museum – Multimedia**
(http://www.deutsches-museum.de/mum/e_index.htm)
Sammlung einfachster IBE, Videos und Audiodateien mit geringem Anspruch und in Bezug zur Ausstellung im Museum
- 20) **Educational Physics Resources – Uni Oldenburg**
(<http://ins.uni-oldenburg.de/PhysNet/education.html>)
Nach Themen sortierte Applets aus unterschiedlichsten Quellen.
- 21) **Femto Welt – Universität Würzburg**
(<http://www.physik.uni-wuerzburg.de/femto-welt/>)
Sehr gute Lernumgebung zu leider nur drei Themen (Molekülschwingungen, Laserpulse und Chemische Reaktionen)
- 22) **FiPS-Medienserver – Hans J. Jodl – Universität Kaiserslautern**
(<http://fips-server.physik.uni-kl.de/medienserver/html/index.html>)
Siehe 3.2
- 23) **Fun@learning.physics – Mark Sutherland – University of Toronto**
(<http://www3.adnc.com/~topquark/fun/fun.html>)
Kleine Sammlung sehr gut umgesetzter Applets
- 24) **General Physics Java Applets - B. Surendranath Reddy**
(<http://www.schulphysik.de/suren/Applets.html>)
Kleine Sammlung sehr schön umgesetzter Applets aus allen Bereichen der Physik

- 25) **Interactive Physics and Math with Java – Sergey Kiselev, Tanya Yanovsky- Kiselev - Private Seite**
(<http://www.lightlink.com/sergey/java/index.html>)
Kleine Sammlung eigener Java-Applets
- 26) **Java-Applets zur Physik – Walter Fendt**
(<http://home.a-city.de/walter.fendt/phd/phd.htm>)
Private Sammlung sehr anschaulicher Applets, sehr einfache Darstellung
- 27) **NTNU Virtual Physics Laboratory**
(<http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/index.html>)
Kleine Appletsammlung guter Qualität quer durch alle Gebiete der Physik
- 28) **Multimedia Projekt der Universität Bielefeld**
(<http://www.physik.uni-bielefeld.de/~projekt/start/index.html>)
Kleine Sammlung sehr guter Applets in Lernumgebung eingebettet
- 29) **Physics Applets – Greg Bathun – University of Oregon**
(<http://jersey.uoregon.edu/vlab/>)
Sammlung anspruchsvoller Applets
- 30) **Physik Online – Universität Würzburg**
(<http://www.physik.uni-wuerzburg.de/video/>)
Siehe 3.2
- 31) **Physikdidaktik Erlangen – Java Applets**
(<http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/download/java.htm>)
Kleine Sammlung anschaulicher Java-Applets
- 32) **Physlets Resource Page – Davidson College bzw. Universität Kaiserslautern**
(<http://webphysics.davidson.edu/applets/applets.html>) bzw.
(<http://pen.physik.uni-kl.de/physlets/index.html>)
Siehe 3.2
- 33) **Teaching - Habib Hamam – University of Montréal**
(<http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/teach.htm>)
Appletsammlung rund um Optik und Elektrizität
- 34) **Quantum Physics Online**
(<http://www.quantum-physics.polytechnique.fr/>)
Sehr guter und anspruchsvoller Kurs zur Quantenphysik

A3: Sonstige Seiten

- 35) **Bang! Boing! Pop!**
(<http://library.thinkquest.org/3042/>)
- 36) **Chemical Vapor Science**
(<http://chiuserv.ac.nctu.edu.tw/~htchiu/cvd/home.html>)
- 37) **Electrostatic Potential Applet**
(<http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap18/eField.htm>)
- 38) **Explore Science**
(<http://128.104.221.84/javamirror/ExplrSci/dswmedia/index.htm>)
- 39) **Interaktive Java-Animationen zur Physik**
(<http://home.s-planet.de/kwode/>)
- 40) **Virtual Laboratory**
(<http://jersey.uoregon.edu/vlab/>)
- 41) **Visual Physics**
(<http://library.thinkquest.org/10170/>)
- 42) **Physlabs at Boston University**
(<http://physics.bu.edu/~demos/Physlab2/>)
- 43) **Eric Weisstein`s World of Physics**
(<http://scienceworld.wolfram.com/physics/>)
- 44) **University of the West Indies**
(<http://scitec.uwichill.edu.bb/cmp/online/online.htm>)
- 45) **High School Teachers at CERN**
(<http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2000/teaching/expt/expt.htm>)
- 46) **Institut für technische Chemie – Universität Leipzig**
(<http://techni.tachemie.uni-leipzig.de/>)
- 47) **Fachbereich Physik am Gymnasium Korschenbroich**
(<http://users.aol.com/gykophys/>)
- 48) **Physics 2000**
(<http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl>)
- 49) **Audite - Ein Multimedialprogramm zum Thema Gehör und Hören**
(<http://www.dasp.uni-wuppertal.de/>)
- 50) **Educational Object Economy**
(<http://www.eoe.org/FMPro?-db=Categories.fp3&-token=library&-format=/library/JavaApplets.htm&class=Branch&-find>)
- 51) **Physik und Astronomie Applets**
(<http://www.geoastro.de/>)

- 52) **Visual Quantum Mechanics**
(<http://www.phys.ksu.edu/perg/vqm/>)
- 53) **Simulation physikalischer Experimente mit Java Applets**
(<http://www.physik.rwth-aachen.de/group/IIIphys/L3/homepage/Simulation/Java/Java.html>)
- 54) **Physics for Kids**
(<http://www.physikforkids.de/>)
- 55) **Nichtlineare Dynamik - Chaostheorie**
(<http://www.robert-doerner.de/>)
- 56) **Thomas Seilnachts virtuelles Chemielabor**
(<http://www.seilnacht.tuttlingen.com/Chemie.htm>)
- 57) **Simulationssoftware zur Quantenmechanik**
(<http://www.wuenstel.de/qm.html>)

A4: Medien zur Optik

Elektromagnetische Wellen im Vakuum

- 58) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/applist/CYMCOLOR/c.htm>
- 59) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/applist/RGBColor/c.htm>
- 60) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/applist/Spectrum/s.htm>
- 61) http://www.explorescience.com/activities/Activity_page.cfm?ActivityID=36
- 62) http://www.explorescience.com/activities/Activity_page.cfm?ActivityID=37
- 63) <http://ir.chem.cmu.edu/irproject/applets/color/Applet.asp>
- 64) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/image/rgbColor.html>
- 65) http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/color/color_e.html
- 66) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/light/additive.html>
- 67) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/light/subtractive.html>
- 68) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/colorstructure/index.html>
- 69) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/colorseparation/index.html>
- 70) http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter07/free/ausbreitung_elektromagnetischer_wellen.html
- 71) http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter07/free/energietransport_elektromagnetischer_wellen.html
- 72) http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/free/foucault_dr.rm

Elektromagnetische Wellen in Materie

- 73) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap25/Snell/app.htm>
- 74) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap13/cd372.htm>
- 75) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap24/polarizers/Polarizer.htm>
- 76) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/Rainbow/rainbow.html>
- 77) http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/restricted/brechung_in_der_atmosphaere.rm
- 78) <http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/restricted/brechungsindex.rm>
- 79) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/free/Absorption-Emission.rm>
- 80) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/Mediafiles/Applets/ourfun/Brechung/lightrefract.htm>

- 81) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter08/restricted/brechung_und_totalreflexion.ram
- 82) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter09/restricted/doppelbrechender_kristall.html
- 83) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter08/free/doppelbrechung.ram>
- 84) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter08/free/durchgang_einer_ebenen_welle_durch_ein_medium.html
- 85) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/Mediafiles/Applets/xchaos5/Krug/WorkInProgress/WorkInProgress.html>
- 86) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter07/free/mikrowellenbrechung.html>
- 87) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter07/free/mikrowellenreflexion.html>
- 88) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter07/free/mikrowellenreflexion.html>
- 89) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter09/free/snelliussches_brechungsgesetz.html
- 90) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter09/restricted/totalreflexion.html>
- 91) <http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter07/free/mikrowellenpolarisation.html>
- 92) http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter07/free/polarisation_elektromagnetischer_wellen.html
- 93) <http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter07/restricted/polarisationsfilter.html>
- 94) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/Mediafiles/Applets/ourfun/Bragg/Bragg.html>
- 95) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter11/free/dielektrischer_spiegel.html
- 96) <http://physics.rug.ac.be/fysica/applets/snellius/index.htm>
- 97) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.crs4.it/~mameli/JAVA/Ottica/OtticaGEOE.html>
- 98) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.msu.edu/user/brechtjo/physics/interfaceOptics/interfaceOptics.html>
- 99) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.crs4.it/~mameli/JAVA/Ottica/LentiE.html>
- 100) http://www.physics.yorku.ca/undergrad_programme/highsch/Prism.html
- 101) http://www.explorescience.com/activities/Activity_page.cfm?ActivityID=51
- 102) <http://www.msu.edu/user/brechtjo/physics/interfaceOptics/interfaceOptics.html>
- 103) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/newton/>
- 104) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/reflection/index.html>
- 105) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/refraction/index.html>
- 106) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/birefringence/index.html>
- 107) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/virtual/polarizing/index.html>
- 108) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/polarizedlight/filters/index.html>
- 109) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/polarizedlight/crystal/index.html>
- 110) [http://www2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/opt/home.rxml](http://www2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/opt/home.rxml)

- 111) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.micro.magnet.fsu.edu/primer/java/polarizedlight/icelandspar/index.html>
- 112) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.kw.igs.net/~jackord/mo/w4.html>
- 113) <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/physikonline/video1/optik/o1versuch1.htm>
- 114) <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/physikonline/video1/optik/o1versuch9.htm>
- 115) <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/physikonline/video1/optik/o1versuch9.htm>

Geometrische Optik

- 116) http://www.explorescience.com/activities/Activity_page.cfm?ActivityID=52
- 117) http://www.explorescience.com/activities/Activity_page.cfm?ActivityID=53
- 118) <http://www.explorescience.com/prism.htm>
- 119) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/applist/optics/o.htm>
- 120) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/applist/shadow/sh.htm>
- 121) http://webphysics.davidson.edu/Applets/optics4/spherical_ aberration.html
- 122) http://webphysics.davidson.edu/Applets/optics4/thick_lens.html
- 123) http://webphysics.davidson.edu/Applets/optics4/dielectric_lens.html
- 124) http://webphysics.davidson.edu/Applets/optics4/data_sources.html
- 125) <http://surendranath.tripod.com/CurvSurf/CurvSurf.html>
- 126) <http://surendranath.tripod.com/Prism/Prism.html>
- 127) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/light/flashLight.html>
- 128) http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/Lens/lens_e.html
- 129) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/thinLens/thinLens.html>
- 130) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/thickLens/thickLens.html>
- 131) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/thickLens/thickLens.html>
- 132) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/fishEye/fishEye.html>
- 133) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/shadow/shadow.html>
- 134) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/billiards/billiards.html>
- 135) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/Fermat/Fermat.html>
- 136) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/pinHole/pinhole.html>
- 137) http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/optics/prism_e.html
- 138) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/shadows/index.html>
- 139) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/hinged/index.html>
- 140) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/lightbench/index.html>
- 141) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/lunar/index.html>
- 142) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/solar/index.html>
- 143) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/virtual/translational/index.html>
- 144) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/eyeball/index.html>
- 145) <http://mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/shadow/Shad.htm>
- 146) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/Optics/Aber/Aberration.htm>
- 147) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/Refract/refract.htm>
- 148) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#ConvLens>
- 149) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#DivLens>
- 150) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#ConvDiop>
- 151) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#DivDiop>
- 152) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#DivMir>
- 153) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#ConvMir>
- 154) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#ConEqSys>
- 155) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#DivEqSys>
- 156) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#twolens>
- 157) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#threelens>
- 158) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#lensmir>
- 159) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/TwoLensM/TwoLensM.htm>
- 160) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#planemir>
- 161) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/principal.htm#LenPlaM>
- 162) <http://www.mapageweb.umontreal.ca/hamamh/optics/Zoom/zoom.htm>
- 163) <http://pen.physik.uni-kl.de/physlets/scriptors/online/OpticsScriptor.html>
- 164) http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter10/free/duenne_linsen.html

- 165) <http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter10/free/linsensysteme.html>
- 166) http://www.fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter10/free/sphaerischer_hohlspiegel.html
- 167) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter12/free/augenmodell.html>
- 168) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.crs4.it/~mameli/JAVA/Ottica/PrismE.html>
- 169) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.phy.ntnu.edu.tw/~hwang/billiards/billiards.html>
- 170) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.micro.magnet.fsu.edu/primer/java/lens/bi-convex.html>
- 171) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.micro.magnet.fsu.edu/primer/java/components/perfectlens/index.html>
- 172) <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/physikonline/video1/optik/o1versuch4.htm>
- 173) <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/physikonline/video1/optik/o1versuch3.htm>

Interferenz und Beugung

- 174) <http://www.falstad.com/ripple/>
- 175) <http://www.falstad.com/diffraction/>
- 176) http://www.explorescience.com/activities/Activity_page.cfm?ActivityID=47
- 177) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap13/cd371.htm>
- 178) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap27/Gary-Inter2/app.htm>
- 179) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap13/cd372.htm>
- 180) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap27/Gary-Diffraction/app.htm>
- 181) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap27/Gary-TwoSlit/app.htm>
- 182) <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/applist/beats/b.htm>
- 183) <http://www.msu.edu/user/brechtjo/physics/waves/waves.html>
- 184) <http://www.msu.edu/user/brechtjo/physics/interference/interference.html>
- 185) <http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/doubleslit/index.html>
- 186) <http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/singleslit.html>
- 187) <http://surendranath.tripod.com/DbISlit/DbISlitAppIntDif.html>
- 188) <http://surendranath.tripod.com/DbISlit/DbISlitApp.html>
- 189) <http://surendranath.tripod.com/Interference/Ripint.html>
- 190) <http://surendranath.tripod.com/Twave/PolWave.html>
- 191) <http://surendranath.tripod.com/SnglSlit/SnglSlitApp.html>
- 192) <http://www.ianford.com/dslit/>
- 193) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/doubleSlit/doubleSlit.html>
- 194) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/doubleSlit/doubleSlit.html>
- 195) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/waveSuperposition/waveSuperposition.html>
- 196) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/propagation/propagation.html>
- 197) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/waveInterference/waveInterference.html>
- 198) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/waveType/waveType.html>
- 199) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/wave/wave.html>
- 200) <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/emWave/emWave.html>
- 201) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/moire/moire.html>
- 202) <http://members.tripod.com/~vsg/interfer.htm>
- 203) <http://landau1.phys.virginia.edu/~snp9b/java/Ripple.html>
- 204) <http://www.physik.uni-bielefeld.de/~projekt/spalt/index.html>
- 205) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter09/free/huygenssch_es_prinzip.html
- 206) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/restricted/beugung_am_doppelspalt.rm
- 207) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/restricted/beugung_am_spalt.rm

- 208) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/restricted/beugung_an_bliebigen_objekten.rm
- 209) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/restricted/beugung_von_mikrowellen.rm
- 210) <http://www.netzmedien.de/rlab>
- 211) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/free/erzeugung_kohaerenter_wellen.rm
- 212) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/restricted/interferenz.rm>
- 213) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/restricted/interferenz_an_duennen_schichten.rm
- 214) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/restricted/interferometer.rm>
- 215) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter11/free/michelson/index.html>
- 216) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.micro.magnet.fsu.edu/primer/java/moire/index.html>
- 217) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.micro.magnet.fsu.edu/primer/java/doubleslit/index.html>
- 218) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://www.micro.magnet.fsu.edu/primer/java/diffraction/index.html>
- 219) <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/physikonline/video1/optik/interferenz01.htm>
- 220) http://www.physics.uoguelph.ca/applets/Intro_physics/kisalev/java/slitdiff/index.html
- 221) <http://www.ph.unimelb.edu.au/~ssk/fresnel/>

Optische Instrumente und Techniken

- 222) <http://webphysics.davidson.edu/Applets/optics4/laser.html>
- 223) http://webphysics.davidson.edu/Applets/optics4/fiber_optics.html
- 224) http://webphysics.davidson.edu/Applets/optics4/arbitrary_transformation.html
- 225) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/microscopy/simplemagnification/index.html>
- 226) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/virtual/magnifying/index.html>
- 227) <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/magnify/index.html>
- 228) <http://micro.magnet.fsu.edu/optics/intelplay/simulator/index.html>
- 229) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter12/free/fernrohr.html>
- 230) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter12/free/lupe.html>
- 231) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediapages/experimentalphysics2/chapter12/free/mikroskop.html>
- 232) http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/restricted/co2_laser.rm
- 233) <http://fernstudium-physik.de/medienserver/mediafiles/realvideo/free/Natrium-Wellenlaengen.rm>
- 234) <http://www.openteach.com/astronomy/telescope.html>
- 235) <http://www.merlot.org/util/Redirect.po?goTo=http://micro.magnet.fsu.edu/chipshots/index.html>

Sammlungen von Applets

- 236) <http://www.ba.infn.it/~zito/museo/gemme.html#n10>
- 237) <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/physikonline/video1/optik/o1versuch9.htm>

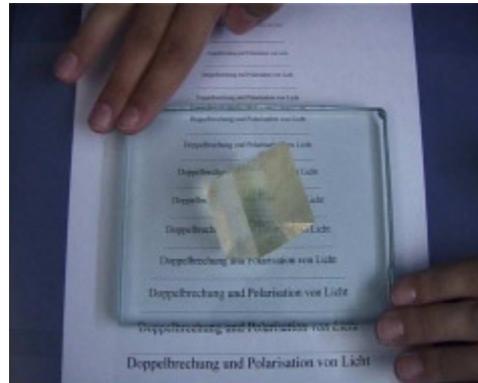
Tutorien zur Optik

- 238) <http://electron9.phys.utk.edu/136/modules/module10.htm>
- 239) <http://electron9.phys.utk.edu/136/modules/module9.htm>
- 240) <http://electron9.phys.utk.edu/optics421/>
- 241) <http://kestrel.nmt.edu/~raymond/classes/ph13xbook/node3.html>

- 242) <http://kestrel.nmt.edu/~raymond/classes/ph13xbook/node20.html>
- 243) <http://kestrel.nmt.edu/~raymond/classes/ph13xbook/node20.html>
- 244) <http://pads1.pa.msu.edu/courses/1997spring/PHY232/lectures/emwaves/index.html>
- 245) <http://pads1.pa.msu.edu/courses/1997spring/PHY232/lectures/refraction/index.html>
- 246) <http://pads1.pa.msu.edu/courses/1997spring/PHY232/lectures/mirrors/index.html>
- 247) <http://pads1.pa.msu.edu/courses/1997spring/PHY232/lectures/lenses/index.html>
- 248) http://pads1.pa.msu.edu/courses/1997spring/PHY232/lectures/op_instruments/index.html
- 249) <http://pads1.pa.msu.edu/courses/1997spring/PHY232/lectures/interference/index.html>
- 250) <http://theory.uwinnipeg.ca/physics/light/index.html>
- 251) http://theory.uwinnipeg.ca/mod_tech/node109.html
- 252) <http://scienceworld.wolfram.com/physics/topics/Optics.html>
- 253) http://www.physik.uni-erlangen.de/PI3/ustinov/seminars/ss_00/lectures/vorlesung-optik-1.pdf
- 254) http://www.physik.uni-erlangen.de/PI3/ustinov/seminars/ss_00/lectures/vorlesung-optik-2.pdf
- 255) http://www.physik.uni-erlangen.de/PI3/ustinov/seminars/ss_00/lectures/vorlesung-optik-3.pdf
- 256) http://www.physik.uni-erlangen.de/PI3/ustinov/seminars/ss_00/lectures/vorlesung-optik-4.pdf
- 257) http://www.physik.uni-erlangen.de/PI3/ustinov/seminars/ss_00/lectures/vorlesung-optik-5.pdf
- 258) http://eeh01.physik.hu-berlin.de/~hebbeker/lectures/i390_ind.htm
- 259) <http://hypertextbook.com/physics/waves/>
- 260) <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/302/lectures/node98.html>
- 261) <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/302/lectures/node105.html>
- 262) <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/302/lectures/node133.html>
- 263) http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_1Huygens.DOC
- 264) http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_2_4Auge.DOC
- 265) http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_2_5Linsen.DOC
- 266) http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_2_8Farben.DOC
- 267) http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_3Polarisation.DOC
- 268) http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_4Beugung.DOC
- 269) http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_4AFourier.DOC
- 270) http://www.ifp.uni-bremen.de/ryder/lv/gk/opt_print.pdf
- 271) <http://www-tfp.physik.uni-karlsruhe.de/~didaktik/skripten/optik.pdf>
- 272) http://www.physik.rwth-aachen.de/group/IIIphys/INFOS/Fluegge_Vorl/ow.ps.gz
- 273) http://www.valdosta.edu/phy/astro/pl_shows/color_2000/first_page.htm
- 274) <http://www.kw.igs.net/~jackord/j6.html#p1>
- 275) <http://id.mind.net/~zona/mstm/physics/light/light.html>
- 276) <http://www.physics.yorku.ca/Undergraduate/tutorials.html>

B1: Ablaufschema zum Video:

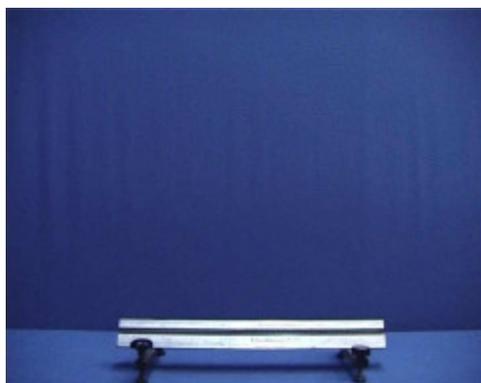
„Doppelbrechung und Polarisation von Licht“



„Doppelbrechung und Polarisation von Licht. Eine Schrift erscheint bei der Betrachtung durch einen Kalkspatkristall doppelt.“



„Dieses Phänomen bezeichnet man als optische Doppelbrechung.“

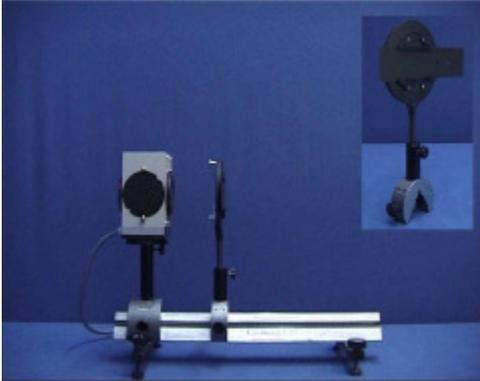


„Um einen stabilen Aufbau zu



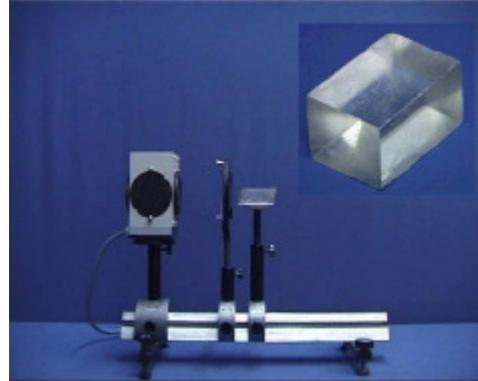
„Darauf montieren wir: Eine

gewähren benutzen wir eine optische Bank als Basis.“



„...eine Lochblende zur Lichtbündelung,...“

unpolarisierte Lichtquelle,...“



„...einen Kalkspatkristall,...“



„...sowie einen Polarisationsfilter als Analysator für das durch den Kristall fallende Licht.“



„In den Kristall fällt ein paralleles Lichtbündel ein.“



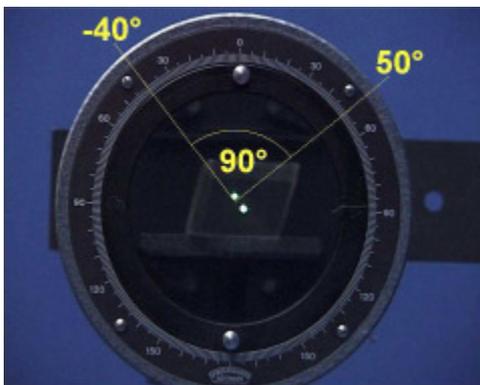
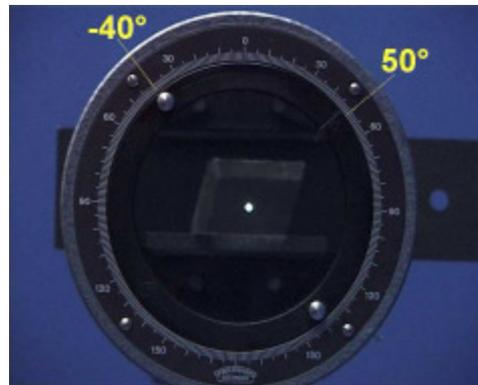
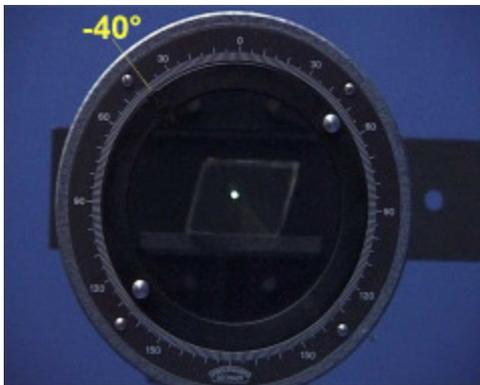
„Betrachten wir das austretende Licht, so erkennen wir deutlich zwei Lichtbündel.“



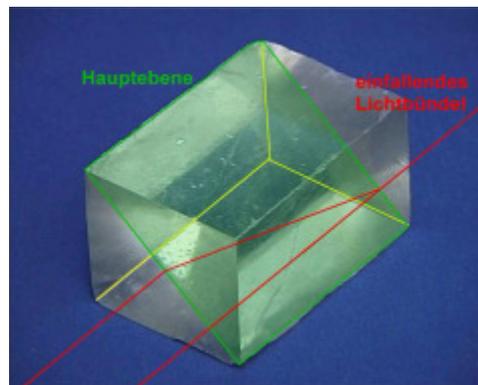
„Das Lichtbündel wird im Kristall, wie hier eingezeichnet, aufgespalten.“



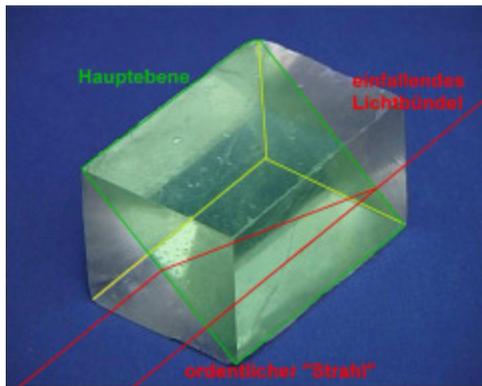
„Wir untersuchen nun die Polarisation der Lichtbündel.“



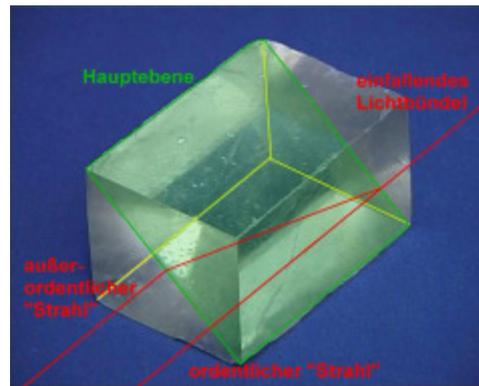
„Wir beobachten, dass die Lichtbündel zueinander senkrecht polarisiert sind.“



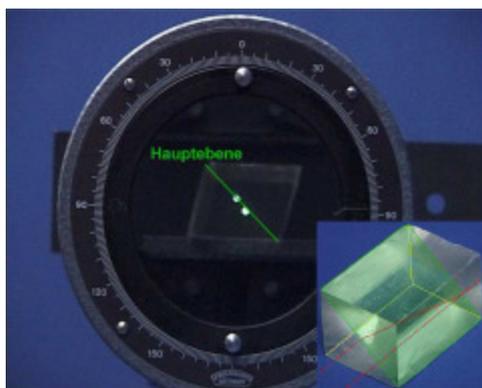
„Bei genauerer Betrachtung erkennen wir, dass das eintretende Lichtbündel im Kristall doppelt gebrochen wird.“



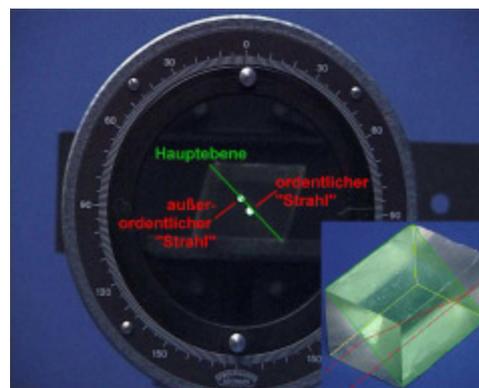
„Zum einen in den ordentlichen ‚Strahl‘, der den Kristall regulär durchläuft, ...“



„...zum anderen in den außerordentlichen ‚Strahl‘, der eine davon abweichende Brechung erfährt.“



„Das ganze hier noch einmal am realen Versuchsaufbau.“

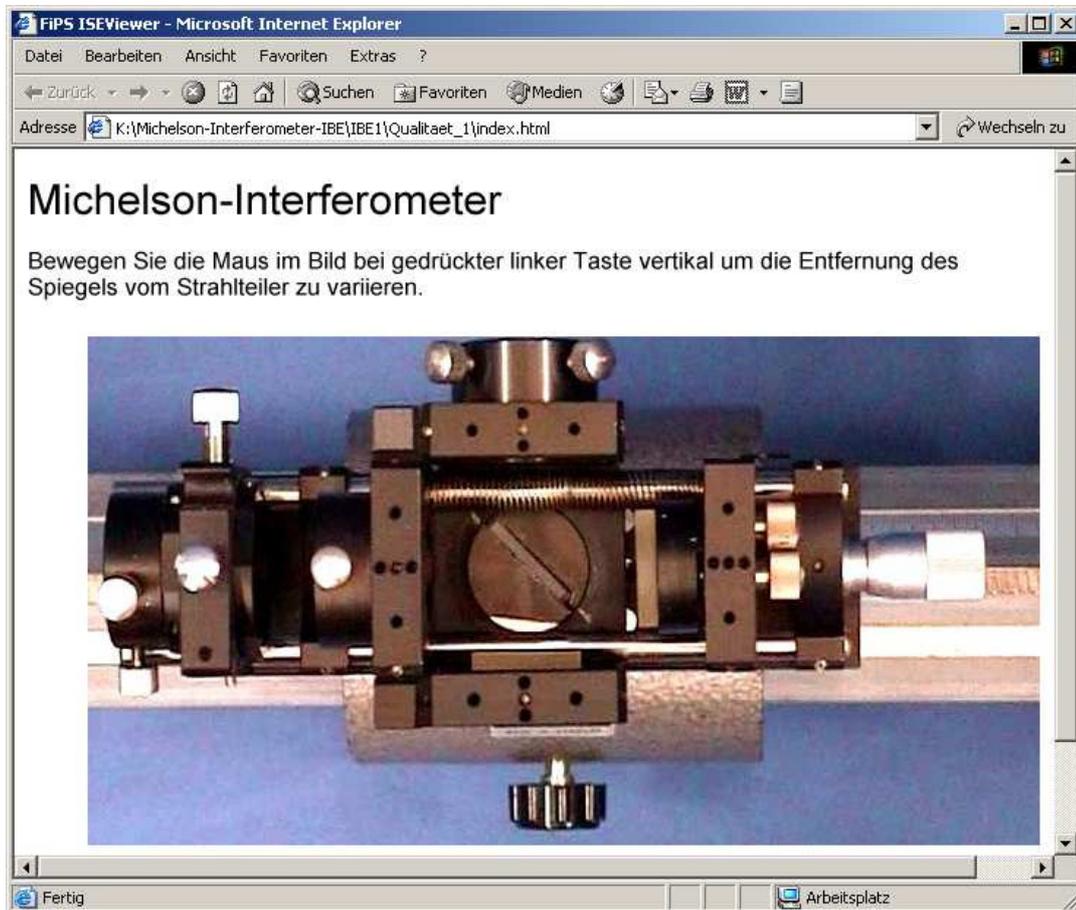


„Wir notieren zum Schluss die wichtigsten Beobachtungen.“

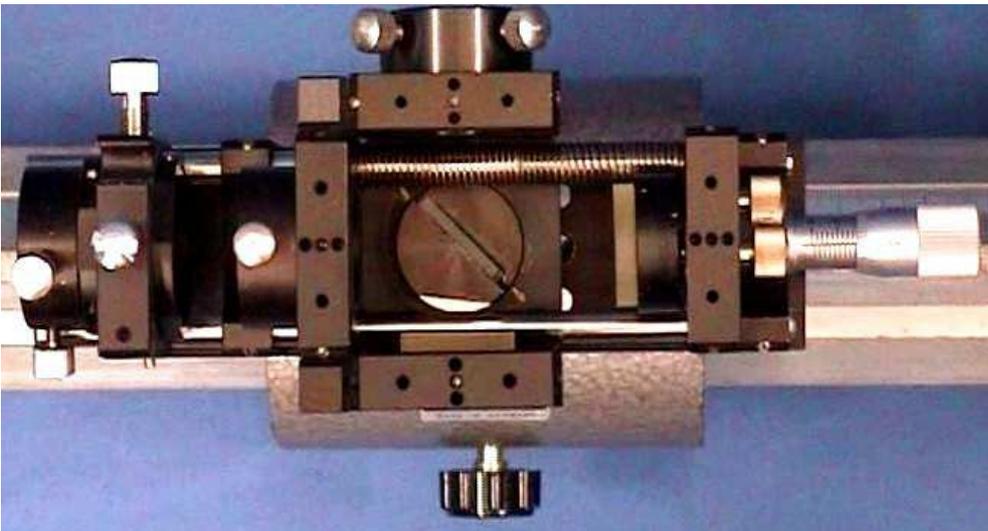
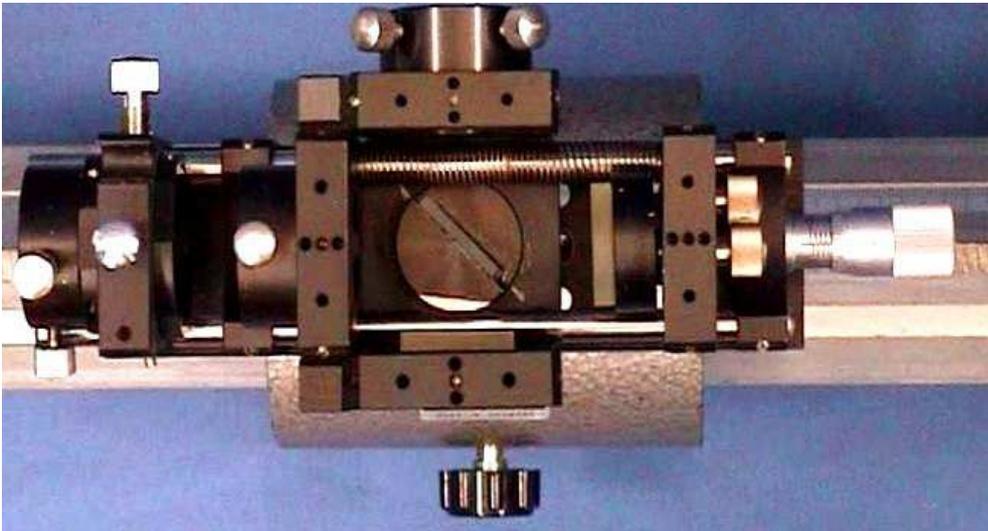
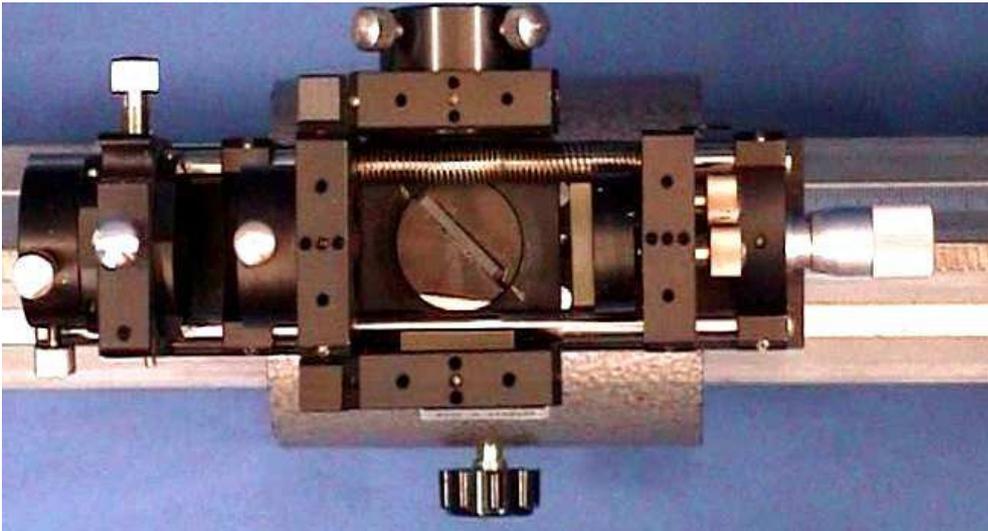


„Die Ausbreitung des Lichtes ist abhängig von der Polarisationsrichtung.“

**B2: Webseite und Ablaufschema zum IBE:
„Das Michelson-Interferometer – Der Aufbau“**

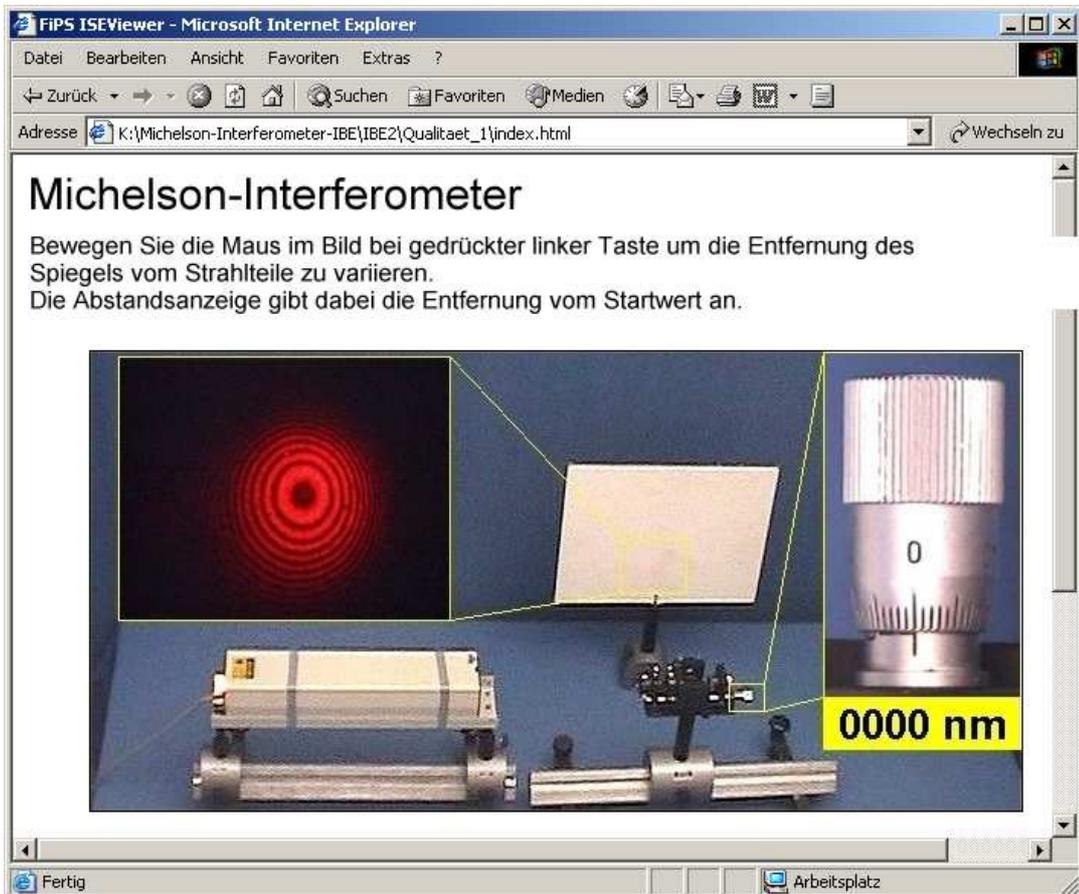


Webseite zu „Das Michelson-Interferometer – Der Aufbau“

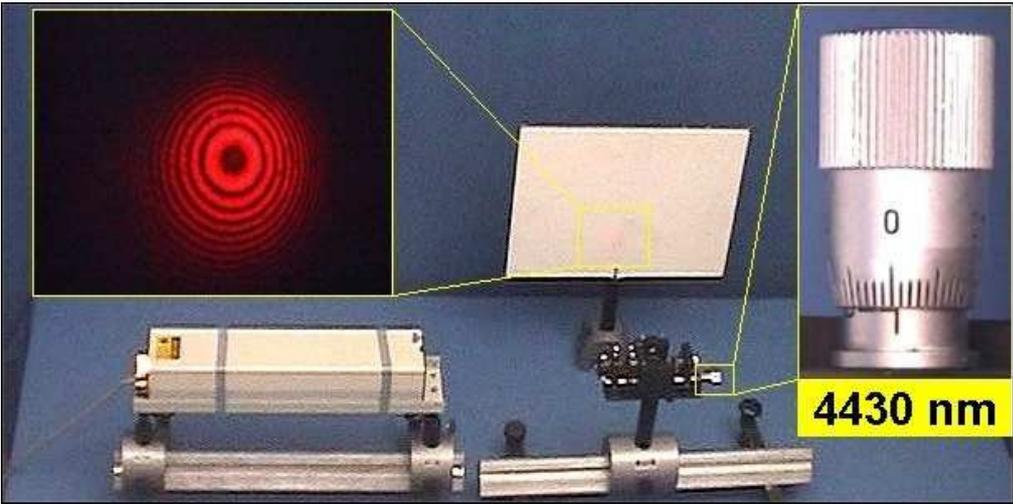
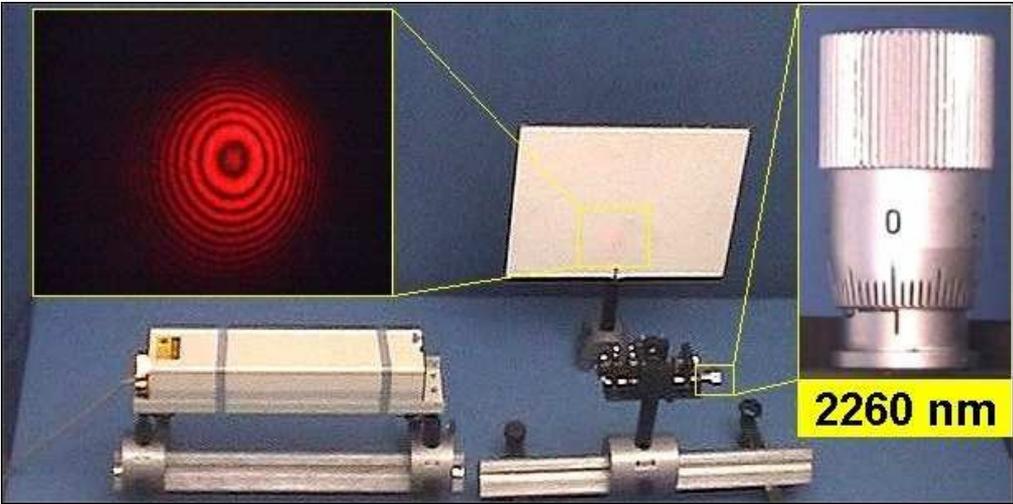
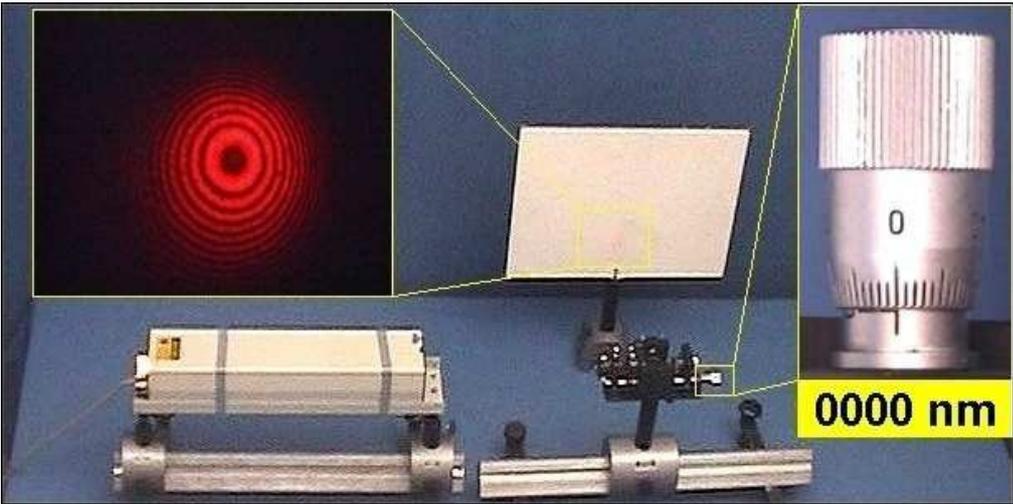


B3: Webseite und Ablaufschema zum IBE:

„Das Michelson-Interferometer – Bestimmen einer Wellenlänge“



Webseite zu „Das Michelson-Interferometer – Bestimmen einer Wellenlänge“



B4: Ablaufschema zum Video:

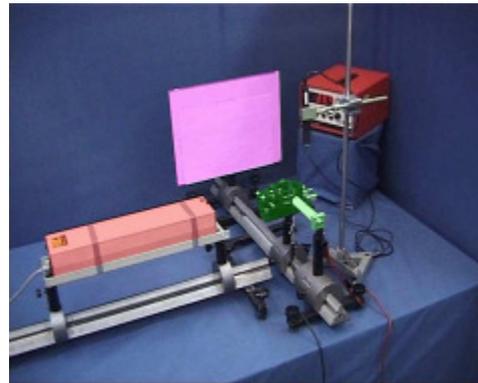
„Das Michelson-Interferometer – Bestimmen einer Längenänderung“



„Um eine Längenänderung mit Hilfe der Interferometrie zu messen benutzen wir diesen Aufbau:“



„Ein Laser strahlt in ein Michelson-Interferometer.“



„Die entstehende Interferenzfigur kann man auf einem Schirm beobachten.“

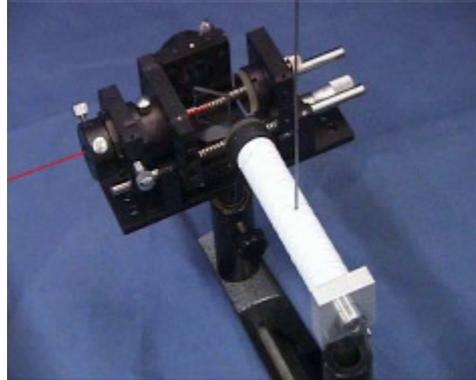


„Betrachten wir uns das Interferometer näher, so sehen wir,...“

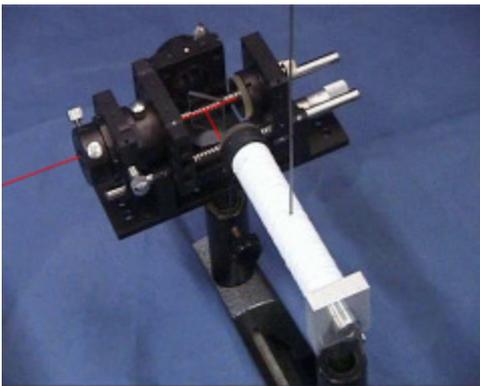


„Dessen Temperatur messen wir mit einem digitalen Thermometer.“

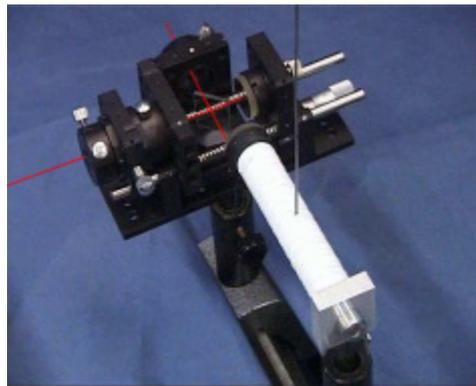
„...dass der bewegliche Spiegel des Interferometers am Ende eines 10 cm langen Aluminiumstabes angebracht ist.“



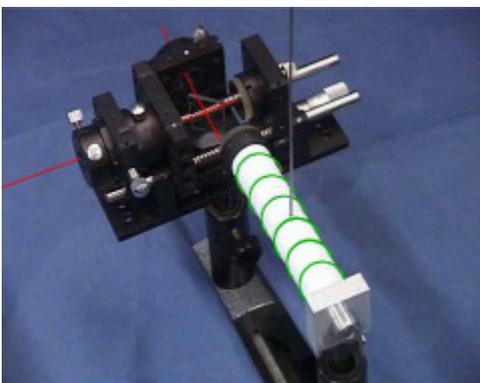
„Der Laserstrahl trifft auf den Strahlteiler,...“



„...geht von dort auf die beiden Spiegel,...“



„...und wird von diesen auf den Schirm reflektiert.“



„Die Verschiebung des Spiegels wird dadurch erreicht, dass wir



einen Heizdraht um den Aluminiumstab gewickelt haben.“

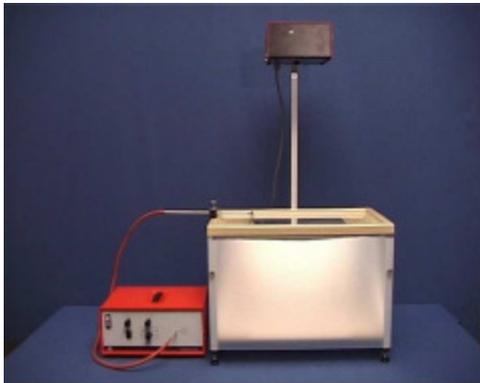
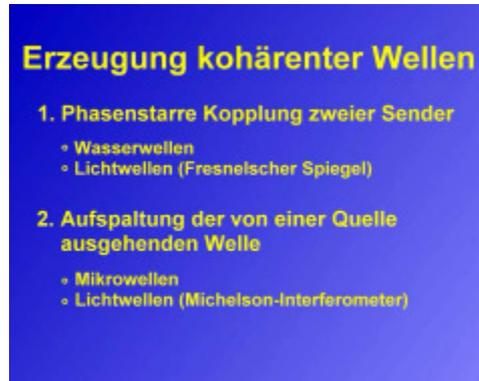


„Wir betrachten uns nun die Interferenzstruktur bei Erwärmung des Stabes von 30 auf 40 Grad Celsius.“

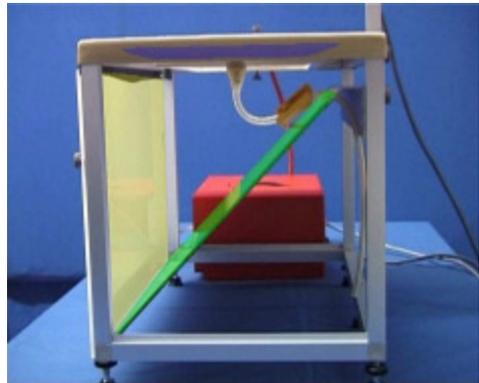


B5: Ablaufschema zum Video:

„Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen zu Interferenzstrukturen“



„Um die Erzeugung kohärenter Wellen mit gekoppelten Sendern bei Wasserwellen zu untersuchen, benutzen wir diesen Aufbau. Das Wasser befindet sich in einer Wanne, die von oben beleuchtet wird.“



„Mit Hilfe des Spiegels wird das Bild der Wellen auf den Schirm projiziert.“



„Hier sehen wir die beiden gekoppelten Wellenerreger.“



„Um stehende Wellen beobachten zu können, benutzen wir als Lichtquelle ein Stroboskop, das mit der

Erregerfrequenz synchronisiert wird.“



„Damit können wir die Interferenz bei kohärenten Wasserwellen bei 50 Hertz beobachten.“

Erzeugung kohärenter Wellen

Phasenstarre Kopplung
zweier Sender

Lichtwellen
(Fresnelscher Spiegel)



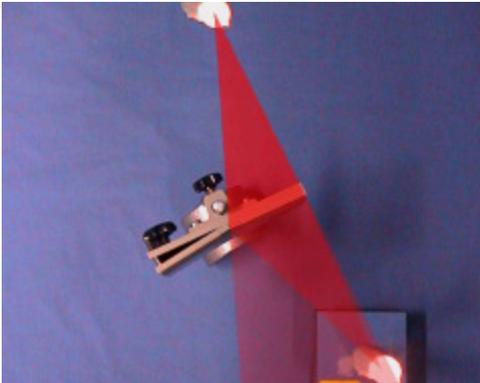
„Zwei Lichtwellen miteinander zu koppeln ist deutlich schwieriger, weshalb man sich (wie hier bei einer Kerze demonstriert) mit einem experimentellen Trick behelfen muss.“



„Die beiden hier gezeigten Kerzen sind virtuell und werden durch einen Fresnelschen Spiegel erzeugt.“

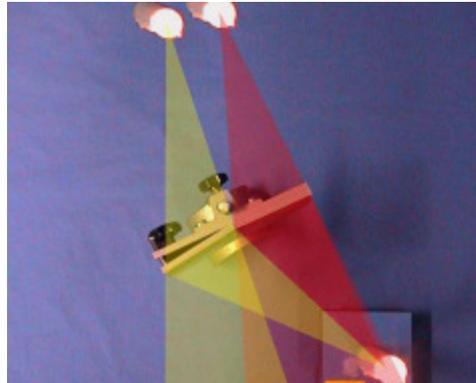


„Dies wird dadurch möglich, dass der Spiegel in der Mitte abgeknickt ist.“



„Für einen Beobachter sieht es so aus, als ob das Licht von einer virtuellen Kerze hinter dem Spiegel abgestrahlt würde.“

„Das von der Kerze ausgehende Licht strahlt in alle Richtungen, also auch auf die erste Hälfte des Spiegels von wo es reflektiert wird.“



„Ebenso verhält es sich mit der zweiten Spiegelhälfte, die uns eine zweite, leicht versetzte virtuelle Kerze zeigt. Die beiden virtuellen Lichtquellen sind miteinander gekoppelt.“



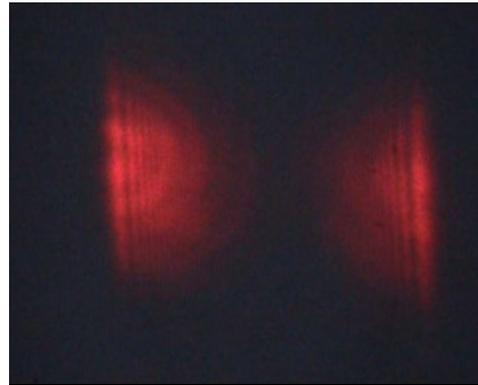
„Da es sich bei einer Kerze jedoch um eine thermische Lichtquelle handelt, muss der Versuch um Interferenzen beobachten zu können mit einem Laser durchgeführt werden.“



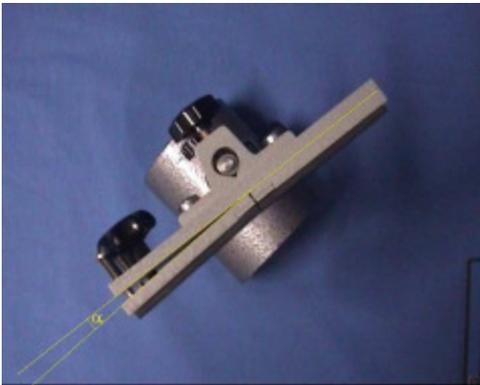
„Dabei benutzen wir eine Linse um den Laserstrahl aufzuweiten,...“



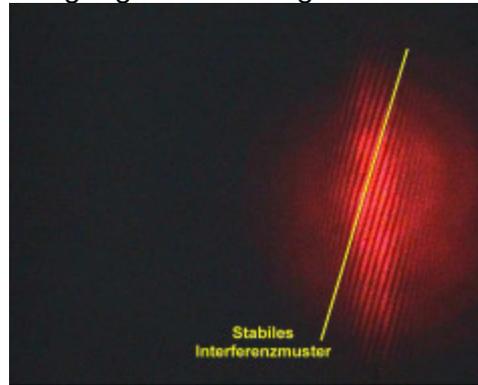
„... und eine zweite um das von den Spiegeln reflektierte Licht auf einem Schirm abzubilden.“



„Im abgedunkelten Labor zeigen sich zwei Laserpunkte mit den an den Spiegelkanten entstehenden Beugungserscheinungen.“



„Durch Verändern des Winkels zwischen den beiden Spiegeln, können wir nun beide Laserpunkte überlagern, und eine Interferenz beobachten.“



„Überlagert man die beiden Teilwellen nun, so erkennt man zusätzlich zu den Beugungserscheinungen an Spiegeln und Linsen die Interferenzstruktur.“



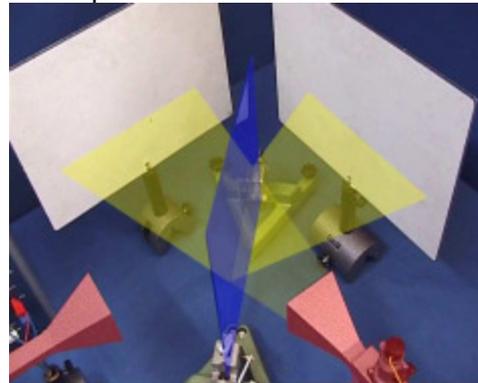
„Bei diesen Versuch wollen wir die Interferenz bei Mikrowellen beobachten.“



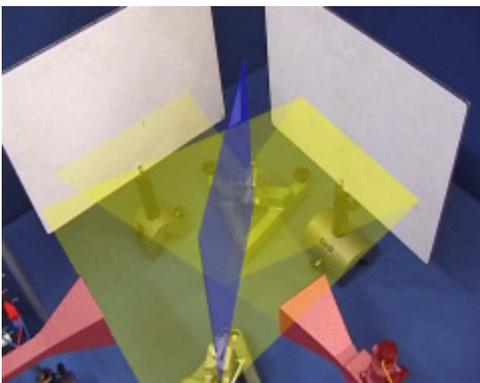
„Dazu verwenden wir eine Glasplatte als Strahlteiler,...“



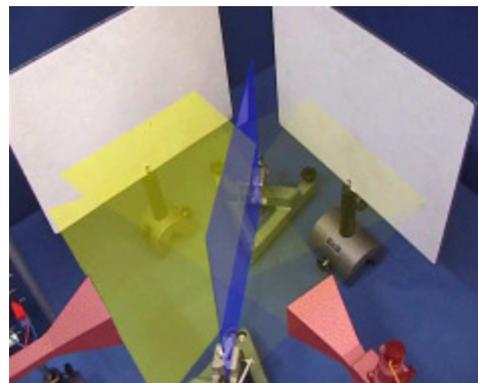
„... einen Mikrowellensender, einen Empfänger dessen Signal verstärkt und auf einen Lautsprecher gegeben wird, und zwei Metallplatten als Reflektoren.“



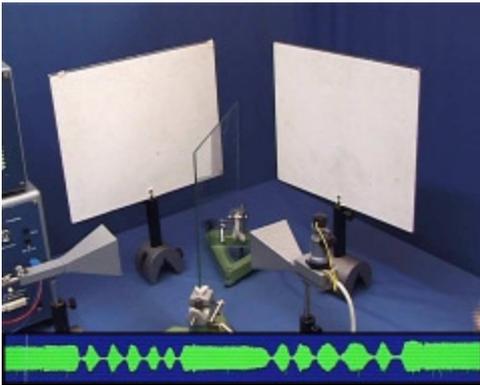
„Die vom Sender ausgestrahlten Mikrowellen werden an der Glasplatte in zwei Teilstrahlen aufgespalten.“



„Die rechte Metallplatte reflektiert die Mikrowellen zum Empfänger,...“



„... ebenso wie die linke, so dass sich dort beide Teile überlagern.“



„Durch Variieren des Wegunterschiedes, können wir konstruktive und destruktive Interferenz beobachten.“

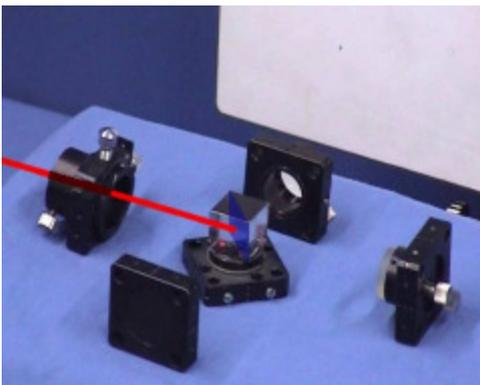
Erzeugung kohärenter Wellen

Aufspaltung in Teilwellen

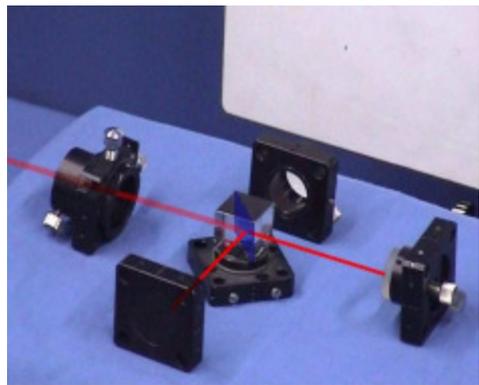
Lichtwellen
(Michelson-Interferometer)



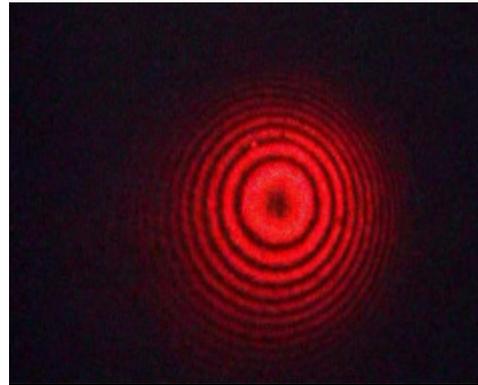
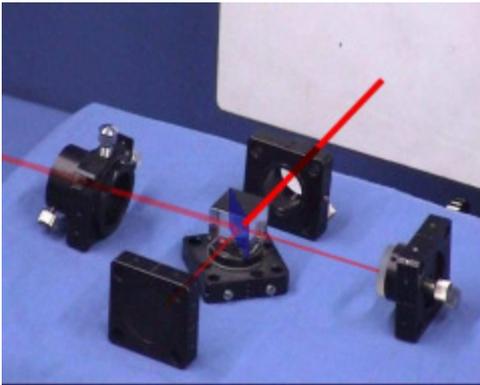
„Der Aufbau des Michelson-Interferometers entspricht dem des Versuches mit Mikrowellen.“



„Der Laserstrahl wird am Strahlteiler aufgespalten, ...“



„... von den beiden Spiegeln reflektiert...“



„... und auf einen Schirm
abgebildet.“

B6: Ablaufschema zum Video:

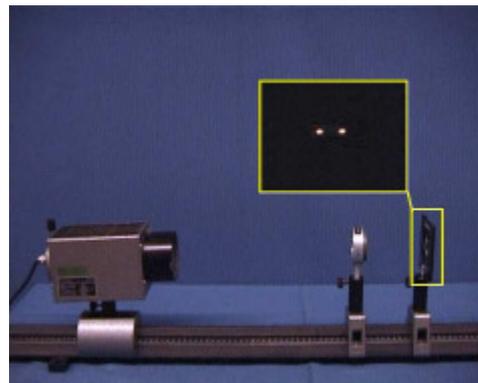
„Rayleigh-Kriterium – Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente“



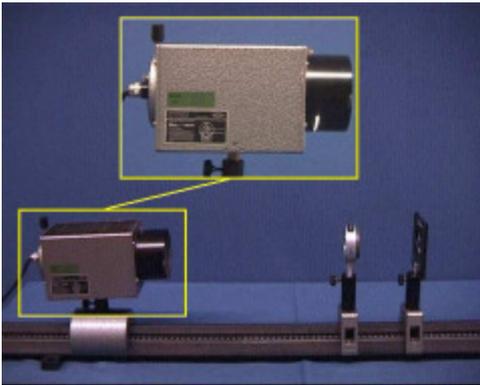
„Das maximale Auflösungsvermögen optischer Instrumente wird durch das Rayleigh-Kriterium beschrieben.“



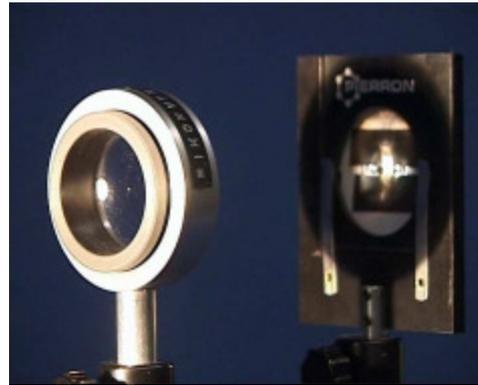
„Wir betrachten zur Untersuchung dieses Kriteriums zwei quasi-punktförmige Lichtquellen durch ein Teleskop. Wird die Auflösungsgrenze durch Verkleinern der Apertur unterschritten, erwarten wir ein ‚Verschmieren‘ der Lichtpunkte.“



„Der Aufbau im einzelnen: Um die quasi-punktförmigen Lichtquellen zu realisieren, benutzen wir ein Blech mit zwei Bohrungen von 200 Mikrometer Durchmesser im Abstand von 550 Mikrometern.“



„Diese beleuchten wir mit einer starken Halogenlampe,...“



„...deren Licht wir um die Intensität noch weiter zu erhöhen mit einer Linse bündeln.“



„Diesen Aufbau betrachten wir nun aus acht Metern Entfernung mit einem Teleskop,...“



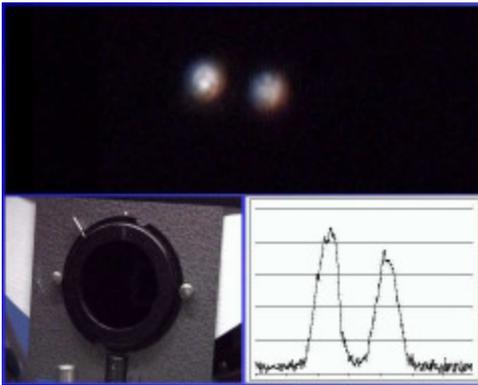
„...dessen Apertur wir mit Hilfe einer Irisblende verkleinern.“



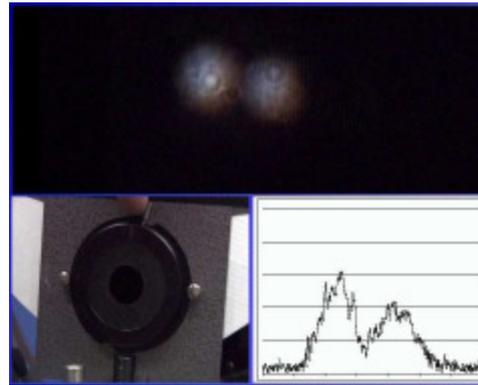
„Bei der qualitativen Versuchsdurchführung beobachten wir nun gleichzeitig das Bild beim Blick durch das Teleskop,...“



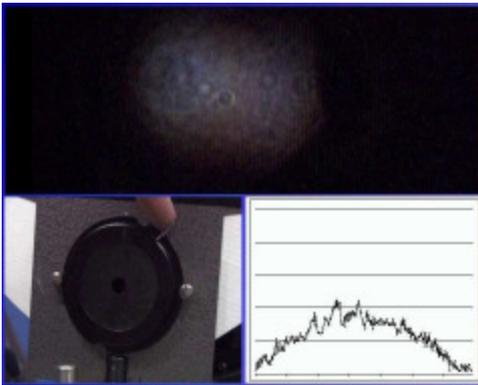
„...die Größe der Apertur...“



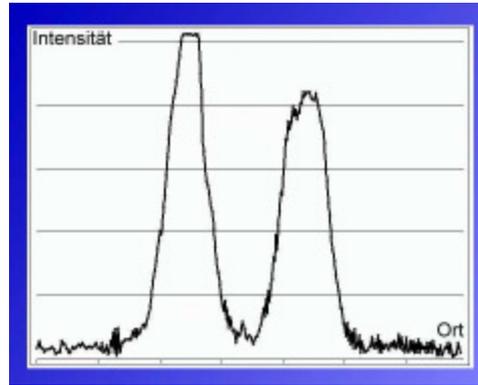
„...sowie die Intensitätsverteilung der beiden Lichtpunkte im Querschnitt.“



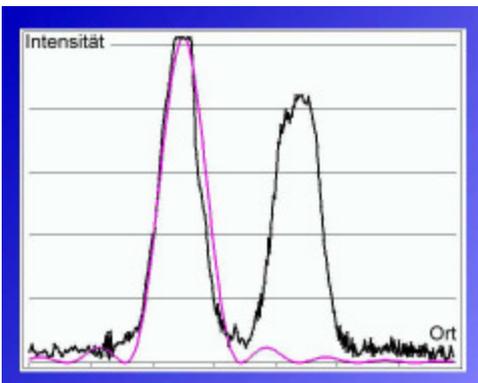
„Verkleinern wir nun die Apertur, sehen wir wie die beiden ursprünglich scharf getrennten Peaks immer breiter werden und schließlich miteinander verschmelzen.“



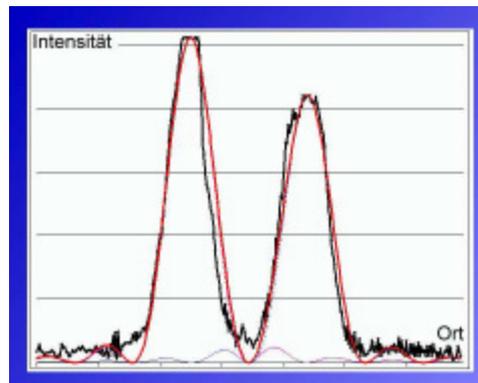
„Da die Lichtausbeute immer geringer wird, wird die Empfindlichkeit der Kamera durchgehend erhöht.“



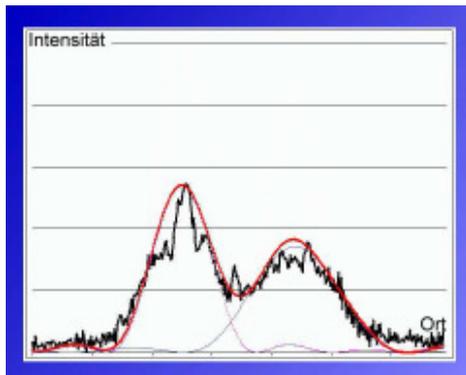
„Zur quantitativen Auswertung betrachten wir zunächst den Zustand am Anfang des Versuches. Beide Peaks lassen sich deutlich trennen.“



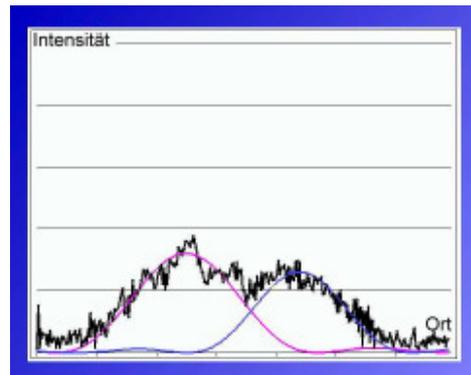
„Wir können die Intensitätsverteilung der einzelnen Peaks beschreiben durch die Beugung eines Lichtbündels hinter einer einzelnen kreisförmigen Blende.“



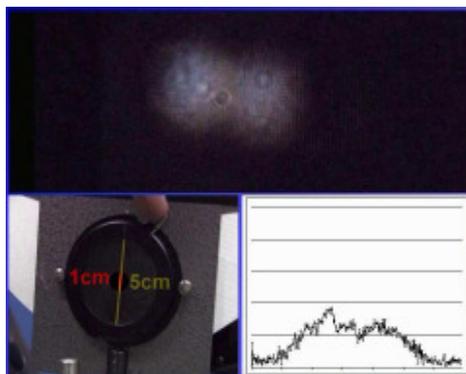
„Überlagern wir beide Beugungsbilder erhalten wir eine Gesamtintensität, welche unserer Beobachtung entspricht.“



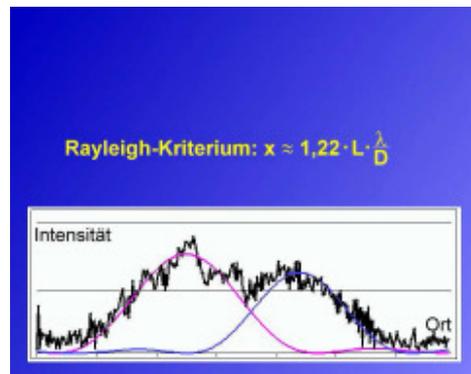
„Wird die Irisblende weiter geschlossen, so verbreitern sich die beiden Lichtflecke und die Trennung der beiden wird immer schwieriger.“



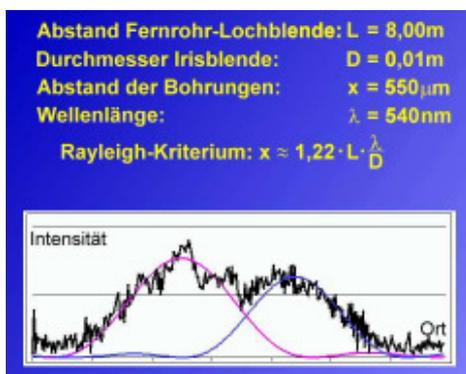
„Der interessanteste Punkt ist erreicht, wenn das Minimum des ersten Peaks mit dem Maximum des zweiten zusammenfällt. Dies ist die von Rayleigh definierte Auflösungsgrenze.“



„Betrachten wir diesen Punkt im Versuch, so sehen wir, dass der Durchmesser der Irisblende von ursprünglich 5 Zentimeter auf 1 Zentimeter verkleinert wurde. Betrachten wir die bekannte, ...“



„... für kleine Winkel genäherte Formel, mit der wir den Abstand zweier Punkte berechnen können, die sich gerade noch voneinander trennen lassen. Der Vorfaktor 1,22 ist darin die analytisch ...“



„... berechnete Lage der ersten Nullstelle in der Intensitätsverteilung. Um unser Experiment zu überprüfen, vergleichen wir dies mit unseren Werten.“



„Wir berechnen einen Vorfaktor von 1,27, was im Rahmen der Messgenauigkeit gut mit dem Theoriewert übereinstimmt.“

B7: Ablaufschema zum Video:

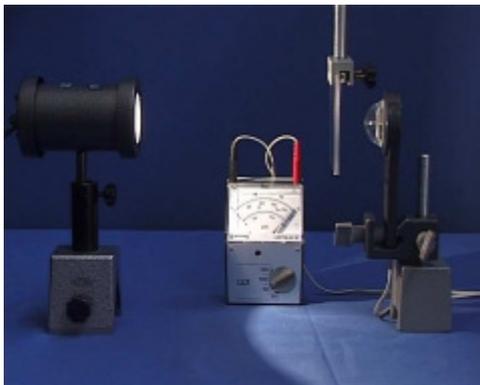
„Absorption und Streuung“



„Die Intensität einer Lichtquelle lässt sich mit einem Photometer bestimmen.“



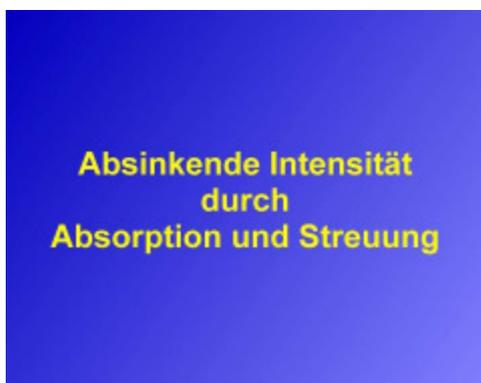
„Bringt man ein durchsichtiges Material in den Strahlengang, ...“



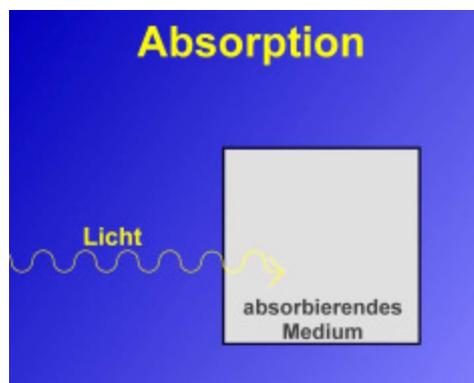
„... so wird außer durch Reflexion an der Oberfläche die Lichtintensität im Medium nicht verringert. Man kann das Verhalten des Stoffes durch seine Brechzahl beschreiben.“



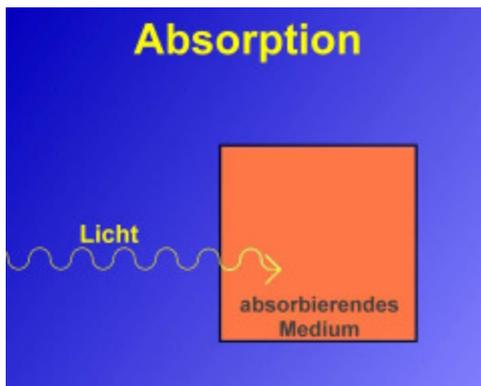
„Nimmt die Intensität jedoch ab, benötigt man eine weitere Materialkonstante. Die Extinktionskonstante. Diese setzt sich aus Absorption und Streuung zusammen, ...“



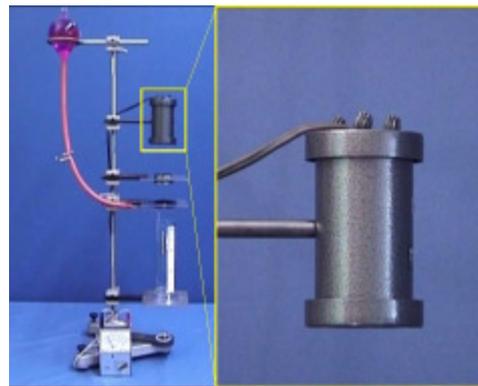
„... und beschreibt das Absinken der Intensität im Inneren des Mediums.“



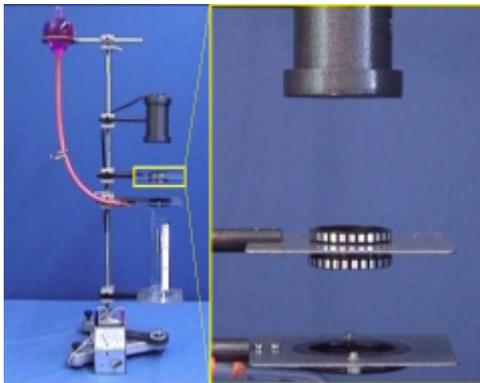
„Bei der Absorption wird eingestrahktes Licht in andere Energieformen umgewandelt, ...“



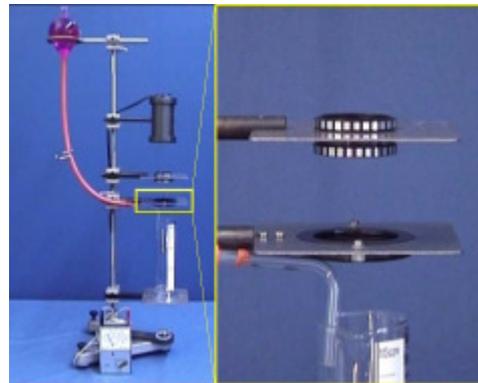
„... im allgemeinen in Wärme. Zur Untersuchung dieses Phänomens ...“



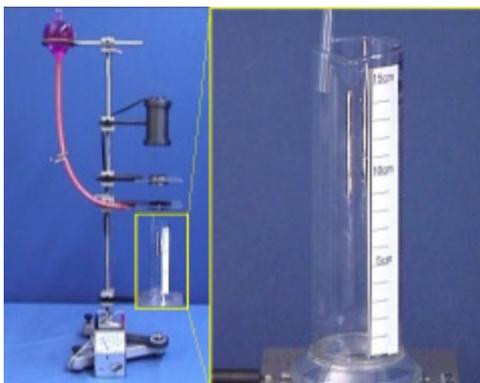
„... benutzen wir diesen Aufbau: Das Licht einer Halogenlampe ...“



„... wird von einer Linse gebündelt ...“



„... und von einer Irisblende kollimiert.“



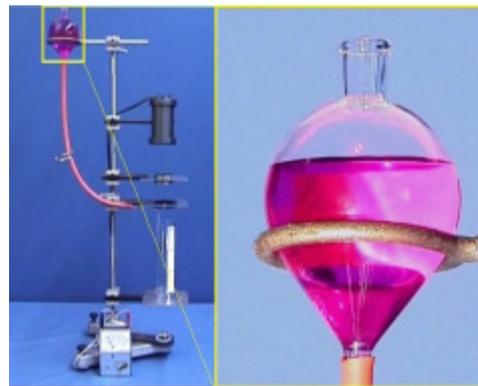
„Der gebündelte Strahl durchläuft ein Becherglas ...“



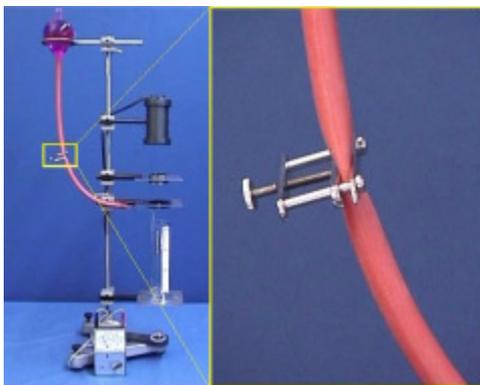
„... und die Lichtintensität wird schließlich mit einem Photometer bestimmt.“



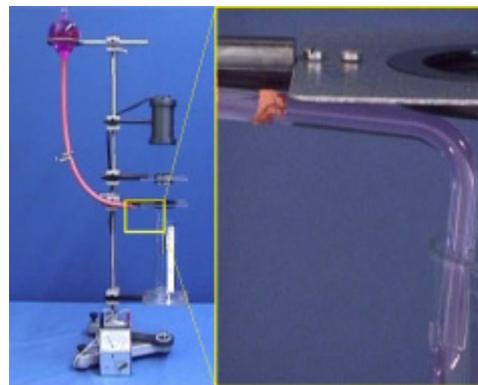
„Das Messgerät zeigt die Lichtstärke in Lux an.“



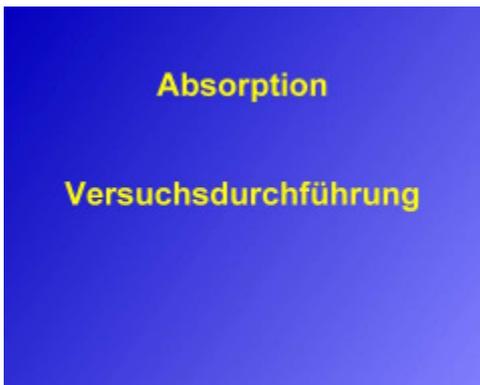
„Die Kaliumpermanganatlösung in diesem Vorratsgefäß...“



„... läuft durch den mit einer Klemme gesperrten Schlauch ...“



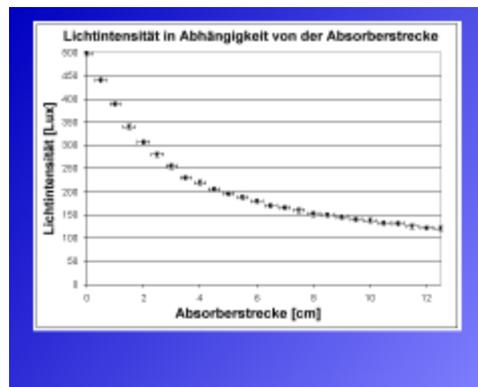
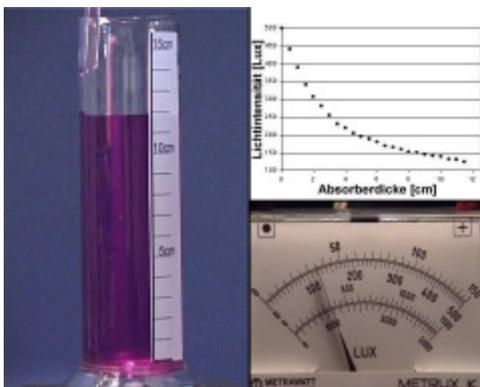
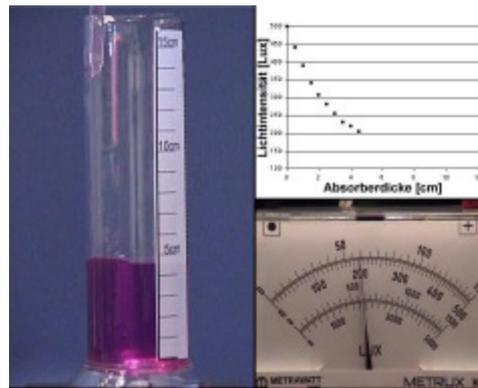
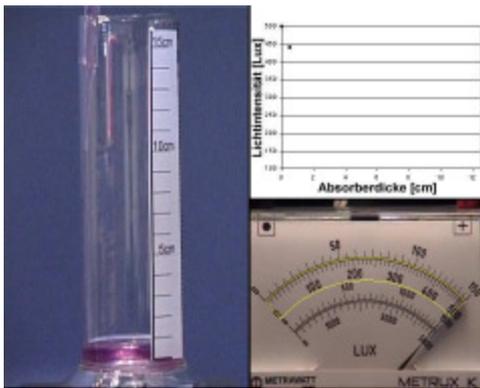
„... in das Becherglas, so dass das Licht eine immer dickere Schicht durchlaufen muss.“



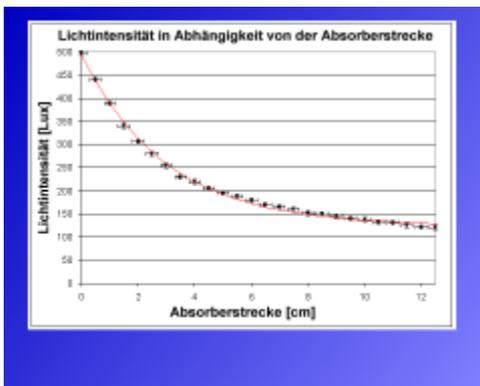
„Dabei sind die Partikel der Lösung so klein, dass praktisch keine Streuung stattfindet.“



„Im Versuch sehen wir nun das sich füllende Becherglas, die Anzeige des Messgerätes sowie ein Diagramm, in das die zu durchlaufende Strecke gegen die transmittierte Lichtintensität aufgetragen werden.“



„Am Ende ist deutlich ein exponentieller Abfall zu erkennen.“



„Eine Fitkurve liefert den Absorptionskoeffizienten ...“



„... unserer Lösung.“

Lambertsches Absorptionsgesetz

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z}$$

I = Intensität nach Durchlaufen des Mediums
 I_0 = Intensität vor Eintritt in das Medium
 α = Absorptionskoeffizient
 z = Strecke im Medium

„Dieser Vorgang wird allgemein durch das sogenannte Lambertsche Absorptionsgesetz beschrieben.“

Streuung

Medium mit streuenden Teilchen

„Bei der Streuung wird das einfallende Licht nicht in eine andere Energieform umgewandelt, ...“

Streuung

Medium mit streuenden Teilchen

„... sondern in alle Richtungen statistisch verteilt abgestrahlt.“

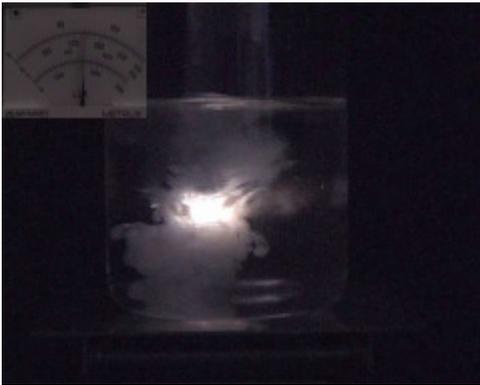
„Ein analoger Aufbau, diesmal mit einem wassergefüllten Becherglas, dient zur Untersuchung der Streuung.“



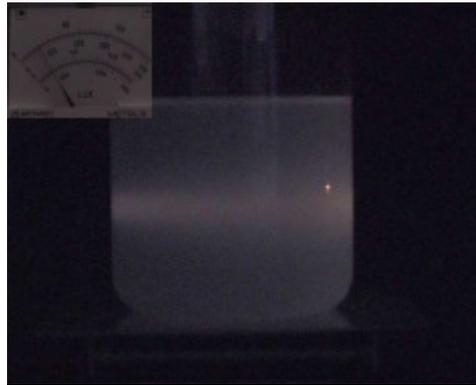
„Es ist kein seitlich austretendes Licht zu erkennen, ...“



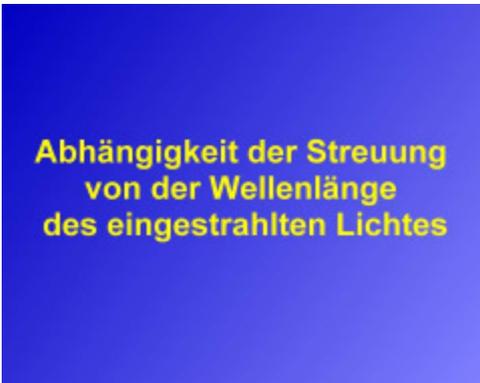
„... da das Wasser ebenso wie die Seitenwände praktisch ungehindert durchlaufen werden kann.“



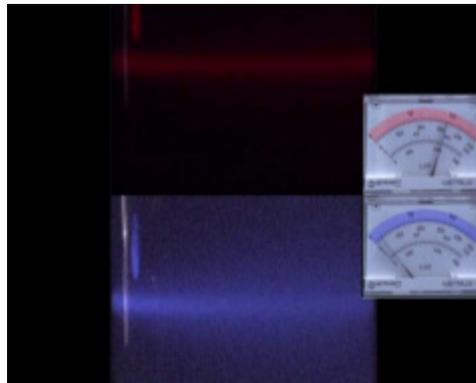
„Gießt man jedoch etwas Milch in die Flüssigkeit so entsteht ein Gemisch mit kleinsten Teilchen, ...“



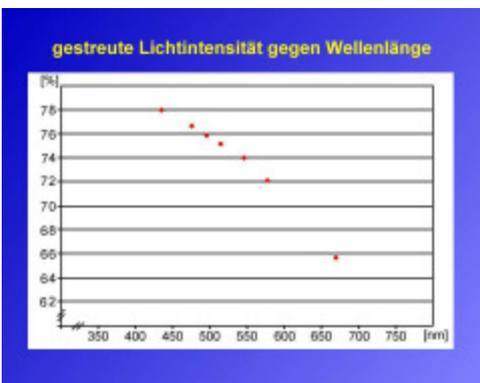
„... an denen das Licht gestreut wird.“



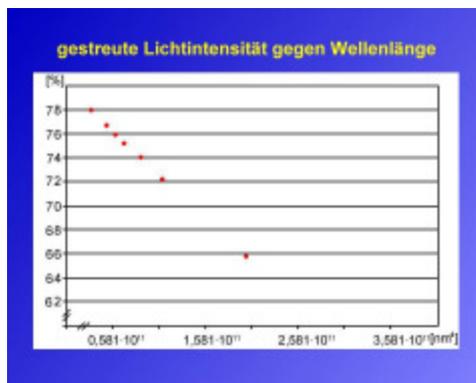
„Wir untersuchen nun die Abhängigkeit der Streuung von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts. Man erkennt deutlich, ...“



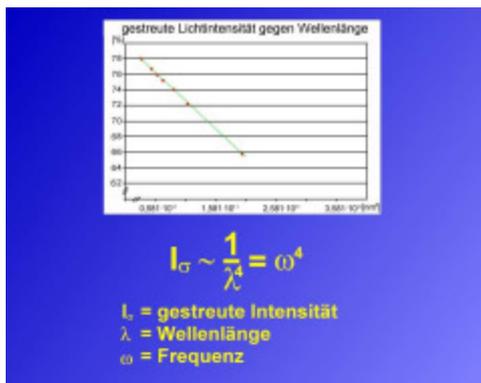
„... dass das längerwellige rote Licht weniger gestreut wird als blaues Licht mit kürzerer Wellenlänge. Während beim roten kaum Intensität verloren geht, gelangen beim blauen nur knapp zehn Prozent bis zum Detektor.“



„Bei Untersuchungen mit verschiedenen Wellenlängen erkennt man, dass die Streuung mit Zunahme der Wellenlänge abnimmt.“



„Trägt man die Wellenlänge in vierter Potenz auf, so erkennt man einen linearen Zusammenhang.“



„Die Streuung ist also umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge und damit proportional zur vierten Potenz der Frequenz.“

Lambertsches Gesetz der exponentiellen Intensitätsabnahme

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha_a z}$$

$\alpha_a \sim \omega^4$

I = Intensität nach Durchlaufen des Mediums
 I_0 = Intensität vor Eintritt in das Medium
 α_a = Absorptionskoeffizient (Streuung)
 z = Strecke im Medium

„Bei monofrequentem Licht lässt sich die Abschwächung der Intensität analog zur Absorption mit dem Lambertschen Gesetz der exponentiellen Intensitätsabnahme beschreiben.“

Absorptionskoeffizient der Streuung

$$\alpha_s = \sigma \cdot n_0$$

α_s = Absorptionskoeffizient (Streuung)
 σ = Streuquerschnitt (wirksame Fläche pro Teilchen in der das einfallende Licht gestreut wird)
 n_0 = Anzahldichte der streuenden Teilchen

„Der Absorptionskoeffizient der Streuung ist dabei das Produkt aus dem Streuquerschnitt, der pro streuendem Teilchen eine Fläche beschreibt, in der das Licht vollständig gestreut wird, und der Anzahldichte der streuenden Teilchen pro Volumen.“

Intensitätsabnahme durch Absorption und Streuung

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha z}$$

$\alpha = \alpha_a + \alpha_s$

I = Intensität nach Durchlaufen des Mediums
 I_0 = Intensität vor Eintritt in das Medium
 α = Extinktionskonstante
 α_a = Absorptionskoeffizient
 α_s = Absorptionskoeffizient (Streuung)

„In einem Medium, das das Licht sowohl absorbiert als auch streut ist die Extinktionskonstante die Summe aus beiden Koeffizienten.“

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe. Alle Stellen der Arbeit, die anderen Werken entnommen sind, sind unter Angabe der Quelle als solche kenntlich gemacht.

Kaiserslautern, den
