



Technische Universität München
TUM School of Education

TUM Science Labs

Gefördert durch die

Deutsche Telekom Stiftung



Interferometrie (INT)

Versuch im Physikalischen Praktikum für Maschinenwesen



Bearbeitet von:

Christian Clemens

Stand: 9. März 2012

Zielgruppe Dieses Angebot eignet sich besonders für Schüler/-innen der gymnasialen Oberstufe und der Berufsschule, die Physik als naturwissenschaftliches Fach gewählt haben.

Erforderliche Grundlagen Die vorliegende Anleitung beschreibt einen Versuch, der Bezug auf den Abschnitt: „Wellenlehre und Einblick in die Quantenphysik“ des bayerischen Lehrplans nimmt. Sie folgt den Ausführungen des Schulbuchs *Metzler Physik* und setzt die dort erarbeiteten Grundlagen als geläufig voraus. Insofern sind die Science Labs ein weiterführendes Angebot, welches auf dem Schulstoff aufbaut und somit über diesen in einem gewissen Rahmen auch hinausgeht. So sind die angebotenen Versuche zum Teil durchaus anspruchsvoll, da durch eigenständiges Experimentieren und themenbezogene Besichtigungen an die moderne Forschung herangeführt werden soll. Die Schüler/-innen sollen sich jedoch nicht durch kompliziertere Formeln und Zusammenhänge abschrecken lassen, da sie während der Versuchsdurchführung und -auswertung umfassend von Studierenden betreut werden.

Gruppenstärke Dieser Versuch ist für eine Gruppenstärke von acht bis zwölf Personen ausgelegt und sollte mit einer Führung am „Max-Planck-Institut für Quantenoptik“ kombiniert werden. Es können jedoch auch 16 bis 24 Personen teilnehmen, da diese dann auf zwei unterschiedliche Versuche aufgeteilt werden. Größere Gruppen mit bis zu 48 Personen sind auch möglich, und werden dementsprechend auf zwei unterschiedliche Führungen sowie Versuche aufgeteilt.

Lernziele Die Schüler/-innen lernen

- den Aufbau eines Versuchs im Physikalischen Praktikum für Maschinenwesen,
- das eigenständige Experimentieren,
- das Protokollieren ihres Versuchs und
- die Auswertung eines eigenständig durchgeführten Versuchs.

Arbeitsunterlagen und -mittel Die Bearbeitung der gestellten Aufgaben erfordert die folgenden Arbeitsunterlagen und -mittel, die die Schüler/-innen am Besuchstag bitte selbst mitbringen: diese Versuchsanleitung, einen Schreibblock sowie Stifte, einen Taschenrechner und ggf. eine Digitalkamera oder ein Mobiltelefon mit Photofunktion zur Illustration der gemeinsamen Ausarbeitung. (USB-Kabel und ein Kartenlesegerät stehen zur Verfügung.)

Zeitplan Der Tagesablauf eines Science Labs besteht aus einer Versuchsdurchführung (90 min) und einer Führung an einem Forschungsinstitut (90 min) am Vormittag, sowie der Auswertung des Versuchs (2,5 h) im Mathematik-Rechnerraum am Nachmittag. Das Programm beginnt somit üblicherweise um 9 Uhr und endet um 16 Uhr, wobei eine halbstündige Mittagspause vorgesehen ist. Der detaillierte Zeitplan hängt jedoch stark von der Gruppengröße ab und muß daher individuell festgelegt werden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Einführung | 4 |
| 1.1. Vorwissen | 4 |
| 1.2. Grundlagen | 4 |
| 1.2.1. Was ist Interferenz? | 4 |
| 1.2.2. Räumliche Interferenzmuster | 6 |
| 1.2.3. Interferometrische Messverfahren | 7 |
| 2. Versuchsaufbau | 7 |
| 2.1. Komponenten der einzelnen Experimente | 7 |
| 2.2. Anordnung der einzelnen Komponenten | 9 |
| 3. Versuchsdurchführung | 10 |
| 3.1. Michelson-Interferometer | 11 |
| 3.1.1. Qualitative Untersuchungen | 11 |
| 3.1.2. Intensitätsmessungen | 12 |
| 3.1.3. Hochgenaue Längenmessung | 12 |
| 3.1.4. Schwingungsmessung | 13 |
| 3.2. Speckle-Interferometrie | 13 |
| 3.2.1. Speckle-Effekt | 14 |
| 3.2.2. Speckle-Interferometrie | 14 |
| 4. Versuchsauswertung | 15 |
| 4.1. Michelson-Interferometer | 15 |
| 4.1.1. Intensitätsmessungen | 15 |
| 4.1.2. Hochgenaue Längenmessung | 16 |
| 4.1.3. Schwingungsmessung | 16 |
| 4.2. Speckle-Interferometrie | 16 |
| 4.2.1. Speckle-Interferometrie | 16 |
| 5. Forschungspräsentation | 16 |

1. Einführung

1.1. Vorwissen

Sie sollten folgende Fragen beantworten können:

- Warum wird bei der Interferometrie das Licht eines Lasers verwendet?
- Warum können anhand eines interferometrischen Verfahrens z.B. sehr kleine Längenänderungen gemessen werden?
- Was bedeutet der Begriff „Interferenz“?
- Aus welchen wesentlichen Teilen ist ein Michelson-Interferometer aufgebaut und wie verlaufen die entsprechenden Strahlengänge?
- Wie groß muss die Kohärenzlänge des Lichts mindestens sein, damit noch ein Interferenzbild im Michelson-Interferometer sichtbar ist?
- Welche physikalische Größe muss bei der Interferenz zweier kohärenter Strahlenbündel (vektoriell) addiert werden?
- Bei einem idealen Michelson-Interferometer mit ebenen Wellenfronten kann der ganze Beobachtungsschirm dunkel sein (destruktive Interferenz), obwohl zwei Lichtwellen dort auftreffen. Was passiert in diesem Fall mit der Lichtleistung (Stichwort: Energieerhaltung)?

1.2. Grundlagen

Die optische Interferometrie ist ein Messverfahren, welches sich die Wellennatur des Lichts und die damit verbundene Interferenz von Wellen zunutze macht. Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegt im Bereich von etwa 350 nm (blau) bis etwa 700 nm (rot). Die Auflösung interferometrischer Messapparaturen ist daher grundsätzlich besser als $1\ \mu\text{m}$ (1000 nm). Mit Hilfe dieser hoch empfindlichen Interferometrie kann man so z.B. kleinste Formveränderungen von Werkstücken detektieren und diese auch quantifizieren. Eine bekannte Anwendung ist zum Beispiel die Schwingungsanalyse von Karosserieteilen in der Automobilindustrie.

1.2.1. Was ist Interferenz?

Interferenzphänomene treten stets im Zusammenhang mit Wellen auf, und zwar unabhängig davon, welcher physikalischer Natur die Wellen sind. So beobachtet man Interferenz nicht nur bei elektromagnetischen Wellen (wozu auch sichtbares Licht gehört), sondern auch bei mechanischen Wellen, wie z.B. Schallwellen oder Wasserwellen. Insbesondere bei Wasserwellen ist Interferenz sehr anschaulich vorstellbar. Überlagern sich Wasserwellen, so entsteht eine neue Struktur der Wellenbewegung, mit Bereichen starker Wellenauslenkung und Bereichen, in denen keine oder nur sehr schwache Wellenauslenkung stattfindet. Das Zustandekommen der neuen Wellenstruktur kann leicht erklärt werden: Treffen beispielsweise zwei Wellenberge zusammen, so werden sie sich zu einem noch höheren

Berg auftürmen, was gewissermaßen einer Verstärkung entspricht. Bei zwei Wellentälern passiert genau das gleiche, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen, d.h. das Tal wird noch tiefer. Treffen sich aber ein Berg und ein Tal, dann wird letzteres quasi durch den Berg aufgefüllt, die beiden löschen sich also gegenseitig aus.

Um Interferenz mathematisch zu beschreiben benötigt man zuerst einen Ansatz für die einzelne Welle. Im Falle von Licht (oder allgemein elektromagnetischen Wellen) macht man folgenden Ansatz einer ebenen Welle für die elektrische Feldstärke $\vec{E}(\vec{r}, t, \phi)$ (vorzugsweise in komplexer Schreibweise):

$$\vec{E}(\vec{r}, t, \phi) = \vec{E}_0 \cdot \exp \left[i \left(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t + \phi \right) \right] . \quad (1.1)$$

Für die mit einem Detektor messbare Lichtintensität dieser Welle erhält man:

$$I = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \left| \vec{E}(\vec{r}, t, \phi) \right|^2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2 \quad \text{mit} \quad E_0 = \left| \vec{E}_0 \right| . \quad (1.2)$$

Wir wollen nun damit die Interferenz zweier kohärenter Wellen beschreiben, die sich mit gleicher Amplitude (und auch gleicher Polarisationsrichtung) entlang derselben Richtung des Wellenvektors \vec{k} ausbreiten. Kohärenz bedeutet, dass die beiden Wellen den gleichen Wellenvektorbetrag bzw. die gleiche Frequenz und eine feste Phasenbeziehung zueinander besitzen. Lediglich die absolute Phasenlage der beiden Wellen kann sich unterscheiden. Die Addition der elektrischen Felder beider Wellen führt uns zur Interferenz:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{gesamt}}(\vec{r}, t, \phi_1, \phi_2) &= \vec{E}_1(\vec{r}, t, \phi_1) + \vec{E}_2(\vec{r}, t, \phi_2) = \\ &= \vec{E}_0 \cdot \exp \left[i \left(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t + \phi_1 \right) \right] + \vec{E}_0 \cdot \exp \left[i \left(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t + \phi_2 \right) \right] = \\ &= \vec{E}_0 \cdot \exp \left[i \left(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t + \phi_1 \right) \right] \cdot \left(1 + \exp \left[i \left(\phi_2 - \phi_1 \right) \right] \right) . \end{aligned} \quad (1.3)$$

Für die Intensität der überlagerten Wellen ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} I_{\text{gesamt}} &= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \left| \vec{E}_{\text{gesamt}}(\vec{r}, t, \phi_1, \phi_2) \right|^2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2 \cdot \left| 1 + \exp \left[i \left(\phi_2 - \phi_1 \right) \right] \right|^2 = \\ &= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2 \cdot 2 \cdot \left(1 + \cos \phi_{21} \right) \quad \text{mit} \quad \phi_{21} = \phi_2 - \phi_1 . \end{aligned} \quad (1.4)$$

Man erhält also einen stationären (zeitunabhängigen) Interferenzterm, der nur vom Phasenunterschied ϕ_{21} zwischen beiden Wellen abhängt. Beträgt der Phasenunterschied ein ungerades Ganzzahliges von π ($\dots, -3\pi, -\pi, \pi, 3\pi, \dots$), so führt dies zu *destruktiver Interferenz* (Interferenzminimum) und für die Intensität gilt $I_{\text{gesamt}} = 0$. Beträgt der Phasenunterschied jedoch ein gerades Ganzzahliges von π ($\dots, -2\pi, 0, 2\pi, \dots$), so ergibt sich *konstruktive Interferenz* (Interferenzmaximum) und für die Intensität erhält man $I_{\text{gesamt}} = 4 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2$. In diesem Fall ist die Intensität der überlagerten Wellen also viermal so groß wie die Einzelintensität (und nicht doppelt so groß, wie man es erwarten würde, wenn man statt der elektrischen Felder die Intensitäten addieren würde).

Interferenz tritt natürlich auch bei nicht kohärenten Wellen auf, da sich (im Falle elektromagnetischer Wellen) die elektrischen Felder von zwei Wellen immer zu einer Gesamtfeldstärke

addieren. Allerdings ist der Interferenzterm dann nicht stationär. Dies bedeutet, dass sich Interferenzminima und -maxima in schneller Folge abwechseln, für den Beobachter mittelt sich der Interferenzeffekt zeitlich weg. Die so entstehende Gesamtintensität erhält man dann einfach wieder durch Addition der Einzelintensitäten.

1.2.2. Räumliche Interferenzmuster

Bei der Interferenz zweier ebener, kohärenter Wellen, die sich parallel entlang einer Richtung ausbreiten, erhält man auf einem Beobachtungsschirm eine einheitliche, mehr oder weniger hohe Lichtintensität. Wie oben gezeigt hängt die Intensität nur von der Phasendifferenz zwischen beiden Wellen ab. In der Praxis ist dieser Fall aber nur sehr schwer oder zumindest nur mit erhöhtem Aufwand realisierbar. In den meisten Fällen kommt es zu Abweichungen davon, da man es nicht mit ideal ebenen Wellen zu tun hat bzw. die Wellen nicht perfekt parallel zueinander ausgerichtet sind.

Dies führt dazu, dass sich über den Strahlquerschnitt unterschiedliche Phasendifferenzen zwischen den beiden Wellen ergeben, auf einem Beobachtungsschirm erhält man dann ein Interferenzmuster, d.h. eine Abfolge von benachbarten Interferenzmaxima und -minima. Wenn zum Beispiel zwei ebene Wellen etwas verkippt zueinander auf den Schirm treffen, so ergibt sich am Schirm eine Phasendifferenz ϕ_{21} , die sich entlang des Schirms linear ändert. Wegen Gl. 1.4 sollte dann die Intensität cosinusförmig entlang der Verkipprichtung moduliert sein.

Das Zustandekommen der Interferenzmuster kann man sich anschaulich klar machen, indem man einfache Streifenmuster, die die jeweilige Welle darstellen, überlagert. Da man daraus aber keine wirkliche konstruktive bzw. destruktive Interferenz ablesen kann, ist dies jedoch nur als vereinfachtes Anschauungsmodell zu sehen.

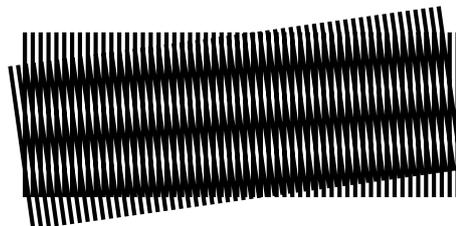


Abb. 1: Schema der Überlagerung zweier ebener Wellen. Die schwarzen Balken stellen die Wellenfronten dar, die Ausbreitungsrichtung ist senkrecht zu diesen. (Eine Wellenlänge würde hier dem Abstand zwischen einem Balken und seinem übernächsten Nachbarn entsprechen. Deutlich zu erkennen ist das sich ergebende Interferenzmuster. Die dunklen Bereiche stellen hier abwechselnd Maxima und Minima dar.)

Der Fall zweier (idealer) ebener Wellen, die unter einem gewissen Winkel zueinander verlaufen, ist in Abb. 1 zu sehen. Man kann sich leicht vorstellen, dass auf einem Beobachtungsschirm ein regelmäßiges Muster aus hellen und dunklen Streifen entsteht, welche senkrecht zur Zeichenebene orientiert sind.

Den Fall, dass eine ebene Welle von einer divergenten Welle (mit kugelförmiger Wellenfront) überlagert wird, kann in Abb. 2 betrachtet werden. Man kann sich vorstellen, dass auf einem Beobachtungsschirm ein konzentrisches Ringsystem aus abwechselnd hellen und dunklen Bereichen entsteht.

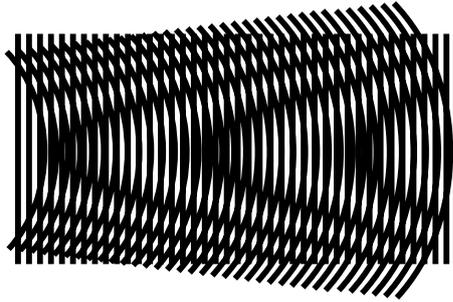


Abb. 2: Schema der Überlagerung zweier Wellen mit ebener und gekrümmter Wellenfront

Am Praktikumsplatz liegen Transparentfolien mit entsprechenden Streifenmustern aus. Damit können Sie sich den geschilderten Sachverhalt nochmals vor Augen führen.

1.2.3. Interferometrische Messverfahren

Wie in Kap. 1.2.1. gezeigt wurde, können bei der Interferenz zweier kohärenter Wellen Interferenzmaxima bzw. -minima entstehen. Um aus einem Maximum ein Minimum zu erzeugen (bzw. umgekehrt) muss sich der Phasenunterschied ϕ_{21} zwischen den beiden Wellen um $\Delta\phi_{21} = \pi$ ändern. Dies kann zum Beispiel dadurch erreicht werden, dass man die Laufstrecke einer der beiden Wellen um $\Delta x = \frac{\Delta\phi_{21}}{2\pi} \cdot \lambda = \frac{\lambda}{2}$ vergrößert oder verringert. Es liegt nahe, dieses Prinzip für Weglängenmessungen heranzuziehen. Da bei sichtbarem Licht für die Wellenlänge $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$ gilt, wird deutlich, dass mit optischer Interferometrie hoch präzise Längenmessungen möglich sind.

Ein bekannter Aufbau zur Interferometrie ist das Michelson-Interferometer. Hier werden zwei zueinander kohärente Lichtwellen erzeugt, indem man ein primäres Lichtbündel durch einen Strahlteiler (halbdurchlässiger Spiegel) in zwei Teilbündel aufteilt¹. Um eine hinreichend große Kohärenzlänge zu haben, wird als Lichtquelle in der Regel ein Laser verwendet. Die beiden Teilwellen werden jeweils über einen Umlenkspiegel zum Strahlteiler zurück reflektiert, von wo aus sie überlagert zum Beobachtungsschirm geleitet werden². Eine der beiden Teilwellen dient dabei als Referenz, deren Phase unverändert bleibt. Die andere Teilwelle wird als Messwelle verwendet, die in einer Phasenverschiebung den zu messenden Effekt trägt. Der Messeffekt kann zum Beispiel darin bestehen, dass der zugehörige Umlenkspiegel verschoben wird.

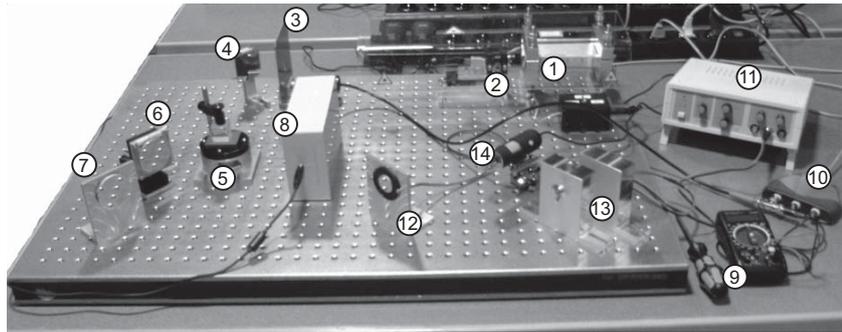
2. Versuchsaufbau

2.1. Komponenten der einzelnen Experimente

Es stehen Ihnen für dieses Experiment folgende, zum Teil teure, Komponenten zur Verfügung (vgl. Abb. 3):

¹In anderen Bereichen ist es oft einfacher zwei zueinander kohärente Wellen zu erzeugen. Bei Schallwellen muss man z.B. nur zwei Lautsprecher an denselben Verstärkerausgang anschließen, bei Radiowellen entsprechend zwei Antennen an denselben Senderausgang.

²Präziser ausgedrückt wird jeweils nur die halbe Wellenamplitude zum Schirm geführt, der restliche Teil wird zum Laser zurück reflektiert.



| | | |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| ① Laser | ⑤ Strahlteiler | ⑩ Datenlogger |
| ② Raumfilter | ⑥ Spiegel (justierbar) | ⑪ Funktionsgenerator |
| ③ Sammellinse | ⑦ Spiegel (nicht justierbar) | ⑫ Lautsprecher mit Spiegel |
| ④ Umlenkspiegel | ⑧ aktiver Beobachtungsschirm | ⑬ Alu-Körper |
| Hier bitte nichts verändern ! | | |
| | ⑨ Multimeter | ⑭ Digital-Kamera |

Abb. 3: Versuchsaufbau

- grüner Diodenlaser (Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$)
- nicht justierbarer Spiegel (Oberflächenebenheit besser $\lambda/4$)
- justierbarer Spiegel (Oberflächenebenheit besser $\lambda/4$), der zudem senkrecht zur Spiegeloberfläche mit einem Lineartisch verschiebbar gelagert ist
- Strahlteilerwürfel (nicht polarisierend)
- aktiver Beobachtungsschirm mit Lichtsensor zur Intensitätsmessung
- Digitalmultimeter
- Lautsprecher mit aufgeklebtem Spiegel
- Funktionsgenerator
- deformierbarer Aluminiumkörper
- nicht deformierbarer Aluminiumkörper
- Digitalkamera
- Computer mit angeschlossenem Datenlogger und Bildverarbeitungssoftware

ACHTUNG: Bitte behandeln Sie die optischen Komponenten pfleglich, d.h. fassen Sie sie nur an den Metallsockeln an, nicht an den optischen Flächen. Achten Sie bitte auch darauf, dass Ihnen die Halterungen nicht umkippen und auf die Spiegelflächen fallen. Sollten Sie aus Versehen einmal auf einen Spiegel oder eine andere optische Fläche fassen und dabei einen Fingerabdruck hinterlassen, wischen Sie diesen bitte nicht (!) weg, sondern sagen Sie es Ihrem Betreuer. Für das Gelingen des Experiments spielen ein paar Fingerabdrücke oder auch Staubkörner keine Rolle, solange es nicht

zu viele werden.

Hinweis: Der Diodenlaser besitzt eine Aufwärmzeit von max. 15 min. Schalten Sie daher den Laser gleich ganz zu Beginn ein.

Der aktive Beobachtungsschirm weist auf Höhe der Strahlmitte eine Öffnung mit einem Durchmesser von 1,5 mm auf, hinter der sich ein Lichtsensor (Phototransistor) befindet. Das Ausgangssignal dieses aktiven Beobachtungsschirms ist direkt proportional zur detektierten Lichtintensität und nimmt einen Wert zwischen 0V und maximal ungefähr -15V an. (Bei einer Spannung von -15V ist die maximal detektierbare Lichtintensität erreicht).

Da der Lichtsensor sehr empfindlich darauf reagiert, unter welchem Winkel der Strahl einfällt, achten Sie bitte darauf, dass der Einfall stets senkrecht erfolgt. Verändern Sie auch während einer Messreihe die Position und Stellung des aktiven Beobachtungsschirms nicht, da dies die Messergebnisse verfälschen würde.

ACHTUNG: Bei diesem Experiment wird ein Diodenlaser der Klasse 2 mit einer Gesamtleistung von max. 1 mW eingesetzt¹. Bei dieser Laserklasse wird davon ausgegangen, dass das Auge (im Normalfall) durch den natürlichen Lidschlussreflex hinreichend geschützt sein sollte. Das hier verwendete grüne Laserlicht hat gegenüber rotem Laserlicht den Vorteil, dass das menschliche Auge hierfür deutlich empfindlicher ist. So kommt man mit geringeren Lichtleistungen (und damit geringerem Gefährdungspotential) aus und erzielt trotzdem eine ausreichende Helligkeit. Beim vorliegenden Aufbau kommt hinzu, dass der Strahl in der Regel auf 20 mm aufgeweitet ist. So ist die Lichtleistung pro Fläche nochmal deutlich reduziert, wodurch sich das Gefährdungspotential weiter einschränkt.

Dennoch stellt Laserstrahlung grundsätzlich für das Auge ein Gefahrenpotential dar! Bei direktem Blick in den Strahlengang, auch in den aufgeweiteten Strahlengang, können Netzhautverbrennungen auftreten². Schäden, die durch Laserstrahlung am Auge entstehen, sind in der Regel irreparabel.

Blicken Sie daher beim Experimentieren niemals direkt in den Laserstrahl! Vermeiden Sie es ebenfalls, den Strahl beim Hantieren unkontrolliert in unbeabsichtigte Richtungen abzulenken. Es ist aus diesem Grund auch durchaus ratsam, Schmuck und Uhren von den Händen zu entfernen.

2.2. Anordnung der einzelnen Komponenten

Bereits montiert sind die ersten drei Komponenten nach dem Laser: Das *Raumfiltersystem*³ (bestehend aus einem Mikroskopobjektiv und einer Lochblende), eine *Sammellinse* zur Parallelisierung des Laserstrahls und ein *Umlenkspiegel*. Diese Komponenten sind bereits justiert und dürfen nicht verändert werden! Insgesamt liefert Ihnen diese Anordnung einen

¹In diese Klasse fallen auch handelsübliche, für Präsentationszwecke zugelassene, Laserpointer.

²Bei starken Lasern (z.B. Argon-Ionen-Laser) kann sogar schon der Blick in das an Oberflächen diffus gestreute Laserlicht gefährlich sein.

³Durch den Raumfilter entsteht ein homogener aufgeweiteter Strahl ohne störende Strukturen, die insbesondere aufgrund von Beugungseffekten an Verunreinigungen der optischen Komponenten entstehen können.

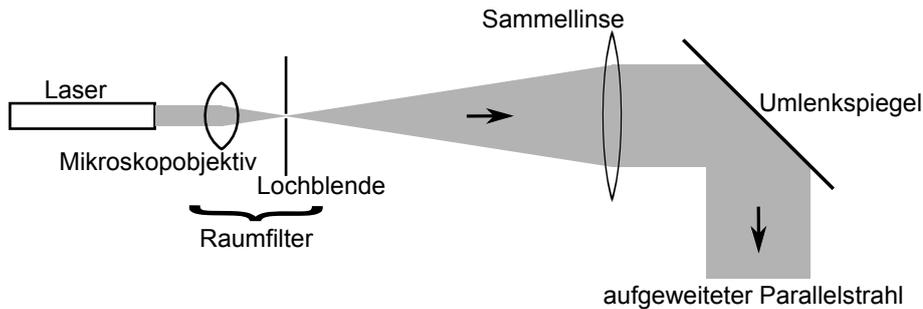


Abb. 4: Schematischer Strahlengang durch die Laseroptik

parallelen Laserstrahl mit einem Durchmesser von 20 mm (vgl. Abb. 4). Sollte dies nicht der Fall sein, so verständigen Sie bitte Ihren Betreuer.

3. Versuchsdurchführung

In der Wissenschaft ist das Erstellen eines detaillierten Versuchsprotokolls sehr wichtig, denn es macht den Ablauf Ihrer Arbeit für eine spätere Auswertung nachvollziehbar. Ebenso ist eine lückenlose Dokumentation wichtig, falls ein Experiment z.B. aufgrund neuer Erkenntnisse wiederholt werden soll. Auch können bei längeren Experimenten Probleme auftauchen, und Ihre Partner müssen die genaue Vorgeschichte nachlesen können. So ist in erster Linie der Inhalt des Protokolls wichtig, nicht seine äußere Form. Allerdings soll es auch für andere nachvollziehbar sein und muß deshalb übersichtlich und sauber geführt werden.

Skizzieren Sie zunächst den Versuchsaufbau sowie ggf. einen Schaltplan und beschriften Sie die Zeichnung mit relevanten Informationen (z.B.: Abmessungen, verwendete Substanzen, ...). Alle weiteren Eintragungen in Ihr Versuchsprotokoll müssen zeitnah und deshalb während der Versuchsdurchführung erfolgen: Schreiben Sie sich hierzu wichtige Beobachtungen auf und dokumentieren Sie alle erforderlichen Versuchsparameter (z.B.: Ströme, Spannungen, Widerstände, ...) zusammen mit den Einstellungen der Netzteile und Messgeräte (z.B.: Strom-, Spannungsbereiche, Wechsel- oder Gleichspannung, ...). Vergessen Sie dabei bitte nicht Ihre Messwerte aufzuschreiben! Notieren Sie sich ferner auch Ideen bzw. Dinge, die Sie nicht verstehen.

In diesem Experiment soll in zwei Schritten ein näherer Einblick in die Technik der Interferometrie vermittelt werden:

1. Zum Verständnis der Grundlagen soll zunächst ein einfaches *Michelson-Interferometer* aufgebaut und ausprobiert werden. Dabei sollte anschaulich deutlich werden, wie hoch genaue Längenmessungen, sowohl im statischen wie auch im dynamischen Fall, interferometrisch möglich sind.
2. Anschließend erfolgt der Umbau zu einem *Speckle-Interferometer*, mit welchem anwendungsnahe Deformationsmessungen demonstriert werden sollen. Hierbei muss auf computerunterstützte Bildverarbeitung zurückgegriffen werden.

3.1. Michelson-Interferometer

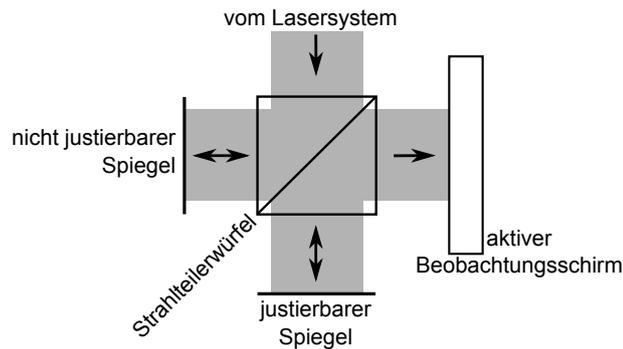


Abb. 5: Aufbau des Michelson-Interferometers

Die ersten Messaufgaben werden mit Hilfe eines Michelson-Interferometers durchgeführt. Bauen Sie diese Anordnung gemäß Abb. 5 auf.

Wenn Sie alles richtig gemacht (und etwas Glück) haben, sollten Sie nun viele Interferenzstreifen auf dem Schirm beobachten können. Die Anzahl der Streifen ist vom Winkel abhängig, den die beiden überlagerten Strahlbündel miteinander einschließen. Die Anzahl wächst dabei mit zunehmendem Winkel. Ist jedoch der Winkel zwischen den beiden Bündeln zu groß, dann liegen die Streifen so dicht beieinander, dass man sie nicht erkennen kann. Versuchen Sie in diesem Fall durch Kippen des justierbaren Spiegels mit Hilfe der Einstellschrauben ein sichtbares Interferenzmuster zu bekommen.

Hinweis: Gehen Sie systematisch vor, indem Sie auf der - dem Laser abgewandten - Seite der Lochblende (des Raumfilters) die Fokuspunkte der beiden Teilstrahlen betrachten, die zur Hälfte vom Strahlteiler zurück reflektiert werden. Diese beiden Fokuspunkte müssen Sie zur Deckung bringen. Wenn es gar nicht klappen will, lassen Sie sich von Ihrem Betreuer helfen.

Sie können den Winkel und damit die Zahl der Interferenzstreifen mit den beiden Einstellschrauben des justierbaren Spiegels variieren. Für den Fall, dass beide Bündel exakt parallel sind, sollte sich theoretisch eine einheitliche, mehr oder weniger helle Fläche ohne Streifen ergeben. Dies gilt aber nur für absolut ebene Wellenfronten. Im Experiment hat man es in der Regel immer mit leicht verzerrten Wellenfronten zu tun. Hauptursache hierfür sind „Fehler“ der optischen Elemente im Strahlengang, also zum Beispiel des Strahlteilers und der Spiegel. Sind die Spiegel nicht absolut plan, dann verzerren sie unweigerlich die Wellenfront. Das Ergebnis ist damit also keine einheitlich helle oder dunkle Fläche, sondern ein Interferenzmuster mit bestenfalls maximalen Abständen zwischen hellen und dunklen Bereichen. Versuchen Sie den Spiegel so einzustellen, dass Sie möglichst wenige Streifen bzw. Ringe sehen.

3.1.1. Qualitative Untersuchungen

Versuchen Sie ein Gefühl dafür zu bekommen, wie leicht das Interferenzmuster beeinflusst werden kann:

- Drücken Sie nacheinander leicht gegen den Halter des justierbaren bzw. nicht justierbaren Spiegels, gegen die Halterung des Strahlteilers sowie direkt auf die

Grundplatte des Versuchsaufbaus. Wie reagiert das Interferenzmuster? Wie sollten Sie sich daher bei den nachfolgenden Interferenzexperimenten verhalten?

- Lassen Sie etwas Feuerzeuggas (ohne Flamme) in einen der beiden Teilstrahlengänge strömen. Was beobachten Sie? Können Sie die Beobachtung erklären?
- Kippen Sie den justierbaren Spiegel so, dass Sie einige wenige Streifen am Schirm erhalten. Wenn Sie nun langsam am Einstellknopf des Lineartisches drehen, so sollten Sie eine (mehr oder weniger schnelle) Abfolge von sich abwechselnden Intensitätsmaxima und Intensitätsminima beobachten können. Wie weit (in Einheiten der Lichtwellenlänge) haben Sie den Tisch verschoben, wenn aus einem Maximum ein Minimum und dann wieder ein Maximum wird?
- Wenn Sie den Tisch im Bereich eines oder mehrerer Millimeter verschieben, werden Sie evtl. sehen, dass sich der Kontrast zwischen Maxima und Minima periodisch verschlechtert und verbessert¹. Stellen Sie den Tisch so ein, dass Sie einen möglichst hohen Kontrast erhalten.

3.1.2. Intensitätsmessungen

Stellen Sie den Beobachtungsschirm so auf, dass Sie (nicht zu nahe am Rand des Interferenzflecks) die Intensität detektieren können. Achten Sie auf senkrechten Lichteinfall und darauf, dass sich die Position des Schirms während der Messreihe nicht ändert. Messen Sie mit dem angeschlossenen Multimeter (DC-Messbereich) folgende Ausgangsspannungen des Schirms unter den jeweils nebenstehenden Bedingungen:

- U_1 : Strahlengang zum justierbaren Spiegel unterbrochen
- U_2 : Strahlengang zum nicht justierbaren Spiegel unterbrochen
- U_{\max} : Photodetektor im Interferenzmaximum
- $U_{\text{gemittelt}}$: Messung, während Sie den Lineartisch (schnell) verdrehen (also zeitliches Mittel des sich ändernden Interferenzmusters)

Dokumentieren Sie alle für die spätere Auswertung notwendigen Parameter und Messwerte (z.B. U_1 , U_2 , U_{\max} und $U_{\text{gemittelt}}$) in Ihrem Versuchsprotokoll.

3.1.3. Hochgenaue Längenmessung

Bei dieser Messaufgabe soll demonstriert werden, wie mit Interferometrie hoch präzise Längenmessungen bzw. Positionierungen möglich sind. Dazu soll mit dem verschiebbaren Tisch der justierbare Spiegel um $10 \mu\text{m}$ (gemäß Skala am Drehknopf) verschoben und der genaue Verschiebungsweg interferometrisch durch Auszählen der durchlaufenen Interferenzmaxima (bzw. -minima) bestimmt werden.

¹Dies wird dadurch verursacht, dass der Laser evtl. nicht nur eine, sondern mehrere unterschiedliche Schwingungsformen (Lasermode) aussendet. Jede dieser Moden erzeugt ein eigenes Interferenzmuster, deren Intensitäten sich überlagern.

Der Drehknopf des Tisches besitzt eine Einteilung von $1/100$ mm. Bedenken Sie, dass die Spindel des Tisches eventuell ein gewisses Spiel aufweist, das heißt, Sie sollten bei der Messung in derselben Richtung drehen, in der Sie unmittelbar vorher gedreht haben. In der Regel ist es auch von Vorteil, den Drehknopf über den passenden Inbusschlüssel zu betätigen. Falls Sie Probleme haben, die Skala gut ablesen zu können, so kann die Beleuchtung an der Digitalkamera hilfreich sein.

Das Mitzählen der Intensitätsmaxima per Auge stellt hier kein zuverlässiges Verfahren mehr dar. Daher wird bei dieser Messung der Intensitätsverlauf am Detektor des Schirms mit einem Datenlogger aufgezeichnet². Starten Sie dazu das Programm *EasyLogger* auf dem Computer. Mit dieser Software wird das Spannungssignal über der Zeit fortlaufend aufgezeichnet. Eine Beschreibung der wichtigsten Bedienelemente des Programms finden Sie am Messplatz. Um keine unnötig langen und unübersichtlichen Dateien zu erzeugen, starten bzw. stoppen Sie die Aufzeichnung möglichst kurz vor bzw. nach dem Schieben des Tisches.

Koordinieren Sie sich bei diesem Experiment mit Ihrem Teamkollegen, d.h. einer dreht am Tisch, der andere bedient die Software. Dokumentieren Sie alle für die spätere Auswertung notwendigen Parameter und Messwerte in Ihrem Versuchsprotokoll und speichern Sie die Aufzeichnung auf einem USB-Stick ab.

3.1.4. Schwingungsmessung

Die Messung von Verschiebungen, die Sie im vorigen Versuch kennengelernt haben, ist prinzipiell natürlich nicht auf statische bzw. langsame Vorgänge beschränkt. Es lassen sich damit zum Beispiel auch Vibrationen analysieren.

Ersetzen Sie dazu den nicht justierbaren Spiegel im Michelson-Interferometer durch den Lautsprecher mit aufgeklebtem Spiegel und stellen Sie ein Interferenzmuster ein, welches möglichst wenige Streifen aufweist. Der Lautsprecher ist an einen Funktionsgenerator angeschlossen, welcher definierte Spannungssignale erzeugen kann.

Stellen Sie den Funktionsgenerator auf ein sinusförmiges Signal und die Frequenz auf 1 Hz ein. Drehen Sie die Amplitude hoch und wieder zurück. Was beobachten Sie (per Auge) am Schirm?

Erhöhen Sie nun die Frequenz am Funktionsgenerator auf 100 Hz und stellen Sie die Amplitude auf einen mittleren Wert ein. Das per Auge sichtbare Interferenzmuster sollte nun verschwinden. Zeichnen Sie mit dem Datenlogger für einige Sekunden den Spannungsverlauf des aktiven Schirms auf. Dokumentieren Sie alle für die spätere Auswertung notwendigen Parameter und Messwerte in Ihrem Versuchsprotokoll und speichern Sie die Aufzeichnung auf einem USB-Stick ab.

3.2. Speckle-Interferometrie

Alle bisher untersuchten Messverfahren hatten die Einschränkung, dass die beiden Teilstrahlen im Interferometer mit Spiegeln zurück reflektiert wurden. In der Praxis kann aber der Fall auftreten, dass es nicht möglich oder sinnvoll ist, auf dem Messobjekt einen Spiegel anzubringen. Eine Lösung bietet hier die Speckle-Interferometrie, bei der man nicht

²Ein Datenlogger erfüllt eine ähnliche Aufgabe wie ein digitales Speicheroszilloskop.

mit reflektierten, ebenen Lichtwellen arbeitet, sondern mit dem von Oberflächen diffus gestreuten Licht.

Bauen Sie das Michelson-Interferometer zu einem Speckle-Interferometer um, indem Sie den justierbaren Spiegel durch den verformbaren Aluminiumkörper (mit der Flügelmutter auf der strahlabgewandten Seite) und den nicht justierbaren Spiegel durch den nicht verformbaren Aluminiumkörper ersetzen. Da das Licht an den Aluminiumkörpern diffus gestreut wird, entsteht natürlich kein gerichteter Strahlengang zum Beobachtungsschirm mehr. Beim Speckle-Interferometer wird der Beobachtungsschirm durch die Digitalkamera ersetzt, die direkt in den Strahlteilerwürfel blickt. Die Digitalkamera sieht dann die Interferenz des Lichts vom deformierbaren Aluminiumkörper (Messobjekt) und vom nicht deformierbaren Aluminiumkörper (Referenzobjekt).

3.2.1. Speckle-Effekt

Verursacht durch Oberflächenrauigkeiten entsteht das Speckle-Muster, welches dem Lichtfleck eines Lasers eine granulare Struktur verleiht.

Beobachten Sie den Speckle-Effekt auf einem der beiden Aluminiumkörper. Variieren Sie den Betrachtungswinkel. Falls Sie Brillenträger sind, beobachten Sie das Speckle-Muster auch ohne Brille. Sehen Sie das Speckle-Muster immer noch scharf? Versuchen Sie sich klar zumachen, wie das Speckle-Muster genau entsteht und wie Sie Ihre Beobachtungen erklären können.

3.2.2. Speckle-Interferometrie

Nehmen Sie als erstes die Digitalkamera in Betrieb, indem Sie das Programm *MicroCapture* auf dem Computer starten. Richten Sie die Digitalkamera so aus, dass die beiden überlagerten Lichtflecke auf den Aluminiumkörpern etwa in der Bildmitte liegen. Die Abstände beider Aluminiumkörper zum Strahlteiler sollten ungefähr gleich sein, damit die beiden abgebildeten Lichtflecke den gleichen Durchmesser haben. Verschieben Sie den verformbaren Aluminiumkörper so, dass der Schraubenkopf am Rand des Lichtflecks liegt. Stellen Sie die Digitalkamera auf die Oberfläche der Aluminiumkörper (zum Beispiel auf den Schraubenkopf) scharf.

Möglicherweise können Sie in dem überlagerten Lichtfleck eine Intensitätsstruktur (Streifenmuster) erkennen, die darauf zurückzuführen ist, dass neben der diffusen Lichtstreuung auch eine gewisse Reflexion von den Körperoberflächen ausgeht. Versuchen Sie in diesem Fall durch Drehen von einem der Aluminiumkörper die Intensitätsstruktur zu unterdrücken, sodass ein möglichst homogenes Speckle-Bild entsteht.

Die Messprozedur besteht aus folgenden Schritten:

- Lockern Sie (falls notwendig) die Flügelmutter am verformbaren Aluminiumkörper und ziehen Sie sie ganz leicht an, damit die Schraube etwas geklemmt ist. Dies stellt den mechanischen Ausgangszustand dar. Nehmen Sie nun ein Bild mit der Digitalkamera auf und speichern Sie es auf dem Desktop ab. Vermeiden Sie Erschütterungen des Aufbaus während der Aufnahme.

- Ziehen Sie nun die Flügelmutter etwas kräftiger an. Dadurch wird der Aluminiumkörper gequetscht. Nehmen Sie nun nochmals ein Bild auf und speichern Sie auch dieses ab. Führen Sie die bisher beschriebenen Schritte möglichst zügig durch, damit zwischen den beiden Bildern keine zu lange Zeitdauer liegt.
- Sie werden weder auf dem einen noch auf dem anderen Bild auswertbare Strukturen erkennen können. Trotzdem unterscheiden sich die beiden Bilder im jeweils aufgezeichneten Speckle-Muster. In diesem Unterschied ist die Verzerrung des deformierten Aluminiumkörpers enthalten. (Wenn Sie an das Michelson-Interferometer mit den Spiegeln zurückdenken, welche damalige Beobachtung ist analog zum Vergleichen der beiden Bilder?) Um den Unterschied zwischen den beiden Speckle-Mustern (also den beiden Intensitätsverteilungen) herauszuextrahieren ist es am einfachsten, die beiden Bilder mit Bildverarbeitungssoftware voneinander zu subtrahieren³. Verwenden Sie dazu das Programm *ImageJ*, eine Kurzbeschreibung zur Programmbedienung finden Sie am Messplatz.
- Betrachten Sie das Differenzbild und passen Sie gegebenenfalls den Kontrast an, um ein deutlicheres Bild zu erhalten.
- Dokumentieren Sie alle für die spätere Auswertung notwendigen Parameter und Messwerte in Ihrem Versuchsprotokoll und speichern Sie das Differenzbild auf einem USB-Stick ab.

Wichtiger Hinweis zum Verständnis: Durch die Subtraktion der beiden Bilder wird kein neues physikalisches Messprinzip eingeführt! Das Grundprinzip der Messung ist beim Michelson-Interferometer und beim Speckle-Interferometer identisch. Während man jedoch im ersten Fall „globale“ Minima-Maxima-Strukturen erhält (die man dann für verschiedene Bedingungen auch unterscheiden kann), entstehen im zweiten Fall Speckle-Muster, deren Unterschied man nur mit Hilfe von Bildverarbeitung feststellen kann.

4. Versuchsauswertung

Fertigen Sie, wie in Kap. 5. beschrieben, als Versuchsauswertung bitte eine Forschungspräsentation an. Dokumentieren Sie hierzu Ihre Ergebnisse aus der Versuchsdurchführung, diskutieren Sie diese sowie gegebenenfalls entstandene Auffälligkeiten ausführlich.

4.1. Michelson-Interferometer

4.1.1. Intensitätsmessungen

Berechnen Sie aus den gemessenen Spannungen das Strahlteilverhältnis U_1/U_2 , das Verhältnis der Intensität im Maximum zur Einzelintensität U_{\max}/U_1 bzw. U_{\max}/U_2 und das Verhältnis der gemittelten Intensität zur Einzelintensität $U_{\text{gemittelt}}/U_1$ bzw. $U_{\text{gemittelt}}/U_2$. Decken sich die Messergebnisse mit den theoretischen Erwartungen?

³Ein digitales Bild stellt eine Tabelle von Helligkeitswerten (für jedes Pixel ein Zahlenwert) dar, eventuell getrennt für jede der drei Farben bei einem Farbbild. Wenn man zwei Bilder voneinander subtrahiert, so werden pixelweise diese Helligkeitswerte voneinander subtrahiert.

4.1.2. Hochgenaue Längenmessung

Zählen Sie die Zahl der durchlaufenen Maxima bzw. Minima in der Aufzeichnung. Mit Hilfe der Lichtwellenlänge des Lasers können Sie nun die tatsächliche Verschiebung des Spiegels auf circa eine halbe Wellenlänge genau berechnen. Wie groß ist die Abweichung von den geplanten $10\ \mu\text{m}$?

4.1.3. Schwingungsmessung

Können Sie die aufgezeichnete Kurvenform erklären? Ermitteln Sie quantitativ, wie weit der Spiegel auf dem Lautsprecher insgesamt hin- und herschwingt und wie groß die Geschwindigkeit des Spiegels am Schwingungsnulldurchgang ist.

4.2. Speckle-Interferometrie

4.2.1. Speckle-Interferometrie

Wie interpretieren Sie das Differenzbild? Analysieren Sie quantitativ, wie tief der Aluminiumkörper direkt neben der Schraube relativ zum Rand des Lichtflecks durch den Laser hineingedrückt wird.

5. Forschungspräsentation

Auf Fachkonferenzen ist es üblich, die eigenen Forschungsergebnisse durch einen Vortrag und ein detailliertes Poster im Format DIN A0 zu präsentieren (vgl. Abb. 6). Diese Poster müssen inhaltlich fehlerfrei sein sowie optisch ansprechend und übersichtlich gestaltet werden, damit ein(e) Konferenzteilnehmer/-in zum Lesen angeregt wird und zudem das Wesentliche in kurzer Zeit erfassen kann. Ein solches Poster gliedert sich deswegen in

- eine aussagekräftige Überschrift,
- eine alphabetisch sortierte Autorenliste (z.B.: A. Bugl, C. Clemens, ...),
- eine Auflistung der beteiligten Forschungsinstitute bzw. Gymnasien,
- eine Einführung in die physikalischen Grundlagen des Versuchs (I),
- eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus u.a. anhand von Skizzen und Schaltplänen (II),
- eine Erläuterung der Versuchsdurchführung mit wichtigen Beobachtungen, allen erforderlichen Versuchsparametern und einer tabellarischen Aufstellung der Messwerte (III) sowie
- eine Versuchsauswertung mit Angabe der verwendeten Formeln, einer Beschreibung der angewandten Methoden (Wie haben Sie die Daten ausgewertet?), einer übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse anhand von Diagrammen sowie einer Diskussion bzw. Interpretation der Ergebnisse, wobei letzteres eine physikalische

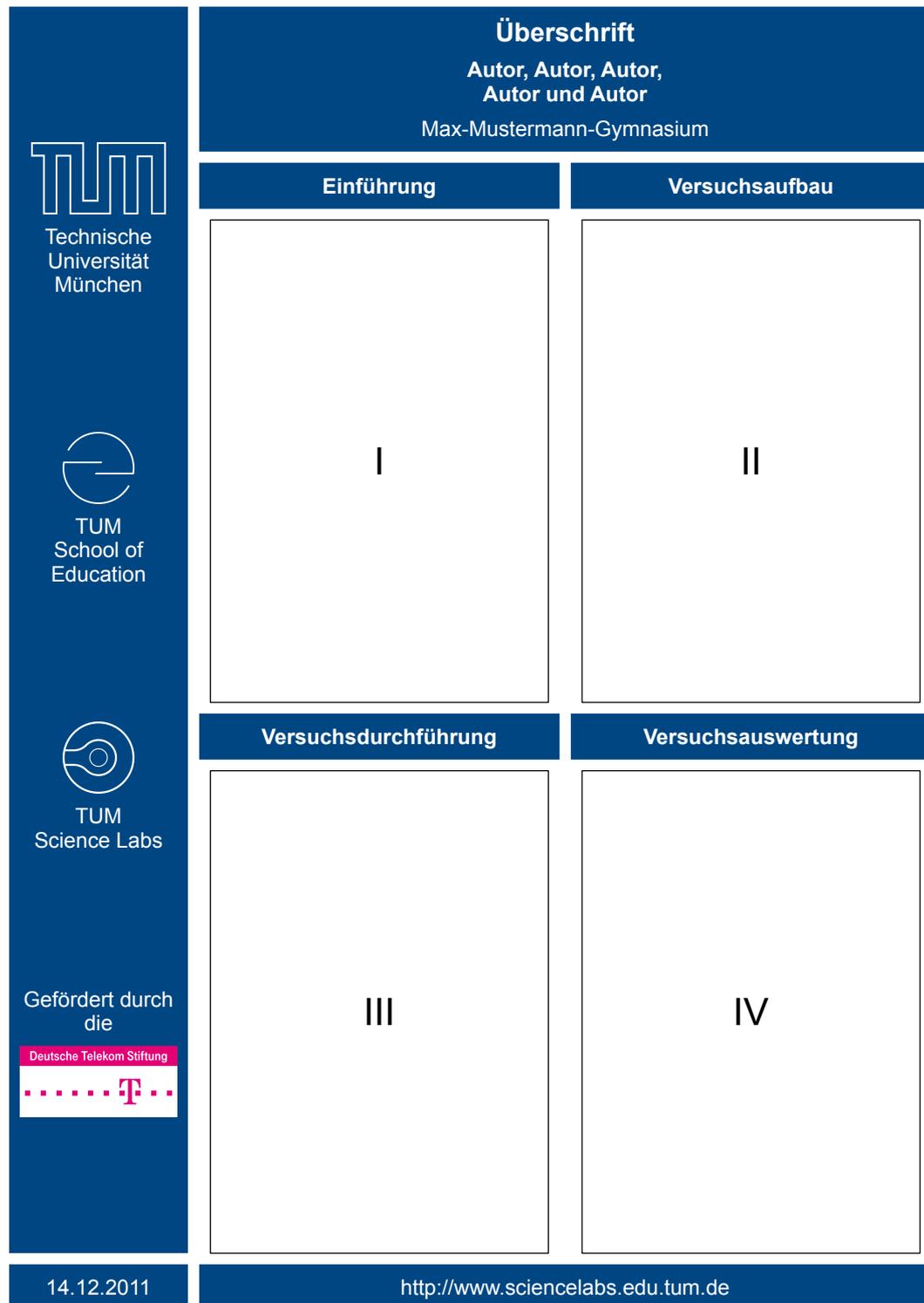


Abb. 6: Forschungspräsentation: Struktur und Aufbau eines Posters

Erklärung der gemachten Beobachtungen und mögliche Folgerungen, die aus den gewonnenen Ergebnissen gezogen werden können, umfasst (IV).

Diese vorgegebene Struktur hat sich über die Jahre hinweg bewährt und wird deswegen in der Forschung bevorzugt verwendet.

Fertigen Sie als Versuchsauswertung bitte ein solches Poster an und gehen Sie dazu wie nachfolgend beschrieben vor:

1. Überlegen Sie sich zunächst gemeinsam eine aussagekräftige Überschrift und versetzen Sie sich dabei in die Lage des Forschenden, der bzw. die auf seine bzw. ihre neuartige Entdeckung aufmerksam machen möchte.
2. Öffnen Sie dann ein neues OpenOffice-Textdokument und notieren Sie sich darin die Überschrift auf die Sie sich geeinigt haben.
3. Erstellen Sie im gleichen Dokument eine vollständige Namensliste der beteiligten Schüler/-innen und fügen Sie diesem Dokument auch den Namen und den Ort Ihres Gymnasiums bei.
4. Speichern Sie nun dieses Dokument in einem beliebigen Verzeichnis unter der Kurzbezeichnung des Versuchs (z.B.: SEL.odt) ab.
5. Überlegen Sie sich jetzt, wie Sie sich die Abschnitte I bis IV untereinander aufteilen. Jedes Team erstellt im Anschluss daran für seinen Abschnitt ein zweites OpenOffice-Textdokument. Übernehmen Sie für dieses Dokument die Standardvorgaben von OpenOffice und ändern Sie nur folgende Einstellungen:
 - Papierformat: Breite: 30,09 cm (= 11,85"), Höhe: 43,26 cm (= 17,03")
 - Papierausrichtung: Hochformat
 - Seitenränder: links, rechts, oben und unten: 0,00 cm (= 0,00")
 - Schrift: -art: Arial, -größe: 36 pt, -stil: normal, -farbe: schwarz
 - Absatzausrichtung: Blocksatz

Speichern Sie am Ende dieses Dokument in einem beliebigen Verzeichnis unter der Kurzbezeichnung des Versuchs und der arabischen Nummer des bearbeiteten Abschnitts (z.B.: SEL1.odt) ab.

6. Die weitere Gestaltung und der genaue Inhalt Ihres Abschnitts ist frei und somit Ihnen überlassen. Bemühen Sie sich jedoch Ihren Abschnitt vollständig auszufüllen bzw. den vorhandenen Platz komplett auszunutzen.

Versuchen Sie sich beim Formulieren möglichst prägnant und unmissverständlich auszudrücken. Diskutieren Sie jedoch die physikalischen Grundlagen, den Versuchsaufbau, Ihre Beobachtungen und Messungen sowie Ihre Vorgehensweise und Ergebnisse ausführlich. Beantworten Sie zudem die Fragestellungen der Versuchsanleitung und formulieren Sie deutlich die Zielsetzung (d.h. Sinn und Zweck) des Versuchs.

Fügen Sie zur Veranschaulichung ausreichend Skizzen, Photos, Messwerttabellen und Diagramme ein.

Denken Sie bei der Gestaltung des Posters daran, daß es sich um eine Forschungspräsentation handelt mit der Sie auf Ihre Ergebnisse aufmerksam machen wollen und vor allem Interesse an Ihrer Arbeit wecken möchten.

7. Der Praktikumsleiter wird aus den einzelnen Abschnitten ein gemeinsames Poster im Format DIN A0 zusammenstellen und es Ihnen sobald wie möglich als Datei sowie ausgedruckt per Post zuschicken. Sie können es dann in Ihrem Klassenzimmer oder in Ihrer Schule aufhängen.