

# Schlierenabbildungen – historische Experimente mit neuen Mitteln

R. Kastl, R. Burger u. V. Nordmeier

Schliereffekte sind uns allen bekannt, wir haben sie schon als Luftspiegelung über heißen Straßen oder hinter Flugzeugtriebwerken gesehen. Bereits im 17. Jahrhundert beobachtete *Robert Hooke* diese „Schlieren“ und beschrieb sie 1665 auch in seiner *Micrographia* [1]. Als ursächlich für dieses Phänomen erkannte schon *Hooke* die Dichteunterschiede im durchstrahlten Medium.

Aber erst der Physiker *August Töpler* entwickelte 1864 [2], also vor ca. 150 Jahren, die „Schlierenmethode“ als ein wissenschaftliches Verfahren zur Visualisierung von Strömungen (insbesondere in Gasen). Mit der Schlierenmethode gelang es erstmals, Dichteunterschiede bzw. Gradienten im Brechungsindex in sonst homogenen Medien (Gas und Flüssigkeiten, aber auch Glas) sichtbar zu machen.

Von *Töpler* stammt auch eine schöne Beschreibung und Definition des Begriffs „Schliere“ als eine „kleine Partie von beliebiger

Gestaltung, deren Brechungsvermögen nur um ein Geringes [...] abweicht“ [3, S. 5]. Diese Definition wird bis heute in der Optik verwendet: Als Schlieren wird also eine Region bezeichnet, in der der Brechungsindex sich von dem des Umgebungsmediums unterscheidet, was dazu führt, dass Licht, das diese Region durchläuft, anders gebrochen wird als durch das umgebene homogene Medium [10].

Später entwickelte *Hubert Schardin* Mitte des 20. Jahrhunderts weitere Methoden zur Anwendung und quantitativen Auswertung von Schlierenabbildungen [4]. Bis heute wurden zahlreiche weitere Varianten vorgeschlagen, Schlieren experimentell abzubilden und fotografisch zu dokumentieren. Inzwischen wurden durch die Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung zudem neue Methoden entwickelt, die es gestatten, auch großformatige Objekte zu untersuchen.

In diesem Beitrag werden einige einfach nachvollziehbare und auch mit einfachen schulischen Mitteln sehr überzeugend realisierbare Experimente zur Schlierenabbildung bzw. -fotografie vorgestellt: der Foucault-Aufbau, ein ‚low-cost‘-Foucault-Aufbau, der klassische Aufbau nach *Töpler*, ein modifizierter Aufbau nach *Schardin* und eine Realisierung der Moiré-Methode.

## 1 Brechungsindex, Dichte und Temperatur

Der Brechungsindex  $n_{\text{Luft}}$  in Luft beträgt bei Normaldruck und -temperatur

$$n_{\text{Luft}} = 1,00028.$$

Ändert sich die Lufttemperatur, so ändert sich auch ihre Dichte. Nach dem Gladstone-Dale-Gesetz  $n - 1 = \rho K$  hängt der Brechungsindex  $n$  nahezu linear von der Dichte  $\rho$  ab, wobei  $K$  eine Materialeigenschaft

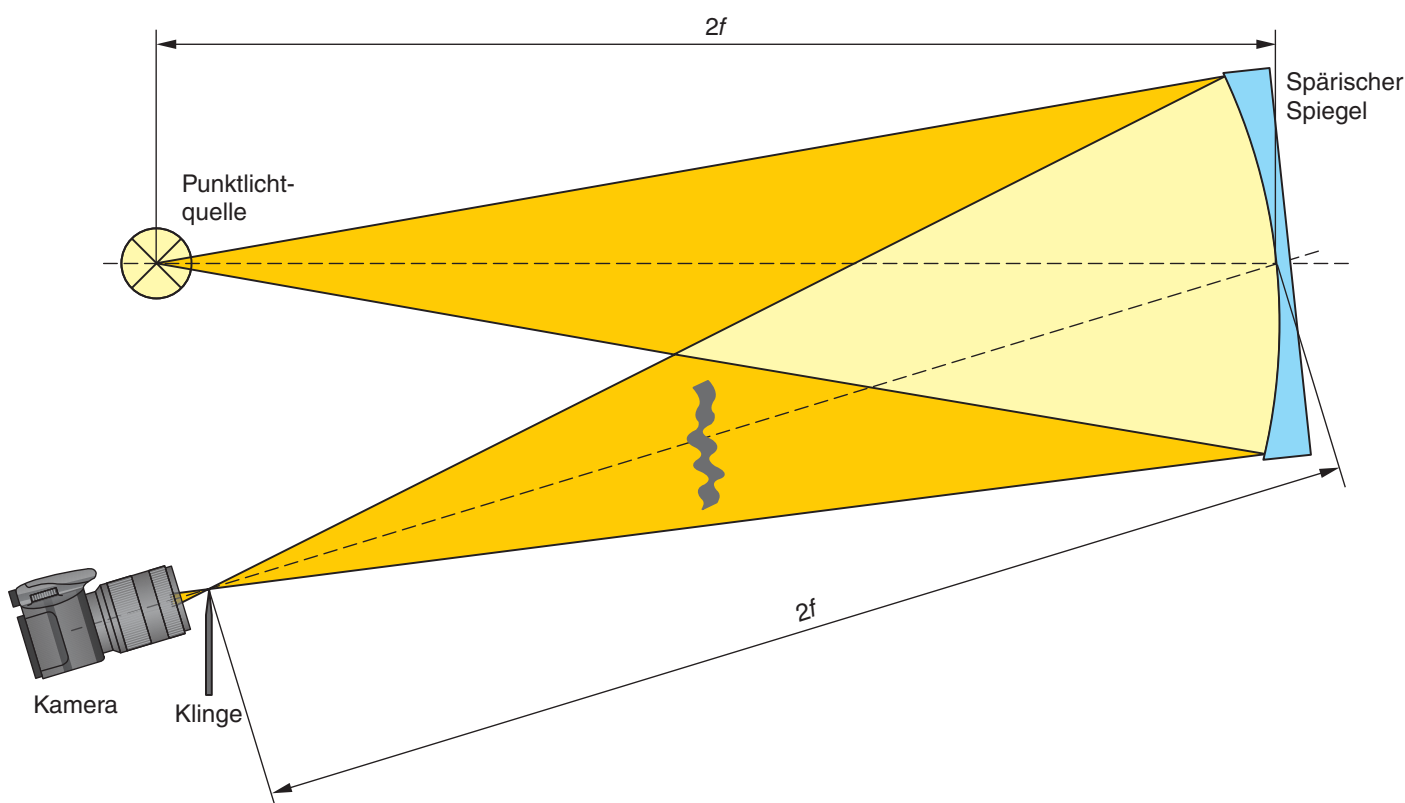


Abb. 1: Strahlengang beim Foucault-Aufbau (mit Schlierenobjekt als geschwungene Linie).

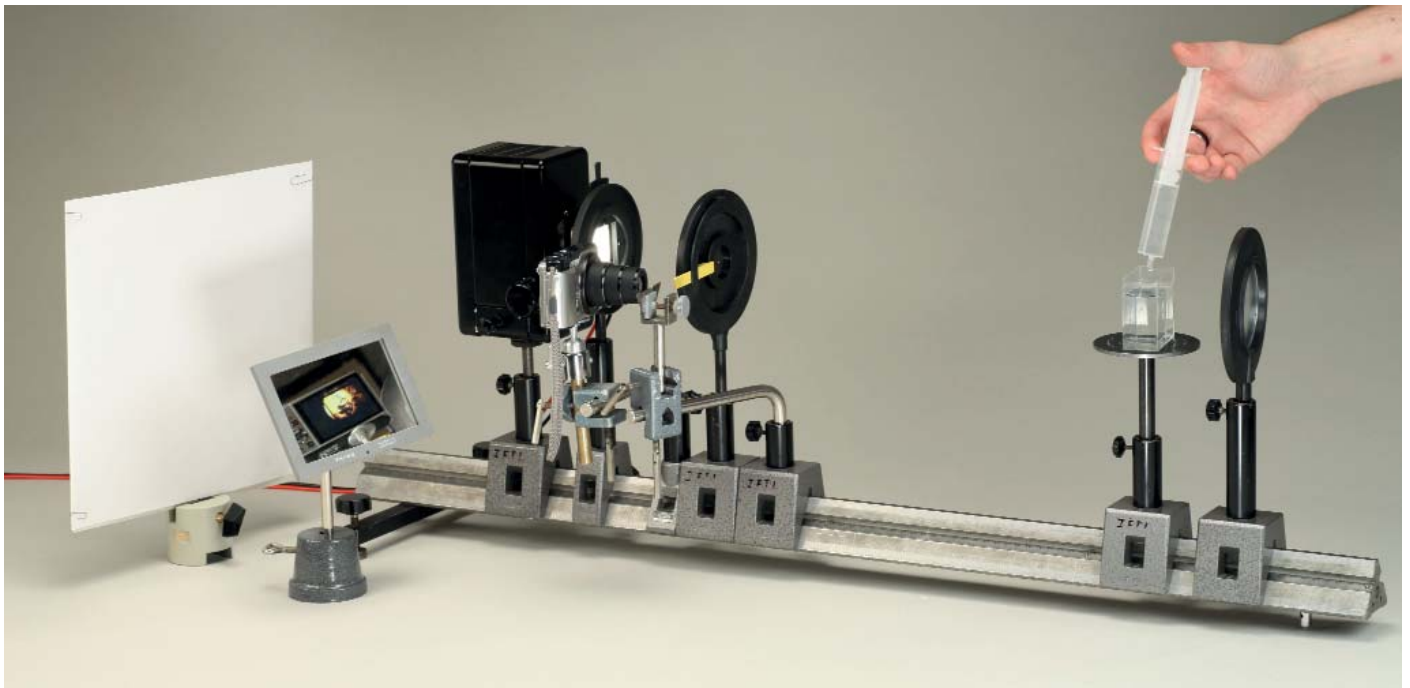


Abb. 2: Foucault-Aufbau mit Kamera und zusätzlichem Beobachtungsspiegel für das Kameradisplay.

ist, die im Bereich der sichtbaren Wellenlängen weitgehend konstant ist. Dabei ist zu bemerken, dass eine Änderung der Dichte  $\rho$  in Luft um zwei Zehnerpotenzen, also  $\rho' = 100 \rho$ , gerade einmal zu einer Abweichung des Brechungsindex um nur circa 3 % (!) führt.

Mit  $n' - 1 = \rho' K$  und  $\rho' = 100 \rho$  gilt:

$$\begin{aligned} n' - 1 &= 100 \rho K = 100 (n_{\text{Luft}} - 1) \\ &= 100 (1,00028 - 1) \\ \Rightarrow n' &= 1,028 \end{aligned}$$

D. h.:  $n'/n_{\text{Luft}} \approx 1,0277$ , also ca. 3 %.

Die Dichte  $\rho$  hängt zudem in etwa antiproportional von der Temperatur  $T$  ab:

$$\rho \approx 1/T$$

Dieser Zusammenhang folgt aus der Dichtedefinition, der allgemeinen Gasgleichung für ideale Gase bzw. der Van-der-Waals-Gleichung (siehe z. B. [5]). Daraus lässt sich insbesondere folgern: Bei einer Temperaturerhöhung verkleinert sich die Dichte und damit auch der Brechungsindex.

Wie bereits erwähnt, ändert sich der Brechungsindex auch bei größeren Schwankungen der Dichte nur in einem sehr geringen Maße. Das bedeutet, dass es einer hochempfindlichen Apparatur bedarf, um auch geringe Änderungen darstellen zu können – wie beispielsweise die Erwärmung der Luft durch eine Kerze oder auch durch einen Menschen. Erstaunlicherweise ist es aber tatsächlich möglich, schon mit einem verhältnismäßig geringen experimentellen Aufwand dieses Ziel zu erreichen.

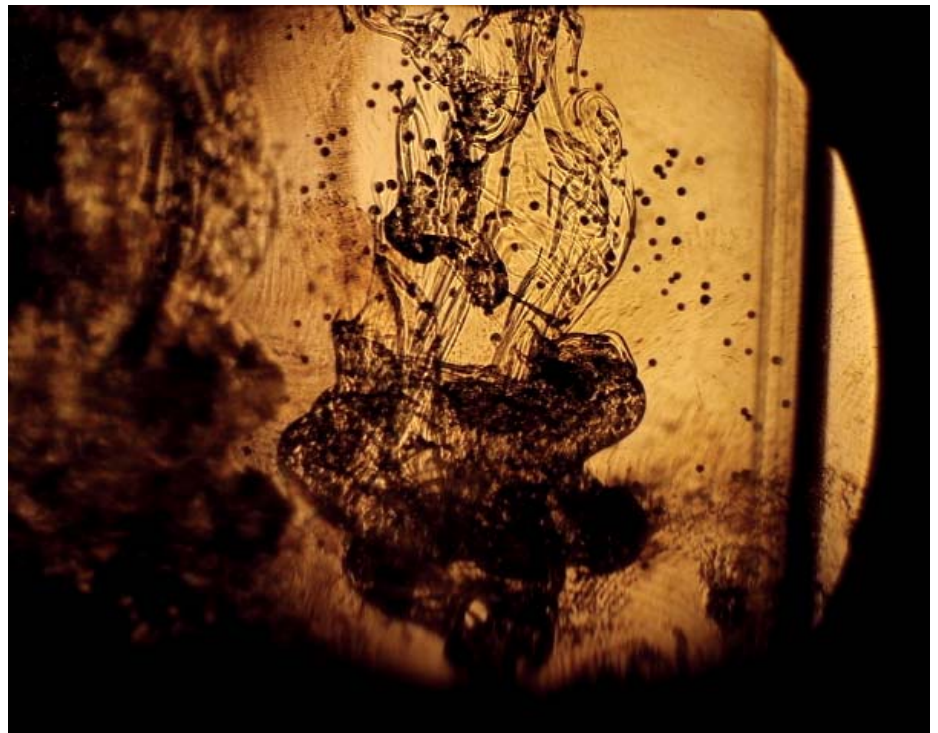


Abb. 3: Schlierenbildung bei Zuckerwasser in Wasser. Digitalfoto, erstellt mit dem Foucault-Aufbau (gemäß Abb. 2).

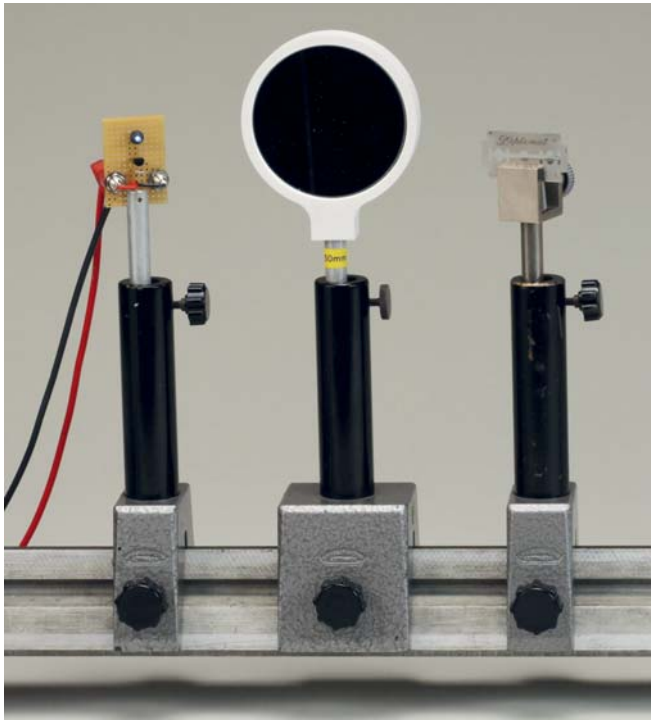
## 2 Verfahren zur Abbildung von Schlieren

### 2.1 Foucault-Aufbau

Zur Darstellung von Schlieren gibt es viele verschiedene Methoden. Der einfachste optische Aufbau entspricht dem des sogenannten Foucault-Tests für Hohlspiegel [6]. Er wurde ursprünglich bereits 1856 von *Léon Foucault* entwickelt, um die Qualität von optischen Instrumenten zu verbessern. Diese Methode war auch *Töpler* bekannt, und er verweist darauf auch in seinen Schriften:

„[...] desgleichen darauf hingewiesen, dass Foucault zur Prüfung von sphärischen Spiegeln ein Verfahren einschlug, welches obiger Methode im Princip nahe kommt, ohne von diesem Experimentator zu weiteren wissenschaftlichen Zwecken verwendet zu werden.“ [7, S. 34].

Für den Aufbau wird lediglich eine (Punkt-) Lichtquelle, ein qualitativ hochwertiger, sphärischer Hohlspiegel und eine scharfe Kante (z. B. Rasierklinge) benötigt. Abb. 1 zeigt den Strahlengang des prinzipiellen Foucault-Aufbaus.



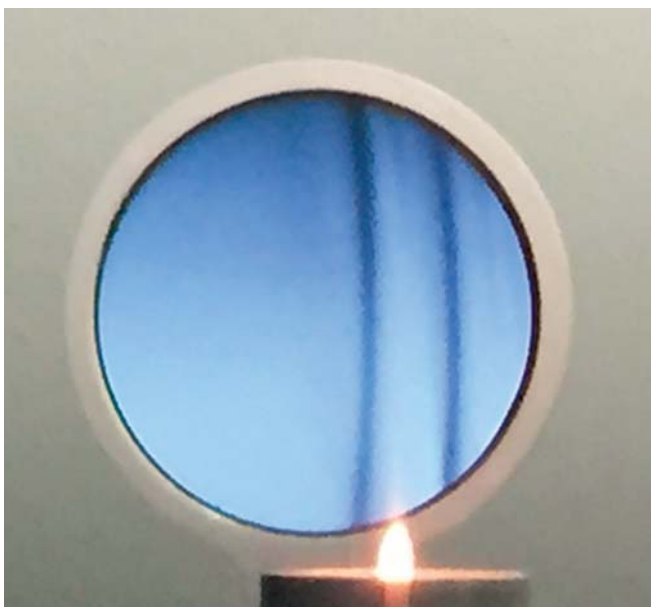
**Abb. 4:** Bestandteile des Foucault-Aufbaus „low-cost“: LED, preiswerter Hohlspiegel im Spiegelhalter aus dem 3D-Drucker und Rasierklinge.

Um eine Punktlichtquelle zu erhalten, wird beispielsweise das Licht einer Halogenlampe mit einer Kondensorlinse auf eine (Iris-)Blende fokussiert, oder aber es wird mit einer sehr hellen Leuchtdiode (mit plangeschliffener Kunststofflinse) gearbeitet.

Quelle und Spiegel werden auf einer Optischen Bank fixiert, wobei der Abstand die doppelte Brennweite  $f$  des Spiegels betragen muss. Über entsprechendes Stativmaterial wird die Rasierklinge (möglichst an der selben Optischen Bank) dicht neben der Punktlichtquelle befestigt. Der Spiegel ist dann so zu verschieben, dass er die Lichtquelle exakt und randscharf auf die Rasierklinge abbildet, also auch der Abstand Kante-Spiegel  $2f$  beträgt. Anschließend wird die Klinge so verschoben, dass die Abbildung der Lichtquelle etwa zur Hälfte abgeblendet wird und die so durchgelassenen Lichtstrahlen auf einem Projektionsschirm dargestellt werden.



**Abb. 5:** Foucault-Aufbau ‚low-cost‘ mit preiswertem Spiegel und LED als Punktlichtquelle.



**Abb. 6:** Standbild aus einem Video (gemäß Aufbau aus Abb. 5).

Abb. 2 zeigt ein von uns verwendetes Setup mit Elementen, wie sie in vielen Sammlungen vorhanden sein dürften; Abb. 3 eine Digitalaufnahme, die mit dieser Anordnung erzeugt wurde (Zuckerwasser in Wasser).

#### Tipps & Tricks zum Foucault-Aufbau

Eine Schliere zwischen Spiegel und Rasierklinge lenkt einige Strahlen derart ab, dass diese entweder zusätzlich oder aber gerade nicht mehr abgeblendet werden. In jeden Fall verursacht sie eine Helligkeitsänderung in einem bestimmten Bereich des Bildes auf dem Schirm.

Durch minimales Verschieben der Klinge in alle Richtungen kann der Kompromiss zwischen Helligkeit und Kontrast des Bildes optimiert werden. Um den Kontrast zu verbessern, sollte man die Klinge entlang der Schliere ausrichten, d. h. zum Bei-



Abb. 7: Klassischer Aufbau nach Töpler mit Diffusor, Schlierenobjekt und Dokumentationskamera.

spiel bei der Aufnahme einer Kerzenflamme die Klinge vertikal dazu platzieren (also längs der Wärmeströmung).

Mit einer Abbildungslinse, die auf das Schlierenobjekt gerichtet ist, wird auch dieses auf dem Schirm sichtbar. Alternativ lässt sich direkt hinter der Klinge auch eine Kamera positionieren.

Aufgrund der hohen Lichtempfindlichkeit von Digitalkameras können auch bei normalen Lichtverhältnissen Aufnahmen gemacht werden, während Schirmprojektionen nur in abgedunkelten Räumen möglich sind. Um ein ständiges, automatisches Nachjustieren der Kamera zu vermeiden und um das zu untersuchende Objekt inklusive Schlieren scharf abzubilden, sollten Fokus und Belichtungszeit manuell einstellbar sein.

In unserem Aufbau befand sich das Schlierenobjekt in etwa 0,5 m Entfernung von der Kameraoptik, welche also auch auf diese Entfernung fokussierbar sein musste.

Werden Punktlichtquelle und Schlierenkante sehr dicht nebeneinander angebracht, so kann das Schlierenobjekt direkt vor dem Spiegel positioniert werden, ohne dass es zu Doppelabbildungen kommt. Der Kontrast wird auf diese Weise merklich verstärkt. Bei einer völligen Überlappung der zum Spiegel hinlaufenden und reflektierten Strahlen spricht man von einer Doublepass-Koinzidenzanordnung, sie ist jedoch nur mit einem Strahlteiler oder einer verspiegelten Klinge realisierbar.

## 2.2 Foucault-Aufbau „low-cost“

Der in Abschnitt 2.1 beschriebene Foucault-Aufbau lässt sich auch mit sehr einfachen



Abb. 8: Abbild eines Schlierenobjekts beim klassischen Aufbau nach Töpler – Flamme eines Teelichts im Luftzug (Ausschnitt aus einem Video gemäß Aufbau aus Abb. 7).

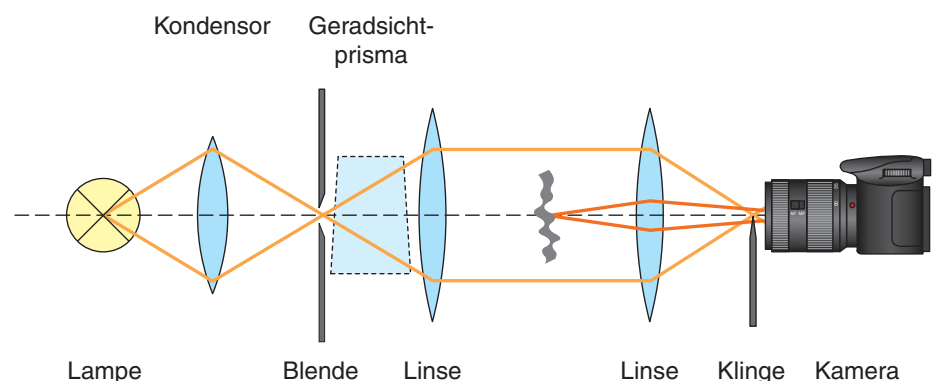
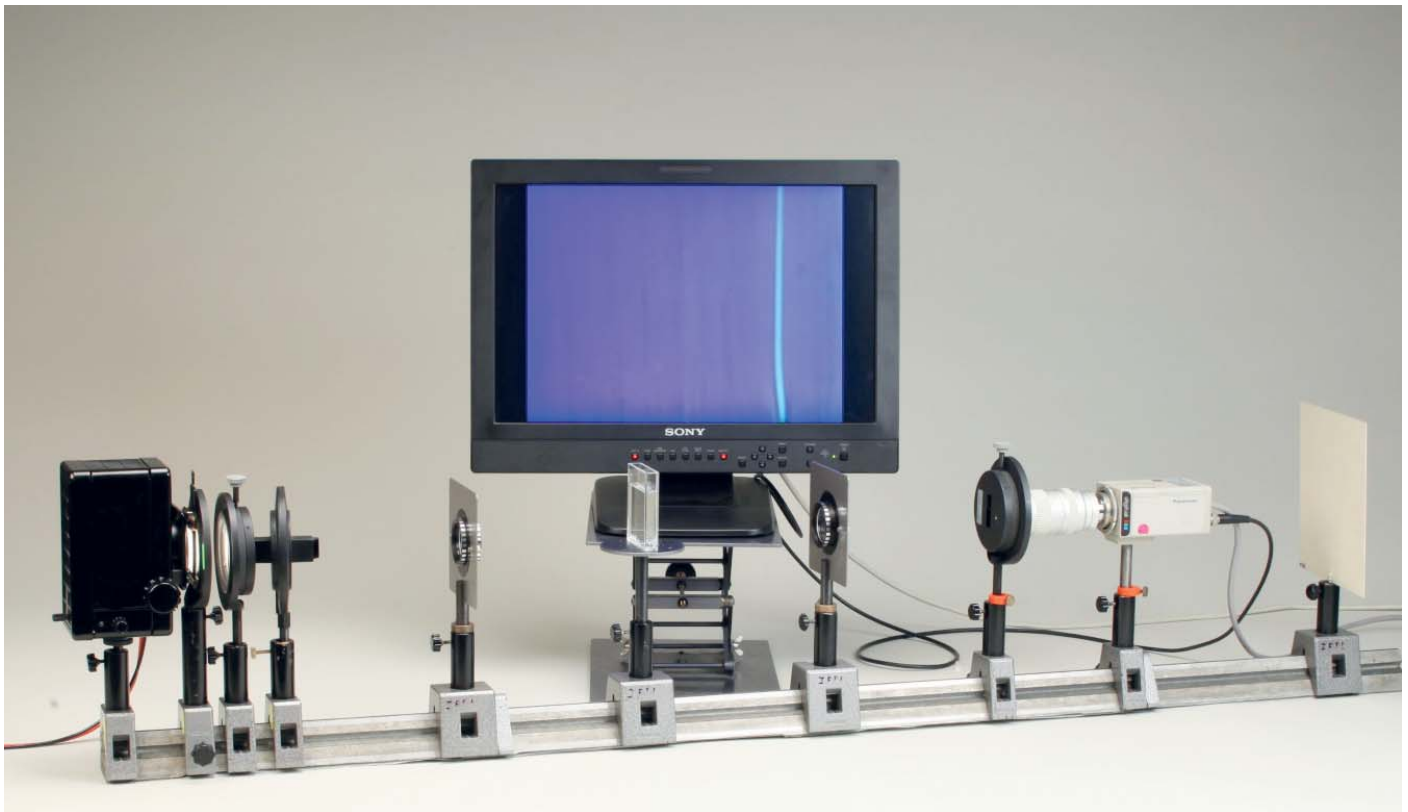


Abb. 9: Der Aufbau nach Töpler wird mit Gradsichtprisma zum Aufbau nach Schardin.



**Abb. 10:** Aufbau nach *Schardin* – Schlierenabbildung mit achromatischen Linsen (wie in Abb. 9 skizziert), jeweils mit einer Brennweite von 200 mm. Beide Spalte sind vertikal geöffnet. In der wassergefüllten Küvette befindet sich ein Zuckerwürfel, der sich bereits nahezu aufgelöst hat (siehe auch Abb. 11).



**Abb. 11:** Schlierenabbildung beim Aufbau nach *Schardin* – Ausschnitt eines Videos des sich auflösenden Zuckerwürfels (aus Abb. 10).

Mitteln realisieren: Sehr preiswerte, für Teleskope vorgesehene und damit entsprechend hochwertige sphärische Konkavspiegel (derzeit 12,90 €; [8]) und achromatische Linsen (derzeit 10,90 €; [9]) sind u. a. bei Astromedia erhältlich. (Für Besitzer von 3D-Druckern finden sich auf unserem Webserver unter <http://didaktik.physik.fu-berlin.de/projekte/schlieren> die nötigen STL-Dateien für Linsen- respekti-

ve Spiegelhalter.) Als Lichtquelle nutzen wir eine ultrahelle, weiße LED mit 25000 mcd, die beim Elektronikversand für ca. 0,30€ erhältlich ist; mit Vorwiderstand zur Strombegrenzung. Ein darüber gezogenes Röhrchen aus Schrumpfschlauch verhindert seitliches Streulicht und engt den Lichtaustritt auf etwa 2 mm ein. Alternativ kann auch ein Stückchen Alufolie mit einer kleinen frontalen Öffnung an der

LED angebracht werden. Die Abbn. 4 und 5 zeigen die Bestandteile und den Foucault-Aufbau „low-cost“. Mit einer Digitalkamera lassen sich so mit einfachen Mitteln auch eindrucksvolle Videosequenzen aufzeichnen (Abb. 6).

### 2.3 Klassischer Aufbau nach *Töpler*

Beim klassischen Aufbau nach *Töpler* wird ebenfalls eine Halogenlampe mittels einer Kondensorlinse möglichst punktförmig auf eine Blende abgebildet. Um eine gleichmäßige Ausleuchtung zu erreichen, kann optional noch ein Diffusor vor die Blende geschoben werden. Diese kann je nach Bedarf als Loch- oder auch als Schlitzblende ausgeführt sein. In seinem sehr empfehlenswerten Buch stellt G. S. Settles [10] auf S. 124 u. a. verschiedene Blendenformen und ihren jeweiligen Nutzen vor. Wir begnügen uns bei unserem Aufbau der Einfachheit halber mit einer Lochblende. Diese Sekundärlichtquelle wird über zwei hochwertige, achromatische Linsen exakt auf eine verstellbare Klinge abgebildet. Wie im Foucault-Aufbau wird diese dann vorsichtig vertikal oder seitwärts aus der Abbildung geführt. Das zu untersuchende Objekt befindet sich zwischen den beiden Linsen, eine auf das Objekt fokussierte Digitalkamera dient zur Darstellung und Dokumentation (Abbn. 7 u. 8).



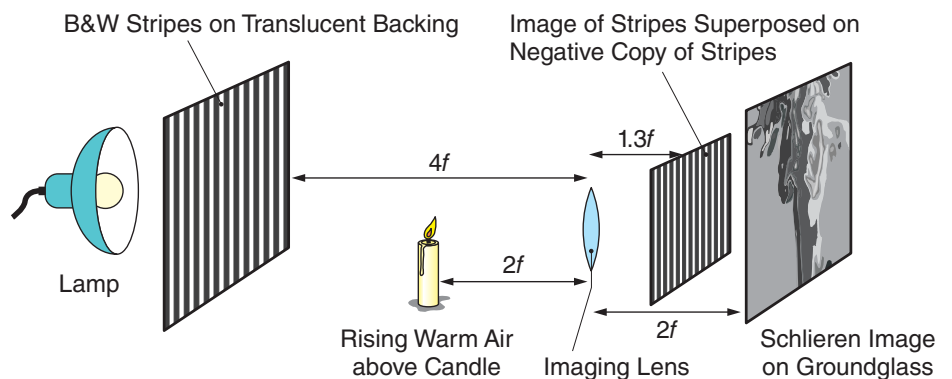
**Abb. 12:** Liveaufnahme einer Schlierenabbildung mit chromatisch fehlerhaften Linsen (vgl. Abb. 9). Auch hier befindet sich in der wassergefüllten Küvette ein Zuckerwürfel, der sich gerade auflöst. Es werden ebenfalls Linsen mit einer Brennweite von 200 mm verwendet, die beiden Spalte sind horizontal angeordnet.

#### 2.4 Schardin'sches Farbschlierenverfahren

Als Variante der klassischen *Töpler*-Methode, die attraktivere, farbige Abbildungen (Abb. 10) produziert und zudem Rückschlüsse auf die Stärke der Lichtablenkung liefern kann, ist das *Schardin'sche* Farbschlierenverfahren bekannt. Hierbei wird zusätzlich ein Gradsichtprisma nach der Eintrittsblende in den Strahlengang eingebracht. Das Prisma zerlegt das Licht der Lichtquelle in seine spektralen Bestandteile, sodass am Ort der Schlierenblende dann eine Abbildung des Eintrittspaltes, der in den einzelnen Spektralfarben des beleuchtenden Lichtes aufgespalten ist, entsteht. Durch eine Schliere wird jedoch – je nach Stärke der Ablenkung – Licht einer anderen Wellenlänge über die Klinge auf die Beobachtungskamera gelenkt. Dadurch wird der Bereich der Schliere auf dem Schirm / der Kamera farblich abgehoben. Die Skizze in Abb. 9 zeigt den *Schardin'schen* Aufbau.

#### Tipps & Tricks zum Aufbau nach Schardin

Mit etwas weniger Aufwand und der Verwendung preiswerter, chromatisch verzerrender Linsen ist ein ähnlicher Farbeffekt erreichbar. Abb. 12 zeigt diese Variante; eine qualitative Beurteilung des Schlierenobjektes ist damit nach unseren Erfahrungen jedoch nicht möglich. Auch die von uns getesteten Vorschläge, den Schlieren-



**Abb. 13:** Möglicher Aufbau zur Moiré-Methode mit zwei Gittern (aus [11]).

spalt durch geeignete Farbfilter zu ersetzen, waren weniger erfolgreich, da damit die Helligkeit, also die Intensität der Abbildung zu stark reduziert wurde.

#### 2.5 Die Moiré-Methode – eine hintergrundorientierte Schlierenabbildung

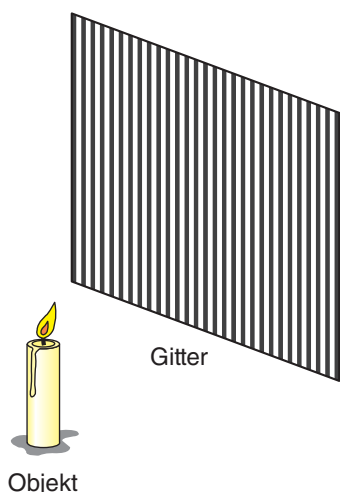
Bei der Schlierenfotografie mit der Moiré-Methode werden Gitter anstelle von Linsen oder Hohlspiegeln genutzt. Dabei gibt es verschiedene Varianten, um diese Gitter zu überlagern. Ein gängiger Aufbau ist in Abb. 13 skizziert. Hier werden zwei Gitter so hintereinander angeordnet, dass aus Beobachterperspektive die Striche des Hintergrundgitters genau auf den Zwischenräumen des Vordergrundgitters liegen, sodass man zunächst nur ein schwarzes Bild sieht.

Das zu untersuchende Objekt wird dann zwischen die beiden Gitter gebracht. Steigt nun warme Luft auf (z. B. einer Kerze), so ändert sich lokal der Brechungsindex. Das Licht wird anders gebrochen, und die Lichtstrahlen verlaufen nicht mehr gradlinig vom Beobachter zum Hintergrundgitter. Dadurch verschieben sich scheinbar die Linien der beiden Gitter. So werden hellere Stellen sichtbar und es entstehen Schlierenbilder.

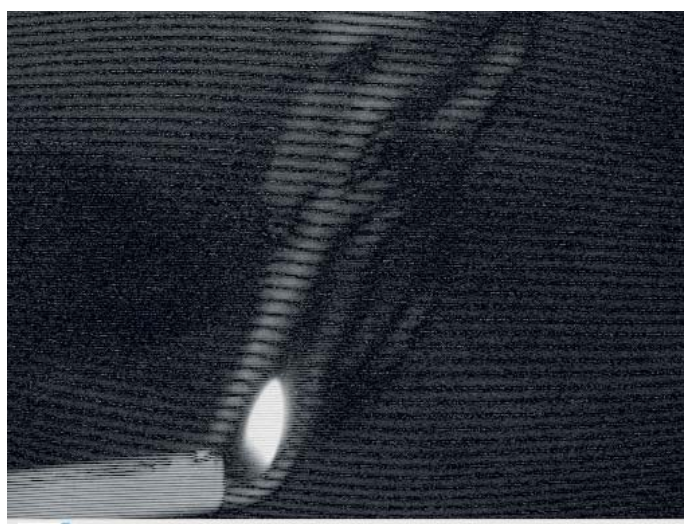
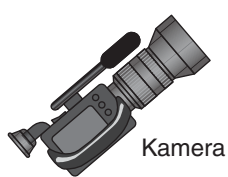
Mithilfe eines Computers und geeigneter Foto- bzw. Videobearbeitungssoftware lässt sich der obige Aufbau auch auf nur ein Gitter reduzieren. Es dient dann als Hintergrund der Aufnahmen. Professionelle Systeme rechnen per Kreuzkorrelation des Hintergrundbildes (des Rasters) mit dem aufgenommenen Bild oder Video,



**Abb. 14:** Turbulenzen um einen Hubschrauber können mithilfe der Moiré-Methode als Schlierenabbildung sichtbar gemacht werden (aus [12]).



**Abb. 15:** Prinzipieller Aufbau nach der Moiré-Methode. Die Videobilder werden digital per Software von einem vorab und ohne Schlierenobjekt aufgenommenen Hintergrundbild des Gitters ‚subtrahiert‘.



**Abb. 16:** Schlierenabbildung eines brennenden Gasfeuerzeugs nach der Moiré-Methode (gemäß Abb. 15).

welches auch den Hintergrund beinhaltet, die Schlierenabbildung des Objektes heraus. Diese Methode ist mittlerweile ziemlich fortgeschritten und kann sogar den natürlichen Hintergrund als Referenzhintergrund benutzen. Somit ist es sogar möglich, auch sehr große Objekte zu verarbeiten, wie Abb. 14 zeigt.

Die von uns erprobte Variante lässt sich äußerst einfach realisieren: Unsere Softwarelösung subtrahiert nur das Hintergrundbild, also das Gitter ohne Objekt, von einem Bild mit „Dichteunterschieden“. Abb. 15 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Als Resultat ergeben sich im Idealfall eindrucksvolle Schlierenbilder (Abb. 16).

**Tipps & Tricks zum Moiré-Verfahren:**

**Videoaufnahmen und Videobearbeitung**

An dieser Stelle soll ein mögliches Vorgehen bei der Bildverarbeitung bzw. dem von uns erfolgreich durchgeführten Ablauf der Videokonvertierung beschrieben werden.

*Avidemux* und *Irfanview* sind frei erhältliche Programme zur Bild- und Videobearbeitung. *Avidemux* ist zudem für alle gängigen Betriebssysteme erhältlich, *Irfanview* nur für Windows. Die geforderte Funktion der „Bildinvertierung“ bieten aber viele andere Programme auch. Unter der Adresse <http://didaktik.physik.fu-berlin.de/projekte/schlieren/daten/testvideo.mov> liegt ein Video bereit, mit dem die notwendigen Schritte nachvollzogen werden können.

**Vorgehen bei der Videoaufnahme**

Zunächst wird ein schwarz-weißes Hintergrundbild (Gitter) mit einem Streifenraster von etwa 1 mm auf dem Laserdrucker ausgedruckt und z. B. mit Magneten auf einer Tafel befestigt. Eine Vorlage dazu findet such auch unter <http://didaktik.physik.fu-berlin.de/projekte/schlieren>. Je dichter die Linien aneinander liegen, desto feinere Aufnahmen (Auflösung kleinerer Dichteunterschiede) sind möglich. Bei unseren Versuchen haben wir aber immer Gitter mit einem Abstand von 1 mm zwischen den Linien verwendet, da kleinere Zwischenräume zu Auflösungsproblemen geführt haben.

Für unsere Aufnahmen verwendeten wir eine HD-fähige Digitalkamera mit optischen 10-fach-Zoom. Im Rahmen unserer Experimente wurde allerdings auch die Kamera eines iPhone-6 eingesetzt, und wir waren erstaunt, dass auch damit sehr gute Ergebnisse erzielt werden konnten.

Die zwingend auf einem stabilen Stativ stehende digitale Videokamera (oder ein Smartphone / Tablet) wird möglichst entfernt platziert, bildfüllend auf das Raster gezoomt und fokussiert.

Jetzt kann die Videoaufnahme gestartet und nach kurzem Warten z. B. ein Gasfeuerzeug zwischen Kamera und Raster entzündet werden.

### Vorgehen bei der Videobearbeitung

Das Video wird dann auf einen Computer überspielt und digital nachbearbeitet:

1. Das Video mit *Avidemux* laden und den ersten Frame (das erste Bild mit Gitter) im Format „jpg“ speichern (mit: File → Save as Image → Save as Jpeg). *Avidemux* erwartet dabei, dass zum Dateinamen auch die Dateierweiterung (z. B. ‚background.jpg‘) mit eingetragen wird!
2. Mit *Irfanview* das Bild laden, invertieren (mit: Image → Negative → all Channels) und dann wieder speichern als z. B. „invers.jpg“ (mit: File → Save as → „invers.jpg“)
3. Weiter geht es nun wieder mit *Avidemux*: Wenn das Video nicht mehr geladen ist, weil sie das Programm verlassen haben, so ist es (mit: File → Open) wieder neu zu laden.
4. Das Format des Ausgabefiles muss festgelegt werden (mit: Video Output → Mpeg4AVC).
5. Der invertierte Videoframe wird nun als Logo transparent über den kompletten Film gelegt (mit: Video Output → Filters → add Logo). Nun das erzeugte Hintergrundbild „invers.jpg“ auswählen und im Feld Alpha 125 eintragen und „ok“ anklicken. Rechts unten befindet sich ein Button mit der Aufschrift „preview“, der es gestattet, die vorgenommenen Änderungen zu begutachten.
6. Meist muss noch die Helligkeit und der Kontrast geändert werden (mit: Filters → Color → Kontrast). Die Änderung geschieht über Schieberegler. Es hat sich bei unseren Experimenten als sinnvoll erwiesen, den Kontrast (Contrast) weit in Richtung Maximum und die Helligkeit (Brightness) in Richtung Minimum zu verschieben. Der dritte Schieberegler gestattet wieder eine Vorschau.
7. Nach diesen Änderungen werden die Filter mit „ok“ übernommen.
8. Das jetzt fertige Video wird jetzt z. B. unter dem Namen „moire“ gespeichert (mit: File → Save → „moire“).
9. Je nach Länge des Videos und Computerausstattung kann es einige Minuten dauern, bis das Video konvertiert ist.

### 2.6 Schlierenabbildung nach der Moiré-Methode – „life“ per Webcam oder per Tablet und App

Bei unseren Experimenten haben wir auch Versuche mit einer HD-Webcam von Micro-

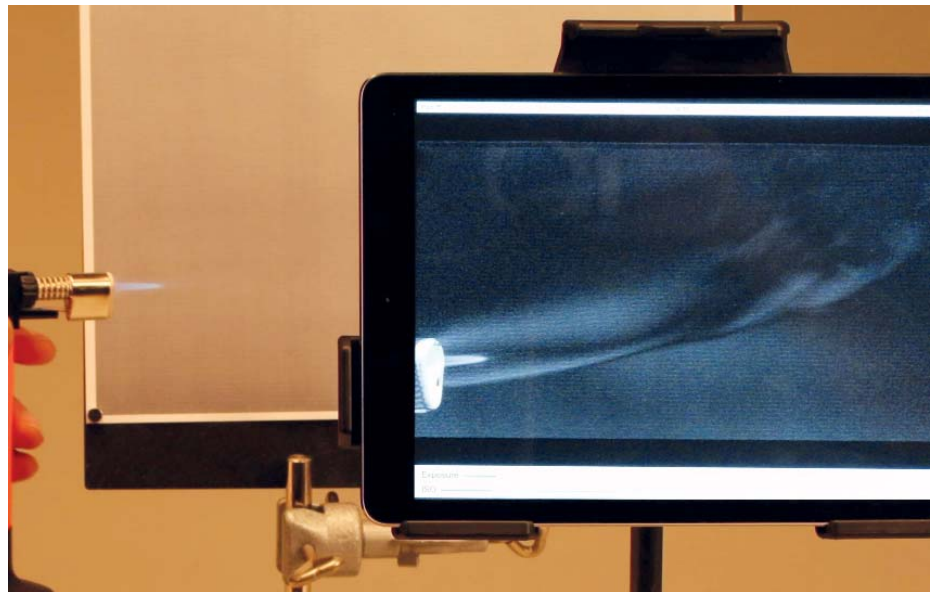


Abb. 17: Schlierenabbildung nach der Moiré-Methode per „App“ und iPad.

soft unternommen. Die Distanz zum Gitter muss bei dieser Kamera naturgemäß sehr kurz sein, mit etwa 15 cm waren auch damit halbwegs brauchbare Ergebnisse zu erzielen.

Unter <http://www.didaktik.physik.fu-berlin.de/projekte/schlieren> findet sich nun ein Programm, das es gestattet, direkt mit einem HTML5-fähigen Browser (z. B. Google Chrome oder Firefox) in Echtzeit Schlierenabbildungen nach der Moiré-Methode mit einer Webcam durchzuführen.

Auf der Webseite finden sich ebenfalls Informationen und ein Link zu einer neuen App (für das iPad), mit der nun mit einfachsten Mitteln Experimente zu Schlierenabbildungen nach der Moiré-Methode durchgeführt werden können (Abb. 17). ■

### Literatur

- [1] Hooke, R. (1665): *Micrographia: or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries there upon*. Jo. Martyn and Ja. Allestry, printers to the Royal Society : London. Digital einsehbar unter: <https://archive.org/details/mobot31753000817897> (Stand 06/2015)
- [2] Töpler, A. (1864): *Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode – Ein Beitrag zur Experimentalphysik*. M. Cohen & Son: Bonn.
- [3] Töpler, A. (1906): *Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode*. A. Witting: Leipzig.
- [4] Schardin, H. (1942): *Die Schlierenverfahren und ihre Anwendungen*. In: *Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften*, 20, S. 303-439.
- [5] Nolting, W. (2012): *Grundkurs Theoretische Physik 4: Spezielle Relativitätstheorie, Thermodynamik*, Springer: Heidelberg Dordrecht London New York

[6] <http://www.scopex.co.za/files/ATM-poster-Foucault-test.pdf> (Stand 06/2015)

[7] Töpler, A. (1867): *Optische Studien nach der Methode der Schlierenbeobachtung*. In: *Annalen der Physik*, Band 207, Heft 5.

[8] <http://astromedia.eu/Material-fuer-Selbstermacher/OPTI-Media-Spiegel/Sphaerischer-Hohlspiegel::133.html> (Stand 6/2015)

[9] <http://astromedia.eu/Material-fuer-Selbstermacher/OPTI-Media-Glaslinsen/Achromat-2-Linse-f%3D228-1mm::166.html> (Stand 6/2015)

[10] Settles, G. S. (2001): *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. Springer: Berlin Heidelberg New York.

[11] <http://people.rit.edu/andpph/textschlieren-focus.html> (Stand 06/2015)

[12] [http://ltces.dem.ist.utl.pt/lxaser/lxaser2014/finalworks2014/papers/02.11\\_5\\_241paper.pdf](http://ltces.dem.ist.utl.pt/lxaser/lxaser2014/finalworks2014/papers/02.11_5_241paper.pdf) (Stand 06/2015)

### Weitere interessante Links

- hervorragende high-speed-Aufnahmen akustischer Phänomene und Animation: <https://www.youtube.com/watch?v=px3oVGXr4mo&feature=youtu.be> (Stand 06/2015)
- Hargather und Settles (Schlierenexperten): <http://infohost.nmt.edu/~mjh/Res-Optical.html> (Stand: 06/2015)
- Zähringer: Vorlesungsscript „optische Messverfahren“ (überzeugende Zusammenfassung optischer Messmethoden): [http://www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Skripte\\_Messtechnik/Optische\\_Messverfahren3\\_2012.pdf](http://www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Skripte_Messtechnik/Optische_Messverfahren3_2012.pdf) (Stand 06/2015)

### Anschrift der Verfasser

Robert Kastl, Randy Burger, Prof. Dr. Volkhard Nordmeier: Freie Universität Berlin, Fachbereich Physik / Didaktik der Physik, Arnimallee 14, 14195 Berlin.  
E-Mail: [volkhard.nordmeier@fu-berlin.de](mailto:volkhard.nordmeier@fu-berlin.de)