

## Spielwiese

# Quételet-Ringe auf Fenstern

H. JOACHIM SCHLICHTING

*Wenn man bei Dunkelheit mit einem Autoscheinwerfer eine Fensterscheibe anleuchtet, kann man manchmal in den Genuss eindrucksvoller Farbringe kommen. Erstaunlicherweise ordnen diese sich exzentrisch zum Spiegelbild des Scheinwerfers an, und ihr fiktiver Mittelpunkt liegt oft sogar außerhalb der Scheibe. Dies ist das seltene Phänomen der Quételet-Ringe.*

Farbringe lassen sich in ganz unterschiedliche Situationen beobachten. Eindrucksvoll erscheinen sie zum Beispiel auf der Wasseroberfläche eines Teiches, auf dem sich feiner Staub abgelagert hat [1]. Kürzlich wurden wir jedoch auf ein Phänomen aufmerksam gemacht, das bislang keine Beachtung fand, aus physikalischer Sicht aber hoch interessant ist: Farbringe, erzeugt von einem Autoscheinwerfer auf einer Fensterscheibe (Abbildung 1) [2].

Bei der Suche nach einer Erklärung gingen wir der sich zunächst aufdrängenden Vermutung nach, es könnte sich um Interferenz an dünnen Schichten handeln. Wir nahmen an, dass sie vielleicht durch einen wie auch immer zustande gekommenen Belag verursacht wird. Neue Fotografien und Experimente belegten dann aber sehr schnell, dass diese Erklärung auszuschließen ist.

Am auffälligsten ist, dass die in Spektralfarben zerlegten Bögen offenbar um ein außerhalb des Fensters gelegenes fiktives Zentrum orientiert sind. Mit dem Scheinwerfer scheinen sie auf den ersten Blick nichts zu tun zu haben. Bei genauerem Hinsehen erkennt man aber (Abbildung 2), dass das Spiegelbild des Scheinwerfers nicht ohne Einfluss auf das Ringsystem ist: Es liegt auf einem hellen, weißen Ring, dem die spektrale Farbzerlegung fehlt. Betrachtet man die sich anschließenden Ringe zum einen in Richtung auf das fiktive Zentrum und zum anderen vom Zentrum weg, so stellt man fest, dass sie jeweils mit der Farbe Blau beginnen und mit Rot enden. Mit anderen Worten: Vom Zentrum des Ringsystems nach außen gehend kehrt sich die Farbreihenfolge in den auf den weißen Ring folgenden Ringen um.

Interessant ist auch, dass die Farbringe ihre Erscheinung verändern, wenn man seinen Standpunkt verändert. Das Ringsystem verschiebt sich einerseits in umgekehrter Richtung zu der Standortänderung, gleichzeitig vergrößern sich die Krümmungsradien mit Annäherung an die Scheibe.



**Abb. 1** Farbiges Ringsystem bei der Beleuchtung eines Fensters mit einem Autoscheinwerfer. (Foto: Eva Seidenfaden)

All diese Phänomene lassen sich nicht mit Interferenz an dünnen Schichten erklären. Vielmehr handelt es sich um Quételet-Ringe, die in gängigen Lehrbüchern der Physik so gut wie keine Erwähnung finden [3, 4]. Dabei treten sie, wie wir inzwischen beobachtet haben, auch „in der freien Natur“ in unterschiedlichen Zusammenhängen auf. Dieses interessante Interferenzphänomen wurde zwar bereits von Newton im Jahre 1704 beobachtet, ist aber weitgehend in Vergessenheit geraten. Hier betrachten wir den physikalischen Hintergrund näher.

Entscheidend sind auf der Oberfläche der Scheibe haftende winzige Staubpartikel, die mit Licht in besonderer Weise wechselwirken (siehe „Quételet-Ringe quantitativ“, S. 186). Zwei Lichtstrahlen mögen von einem Punkt der Lichtquelle ausgehen. Einer von ihnen wird an einem Staubpartikel gestreut und anschließend an der Rückseite der Scheibe reflektiert, der andere Lichtstrahl wird umgekehrt zunächst an der Rückwand reflektiert und dann an demselben Partikel gestreut. Strahlen, die vom selben Punkt oder von einem räumlich eng begrenzten Gebiet einer Lichtquelle ausgehen, erfüllen auch bei gewöhnlichem weißen Licht die Kohärenzbedingung. Wenn sich diese beiden Strahlen anschließend überlagern, kommt es zur Interferenz, obwohl sie mit derselben Phase gestartet sind. Denn aufgrund der unterschiedlichen Reihenfolge von Streuung

## QUÉTELET-RINGE QUANTITATIV

Mathematisch lassen sich Quételet-Ringe am einfachsten für monochromatisches Licht (Wellenlänge  $\lambda$ ) erklären. Wir gehen gemäß der Abbildung (linkes Bild) von dem Spezialfall aus, dass der Beobachter O im Abstand  $b$  und die Lichtquelle L im Abstand  $a$  zum Fußpunkt F auf einer Linie liegen. Der Spiegel habe die Dicke  $t$ . Im Abstand  $r$  von F befinde sich ein Streupartikel P. Der Winkel zwischen den Geraden OF und OP sei  $\alpha$  und der zwischen LF und LP sei  $\beta$ .

Wir betrachten gemäß dem rechten Teil der Abbildung ein Paar Lichtstrahlen gleicher Phase, die jeweils in umgekehrter Reihenfolge an der verspiegelten Schicht (bei T und U) reflektiert und an P gestreut werden. Durch den unterschiedlich langen Weg ergibt sich Gangunterschied  $\Delta s$ . Die beiden Lichtstrahlen interferieren konstruktiv, wenn

$$m\lambda = \Delta s, \text{ mit } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

$\Delta s$  ergibt sich schließlich aus der Differenz der Gangunterschiede  $\Delta s_1$  und  $\Delta s_2$  zwischen den ausfallenden und einfallenden Strahlen. Weil  $a$  und  $b$  im Vergleich zu  $t$  groß und die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  sehr klein sind, können wir von parallelen Lichtstrahlen ausgehen.

Für  $\Delta s_1$  ergibt sich:

$$\Delta s_1 = n(QT + TP) - MP = n(RT + TP).$$

Dabei ist  $n$  ist der Brechungsindex der Glasscheibe.

Mit  $RT = TP \cos(2\beta')$  folgt:

$$\Delta s_1 = n TP (\cos(2\beta') + 1) = 2n TP \cos^2(\beta').$$

Dabei wurde  $\cos(2\beta') = \cos^2(\beta') - \sin^2(\beta')$  und  $\cos^2(\beta') = 1 - \beta^2 \sin^2(\beta')$  ausgenutzt.

Mit  $TP \cos(\beta') = PP' = t$  erhält man:

$$\Delta s_1 = 2 n t \cos(\beta').$$

Auf analoge Weise kommt man zu:

$$\Delta s_2 = 2 n t \cos(\alpha'), \text{ so dass sich schließlich als gesamter Gangunterschied ergibt:}$$

$$m\lambda = \Delta s = \Delta s_2 - \Delta s_1 = 2 n t [\cos(\alpha') - \cos(\beta')]. \quad (1)$$

Dieser Ausdruck lässt sich durch die einfach zu messenden Größen  $a$ ,  $b$  und  $r$  ausdrücken, wenn man

$\sin(\alpha') = n \sin(\alpha)$  (Brechungsgesetz) und

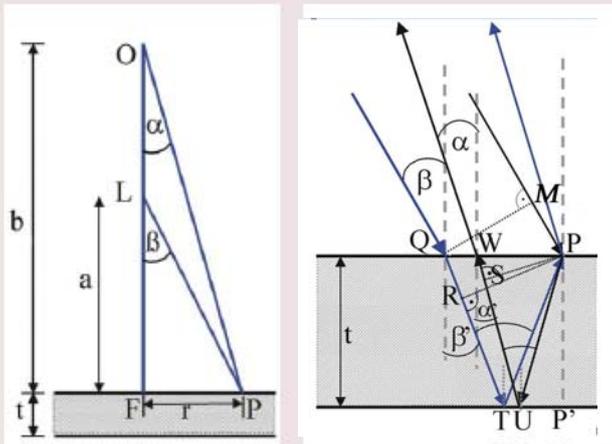
$\cos(\alpha') = (1 - \sin^2(\alpha)/n^2)^{1/2} \approx 1 - \alpha^2/2n^2$  benutzt.

Die letzte Näherung gilt für sehr kleine Winkel  $\alpha$ .

Auf analoge Weise erhält man  $\cos(\beta') \approx 1 - \beta^2/2n^2$ .

Setzt man außerdem  $\tan(\alpha) \approx \sin(\alpha) \approx \alpha \approx r/b$  und analog dazu  $\beta \approx r/a$ , so erhält man durch Einsetzen in (1):

$$m\lambda = \frac{r^2 t}{n} \left[ \frac{b^2 - a^2}{a^2 b^2} \right].$$



Strahlenverlauf zur Herleitung der Formel für die Intensitätsmaxima.



Abb. 2 Der Reflex des Scheinwerfers liegt auf einem hellen Ring. (Foto: Eva Seidenfaden)

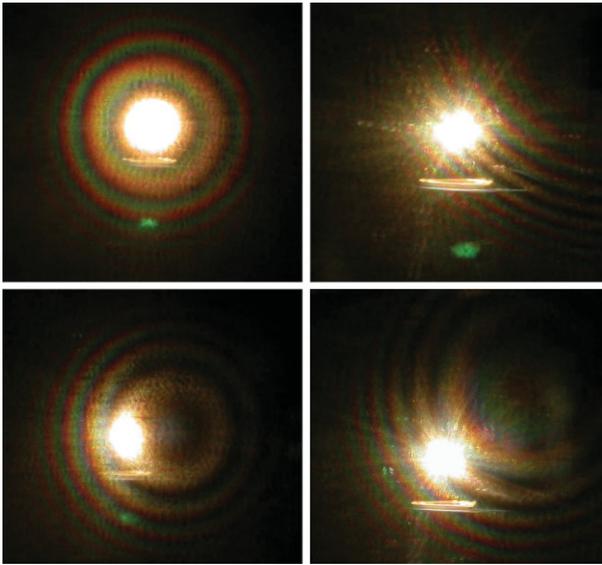
am Teilchen und Reflexion an der Scheibe legen sie im Allgemeinen unterschiedliche Wege zurück.

Nur wenn die Verbindungslinie zwischen Lichtquelle und Beobachter senkrecht auf der Spiegelfläche steht und das Staubteilchen am Fußpunkt dieser Linie liegt, sind die Wege gleich lang. Dann kommt es zur Verstärkung der Lichtstrahlen mit der Folge, dass man an dieser Stelle einen hellen Fleck sieht. Je weiter die Teilchen von diesem Punkt entfernt liegen, desto größer wird die Phasendifferenz, mit der sie im Auge des Beobachters ankommen.

Je nachdem, ob die Differenz ein ganzzahliges oder halbzahliges Verhältnis der Wellenlänge beträgt, kommt es zur Verstärkung oder Auslöschung der betreffenden Farbe des weißen Lichts, was insgesamt zu der spektralen Zerlegung des Lichts führt. Da alle gleich weit vom Fußpunkt der Verbindungslinie zwischen Lichtquelle und Beobachter gelegenen Teilchen dieselbe Bedingung erfüllen, entsteht eine kreis- oder ringförmige Anordnung von Farbringen. Dieser symmetrische Fall ist in Abbildung 3 oben links dargestellt. (Da der Beobachter in diesem Fall die Lichtquelle verdeckt, musste ein Teil des Lichts mit einem Strahlteiler in Form einer in einem Winkel von  $45^\circ$  in den Strahlengang gestellten Glasscheibe ausgekoppelt werden.)

Verschiebt sich die Blickrichtung des Beobachters von der Senkrechten, so entfernt sich das Zentrum des Ringsystems in entgegengesetzter Richtung. Das der nullten Interferenzordnung entsprechende Spiegelbild der Lichtquelle kommt auf einem der Ringe zu liegen, wodurch die typische exzentrische Anordnung der Interferenzordnungen bezüglich des Zentrums des Ringsystems hervorgerufen wird (Abbildung 3). Dies sind die Ansichten, wie man sie auch im Scheinwerferlicht auf der Fensterscheibe beobachtet.

Weil es bei der Streuung von Licht an Teilchen zu einem von Größe und Form abhängigen Phasensprung kommt, können an verschiedenen Teilchen gestreute kohärente



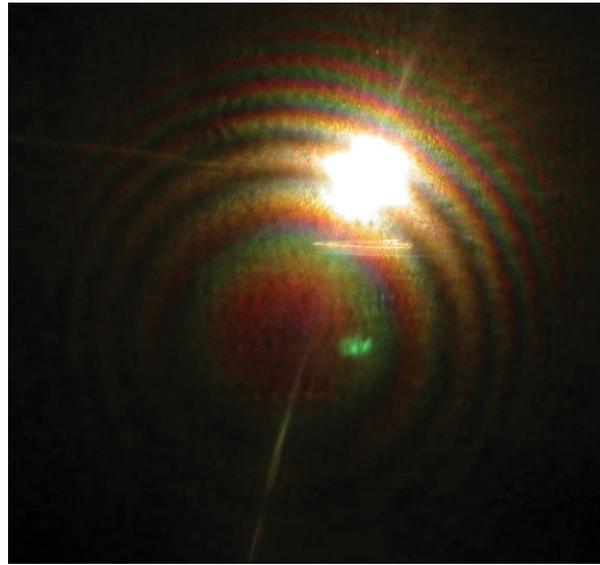
**Abb. 3** Quételetsche Ringsysteme eines mit Gipspulver bestäubten Spiegels aus unterschiedlichen Positionen betrachtet.

Lichtstrahlen nur dann interferieren, wenn sich die Teilchen hinreichend ähneln. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die Fraunhofer-Beugung an Teilchen, wie sie beispielsweise bei einer Pollenkorona auftreten. Im vorliegenden Fall der Reflexion von kohärenten Strahlpaaren an ein und demselben Teilchen ist die Gleichartigkeit des Phasensprungs von vornherein gegeben. Hieraus erklärt sich die weitgehende Unempfindlichkeit des Phänomens gegenüber Form und Größe der Teilchen.

### Selbstgemachte Ringsysteme

Die Quételet-Ringe lassen sich mit einfachen Mitteln experimentell herstellen. Wenn man statt eines Fensterglases einen normalen Haushaltsspiegel benutzt, hat man den Vorteil, dass eine größere Lichtintensität zur Verfügung steht. Denn bei der Fensterscheibe trägt nur der geringe Bruchteil des Lichts zur Interferenz bei, der an der Rückwand der Scheibe reflektiert wird. Deswegen beobachtet man die Ringe an Fensterscheiben auch am besten bei Dunkelheit im intensiven Licht eines Scheinwerfers.

Den Spiegel bestäubt man beispielsweise mit Gipspulver, aber auch wenn man den Spiegel mit fettigen Händen abtastet, kommt man zu guten Ergebnissen. Zur Beleuchtung benutzt man eine möglichst punktförmige oder weit entfernt aufgestellte Lichtquelle. Schon ergeben sich die in Abbildung 3 dargestellten Ringsysteme. Sie weisen alle Merkmale der an den verschmutzten Fensterscheiben beobachteten Farbringe auf. In Abbildung 4 ist deutlich der helle Reflex des nullten Maximums zu erkennen, dem sich die höheren Ordnungen nach außen und innen mit ihrer charakteristischen Farbfolge von Blau nach Rot anschließen. Vom Zentrum des Ringsystems ausgehend hat man das auf den ersten Blick merkwürdig anmutende Phänomen, dass sich nach dem hellen Ring die Farbreihenfolge umkehrt.



**Abb. 4** Typische exzentrische Anordnung des Quételetschen Ringsystems.

### Zusammenfassung

Quételetsche Ringe zeigen sich dem aufmerksamen Beobachter zuweilen an verschmutzten Fensterscheiben, die aus hinreichender Entfernung mit einem Autoscheinwerfer angestrahlt werden. Besonders geeignet scheinen Fensterscheiben zu sein, die durch eine Bedampfung mit einer reflektierenden Schicht ein stärkeres Reflexionsvermögen aufweisen als normale Scheiben. Quételet-Ringe kommen dadurch zustande, dass sich an Schmutzteilchen gestreute und anschließend an der Rückseite der Scheibe reflektierte Lichtstrahlen mit an der Scheibenvorderseite reflektierten und anschließend an jeweils denselben Teilchen gestreuten Lichtstrahlen überlagern. Das Phänomen lässt sich an einem mit Gips eingestäubten Spiegel im Lichte eines Halogenstrahlers experimentell nachvollziehen.

### Stichworte

Quételet-Ringe, Spektralfarben, Interferenz.

### Danksagung

Ich danke Kevin Zaddach, Carsten Bruns und Eva Seidenfaden.

### Literatur

- [1] H. J. Schlichting, Physik in unserer Zeit **2004**, 35 (2), 86.
- [2] Die Fotos stammen von Eva Seidenfaden. Sie zeigt auf ihrer homepage [www.parselene.de](http://www.parselene.de) weitere eindrucksvolle Fotos von Natur- und Alltagsphänomenen.
- [3] J. Walker, Scientific American **1981**, 245 (2), 116.
- [4] R.W. Pohl, Optik und Atomphysik, Springer-Verlag, Berlin 1967.

### Autor/Anschrift

Prof. Dr. H. Joachim Schlichting schreibt seit vielen Jahren für die Rubrik Spielwiese. Prof. Dr. H. Joachim Schlichting, Universität Münster, Institut für Didaktik der Physik, Wilhelm-Klemm-Straße 10, 48149 Münster. [Schlichting@uni-muenster.de](mailto:Schlichting@uni-muenster.de)