

Farben im Spinnennetz - Ein Gegenstand der Alltagsphysik -

Wilfried Suhr*, H. Joachim Schlichting+

*,+Universität Münster, Institut für Didaktik der Physik,
Wilhelm-Klemm-Straße 10, 48149 Münster
*wilfried.suhr@uni-muenster.de, +schlichting@uni-muenster.de

Kurzfassung

Trifft das Sonnenlicht aus einer geeigneten Richtung auf ein Spinnennetz, dann funkeln die Spinnwebfäden in leuchtenden Farben. Sie lassen sich auf ähnliche Ursachen zurückführen, wie durch Beugung an dünnen Drähten entstehende Farben. An Spinnwebfäden mit darauf aufgereihten winzigen Klebtropfchen, aus denen die Fangspirale in Radnetzen besteht, entstehen im Unterschied dazu weitaus komplexerer Interferenzmuster. Erkennbar werden diese Muster allerdings erst, wenn man nicht auf den Faden sondern auf die Lichtquelle fokussiert. Es wird dargestellt, wie sich experimentelle Befunde mit einer einfachen Modellrechnung nachstellen lassen.

1. Anlass der Untersuchung

Bei gewöhnlichen Lichtverhältnissen sehen Spinnwebfäden weiß aus. Betrachtet man sie aber in der Nähe des Gegenlichts der Sonne, so funkelt sie plötzlich in brillanten Farben. Der Versuch, dies fotografisch festzuhalten gestaltet sich aber meist schwierig. Denn fokussiert man auf die Spinnwebfäden selbst, so werden diese zwar scharf abgebildet, doch sind ihre Farben dann kaum zu erkennen. Erst durch Unschärfefotografie lassen sich ihre Farben auf ein Foto bannen, wobei man dann aber in Kauf zu nehmen hat, dass die Fäden selbst verschwommen aussehen (vgl. Abb. 1).



Abb.1: Durch Spinnwebfäden hervorgerufenen Farben bei leichter Defokussierung fotografiert.

Seiner besonderen Ästhetik wegen ist dieses Farbphänomen ein beliebtes Motiv für Fotografen. Mit

ihren vielen Fotos lieferten sie ganz unbeabsichtigt einen Beleg für den Variantenreichtum seiner Erscheinungsformen. Letztlich beruhen solche Varianten auf der bloßen Änderung der Fokussierung auf eine im Grunde immer gleiche Konstellation. Deshalb darf man annehmen, dass sie auf einfache Zusammenhänge zurückführbar sind. Die zu dieser Thematik auffindbaren physikalischen Erklärungsansätze [1, 2] haben sich allerdings nur auf Teilaspekte beschränkt. Der vorliegende Artikel ist daher ein Versuch, zu einer umfassenderen Erklärung beizutragen und damit zugleich einen physikalischen Lerninhalt aus einem alltäglichen Kontext für den Physikunterricht zu erschließen.

2. Farbphänomene bei Radnetzen

Die wohl bekannteste Form des Spinnennetzes ist das Radnetz, das vielen Arten von Webspinnen dem Beutefang dient. Typischerweise werden zu dessen Bau zwei Arten von Fäden verwendet. Die in radialer Richtung gespannten Fäden, besitzen selbst keine Klebkraft. Mit dem Lichtmikroskop betrachtet, gleicht ihre Form einem lang gestreckten, dünnen Zylinder. Zum Beutefang dient dagegen ein mit vielen Klebetropfchen bestückter Fangfaden, den die Spinne in Spiralförmigkeit an die Radialfäden heftet, die wie Speichen eines Rades angeordnet sind (Abb. 2). Im Folgenden werden wir erläutern, wie sich die Entstehung von Farben an beiden Fadenarten des Radnetzes erklären lässt und was sie unterscheidet.

Eine auf empirischen Untersuchungen beruhende Theorie der Farben in Spinnennetzen stellten Greenler und Hable im Jahr 1989 vor [1]. Es gelang ihnen damit denjenigen Effekt zu erklären, der die

größte Intensität liefert. Grundlegend dafür war ihre Annahme, dass die Farben im Wesentlichen durch Beugung entstehen. Was ihnen ein Indiz dafür lieferte war, dass sich beim Schwenken des Kopfes um einen von der Sonne beleuchteten Spinnwebfaden herum, die daran entstehenden Farben ändern. Desweiteren führten sie an, dass die Ausdehnung des Querschnitts von Spinnwebfäden nur wenige μm beträgt, womit sie einer Größenordnung von Strukturen angehören, die frei beobachtbare optische Beugungseffekte hervorrufen können.



Abb.2: Für den Bau ihrer Radnetze verwenden Spinnen zwei Fadenarten: In radialer Richtung nicht klebende Fäden (gelb markiert) sowie ein in Spiralforn angeordneter Fangfaden mit Klebtropfen (rot markiert).

Um das bei monochromatischer Beleuchtung entstehende Beugungsmuster eines Spinnwebfadens im Labor zu untersuchen, spannten Greenler und Hable einen mit Tröpfchen besetzten Fangfaden in eine Halterung ein und beleuchteten einen Abschnitt davon mit einem Laserstrahl. Die bezogen auf die Einfallrichtung auftretende, winkelabhängige Intensität des Beugungsmusters wurde mit einer Photomultiplier-Röhre ermittelt. Dieser Detektor war um eine Achse schwenkbar, die mit der Längsachse des Fangfadens übereinstimmte. Beim Schwenken überstrich seine Eintrittsblende eine zur Drehachse senkrechte Ebene durch die auch der Laserstrahl verlief.

In seiner Abfolge von Maxima und Minima stimmte das mit dieser Apparatur erfasste Beugungsmuster weitgehend mit einem Intensitätsverlauf überein, der für entsprechend dünne Zylinder theoretisch zu erwarten war. Was allerdings überraschte, war eine diesem Verlauf überlagerte Feinstruktur von geringerer Intensität. Indem die Blende der Photomultiplier-Röhre bis auf den Durchmesser des Laser-

strahls verkleinert wurde, ließ sich diese Feinstruktur nahezu ausblenden. Für ihre Herkunft machten Greenler und Hable die Tröpfchen verantwortlich, die ja einen deutlich größeren Querschnitt als der Faden haben und deren Beugungsmuster folglich engere Abstände zwischen den Maxima und Minima aufweisen muss. Unter der Voraussetzung, dass es sich um gleich große, nahezu sphärische Tröpfchen handelt, vermuteten sie ein davon ausgehendes Beugungsmuster von konzentrischen Ringen, das sich dem weitaus intensiveren Beugungsmuster überlagert, das die zylindrischen Abschnitte des Fadens hervorrufen.

Bei dieser Vorhersage des kompletten Beugungsmusters wurde allerdings nicht bedacht, dass die etwa gleich großen Klebtropfen nahezu äquidistant voneinander auf einer geraden Linie aufgereiht sind. Diese Konstellation entspricht nämlich einem linearen periodischen Gitter, dessen Gitterkonstante dem Abstand zwischen zwei benachbarten Tröpfchen entspricht. Welche Auswirkungen dies auf das entstehende Beugungsbild hat, werden wir später erläutern. Zunächst erörtern wir die an einem einfachen Radialfaden beobachtbaren Farben, die sich in guter Übereinstimmung mit der von Greenler und Hable vorgeschlagenen Theorie erklären lassen.

3. Beugung am zylindrischen Radialfaden

Bei einer Behandlung der Thematik im Physikunterricht lassen sich Parallelen zur klassischen Beugung am Spalt aufzeigen. Dazu sind zwei Schritte erforderlich. Zunächst vergleicht man Beugungsbilder, die einerseits ein dünner zylindrischer Draht und andererseits ein hauchdünner Streifen hervorrufen, der die Abmessungen der Parallelprojektion dieses Drahtes hat. Zwischen beiden Beugungsbildern werden nur geringe Unterschiede feststellbar sein (vgl. [3]). Der zweite Schritt ist die Anwendung des Prinzips von Babinet, wonach komplementäre Blenden das gleiche Beugungsbild hervorrufen. Entsprechend komplementär zum schmalen Streifen ist ein offener Spalt von gleicher Breite. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass es auch zwischen dem Beugungsbild eines zylindrischen Radialfadens und einem Spalt, dessen Breite der Fadendicke entspricht, große Übereinstimmungen gibt [3].

Um quantitative Zusammenhänge darstellen zu können, lässt sich mit diesem Argument die über das Schulniveau hinausgehende Beugungstheorie für zylindrische Objekte vermeiden. So reicht für eine Prognose der Lage von Intensitätsmaxima bereits der für einen Spalt leicht herleitbare Zusammenhang $\sin \alpha_m = (m + 0,5)\lambda / b$ aus, wobei α_m der Projektionswinkel des Maximums m -ter Ordnung, λ die Wellenlänge des einfallenden Lichts und b die Spaltbreite ist. Wegen der darin erkennbaren Proportionalität $\sin \alpha_m \sim \lambda$ ist das bei Beleuchtung mit rotem Licht entstehende Beugungsmuster eine ge-

streckte Version des Musters, das bei Beleuchtung mit blauem Licht entsteht. Auf der Basis eines stark vereinfachten Farbmodells, lässt sich nun anschaulich erklären, wie Beugungsfarben an einem Spalt bei Beleuchtung mit weißem Licht entstehen.

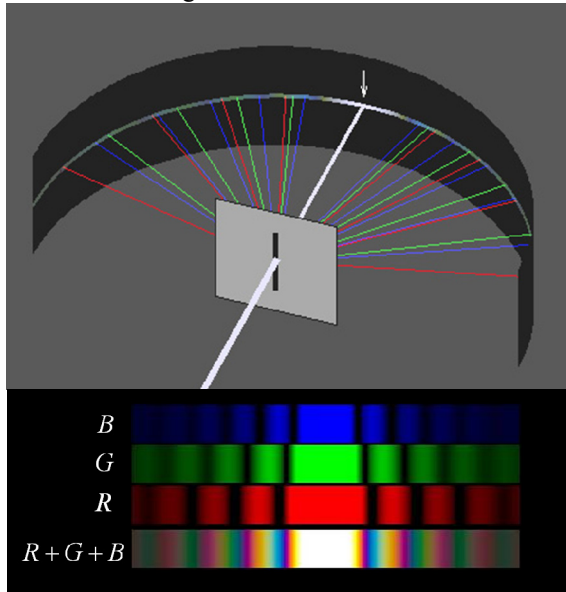


Abb.3: Ein Spalt wird mit weißem Licht beleuchtet: Das für die einzelnen Komponenten Rot (R), Grün (G) und Blau (B) entstehende Beugungsmuster ist unterschiedlich gestreckt. Sie überlagern sich durch Farbmischung zu einem vielfarbigen Beugungsmuster.

Entsprechend dem (beispielsweise bei Farbdisplays verwendeten) RGB-Modell entsteht weißes Licht durch Mischung von nur drei monochromatischen

Komponenten, nämlich von geeignetem rotem, grünem und blauem Licht. Wie in Abb. 3 dargestellt, würde jede dieser Komponenten ein ähnliches Beugungsmuster liefern. Proportional zur jeweiligen Wellenlänge liegt zwischen den Projektionswinkeln ihrer Maxima und Minima allerdings eine unterschiedliche Streckung. Durch Überlagerung dieser drei durch Streckung zueinander verschobenen Beugungsmuster entstehen daher je nach Projektionswinkel unterschiedliche Mischfarben.

In analoger Weise entstehen auch die Beugungsfarben an einem zylindrischen Spinnwebfaden, wenn dieser von weißem Sonnenlicht beleuchtet wird. Sie fallen allerdings nur unter der Bedingung ins Auge, dass die Verbindungslinie zwischen Auge und Sonne innerhalb der Ebene liegt, für die die Längsachse des Spinnwebfadens eine Flächennormale ist. Da sich der vom Faden ausgehende Beugungsfächer mit zunehmendem Abstand immer weiter ausdehnt, enthält der Ausschnitt des Beugungsmusters, der durch die Pupille in das Auge eines Betrachters fällt um so weniger Details, je weiter er vom Faden entfernt ist. Schwenkt er also seinen Kopf, so ändern sich dabei die Farben umso weniger, je größer sein Abstand vom Faden ist.

4. Einfluss der Fokussierung

Welchen Einfluss die Fokussierung auf die Sichtbarkeit der Beugungsfarben hat, illustriert die in Abb. 4 dargestellte Situation. Dort wird ein senkrecht zur Bildebene verlaufender Spinnwebfaden mit weißem Licht beleuchtet, das von einer weit entfer-

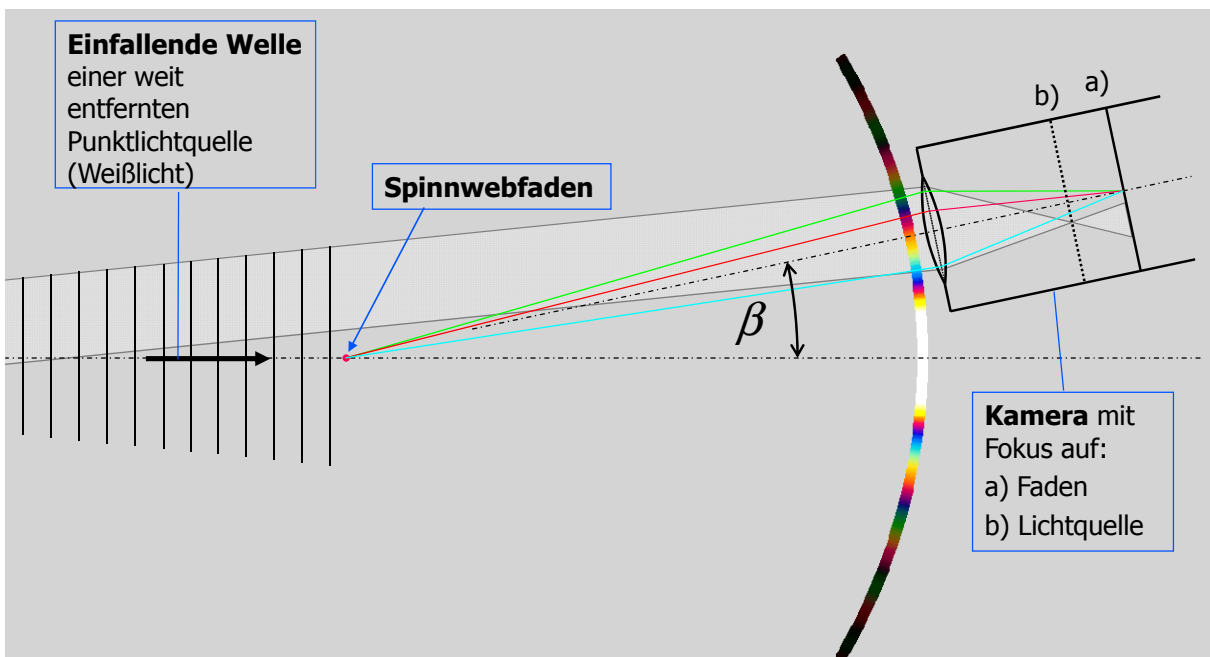


Abb.4: Schema eines Versuchsaufbaus zur fotografischen Erfassung des Beugungsbildes eines Spinnwebfadens bei Beleuchtung mit weißem Licht. Der Spinnwebfaden verläuft senkrecht zur Zeichenebene. Er wird von einer ebenen Welle beleuchtet. Die optische Achse der Kamera ist unter dem Projektionswinkel β auf den Faden gerichtet. Auf einer bei a) positionierten Filmebene wird der Faden und bei b) die Lichtquelle scharf abgebildet.

ten Punktlichtquelle stammt. Die im projizierten Beugungsfächer in einem bestimmten Abstand anzu-treffenden Farben sind auf einem Kreisbogen schematisch dargestellt. Die bei einem bestimmten Projektionswinkel β aufgestellte, einfache Linsen-kamera dient zur Abbildung. Liegt die Filmebene der Kamera bei der Marke a), dann wird auf ihr der Faden scharf abgebildet. Die durch die Öffnung des Objektivs hindurch gelangenden Strahlen des Beugungsfächers tragen in diesem Fall zur Abbildung des dünnen Fadens bei, wobei sich ihre Farben auf diesem dünnen Fadenabbild mischen. Das Ergebnis ist ein scharfes Bild des Fadens, der in einem bestimmten Abschnitt so hell leuchtet, dass man die darin enthaltene Mischfarbe kaum erkennen kann. Der helle Abschnitt hat dieselbe Ausdehnung, wie die bei dieser Fokussierung unscharf abgebildete Lichtquelle (vgl. Abb. 5 rechts). Der durch die Aper-tur des Objektivs in die Kamera gelangende Aus-schnitt des Beugungsfächers wird dagegen Bestand-teil der Abbildung, wenn man die Lichtquelle scharf abbildet. Dazu muss die Filmebene in Abb. 4 bei der Marke b) liegen. Die sich nun aus vielen Zer-streuungskreisen zusammensetzende, unscharfe Abbildung des Fadens weist quer zum Fadenverlauf einen hellen Streifen auf, der die Farben des erfass-ten Ausschnitts des Beugungsfächers aufweist. Die Streifenbreite entspricht hier ebenfalls der Ausdeh-nung der nunmehr scharf abgebildeten Lichtquelle (vgl. Abb. 5 links).

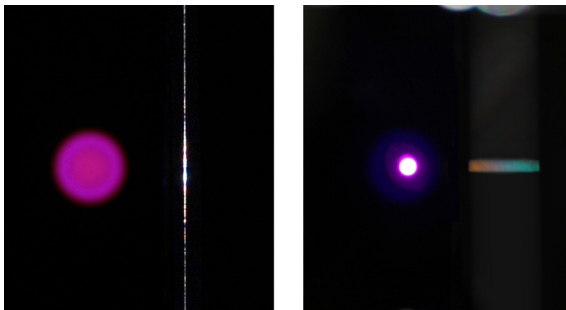


Abb.5: Mit direktem Sonnenlicht beleuchteter Radialfa-den. (Die links daneben erkennbare Sonne, wird durch ein Filter beobachtet.) Fokussiert wurde im linken Bild auf den Faden, im rechten Bild auf die Sonne. Auf dem un-scharfen Bild des Fadens erscheint ein Streifen mit Beugungsfarben.

5. Der Fangfaden als lineares Gitter

Für unsere Untersuchungen verwendeten wir Spinnwebfäden aus Radnetzen einer heimischen Kreuzspinnenart, die einerseits aus glatten Radialfä-den und andererseits aus einem mit Klebetropfchen besetzten Fangfaden bestehen (siehe Abb. 2). So-wohl die Radialfäden als auch der Fangfaden waren etwa $2,8\mu\text{m}$ dick. Auf dem Fangfaden waren die Tröpfchen nebeneinander im etwa gleichen Abstand von etwa $153\mu\text{m}$ aufgereiht. Ihre rotationssymmet-rische Form erinnerte an eine Zitrone. Untereinander

waren die Tröpfchen etwa gleich groß, wobei ihr kleinster Querschnitt einen Durchmesser von etwa $28\mu\text{m}$ hatte (Abb. 6).

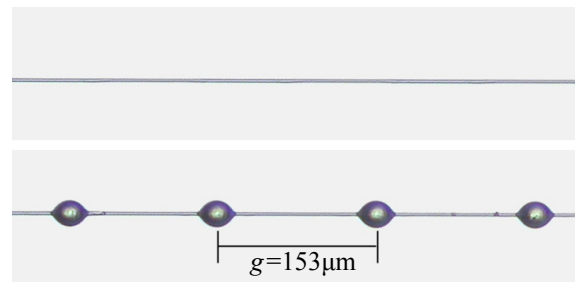


Abb.6: Mikroskopische Aufnahme von Spinnwebfäden aus dem Radnetz einer Kreuzspinne. Annähernd zylind-risch geformter Radialfaden (oben). Fangfaden mit Klebe-tröpfchen (unten).

Um eine Vorstellung von dem Beugungsmuster zu erlangen, das ein beleuchteter Fangfaden hervorruft, waren Greenler und Hable in [1] davon ausgegan-gen, dass es sich um eine Überlagerung der beiden Beugungsmuster handelt, die jeweils entstehen wür-den, wenn man einerseits nur den zylindrischen Faden und andererseits die davon getrennten Tröpfchen beleuchten würde. Um diese Vorhersage zu überprüfen, wollten wir uns einen visuellen Überblick über das Beugungsmuster verschaffen. Da hierbei auch Bereiche von geringer Intensität zu erkennen sein sollten, begaben wir uns dafür in einen verdunkelbaren Laborraum. Wie Abb. 7 zeigt, spannten wir dort einen Fangfaden so auf, dass er längs der Achse eines zylindrisch gewölbten Projek-tionsschirms verlief. Zur monochromatischen Be-leuchtung des Fadens diente ein grüner Laser (4mW , $\lambda = 532\text{ nm}$) mit einem Strahldurchmesser von $1,5\text{ mm}$.

Das dabei projizierte Beugungsmuster füllte den gesamten Schirm aus und ragte noch weit darüber hinaus. Um aus diesem komplexen Muster Rück-schlüsse auf charakteristische Abmessungen des Fangfadens zu ziehen, gingen wir davon aus, dass seine Komplexität auf der Überlagerung von einfa-chen Streifen- oder Ringmustern beruht, die jeweils durch Beugung an einzelnen Segmenten des Fangfa-dens entstehen würden. Unser erster Analyseschritt bestand daher darin, solche regelmäßigen Streifen-oder Ringmuster im komplexen Beugungsmuster als zusammengehörige Gestalt zu erkennen. Ein wichti-ges Unterscheidungsmerkmal war dabei die typische Größenordnung der im Muster auftretenden Strei-fenabstände. Anhand dieses Merkmals konnten wir erkennen, dass sich das komplexe Beugungsmuster des Fangfadens im Wesentlichen aus drei einfache-ren Mustern zusammensetzt.

Den größten Winkelabstand zwischen den Intensi-tätsmaxima, von etwa 16 Grad , hatte ein Muster aus vertikalen Streifen, das man in Abb. 7 an einem in horizontaler Richtung erfolgenden Wechsel der

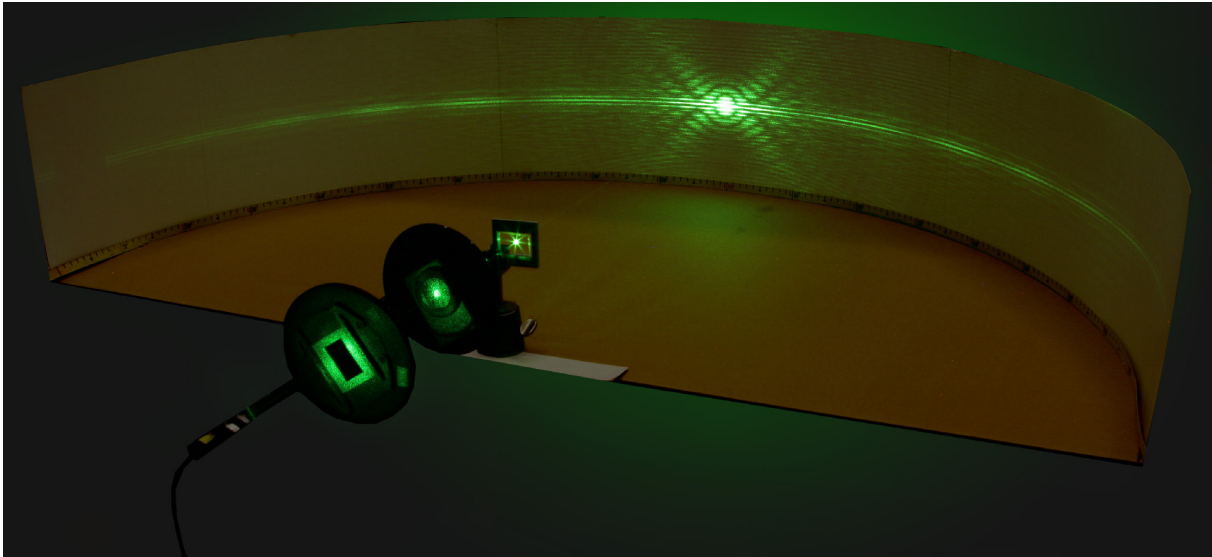


Abb.7: Projiziertes Beugungsmuster eines Fangfadens. Längs der Achse des zylindrisch gewölbten Projektionsschirms verläuft der Faden, der mit einem Laserstrahl beleuchtet wird.

Intensität erkennt. Da der Streifenabstand eines Beugungsmusters umso größer wird, je kleiner das beugende Objekt ist (und umgekehrt), musste dieses breitesten Streifenmuster von der kleinsten Abmessung des Fangfadens herrühren. Dass es sich hierbei um den Durchmesser des Querschnitts des Fangfadens handelte, zeigte die Übereinstimmung der Lage der Maxima mit berechneten Werten für einen Einfachspalt, dessen Breite dem Durchmesser des Fadens entsprach. Außerdem hatten die durch Beugung an einem einfachen Radialfaden entstehenden Maxima etwa dieselben Winkelabstände.

Um das in Vorwärtsrichtung projizierte helle Zentrum herum, erkennt man auf Abb. 7 konzentrische Beugungsringe von schwacher Intensität. Ihre ansonsten etwa kreisförmige Form ist in vertikaler Richtung deutlich gestaucht. Bei Ringen höherer Beugungsordnung lag der Winkelabstand zwischen den Maxima in horizontaler Richtung etwa bei $1,4^\circ$. Da zu vermuten war, dass dieses Muster durch Beugung an den Klebetröpfchen entstand, verwendeten wir zur Abschätzung der Größe des beugenden Objekts die klassische Gleichung für die Beugung an einer Lochblende. Diese Rechnung zeigte, dass bei der betrachteten Beugungsordnung der selbe Winkelabstand zwischen den Maxima auftreten würde, wenn der Durchmesser der Lochblende etwa mit dem Durchmesser des kleinsten Querschnitts eines Klebetröpfchens übereinstimmt.

Ein System eng beieinander liegender, horizontaler Streifen erstreckt sich über das gesamte Beugungsmuster in Abb. 7. Zwischen seinen Maxima lag typischerweise ein Winkelabstand von $0,2^\circ$. Da es sich um den kleinsten Winkelabstand im Beugungsbild handelte, musste dieser mit der größten Abmessung des beugenden Fangfadens verknüpft sein. Bei diesem größten Abstand konnte es sich nur um den Abstand g zwischen benachbarten Klebetröpfchen

handeln. Zerlegt man einen gerade verlaufenden Fangfaden gedanklich in Abschnitte von der Länge g , so besteht jeder Abschnitt aus einem Klebetröpfchen und einem jeweils gleich langen Stück des zylindrischen Fadens. Es handelt sich somit um gleichartige Beugungsobjekte, die sich entlang einer geraden Linie periodisch wiederholen. Diese Anordnung entspricht daher einem linearen Gitter mit der Gitterkonstanten g . Ein Indiz dafür, dass ein Gitter das enge Streifenmuster hervorruft, ist der starke Kontrast zwischen den scharf begrenzten Maxima und Minima des Streifenmusters. Setzt man den zwischen den Maxima gemessenen Winkelabstand in die herkömmliche Gittergleichung ein, so erhält man eine Gitterkonstante, die dem gemessenen Abstand g der Tröpfchen sehr nahe kommt.



Abb.8: Unschärfefotografie eines Radnetzes. Jeder zwischen den Speichen aufgespannte Abschnitt des Fangfadens weist ein System paralleler, farbiger Streifen auf.

Bei ihrer Erklärung der Farben in Spinnennetzen hatten Greenler und Hable diese Gitterwirkung des Fangfadens nicht berücksichtigt. Ohne sie lässt sich aber beispielsweise nicht erklären, warum bei un-

scharf fotografierten Spinnwebfäden oft eng beieinander liegende Streifen zu erkennen sind, die parallel zu beiden Seiten des hellsten Streifens liegen und deren Farbfolge dazu symmetrisch angeordnet ist (vgl. Abb. 8).

6. Numerisches Modell der Beugung am Fangfaden.

Um vorherzusagen zu können, wie sich die Änderung von geometrischen Parametern des Fangfadens auf sein Beugungsbild auswirkt, entwickelten wir ein sehr einfaches numerisches Modell. Da uns eine exakte Lösung mittels der Mie-Theorie zu aufwendig erschien, verzichteten wir auf deren Exaktheit und beschränkten uns stattdessen auf ein stark vereinfachtes Modell des Fangfadens. Dafür reduzieren wir ihn auf eine zweidimensionale Form, die seiner Parallelprojektion auf eine Ebene entspricht. Diese zweidimensionale Form zerlegten wir in ein quadratisches Raster, wobei wir der Mitte jedes Rasterelements ein punktförmiges Streuzentrum zuordneten. Als Beleuchtung fügten wir eine ebene Welle in das Modell ein, die sich senkrecht zu der Ebene ausbreitet, in der sich die Streuzentren des Fadenmodells befinden. Entsprechend dem Huygens-Fresnelschen Prinzip stellt jedes Streuzentrum den Ausgangspunkt einer sekundären Raumkugelwelle dar. Um das durch Interferenz dieser Sekundärwellen zustande kommende Beugungsmuster in seinem Fernfeld zu erfassen, wurde dort gedanklich ein Schirm plazierte, der es auffängt. Für jeden ausgewählten Bildpunkt auf diesem Schirm wurde die dort anzutreffende Intensität durch eine Überlagerung aller Wellen berechnet, die von jedem Streuzentrum des Fangfadens ausgehen (vgl. Abb. 9).

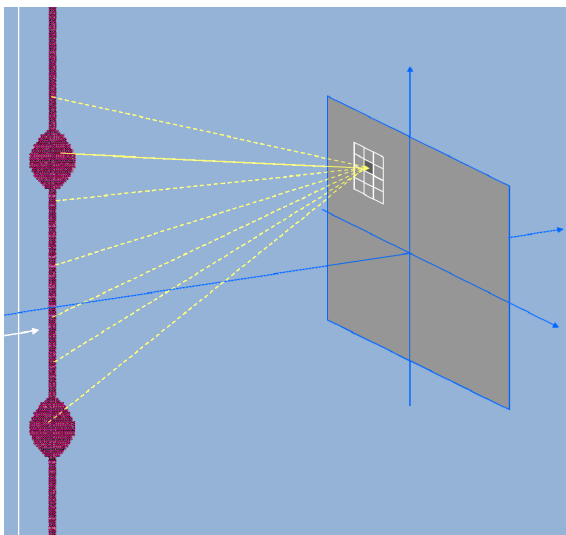


Abb.9: Schematische Darstellung der Geometrie des Modells zur Berechnung des Beugungsmusters eines Fangfadens. Die an jedem Rasterpunkt des Schirms (rechts) herrschende Intensität berechnet sich aus der Überlagerung der von allen Streuzentren des Fadens (links) ausgesandten Sekundärwellen.

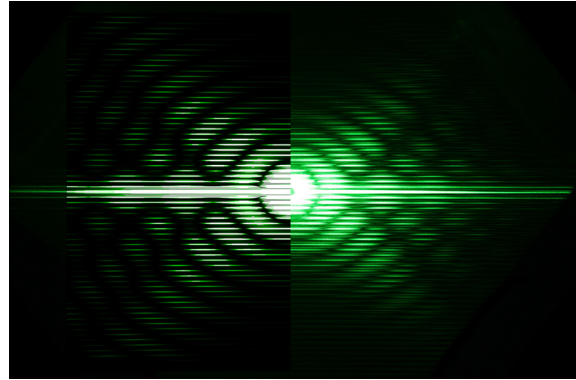


Abb.10: Vergleich von berechnetem Beugungsmuster (links) mit einem im Labor projizierten (rechts).

Das auf diese Weise berechnete Beugungsbild eines Fangfadens (Fadendicke = $2,8\ \mu\text{m}$, Tröpfchenabstand $g = 153\ \mu\text{m}$, Durchmesser des kleinsten Querschnitts eines Tröpfchens = $28\ \mu\text{m}$) zeigt Abb. 10 (links). Zum Vergleich zeigt die rechte Hälfte dieser Abbildung ein bei gleichen geometrischen Verhältnissen im Labor erstelltes Beugungsbild eines Fangfadens mit gleichen Abmessungen. Dafür wurde der Faden mit einem Laserstrahl monochromatisch ($\lambda = 532\text{nm}$) beleuchtet und das dabei projizierte Beugungsbild mit einem Schirm aufgefangen. Qualitativ stimmen beide Beugungsbilder gut überein. Gute Übereinstimmung besteht auch bei den Streifenabständen des horizontal verlaufenden, engen Streifenmusters, das durch die Gitterwirkung des Fangfadens entsteht. Leichte Abweichungen sind zwischen den Abmessungen der ringförmigen Beugungsmuster erkennbar. Dies liegt vermutlich an der im Modell vorgenommenen Reduktion des Fangfadens auf eine zweidimensionale Form und den damit verbundenen Verzicht auf eine exakte Lösung.

7. Farben am Fangfaden

Um das bei Beleuchtung eines Fangfadens mit weißem Licht entstehende farbige Beugungsmuster

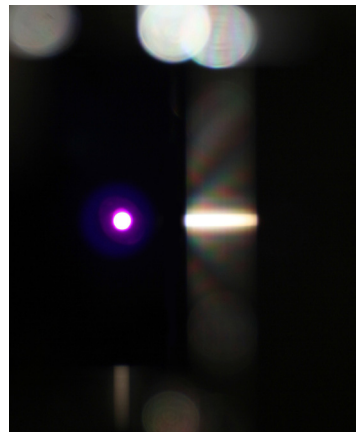


Abb.11: Mit direktem Sonnenlicht beleuchteter Fangfaden. Ein strukturiertes Beugungsmuster erstreckt sich über die gesamte Fadenlänge.

fotografisch zu erfassen, verwendeten wir den bereits im Abschnitt 4 erläuterten Aufbau (Abb. 4). Als Lichtquelle diente Sonnenlicht, das über einen Heliostaten in den Laborraum gespiegelt wurde. Im Unterschied zum Beugungsbild des zylindrischen Radialfadens (Abb. 5), bei dem sich quer über den unscharf fotografierten Faden nur auf Höhe der Lichtquelle ein schmales Band von Beugungsfarben erstreckte, tritt bei einem auf gleiche Weise fotografierten Fangfaden (Abb. 11) über die gesamte Länge des Fadens hinweg ein Farbmuster auf. Seine Intensität ist gering im Vergleich zur Intensität des Lichts, das von dem hellen Band stammt, das auf Höhe der Lichtquelle quer über den Faden verläuft. Weil dessen hohe Intensität die Farbkanäle der Digitalkamera übersteuerte, wurde es weiß dargestellt.

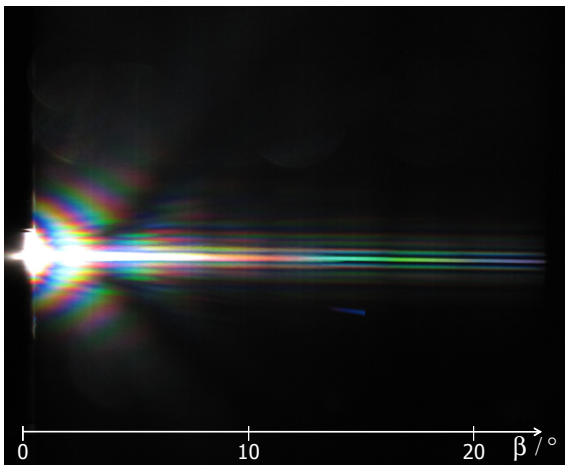


Abb.12: Zusammengefügte Serienaufnahme von Beugungsbildern eines Fangfadens für Projektionswinkel zwischen ca. 0° bis 22° .

Je nach Größe der Apertur des Kameraobjektivs kann die Kamera nur einen begrenzten Ausschnitt aus dem gesamten Beugungsbild erfassen. Vorausgesetzt, die optische Achse der Kamera ist stets auf die Fadenmitte gerichtet, so liegt zwischen der Kameraachse und einem vom Zentrum der Lichtquelle zur Fadenmitte gerichteten Strahl ein Winkel β , der einem Projektionswinkel des Beugungsmusters gleich kommt. Welchen Ausschnitt die Kamera von diesem Muster erfasst, wird daher maßgeblich von β bestimmt. Die Erfassung eines großen Ausschnitts des Beugungsmusters erforderte einen Kameraschwenk um den Faden herum. Dieser Schwenk ließ sich als Serienaufnahme realisieren, wobei β nach jeder Einzelaufnahme schrittweise gerade um den Betrag verändert wurde, bei dem noch ein kleiner Überlapp zu dem in benachbarter Position erfassten Ausschnitt des Beugungsbildes verblieb. Diese Einzelaufnahmen ließen sich anschließend zu einer Serienaufnahme zusammenfügen (Abb. 12). Von der Intensitätsverteilung her, ist ihr die enge Verwandtschaft zu Abb. 10 anzusehen.

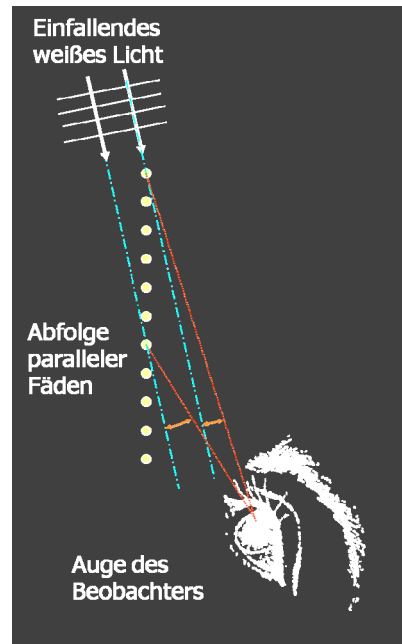


Abb.13: Blick auf die durch Fangfäden eines Radnetzes gebildete „Sprossenleiter“. Der Projektionswinkel β ist umso größer, je näher die „Sprosse“ beim Auge des Beobachters liegt.

Auch in der Natur bietet sich gelegentlich die Chance, dieses umfassende farbige Beugungsbild in einem Radnetz zu beobachten. Damit seine intensitätsschwachen Farben zum Vorschein kommen, muss der Hintergrund des Radnetzes möglichst dunkel sein. Das Sonnenlicht sollte die Ebene, in der das Netz liegt, aus einem möglichst flachen Winkel streifen. Die zwischen zwei Speichen eines Radnetzes gespannten Abschnitte des Fangfadens verlaufen etwa parallel, wie dies bei den Sprossen einer Leiter

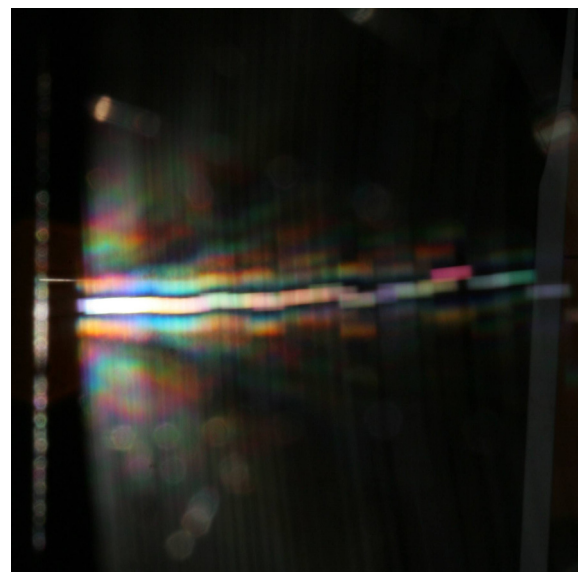


Abb.14: Die hintereinander aufgereihten Beugungsbilder von Fangfäden in einem Radnetz lassen eine zusammenhängende Beugungsfigur (vgl. Abb. 12) erkennen.

der Fall ist. Stehen die „Sprossen“ dieser Fadenleiter senkrecht zum einfallenden Licht, dann lassen sich auf jedem zugehörigen Fadenabschnitt Beugungsfarben beobachten. Befindet sich der Beobachter nun nahe am Radnetz, dann ist der Projektionswinkel β für weiter vom Auge entfernte „Sprossen“ kleiner, als für solche, die dem Auge nahe sind (vgl. Abb. 13). Entsprechend dem jeweils zugehörigen Projektionswinkel β projiziert jede der „Sprossen“ also einen unterschiedlichen Ausschnitt des Beugungsbildes ins Auge des Beobachters. Fotografiert man die Fadenleiter aus dieser Beobachterposition und fokussiert dabei auf die Lichtquelle, dann werden die jeweiligen Abschnitte des Beugungsbildes hintereinander aufgereiht erkennbar (Abb. 14).

8. Literatur

- [1] Greenler, Robert G.; Hable, Joel W. (1989): Colors in Spider Webs. In: American Scientist, 77, 4, 368-373
- [2] Hinsch, Klaus D. (2007): Unschärf wird schön – farbenprächtige Beugung an Spinnfäden. In: DGaO Proceedings, 108. Tagung, <http://www.dgao-proceedings.de> (Stand 5/2010)
- [3] Greenler, Robert G.; Hable, Joel W.; Slane, Patrick O. (1990): Diffraction around a fine wire: How good is the single-slit approximation? In: American Journal of Physics, 58, 4, 330-331