

# Zum Haidinger-Büschel

Johannes Grebe-Ellis

(aus: DPG (Hrsg.) *Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung der DPG*. Leipzig, 2002)

---

## Vorbemerkung

Im Kontext einer Phänomenologie der Polarisation, die Polarisationszustände als Bildzustände beschreibt, kommt dem sogenannten "Haidinger-Büschel" eine zentrale Bedeutung zu, gestattet es doch, mit bloßem Auge etwas über den Polarisationszustand verschiedener Ansichten zu erfahren. In dem Beitrag werden das Phänomen selbst und die Umstände beschrieben, unter denen es erscheint. Mit den komplexen Bedingungen, die im Auge zum Auftreten des Haidinger-Büschels als Kontrastphänomen führen, hat sich seit den Hinweisen von Helmholtz ausführlich die Ophthalmologie beschäftigt. In der Physik ist das Phänomen, das 1844 erstmals von dem Wiener Mineralogen Wilhelm Karl Haidinger beschrieben wurde, lange unbekannt geblieben, weil es sich nicht objektivieren lässt. Es wird dagegen gezeigt, dass in seinem Auftreten alle für die Polarisationsoptik charakteristischen Elemente zusammenwirken und dass sich die geometrischen Bedingungen dieses Zusammenwirkens auch objektiv anschauen lassen. Für den, der einen gewissen Übungsaufwand zu Beginn nicht scheut, kann es damit zu einem legitimen Untersuchungsmittel werden, das auf immer erneut überraschende Weise das Sehfeld bereichert.

## 1 Einleitung

Ziel einer Optik der Bilder, wie sie von Maier [Mai86, Mai81, Mai84] und Mackensen [MO98] seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt wurde, ist die konsequente Erarbeitung der optischen Erscheinungen aus den Ordnungen ihres Erscheinens. Darauf, diese Erscheinungen auf selbst nicht erscheinende, sondern unabhängig von der Beobachtung in der Vorstellung zugrundegelegte Vorgänge mit hypothetischen Strahlen, Teilchen oder Wellen zurückzuführen, wird bei diesem Vorgehen verzichtet. Damit wird einer Forderung entsprochen, die schon verschiedentlich [Mue48], insbesondere aber von Goethe [Goe81] gestellt wurde. Die Bedingungen der Erscheinungen werden definiert über Wege, sie herzustellen. Die Aussagen einer solchen Vorgehensweise haben deshalb die Form operationell-empirischer Axiome. Didaktisches Interesse an der methodischen Seite dieses Ansatzes besteht durch das bewusste Abstützen der Urteile auf die selbstgemachte Erfahrung, d.h. auf subjektive Versuche.

Im Rahmen dieser auch als hypothesen- bzw. modellfrei bezeichneten Optik wird vom Verfasser an der Entwicklung einer Phänomenologie der Polarisation gearbeitet

Von besonderer Bedeutung für eine solche Phänomenologie ist die Tatsache, dass das menschliche Auge Polarisation wahrnehmen kann. Dass dieses Vermögen in unterschiedlichen Ausprägungen bei Tieren auftritt, ist spätestens seit den beeindruckenden Untersuchungen von Frisch [Fri49] zur Bedeutung der Polarisation des Himmelslichtes als orientierender Faktor bei den Tänzen der Bienen bekannt, die Ende der 40er Jahre des 20. Jahrhunderts veröffentlicht wurden. Waterman hat in einer Arbeit [Wat75] von 1975 107 polarisationssensitive Spezies aufgeführt. 36 davon – dazu gehören die Bienen – nutzen die Polarisation des blauen Himmels als eine Art "Sonnenkompass". Zu den jüngsten Arbeiten auf diesem Gebiet gehören die Untersuchungen von Wehner [Weh98] zum Polarisationssehen der *Cataglyphis bombycinus*, einer Wüstenameise der Sahara, die sich bei ihren über Hunderte von Metern durch strukturloses Gelände führenden Jagdzügen offenbar an dem mit dem augenblicklichen Sonnenstand verknüpften Polarisationsmuster des blauen Himmels orientiert.

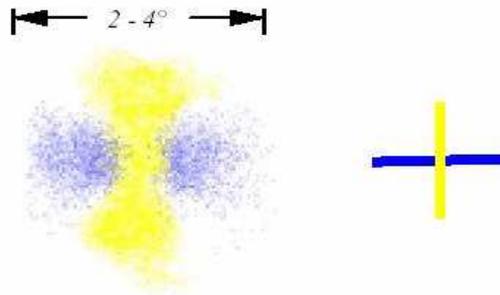
Dem Menschen wird – zumindest was die physikalische Lehrbuchliteratur betrifft – die Fähigkeit des Polarisationssehens immer noch größtenteils abgesprochen, – aus Gründen, die verständlich sind, die sich aber bei genauerer Prüfung als unberechtigt erweisen.

Die eigentliche Erforschung des menschlichen Polarisationssehens ist, ausgehend von den bis heute wegweisenden Thesen von Helmholtz [Hel96, S. 566-572], in der Ophthalmologie erfolgt. Hier hat man sich die Fähigkeit des menschlichen Auges, beispielsweise im Durchblick durch eine gewöhnliche Polarisationsfolie auf Anrieb deren kristallographische Hauptachse bzw. die Polarisationsrichtung bestimmen zu können, seit den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts in quantitativen Korrespondenz- und Fixationsprüfungen sowie in Untersuchungen zur Funktion der Macula zunutze gemacht [CE72, S. 376-378] und [Ale95, S. 596-603].

## 2 Das Haidinger-Büschel

Vom "menschlichen Polarisationssehen" zu sprechen ist insofern ungenau, als "Polarisation" ein Begriff ist und man Begriffe nicht sehen kann. Was man im Auge hat, wenn vom "menschlichen Polarisationssehen" die Rede ist, ist das sogenannte Haidinger-Büschel, eine zarte, gelb-violette und symmetrische Figur, mit der das Auge auf den Anblick einer linear polarisierten Fläche antwortet.

Die Erscheinung wurde von dem Mineralogen und Begründer der Geologischen Reichsanstalt in Wien, Wilhelm Karl Haidinger (1795-1871) in den 40er Jahren des 19. Jahrhunderts bei Untersuchungen zum Pleochroismus der Kristalle entdeckt und in einer Reihe von lesenswerten Arbeiten zwischen 1844 und 1854 beschrieben [Hai44, Hai46b, Hai46a, Hai54]. Eine Würdigung des dort ausgebreiteten Beobachtungsreichtums kann hier nicht gegeben werden. Dafür



**Abbildung 1:** Das Haidinger-Büschel. Von dem nebenstehenden Richtungsschema mit Gelb- und Blaurichtung wird in den folgenden Abbildungen Gebrauch gemacht.

sei auf die gegenwärtig umfangreichste Arbeit zum Haidinger-Büschel von Pröbstl [Prö98] verwiesen.

Das Haidinger-Büschel ist ein Kontrastphänomen. Es erscheint in der Folge des Anblicks einer linear polarisierten Fläche in der Mitte des Gesichtsfeldes und hat dort eine Ausdehnung von  $2-4^\circ$ . Die größte Hürde beim ersten Versuch, es zu sehen, besteht erfahrungsgemäß in einer der Zartheit der Erscheinung unangemessenen Erwartung. Die Erfahrung der spezifischen Kontraststärke, mit der das Büschel erscheint, lässt den Umgang damit rasch sicherer werden. Bereits Stokes [Sto83] hat sich mit der relativen Sichtbarkeit des Büschels in verschieden farbigen Beleuchtungen beschäftigt und darauf hingewiesen, dass die Erscheinung durch blaue Gläser am deutlichsten beobachtet wird, wogegen sie durch gelbe Gläser kaum mehr auszumachen ist. Quantitative Untersuchungen der Ophthalmologie, z.B. von Gehrke, bestätigen dies. Weiterhin bedingt ist die Deutlichkeit der Erscheinung von dem Polarisationsgrad der Ansicht: Je höher dieser ist, desto klarer tritt das Büschel hervor. Die untere Grenze liegt nach Messungen von Comberg und Witt bei einem Polarisationsgrad von 50%. Die Verweildauer des Büschels folgt der Lokaladaptation der Netzhaut und beträgt im Mittel einige Sekunden; dann verblasst es und kann durch Änderung der Netzhautorientierung bzw. der Polarisationsrichtung der Ansicht erneut hervorgerufen werden.

### 3 Wie kann man das Haidinger-Büschel beobachten?

Es werden im Folgenden vier Beobachtungssituationen vorgestellt. Dieselben sind so gewählt, dass zugleich ein Eindruck von der Wandelbarkeit der Bedingungen entsteht, unter denen das Haidinger-Büschel erscheint. Es ergibt sich eine Stufenfolge.

### 3.1 Das "Atmosphärenbüschel"

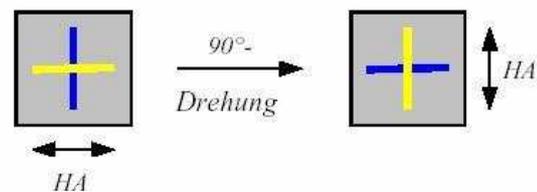
Das "Atmosphärenbüschel" erscheint dem Blick an den blauen Himmel, am deutlichsten im Winkelabstand von  $90^\circ$  zum augenblicklichen Sonnenstand. Dort ist die relative Polarisation des Himmels am größten (60-70%). Das Aufrufen des Büschels gelingt durch die Änderung der Netzhautorientierung gegenüber der Himmelsansicht, d.h. durch Hin- und Herwiegen des Kopfes. Oft genügt für die nötige Kontrastierung auch schon der Ansichtswechsel, der sich für den wandernden Blick von selbst ergibt.

### 3.2 Das "Oberflächenbüschel"

Das "Oberflächenbüschel" erscheint dem Blick auf optisch klare Mittel, die spiegeln und zugleich durchsichtig sind. Tritt man beispielsweise ans Ufer eines Sees, so zeigt sich zum einen das Spiegelbild des Himmels, zum anderen die gehobene Ansicht des Grundes. Unter einer Blickrichtung mäßiger Schräge (Brewster-Winkel ( $B = 53^\circ$ )) auf die ruhige Wasseroberfläche erscheint das "Oberflächenbüschel"; es ist so orientiert, dass dem Beobachter die Blaurichtung stets parallel zur Wasseroberfläche erscheint.

### 3.3 Das "Festkörperbüschel"

Das "Festkörperbüschel" erscheint im Durchblick durch ein dichroitische Mittel, beispielsweise eine Turmalinplatte oder ein Stück der gängigen Polarisationsfolie. Dreht man ein solches Foliestück, während man es unmittelbar vor die Augen hält und gegen einen hellen Grund blickt, um  $90^\circ$  und verharrt einen Moment, so erscheint das Büschel geradezu leuchtend für einige Sekunden, bevor es matter wird und schließlich wieder verschwindet. Erneutes Drehen und Verharren bringt die Erscheinung erneut hervor.

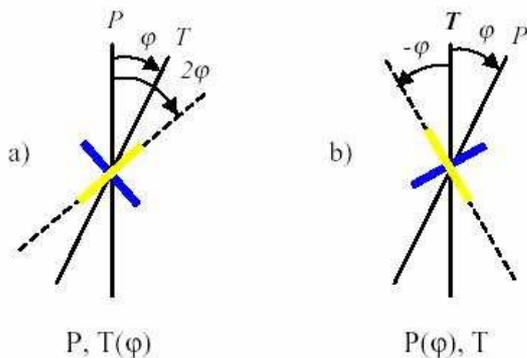


**Abbildung 2:** Das "Festkörperbüschel" im Durchblick durch eine Polarisationsfolie.  $HA$  kennzeichnet die Hauptachsenlage der Folie.

Mit ein wenig Übung findet man die Drehgeschwindigkeit, mit der sich im Durchblick durch die Folie der Kontrast und damit die Erscheinung des Büschels fortwährend erhalten lässt. Dann stellt man fest, dass die Orientierung des "Festkörperbüschels" mit derjenigen der Folie fest verbunden ist: Dreht man die Folie, so dreht sich das Büschel mit. Die Gelbrichtung des Büschels fällt mit der kristallographischen Hauptachse der Folie zusammen, die durch Strecken der Folie bei ihrer Herstellung entsteht. Die Polarisationsrichtung ist üblicherweise senkrecht dazu definiert. Ihr entspricht damit die Blaurichtung des Büschels.

### 3.4 Das "Beziehungsbüschel"

Haidinger beschreibt einen weiteren charakteristischen Beobachtungszusammenhang [Hai46a], der folgendermaßen nachvollzogen werden kann: Hält man vor die Polarisationsfolie aus Beobachtung 3.3 auf der vorherigen Seite ein doppelbrechendes Mittel, etwa eine dünne Glimmerplatte, und dreht dieselbe senkrecht zur Blickrichtung mit der Winkelgeschwindigkeit  $\varphi$ , während die Orientierung der Polarisationsfolie fest bleibt, so erscheint ein Büschel, das der ausgeführten Drehbewegung mit  $2\varphi$  vorausleitet (Abbildung 3 a). Hält man dagegen die Glimmerplatte fest und dreht stattdessen die dahinter liegende Polarisationsfolie mit  $\varphi$ , so dreht sich das erscheinende Büschel mit  $-\varphi$ , also gleich schnell aber in entgegengesetzter Richtung (Abbildung 3 b).



**Abbildung 3:** Das "doppeldrehende" Haidinger-Büschel.  $P$  kennzeichnet die Polarisationsrichtung der Folie,  $T$  eine Hauptachse der Glimmerplatte.

In beiden Fällen gilt: Der Winkelabstand zwischen dem "Festkörperbüschel" der Polarisationsfolie und demjenigen Büschel, welches beim Blick durch das Ensemble Glimmerplatte-Polarisationsfolie gesehen wird, ist immer doppelt so groß wie der ausgeführte Drehwinkel.

Die Glimmerplatte, an deren Stelle auch ein Stück gewöhnliche Frischhaltefolie benutzt werden kann, zeigt für sich genommen kein Büschel. Dieses tritt erst auf, wenn durch das doppelbrechende Mittel hindurch auf eine dahinterliegende Polarisationsfolie geblickt wird.

Im Vergleich mit dem "Festkörperbüschel" ist nun interessant, dass das doppeldrehende Büschel nur noch mittelbar korreliert ist mit der räumlichen Orientierung *eines* Festkörpers. Es ist vielmehr eine sichtbare Funktion der *Beziehung* zwischen den räumlichen Orientierungen *zweier* Festkörper (hier Glimmerplatte und Polarisationsfolie). Aus diesem Grund wurde der zunächst etwas fremd klingende Name "Beziehungsbüschel" vorgeschlagen. Eine ausführlichere Erörterung der Bedingungen der "Doppeldrehung" im Kontext der modellfreien Optik wird in [GE01] gegeben.

Damit ist eine kleine aber charakteristische Auswahl von Beobachtungsmöglichkeiten zum Haidinger-Büschel vorgestellt. Dem Anfänger wird die Beobachtung des "Festkörperbüschels" empfohlen, die erfahrungsgemäß am leichtesten gelingt.

Die Identifikation zirkularer Polarisationszustände mit Hilfe des Haidinger-Büschels hat 1955 Shurcliff [Shu55] beschrieben. Dem Verfasser ist es allerdings nicht gelungen, die betreffenden

Beobachtungen zu bestätigen. Ferner sei auf die Wirkung hingewiesen, die optisch drehende Substanzen in verschiedenen Aggregatzuständen auf die Stellung des Haidinger-Büschels haben. Solche und zahlreiche weitere Beobachtungen finden sich bei Pröbstl [Prö98].

#### 4 Wie entsteht das Haidinger-Büschel im Auge?

Diese Frage führt weit in Spezialgebiete der Ophthalmologie hinein: in chemische und neurobiologische Untersuchungen zur Beschaffenheit und Funktionsweise der Netzhaut. Für einen Überblick über den diesbezüglichen Forschungsstand, der hier nicht wiedergegeben werden kann, sei auf die Arbeiten von Zhevandrov [Zhe95] und Mission [Mis93] verwiesen. Mit besonderer Rücksicht auf die dort referierten Untersuchungen von Boehm [Boe40], Cords [Cor47], De Vries [VJS53] und Hallden [Hal57] kann das aus physikalischer Sicht Wesentliche folgendermaßen zusammengefasst werden: Die Netzhaut weist zwei besondere und in ihrer Funktionsweise polare Strukturelemente auf: den blinden und den gelben Fleck (*Papilla nervi optici* und *Macula lutea*). Die Existenz des blinden Flecks folgt aus der Inversion der Netzhaut beim Auge des Wirbeltieres. Neben den damit für die Sehleistung verbundenen Vorteilen entsteht der Nachteil, dass die Nervenfasern innen abgehen und die Sinneszellschicht irgendwo durchbrechen müssen, um das Auge verlassen zu können. An dieser Stelle ist das Auge blind. Demgegenüber erreichen Struktur und Funktion der Netzhaut in der Macularegion, wo sich die Retina zur Netzhautgrube (*Fovea centralis*) einsenkt, ihre Kulmination. Hier ist die Stelle des schärfsten und farbintensivsten Sehens, wo nur Zapfen vorhanden sind, die aber ein stäbchenartiges Aussehen erlangen. Stäbchen fehlen ganz. Die *Fovea* kann man sich wie mit dem Daumen eingedrückt entstanden denken, so dass alle Schichten, mit Ausnahme der Sinneszellschicht, nach der Seite verschoben sind. Die menschliche *Macula* hat ungefähr einen Durchmesser von 2 bis 2,5 mm, die *Fovea* von 0,5 bis 1 mm. Die zitronengelbe Färbung kommt durch einen in den Optikusganglien abgelagerten Farbstoff (Xanthophyll), ein Karotinoid, zustande [Roh72, S. 17-50].

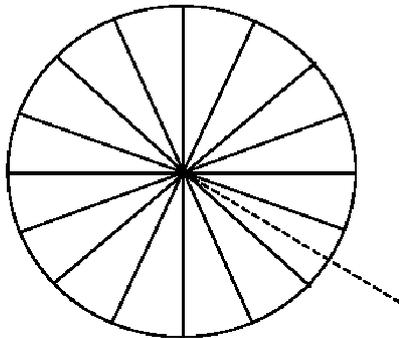
Im Hinblick auf die Entstehung des Haidinger-Büschels ist nun dreierlei bemerkenswert:

1. Der gelbe Fleck ist der Ort auf der Netzhaut, welcher der Mitte des Gesichtsfeldes entspricht, wo das Haidinger-Büschel erscheint.
2. Die Ausdehnung des gelben Flecks entspricht recht genau der gesehenen Größe des Haidinger-Büschels.
3. Die Nervenfasern der Zapfen im Bereich der Fovea breiten sich, ausgehend von der Mitte der Netzhautgrube, radiärsymmetrisch aus und laufen im blinden Fleck wieder zusammen. Der in diesen radiärsymmetrischen Faserverlauf eingelagerte Farbstoff bewirkt,

dass das Gewebe vor der lichtempfindlichen Netzhaut mit radialer Vorzugsrichtung selektiv absorbiert. Damit wirkt der gelbe Fleck wie ein radiärsymmetrischer Dichroit bzw. Analysator.

## 5 Ein Modell

Der Verfasser hat ein Modell eines solchen Analysators gebaut. Es besteht aus 16 zwischen zwei Glasplatten eingespannten Segmenten linear polarisierender Folie, deren Polarisationsrichtung jeweils radial orientiert ist (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Radiärsymmetrischer Analysator mit 16 Segmenten. Die Lage der Polarisationsrichtung je Segment ist für ein Segment durch die gestrichelte Linie angegeben.

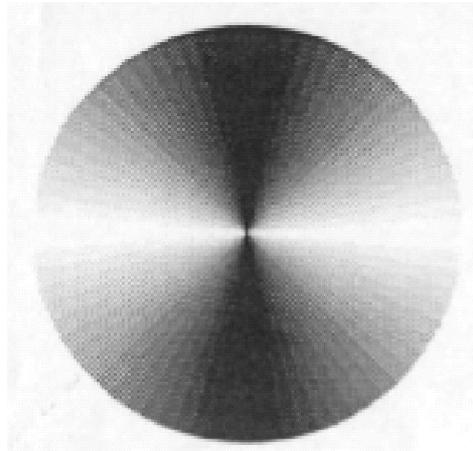
[Mis93] die These bestätigt, dass die zweite entscheidende, die Farbigkeit des Haidinger-Büschels bedingende Komponente des Auges die Hornhaut ist. Er vergleicht sie mit einem konvexen zweiachsig-doppelbrechenden Kristall. Die Doppelbrechung isolierter Hornhautpräparate im Bereich der optischen Achse beträgt nach Messungen von Stanworth [SN53]  $\Delta n = 0,0028$ . Bedingt durch ihre Wachstumseigenschaften weist die Hornhaut ferner eine radiärsymmetrische Anisotropie auf. Die mittlere optische Dicke beträgt im blauen Spektralbereich eine Achtel-Wellenlänge (72 nm)[Shu74]. Die Hornhaut wirkt demnach vereinfacht gesagt wie ein radiärsymmetrisches  $\lambda/8$ -Plättchen, d.h. so, dass bei natürlicher Beleuchtung die dunklen Bereiche des "Schattenbüschels" in Abbildung 5 auf der nächsten Seite gelb und die hellen blau-violett erscheinen.

Für ein Modell der so verstandenen Hornhautfunktion ergab sich nach längerem Probieren, dass die Cellophanfolie, die zum Verpacken der Schachteln von Niederegger Marzipan-Pralinen

Die Helligkeitsverteilung, die sich ergibt, wenn man diesen "Radiäranalysator" durch eine gewöhnliche Polarisationsfolie betrachtet, lässt eine auffallende Ähnlichkeit mit der Form des Haidinger-Büschels erkennen (Abbildung 5 auf der nächsten Seite).

Wäre – so könnte man schlussfolgern – der gelbe Fleck die einzige am Zustandekommen des Haidinger-Büschels beteiligte Komponente des Auges, so wäre dieses ein reines Hell-Dunkel-Gebilde, ein "Schattenbüschel", wie Abbildung 5 auf der nächsten Seite schematisch zeigt.

Frühere Ergebnisse zusammenfassend und mit Hilfe von Simulationen hat Mission



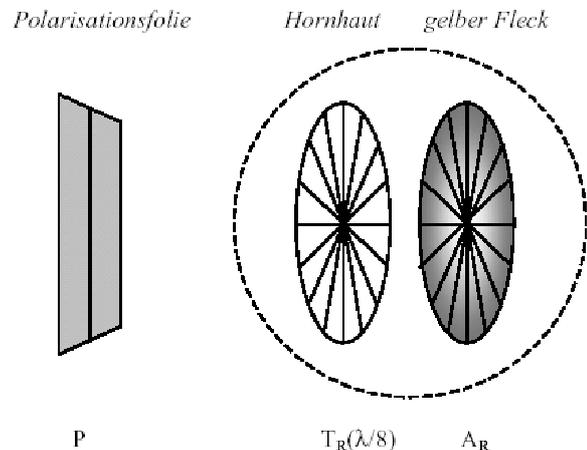
**Abbildung 5:** Geglättete Helligkeitsverteilung beim Anblick des "Radiäranalysators" durch eine Polarisationsfolie, entnommen aus [Mis93].

verwendet wird, gerade die erforderlichen optischen Eigenschaften erfüllt. Es wurden 16 Segmente dieser Folie ausgeschnitten und auf diejenigen des "Radiäranalysators" aufgebracht. Ohne hier näher auf die optischen Eigenschaften ein- bzw. zweiachsiger Kristalle einzugehen sei erwähnt, dass beim Ausschneiden der doppelbrechenden Foliensegmente darauf geachtet wurde, dass der Winkel zwischen der Hauptachse der Folie und der Symmetrieachse der Segmente, die mit der radial orientierten Polarisationsrichtung des jeweiligen Analysatorsegments identisch war,  $45^\circ$  betrug. Unter diesem Winkel wird die doppelbrechende Folie als Transformator zwischen Polarisator und Analysator maximal wirksam; bei  $0^\circ$  bzw.  $90^\circ$  Hauptachsenlage gegenüber der Polarisationsrichtung ist sie unwirksam. Das ergibt sich aus der geometrischen Beziehung zwischen den beteiligten optischen Elementen und kann leicht nachgerechnet werden [GE01].

Betrachtet man nun den mit einem radiärsymmetrischen Transformator versehenen "Radiäranalysator" durch eine gewöhnliche Polarisationsfolie, so erscheinen die in Abbildung 5 dunklen Bereiche gelb und die hellen in komplementärem Blau-Violett. Man hat damit den deutlichen Eindruck, die wesentlichen optischen und geometrischen Bedingungen für Form und Farben des Haidinger-Büschels kennen gelernt zu haben. Abbildung 6 auf der nächsten Seite fasst diese Bedingungen nochmal schematisch zusammen.

## 6 Schluss

Derjenige, der die vorangegangene Erörterung zur Beobachtung und Erklärung des Haidinger-Büschels nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch nachvollzieht, indem er vielleicht selbst zu den hier beschriebenen Mitteln greift, wird die in Abbildung 6 gegebene Zusammenfassung der für das Auftreten des Haidinger-Büschels wesentlichen optischen Komponenten möglicherweise als einfach und schlüssig beurteilen. Demgegenüber sei angemerkt, dass hier eine dem vorgegebenen Rahmen angepasste Vereinfachung der z.T. sehr viel komplizierteren Zusammenhänge und Einzelheiten gegeben wurde. Die Erforschung des Haidinger-Büschels ist keineswegs abgeschlossen, seine Erklärung auch nicht. Das bemerkt zuletzt jeder, der die merkwürdig ungegenständliche Qualität der Erscheinung als Bereicherung seines Sehfeldes schätzen gelernt hat.



**Abbildung 6:** Schema des mit dem Auftreten des Haidinger-Büschels verbundenen Bedingungs-zusammenhangs zwischen gelbem Fleck und Hornhaut im Auge und einer polarisierten Ansicht, die hier durch eine Polarisationsfolie gegeben ist.

## Literatur

- [Ale95] ALEXANDRITIS, E. ; STRAUB, W. (Hrsg.) ; KROLL, P. (Hrsg.) ; KÜCHLE, H.J. (Hrsg.): *Augenärztliche Untersuchungsmethoden*. Stuttgart : Enke, 1995
- [Boe40] BOEHM, G.: Über maculare (Haidingersche) Polarisationsbüschel und über einen polarisationsoptischen Fehler des Auges. In: *Acta Ophthalmol* 18 (1940), S. 109–142
- [CE72] COMBERG, D. ; EHRLICH, W. ; VELHAGEN, K. (Hrsg.): *Der Augenarzt*. Bd. 2. Leipzig : Thieme, 1972
- [Cor47] CORDS, O.: Das Haidingersche Büschel und seine Erklärung als Beitrag für eine physikalische Deutung des Sehvorganges. In: *Optik* 2 (1947), S. 423–433
- [Fri49] v. FRISCH, K.: Die Polarisation des Himmelslichts als orientierender Faktor bei den Tänzchen der Bienen. In: *Experientia* 5 (1949), S. 142–148
- [GE01] GREBE-ELLIS, J.: Doppeldrehung und Polarisation. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 75 (2001), Nr. 2, S. 13–32

- [Goe81] v. GOETHE, J. W.: Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt. In: *Naturwissenschaftliche Schriften* Bd. 13. München : C.H. Beck, 1981, S. 10–20
- [Hai44] HAIDINGER, W. K.: Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts. In: *Poggendorf Annalen* 63 (1844), S. 29–39
- [Hai46a] HAIDINGER, W. K.: Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel auf Flächen, welche das Licht in zwei senkrecht aufeinander stehende Richtungen polarisieren. In: *Poggendorf Annalen* 68 (1846), S. 305–319
- [Hai46b] HAIDINGER, W. K.: Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel im geradlinig polarisiertem Lichte. In: *Poggendorf Annalen* 68 (1846), S. 73–87
- [Hai54] HAIDINGER, W. K.: Dauer des Eindrucks der Polarisationsbüschel auf der Netzhaut. In: *Poggendorf Annalen* 93 (1854), S. 318–320
- [Hal57] HALLDEN, U.: An explanation of Haidinger's brushes. In: *Arch. Ophthal* 57 (1957), S. 393–399
- [Hel96] v. HELMHOLTZ, H. *Handbuch der physiologischen Optik*. 1896
- [Mai81] MAIER, G.: Der Übergang vom Strahlen- zum Feldbegriff I und II. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 35 (1981), Nr. 2, S. 26–42
- [Mai84] MAIER, G.: Der Übergang vom Strahlen- zum Feldbegriff I und II. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 40 (1984), S. 42–52
- [Mai86] MAIER, G.: *Optik der Bilder*. Dürnau : Verlag der Kooperative Dürnau, 1986
- [Mis93] MISSION, G. P.: Form and behavior of Haidinger's brushes. In: *Ophthal. Physiol. Opt.* 13 (1993), S. 392–396
- [MO98] v. MACKENSEN, M. ; OHLENDORF, H.-Ch. *Modellfreie Optik*. 1998
- [Mue48] MUELLER, H.: The Foundations of Optics. In: *Journal of the Optical Society of America* 38 (1948), S. 661
- [Prö98] PRÖBSTL, A.: Das Haidinger-Büschel als Urphänomen der Polarisationserscheinungen. In: *Elemente der Naturwissenschaften* 68 (1998), Nr. 2, S. 1–26
- [Roh72] ROHEN, J. ; v. VELHAGEN, K. (Hrsg.): *Der Augenarzt*. Bd. 1. Leipzig : Thieme, 1972
- [Shu55] SHURCLIFF, W. A.: Haidinger's brushes and circularly polarized light. In: *Journal of the Optical Society of America* 45 (1955), S. 399

- 
- [Shu74] SHUTE, C. C. D.: Haidinger's brushes and predominant orientation of collagen in corneal stroma. In: *Nature* 250 (1974), S. 163–164
- [SN53] STANWORTH, A. ; NAYLOR, E.: The cornea and the Haidinger effect. In: *Journ. of Exp. Biol.* 30 (1953), S. 160–163
- [Sto83] STOKES, G. G.: On Haidinger's brushes. In: *Mathematical and physical papers* 2 (1883), S. 362–364
- [VJS53] DE VRIES, H. ; JIELOF, R. ; SPOOR, A.: Properties of the eye with respect to polarised light. In: *Physica* 19 (1953), S. 419–432
- [Wat75] WATERMAN, T.H. ; EVANDS, G.C. (Hrsg.): *Natural Polarised Light and e-Vektor Discrimination by Vertebrates in Light as an Ecological Factor II*. Rainbridge : Blackwell Scientific, 1975
- [Weh98] WEHNER, R.: Der Himmelskompass der Wüstennameisen. In: *Spektrum der Wissenschaft* 11 (1998), S. 56–67
- [Zhe95] ZHEVANDROV, N. D.: Polarisation physiological optics. In: *Physics Uspekhi* 38 (1995), Nr. 10, S. 1147–1167