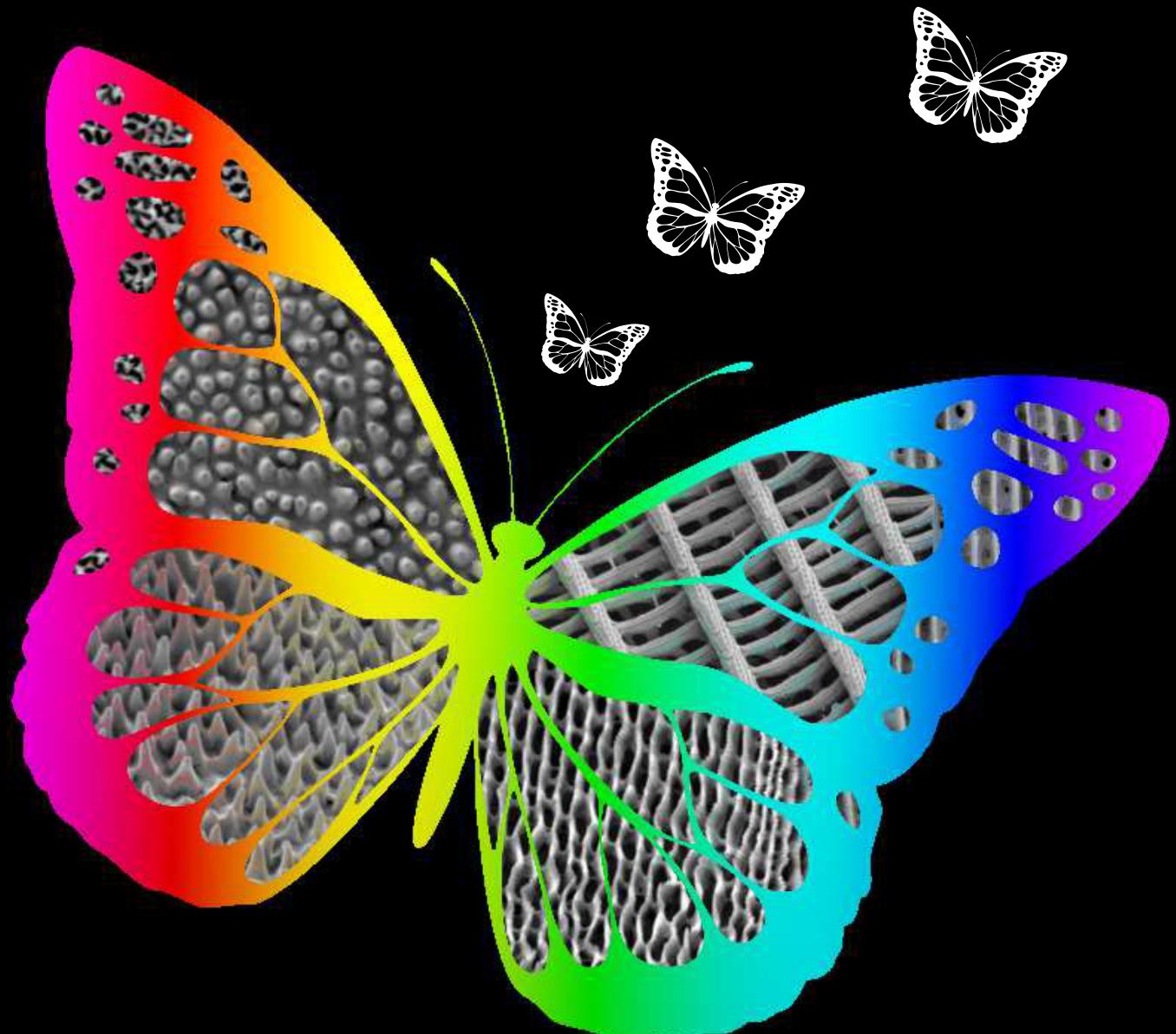


Regionalwettbewerb  
Südbaden  
Jugend forscht 2017



## Farben ohne Farbe Nanostrukturen bei Schmetterlingen auf der Spur



Nicola Holetzke (16), Johanna Schneider (16), Hanna Westermann (17)

Hans-Thoma-Gymnasium, Lörrach



Schülerforschungszentrum **phænovum**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Biophysikalische Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Aufbau Schmetterlingsflügel . . . . .	2
2.2 Optik auf Nanometerebene . . . . .	3
2.2.1 Licht . . . . .	3
2.2.2 Streuung und Absorption von Licht . . . . .	3
2.2.3 Reflexion und Brechung von Licht . . . . .	3
2.2.4 Beugung und Interferenz . . . . .	4
2.2.5 Interferenz durch Beugung am Doppelspalt bzw. Gitter . . . . .	4
2.2.6 Interferenz an dünnen Schichten . . . . .	5
2.3 Aktueller Forschungsstand . . . . .	6
<b>3 Experimente</b>	<b>7</b>
3.1 Verwendete Schmetterlinge . . . . .	7
3.2 Mikroskopie . . . . .	7
3.3 Versuchsdurchführung . . . . .	8
<b>4 Resultate und Diskussion</b>	<b>8</b>
4.1 <i>Greta Oto</i> . . . . .	8
4.2 <i>Graphium Agamemnon</i> . . . . .	9
4.3 <i>Dryas Iulia</i> . . . . .	10
4.4 <i>Heliconius Erato Hydara</i> . . . . .	10
4.5 <i>Archaeoprepona Demophon</i> . . . . .	11
4.6 <i>Heliconius Pachinus</i> . . . . .	11
4.7 <i>Siproeta Stelenes</i> . . . . .	12
4.8 <i>Danaus Plexippus</i> . . . . .	12
4.9 Diskussion . . . . .	13
<b>5 Zusammenfassung</b>	<b>15</b>
<b>6 Ausblick</b>	<b>15</b>
<b>7 Danksagung</b>	<b>15</b>

## 1 Einleitung

Die Farbenpracht und Vielfalt der Tierwelt fasziert. Besonders stechen die Tiere hervor, welche irisierende<sup>1</sup> Farben vorweisen, wie sie beispielsweise bei Pfauenfedern, Enten, aber auch bei manchen Schmetterlingsarten zu finden sind. Der Frage nach der Entstehung dieser Farben ging erstmals Robert Hooke 1665 nach [1]. Er untersuchte Pfauen- und Entenfedern und beobachtete wie die Farben durch einen Wassertropfen zerstört wurden. Daraus schloss er, dass wechselnde Schichten aus Luft und dünnen Platten das Licht reflektieren und so die Farben entstehen. Newton ergänzte später in seinem Werk Opticks, dass die irisierenden Farben der Pfauenfedern, an den transparenten Stellen der Federn entstehen [2]. Heute wissen wir, dass die schillernden Farben teilweise durch Interferenz an den Nanostrukturen<sup>2</sup> entstehen [3].

Schmetterlinge zeichnen sich ebenso durch ihre irisierende Farbvielfalt aus. Ein bekannter Vertreter für dieses Phänomen ist der blaue Morphofalter. [4] [5]. Auch seine schillernd blaue Farbe entsteht durch Strukturfarben [6].

Jedoch erfolgt die Farbentstehung nicht bei allen Schmetterlingen durch Strukturfarben. Viele Schmetterlingsarten besitzen blassere Farben, welche durch Pigmente entstehen, die im Chitin der Flügelschuppen eingeschlossen sind [7]. Das Licht treffen auf die Farbpigmente, diese können nicht alle Farben absorbieren und reflektieren einen bestimmten Farbanteil [8].

Auch wir haben am Anfang den blauen MORPHO PELEIDES analysiert und konnten die in der Theorie angegebenen Dimensionen und Strukturen überprüfen (Abb. 1). In Abb. 1 sind unsere Messungen zu-

sammengefasst dargestellt. Für die hochauflösenden Messungen haben wir Stellen untersucht, die nicht beschädigt waren. Aus den Messungen mit dem Laserrastermikroskop konnten wir erste Informationen über die Geometrie, Struktur und Farbe bekommen (Abb. 1 b<sub>1</sub> und b<sub>2</sub>). Mit dem Rasterelektronenmikroskop kann man Detailaufnahmen der Oberflächen und Querschnitte machen (Abb. 1 c<sub>1</sub> bis c<sub>3</sub>).

In unserer Arbeit befassen wir uns im Speziellen mit der Farbentstehung durch Nanostrukturen bei Schmetterlingen. Dabei interessierten uns folgende Fragen:

- Wie entsteht der Farbeindruck an Nanostrukturen?
- Wodurch unterscheiden sich die verschiedenen Farbeindrücke?
- Worin unterscheiden sich die Nanostrukturen?
- Gibt es Zusammenhänge oder Ähnlichkeiten zwischen den Familien der Schmetterlinge und den Nanostrukturen?

Wir haben uns vor allem Schmetterlinge angesehen, deren Strukturen gar nicht oder nur selten wissenschaftlich beschrieben wurden. Wir untersuchten die Nanostrukturen in Abhängigkeit des makroskopischen Farbeindrucks mit verschiedenen hochauflösenden Mikroskopen. Diese Ergebnisse haben wir in Bezug auf Geometrie und Dimension analysiert. Unsere Ergebnisse haben wir systematisch ausgewertet und mit physikalischen Modellen zur Lichtreflexion und -Absorption beschrieben.

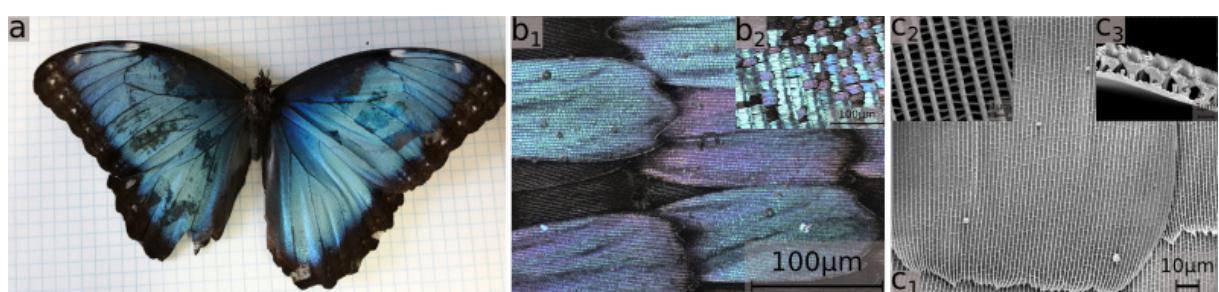


Abb. 1: a Morpho Peleides; b<sub>1</sub> LRM-Vergrößerung der blauen Schuppen; b<sub>2</sub> Übersicht der blauen Schuppen; c<sub>1</sub> REM-Ansicht der blauen Deckschuppe; c<sub>2</sub> Vergrößerung auf die Lamellenstruktur der blauen Schuppe; c<sub>3</sub> Querschnitt einer blauen Schuppe

<sup>1</sup>Irisieren ist ein optisches Phänomen, wobei eine Oberfläche je nach Perspektiven in einer anderen Farbe erscheint.

<sup>2</sup>Nanostrukturen sind definiert als Struktur, dessen Größe in einer oder mehreren Dimensionen hundert Nanometer oder weniger beträgt.

## 2 Biophysikalische Grundlagen

### 2.1 Aufbau Schmetterlingsflügel

Charakteristisch für die Ordnung der Schmetterlinge sind die beschuppten Flügel. Das lässt sich auch aus der wissenschaftlichen Bezeichnung Lepidoptera (griechisch „lepidos“ Schuppe und „pteros“ Flügel) ableiten (vgl. Abb. 2 a). Die Beschuppung lässt sich allerdings nur bei fertig ausgebildeten, adulten Schmetterlingen (Imagenes) finden. Neben den Schuppen kann man auf Flügelteilen mancher Schmetterlinge auch einenoppenartige Struktur finden (vgl. Abb. 2 b<sub>2</sub> und b<sub>3</sub>).

Die Schuppen dienen unter anderem der Flügelstabilität und der Verstärkung der Auftriebskraft. Dafür verantwortlich ist das Hohlkammersystem zwischen Vorder- und Rückseite der Schuppen. Des Weiteren dienen die Schuppen der Schmutzabwehr und schützen so die Flügel des Schmetterlings. Eine weitere Funktion der Schuppen ist die Regelung des thermischen Haushaltes. Hierbei sorgt das Hohlkammersystem für einen ständig, kühlenden Luftstrom. Genauso funktioniert das Hohlkammersystem natürlich auch zur Isolierung.

Die Schuppen sind an Ober- und Unterseite der Flü-

gel vorhanden und dachziegelartig übereinander angeordnet und bestehen aus einem ähnlichen Material wie Haare (Hauptbestandteil Chitin). Sie sind durch einen Stift, der in einer Hülse in der Cuticula (Flügelhaut) steckt, befestigt (vgl. Abb. 2 b<sub>1</sub> und b<sub>2</sub>). Die einzelnen Schuppen sind einfarbig, ihre Form kann jedoch in Anzahl der Zacken und Umrisse der Schuppen variieren. Man kann die Schuppen anhand ihrer Form in drei Klassen unterteilen: Die dachziegelartigen, lamellären Schuppen, die haarförmigen Schuppen und andere Formen.

Die Oberfläche der Schuppen ist meist durch rillenförmige Lamellen strukturiert (vgl. Abb. 2 c). Die Unterseite der Schuppen ist flach. Bei den meisten Schmetterlingsarten lassen sich auf den Lamellen teilweise sich überlagernde Lamellenstreben finden (vgl. Abb. 2 d<sub>1</sub> bzw. d<sub>2</sub>). Orthogonal zu diesen verlaufen bei manchen Schmetterlingen parallel angeordnete „Rippen“. Je nach Schmetterlingsart werden die Lamellen durch unterschiedlich angeordnete Querstreben verbunden. Des Weiteren zeigt der Querschnitt einer Schuppe eine Art „Tannenbaumstruktur“ (vgl. Abb. 2 e<sub>1</sub> bzw. e<sub>2</sub>).

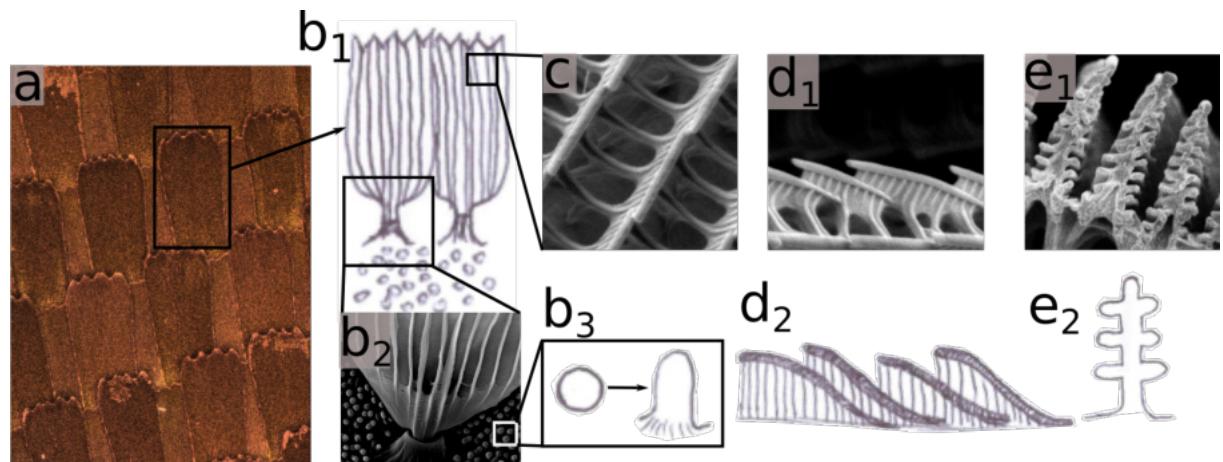


Abb. 2: Aufbau des Schmetterlingsflügels: a beschuppte Oberfläche unter dem LRM; b<sub>1</sub> Skizze der Schuppe; b<sub>2</sub> Schuppenbefestigung auf Cuticula; b<sub>3</sub> Skizze der Noppen; c Lamellenstruktur der Schuppe; d<sub>1</sub> Seitansicht einer Lamelle; d<sub>2</sub> Skizze dieser Seitansicht; e<sub>1</sub> Querschnitt der Lamelle; e<sub>2</sub> vereinfachte Skizze des Querschnitts („Tannenbaumstruktur“)

## 2.2 Optik auf Nanometerebene

### 2.2.1 Licht

Der für das menschliche Auge sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums wird als Licht bezeichnet. Die Wellenlängen liegen zwischen  $400\text{ nm}$  (violett) und  $750\text{ nm}$  (rot) (Abb. 3). Mit der Formel  $c = \lambda \cdot f$ , wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $\lambda$  die Wellenlänge und  $f$  die Frequenz darstellt, können die zugehörigen Frequenzen berechnet werden. Oberhalb von  $750\text{ nm}$  liegt der infrarote, unterhalb von  $400\text{ nm}$  der ultraviolette Bereich.

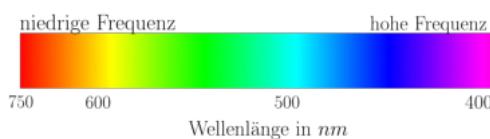


Abb. 3: Farbspektrum der elektromagnetischen Strahlung

Folgende drei Modelle sind für die Beschreibung für Licht essentiell:

Das einfachste Modell, das **Modell Lichtstrahl**, besagt, dass sich Licht aus unendlich vielen Lichtstrahlen zusammensetzt. Es wird somit die geradlinige Ausbreitung des Lichts und die Umkehrbarkeit des Lichtweges verdeutlicht.

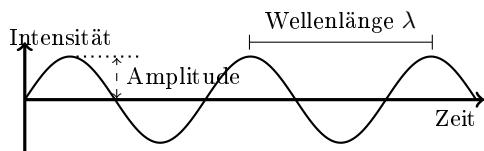


Abb. 4: Darstellung einer eindimensionalen Welle

Um Beugung und Interferenz, Reflexion/Streuung und Brechung sowie die Polarisation von Licht zu erklären, wird das **Wellenmodell** verwendet (Abb. 4). Licht wird hier als elektromagnetische Welle mit der Amplitude und Wellenlänge  $\lambda$  betrachtet. Man unterscheidet ein-, zwei- und dreidimensionale Lichtwellen, wobei mehrdimensionale Wellen i.d.R. durch Wellenfronten und -normalen (vgl. Lichtstrahlmodell) dargestellt werden (Abb. 5).

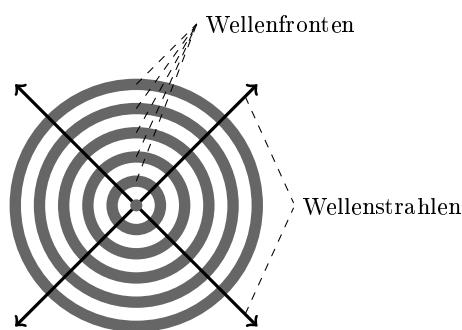


Abb. 5: Darstellung einer zweidimensionalen Welle

Huygens erweitert dieses Modell wie folgt:

*„Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer Elementarwelle betrachtet werden. Wellenfronten lassen sich als Einhüllende dieser Elementarwellen darstellen. Die Elementarwellen haben immer die gleiche Frequenz und Wellenlänge wie die Welle, aus der sie entstanden sind oder die sie erzeugen.“ [8]*

Quantenphysikalische Phänomene, z.B. der äußere lichtelektrische Effekt (Photoeffekt), lassen sich jedoch nur mit dem **Teilchenmodell** erklären. Dieses Modell basiert auf der Vorstellung, dass Licht aus vielen Photonen besteht, deren Energie  $E = h \cdot f$  mit der Frequenz über die Planck-Konstante verknüpft ist.

### 2.2.2 Streuung und Absorption von Licht

Trifft Licht auf die raue Oberfläche eines Körpers wird es in alle Richtungen reflektiert und/oder absorbiert. Wird das gesamte auftreffende Licht gestreut, erscheint uns der Körper weiß, wird die Energie des Lichts jedoch vollständig absorbiert, nehmen wir einen schwarzen Körper wahr. Unterschiedliche Farbeindrücke entstehen dadurch, dass nur ein Teil des Farbspektrums und damit die daraus resultierende Mischfarbe in unser Auge gestreut, der andere Teil vom Körper absorbiert wird.

### 2.2.3 Reflexion und Brechung von Licht

Trifft ein Lichtstrahl unter dem Einfallswinkel  $\alpha$  gegenüber dem Einfallslot auf die Grenzfläche zwischen einem optisch dünnen (z.B. Luft) und einem optischen dichten Medium (z.B. Wasser oder Glas), so wird ein Teil des Lichts unter dem Winkel  $\alpha' = \alpha$  (Reflexionsgesetz) gegenüber dem Einfallslot reflektiert (Abb. 6). Der andere Teil wird unter dem Winkel  $\beta < \alpha$  zum Lot hin gebrochen und ändert dadurch seine Ausbreitungsrichtung. Bei umgekehrtem Lichtweg wird der Lichtstrahl unter dem Winkel  $\beta > \alpha$  vom Lot weg gebrochen. Einfallender, reflektierter und gebrochener Lichtstrahl liegen in einer Ebene.

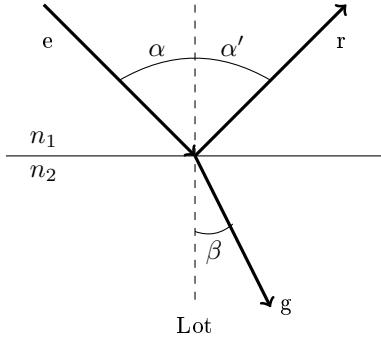


Abb. 6: Schematische Darstellung der Lichtreflexion und-Brechung mit  $e$  einfallender Lichtstrahl;  $r$  reflektierter Lichtstrahl;  $g$  gebrochener Lichtstrahl;  $n$  Brechungsindex des Mediums;  $\alpha$  Einfallsinkel;  $\alpha'$  Ausfallsinkel;  $\beta$  Brechungswinkel

Ursache der Lichtbrechung ist die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  von Licht in den verschiedenen Medien. Da die Frequenz  $f$  des Lichts, welche die Lichtfarbe bestimmt, konstant bleibt, ändert sich gemäß  $c = \lambda \cdot f$  die Wellenlänge des Lichts; in optisch dünnen Medien ist  $c$  und damit die Wellenlänge größer, in optisch dichteren Medien kleiner. Es gilt das Brechungsgesetz,

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{c_1}{c_2}, \quad (1)$$

wobei  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungsindizes der beteiligten optischen Medien und ein Maß für die optische Dichte des jeweiligen Mediums sind. Für Vakuum und näherungsweise auch für Luft ist  $n_1 = 1$ , für Chitin ist  $n_2 = 1.53$ .

## 2.2.4 Beugung und Interferenz

Trifft einfarbiges Licht auf ein Hindernis mit einer wenige Wellenlängen breiten Öffnung (Einzelspalt), ist diese gemäß dem Huygenschen Prinzip Ausgangspunkt von Elementarwellen. Dadurch kann das Licht hinter dem Hindernis in Bereiche eindringen, die – wegen der geradlinigen Ausbreitung vor dem Hindernis – eigentlich nicht erreichbar sein sollten. Diese Phänomen nennt man **Beugung**, die nur für Wellen auftritt (Abb. 7):

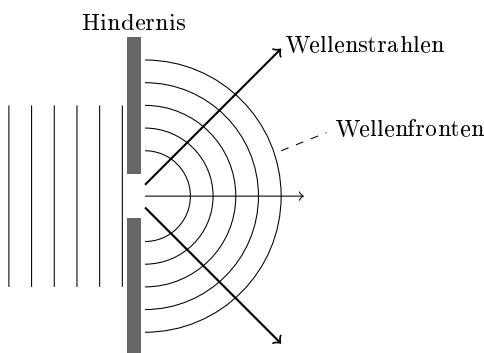


Abb. 7: Darstellung der Lichtbeugung

Treffen zwei oder mehrere Wellen gleicher Wellenlänge (und Amplitude) an einem bestimmten Punkt aufeinander, überlagern sie sich. Dieses Phänomen, bei dem die Amplituden aller beteiligten Wellen addiert werden, wird als **Interferenz** bezeichnet. Dabei kann entweder konstruktive oder destruktive Interferenz entstehen, d.h. es kommt entweder zur Verstärkung oder zur Auslöschung bzw. Abschwächung der Wellen.

## 2.2.5 Interferenz durch Beugung am Doppelspalt bzw. Gitter

Interferenz ist z.B. beobachtbar, wenn das Hindernis zwei (Doppelspalt) oder mehrere (Mehrfachspalt bzw. Gitter) Öffnungen mit gleichem Abstand  $g$  aufweist. Geht man näherungsweise davon aus, dass von jedem Spalt nur eine Elementarwelle ausgeht, und die Wellennormalen wegen des geringen Spaltabstandes gegenüber der Entfernung  $a$  zu einem parallel zum Hindernis angebrachten Schirm nahezu parallel sind, kann man die geometrische Bedingung für den Gangunterschied  $\delta$  (Wegdifferenz) benachbarter Elementarwellen zu einem Punkt  $P$  auf dem Schirm herleiten (Abb. 8).

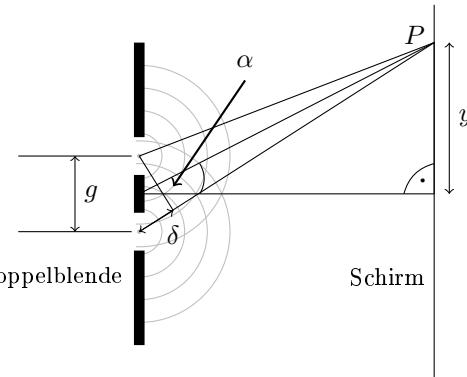


Abb. 8: Schematische Darstellung des Doppelspaltexperiment mit den dazugehörigen Parametern

Es gilt:

$$\tan(\alpha) = \frac{y}{a} \text{ und } \sin(\alpha) = \frac{\delta}{g}. \quad (2)$$

Beträgt nun der Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$ , dann verstärken sich die Elementarwellen und man erhält konstruktive Interferenz. Im Punkt  $P$  wird ein Maximum der Intensität beobachtet. Beträgt  $\delta$  ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge, dann löschen sich die Elementarwellen gegenseitig aus. Diese destruktive Interferenz führt dazu, dass in  $P$  ein Intensitätsminimum auftritt. Helligkeitsmaxima bzw. -minima treten demnach unter den Beobachtungswinkeln

$$\sin(\alpha) = \frac{k \cdot \lambda}{g} \quad (k \in \mathbb{N}_0) \text{ bzw.} \quad (3)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{(2k-1) \cdot \lambda}{2g} \quad (k \in \mathbb{N}) \quad (4)$$

auf. Fällt weißes Licht, das sich aus allen Farben des sichtbaren Lichtbereichs zusammensetzt, auf ein Gitter, können in Abhängigkeit von der Spaltbreite ein oder mehrere Farbspektren beobachtet werden, wobei die Beobachtungswinkel für violettes Licht wegen der geringeren Wellenlänge kleiner als die für rotes Licht sind.

## 2.2.6 Interferenz an dünnen Schichten

Auch an dünnen Schichten kann, abhängig von der Dicke  $d$  der lichtdurchlässigen Schicht, die auch im Bereich der Wellenlänge liegen kann, konstruktive und destruktive Interferenz auftreten, d.h. bei konstruktiver Interferenz kann die Schicht farbig leuchten, bei destruktiver Interferenz sieht die Schicht schwarz aus. Ursache ist die Reflexion (und Brechung) des Lichts an den beiden Grenzflächen zwischen der optisch dünneren Luft und der optischen dickeren Schicht (Abb. 9) [9].

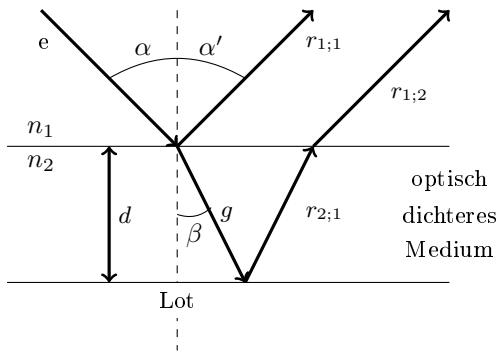


Abb. 9: Schematische Darstellung der Interferenz an dünnen Schichten mit  $d$  Dicke des Mediums;  $r_{1;1}$  reflektierter Lichtstrahl an Ebene eins;  $r_{2;1}$  reflektierter Lichtstrahl an Ebene zwei;  $r_{1;2}$  reflektierter Lichtstrahl zweiter Ordnung

Licht, das *senkrecht* auf die dünne Schicht trifft, wird sowohl an der oberen als auch der unteren Grenzfläche (teilweise) reflektiert. Dadurch kommt es zwischen den beiden reflektierten Lichtstrahlen oberhalb der Schicht zu einem Gangunterschied  $\delta = 2 \cdot d$ . Da sich das Licht in der dünnen Schicht um den den Faktor  $n$  langsamer ausbreitet, wird der Gangunterschied entsprechend um den Faktor  $n$  größer:

$$\delta = 2 \cdot d \cdot n \quad (5)$$

Außerdem erfährt der an der oberen Grenzschicht reflektierte Lichtstrahl einen Phasensprung von  $\pi$ , was den Gangunterschied um eine halbe Wellenlänge zu erhöht. Für konstruktive Interferenz ergibt sich da-

$$\delta = 2 \cdot d \cdot n + \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

erhöht. Für konstruktive Interferenz ergibt sich da-

mit

$$d \cdot n = (2k-1) \frac{\lambda}{4}, \quad (7)$$

für destruktive Interferenz erhält man

$$d \cdot n = k \frac{\lambda}{2}, \quad (8)$$

wobei  $\lambda = n \cdot \lambda'$  ist. Entspricht die Schichtdicke  $d$  also einem ungeradzahligen Vielfachen von einem Viertel der Wellenlänge  $\lambda'$  im optischen dickeren Medium, überlagern sich die beiden reflektierten Lichtstrahlen konstruktiv, beträgt sie ein ganzzahliges Vielfaches von  $\frac{\lambda'}{2}$ , tritt destruktive Interferenz auf. Trifft Licht unter einem Winkel  $\alpha$  auf die dünne Schicht (Abb. 9), beträgt der gesamte Gangunterschied

$$\delta = 2 \cdot d \sqrt{n^2 - \sin(\alpha)^2} + \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

Für konstruktive Interferenz erhält man nun

$$d \cdot \sqrt{n^2 - \sin(\alpha)^2} = (2k-1) \cdot \frac{\lambda}{4}, \quad (10)$$

für destruktive Interferenz

$$d \cdot \sqrt{n^2 - \sin(\alpha)^2} = k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (11)$$

Mit dem Modell der Interferenz an dünnen Schichten lässt sich auch bei den Nanostrukturen der Schmetterlinge, der „Tannenbaumstruktur“, die Farbgebung vereinfacht beschreiben (Abb. 10).

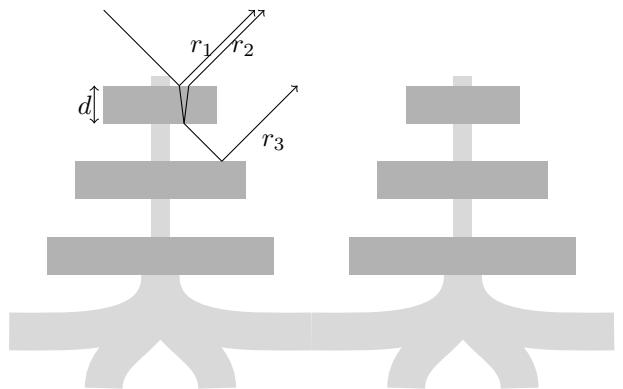


Abb. 10: Schematische Darstellung der Interferenz an dünnen Schichten an der „Tannenbaumstruktur“

Trifft das Licht nun auf eine dieser Lamellenstreben, kommt es wie oben erklärt zur Interferenz. Dabei wird ein Teil des Lichts direkt reflektiert, der andere Teil wird beim Auftreffen auf der lichtdurchlässigen Schicht gebrochen und wieder reflektiert. Ein weiterer Teil des Lichts transmittiert durch die Schicht und wird erneut an der nächsten Schicht reflektiert. So kommt es zur Überlagerung der Wellen und damit zur Interferenz [9].

## 2.3 Aktueller Forschungsstand

Die Farbentstehung durch Nanostrukturen bei Schmetterlingen ist ein aktuelles Thema in der Wissenschaft [10]. Dabei ist der blaue Morphofalter der am häufigsten vertretene Schmetterling in der Forschung [11]. Dies liegt vor allem an seiner schillernd blauen bis violetten Färbung. Dieser schillernde Effekt kommt wahrscheinlich von dem tannenbaumartigen Aufbau der Nanostrukturen, welche auf periodisch angeordneten Schuppen angelagert sind. An diesen entsteht durch das Zusammenwirken mehrschichtiger Interferenz, Streuung, Beugung und Brechung des Lichts die typisch blaue Strukturfarbe des Morphofalters. Die Nanostrukturen befinden sich im Bereich der Wellenlänge von Licht [12].

Jedoch wirkt sich der Einfallswinkel des Lichts gegen die Theorie der mehrstufigen Interferenz nicht maßgebend auf die Farbgebung aus. Hier haben wissenschaftliche Untersuchungen ergeben, dass sich die einheitliche Farbe im Bezug auf die Beobachtungsrichtung nicht allein durch mehrstufige Interferenz erklären lassen kann. Die komplexe Lamellenverteilung der baumähnlichen Strukturen ist hierbei der entscheidende Faktor für die niedrige Einfallswinkelabhängigkeit, welche über die Farbgebung entscheidet [13].

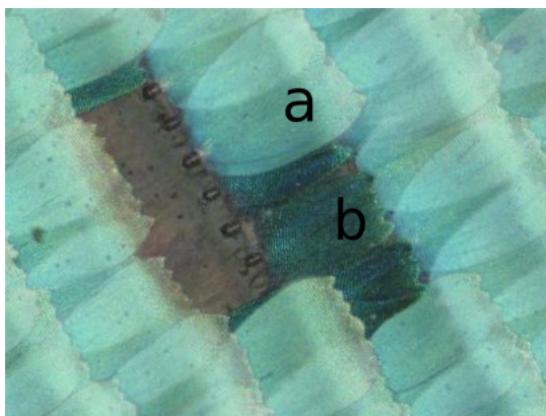


Abb. 11: LRM-Aufnahme des MORPHO PELEIDES  
a Deckschuppen; b Grundschuppen

Der Morphofalter besitzt außerdem zwei Arten von Schuppen im blauen Bereich; die Deckschuppen (a) und die Grundschuppen (b) (Abb 11). Der Interferenzeffekt auf der Deckschuppe unterstützt zusätzlich zur Farbentstehung die Reflexion im infraroten und ultravioletten Bereich [13]. Beim ebenfalls blauen HYPOLIMNAS SALMACIS haben die Deck- und Grundschuppen eine weitere Funktion. Die blaue Färbung entsteht hier durch Überlagerung der braunen Grundschuppen und weißen Deckschuppen [14].

Bei manchen Schmetterlingsarten spielen neben Nanostrukturen auch Nanopartikel auf den Schuppen

eine Rolle bei den Reflexionseigenschaften. An den weißen Stellen auf den Flügeln des PIERIS RAPAE entsteht beispielsweise eine höhere Reflexion als beim HELICONIUS MELPOMENE. Dies lässt sich auf die Anwesenheit von Nanopartikel, welche beim HELICONIUS MELPOMENE nicht enthalten sind, zurückführen, da er sonst gleiche Strukturen aufweist (Abb. 12) [15].

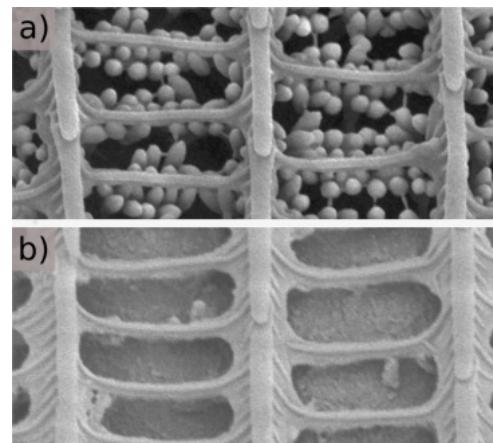


Abb. 12: a Nanostruktur des PIERIS RAPAE im weißen Bereich des Flügels mit Nanopartikel; b Nanostruktur des HELICONIUS MELPOMENE im weißen Bereich des Flügels ohne Nanopartikel [15]

Für die Farbentstehung auf Schmetterlingsflügeln sind neben den Strukturfarben auch Pigmente ein wichtiger Faktor. Diese sind chemische Verbindungen, welche bei Stoffwechselvorgängen im Schmetterling entstehen und im Chitin der Schuppen eingelagert sind. Die Pigmente absorbieren bestimmte Wellenlängen des Lichts. Der restliche Teil des Lichts wird reflektiert und bestimmt die Farbe des Schmetterlingsflügels.

Zwischen den verschiedenen Schmetterlingsarten gibt es Unterschiede in den Nanostrukturen. Falter gleicher Unterfamilie können beispielsweise unterschiedliche Längen der Querrippen oder Lamellenstreben aufweisen [16]. Wissenschaftler, die verschiedene Schmetterlingsarten der Familie der Bläulinge untersuchten, fanden heraus, dass sich die Perforation der Nanostrukturen zwischen den Arten unterscheidet. Je stärker die Nanostrukturen perforiert sind, desto geringer ist die Reflexion ausgeprägt. Mit zunehmender Perforation tritt vermehrt die Zerstreuung bei größeren Winkeln auf [17]. Bei Schmetterlingen gleicher Familien aber verschiedener Unterfamilien sind die Unterschiede der Nanostrukturen deutlicher erkennbar. Dies ist eine gute Grundlage zur Erforschung und zum Vergleichen der verschiedenen Nanostrukturen und Farben der Schmetterlinge.

## 3 Experimente

### 3.1 Verwendete Schmetterlinge

Die Schmetterlinge, die wir für unsere Experimente verwendet haben, haben wir nach verschiedenen Kriterien ausgesucht. Sie gehören alle, bis auf eine Ausnahme, der Familie der Edelfalter (Nymphalidae) an (Abb. 13). Der GRAPHIUM AGAMEMNON gehört der Familie der Ritterfalter (Papilionidae) an. So kann man vergleichen, ob die Strukturen bei gleicher Familie ähnlich sind. Des Weiteren haben wir Schmetterlinge verschiedener Farben

genommen, um ein breites Farbspektrum zu erhalten und so verschiedene Farben und ihre Entstehung zu analysieren. All unsere Schmetterlinge haben wir aus dem Schmetterlingshaus auf der Insel Mainau bekommen. Nun wollten wir die Schmetterlinge systematisch untersuchen. Dafür haben wir sie unter speziellen Mikroskopen angeschaut und anschließend die Bilder ausgewertet.

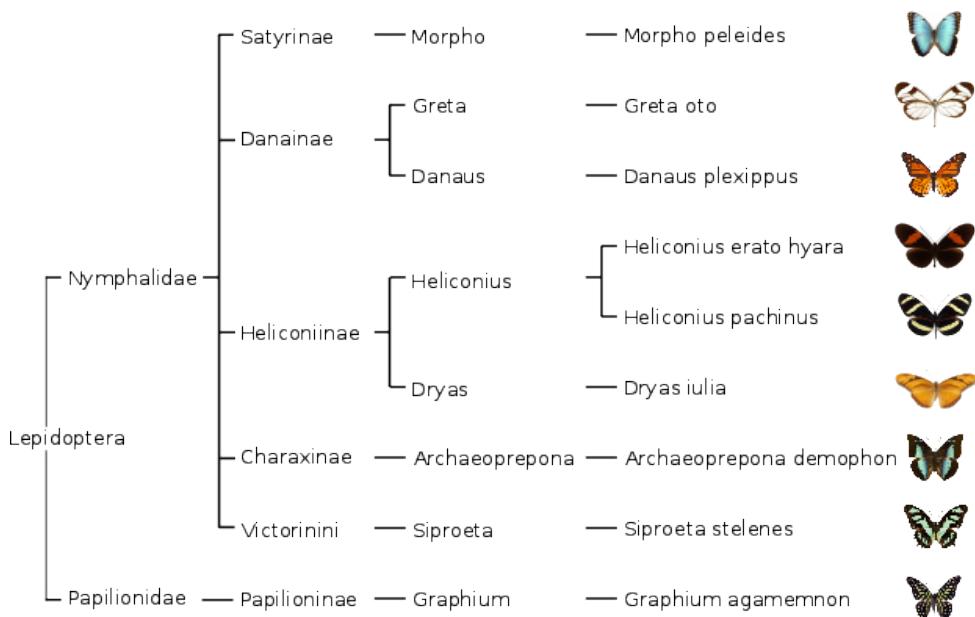


Abb. 13: Schematische Darstellung des Stammbaums der untersuchten Schmetterlinge

### 3.2 Mikroskopie

Um einen Überblick über die Flügel der Schmetterlinge zu erhalten, haben wir sie im Departement Physik in der Uni Basel unter einem Laserrastermikroskop (LRM) angeschaut. Unter einem normalen Lichtmikroskop kann man die filigranen Strukturen nicht erkennen, da die Größe ungefähr ein Viertel der Wellenlänge von Licht beträgt.

Die Aufnahme wird aus einem optischen und einem Laserbild zusammengesetzt. Der Fokus rastert das Objekt von oben nach unten durch und macht so von jeder Ebene ein gestochen scharfes Bild. Am Schluss setzt das Mikroskop diese alle zusammen und es entsteht eine scharfe Kompletaufnahme. Mit einem Laser wird die Oberfläche des Objekts abgetastet, so erhält man genaue Höheninformationen.

Um genauere Informationen über die Schuppen und Nanostrukturen auf den Flügeln zu erhalten, haben wir im Mikroskopiezentrums an der Uni Ba-

sel ein Rasterelektronenmikroskop (REM) benutzt. Dies hat den Vorteil, dass es sehr hohe Vergrößerungen aufnehmen kann. Ein weiterer Vorteil ist die große Tiefenschärfe der Aufnahmen.

Im REM wird ein Wolframdraht durch Strom erhitzt, sodass sich Elektronen heraus lösen. Diese werden durch ein starkes elektrisches Feld beschleunigt und durch mehrere elektromagnetische Linsen auf wenige nm fokussiert. Durch ein Ablenkspulensystem wird der Elektronenstrahl zeilenförmig über die Probenoberfläche bewegt. Beim Auftreten werden energieschwache Sekundärelektronen frei, welche durch ein Szintillatoren-Photomultipliersystem zuerst zu einem optischen und dann wieder zu einem elektrischen Signal verarbeitet werden.

Um so viele Informationen wie möglich über die Nanostrukturen und die Farbentstehung zu erhalten, haben wir die Flügel von oben und im Querschnitt aufgenommen.

### 3.3 Versuchsdurchführung

Wir haben nach der Farbe entschieden, welche Teile des Schmetterlingsflügel wir genauer untersuchen wollten. Hierbei entschieden wir uns für die farbigen Bereiche und vereinzelt auch für schwarze Bereiche. So konnten wir analysieren, ob die schwarze Farbe bei verschiedenen Schmetterlingen auf unterschiedliche Art entsteht. Für die LRM-Messungen zerlegten wir die Schmetterlinge mit Skalpell und Schere in ihre einzelnen Bestandteile. Wir nahmen bis auf wenige Ausnahmen für unsere Messungen nur die Vorderflügel, da diese meistens im Vergleich zu den Hinterflügeln eine größere Farbenpracht und -intensität besitzen.

Für die REM-Messungen haben wir kleine Proben ( $5 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm}$ ) aus den Schmetterlingen ausgeschnitten. Dafür haben wir uns aus den LRM-Messungen wichtige Stellen herausgesucht und diese dann aus dem Schmetterlingsflügel herausgeschnitten (Abb. 14)

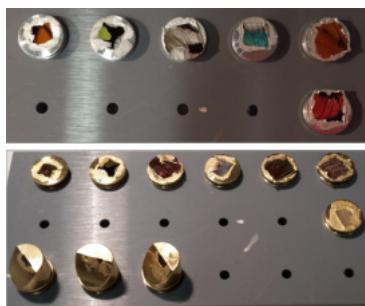


Abb. 14: Proben der Schmetterlinge für die REM vor der Goldbeschichtung (oben) und danach (unten); die Querschnittsproben wurden auf abgewinkelte Probenhalter befestigt (unten rechts)

Danach wurden die Proben in einer speziellen Kathodenerstäubungsanlage mit einer etwa  $20 \text{ nm}$  dicken, leitfähigen Goldfilm beschichtet (Abb. 15).



Abb. 15: Proben in der Kathodenerstäubungsanlage

Auf den Flügeln haben wir uns die Form der Schuppen und der Nanostrukturen angesehen und nach auffallenden Stellen gesucht. Man sieht durch das LRM sowohl das optische als auch das Laserbild. Dadurch konnten wir sehen, welche Schuppen welche Farbe haben. Dies war für spätere Messungen notwendig, da man unter dem Rasterelektronenmikroskop nach der Goldbeschichtung nichts mehr von der eigentlichen Farbe der Schuppen erkennen konnte (Abb. 14).

Zum Analysieren der Daten haben wir das Programm Gwyddion benutzt [18]. Hier haben wir verschiedene Längen und Faktoren der Strukturen mehrerer Schmetterlinge gemessen und anschließend miteinander verglichen.

## 4 Resultate und Diskussion

Im Folgenden werden wir die einzelnen Schmetterlinge näher erläutern und diese anhand unserer Messungen beschreiben. Die Daten fassen wir anschließend in einer Tabelle zusammen (vgl. Tabelle 1). Die allgemeinen Informationen über die Schmetterlinge bezogen wir aus Wikipediaseiten [19].

### 4.1 Greta Oto

Der Schmetterling GRETA OTO stammt aus der Familie der Edelfalter (Nymphalidae). Der Schmetterling besitzt transparente Flügel mit einem braunen Rand und schwarzen Adern. Sein Körper ist lang und filigran (Abb. 16 a). Das Verbreitungsgebiet erstreckt sich von Mexiko nach Panama.

Die besonderen Flügel lassen den Schmetterling während des Fluges fast vollständig verschwinden. Da seine Flügel nur sehr wenig Licht reflektieren,

nur ca. 2-5 % der Lichteinstrahlung<sup>3</sup>, ist er für seine Fressfeinde nahezu unsichtbar. Des weiteren unterdrückt er infrarotes und ultraviolettes Licht, so ist es für seine Feinde fast unmöglich, ihn in der Luft auszumachen. Der Gruppe um den Wissenschaftler Hendrik Hölscher fand heraus, dass unregelmäßige Nanostrukturen für die transparenten Flügel verantwortlich sind. Dies konnten wir unseren Messungen bestätigen.

<sup>3</sup>Im Vergleich reflektiert ein Fensterglas minimal 8 %, ein Spiegel ca. 95 % des einfallenden Lichtes.

Auf Abb. 16 b kann man den Übergang von dem transparenten zu dem braunen Bereich erkennen. Man sieht, dass dieser Schmetterling in dem braunen Bereich eine Schuppenstrukturen aufweist. Die REM-Aufnahmen von dem transparenten Bereich zeigen einen erstaunliche Eigenschaft. Hier besitzt der Schmetterling keine Schuppen, sondern zeigt haarige Strukturen, wie sie auch schon das Team um

Hölscher entdeckt hat. Der Untergrund den man auf Abb. 16 c oben erkennen kann ist vollkommen unregelmäßig und weist keinerlei Periodizität auf. Die letzte Grafik Abb. 16 d zeigt eine Vergrößerung auf eine braune Schuppe. Hier erkennt man eine stetige Lamellenstruktur auf einer Schuppe mit dem Lamellenabstand von  $1,38 \mu\text{m}$  und der Lamellenstrebenbreite von  $95\text{nm}$ .

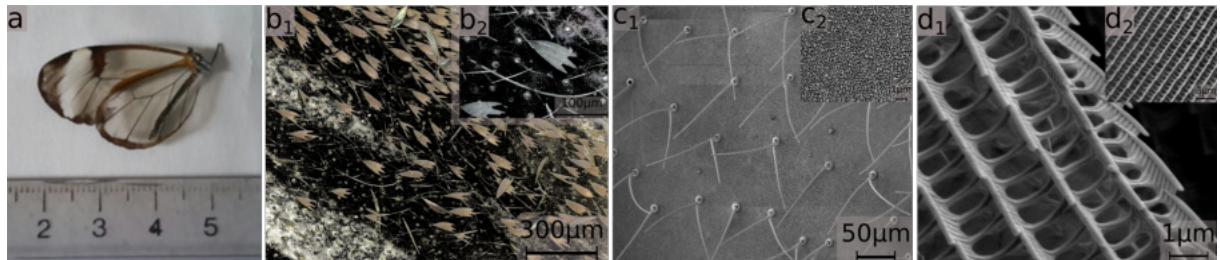


Abb. 16: Greta Oto; a Ansicht der Flügel; b<sub>1</sub> LRM-Aufnahme des Übergangsbereiches zwischen transparenten und braunen Flügelbereich; b<sub>2</sub> LRM-Aufnahme der Vergrößerung dieses Bereiches; c<sub>1</sub> REM-Aufnahme des transparenten Bereiches; c<sub>2</sub> REM-Aufnahme der Noppenstruktur; d<sub>1</sub> REM-Aufnahme der Lamellenstruktur einer braunen Schuppe; d<sub>2</sub> Übersicht dieser Lamellenstruktur

## 4.2 Graphium Agamemnon

Der GRAPHIUM AGAMEMNON stammt aus der Familie der Ritterfalter (Papilionidae). Der Schmetterling besitzt eine schwarze Grundfärbung der Flügel, mit zahlreichen hellgrünen Flecken und Streifen. Durch die grün gesprenkelten Flügel ist er im Flug durch Licht und Schatten nahezu unsichtbar. Der Lebensraum dieses Schmetterlings beschränkt sich auf die indo-australische Faunenregion. Das Verbreitungsgebiet zieht sich von Indien bis nach Neuseeland.

Der GRAPHIUM AGAMEMNON hat uns besonders fasziniert. Die grünen Flächen auf der Oberfläche sind sehr glatt, was man auch auf den Lasermikroskopbildern gut erkennen kann. Auf der Abb. 17 b sieht man den Übergang von dem schwarzen Bereich in den grünen. Im grünen Bereich sind keinerlei Schuppen auszumachen. Die Farbe entsteht hier scheinbar nicht durch die typischen Lamellen und

deren Nanostrukturen, wie bisher angenommen. In Abb. 17 c<sub>1</sub> sieht man eine REM-Messung. Sie zeigt den schwarzen Bereich des Flügels. Das Erstaunliche hierbei ist, dass zwei unterschiedliche Formen von schwarzen Schuppen in periodischer Anordnung vorhanden sind: Ein breite und an der Spitze gezackte und eine schmale und an der Spitze abgerundete Schuppe. Die breite, zackige Schuppe hat einen Lamellenabstand von  $1,82 \mu\text{m}$ , die schmale, runde Schuppe nur einen Lamellenabstand von  $0,73 \mu\text{m}$ . Auf den Abbildungen c<sub>2</sub> und c<sub>3</sub> ist die Lamellenstruktur dieser beiden Schuppenarten vergrößert zu sehen. Des weiteren besteht der Untergrund in diesem Bereich aus vielen kleinen Noppen (siehe Abb. 17 d) die, ähnlich den Noppen des transparenten Flügelteils des GRETA OTO, kaum periodisch angeordnet sind. Der durchschnittliche Abstand der Noppen beträgt  $770\text{ nm}$ , mit einer durchschnittlichen Abweichung von  $270\text{ nm}$ .

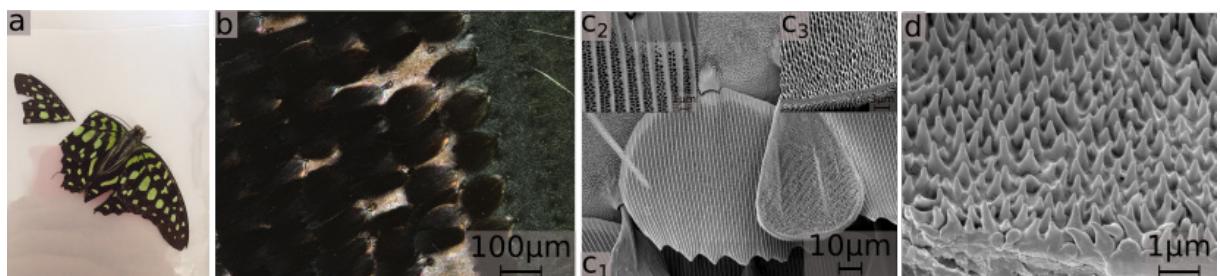


Abb. 17: Graphium Agamemnon; a Ansicht des Schmetterlings; b LRM-Aufnahme des Übergangsbereiches von grün und schwarz; c<sub>1</sub> REM-Ansicht auf die zwei schwarzen Schuppenarten; c<sub>2</sub> Lamellenstruktur der breiten Schuppe; c<sub>3</sub> Lamellenstruktur der schmalen Schuppen; d Noppenstruktur der grünen Bereichs

### 4.3 Dryas Iulia

Der DRYAS IULIA stammt aus der Familie der Edelfalter (Nymphalidae). Die Vorderflügel sind lang und schmal mit einer leuchtend orangenen Flügelfarbe und schwarzem, leicht gewellten Rand (Abb. 18 a). Der Lebensraum des DRYAS IULIA ist das neotropische Gebiet. Das Verbreitungsgebiet zieht sich von Mexiko bis nach Kolumbien, auch auf den karibischen Inseln ist dieser Schmetterling zu finden.

Auf der Lasermikroskopaufnahme des DRYAS IULIA erkennt man eine fast homogene Anordnung der orangenen Flügelschuppen (Abb. 18 b), welche kaum

Unterschiede zwischen den einzelnen Schuppen aufweisen. Abbildung 18 c<sub>1</sub> zeigt eine REM-Messung. Auf diesem Bild erkennt man die Lamellenstruktur der Schuppen genauer, der Abstand dieser Lamellen beträgt durchschnittlich  $1,15 \mu\text{m}$ . In Abb. 18 c<sub>2</sub> ist eine Übersicht zu sehen, die auf die regelmäßige Strukturanordnung der Lamellen auf dem Flügel schließen lässt. Das Besondere bei diesem Schmetterling ist seine kräftige Farbe und die periodische Nanostruktur.

Bisher hat sich außer uns noch niemand mit der Nanostruktur dieses Schmetterlings befasst.

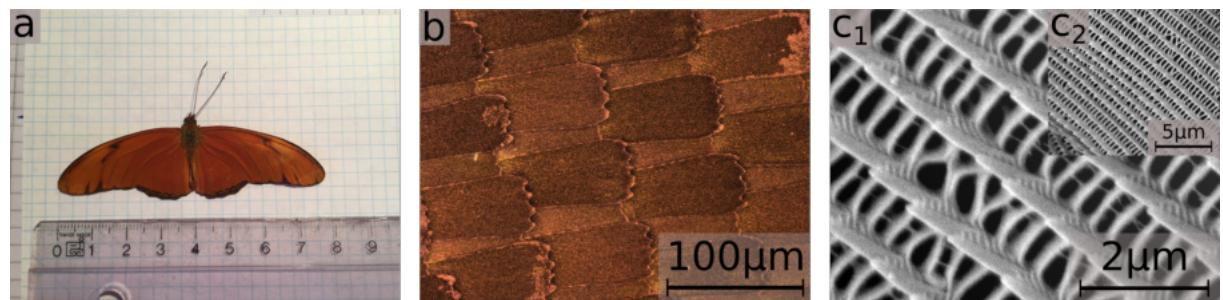


Abb. 18: Dryas Iulia; a Ansicht des Schmetterlings; b LRM-Aufnahme der orangenen Schuppen; c<sub>1</sub> Vergrößerung auf die Lamellenstruktur einer orangenen Schuppe; c<sub>2</sub> Übersicht dieses Bereichs

### 4.4 Heliconius Erato Hydara

Der HELICONIUS ERATO HYDARA stammt aus der Familie der Edelfalter (Nymphalidae). Er weist, je nach Region, verschiedene Farben und Zeichnungen auf. Er kommt aus der Neotropis (Südamerika). Seine Verbreitung reicht von Mexiko bis nach Brasilien und von Bolivien bis nach Argentinien.

Der HELICONIUS ERATO HYDARA ist ein besonderer Schmetterling. Er ist fast vollständig schwarz, besitzt jedoch eine rote Binde an jedem Vorderflügel (Abb. 19 a). Abbildung 19 b zeigt die Vergrößerung des Flügels auf einen roten Bereich durch ein Lasermikroskop. Hier sieht man, dass dieser Schmetterling eine hohe Anzahl an Zacken besitzt. Die Ab-

bildung 19 c<sub>1</sub> stellt eine Aufnahme des Rasterelektronenmikroskops dar. Es zeigt die Lamellenstruktur des Schmetterlings auf einer roten Schuppe. Es wird deutlich, dass der HELICONIUS ERATO HYDARA, wie auch der DRYAS IULIA eine fast homogene und periodische Struktur auf den Flügeln aufweisen kann. Die Lamellen sind hierbei um durchschnittlich  $0,97 \text{ nm}$  von einander entfernt und fast genauso hoch. Die Abbildung 19 d zeigt den Querschnitt der roten Schuppen und verdeutlicht erneut die regelmäßige Lamellenstruktur.

Es gibt keine expliziten wissenschaftliche Arbeiten über die Nanostrukturen von diesem Schmetterling.

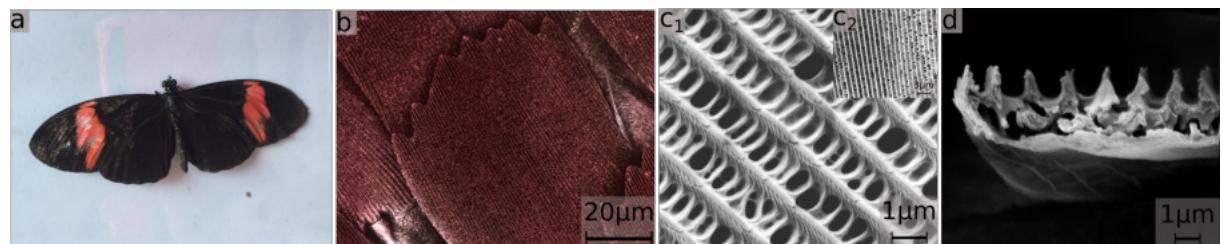


Abb. 19: Heliconius Erato Hydara; a Ansicht des Schmetterlings; b LRM-Aufnahme einer roten Schuppe; c<sub>1</sub> REM-Vergrößerung der Lamellenstruktur einer roten Schuppe; c<sub>2</sub> Übersicht dieses Bereichs; d Querschnitt einer roten Schuppe

## 4.5 Archaeoprepona Demophon

Das Verbreitungsgebiet des ARCHAEOPREPONA DEMOPHONS erstreckt sich von Mexiko bis zum Amazonasbecken. Er stammt aus der Familie der Edelfalter (Nymphalidae). Der Grundfarbe des Schmetterlings ist braun-schwarz, je nach Unterart, mit einem großen brillant-blauen Band, das auf beiden Vorderflügelseiten zu sehen ist.

Der ARCHAEOPREPONA DEMOPHON weist interessante Eigenschaften auf: Zum einen schimmert dieser Schmetterling wie der MORPHO PELEIDES, jedoch eher in einem Grün-blau als in einem reinen Blau, wie in der Lasermikroskopaufnahme zu sehen (Abb. 20 a). Zudem zeigt die REM-Aufnahme im oberen Eck des Bildes eine weitere Besonderheit auf: Der Flügel des ARCHAEOPREPONA DEMOPHON besteht nämlich nicht nur aus einer Sorte von Schuppen,

sondern aus zwei. Die oberen Schuppen sind nahezu rechteckig und blau, die unteren besitzen die „übliche“ zackige Struktur und sind schwarz. Diese Gegebenheit lässt sich auf Abb. 20 b noch stärker verdeutlichen. Die Deckschuppen besitzen, im Gegensatz zu den Bodenschuppen, keinerlei Hohlräume (Abb. 20 b<sub>1</sub>) und haben einen Lamellenabstand von  $0,77 \mu\text{m}$ . Die Bodenschuppe hingegen weist eine Lamellenstruktur mit Hohlräumen auf (Abb. 20 b<sub>2</sub>), der Abstand der Lamellen beträgt hier  $1,47 \mu\text{m}$  und die Lamellenstreben sind  $110\text{nm}$  dick. Auf Abbildung 20 c kann man gut diese Besonderheit der Deckschuppe erkennen, welche eine ausgeprägte „Tannenbaumstruktur“ aufweist.

Auch hier gibt es keine speziellen Arbeiten über die Nanostrukturen von diesem Schmetterling.

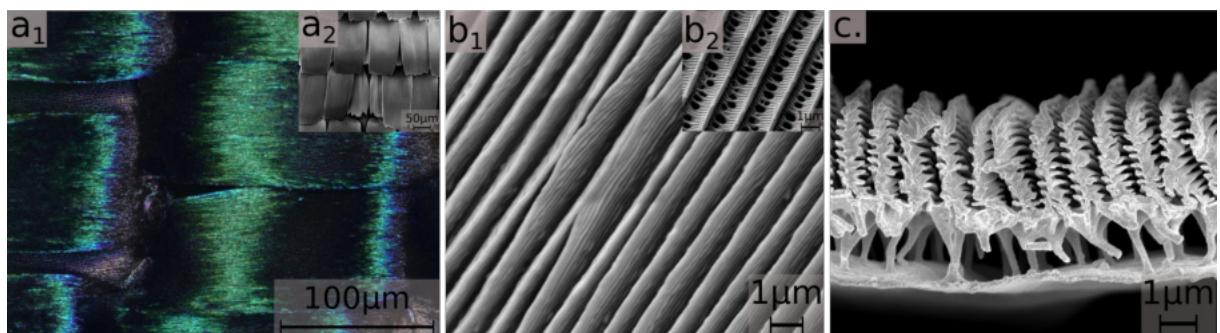


Abb. 20: Archaeoprepona Demophon; a<sub>1</sub> LRM-Aufnahme (blau); a<sub>2</sub> REM-Aufnahme (blau); b<sub>1</sub> REM-Ansicht der Lamellenstruktur (blau); b<sub>2</sub> REM-Ansicht der Lamellenstruktur (schwarz); c Querschnitt (blau)

## 4.6 Heliconius Pachinus

Der HELICONIUS PACHINUS stammt aus der Familie der Edelfalter (Nymphalidae). Die tropischen und subtropischen Regionen Süd-Mittelamerikas sind die Heimat des HELICONIUS PACHINUS. Er besitzt schmale Vorderflügel und kleine Hinterflügel. Die Grundfarbe dieses Schmetterlings ist schwarz mit zwei hellgrünen Binden auf den Vorderflügeln.

Auf Abbildung 21 a<sub>1</sub> erkennt man eine Lasermikroskopaufnahme des grünen Flügelbereiches. Man kann die gezackte Struktur der Schmetterlingschuppen erkennen. Eine Übersicht der Schuppen durch ein REM ist auf Abb. 21 a<sub>2</sub> zu sehen. Es zeigt sich, dass auch bei diesem Schmetterling die Schuppen sehr regelmäßig angeordnet sind. Eine weite-

re periodische Eigenschaft stellen die Abb. 21 b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> dar, die Lamellenstruktur der Schuppe. Dabei ist auf Abbildung 21 b<sub>1</sub> eine Vergrößerung einer einzelnen grünen Schuppe zu sehen. Wobei in Abbildung 21 b<sub>2</sub> die Übersicht dieser Lamellenstruktur zu sehen ist. Die zyklische Struktur der Lamellen wird in diesem Bild deutlich, welche einen Abstand von  $1,07 \mu\text{m}$  haben. Auf Abbildung 21 c<sub>1</sub> ist die Struktur der schwarzen Schuppe im Detail zu sehen und auf Abbildung 21 c<sub>2</sub> eine Übersicht. Hier beträgt der Lamellenabstand  $0,87 \mu\text{m}$ . Dieser Schmetterling ist ein weiteres Beispiel für die erstaunliche Vielfalt und Periodizität der Nanostrukturen der Schmetterlingen.

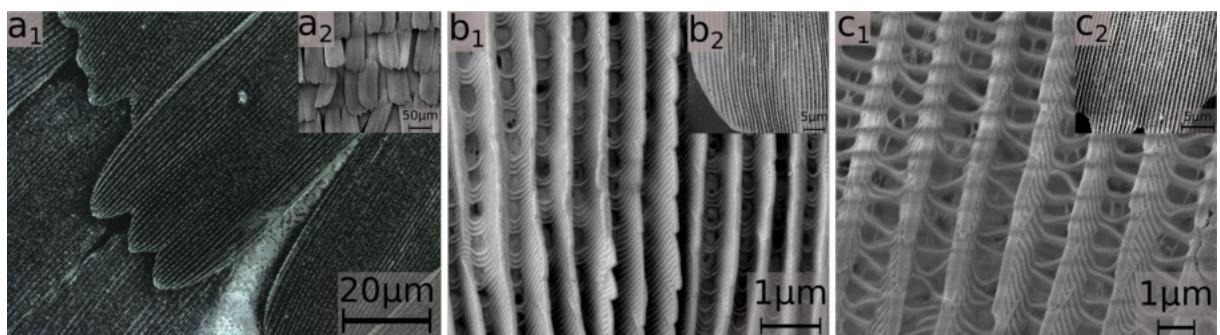


Abb. 21: Heliconius Pachinus; a<sub>1</sub> LRM-Aufnahme (grün); a<sub>2</sub> REM-Übersicht (grün); b<sub>1</sub> REM-Vergrößerung der Lamellenstruktur (grün); b<sub>2</sub> Übersicht der Lamellenstruktur (grün); c<sub>1</sub> REM-Vergrößerung der Lamellenstruktur (schwarz); c<sub>2</sub> Übersicht der Lamellenstruktur (schwarz)

## 4.7 Siproeta Stelenes

Der SIPROETA STELENES stammt aus der Familie der Edelfalter (Nymphalidae). Er besitzt eine schwarze Grundfarbe mit mehreren großen hellgrünen Flecken und Querbinden auf den Vorderflügeln. Bei längerer Aufbewahrung verblasst die Farbe zu einem Hellblau (Abb. 22 a). Die Heimat des SIPROETA STELENES ist die neotropische Region. Mexiko und fast ganz Südamerika gehört zu seinem Verbreitungsgebiet.

Die Abbildungen 22 b<sub>1</sub> und b<sub>2</sub> stellten eine REM-Aufnahme der grünen Schuppen auf dem Flügel dar. Dabei ist die Abbildung 22 b<sub>2</sub> eine Übersicht der einzelnen grünen Schuppen und Abbildung 22 b<sub>1</sub> eine Vergrößerung auf zwei einzelne Schuppen. Man

kann gut eine herzförmige Form der Flügelschuppen mit ihrem Ansatz auf die nippennartige Cuticula erkennen. Die Noppenanordnung ist sehr chaotisch, dass lässt sich an der durchschnittlichen Abweichung des Lamellenabstands erkennen: Die Abweichung vom durchschnittlichen Abstand 1,09  $\mu\text{m}$  beträgt 0,56  $\mu\text{m}$ . Außerdem wird wieder eine Lamellenstruktur auf den einzelnen Schuppen deutlich. Eine starke Vergrößerung auf eine einzelne Lamelle zeigt die Abb. 22 c. Hier erkennt man die Rippen einer Lamellen und die Überlagerung der Lamellenstreben. Der Abstand zwischen diesen Lamellen beträgt 2,59  $\mu\text{m}$ .

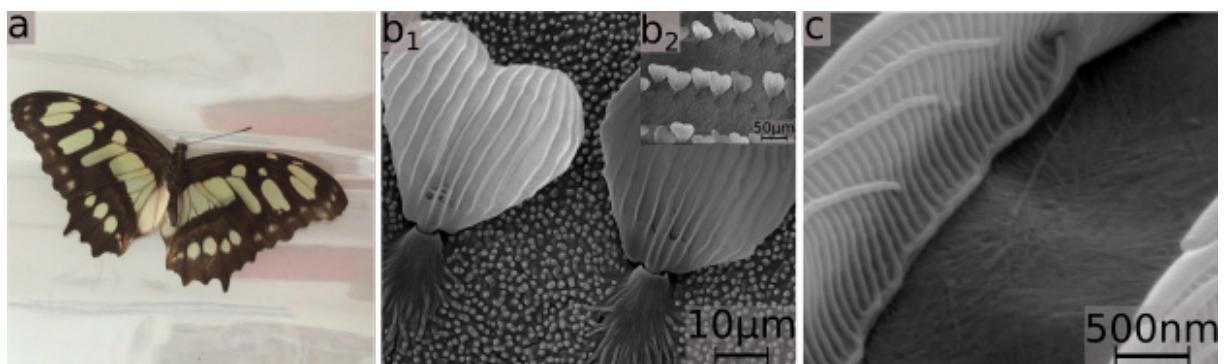


Abb. 22: Siproeta Stelenes; a Ansicht des Schmetterlings; b<sub>1</sub> REM-Aufnahme zweier Schuppen im grünen Bereich mit Noppenstruktur; b<sub>2</sub> Übersicht auf grünen Bereich; c Vergrößerung auf eine Lamelle der grünen Schuppe

## 4.8 Danaus Plexippus

Der letzte Schmetterling in unserer Reihe ist der DANAUS PLEXIPPUS. Er fällt auf durch seine orange und schwarz gezeichnete Oberfläche. Seine orangene Grundfarbe ist von schwarz-weißer Zeichnung an den Ränder überzogen (Abb. 23 a). Er stammt aus der Familie der Edelfalter (Nymphalidae). Das Verbreitungsgebiet dieses Schmetterlings zieht sich von Amerika bis nach Australien und Neuseeland. Die Abbildung 23 b<sub>1</sub> zeigt eine Vergrößerung auf die einzelnen Flügelschuppen, durch ein Lasermikroskop und Abbildung 23 b<sub>2</sub> eine durch ein REM. Hier-

bei erkennt man die sehr regelmäßig und homogen angeordneten Schuppen. Außerdem lassen sich unterschiedliche Farben der Flügelschuppen im Lasermikroskopbild erkennen, obwohl die Farbe des Flügels von außen nur orange-braun scheint. Auf Abbildung 23 c sieht man eine Vergrößerung der Lamellen einer orangenen Schuppe. Man kann die periodische Struktur dieses Schmetterlings erkennen, welcher einen Lamellenabstand von 1,73  $\mu\text{m}$  besitzt. Es zeigt sich dass es auch hier Lamellenstreben gibt, die zu einer tannenbaumartigen Struktur führen.

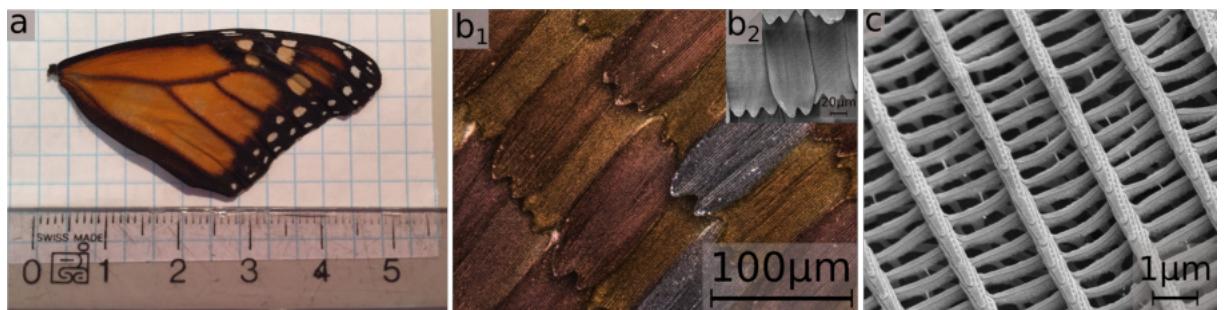


Abb. 23: Danaus Plexippus; a Ansicht des Flügels; b<sub>1</sub> LRM-Übersicht des orangenen Schuppenbereichs; b<sub>2</sub> REM-Aufnahme der orangenen Schuppen; c Vergrößerung der Lamellenstruktur einer orangenen Schuppe

## 4.9 Diskussion

Unsere Hypothese, dass die Farben bei den Tannenbaumstrukturen durch Interferenz an dünnen Schichten entstehen, lässt sich durch die Berechnung der Wellenlänge bestätigen (Gl. 7). Hierbei gehen wir von einem senkrechten Lichteinfall aus. Wichtig ist hier die Lamellendicke  $d$  und der Brechungsindex  $n$ , welcher in diesem Fall ein Maß für die Dichte von Chitin ist und 1,53 beträgt. Vergleicht man die berechnete Wellenlänge in der Tabelle 1 mit der dazugehörigen Farbe, stimmen diese, mit Ausnahme der Strukturen der schwarzen Schuppen, mit der Flügelfarbe gut überein. Einige Fragen sind jedoch noch offen:

- Wie entstehen die dunklen Farben (schwarz, braun)?
- Wie entstehen die Farben bei den Noppenstrukturen?
- Inwieweit spielen Pigmente eine Rolle?
- Wie und warum entstehen die schimmernden Farben?
- Ähneln sich die Strukturen verwandter Schmetterlinge?

Unsere Hypothese bezüglich der Entstehung der dunkleren Farben betrifft die Hohlräume zwischen den Querstreben in den Lamellenzwischenräumen (Abb. 10). Hierbei entsteht durch die Interferenz an der Lamelle eine Farbe, die sich in dem für Menschen sichtbaren Spektralbereich befindet. Wie am Beispiel der schwarzen Schuppe des ARCHAEOPREPONA DEMOPHON zu sehen ist, bei welcher die reflektierten Lichtstrahlen eine Wellenlänge von rund 672 nm besitzen, was einem dunklerem Rot entspricht.

Die Schuppe ist jedoch eindeutig schwarz, dies lässt sich durch Absorption erklären: Lichtstrahlen, welche auf die Tannenbaumstruktur treffen, werden größtenteils reflektiert werden. Gelangen die Lichtstrahlen jedoch in die Hohlräumen unter den Tannenbaumstrukturen, so werden sie absorbiert. Da wir absorbierte Lichtstrahlen als schwarz wahrnehmen, bildet sich, je nach Größe der Zwischenräume und des Lamellenabstandes  $r$ , eine Mischfarbe. Je mehr Licht absorbiert wird, desto stärker dominiert die schwarze Farbe. Bei den schwarzen Schuppen des ARCHAEOPREPONA DEMOPHON beträgt der Lamellenabstand 1,47  $\mu\text{m}$ . Der Lamellenabstand auf den braunen Schuppen des GRETA OTO ist mit 1,39  $\mu\text{m}$  kleiner und absorbiert somit weniger Licht. So ist die Mischfarbe des GRETA OTO weniger von schwarz dominiert und wirkt, mit der orangefarbenen Struktur, bräunlich.

Bei der Gattung der Heliconius sind die Zwischenräume größtenteils geschlossen und es entstehen dabei hellere Farben, wie grün und rot. Bei den beiden orangefarbenen Schmetterlingen DRYAS IULIA und

DANAUS PLEXIPPUS verhält es sich ähnlich. Hier sind die Zwischenräume zwischen den Querstreben zwar nicht geschlossen, jedoch sind in beiden Fällen der Abstand zwischen den Querstreben sehr gering. Die helle Mischfarbe in diesem Fall resultiert dabei aus der geringen Absorption. Bei den blauen Schuppen des MORPHO PELEIDES und des Schuppen des SIPROETA STELENES, sind gar keine Hohlräume vorhanden, sodass die Farbe ausschließlich auf Interferenz zurückzuführen ist.

Name	Farbe	Struktur	Messung	Wellenlänge $\lambda$
Graphium agamemnon	grün		$r=0,77\mu\text{m}$ $\Delta=0,27\mu\text{m}$	
	schwarz (zackig)		$r=1,82\mu\text{m}$ $\Delta=0,08\mu\text{m}$	
	schwarz (rund)		$r=0,73\mu\text{m}$ $\Delta=0,15\mu\text{m}$	
Greta oto	transparent		$r=$ zu chaotisch	
	braun		$r=1,39\mu\text{m}$ $\Delta=0,05\mu\text{m}$ $d=95\text{nm}$ $\Delta=10\text{nm}$	580nm
Dryas iulia	orange		$r=1,152\mu\text{m}$ $\Delta=0,04\mu\text{m}$	
Heliconius pachinus	grün		$r=1,07\mu\text{m}$ $\Delta=0,03\mu\text{m}$	
	schwarz		$r=0,87\mu\text{m}$ $\Delta=0,05\mu\text{m}$	
Archaeoprepona demophon	blau (obere)		$r=0,77\mu\text{m}$ $\Delta=0,03\mu\text{m}$ $d=80\text{nm}$ $\Delta=10\text{nm}$	496nm
	schwarz (untere)		$r=1,47\mu\text{m}$ $\Delta=0,05\mu\text{m}$ $d=110\text{nm}$ $\Delta=10\text{nm}$	672nm
Heliconius Erato Hydara	rot		$r=0,97\mu\text{m}$ $\Delta=0,06\mu\text{m}$ $d=106\text{nm}$ $\Delta=9\text{nm}$	649nm
Siproeta stelenes	hellblau		$r=1,09\mu\text{m}$ $\Delta=0,56\mu\text{m}$	
	hellblau		$r=2,59\mu\text{m}$ $\Delta=0,07\mu\text{m}$ $d=78\text{nm}$ $\Delta=10\text{nm}$	476nm
Morpho peleides	orange		$r=1,73\mu\text{m}$ $\Delta=0,03\mu\text{m}$	
	blau (obere)		$r=1,87\mu\text{m}$ $\Delta=0,09\mu\text{m}$ $d=75\text{nm}$ $\Delta=5\text{nm}$	459nm
	schwarz (untere)		$r=1,12\mu\text{m}$ $\Delta=0,04\mu\text{m}$ $d=114\text{nm}$ $\Delta=1\text{nm}$	698nm

Tabelle 1: Übersicht der relevanten Ergebnisse; zu jedem Schmetterling relevante Oberflächen- und Querschnittsmessungen gezeigt und die entsprechenden Dimensionen Lamellenabstand  $r$ , Lamellenstrebendicke  $d$  und die dazugehörigen Abweichungen  $\Delta$ ; wenn möglich sind die berechneten Wellenlängen eingetragen

Obwohl der *ARCHAEOREPONA DEMOPHON* Hohlräume aufweist, wirkt er bläulich, dies ist auf den geringen Lamellenabstand von  $0,77\text{ }\mu\text{m}$  zurückzuführen.

Bei den Noppenstrukturen erfolgt die Farbbildung unserer Hypothese nach vorwiegend über Pigmente. Ein gutes Beispiel ist hier der *SIPROETA STELENES*, dessen Farbe mit der Zeit von einem hellen Grün zu Hellblau verblasst (siehe 4.7 auf Seite 12). Auch bei dem *GRAPHIUM AGAMEMNON* verblasst das Neongrün nach einiger Zeit zu einem blasseren Hellgrün. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich im Bereich der Noppen im Chitin eingeschlossene Pigmente befinden, welche unter UV-Einstrahlung verblassen.

Eine der interessantesten Strukturen weist der *GRETA OTO* im Bereich des transparenten Flügels auf. Diese chaotische Noppenstruktur, welche im Vergleich zu den anderen Noppenstrukturen sehr klein ist (vgl. Tabelle 1). In diesem Fall befinden sich keinerlei Pigmente in dem farblosen Chitin und es gibt auch keine periodisch angeordneten Strukturen, welche Strukturfarben verursachen würden. Die Transparenz der Flügel des *GRETA OTO*'s beruht also auf der chaotischen Anordnung seiner Nanostruktur.

Eine weitere Eigenschaft der Noppenstruktur ist die der Antireflexion, diese kann bei allen Schmetterlingen beobachten werden, welche die Noppenstruktur aufweisen. Auf diesen Flächen wirken die Farben matt, selbst in dem transparenten Bereich kann man kaum eine Reflexion feststellen. Die Reflexion ist stärker je größer die Differenz des Brechungsindexes an der Mediengrenze und je sprunghafter dieser Wechsel der Medien erfolgt. Die Reflexion ist auf ein Minimum beschränkt da die Noppen ein weichen Übergang bilden, wodurch das Licht eher gestreut als gebrochen wird. Unsere Hypothese besagt, dass ein Teil der Farben durch Streuung entsteht. Hierbei wird kurzwelliges (blaues) Licht viel stärker gestreut als langwelliges (rotes) Licht. Dadurch wird der Farbwechsel des *SIPROETA STELENES* erklärt, welcher nach dem Verblasen der grünen Pigmentfarbe eine bläulich Färbung hat.

Unsere Hypothese bezüglich des Schillern der Flügelfarben betrifft die Anzahl der Lamellenstreben eines Tannenbaums. Dieses Schillern lässt sich sowohl bei dem *ARCHAEOREPONA DEMOPHON*, als auch bei dem *MORPHO PELEIDES* wiederfinden. Bei beiden Schmetterlingen gibt es zwei verschiedene Schuppenschichten, wobei jeweils nur die Deckschuppen schimmern. Die schillernden Farben ent-

stehen an der Struktur der oberen Schuppe. Hierbei spielt die Anzahl der Lamellenstreben eine große Rolle, diese beläuft sich bei dem *ARCHAEOREPONA DEMOPHON* auf 8 bis 12 und bei dem *MORPHO PELEIDES* auf 4 bis 5. Im Gegensatz zu den anderen Schmetterlingen (durchschnittlich 2 bis 3) eine deutlich größere Anzahl. Bei dem Vorgang der Interferenz an dünnen Schichten entscheidet hier, im Gegensatz zu den Flügelstrukturen der anderen Schmetterlinge, schon die kleinste Veränderung des Einstrahlungswinkels die Farbgebung. Die feinere Strukturierung verursacht somit die schillernden Farben.

Geht man von einer Ähnlichkeit durch die Abstammung der einzelnen Schmetterlingen von einer Unterfamilie bzw. Gattung aus (Abb. 13), so kann man die Strukturen des *GRETA OTO* und die des *DANAUS PLEXIPPUS* vergleichen welche beide der Unterfamilie Danainae angehören. Ebenso die Schmetterlinge welche der Unterfamilie der Heliconiinae angehören, dazu gehört der *DRYAS IULIA*, sowie die beiden Schmetterlinge welche auch der selben Gattung, der *Heliconius* angehören: der *HELICONIUS ERATO HYDARA* und der *HELICONIUS PACHINUS*.

Bei den Unterfamilie Danainae unterscheidet sich allerdings die Struktur des transparenten *GRETA OTO* und des orangefarbenen *DANAUS PLEXIPPUS* grundlegend, da sich hier einmal die Noppenstruktur und einmal die Tannenbaumstruktur finden lässt. Anders bei dem orangefarbenen *DRYAS IULIA*, dem roten *HELICONIUS ERATO HYDARA* und dem grünen *HELICONIUS PACHINUS*, hier ähneln sich sowohl die Lamellenabstände  $r$ , als auch die obere Lamellenstrebenbreite  $w$ . Diese Tatsache zeigt, dass die Nanostruktur ebenfalls von der Abstammung abhängig ist und sich bei engere Verwandtschaft eine größere Übereinstimmung der Nanostrukturen feststellen lassen. Ein weiterer Indiz zur Bestätigung dieser Hypothese ist, dass die Dimensionen der Nanostrukturen der Schmetterlinge welche der selben Gattung angehören eine größere Übereinstimmung aufweisen, als die welche lediglich einer Unterfamilie angehören.

Die beiden Lamellenstrebenbreiten der zwei Schmetterlinge aus der Gattung *Heliconius* weisen eine Differenz von  $10\text{ nm}$  auf. Der *DRYAS IULIA* besitzt eine Lamellenstrebenbreite von  $180\text{ nm}$  und diese ist somit um  $40\text{ nm}$  breiter als beim *HELICONIUS PACHINUS* und um  $30\text{ nm}$  breiter als beim *HELICONIUS ERATO HYDARA*.

## 5 Zusammenfassung

Während unserer Arbeit haben wir uns intensiv mit der Farbentstehung im Allgemeinen und insbesondere durch Nanostrukturen auf Schmetterlingsflügeln beschäftigt. In unseren Experimenten verwendeten wir Schmetterlinge, welche bis jetzt gar nicht oder nur selten in wissenschaftlichen Untersuchungen beschrieben wurden. Wir haben mit einem Laserraster- und Rasterelektronenmikroskop die Schuppenstrukturen der Flügeloberfläche aufgenommen und diese auf verschiedene Messgrößen hin untersucht. Wir konnten das Modell der Interferenz an dünnen Schichten auf die gefundenen Nanostrukturen übertragen und dies mit Berechnungen der reflektierten Lichtwellen und damit der sichtbaren Farben bestätigen. Hierbei konnten wir nachweisen, dass die Dicke der Lamellenstreben ein wichtiger Faktor für die Entstehung der verschiedenen Farben ist. Außerdem haben wir ein Modell des Schwarzanteils in den Farben aufgestellt und für die Bedeutung der Noppenstruktur eine Erklärung gefunden. Des Weiteren haben wir Zusammenhänge zwischen verwandten Schmetterlingsarten und deren Nanostrukturen herstellen können.

## 6 Ausblick

Die Erforschung der Nanostrukturen ist eine sehr komplexe und vielschichtige Thematik und zurzeit aktueller denn je. Technische Innovationen ermöglichen immer detailliertere Analysemethoden und Herstellungsverfahren in der Nanotechnologie. Wir planen in unserem Projekt ebenfalls genauere Untersuchungen um dem spannenden Thema der Farbgestaltung durch Nanostrukturen. Zum einen werden wir die Abhängigkeit der Farben von zusätzlichen Parameter erforschen, wie zum Beispiel den Einstrahlungswinkel auf den Flügel, die Polarisa-

tion sowie die spektrale Verteilung der reflektierten Lichtstrahlen. Dadurch wollen wir Aussagen und Vorhersagen zu der Entstehung der Strukturfarben treffen. Zum anderen wollen wir versuchen, ein dreidimensionales Modell der Nanostrukturen auf Schmetterlingsflügeln zu entwerfen und herzustellen. Des Weiteren möchten wir durch verschiedene Nachweismethoden den Anteil der Pigmente bestimmen, um genauere Aussagen über das Verhältnis von Strukturfarbe und Pigmenten treffen zu können. Hierbei planen wir Aufnahmen der Flügel mit UV- und Infrarotlicht sowie die Charakterisierung der Fluoreszenz.

## 7 Danksagung

Zunächst möchten wir uns bei all denjenigen bedanken, die uns dabei unterstützt haben, unser Projekt zu verwirklichen. Ganz besonders gilt dieser Dank unserem Projektbetreuer Thilo Glatzel für seine aufopfernde Hilfe und unbeschreibliche Geduld. Er hat uns durch seine wertvollen Tipps und konstruktive Kritik sehr weitergeholfen und uns immer wieder neu motiviert. Daneben gilt unser Dank dem phænovum, insbesondere H. Klein, K. Dafferth, P. Gohn, M. Neidinger und S. Geyer für ihre hilfreichen Korrekturen, Hilfe bei der graphischen Umsetzungen und wertvollen Tipps. Wir möchten auch dem Departement Physik der Uni Basel und dem Mikroskopiezentrums Basel danken, welche uns das LRM und REM zu Verfügung gestellt haben. Wir bedanken uns bei S. Erpel und M. Schönenberger für ihre Unterstützung bei der Mikroskopie. Bei der Baden-Württemberg Stiftung bedanken wir uns für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des mikromakro Programmes.

## Literatur

- [1] R. Hooke. *Micrographia. Historiae naturalis classica*. Cramer, 1961.
- [2] Sir Isaac Newton, I. Bernard Cohen, Albert Einstein, and Sir Edmund Whittaker. *Opticks: Or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light-Based on the Fourth Edition London, 1730*. Dover Publications, 2012.
- [3] Shuichi Kinoshita and Shinya Yoshioka. Structural colors in nature: The role of regularity and irregularity in the structure. *ChemPhysChem*, 6(8):1442–1459, aug 2005.
- [4] Yong Ding, Sheng Xu, and Zhong Lin Wang. Structural colors from morpho peleides butterfly wing scales. *Journal of Applied Physics*, 106(7):074702, oct 2009.
- [5] Shichao Niu, Bo Li, Zhengzhi Mu, Meng Yang, Junqiu Zhang, Zhiwu Han, and Luquan Ren. Excellent structure-based multifunction of morpho butterfly wings: A review. *Journal of Bionic Engineering*, 12(2):170–189, apr 2015.
- [6] Radwanul Hasan Siddique, Silvia Diewald, Juerg Leuthold, and Hendrik Hölscher. Theoretical and experimental analysis of the structural pattern responsible for the iridescence of morpho butterflies. *Optics Express*, 21(12):14351, jun 2013.
- [7] Irina Fernandes. Was ist Schmetterlingsstaub? <http://www.planet-wissen.de/>, 06.08.2013, 13:00.
- [8] T. Höfer, F. Karsten, and H. Welker. *Impulse Physik Kursstufe Baden-Württemberg*. Ernst Klett GmbH, Stuttgart, 2010. S.123.
- [9] Paul A. Tipler and Gene Mosca. *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure (German Edition)*. Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- [10] Rebecca E. Coath. Investigating the use of replica morpho butterfly scales for colour displays. *Dimensions*, 5:7, 2007.
- [11] Bokwang Song, Seok Chan Eom, and Jung H. Shin. Disorder and broad-angle iridescence from morpho-inspired structures. *Optics Express*, 22(16):19386, aug 2014.
- [12] Mohan Srinivasarao. Nano-optics in the biological world: beetles, butterflies, birds, and moths. *Chemical Reviews*, 99(7):1935–1962, jul 1999.
- [13] Wanlin Wang, Wang Zhang, Jiajun Gu, Qinglei Liu, Tao Deng, Di Zhang, and Hai-Qing Lin. Design of a structure with low incident and viewing angle dependence inspired by morpho butterflies. *Scientific Reports*, 3, dec 2013.
- [14] Radwanul Hasan Siddique, Silvia Vignolini, Carolin Bartels, Irene Wacker, and Hendrik Hölscher. Colour formation on the wings of the butterfly *hypolimnas salmacis* by scale stacking. *Scientific Reports*, 6:36204, nov 2016.
- [15] D. G. Stavenga, S. Stowe, K. Siebke, J. Zeil, and K. Arikawa. Butterfly wing colours: scale beads make white pierid wings brighter. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 271(1548):1577–1584, aug 2004.
- [16] Dejan Pantelić, Srećko Ćurčić, Svetlana Savić-Šević, Aleksandra Korać, Aleksander Kovačević, Božidar Ćurčić, and Bojana Bokić. High angular and spectral selectivity of purple emperor (lepidoptera: Apatura iris and a ilia) butterfly wings. *Optics Express*, 19(7):5817, mar 2011.
- [17] B. D Wilts, H. L Leertouwer, and D. G Stavenga. Imaging scatterometry and microspectrophotometry of lycaenid butterfly wing scales with perforated multilayers. *Journal of The Royal Society Interface*, 6(Suppl\_2):S185–S192, sep 2008.
- [18] Gwyddion data analysis software. <http://gwyddion.net/>. Eingesehen am 10.12.2016.
- [19] Wikipedia - die freie enzyklopädie. <https://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>. Eingesehen am 30.12.2016.