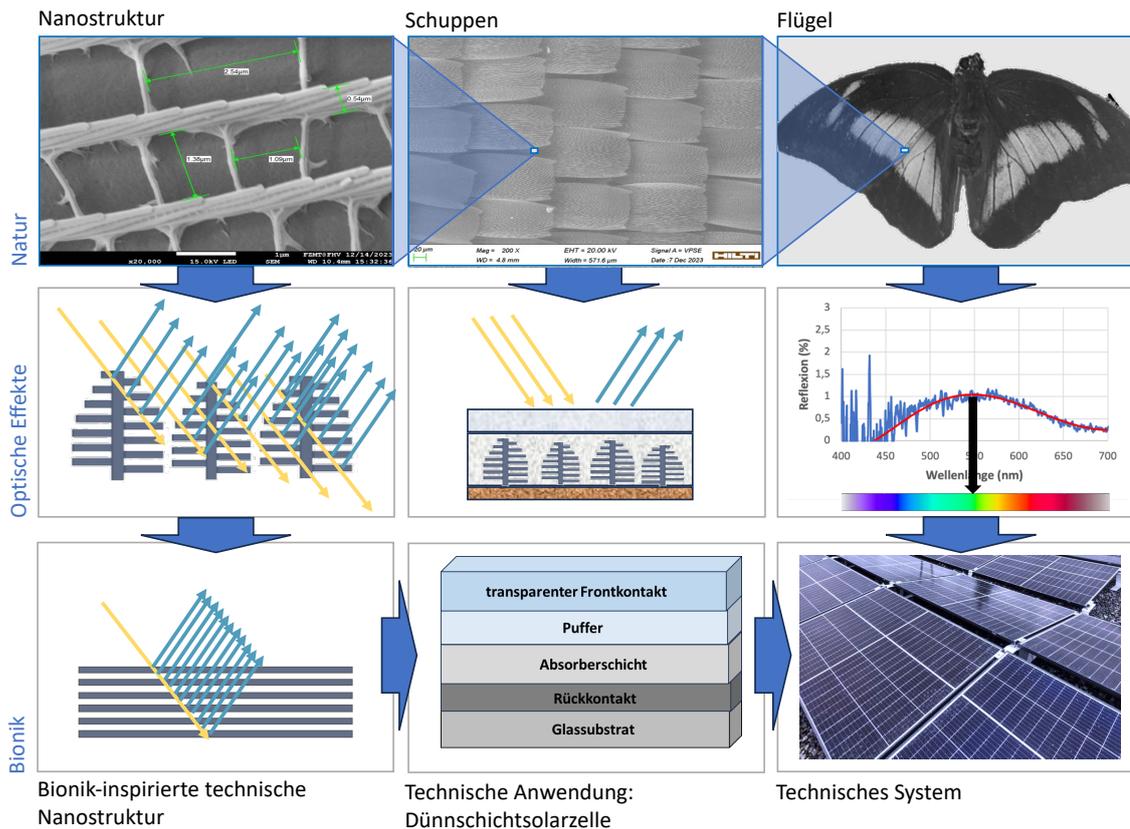


Der Schmetterling als Inspiration neuer Nanotechnologien

Ein bionischer Ansatz für eine nachhaltige Zukunft



Vorwissenschaftliche Arbeit

verfasst von **Ella Taenzer**, Klasse 8e

eingereicht am Gymnasium Schillerstraße Feldkirch/Vorarlberg

Betreuerin: Mag. Susanne König

Abstract

Innovative Lösungsansätze sind gefragter denn je, um dem Klimawandel entgegenzuwirken. Dabei steht das Sonnenlicht als Energiequelle praktisch unbegrenzt zur Verfügung. Die Natur selbst liefert Ansätze, diese Energie besser zu nutzen. So weisen Schmetterlinge an ihren Oberflächen Nanostrukturen auf, bei denen die charakteristischen Abmessungen im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegen. Diese Strukturen führen zu spezifischen Reflexions-, Absorptions- und Transmissionseigenschaften. Derartige Strukturen können in vereinfachter Form für die Herstellung von Schichten für Solarzellen genutzt werden, um so deren Wirkungsgrad durch bessere Absorption zu erhöhen. Ferner liefern sie die Möglichkeit, effiziente farbige Photovoltaik-Module, die die optische Ästhetik von Gebäudefassaden verbessern, zu entwickeln. In der vorliegenden Arbeit werden mehrere Schmetterlingsarten mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskopen und einem Spektrometer experimentell untersucht, anhand einer Literaturrecherche in den Kontext des Standes der Technik gesetzt und Ideen für fortführende Arbeiten abgeleitet. Die Vielfalt der gefundenen Nanostrukturen ist groß und liefert Impulse für die Entwicklung effizienterer Solarzellen. Die gesamtinstallierte Photovoltaikleistung in Österreich liegt im Gigawattbereich. Verbesserungen des Wirkungsgrades von Solarzellen um wenige Prozent können Leistungszuwächse im dreistelligen Megawattbereich bedeuten – ein sehr hoffnungsvoller Ansatz.

Vorwort

Als junger Mensch des 21. Jahrhunderts bin ich mit der Thematik des Klimawandels und den teils aussichtslosen Prognosen beinahe tagtäglich konfrontiert. Viele meiner Altersgenossen entscheiden sich für die Teilnahme an ‚Fridays for Future-Demonstrationen‘. Für mich ist die aktive Mitgestaltung nachhaltiger Technologien ein interessanter Ansatz, um einen Beitrag zur Eindämmung des Klimawandels zu leisten. Auf der Suche nach einem VWA-Thema bin ich auf der Seite www.youngscience.de auf die Bionik des Schmetterlings aufmerksam geworden. Innerhalb kürzester Zeit faszinierte mich die breite Palette an bionischen und nachhaltigen Anwendungen der Schmetterlinge und deren Aktualität in der Forschung. Nach dem Emailaustausch mit der Professorin Ille C. Gebeshuber von der TU Wien im Oktober 2022 zum Thema ‚Bionik der Schmetterlinge‘ habe ich beschlossen, den Fokus meiner Arbeit auf die Bionik des Schmetterlings in Bezug auf nachhaltige Technologien zu legen. Für ihren Input möchte ich mich herzlichst bei ihr bedanken.

Allen voran möchte ich einen großen Dank an meine Betreuungslehrerin Frau Mag. Susanne König aussprechen, die mich während des Verfassens meiner vorwissenschaftlichen Arbeit laufend unterstützt und mir geholfen hat, meine vielen Ideen umzusetzen. Sie stand mir stets mit Rat und Tat zur Seite und hat mich darüber hinaus im Rahmen meiner empirischen Untersuchungen zum Unternehmen Hilti in Liechtenstein und zum Technorama in Winterthur in der Schweiz begleitet.

An dieser Stelle möchte ich mich beim Technorama, insbesondere bei Gregor Schaf-frath und seinem Team, für die Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop und die Unterstützung bedanken.

Ein großes Dankeschön möchte ich ebenfalls an das Schmetterlingshaus der Insel Mainau in Konstanz richten. Dieses hat mir über 20 verschiedene, teils exotische Schmetterlinge für die empirischen Untersuchungen meiner Arbeit zur Verfügung gestellt. Ohne diese Unterstützung wäre die Durchführung meiner empirischen Untersuchungen nicht möglich gewesen.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Stephan Kasemann, der es mir ermöglicht hat Spektrometermessungen an der FH-Dornbirn durchzuführen. Er hat sein Wissen in der Nano- und Mikrotechnik mit mir geteilt und mir geholfen, die komplizierten Spektrometeruntersuchungen mit zahlreichen Schmetterlingsflügeln durchzuführen und weitere REM-Bilder aufzunehmen.

Besonderer Dank gilt auch der Firma Hilti AG in Schaan in Liechtenstein, insbesondere Herrn Fabian Geiger, mit dem wir am Rasterelektronenmikroskop der Firma Hilti einen Nachmittag lang arbeiten durften.

Zuletzt möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Hendrik Hölscher vom KIT in Karlsruhe bedanken. Er hat mir wertvolle Literatur und Forschungsberichte für die Verbesserung von Solarzellen mithilfe der Nanostrukturen von Schmetterlingen zur Verfügung gestellt.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Wörtern das generische Maskulinum verwendet. Grundsätzlich gelten Personenbezeichnungen und Begriffe im Sinne der Gleichbehandlung für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet daher keine Wertung.

Feldkirch, 07.01.2024

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	6
2. Oberflächen-Nanostrukturen von Schmetterlingen.....	8
2.1 Untersuchte Schmetterlingstypen	8
2.2 Untersuchungsmethoden.....	10
2.3 Aufbau der Oberflächen-Nanostrukturen	13
3. Messergebnisse	18
3.1 Farbige Schmetterlingsoberflächen	18
3.2 Schwarze Schmetterlingsoberflächen	21
4. Optische Effekte an der Schmetterlingsoberfläche.....	24
4.1 Überblick	24
4.2 Interferenz im Allgemeinen.....	25
4.3 Dünnschichtinterferenz.....	26
4.4 Multischichtinterferenz.....	27
4.5 Beugungsgitter	29
4.6 Photonische Kristalle	30
4.7 Entstehung von physikalischen Strukturfarben.....	31
5. Ansätze zur Verbesserung von Solarzellen mithilfe der Nanostrukturen von Schmetterlingen	38
5.1 Einführung Photovoltaik (PV)	38
5.2 Effizienzsteigerung von Dünnschichtsolarzellen mithilfe von bionischen Absorbern.....	40
5.2.1 Bionischer Ansatz.....	40

5.2.2	Nippelstruktur	41
5.2.3	Wabenstruktur	42
5.3	Entwicklung gebäudeintegrierter PV-Module mithilfe der Nanostrukturen des Morphofalters	48
6.	Mögliche Ansätze zur Nutzung der Nanostrukturen der untersuchten Schmetterlinge	53
7.	Zusammenfassung und Ausblick	58
8.	Glossar	60
9.	Literatur- und Quellenverzeichnis	62
10.	Abbildungsverzeichnis	69
11.	Tabellenverzeichnis	74

1. Einleitung

Zurzeit erleben wir einen Bevölkerungszuwachs auf der Erde, wie es ihn noch nie zuvor gegeben hat. Seit dem Ausbruch des Krieges in der Ukraine sind weite Teile der Welt von einer schwerwiegenden Energiekrise betroffen. Insbesondere in den letzten Jahren sind die Energierechnungen in die Höhe geschneilt und für viele Menschen unerschwinglich geworden. Lösungen und eine Abschwächung dieser Trends zeigen sich in naher Zukunft allerdings nicht. So wird sich der globale Stromverbrauch laut Prognosen bis zum Jahr 2050 beinahe verdoppeln (vgl. Schiffer und von Kienitz, 2020, 23). Aus diesem Grund ist es an der Zeit, Innovationen und Lösungsansätze zu finden, die diese desaströsen Veränderungen verlangsamen. Ideen für derartige Innovationen kann uns die Natur liefern. Aufgrund der Anpassungsfähigkeiten von Tieren und Pflanzen haben diese besondere Systeme und Strukturen entwickelt, von denen der Mensch lernen kann. Dieser Prozess, das Lernen von der Natur für Anwendungen in der Technik, wird als Bionik bezeichnet (vgl. Nachtigall, 2010, 144).

Ein bekanntes Beispiel für einen bionischen Ansatz liefert der Schmetterling. Dieser weist großflächige Mikro- und Nanostrukturen mit einzigartigen physikalischen Eigenschaften auf, mithilfe derer technische Systeme auf erstaunliche Art und Weise revolutioniert werden können. Bekannt sind speziell die optischen Eigenschaften hinsichtlich **Absorption**¹ und **Reflexion** von Licht sowie das Selbstreinigungsverhalten durch extreme Nichtbenetzbarkeitseigenschaften (vgl. Xu u. a., 2016, 1–3; Giraldo, 2008, 7–10).

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erfassung der Mikro- und Nanostrukturen, fokussiert sich dann aber auf die optischen Bionik-Anwendungen für nachhaltige Technologien, um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen. Das Hauptziel der vorwissenschaftlichen Arbeit ist das Schaffen von Grundlagen für die Verbesserung der Leistung von Solarzellen.

Die Nanostruktur der Solarzellenschichten hat aufgrund ihrer Absorptionseigenschaften signifikanten Einfluss auf deren Wirkungsgrad und aufgrund wellenspezifischer

¹ Im Text fett geschriebene Wörter sind im Glossar erklärt

Reflexion Einfluss auf die ästhetische Wahrnehmung durch das Design gewünschter Farben (vgl. Siddique u. a., 2017a, 7; Bläsi u. a., 2017, 1–4).

Schmetterlinge haben sehr unterschiedliche Oberflächen-Nanostrukturen. Diese führen zu spezifischen Absorptions- und Reflexionseigenschaften, da ihre charakteristische Größe im Bereich der Wellenlänge von sichtbarem Licht liegen. Der Grundgedanke ist es, solche Nanostrukturen gezielt für die Verbesserung von Solarzellen zu nutzen (vgl. Giraldo, 2008, 8–10; Siddique u. a., 2017a, 7; Han u. a., 2012, 1–4).

Zu Beginn der Arbeit wird der Aufbau der Oberflächen-Nanostrukturen von Schmetterlingen auf der Basis von selbst durchgeführten Rasterelektronenmikroskop-Messungen untersucht. Im Anschluss daran werden die für den Inhalt dieser Arbeit relevanten Grundlagen der Optik erläutert. Darauf aufbauend wird anhand einer wissenschaftlichen Literaturrecherche die Verbesserung von Solarzellen in zwei Ansätzen präsentiert. Zum einen kann aufgrund der hohen Absorptionseigenschaft bestimmter Nanostrukturen der Wirkungsgrad von Solarzellen gesteigert werden. Zum anderen werden auf der Basis des Reflexionsverhaltens von schillernden Schmetterlingen optisch ansprechendere Solarmodule entwickelt, die in Gebäudefassaden integriert werden können. Anschließend werden fortführende Ansätze zur Verbesserung von Solarzellen vorgeschlagen.

Die Arbeit stützt sich auf eigene Messungen, Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen, aktuelle Forschungsberichte und wissenschaftliche Veröffentlichungen.

2. Oberflächen-Nanostrukturen von Schmetterlingen

2.1 Untersuchte Schmetterlingstypen

Es gibt **schillernde** und nicht-schillernde Schmetterlinge mit grundlegend verschiedenen Nanostrukturen und optischen Eigenschaften. Für diese Arbeit hat das Schmetterlingshaus der Insel Mainau über 20 verstorbene Schmetterlinge verschiedener Arten zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Besuch der Autorin im Schmetterlingshaus der Insel Mainau (eigene Abbildung)

Fokus für die Untersuchungen waren schillernde bunte Schmetterlinge und nicht-schillernde schwarze Schmetterlinge, da sie ganz unterschiedliche spezifische Oberflächeneigenschaften aufweisen (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Schmetterlinge aus dem Schmetterlingshaus der Insel Mainau (eigene Abbildung)

Für schwarze Schmetterlingsflügelbereiche ist eine hohe Absorption zu erwarten, für farbige Schmetterlinge, insbesondere schillernde, Reflexion in spezifischen Wellenlängen (vgl. Giraldo, 2008, 8–10; Chen u. a., 2021, 3).

Dabei finden sich nach Giraldo (siehe Abbildung 4) typischerweise Wellenlängenbereiche

- mit niedriger Intensität, was Absorption kennzeichnet,
- mit hoher Intensität in einem engen Wellenlängenbereich, was auf spezifische Farbgebung hindeutet und
- mit mittlerer oder niedriger Intensität über einen breiteren Bereich, was auf Streuung hindeutet (vgl. Giraldo, 2008, 8–10).

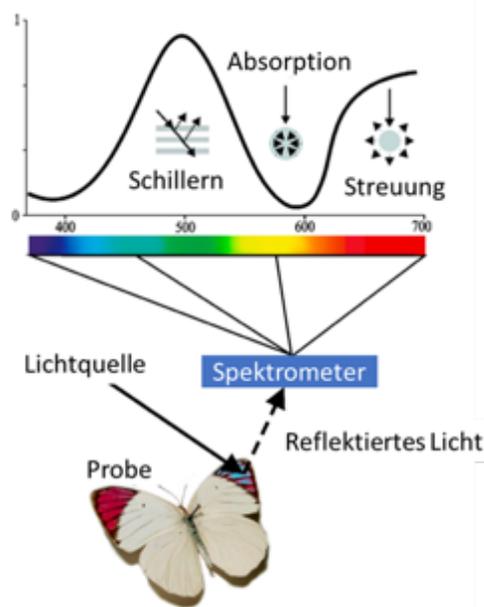


Abbildung 4: Reflexionsverhalten an der Oberfläche eines Schmetterlingsflügels mit den drei Effekten Schillern, Absorption und Streuung (Giraldo, 2008, 9)

Abbildung 5 zeigt ein Praxisbeispiel aus der Literatur für einen schillernden Morphofalter. Das Reflexionsmaximum liegt im blau-grünen Bereich und Absorption und **Streuung** zeigen sich für den restlichen Bereich des Spektrums (vgl. Ahmed u. a., 2018, 27113).

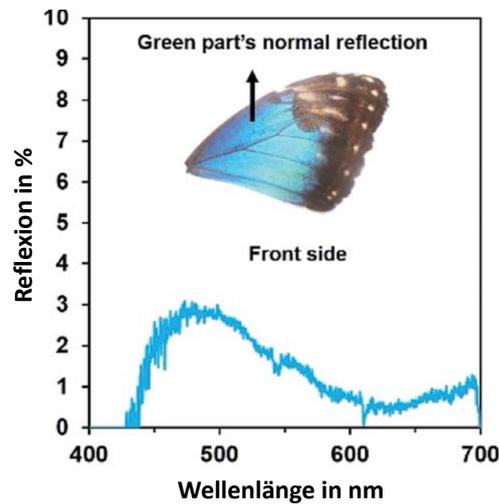


Abbildung 5: Reflexionsverhalten eines Morphofalters im farbigen Bereich (Ahmed u. a., 2018, 27113)

2.2 Untersuchungsmethoden

Um Aussagen über das unterschiedliche Reflexions- und Absorptionsverhalten von Nanostrukturen der Schmetterlingsoberflächen treffen zu können, wurde mit einem **Spektrometer** (Ocean Optics HR4000CG-UV-NIR) der FH Dornbirn die Reflexion in Abhängigkeit der Wellenlänge gemessen. Ferner wurden mithilfe von Rasterelektronenmikroskopen Aufnahmen von Nanostrukturen erstellt und die Ergebnisse anschließend miteinander verglichen und analysiert.

Für die Aufnahmen der Nanostrukturen wurden mehrere Rasterelektronenmikroskope (REM) mit unterschiedlichen Auflösungsvermögen verwendet:

- REM im Technorama Winterthur (ZEISS EVO 10), siehe Abbildung 6
- REM an der FH Dornbirn (JEOL 7100 F)
- REM bei der Firma Hilti AG in Liechtenstein (ZEISS Supra 40VP)

Das Rasterelektronenmikroskop arbeitet im Gegensatz zu einem Lichtmikroskop mit einem Elektronenstrahl und kurzen Wellenlängen. Dadurch kann es Objekte 100-50.000-fach vergrößern und es lassen sich Bereiche mit einer Größe von 1–5 *nm* auflösen (vgl. Quinn, 2022, 405f; Bauch und Rosenkranz, 2017, 7). Zur Bildentstehung trägt insbesondere der Elektronenstrahl bei. Dieser emittiert Elektronen auf die Probe und ein Elektronendetektor registriert die zurückgeworfenen Signale, indem magnetische Ablenkspulen mehrere Punkte der Probe rasterförmig abtasten. Dies führt zu einer digitalen Schwarzweißaufnahme (vgl. Quinn, 2022, 405f; Khursheed, 2011, 2).



Abbildung 6: REM des Technoramas in Winterthur (eigene Abbildung)

Bevor die Proben aus dem Schmetterlingshaus der Insel Mainau mit dem REM untersucht wurden, wurden die Schmetterlinge mittels eines Skalpellts seziiert und für Untersuchungen am REM und Spektrometer vorbereitet (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Vorbereiten der Schmetterlingsproben für das Besputtern (eigene Abbildung)

Anschließend wurden diese mit einer Goldschicht bedampft, um die Proben leitfähig zu machen und Aufladungen im REM zu minimieren. Dieser Prozess wird als Besputterung bezeichnet und ist in Abbildung 8 zu erkennen (vgl. Giraldo und Stavenga, 2016, 382).



Abbildung 8: Besputterung der Schmetterlingsproben (eigene Abbildung)

2.3 Aufbau der Oberflächen-Nanostrukturen

Das Flügelmaterial eines Schmetterlings besteht aus dem Material Chitin. Chitin ähnelt dem Material Zellulose und bildet das wesentliche Element für Zellwände oder Panzer von Insekten (vgl. Lee u. a., 2023, 1; Giraldo und Stavenga, 2016, 381).

Abbildung 9 zeigt, dass sich die Makrostruktur eines Flügels aus Schuppen, die die Mikrostruktur bilden, zusammensetzt. Die Schuppen wiederum weisen Nanostrukturen auf.

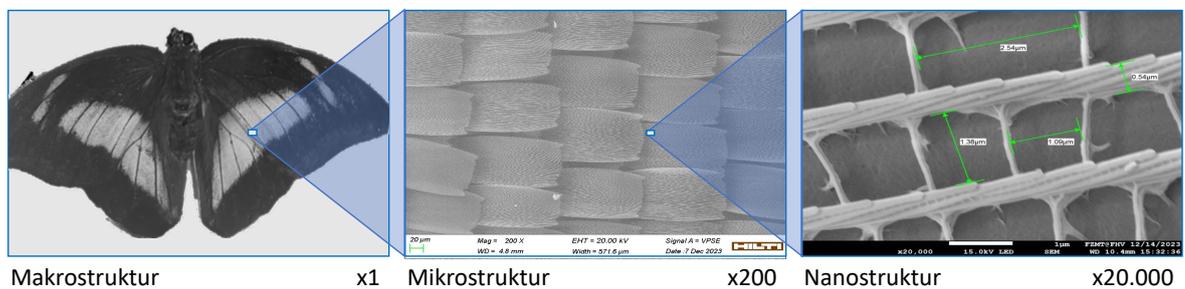


Abbildung 9: Längenskalen und zugehörige Strukturen (eigene Abbildung)

Abbildung 10 zeigt die Vorderseite eines Schmetterlingsflügels, auf welcher sich die kurzen Grundschruppen und die darüberliegenden längen Deckschruppen befinden. Im Durchschnitt sind die Schuppen der analysierten Schmetterlinge zwischen 150 und 200 µm groß. Dabei ähneln sie Haarschruppen und sind borstenartig an der Membranoberfläche befestigt (siehe Abbildung 10).

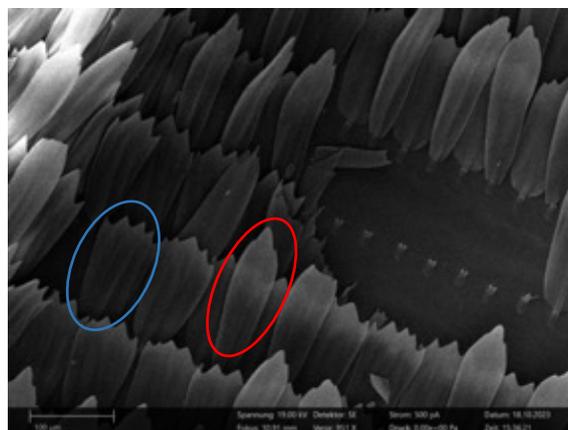


Abbildung 10: Kurze Grundschruppe blau eingefärbt und längere Deckschruppe rot eingefärbt (eigene Abbildung)

Wie in Abbildung 11 zu erkennen ist, kann die geometrische Anordnung der Schuppen mit der Anordnung von Dachziegeln verglichen werden.

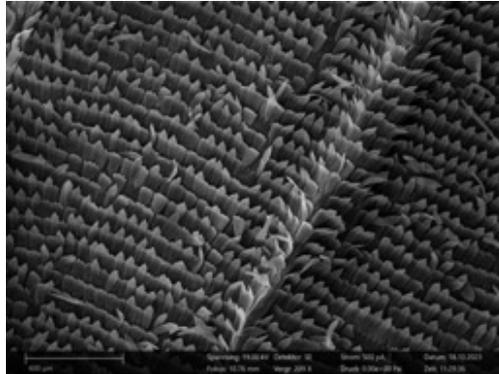


Abbildung 11: Anordnung der Schuppen auf dem Flügel (eigene Abbildung)

Es zeigen sich unterschiedlich geformte Schuppen je nach Schmetterlingstyp und Lage auf dem Flügel (siehe Abbildung 12). Auffallend ist, dass es schillernde Schmetterlinge gibt, die runde oder rechteckige Schuppen mit mehr oder weniger gleicher Größe aufweisen. Die untersuchte schwarze Flügeloberfläche zeigt, dass die Grund- und Deckschuppen unterschiedlich groß sind. Weiters stellt sich heraus, dass die Anzahl der Zacken einer Schuppe je nach Schmetterlingsart variieren kann.

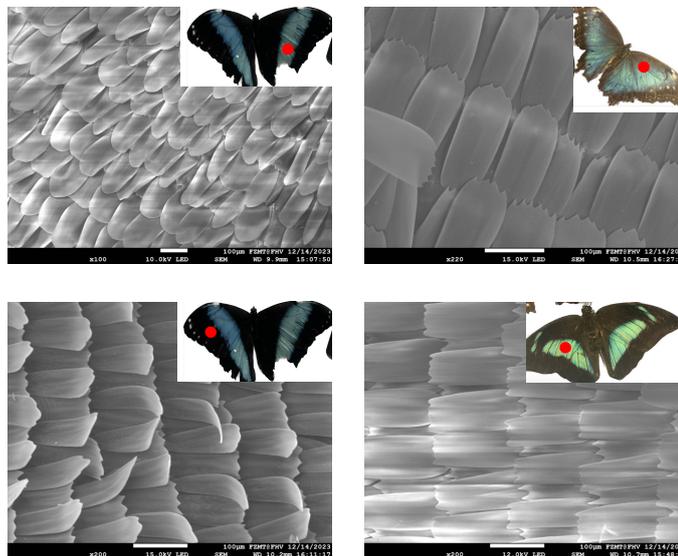


Abbildung 12: Schuppenarten von unterschiedlichen Schmetterlingen (eigene Abbildung)

Die Unterseite einer Schuppe beeinflusst maßgeblich die Lichtdurchdringung (Transmission) und die Oberseite hat Auswirkungen auf die Reflexion und Absorption eines Schmetterlings. Meist ist die Unterseite einer Schuppe strukturlos, während auf der

Oberseite Nanostrukturen, beispielsweise mit Längsrippen und Querrippen, die aus mehreren Lamellen bestehen, vorhanden sind (siehe Abbildung 13) (vgl. Chen u. a., 2021, 2; Lou u. a., 2012, 10).

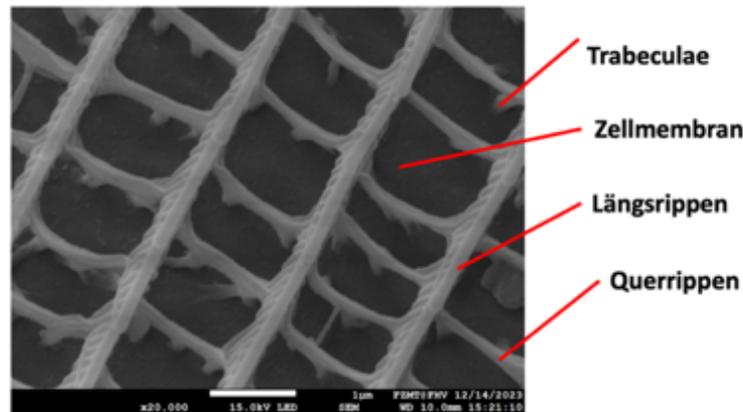


Abbildung 13: Bestandteile einer Nanostruktur (eigene Abbildung)

Die Nanostruktur der Abbildung 13 gehört zu einer der am häufigsten vorkommenden Oberflächen. Sie ist durch Längsrippen, welche entlang der Längsachse auf der Schuppenoberfläche verlaufen und jeweils durch Querrippen miteinander verbunden sind, gekennzeichnet. Die Querrippen verlaufen in das Innere des Schmetterlings. Die gesamte Schuppe ist mittels den Trabeculae über Querrippen an der Zellmembran befestigt. Dabei hängt die Ausprägung der Schuppenoberfläche und Nanostruktur von der Schmetterlingsart ab (vgl. Chen, 2021, 2; Giraldo, 2008, 5).

Abbildung 14 zeigt die Nanostrukturen von Schmetterlingen, die im Rahmen dieser Arbeit gefunden wurden: A) Längs-/Querrippen, B) ‚Waben‘, C) ‚Nippel‘, D) löchrige Membran, E) eng angeordnete ‚Tannenbäume‘, F) weitläufig angeordnete ‚Tannenbäume‘ G) Mikrohaare mit umgebenden Nanokegeln und H) rillenartige Ausstülpungen.

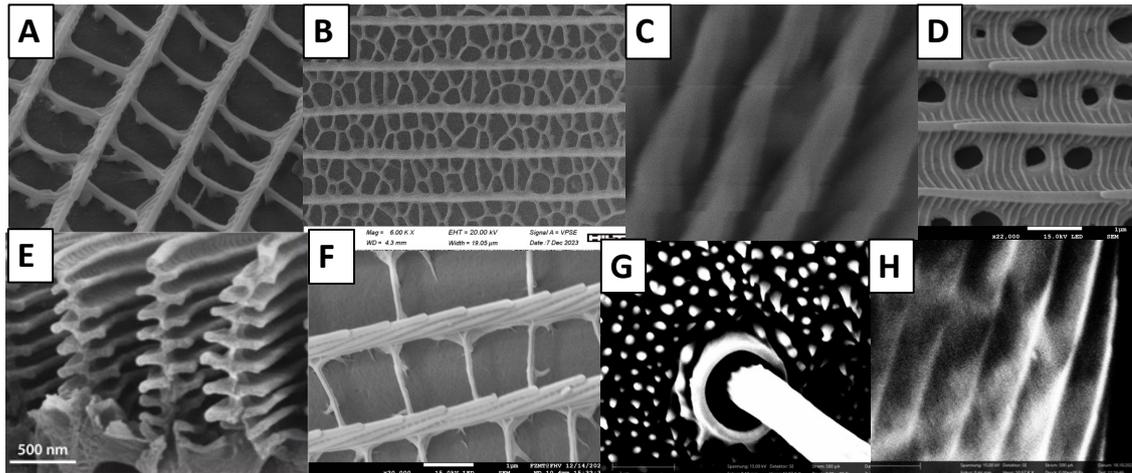


Abbildung 14: Arten der Nanostrukturen von Schmetterlingen (A, B, C, D, F, G, H: eigene Abbildungen; E: Butt u. a., 2016, 499)

Die Nanostruktur *A* weist die klassische Nanostruktur mit Längsrippen, Querrippen und Trabeculae auf, während die Nanostruktur *B* Waben ähnelt. Bei beiden handelt es sich um eine Nanolochstruktur, die primär bei schwarzen Schmetterlingsoberflächen vorzufinden ist (siehe Abbildung 15) (vgl. Chen u. a., 2021, 3; Huang u. a., 2020, 738-741).

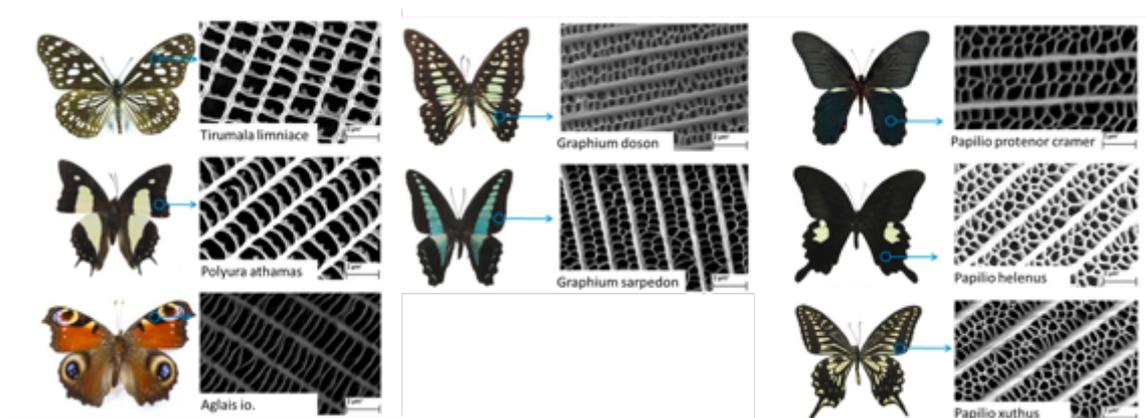


Abbildung 15: Rippen- und Wabennanostrukturen schwarzer Schmetterlingsoberflächen (Huang u. a., 2020, 739–741)

Die gesamte Struktur der Nanolöcher bildet ein 2D-Netzwerk, welches sowohl aus Chitin als auch aus dem Pigment **Melanin** besteht. Durchschnittlich ist ein Loch der Struktur weniger als ein Mikrometer groß (vgl. Siddique u. a., 2017a, 2). Die Nanostruktur *C* besteht aus zottenartigen Ausstülpungen und wird in der Literatur Nippelstruktur genannt (vgl. Lou u. a., 2012, 9202). Bei der Nanostruktur *D* handelt es sich um eine Nanostruktur mit Löchern in der Zellmembran zwischen zwei Längsrippen. Diese Struktur wurde im Rahmen der empirischen Untersuchung bei gelben Schmetterlingsoberflächen vorgefunden. Die regelmäßig angeordneten Rippen der Nanostruktur *E* bilden im Querschnitt eine Struktur, die an Tannenbäume erinnert, und findet sich vor allem in den Grundschuppen von schillernden Schmetterlingen. Ihre Längsrippen haben eine baumartige Struktur, bei der sich Chitin- und Luftschichten abwechseln (vgl. Kolle, 2011, 38). Die Nanostruktur *F* ist vor allem bei den Deckschuppen von schillernden Schmetterlingen zu finden (vgl. Chen u. a., 2021, 4). Die Nanostruktur *G* besteht aus Härchen, die von nanogroßen Kegeln umgeben sind. Bei der Nanostruktur *H* zeigen sich rillenartige Ausstülpungen.

Interessante Nanostrukturen finden sich auch im Bereich der Schmetterlingsaugen. Dort weisen die zwei Augen regelmäßig angeordnete ‚Nippel‘ auf (siehe Abbildung 16).

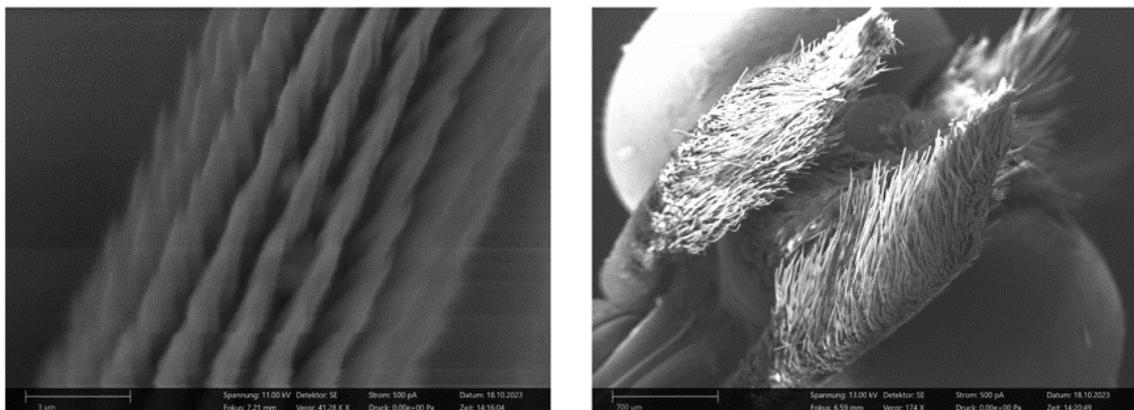


Abbildung 16: Die Augen und der Kopf eines Schmetterlings (eigene Abbildung)

3. Messergebnisse

3.1 Farbige Schmetterlingsoberflächen

In den farbigen Bereichen der schillernden Schmetterlinge finden sich primär die drei Nanostrukturen 1) Tannenbaum, 2) Löchrige Membran und 3) Rillenartige Ausstülpungen (Tabellen 1 bis 5). Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass Grund- und Deckschuppen unterschiedliche Nanostrukturen aufweisen können.

Tabelle 1: Eigene REM-Aufnahmen *Papilio palinurus*

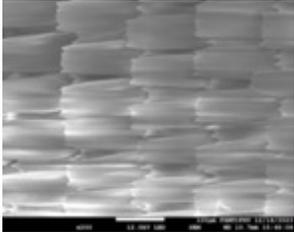
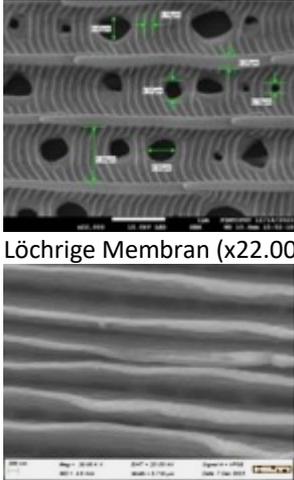
Schmetterling	Schuppen	Nanostruktur
 Grüner Flügelbereich	 (x200)	 Löchrige Membran (x22.000) Tannenbaumstruktur (x20.000)

Tabelle 2: Eigene REM-Aufnahmen *Pachliopta kotzebuea*

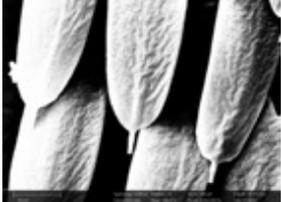
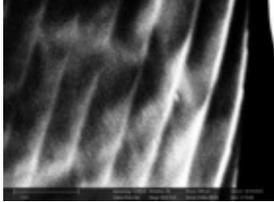
Schmetterling	Schuppen	Nanostruktur
 Roter Flügelbereich	 (x3.660)	 Rillenartige Ausstülpungen (x50.700)

Tabelle 3: Eigene REM-Aufnahmen *Morpho achiles*

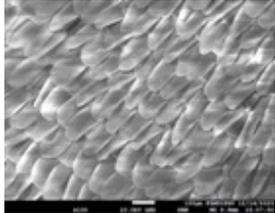
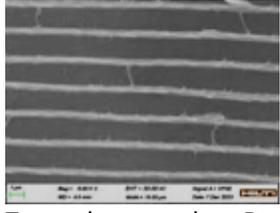
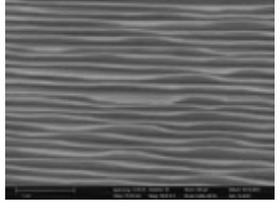
Schmetterling	Schuppen	Nanostruktur
 <p>Blauer Flügelbereich</p>	 <p>(x100)</p>	 <p>Tannenbaumstruktur Deck- schuppe (x6.000)</p>  <p>Tannenbaumstruktur Grund- schuppe (x28.000)</p>

Tabelle 4: Eigene REM-Aufnahmen *Morpho peleides*

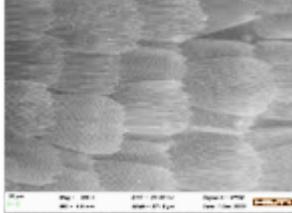
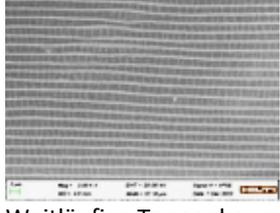
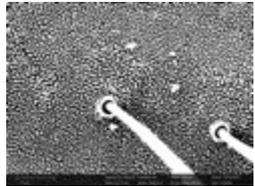
Schmetterling	Schuppen	Nanostruktur
 <p>Blauer Flügelbereich</p>	 <p>(x200)</p>	 <p>Weitläufige Tannenbaum- struktur (x2.000)</p>  <p>Detail (x40.000)</p>

Tabelle 5: Eigene REM-Aufnahmen *Graphium agamemnon*

Schmetterling	Schuppen	Nanostruktur
 Gelber Bereich	Keine Aufnahme	 Härchen mit Nanokegeln (x10.000)  (x42.000)

Die Reflexionsanalyse bestätigt das wellenlängenspezifische Verhalten und die entsprechend wahrgenommenen Farben der Schmetterlinge (Abbildung 17). Die Reflexionsgrade von 1–3% liegen deutlich über dem Reflexionsgrad von schwarzen Schmetterlingen und ermöglichen schillernde Farben.

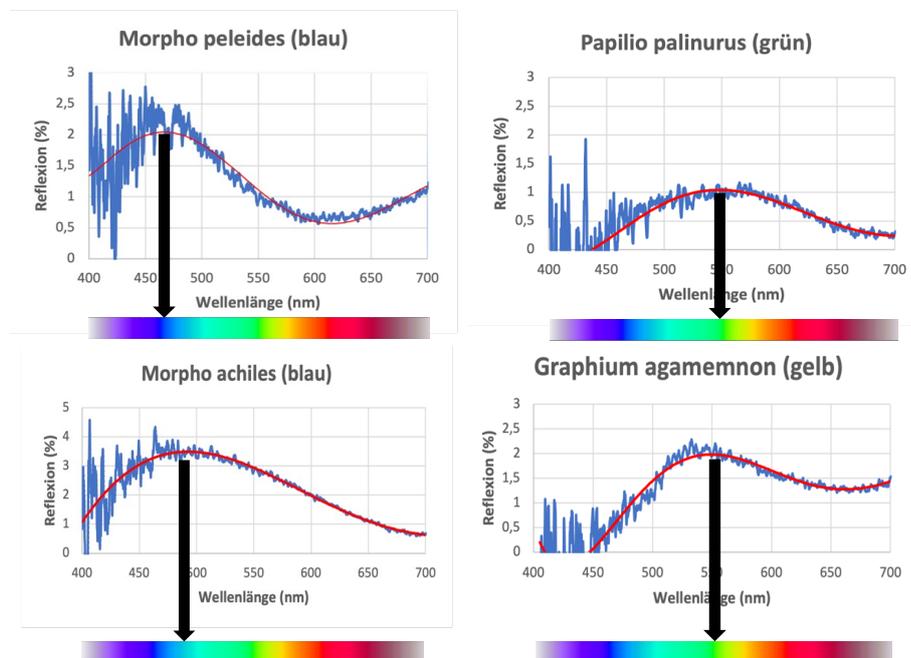


Abbildung 17: Reflexion farbiger Oberflächen in Abhängigkeit der Wellenlänge, blau: Rohdaten, rot: Trendkurve mit Polynomfunktion 5. Grades (eigene Messungen)

3.2 Schwarze Schmetterlingsoberflächen

Für schwarze Schmetterlingsoberflächen finden sich primär Waben- und Rippennanostrukturen (Tabellen 6 bis 10).

Tabelle 6: Eigene REM-Aufnahmen *Papilio palinurus*

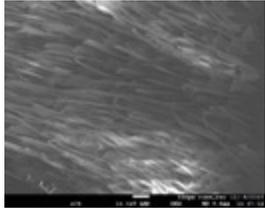
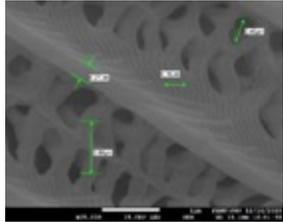
Schmetterling	Schuppen	Nanostruktur
 <p>Schwarzer Flügelbereich</p>	 <p>Mit Härchen durchwachsene Schuppen (x75)</p>	 <p>Wabenstruktur (x25.000)</p>

Tabelle 7: Eigene REM-Aufnahmen *Pachliopta kotzebuea*

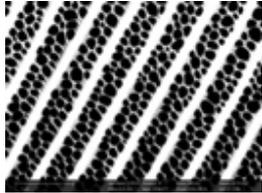
Schmetterling	Schuppen	Nanostruktur
 <p>Schwarzer Flügelbereich</p>	Keine Aufnahme	 <p>Wabenstruktur (x48.700)</p>

Tabelle 8: Eigene REM-Aufnahmen *Papilio memnon*

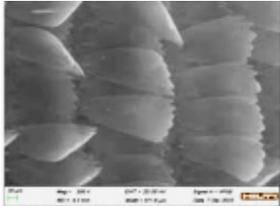
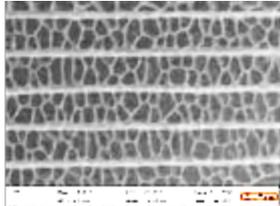
Schmetterling	Schuppen	Nanostruktur
 <p>Schwarzer Flügelbereich</p>	 <p>(x200)</p>	 <p>Wabenstruktur (x6.000)</p>

Tabelle 9: Eigene REM-Aufnahmen *Morpho achiles*

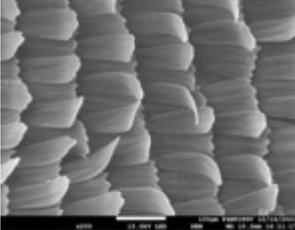
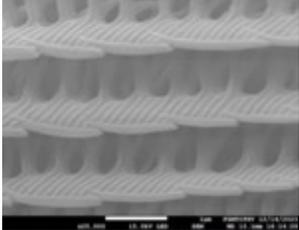
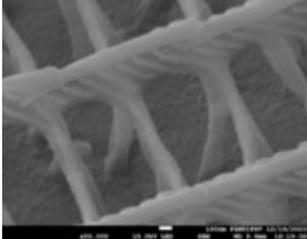
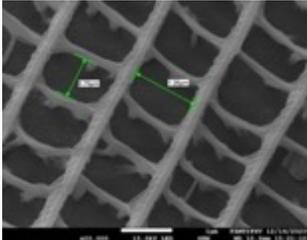
Schmetterling	Schuppen	Nanostruktur
 <p>Schwarzer Flügelbereich</p>	 <p>(x200)</p>	 <p>Längs- und Querrippen (x25.000)</p>  <p>Längs- und Querrippen (x50.000)</p>  <p>Längs und Querrippen (x20.000)</p>

Tabelle 10: Eigene REM-Aufnahmen *Graphium agamemnon*

Schmetterling	Schuppen	Nanostruktur
 <p>Schwarzer Flügelbereich</p>	<p>Keine Aufnahme</p>	 <p>Längs- und Querrippen (x50.000)</p>

Die Reflexionsanalyse bestätigt das hohe Maß an Absorption für schwarze Bereiche der untersuchten Schmetterlinge und zeigt keine wellenlängenspezifischen Charakteristika. Sie weisen Reflexionen von deutlich unter 1% auf (siehe Abbildung 18).

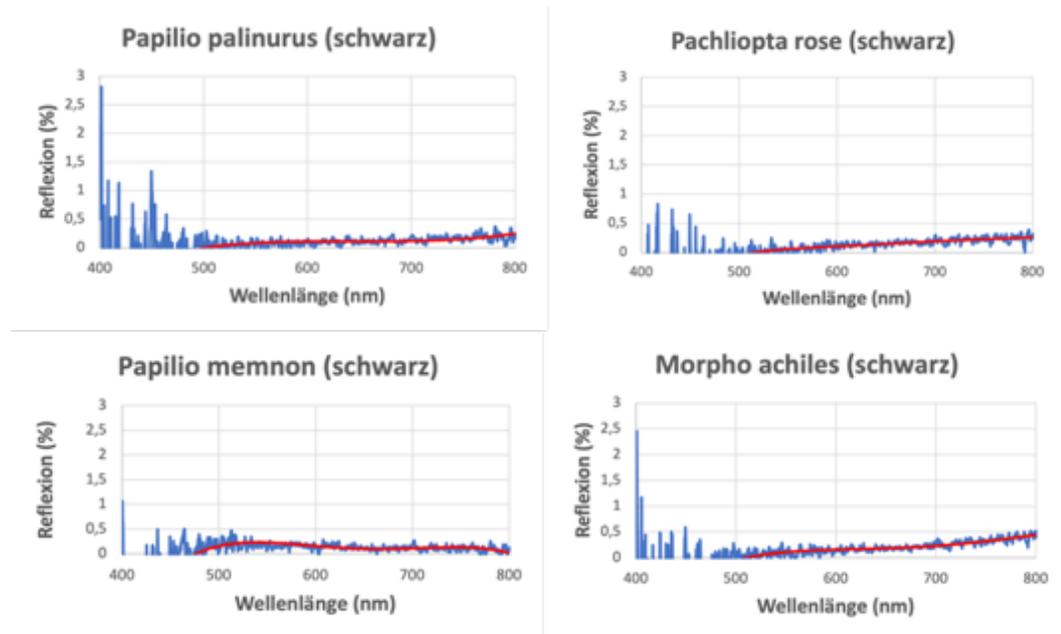


Abbildung 18: Reflexion schwarzer Oberflächen in Abhängigkeit der Wellenlänge, blau: Rohdaten, rot: Trendkurve mit Polynomfunktion 4. Grades (eigene Messungen)

4. Optische Effekte an der Schmetterlingsoberfläche

4.1 Überblick

Abbildung 19 zeigt, was passiert, wenn Licht auf die Schmetterlingsoberfläche trifft. Beim Erstkontakt des Lichtes treten an den Oberflächen die klassischen Effekte von Reflexion, **Brechung** und **Beugung** sowie Streuung auf. In der Nanostruktur kommt es dann zu weiteren Reflexionen, Beugungen, Brechungen und Interferenzen. Die Kombination der Nano- und Mikroeffekte führt zum makroskopischen Gesamtbild mit Farbe, Farbeffekten und Absorption sowie Reflexion (vgl. Chen u. a., 2021, 3; Lou u. a., 2012, 9199f; Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 2).

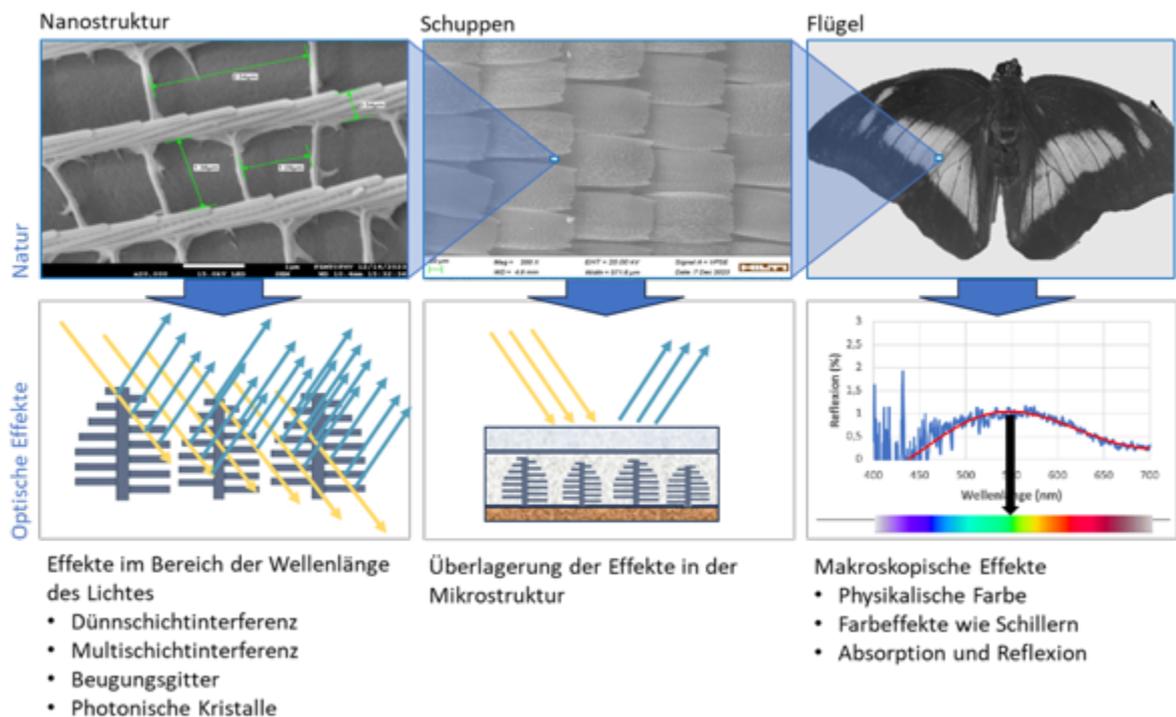


Abbildung 19: Optische Effekte an den Strukturen von Schmetterlingen (eigene Abbildung)

4.2 Interferenz im Allgemeinen

Unter Interferenz ist die Überlagerung zweier oder mehrerer Lichtwellen in einem Raum zu verstehen. Dabei können diese gleiche oder unterschiedliche **Frequenzen** und **Amplituden** aufweisen (vgl. Gmelch und Reineke, 2019, 157f; Roth und Stahl, 2019, 240).

Die Voraussetzung für das Auftreten von Interferenz ist ein Gangunterschied zwischen zwei disparaten Lichtstrahlen. Dieser beschreibt die unterschiedliche Phase zweier Wellen und wie diese zueinander versetzt sind (siehe Abbildung 20). Beim Auftreten einer solchen Phasendifferenz kann zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz differenziert werden (vgl. Roth und Stahl, 2019, 267f; Gute, 2021, 10f).

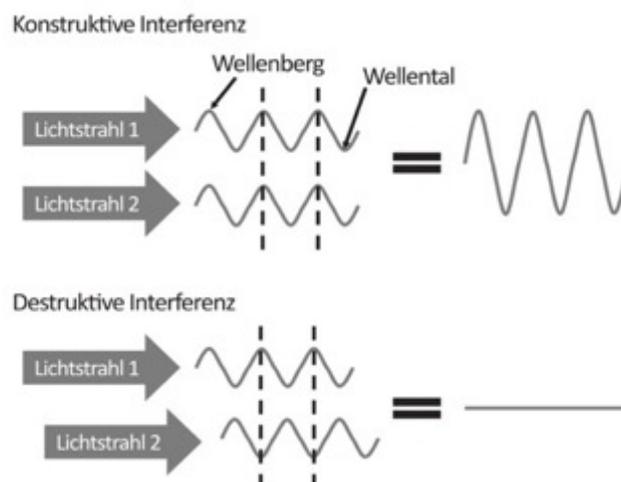


Abbildung 20: Konstruktive und destruktive Interferenz (Steglich und Heise, 2019, 41)

Die konstruktive Interferenz tritt bei einem Gangunterschied von ganzzahligen Vielfachen einer Wellenlänge auf, wohingegen destruktive Interferenz bei halbzahligen Vielfachen der ursprünglichen Wellenlängen auftritt. Dabei schwächt die destruktive Interferenz die Amplitude ab oder löscht sie aus, während die konstruktive Interferenz die Amplitude verstärkt (siehe Abbildung 20) (vgl. Roth und Stahl, 2019, 242).

und die Intensitäten der Strahlen nehmen durch Reflexion und Brechung mit der Zeit ab. Wenn die Lichtstrahlen A_1 , A_2 , A_3 , oder A_4 mit dem ursprünglichen Lichtstrahl einer Lichtquelle miteinander wechselwirken, kommt es zur Entstehung von Interferenzen (vgl. Roth und Stahl, 2019, 281). Beim Auftreffen des Lichtstrahls auf das Medium ändert der reflektierte Strahl an der Oberfläche meistens seine Phase um 180° und es kommt zu einem Phasensprung. Das heißt, dass sich die Phase der Welle innerhalb einer Schwingungsperiode verschiebt und sich beispielsweise Minima und Maxima der Welle vertauschen. Aufgrund dessen kommt es zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz. Spezifische Wellenlängen und Farben werden verstärkt, während andere Wellenlängen destruktiv interferieren und die Farben abgeschwächt werden. Dies führt zu Farbgebung eines Objektes (vgl. Gmelch und Reineke, 2019, 160; Tipler und Mosca, 2015, 1087f).

4.4 Multischichtinterferenz

Die Multischichtinterferenz tritt bei der Nanostruktur von schillernden Schmetterlingen auf und wird anhand dieser erklärt (siehe Abbildung 22) (vgl. Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 18).

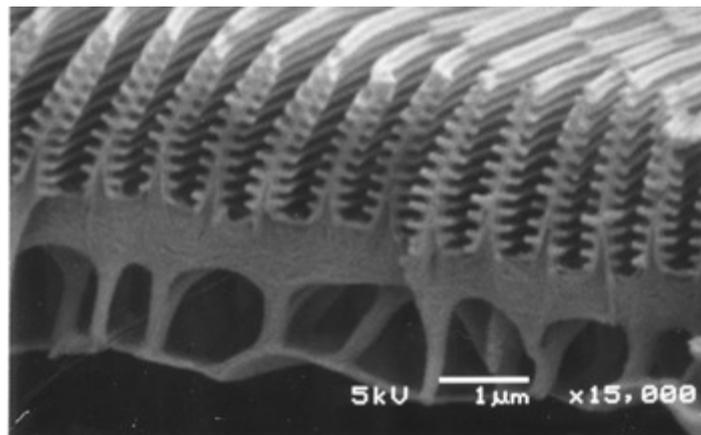


Abbildung 22: Tannenbaumstruktur eines schillernden Schmetterlings (Quelle: <https://www.nisenet.org/catalog/scientific-image-blue-morpho-butterfly-wing-microribs>; Zugriff: 04.01.2024)

Bei genauerer Betrachtung weist die Multischichtinterferenz Ähnlichkeiten mit der Dünnschichtinterferenz auf. Der fundamentale Unterschied besteht darin, dass Beugung an allen Grenzschichten auftritt und hierdurch Interferenzeffekte hervorgerufen werden. Darüber hinaus charakterisiert die Tannenbaumstruktur ein Multischichtsystem aus periodisch angeordneten, alternierenden dünnen Schichten mit den Dicken A und B (siehe Abbildung 23) (vgl. Gute, 2021, 12).

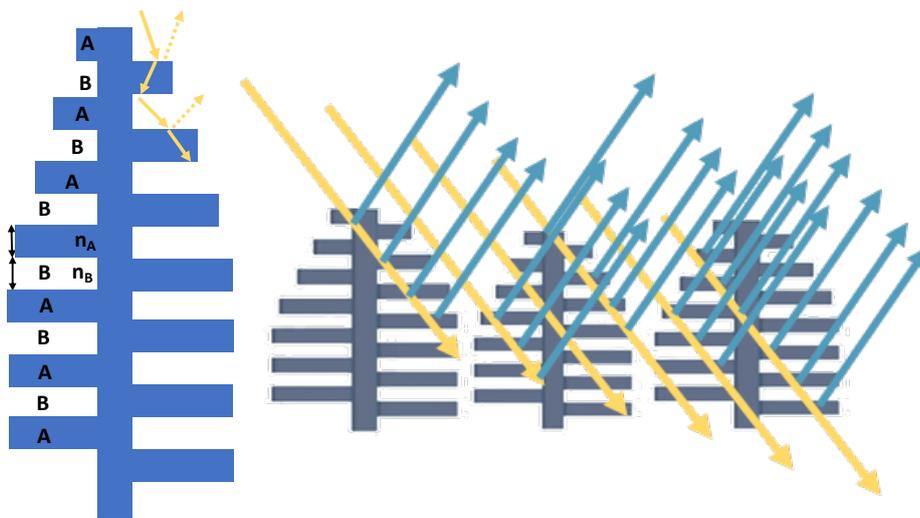


Abbildung 23: Modell für die Multischichtinterferenz an der Nanostruktur eines schillernden Schmetterlings (eigene Abbildung)

Dabei weist die Schicht A den Brechungsindex n_A und die Schicht B den Brechungsindex n_B auf (vgl. Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 5). Aufgrund der sich abwechselnden Schichtanordnung erfolgt eine Brechung oder Reflexion der Lichtstrahlen an den Grenzschichten. Dies führt zu konstruktiver Interferenz von blauen Wellenlängen, die synchron reflektiert werden. Die restlichen Wellenlängen, die nicht blau sind, interferieren nach der Reflexion in der Nanostruktur destruktiv und werden ausgelöscht (vgl. Gute, 2021, 12; Kinoshita u. a., 2002, 103-121).

4.5 Beugungsgitter

Als Beugungsgitter werden periodische Strukturen mit Abständen in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts bezeichnet. Die Längsrippen der Nanostrukturen bilden wegen des Längsrippenabstands ein Beugungsgitter. Lichtwellen, die auf die Hindernisse dieses Gitters stoßen, erfahren eine Richtungsänderung und werden gebeugt (vgl. Ingram und Parker, 2008, 2467). Im Folgenden wird das Beugungsgitter anhand eines schillernden Schmetterlings (A) und eines nicht schillernden Schmetterlings (B) erläutert (siehe Abbildung 24).

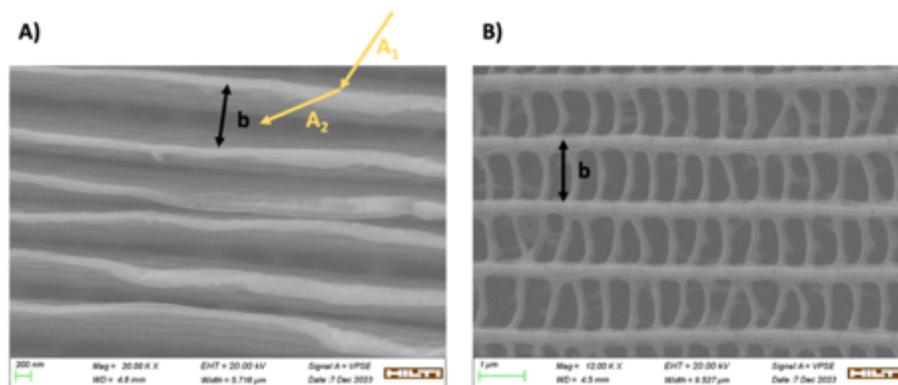


Abbildung 24: Als Beugungsgitter wirkende Nanostrukturen eines schillernden Schmetterlings (A) und eines nicht-schillernden Schmetterlings (B) (eigene Abbildungen)

Wie in Abbildung 24 ersichtlich ist, besteht das Beugungsgitter des Schmetterlings aus parallel angeordneten Längsrippen, an denen Öffnungen oder reflektierende Oberflächen vorliegen. Wenn Licht auf das Gitter trifft, wird das einfallende Licht spektral zerlegt. Die Gitterkonstante b , welche in Mikrometern oder Nanometern gemessen wird, bezeichnet den Abstand im Beugungsgitter und bestimmt, wie das Licht gebeugt wird. Je kleiner die Gitterkonstante, desto größer der Winkel, unter dem das Licht gebeugt wird. Aufgrund der unterschiedlichen Einfallswinkel und Beugungen des Lichts kann die Intensität der Farben variieren (vgl. Tipler und Mosca, 2015, 1093f; „Optisches Gitter: Gitterkonstante, Formeln & Aufgaben“ o. J.; Gmelch und Reineke, 2019, 177f).

Die Ausprägung der Querrippen und der Längsrippen eines Schmetterlings können die Eigenschaften eines Beugungsgitters grundlegend verändern (vgl. Ingram und Parker, 2008, 2467f). Bei genauer Betrachtung der Abbildung 24 bilden beispielsweise die

parallelen Längsrippen des Schmetterlings *A* das Beugungsgitter eines schillernden Schmetterlings mit einer Gitterkonstante b im Nanometerbereich. Im Gegensatz dazu weist die Struktur *B* des nicht-schillernden Schmetterlings eine Gitterkonstante im Mikrometerbereich auf.

4.6 Photonische Kristalle

Photonische Kristalle sind Strukturen aus periodischen Schichten mit sich änderndem oder alternierendem Brechungsindex. Dabei beeinflussen die Strukturen die Bewegung und Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen beispielsweise durch Interferenzen (vgl. Peters, 2009, 4; Lou u. a., 2012, 9205). Des Weiteren sind photonische Kristalle natürliche oder künstliche Strukturen und tragen zur Ausprägung des Musters innerhalb der Gitterstruktur bei. Es kann zwischen eindimensionalen (1D), zweidimensionalen (2D) und dreidimensionalen (3D) photonischen Kristallen differenziert werden (vgl. Zobl, 2018, 16; Sukhoivanov und Guryev, 2009, 1-3). Ein Modell für die unterschiedlichen photonischen Kristalle liefert Abbildung 25. Die diversen Grüntöne der Abbildung symbolisieren Materialien mit unterschiedlichen **dielektrischen** Konstanten (vgl. Lou u. a., 2012, 9205).

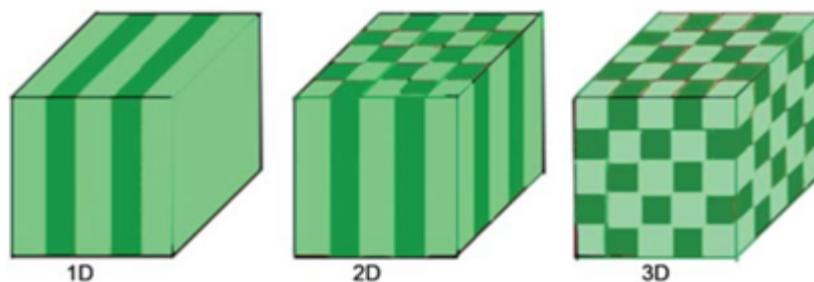


Abbildung 25: 1D, 2D und 3D photonische Kristalle (Lou u. a., 2012, 9204)

Der Name ‚Kristall‘ findet wegen analogen Beugungs- und Reflexionseffekten von Röntgenstrahlung in Kristallen Anwendung. Einerseits stellt die Tannenbaumstruktur der schillernden Schmetterlinge einen 2D-photonischen Kristall dar. Andererseits kann die Nanostruktur *A* (siehe Abbildung 14), sofern sie in großem Ausmaß dichte Querrippen aufweist, Licht als 2D-photonischen Kristall propagieren (vgl. Chen u. a., 2021, 3; Sukhoivanov und Guryev, 2009, 1-3).

Photonische Kristalle weisen eine sogenannte photonische Bandstruktur auf, die durch das Vorhandensein von photonischen Bandlücken charakterisiert ist. Diese sind für spezifische elektromagnetische Wellenlängen undurchdringbar (vgl. Peters, 2009, 11f).

4.7 Entstehung von physikalischen Strukturfarben

Die Tannenbaumnanostruktur ist insbesondere bei blau schillernden Schmetterlingen vorhanden und weist Reflexionseigenschaften für spezifische Wellenlängen auf. Das heißt, dass aufgrund der Struktur der ‚Tannenbäume‘ nur spezifische Wellenlängen des einfallenden Lichts von der Struktur absorbiert und blaue Wellenlängen reflektiert werden (vgl. Butt u. a., 2016, 497). Abbildung 26 illustriert dieses Grundprinzip.

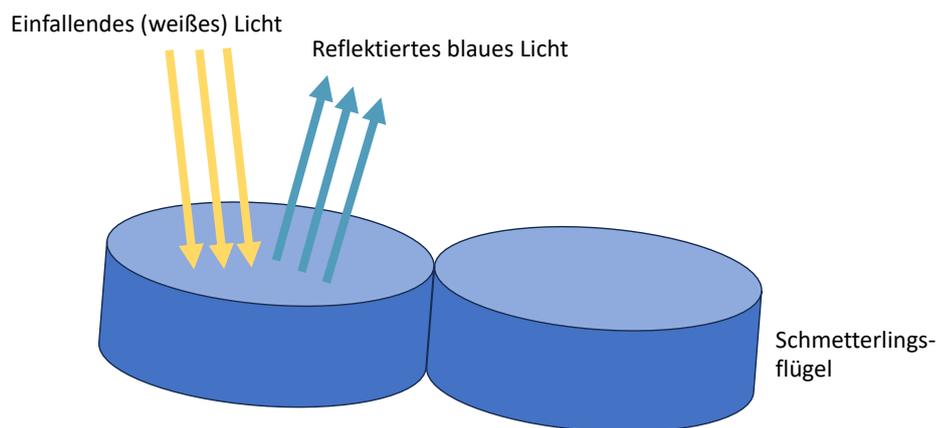


Abbildung 26: Modell für Reflexion über kurze Bandbreite an einem Schmetterlingsflügel (eigene Abbildung)

Der Wechsel zwischen Schichten mit hohem und niedrigem Brechungsindex sorgt für die schillernde Farbgebung des Objekts. Bis zu 80% der einfallenden Wellen von blauem Licht werden reflektiert (vgl. Sun, Bhushan, und Tong, 2013, 14863-14872; S Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 12f). Diese spezifischen Reflexionseigenschaften machen die Nanostruktur von schillernden Schmetterlingen zu einem spannenden Objekt für die Entwicklung von Technologien hinsichtlich des Designs für spezifische Farbgebung (vgl. Sun, Bhushan und Tong, 2013, 14877f).

Zudem existieren mehrere Nanostrukturen mit Antireflexionseigenschaften (siehe Abbildung 27). Dazu gehören die Wabenstruktur oder die Nippelstruktur. In diesen Nanostrukturen wird ein Maximum der Lichtstrahlen ‚gefangen‘ und es ergibt sich hohe Absorption. Ermöglicht wird dies durch den ‚Light Trapping‘-Effekt. Darunter ist zu verstehen, dass Lichtwellen aufgrund der Nanostrukturen einen längeren optischen Weg zurücklegen und das Lichtstrahlen die Struktur nicht mehr verlassen können (vgl. Lou u. a., 2012; Han u. a., 2012, 1–4).

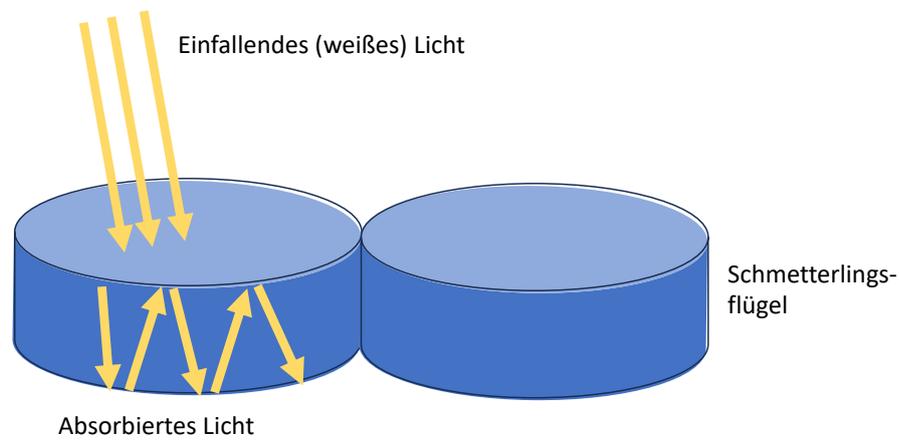


Abbildung 27: Absorptionseffekte an einem Schmetterlingsflügel (eigene Abbildung)

Grundsätzlich entstehen Farben in der Natur durch Pigmentierung oder durch Strukturfarben. Pigmentierung ist eine chemische Farbgebung, bei der bestimmte chemische Komponenten von anderen chemischen Bestandteilen absorbiert und reflektiert werden (vgl. Han, 2022, 187). Die Strukturfarben der Schmetterlinge hingegen sind Farben, die aufgrund physikalischer Effekte, wie Dünnschichtinterferenz, Multischichtinterferenz, Beugungsgitter, Streuung und photonischen Kristalle, entstehen (vgl. Zobl, 2018, 9f).

Ein Beispiel für die Entstehung von Strukturfarben ist der Morphofalter mit seinen schillernden Blautönen (siehe Abbildung 28). Die Flügeloberseite von Morphofaltern schillert blau, während die Flügelrückseite dunkelbraun gefärbt ist (vgl. Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 9).



Abbildung 28: Morphofalter (eigene Aufnahme: entstanden im Schmetterlingshaus der Insel Mainau)

Strukturfarben sind winkelabhängig und ändern in Flüssigkeiten mit höheren Brechungsindizes kurzzeitig ihre Farbe (vgl. Kolle, 2011, 32). Dieser Zusammenhang wird anhand der Schmetterlinge, die in Abbildung 29 zu sehen sind, überprüft. Es wird angenommen, dass die Farbgebung des weiß-schwarzen Schmetterlings chemisch entsteht und die Farbgebung des blauen Schmetterlings aus Strukturfarben resultiert. Um dies zu überprüfen werden der linke Flügel des blauen Morphofalters, der rechts in Abbildung 29 ersichtlich ist, und der schwarz-weiße nicht-schillernde Schmetterling, welcher sich links befindet, mit Ethanol besprüht.



Abbildung 29: Schwarz-weißer Schmetterling und Morphofalter (eigene Abbildung)

Abbildung 30 zeigt deutlich, dass sich die schillernde blaue Farbe des besprühten linken Flügels braun färbt. Allerdings nimmt der Flügel nach kurzer Zeit wieder die ursprüngliche Farbe an. Der erneute Farbwechsel entsteht, da Ethanol binnen kurzer Zeit verdunstet. Ethanol weist einen höheren Brechungsindex als das Chitingerüst des Morphofalters auf und beschleunigt dadurch den Farbwechsel (vgl. Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 10; Shuichi Kinoshita und Yoshioka, 2005, 1448). Im Gegensatz zum blauen Schmetterling ist beim linken Schmetterling keine Farbänderung aufgetreten. Dies unterstreicht die Tatsache, dass seine Flügelfärbung nicht aus Strukturfarben resultiert.



Abbildung 30: Schwarz-weißer Schmetterling mit Ethanol besprüht und Morphofalter nur auf linkem Flügel mit Ethanol besprüht (eigene Abbildung)

Einerseits bilden beim Morphofalter Längsrippen ein Multischichtsystem. Andererseits entsteht aufgrund der Lamellen, welche sich zwischen den Längsrippen befinden, Dünnschichtinterferenz. Das Auftreten der blauen Strukturfarbe resultiert aus dem Zusammenspiel der Grund- und Deckschuppen (vgl. Shuichi Kinoshita und Yoshioka, 2005, 1448-1450).

Allerdings sind die Grundsuppen (siehe Abbildung 31) primär für das Entstehen von Strukturfarben verantwortlich (vgl. Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 15–17). Diese bestehen aus Längsrippen mit Abständen von ca. 800 nm , die parallel zu den Schuppen verlaufen. Die Abstände zwischen den Längsrippen bilden ein Beugungsgitter und beugen einfallende Lichtwellen. Dort kommt es zu Interferenzerscheinungen, was zur Entstehung des Blautons beiträgt (vgl. Kolle, 2011, 38; Butt u. a., 2016, 1).

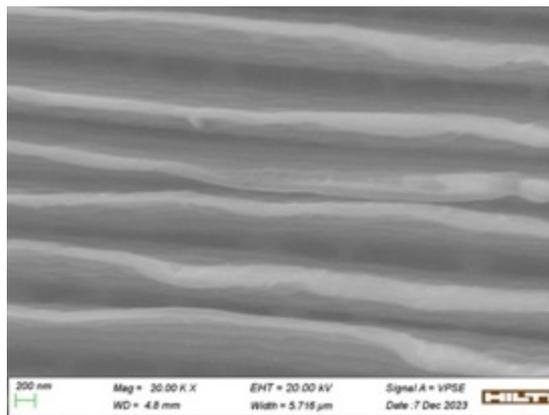


Abbildung 31: Nanostruktur der Grundsuppe (eigene Abbildung)

Die Decksuppen des Morphofalters (Abbildung 32) sind üblicherweise transparent, regulieren den Glanz des Schmetterlings und streuen Lichtstrahlen. Sie sind an einer $190\text{--}230\text{ nm}$ dünnen Schicht befestigt und verlaufen quer zur Schuppenebene. Diese Anordnung beeinflusst den Reflexionsgrad eines Schmetterlingsflügels (vgl. Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 13-17).

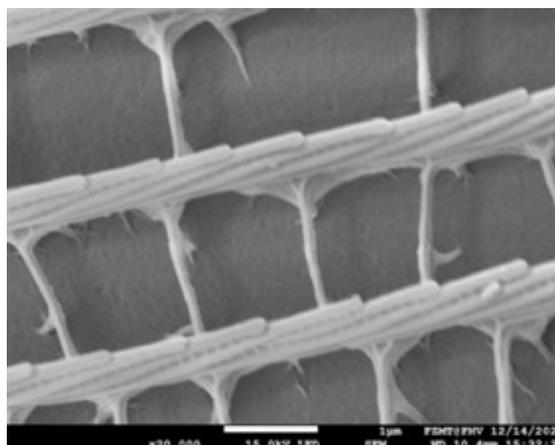


Abbildung 32: Nanostruktur der Decksuppe (eigene Abbildung)

Der Querschnitt einer Längsrippe, die schräg zur Schuppenebene in einem Neigungswinkel von 7–10° liegt, weist die Struktur eines ‚Tannenbaums‘ auf. Abbildung 33 zeigt, dass Deckschuppen im Gegensatz zu Grundschruppen weniger ‚Tannenbäume‘ aufweisen (Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 13).

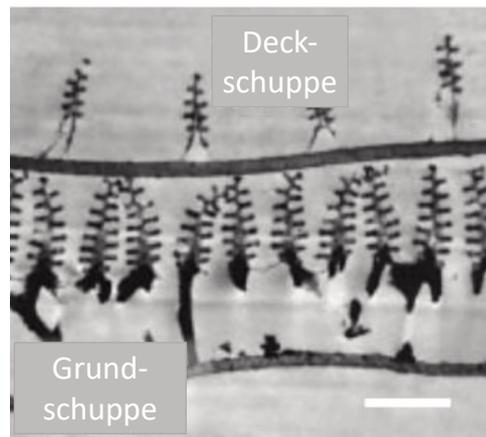


Abbildung 33: Ausprägung der Tannenbaumstruktur bei Deckschruppen und Grundschruppen (Chen u. a., 2021, 4)

Ein einzelner ‚Tannenbaum‘ der Grundschruppen ist ca. $2\ \mu\text{m}$ hoch und $0.3\ \mu\text{m}$ breit. Die dünnen Schichten der ‚Tannenbäume‘ erzeugen je nach Einfallswinkel des Lichtes Reflexionen in unterschiedliche Richtungen. Der Abstand zwischen zwei ‚Tannenbäumen‘ beträgt $0.2\ \mu\text{m}$. Dieser geringe Abstand steigert das Reflexionsverhalten des Schmetterlingsflügels (vgl. Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 15–18; Shūichi Kinoshita, 2008, 66).

Da bei der Tannenbaumstruktur ein System mit sich abwechselnden unterschiedlichen dielektrischen Materialien vorliegt, handelt es sich um eine 1D-photonische Kristallstruktur. Angesichts der Tatsache, dass die dielektrischen Eigenschaften von Chitin und Luft bereits festgelegt sind, bestimmt die Dicke der Schichten, welche Wellenlängen konstruktiv oder destruktiv interferieren. Dies trägt zur blauen Farbgebung bei (vgl. Lou u. a., 2012, 9206).

Ferner gehören die Interferenzen, die in dem Multischichtsystem der Tannenbaumstruktur entstehen, zu den ausschlaggebendsten Faktoren für die Entstehung von Strukturfarben. Wenn das Licht aus einem anderen Winkel auf die Struktur fällt, kommt es zu einer leichten Farbänderung (vgl. Shuichi Kinoshita und Yoshioka, 2005, 1448; Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 18).

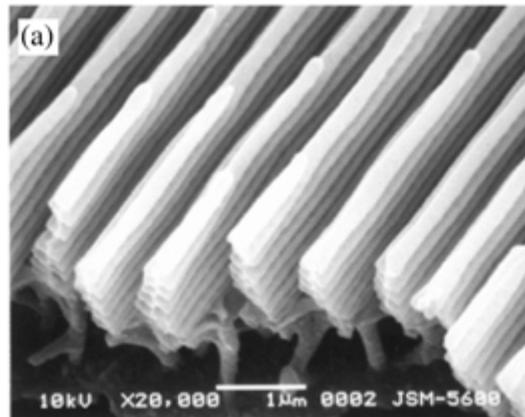


Abbildung 34: Zufällige Höhenverteilung der Rippen (Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 13)

Wie in Abbildung 34 ansatzweise zu erkennen sind, weisen die schmalen Längsrippen unterschiedliche Höhen auf und sind unregelmäßig verteilt. Da sich das in diesen Bereichen gebeugte Licht mit Interferenzen der Multischichten überlagert, entstehen keine Interferenzen zwischen benachbarten Rippen und es kommt zu einer Streuung des Lichtes in einem breiten Winkelbereich (vgl. Butt u. a., 2016, 498).

Zur blauen Farbe trägt zu geringem Teil auch der chemische Bestandteil Melanin bei. Dieser absorbiert spezifische Wellenlängen, verhindert Streuung von Licht an der Unterseite des Flügels und verstärkt dadurch die Reflexion von blauem Licht (vgl. Shūichi Kinoshita, 2008, 69). Das komplexe Zusammenspiel der angeführten optischen Effekte in der Nanostruktur von Morphofaltern und die Ausrichtung der Schuppen verbessern die Sichtbarkeit der blauen Farbe in einem breiten Winkelbereich über der Flügeloberfläche (vgl. Kollé, 2011, 38f; Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 18).

5. Ansätze zur Verbesserung von Solarzellen mithilfe der Nanostrukturen von Schmetterlingen

5.1 Einführung Photovoltaik (PV)

Abbildung 35 beschreibt die Entwicklung des PV-Marktes in Österreich. Dieser boomt seit 2021. Die Leistung stieg allein 2022 im Vergleich zum Vorjahr um 36% (vgl. Biermayr u.a., 2023). Um langfristig mit fossilen Brennstoffen konkurrieren zu können, müssen PV-Anlagen allerdings billiger und effizienter werden (vgl. Schneider, 2016, 29).

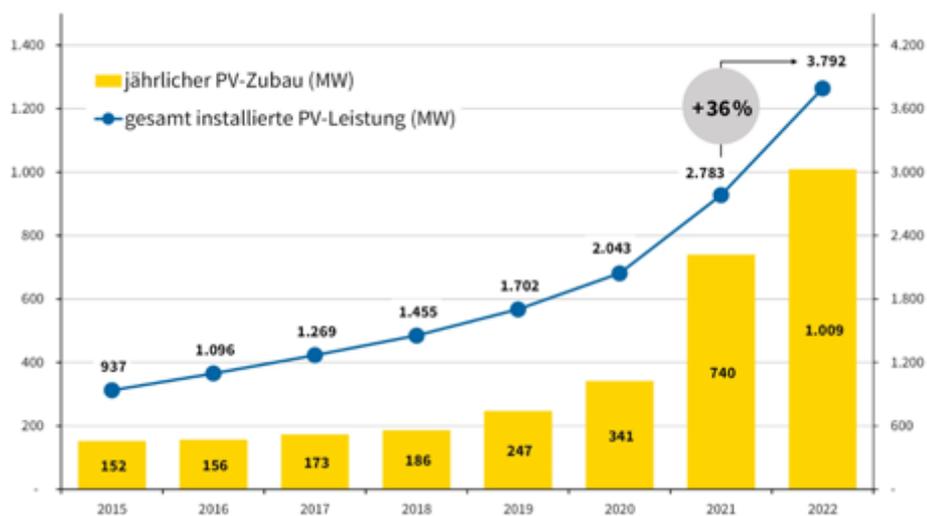


Abbildung 35: Leistung des Photovoltaik-Zubaus und der installierten Photovoltaik-Anlagen in Österreich in Megawatt Peak (Biermayr u. a., 2023)

Solarzellen wandeln Strahlungsenergie in elektrische Energie um. Sie bestehen aus **Halbleitern**, wie beispielsweise Silizium, welche elektromagnetische Wellen aus dem Sonnenlicht absorbieren und Elektronen als Ladungsträger freisetzen. Aufgrund unterschiedlicher Ladungen entsteht in der Solarzelle ein elektrisches Feld und durch den Fluss der Elektronen wird elektrischer Strom erzeugt. Solarzellen setzen sich aus drei Schichten zusammen. Die obere Schicht fängt das Sonnenlicht ein, während die mittlere Siliziumschicht Elektronen freisetzt und die untere Schicht freigesetzte Elektronen aufnimmt. Zwischen der oberen und unteren Schicht entsteht eine Spannung, welche Strom erzeugt (vgl. Schneider, 2016, 30f; Wesselak und Voswinckel, 2016, 27-36).

Der Wirkungsgrad einer PV-Anlage oder einer Solarzelle beschreibt prozentual, wie viel Sonnenenergie, die auf die Solarzelle trifft, in Strom umgewandelt wird. Dieser ist derzeit nicht besonders hoch und viel Energie der Sonneneinstrahlung bleibt ungenutzt. Wie in Abbildung 36 zu erkennen ist, beeinflussen mehrere Faktoren den Wirkungsgrad einer Solarzelle (vgl. „Wirkungsgrad moderner Solarzellen – einfach und verständlich erklärt!“ o. J.; „Welche Wirkungsgrade haben Solarzellen?“ 2023).

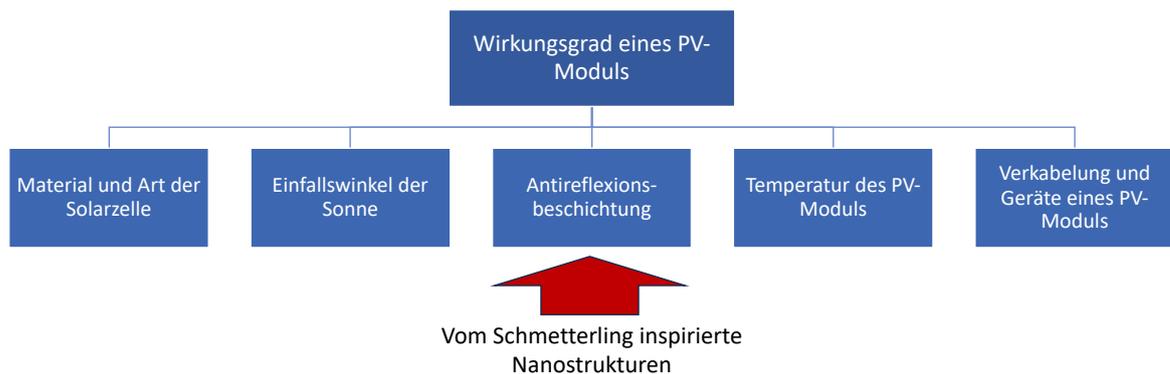


Abbildung 36: Faktoren, die den Wirkungsgrad einer PV-Anlage beeinflussen (eigene Abbildung; Daten: vgl. „Wirkungsgrad moderner Solarzellen – einfach und verständlich erklärt!“ o. J.; „Welche Wirkungsgrade haben Solarzellen?“ 2023)

Das Material und die Art einer Solarzelle haben erhebliche Auswirkungen auf den Wirkungsgrad. So verzeichnen Dünnschicht-Solarzellen Wirkungsgrade von 5–15% und kristalline Solarzellen 15–20% (vgl. „Dünnschicht-Solarzelle: Was sind Dünnschicht-Photovoltaik Module?“ 2023). Wegen des niedrigeren Wirkungsgrades werden Dünnschicht-Solarzellen weniger und in kleineren Geräten, wie Armbanduhren, eingesetzt. Gleichzeitig punkten sie aber durch niedrige Materialkosten. Wissenschaftler arbeiten daran, Dünnschicht-Solarzellen durch Antireflexionsschichten zu verbessern und sind mithilfe der Nanostrukturen von Schmetterlingen auf neue Lösungsansätze gestoßen (vgl. „Schmetterlingsflügel inspiriert Photovoltaik: Absorption lässt sich um bis zu 200 Prozent steigern“ 2018).

5.2 Effizienzsteigerung von Dünnschichtsolarzellen mithilfe von bionischen Absorbern

5.2.1 Bionischer Ansatz

Die Antireflexionseigenschaften der Nanostrukturen von Schmetterlingen können zur Entwicklung von effizienteren Absorbern für Dünnschichtsolarzellen beitragen. Dabei werden die Nanostrukturen mittels verschiedener Methoden, wie Ätzverfahren, auf der Absorberschicht einer Dünnschichtsolarzelle nachgebildet. Diese ist für die Absorption der Sonnenenergie und die Anregung der Elektronen im PV-Modul verantwortlich und erzeugt dadurch elektrischen Strom (vgl. Siddique u. a., 2017a, 7; Han u. a., 2019, 51; Yusoff, 2022, 90–112).

Wie in Abbildung 37 dargestellt, dienen die Nippelstruktur und die Wabenstruktur, bei welcher der ‚Light Trapping‘-Effekt beobachtet wird, als Inspiration für eine effizientere Gestaltung von Solarzellen. Dem Forscherteam Siddique u. a. ist es bereits gelungen, die Wabenstruktur in die Absorberschicht einer Dünnschichtsolarzelle zu integrieren (vgl. Han u. a., 2019, 51; Siddique u. a., 2017a, 1). Daher wird diese gemeinsam mit der Nippelstruktur im folgenden Abschnitt thematisiert.

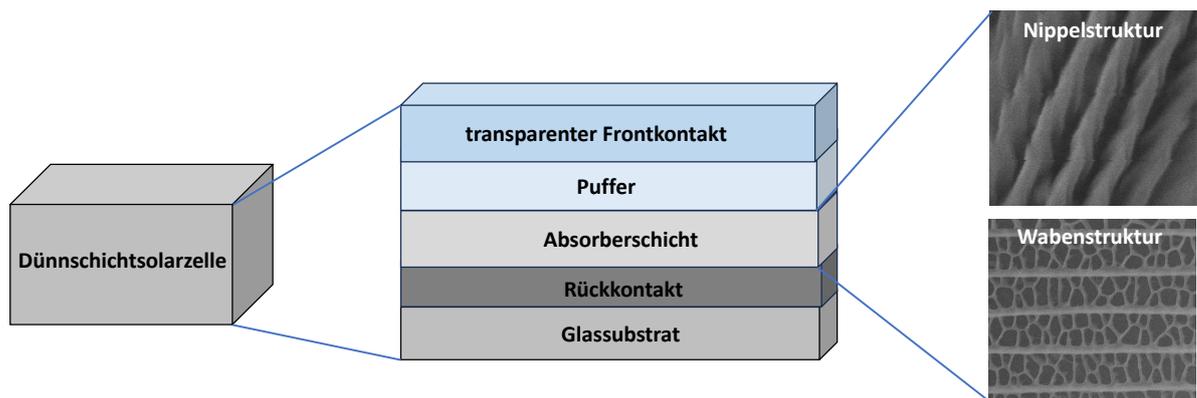


Abbildung 37: Dünnschichtsolarzelle mit Elementen der Nanostrukturen von Schmetterlingen (eigene Abbildung; Daten: KIT: https://www.aph.kit.edu/kalt/img/content/ScilightsBild_deutscheVersion_rdx_1200x653.png, Zugriff: 07.01.2024)

5.2.2 Nippelstruktur

Die Nippelstruktur ist in den Augen von Schmetterlingen zu finden (Abbildung 38). Ihre Ausstülpungen sind im Durchschnitt ca. 0–230 *nm* hoch und in Abständen von jeweils 180–240 *nm* zueinander angeordnet (vgl. Han u. a., 2019, 9).

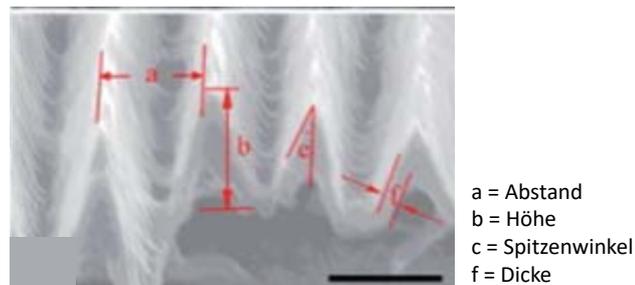


Abbildung 38: Nippelstruktur REM-Aufnahme (Lou u. a., 2012, 9202)

Dadurch entstehen zwischen dem Chitin der Schmetterlingsaugen und der Luft viele Grenzschichten mit unterschiedlichem Brechungsindex. Die Spitze der Nippel weist aufgrund des dichten Kontakts mit der Luft im Gegensatz zum restlichen Körper einen hohen Brechungsindex auf. Aufgrund der allmählich kleiner werdenden Brechungsindexe weist die Struktur geringe Reflexionsraten auf. Das Forschungsteam Lou u. a. hat die Nippelstruktur vereinfacht reproduziert und die Reflexionsraten der Struktur experimentell und per Simulation erfasst. Basierend auf den Ergebnissen (siehe Abbildung 39) konnte für die nachgebaute Nippelstruktur bei Wellenlängen zwischen 400 und 650 *nm* ein Reflexionsgrad von etwa 1% nachgewiesen werden, während sich mit dem Modell einer glatten Oberfläche ein Reflexionsgrad von 14% ergibt. Diese gewonnenen Daten unterstreichen, dass die Nippel großes Potential haben, Solarzellen zu verbessern (vgl. Lou u. a., 2012, 9201–9203).

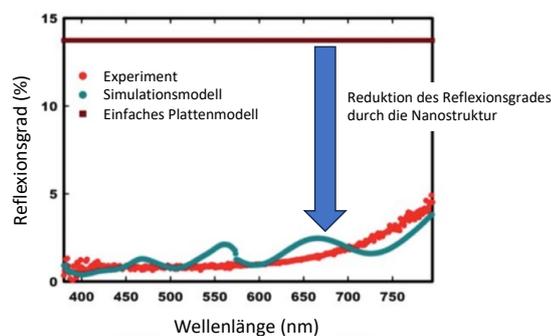


Abbildung 39: Reflexion der Nippelstruktur (Lou u. a., 2012, 9202)

5.2.3 Wabenstruktur

Auch die wabenartige Nanolochstruktur (siehe Abbildung 40) weist Elemente auf, die zur Verbesserung von Solarzellen beitragen können. Im Gegensatz zur zuvor beschriebenen Struktur ist für die Wabenstruktur eine unregelmäßige Anordnung von Löchern mit unterschiedlichen Durchmessern von etwa 350–850 *nm* charakteristisch (vgl. Chen u. a., 2021, 19; Siddique u. a., 2017a, 1f; Lou u. a., 2012, 9203ff).

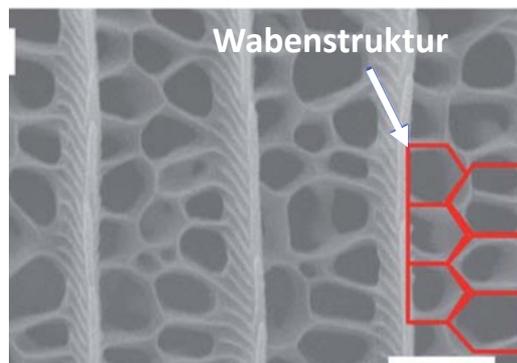


Abbildung 40: Wabenstruktur REM-Aufnahme (Han u. a., 2012, 12)

Physikalisch gesehen handelt es sich bei der Wabenstruktur um ein Beugungsgitter aus Chitin und Luft mit periodisch parallelen Rillen in der Größenanordnung der Wellenlänge des Lichts. Diese Eigenschaften sorgen gemeinsam mit weiteren Charakteristika, wie beispielsweise der geringen Längsrippenbreite, für besondere Absorptionseigenschaften der Struktur. Der Reflexionsgrad steigt mit größerem Verhältnis der Lochgröße zur Wellenlänge (vgl. Lou u. a., 2012, 9204; Siddique u. a., 2017a, 2–4).

Die Absorptionseigenschaften der Struktur entstehen aufgrund eines mehrstufigen Systems wie folgt. Trifft Licht auf die Lochstruktur, wird es zunächst an der Oberfläche gesammelt und infolgedessen teilweise absorbiert. Photonen, die an der 2D-Nanolochstruktur nicht absorbiert werden, haben nach wiederholten Reflexionsvorgängen an der Strukturoberfläche eine zweite Möglichkeit absorbiert zu werden (vgl. Siddique u. a., 2017a, 3–4; Lou u. a., 2012, 9204).

Die Streifen auf den Längsrippen, welche in Abbildung 41 zu sehen sind, verstärken die Streuung des Lichts an den Rippen in die Nanolochstruktur (vgl. Han u. a., 2015, 7).

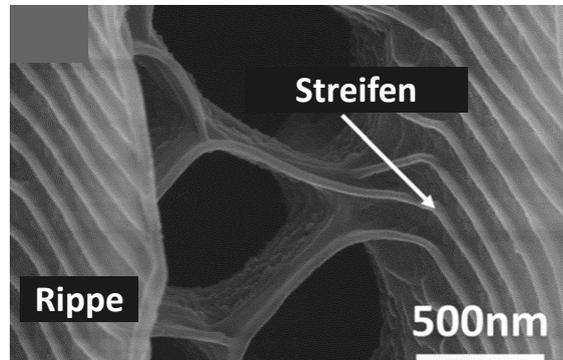


Abbildung 41: Streifen auf den Längsrippen (Han u. a., 2015, 5)

Der Schmetterling ‚Pachliopta aristolochiae‘ (siehe Abbildung 42) stellt für Forscher ein vielversprechendes Studienobjekt dar, da die tiefschwarzen Bereiche strukturell mit vielen Luftlöchern ausgestattet sind. Solche Nanostrukturen haben einen hohen ‚Air Filling‘-Anteil (vgl. Siddique u. a., 2017a, 1f).

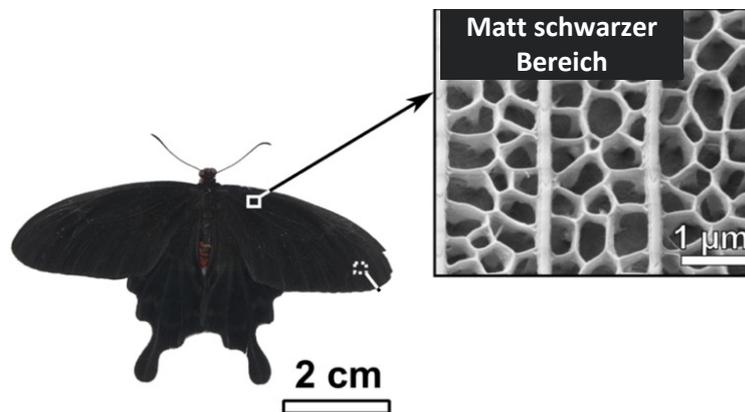


Abbildung 42: REM-Aufnahme des Schmetterlings ‚Pachliopta aristolochiae‘ (Siddique u. a., 2017a, 2)

Abbildung 43 zeigt, dass ein prozentual höherer ‚Air Filling‘-Anteil der Nanostruktur die Absorption positiv beeinflusst. Außerdem ist zu erkennen, dass aus kurzen Wellenlängen (350–500 nm) eine hohe Absorption resultiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Licht mit diesen Wellenlängen die Nanolochstruktur vielfach geradlinig durchdringt. Treffen Lichtstrahlen auf die Seitenwände der Rippen, werden sie reflektiert und gestreut und dadurch zu den Nanolochgebieten weitergeleitet. Dort werden sie dann größtenteils absorbiert. Dieses Prinzip wird als ‚Vertical Channeling‘ bezeichnet (vgl. Lou u. a., 2012, 9204; Siddique u. a., 2017a, 2f).

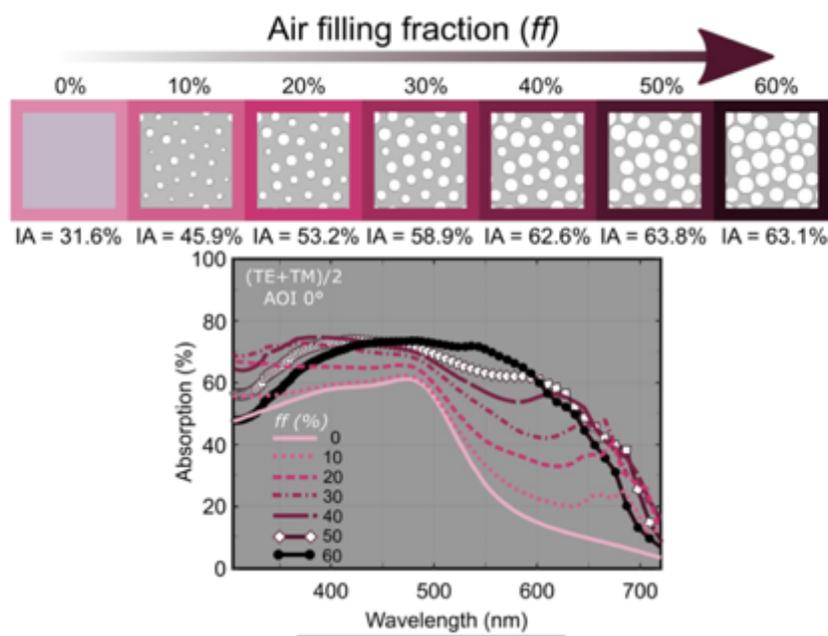


Abbildung 43: Einfluss des ‚Air Filling‘-Anteils auf Absorption (Siddique u. a., 2017b, 5)

Bei Wellenlängen von 550 nm flacht die Absorptionsrate langsam ab. In diesem Wellenlängenbereich tritt ‚Vertical Channeling‘ gemeinsam mit Streuung des Lichts an der gesamten Lochstruktur auf (vgl. Siddique u. a., 2017a, 2f). Da die Wellenlängen des Lichts in der Regel größer sind als die Rippen, wirkt die gesamte Struktur wie ein Filter und nur einzelne Lichtstrahlen können die Nanolochstruktur durchdringen (vgl. Lou u. a., 2012, 9204).

Die Auswirkungen der Anzahl und der Anordnung von Nanolöchern auf die Absorption von Solarzellen sind von Forschern des Karlsruhe Instituts für Technologie (KIT) untersucht worden. Mittels Computersimulationen haben sie periodische Strukturen mit

Löchern entwickelt und konnten physikalische Gesetzmäßigkeiten nachweisen. Wie in Abbildung 44 ersichtlich ist, hat die Forschergruppe mehrere Strukturen entwickelt: 1) ohne Löcher, 2) regelmäßig mit Löchern gleichen Durchmessers, 3) regelmäßig mit unterschiedlich großen Löchern und 4) unregelmäßig mit unterschiedlich großen Löchern (vgl. Siddique u. a., 2017a, 4).

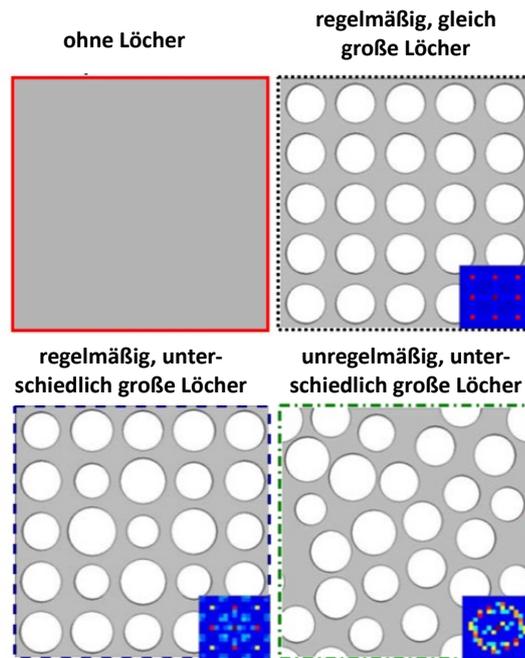


Abbildung 44: Modelle der Nanolochstrukturen (Siddique u. a., 2017a, 4)

Die unregelmäßige Lochstruktur, die der Struktur des schwarzen Schmetterlings entspricht (siehe Abbildung 42), weist Löcher mit Durchmessern von 133–343 nm auf und ist für eine effiziente Streuung in die Nanolochstruktur hinein verantwortlich. Weiters haben die Forscher herausgefunden, dass die Absorption mit der Annäherung der Lochgröße an die Wellenlänge des Lichts steigt (vgl. Siddique u. a., 2017a, 4; Kempkens, 2018).

Abbildung 45 zeigt, dass die regelmäßige Struktur mit gleich großen Löchern mit einer Absorptionsrate von 63.8% eine doppelt so hohe Absorption aufweist wie die Struktur ohne Löcher mit 31.6%. Unregelmäßige Lochanordnungen können Licht unabhängig von seiner Ausbreitungsrichtung für ein weites Spektrum an Wellenlängen absorbieren (vgl. Siddique u. a., 2017, 4f).

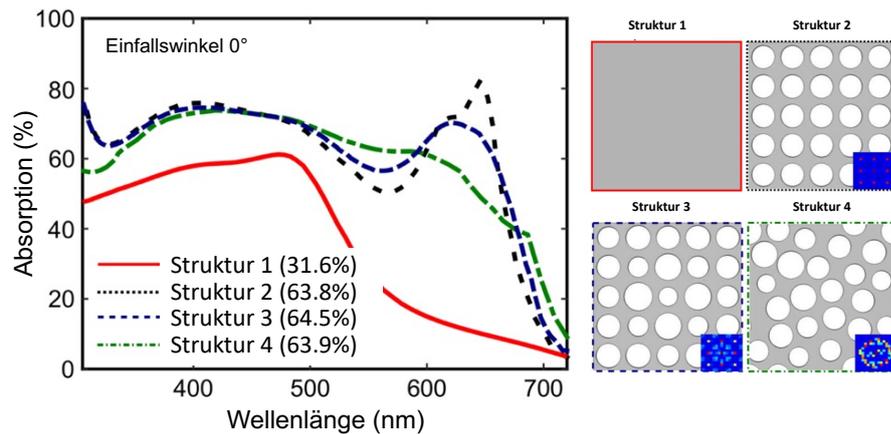


Abbildung 45: Absorption der vier periodischen Modelle unter einem normalen Einfallswinkel (Siddique u. a., 2017, 4)

Die zwei regelmäßigen Lochstrukturen weisen für Einfallswinkel von 10° bis 60° ähnliche Absorption auf (Abbildung 46). Die bionische Struktur kann Licht auch noch unter Einfallswinkeln über 60° effizienter absorbieren und ist somit winkelrobuster als die anderen Strukturen (vgl. Siddique u. a., 2017a, 4f). Diese Robustheit in höheren Winkelbereichen ist vor allem für Solarzellen auf europäischem Boden, wo Sonnenstrahlen selten senkrecht auf die Erde treffen, vielversprechend (Urbansky, 2018).

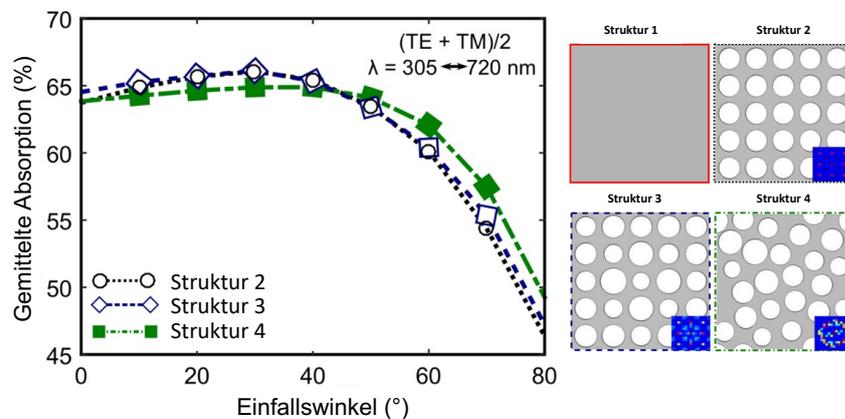


Abbildung 46: Auswirkungen des Einfallswinkels (°) des Lichtes auf Absorption der periodischen Strukturen (Siddique u. a., 2017a, 4)

Unter Gesamtbetrachtung der Faktoren Winkelrobustheit und Absorption für ein breites Spektrum liefert die bionische Nanostruktur vom Schmetterling die besten Absorptionsraten. Inspiriert durch diese Struktur haben Forscher am KIT Löcher mit unterschiedlich großen Durchmessern von 133–343 *nm* auf die Siliziumschicht einer Dünnschichtsolarzelle geätzt. Dabei haben sie auf eine unregelmäßige Anordnung der Löcher geachtet. Die Wissenschaftler zeigten sich überrascht darüber, dass die Absorptionsrate im Vergleich zu einer glatten Oberfläche ohne Nanostrukturen bei einem senkrechten Lichteinfall um 97% höher und bei einem Einfallswinkel von 50° sogar um 207% höher ist. Da auch noch andere Faktoren den Wirkungsgrad einer Solarzelle beeinflussen, können diese Ergebnisse nicht als eine 200%ige Steigerung der Solarzelleneffizienz betrachtet werden. Laut Forschern könnte die Struktur in naher Zukunft für die Industrie relevant sein, da die Wabenstruktur jegliche Art von Dünnschicht-PV-Modulen verbessern könne (vgl. „Schmetterlingsflügel inspiriert Photovoltaik: Absorption lässt sich um bis zu 200 Prozent steigern“ 2018).

5.3 Entwicklung gebäudeintegrierter PV-Module mithilfe der Nanostrukturen des Morphofalters

Die Integration von Photovoltaikmodulen in die Gebäudehülle bedeutet eine effiziente Nutzung von Oberflächen. Herkömmliche, oft als unästhetisch empfundene, Gestelle für PV-Module auf Dächern sollen mit diesem Ansatz durch im Gebäude integrierte PV-Verkleidungsmaterialien ersetzt werden (vgl. Bemann, 2021).

Das optische Erscheinungsbild der Module spielt bei der Gebäudeplanung eine große Rolle. Gebäudeplaner bevorzugen für die Anwendung von PV-Modulen eine individuelle Farbauswahl, welche ein homogenes Erscheinungsbild für einen weiten Winkelbereich liefert und keine Einbußen bezüglich des Wirkungsgrads verzeichnet. Bisher angewandte pigmentierte farbige Solarzellen verlieren durch ihre Färbung signifikant an Effizienz und Lebensdauer. Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts (ISE) haben den physikalischen Ansatz der blauen Strukturfarben des Morphofalters für die Verbesserung von Solarzellen analysiert und angewandt. Mithilfe der physikalischen Eigenschaften der photonischen Kristallstrukturen dieses Schmetterlings können effizientere, ästhetischere und im Gebäude integrierte PV-Module entwickelt werden. Dadurch ließe sich die Akzeptanz für Solarzellen in der Gesellschaft immens steigern (vgl. Bläsi u. a., 2021, 1305).

Aufgrund der Struktureffekte und Dünnschichtinterferenzen in der photonischen Kristallstruktur erreicht der Morphofalter sein Reflexionsmaximum in einem schmalen Wellenlängenbereich. 93% des Lichts durchdringen die Morphoschicht und rund 7% werden reflektiert und sorgen für die Morphofarbgebung. Die 7% sorgen für die Entstehung der kräftig leuchtenden Morphofarbe („Solar Technology with the Beauty of Butterfly Wings“ 2021; Lou u. a., 2012, 9206).

Die photonische Kristallstruktur des Morphofalters weist Schichten auf, welche auch als Bragg-Stapel bezeichnet werden. Dabei wechseln sich Schichten mit hohem und niedrigem Brechungsindex ab (siehe Abbildung 47) (vgl. Bläsi u. a., 2021, 1307). Aufgrund dieser Anordnung weist die Struktur ein gesättigtes Farberscheinungsbild und eine Winkelstabilität über einen weiten Bereich auf. Das in Abbildung 47 dargestellte vereinfachte Modell des Morphofalters weist Schichten mit hohem Brechungsindex n_h und niedrigem Brechungsindex n_l auf. Oberhalb der Schichten befindet sich das Deckglas mit einem Brechungsindex von 1.5 und einer Antireflexionsschicht. Die unterste Schicht, welche auch einen Brechungsindex von 1.5 aufweist, stellt die Schicht, in die das Licht übertragen wird, dar (vgl. Bläsi u. a., 2021, 1306f).

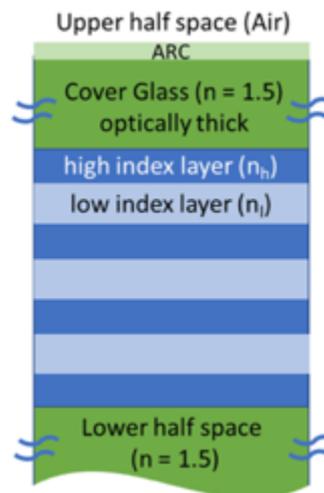


Abbildung 47: Modell der Morphostruktur mit Bragg-Stapel (Bläsi u. a., 2021, 1307)

Für die Generierung eines optimalen Modells mit reduzierter Reflexion und robuster Farberscheinung wird eine spezifische Anzahl von Schichten mit den Brechungsindizes $n_h = 2.0$ und $n_l = 1.5$ implementiert. Die Anordnung dieser Schichten mit hohen Brechungsindizes ist gezielt gewählt, um die Reflexion zu minimieren und eine stabile Farbwiedergabe auch bei großen Einstrahlwinkeln für schmalbandiges Reflexionsverhalten zu sichern (vgl. Bläsi u. a., 2021, 1305–1308).

Dazu wird die bionische Morphostruktur durch Strukturierung, Besputterung und Ätzung auf eine vorgeformte Schicht reproduziert und auf einer Modul-Glasrückseite angebracht. Dabei ist sie zwischen einem Modulglas und Laminat eingefasst (siehe Abbildung 48). An der Vorderseite des Modulglases kann eine Textur montiert werden, die die Farbtoleranz erhöht (vgl. Bläsi u. a., 2017, 2).

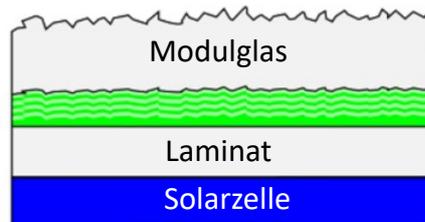


Abbildung 48: Konzept für PV-Modul mit rauer Oberfläche (Bläsi u. a., 2017, 2)

Modulgläser dieser Art sind bereits in den Farben Rot, Grün und Blau von Forschern des Karlsruhe Instituts produziert worden. Durch die Veränderung der Schichtdicken können andere Reflexionsmaxima und folglich andere Farben entwickelt werden (vgl. Bläsi u. a., 2021, 1306f).

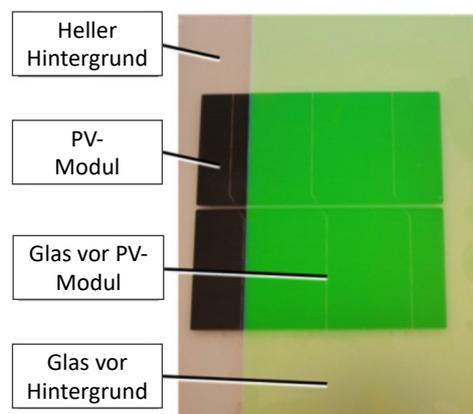


Abbildung 49: Auswirkungen von einem grünen Modulglas auf die Farberscheinung eines PV-Moduls (Bläsi u. a., 2017, 2)

Abbildung 49 zeigt, dass der Bereich, welcher mit einem Glasmodul überzogen wurde, eine satte grüne Farbe aufweist. Im linken Bereich der Abbildung wurde das PV-Modul nicht mit dem Glasmodul überzogen und die Zelle erscheint schwarz (vgl. Bläsi u. a., 2017, 2f).

Weiters führten Forscher des KIT winkelabhängige Spektrometermessungen durch. Bei 550 nm befindet sich das Reflexionsmaximum (siehe Abbildung 50). Da die Reflexionskurven bei Einfallswinkeln von 10° bis 60° nur geringe Schwankungen aufweisen, lässt sich auf eine gute Winkelstabilität in Hinblick auf die Reflexion des PV-Moduls schließen (vgl. Bläsi u. a., 2017, 2f).

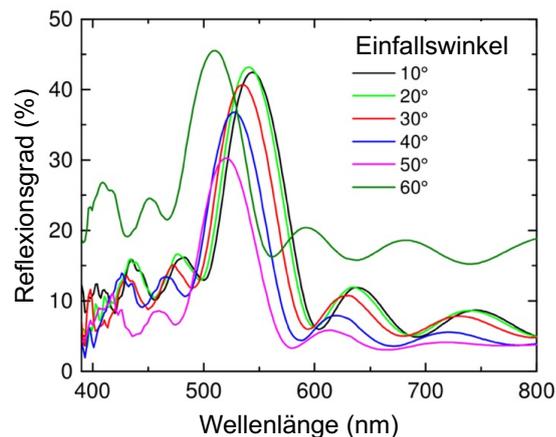


Abbildung 50: Reflexionsgrad der glasüberzogenen Photovoltaikmodule (Bläsi u. a., 2017, 3)

Wie in Abbildung 51 zu erkennen ist, sind bereits erste integrierte Solarzellen mit Morphofarbe an der Gebäudefassade des Fraunhofer Instituts integriert worden (vgl. „Farbige PV-Module mit Fraunhofer ISE Patent erreichen Marktreife“ 2023).



Abbildung 51: Gebäudeintegrierte PV-Module am Fraunhofer ISE (Quelle: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2023/farbige-pv-module-mit-fraunhofer-ise-patent-erreichen-marktreife.html>, Zugriff: 22.11.2023)

Um die Morpho-inspirierten PV-Module der Farben Blau, Grün und Rot mit einem herkömmlichen schwarzen PV-Modul ohne photonische Struktur zu vergleichen, wurde erstmals die Leistung beider PV-Module am Fraunhofer Institut gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die vom Morphofalter inspirierten PV-Module 94% der Leistung einer schwarzen Solarzelle erzielen und somit in der Effizienz nur geringfügig abweichen. Dies wäre mit traditionellen Farbgebungsmethoden ohne photonische Schichten nicht möglich (vgl. Bläsi u. a., 2021, 1310).

Modul	Referenz	Blau	Grün	Rot
P_{mpp} (W)	155.2	146.5	146.4	146.7
Relativ zur Referenz		94.4%	94.3%	94.5%

Abbildung 52: Leistung der vom Morphofalter inspirierten BIPV-Module im Vergleich zu einer herkömmlichen schwarzen Solarzelle (eigene Abbildung; Daten: Bläsi u. a., 2021, 1310)

Im April 2023 kam es zu einem weiteren wichtigen Meilenstein für das ISE-Institut. Die Zusammenarbeit des Fraunhofer Instituts mit der Firma Megasol Energie AG in der Schweiz führte zur erstmaligen Industrialisierung dieser hocheffizienten Solarmodule. Diese stehen damit erstmals der Baubranche zur Verfügung. Über den Erfolg und die Nachfrage der Produkte sind bisher noch keine Daten veröffentlicht worden. Die Mitarbeiter des ISE hoffen auf eine Revolution für solare Gebäudehüllen und Fassaden (vgl. „Farbige PV-Module mit Fraunhofer ISE Patent erreichen Marktreife“ 2023).

6. Mögliche Ansätze zur Nutzung der Nanostrukturen der untersuchten Schmetterlinge

Abbildung 53 fasst die Ergebnisse der oben beschriebenen Literaturrecherche zusammen und zeigt drei wesentliche Lösungsansätze für bionische Nanostrukturen. Zum einen sorgt die Nippelstruktur durch variablen Brechungsindex für eine höhere Absorption (vgl. Lou u. a., 2012, 9201). Zum anderen werden die Antireflexionseigenschaften der Wabenstruktur schwarzer Schmetterlinge durch das ‚Light Trapping‘-Prinzip hervorgerufen. Gemeinsam mit der Nippelstruktur findet die Wabenstruktur Anwendungen in Dünnschichtsolarzellen (vgl. Siddique u. a., 2017, 1–4; Han u. a., 2019, 47). Die Tannenbaumstruktur von Morphofaltern hingegen initiiert Reflexion für spezifische Wellenlängen und sorgt für spezielle Farbgebung von Solarzellen (vgl. Bläsi u. a., 2017, 1–4).

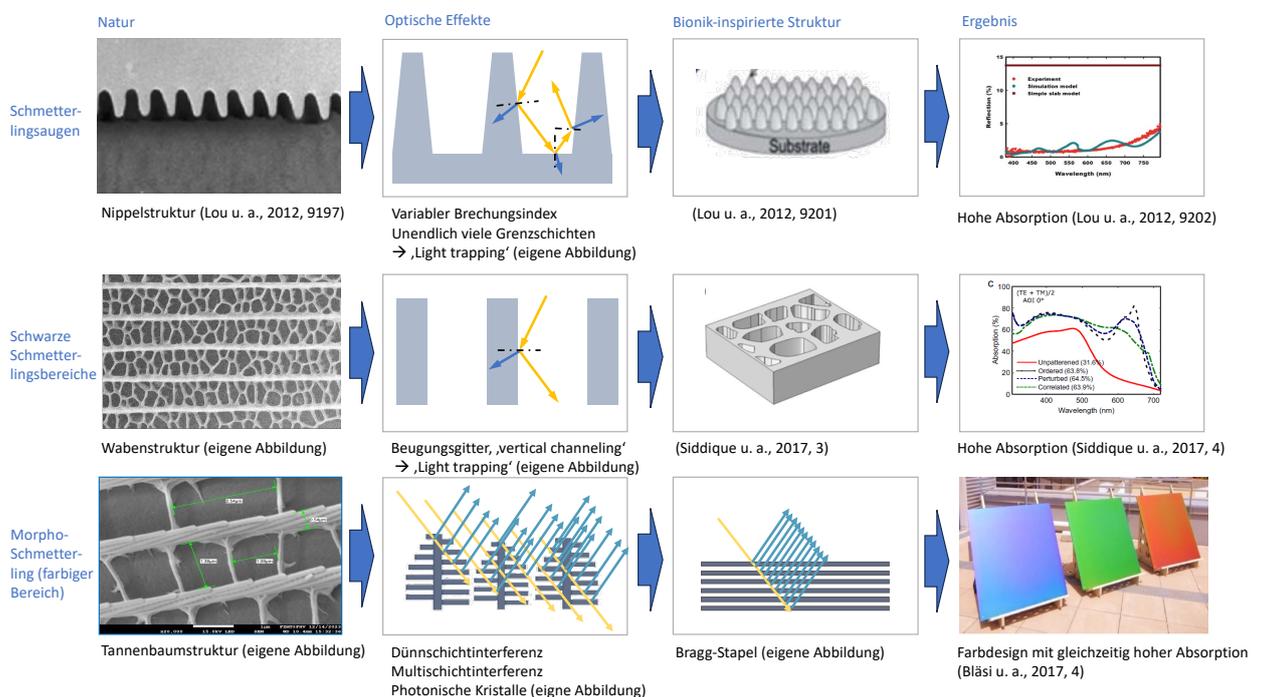


Abbildung 53: Zusammenfassung ausgewählter in der Literatur beschriebener Wege zur Verbesserung von Solarzellen (eigene Abbildung auf der Basis der oben beschriebenen Quellen)

Dem können nun die eigenen Messergebnisse gemäß Kapitel 3 gegenübergestellt werden. Waben- und Rippenstrukturen wurden im Rahmen dieser Arbeit in schwarzen Schmetterlingsbereichen gefunden und die hohe Absorption, wie in der Literatur beschrieben, experimentell bestätigt. Beim schwarzen Flügelbereich des *Papilio palinurus* sorgen beispielsweise die relativ kleinen Nanolöcher mit einem Durchmesser von etwa 400 nm und die dünnen Lochwände für einen großen ‚Air Filling‘-Anteil. Die Unordnung der Struktur und die großflächige Oberflächenstrukturierung könnten ausschlaggebend für den geringen Reflexionsgrad sein. Auch die Nanostruktur des *Papilio memnon* (siehe Kapitel 3) passt ins Bild. Erkennbar sind 497 nm breite Längsrippen, ein Längsrippenabstand von 1.089 nm und Nanolöcher mit einem Durchmesser von ca. 369 nm . In seiner Gesamtheit betrachtet weist der Schmetterling ein großes Netz an Löchern mit unterschiedlichen Durchmessern auf. Auffällig sind insbesondere die dünnen Lochwände, die Lichtstrahlen in die Nanostrukturen streuen. Zudem variiert der Längsrippenabstand der Schmetterlinge je nach Art deutlich. Ein Zusammenhang zwischen dem Längsrippenabstand und dem Absorptionsverhalten der untersuchten Schmetterlinge konnte in dieser Arbeit nicht gefunden werden. Dennoch könnten der Längsrippenabstand und die Breite der Rippe Einfluss auf die optischen Eigenschaften haben. Möglicherweise kommt es bei einem geringeren Längsrippenabstand zu stärkerem Beugungsverhalten der Nanostruktur, die in diesem Kontext als Beugungsgitter fungiert. Aufgrund der zunehmenden Beugung würden dann die Lichtstrahlen effizienter in die Nanolochstruktur gelangen, ohne direkt an den Rippen reflektiert zu werden. Diese Theorie müsste allerdings anhand von Simulationen und Messungen bestätigt werden.

Tannenbaumstrukturen wurden bei farbigen Schmetterlingen, wie dem Morphofalter, gefunden und die erwarteten in der Literatur beschriebenen physikalischen Farbeigenschaften im Rahmen der Spektrometeruntersuchung bestätigt. Nippelstrukturen von Schmetterlingsaugen wurden in dieser Arbeit in REM-Aufnahmen gefunden, aber nicht untersucht.

Zusätzlich wurden mehrere spezielle Strukturen gefunden (siehe Kapitel 3.1 und 3.2):

- So hat der *Papilio palinurus* eine Härchen-Mikrostruktur, die an eine Art ‚Gras‘, das über die Schuppen wächst, erinnert. Dies könnte ähnlich wie bei der Nippelstruktur im Mikrobereich Streuung und eine allmähliche Verringerung des Brechungsindex bedeuten und dadurch starkes Reflexionsverhalten verhindern.
- Generell finden sich auch sehr komplexe Nanostrukturen. Der schwarze Bereich des *Morpho achilles* hat Grund- und Deckschuppen mit sehr unterschiedlicher Nanostruktur. Die Deckschuppe hat eine regelmässige Nanolochstruktur, während die Grundschuppe eine Nanolochstruktur mit einer ausgeprägten Strukturierung an der Membranwand zwischen Längsrippe und Lochstruktur aufweist. Des Weiteren bestehen die Längsrippen aus mehreren Lamellenstreben. Diese Eigenschaften könnten das Licht in die Struktur streuen und Antireflexionseigenschaften hervorrufen.
- Auf dem gelben Bereich des Schmetterlings *Graphium agamemnon* ist eine Struktur aufgenommen worden, die der Struktur eines Glasflügelalters ähnelt. Die Struktur des Glasflügelalters besteht aus ‚Nanokissen‘ und wurde in mehreren Forschungsergebnissen als effiziente Nanostruktur für Antireflexionseigenschaften gewertet (vgl. Siddique, Gomard und Hölscher, 2015, 7). Überraschenderweise zeigt die Struktur des gelb-schwarzen Schmetterlings allerdings eine höhere Reflexion als die restlichen Strukturen. Möglicherweise haben die relativ dicken Borstenhaare und die weitläufige Anordnung der Nanokegel negative Auswirkungen auf die Antireflexionsrate.
- Die Rippen mancher Schmetterlinge bestehen aus einzelnen Längsrippenteilen. Die unterschiedlichen Höhen der Längsrippen könnten ebenfalls das Interferenzverhalten der Nanostruktur positiv beeinflussen.

- Die schwarzen Bereiche des *Morpho achilles* und des *Papilio palinurus* weisen die kleinräumigsten gefundenen Oberflächenstrukturen auf. Insbesondere die ‚Streifen‘ der Längsrippen könnten womöglich Streuung in die Nanolöcher fördern (siehe Abbildung 54).

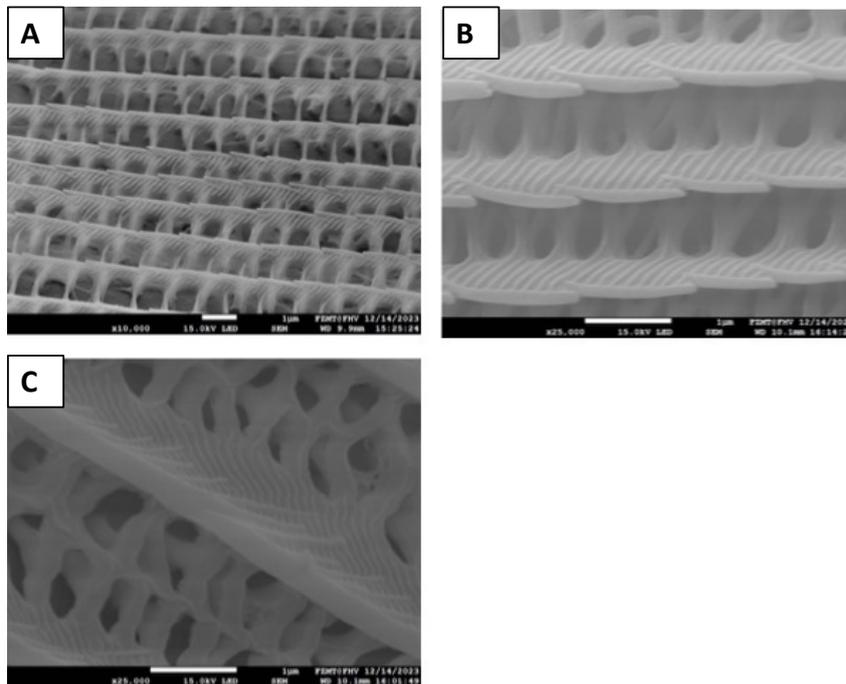


Abbildung 54: Oberflächenstrukturierung vom *Morpho achilles* (A, B) und vom *Papilio palinurus* (C) (eigene Abbildung)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass offensichtlich gerade eine regelmäßige Grundstruktur, überlagert mit einer ‚Unordnung und Zufälligkeit‘ kleinerer Größenordnungen sowie mit einer komplexen Oberflächenstruktur für die entscheidenden Vorteile sorgt. Dies kann bei der weiteren Entwicklung reproduzierter Strukturen für technische Anwendungen genutzt werden. Dabei sollten moderne Ätzverfahren eine kostengünstige Herstellung ermöglichen.

Das Prinzip der unterschiedlichen Deck- und Grundschuppen hat möglicherweise Auswirkungen auf den Absorptionsgrad und sollte mittels Simulationen untersucht werden. In der Literatur findet sich dazu wenig und die Natur muss einen ‚Grund‘ gehabt haben, diese zu entwickeln. Möglicherweise liegt der eigentliche Nutzen der Schuppenstruktur aber in der niedrigen Benetzbarkeit und hat weniger Einfluss auf die optischen Eigenschaften. Daran könnte in weiteren Arbeiten geforscht werden. Die

Oberflächenstrukturierung und die Breite der Rippen sollten ebenfalls systematisch analysiert werden, um deren Einfluss besser zu verstehen.

Die Simulation, die in einigen der zitierten Arbeiten zum Einsatz kommt, stellt eine effiziente Methode dar, komplexe Strukturen zu modellieren und deren Einfluss auf Absorption und Reflexion zu verstehen. Außerdem wäre der Aufbau eines modularen Strukturmodells, bei dem ‚Zellen‘, ‚Waben‘, ‚Tannenbäume‘ und andere Grundstrukturen mit Rippen kombiniert werden zu empfehlen. Dabei wäre auch eine Unordnung zu parametrisieren.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung von Schmetterlingsproben aus dem Schmetterlingshaus der Insel Mainau mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen und Spektrometeruntersuchungen hat gezeigt, dass Schmetterlingsoberflächen eine hohe Vielfalt von Nanostrukturen aufweisen. Dies bestätigt insbesondere deren regelmäßige zwei- und dreidimensionale Anordnung von Grundgeometrien, überlagert mit einer Unordnung und Zufälligkeit kleinerer Größenordnung. Da die charakteristischen Längen dieser Strukturen, wie beispielsweise der Längsrippenabstand oder der Wabenlochdurchmesser, im Bereich der Wellenlängen des optisch sichtbaren Lichtes liegen, stellen sich spezifische optische Mikro- und Makroeigenschaften ein. Diese entstehen durch dreidimensionale Dünnschicht- und Multischichtinterferenz, Beugungsgitter und photonische Kristalle. Dies wird in der Literatur anhand vieler Einzelbeispiele vertieft beschrieben.

Mit einem bionischen Ansatz, bei dem die Nanostrukturen der Schmetterlinge vereinfacht reproduziert werden, lassen sich Absorberschichten für Solarzellen entwickeln, die durch bessere Lichtausbeutung den Wirkungsgrad von Solarzellen erhöhen. Außerdem lassen sich mithilfe der Nanostrukturen von schillernden Schmetterlingen die Reflexionseigenschaften hinsichtlich ästhetischer Wahrnehmung optimieren. Dies könnte zu besserer Akzeptanz von Solarzellen für die Verwendung an Gebäudefassaden führen.

Zudem wurde in der Arbeit gezeigt, dass die Rasterelektronenmikroskopie der Nanostrukturen eine genaue Identifikation der Nanostrukturtypen ermöglicht und die entsprechenden charakteristischen Maße, wie beispielsweise Längsrippenabstände oder Lochdurchmesser, direkt abgelesen werden können. Die Analyse mit dem Spektrometer liefert die zugehörigen makroskopischen optischen Eigenschaften. Daraus ergibt sich die folgende, einfache und effiziente Methode, bionische Nanostrukturen gezielt zu entwickeln.

Mit einem Systemmodell, bei dem Grundstrukturen wie ‚Waben‘, ‚Tannenbäume‘ und ‚Rippen‘ kombiniert werden, lassen sich direkt bionische Strukturen definieren. Diese

können mittels Simulation spektral getestet werden und den realen Ergebnissen gegenübergestellt werden. Damit lassen sich Hypothesen für Verbesserungen direkt bestätigen oder verwerfen. Die Implementierung von maschinellem Lernen kann für die Generierung von Strukturen genutzt werden und somit in Zukunft zu signifikanten Verbesserungen von Solarzellen führen.

Ferner wurden weitere Ansätze zur Nutzung von Nanostrukturen in Hinblick auf nachhaltige Technologien in der Forschung gefunden. So können die Nanostrukturen von Morphofaltern für die Entwicklung biochemischer Sensoren und Kühlungssysteme genutzt werden (vgl. Didari und Mengüç, 2018, 1; Butt u. a., 2016, 502).

Trotz bisheriger Meilensteine in der Forschung der Nanostrukturen von Schmetterlingen sind noch Hürden für die Entwicklung der Technologien und deren effektive Umsetzung zu überwinden. In Anbetracht dessen ist die Investition in weitere Forschungsarbeiten notwendig, um bereits vorhandene Lösungsansätze marktreif werden zu lassen.

8. Glossar

Absorption: Aufnahme von Licht eines Objekts (vgl. Gmelch und Reineke, 2019, 13)

Amplitude: Maximale oder minimale Auslenkung einer Welle während einer Periode einer physikalischen Schwingung (vgl. Gmelch und Reineke, 2019, 94)

Beugung: Ablenkung von Lichtstrahlen beim Auftreten auf ein Hindernis mit einer Öffnung, welche in der Größenordnung der Wellenlänge des eintreffendes Lichts liegt (vgl. Zobl, 2018, 15; Gmelch und Reineke, 2019, 163)

Brechung: Die Änderung der Richtung eines Lichtstrahls, wenn er nicht senkrecht auf eine Grenzschicht trifft (vgl. Tipler und Mosca, 2015, 1011f).

Brechungsindex: Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zu der im betrachteten Medium (vgl. Tipler und Mosca, 2015, 1011)

Dielektrisch: Elektrisch nicht leitende Materialien wie zum Beispiel Luft oder Glas (vgl. Tipler und Mosca, 2015, 778)

Frequenz: Die Anzahl der Schwingungen/Wiederholungen pro Zeiteinheit bei einem physikalischen Prozess (vgl. Meschede und Gerthsen, 2015, 3)

Halbleiter: Ein Festkörper, welcher aus drei Energieniveaus besteht und ganz oder teilweise mit Elektronen gefüllt ist; er kann abhängig von Temperaturen als Leiter oder Nichtleiter fungieren (vgl. Wesselak und Voswinckel, 2016, 29)

Melanin: In Insekten vorkommendes Pigment, welches als brauner bis schwarzer Farbstoff fungiert (vgl. Shūichi Kinoshita, 2008, 131)

Reflexion: Das Zurückwerfen von Lichtwellen, wenn ein Lichtstrahl auf eine Oberfläche eines Objekts fällt, welches einen von der bisherigen Umgebung abweichenden Brechungsindex aufweist (vgl. Tipler und Mosca, 2015, 1012)

Schillernd: Wird in der Fachsprache als ‚irisierend‘ bezeichnet und beschreibt ein optisches Phänomen, bei welchem die Oberfläche abhängig von der Perspektive in unterschiedlichen Farben wahrgenommen wird (vgl. Shūichi Kinoshita, 2008, 2)

Spektrometer: Messgerät zur Untersuchung und Darstellung eines Spektrums elektromagnetischer Strahlung (vgl. Gressner, 2013, 1241)

Streuung: Das Zurückwerfen von Lichtwellen in viele unterschiedliche Richtungen, nachdem sie auf eine unregelmäßige Oberflächenstrukturierung getroffen sind (vgl. Zobl, 2018, 15)

9. Literatur- und Quellenverzeichnis

Ahmed, Rajib, Xiaochao Ji, Raghied M. H. Atta, Ahmmed A. Rifat, und Haider Butt. 2018. „Morpho Butterfly-Inspired Optical Diffraction, Diffusion, and Bio-Chemical Sensing“. *RSC Advances* 8 (48): 27111–18. <https://doi.org/10.1039/C8RA04382E>.

Bauch, Jürgen, und Rüdiger Rosenkranz. 2017. *Physikalische Werkstoffdiagnostik: ein Kompendium wichtiger Analytikmethoden für Ingenieure und Physiker*. Berlin [Heidelberg]: Springer Vieweg.

Bemann, Ulrich. 2021. „Was sind gebäudeintegrierte Photovoltaik-Module?“ Solar-energie: Informationen zu Photovoltaik und mehr. Zugriff am: 11. November 2023. <https://solarenergie.de/solarmodule/arten/gebäudeintegrierte-photovoltaik>.

Biermayr, P., S. Aigenbauer, C. Dißauer, M. Eberl, M. Enigl, H. Fechner, C. Fink, M. Fuhrmann, F. Hengel, M. Jaksch-Fliegenschnee, K. Leonhartsberger, D. Matschegg, S. Moidl, E. Prem, T. Riegler, S. Savic, C. Schmidl, C. Strasser, P. Wonisch, und E. Wopienka. 2023. „Hochkonjunktur für Erneuerbare: Statistik 2022 zeigt Rekord-Zuwächse“. energie.gv.at. Zugriff am: 31. Oktober 2023. <https://energie.gv.at/erneuerbare-energie/erneuerbare-im-trend>.

Bläsi, Benedikt, Thomas Kroyer, Oliver Höhn, Martin Wiese, Claudio Ferrara, Ulrich Eitner, und Tilmann E. Kuhn. 2017. „MORPHO BUTTERFLY INSPIRED COLOURED BIPV MODULES“, September.

Bläsi, Benedikt, Thomas Kroyer, Tilmann E. Kuhn, und Oliver Höhn. 2021. „The MorphoColor Concept for Colored Photovoltaic Modules“. *IEEE Journal of Photovoltaics* 11 (5): 1305–11. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3090158>.

Bläsi, Benedikt, Thomas Kroyer, Oliver Höhn, Claudio Ferrara, und Tilmann E. Kuhn. 2016. „Coloured Module Glass for BIPV Inspired by Morpho Butterfly“. In *Light, Energy and the Environment*, PW5A.2. Leipzig: OSA. <https://doi.org/10.1364/PV.2016.PW5A.2>.

Butt, Haider, Ali K. Yetisen, Denika Mistry, Safyan Akram Khan, Mohammed Umair Hassan, und Seok Hyun Yun. 2016. „Morpho Butterfly-Inspired Nanostructures“. *Advanced Optical Materials* 4 (4): 497–504. <https://doi.org/10.1002/adom.201500658>.

Chen, Angela. 2017. „Butterfly Wings Inspire a Better Way to Absorb Light in Solar Panels“. The Verge. Zugriff am: 10. Oktober 2023.
<https://www.theverge.com/2017/10/19/16503258/butterfly-wings-engineering-solar-cell-energy-biomimicry>.

Chen, Zhuoyue, Zhuohao Zhang, Yu Wang, Dongyu Xu, und Yuanjin Zhao. 2021. „Butterfly Inspired Functional Materials“. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 144 (April): 100605. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100605>.

Didari, Azadeh, und M. Pinar Mengüç. 2018. „A Biomimicry Design for Nanoscale Radiative Cooling Applications Inspired by Morpho Didius Butterfly“. *Scientific Reports* 8 (1): 16891. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35082-3>.

„Dünnschichtsolarzelle: Was sind Dünnschicht-Photovoltaik Module?“ 2023. *Solarwissen Selfmade Energy* (blog). Zugriff am: 4. Januar 2024. <https://solarwissen.selfmade-energy.com/duennschichtsolarzelle-was-ist-das/>.

„Farbige PV-Module mit Fraunhofer ISE Patent erreichen Marktreife“. 2023. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Zugriff am: 6. Januar 2024.
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2023/farbige-pv-module-mit-fraunhofer-ise-patent-erreichen-marktreife.html>.

Giraldo, M. A., und D. G. Stavenga. 2016. „Brilliant Iridescence of Morpho Butterfly Wing Scales Is Due to Both a Thin Film Lower Lamina and a Multilayered Upper Lamina“. *Journal of Comparative Physiology A* 202 (5): 381–88.
<https://doi.org/10.1007/s00359-016-1084-1>.

Giraldo, Marco. 2008. „Butterfly wing scales: Pigmentation and structural properties“. *Adv Insect Physiol* 38 (Januar).

Gmelch, Max, und Sebastian Reineke. 2019. *Durchblick in Optik: mit Phänomenen, Formeln und Fragen zum Verständnis*. Lehrbuch. Berlin: Springer Spektrum.

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58939-7>.

Gressner, A. M. 2013. *Lexikon der medizinischen Laboratoriumsdiagnostik*. 2., Überarbeitete und Erweiterte Auflage. Berlin: Springer.

Gute, Heike. 2021. „Entwicklung einer Methode zur bioinspirierten Farbgebung von Oberflächen durch Imitation von Strukturfarben“. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Han, Zhiwu. 2022. *Nature-Inspired Structured Functional Surfaces: Design, Fabrication, Characterization, and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH.

Han, Zhiwu, Zhibin Jiao, Shichao Niu, und Luquan Ren. 2019. „Ascendant Bioinspired Antireflective Materials: Opportunities and Challenges Coexist“. *Progress in Materials Science* 103 (Juni): 1–68. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.01.004>.

Han, Zhiwu, Bo Li, Zhengzhi Mu, Meng Yang, Shichao Niu, Junqiu Zhang, und Luquan Ren. 2015. „An Ingenious Super Light Trapping Surface Templated from Butterfly Wing Scales“. *Nanoscale Research Letters* 10 (1): 344. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1052-7>.

Han, Zhiwu, Shichao Niu, Chunhui Shang, Zhenning Liu, und Luquan Ren. 2012. „Light Trapping Structures in Wing Scales of Butterfly Trogonoptera Brookiana“. *Nanoscale* 4 (9): 2879. <https://doi.org/10.1039/c2nr12059c>.

Huang, Zhongjia, Xinying Shi, Gang Wang, Petri Leukkunen, Marko Huttula, und Wei Cao. 2020. „Antireflective Design of Si-Based Photovoltaics via Biomimicking Structures on Black Butterfly Scales“. *Solar Energy* 204 (Juli): 738–47.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.031>.

Ingram, A.L, und A.R Parker. 2008. „A review of the diversity and evolution of photonic structures in butterflies, incorporating the work of John Huxley (The Natural History Museum, London from 1961 to 1990)“. *Philosophical Transactions of the Royal Society*

B: Biological Sciences 363 (1502): 2465–80. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2258>.

Kempkens, Wolfgang. 2018. „Schmetterlingsflügel verbessert Solarzellen - ingenieur.de“. *ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure*. Zugriff am: 21. Oktober 2023.

<https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/rekorde/schmetterlingsfluegel-verbessert-solarzellen/>.

Khursheed, Anjam. 2011. *Scanning Electron Microscope Optics and Spectrometers*. New Jersey: World Scientific.

Kinoshita, S., S. Yoshioka, und J. Miyazaki. 2008. „Physics of structural colors“. *Reports on Progress in Physics* 71 (7): 076401. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/71/7/076401>.

Kinoshita, S., S. Yoshioka, N. Okamoto, und Y. Fujii. 2002. „Photophysics of Structural Color in the Morpho Butterflies“, September.

Kinoshita, Shūichi. 2008. *Structural colors in the realm of nature*. Singapore; Hackensack, NJ: World Scientific.

Kinoshita, Shuichi, und Shinya Yoshioka. 2005. „Structural Colors in Nature: The Role of Regularity and Irregularity in the Structure“. *ChemPhysChem* 6 (8): 1442–59. <https://doi.org/10.1002/cphc.200500007>.

Kolle, Mathias. 2011. *Photonic Structures Inspired by Nature*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15169-9>.

Lee, Suyoung, Lam Tan Hao, Jeyoung Park, Dongyeop X. Oh, und Dong Soo Hwang. 2023. „Nanochitin and Nanochitosan: Chitin Nanostructure Engineering with Multiscale Properties for Biomedical and Environmental Applications“. *Advanced Materials* 35 (4): 2203325. <https://doi.org/10.1002/adma.202203325>.

Lou, Shuai, Xingmei Guo, Tongxiang Fan, und Di Zhang. 2012. „Butterflies: Inspiration for Solar Cells and Sunlight Water-Splitting Catalysts“. *Energy & Environmental Science* 5 (11): 9195. <https://doi.org/10.1039/c2ee03595b>.

Meschede, Dieter, und Christian Gerthsen. 2015. *Gerthsen Physik*. 25. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer Spektrum.

Nachtigall, Werner. 2010. *Bionik als Wissenschaft: Erkennen → Abstrahieren → Umsetzen*. Berlin Heidelberg Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10320-9>.

„Optisches Gitter: Gitterkonstante, Formeln & Aufgaben“. o. J. StudySmarter. Zugriff am: 4. Januar 2024. <https://www.studysmarter.de/schule/physik/optik/optisches-gitter/>.

Peters, Ian Marius. 2009. „Photonic Concepts for Solar Cells“. Freiburg im Breisgau: Albert-Ludwigs-University.

Pohl, Robert Wichard. 2018. *Pohls Einführung in die Physik. Band 2: Elektrizitätslehre und Optik / Klaus Lüders, Robert Otto Pohl (Hrsg.)*. Herausgegeben von Klaus Lüders und Robert O. Pohl. 24., Gründlich überarbeitete Auflage. Lehrbuch. Berlin [Heidelberg]: Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54855-4>.

Quinn, Patrick S. 2022. *Thin section petrography, geochemistry & scanning electron microscopy of archaeological ceramics*. Archaeopress archaeology. Oxford: Archaeopress.

Roth, Stefan, und Achim Stahl. 2019. *Optik: Experimentalphysik - anschaulich erklärt*. Lehrbuch. Berlin [Heidelberg]: Springer Spektrum.

Schiffer, Hans-Wilhelm und Burkhard von Kienitz. 2020. „Globale Szenarien und Prognosen zur Energieversorgung im Vergleich“, April. <https://www.weltenergieerat.de/wp-content/uploads/2020/05/Szenarien-und-Prognosen-weltweit-im-Vergleich.pdf>.

„Schmetterlingsflügel inspiriert Photovoltaik: Absorption lässt sich um bis zu 200 Prozent steigern“. 2018. *Biokon Bionik Kompetenz Netz* (blog). Zugriff am: 5. Januar 2024. <https://www.biokon.de/schmetterlingsfluegel-inspiriert-photovoltaik-absorption-laesst-sich-um-bis-zu-200-prozent-steigern/>.

Schneider, Christian. 2016. *Licht in der Welt der Nanotechnologie: Ein verständlicher Einstieg in die Grundlagen und Anwendungen*. 1. Aufl. 2016. essentials. Wiesbaden s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Siddique, Radwanul H., Yidenekachew J. Donie, Guillaume Gomard, Sisir Yalamanchili, Tsvetelina Merdzhanova, Uli Lemmer, und Hendrik Hölscher. 2017a. „Bioinspired Phase-Separated Disordered Nanostructures for Thin Photovoltaic Absorbers“. *Science Advances* 3 (10): e1700232. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700232>.

— — —. 2017b. „Supplementary Materials for Bioinspired Phase-Separated Disordered Nanostructures for Thin Photovoltaic Absorbers“. *Science Advances* 3 (10). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700232>.

Siddique, Radwanul Hasan, Guillaume Gomard, und Hendrik Hölscher. 2015. „The Role of Random Nanostructures for the Omnidirectional Anti-Reflection Properties of the Glasswing Butterfly“. *Nature Communications* 6 (1): 6909. <https://doi.org/10.1038/ncomms7909>.

„Solar Technology with the Beauty of Butterfly Wings“. 2021. Fraunhofer-Gesellschaft. Zugriff am: 27. Januar 2024. <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2021/january-2021/solar-technology-with-the-beauty-of-butterfly-wings.html>.

Steglich, Patrick, und Katja Heise. 2019. *Photonik einfach erklärt: wie Licht die Industrie revolutioniert*. 1. Auflage 2019. essentials. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Spektrum.

Sukhoivanov, Igor A., und Igor V. Guryev. 2009. *Photonic Crystals: Physics and Practical Modeling*. Bd. 152. Springer Series in Optical Sciences. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02646-1>.

Sun, Jiyu, Bharat Bhushan, und Jin Tong. 2013. „Structural Coloration in Nature“. *RSC Advances* 3 (35): 14862. <https://doi.org/10.1039/c3ra41096j>.

Tipler, Paul A., und Gene Mosca. 2015. *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure*. Herausgegeben von Jenny Wagner. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54166-7>.

Urbansky, Frank. 2018. „Schmetterling als Vorbild für effizientere Solarzellen“. *springerprofessional.de*. Zugriff am: 21. Oktober 2023.

<https://www.springerprofessional.de/photovoltaik/energienutzung/schmetterling-als-vorbild-fuer-effizientere-solarzellen/15443388>.

„Welche Wirkungsgrade haben Solarzellen?“ 2023. Photovoltaik-Anbieter für Module und Speicher | Solarwatt. Zugriff am: 4. Januar 2024.

<https://www.solarwatt.de/ratgeber/wirkungsgrad-solarzelle-und-pv>.

Wesselak, Viktor, und Sebastian Voswinckel. 2016. *Photovoltaik: wie Sonne zu Strom wird*. 2. Auflage. Technik im Fokus. Berlin Heidelberg: Springer.

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-48906-2>.

„Wirkungsgrad moderner Solarzellen – einfach und verständlich erklärt!“ o. J. EIGENSONNE. Zugriff am: 4. Januar 2024.

<https://www.eigensonne.de/ratgeber/photovoltaik/wirkungsgrad/>.

Xu, Quan, Wenwen Zhang, Chenbo Dong, Theruvakkattil Sreenivasan Sreeprasad, und Zhenhai Xia. 2016. „Biomimetic Self-Cleaning Surfaces: Synthesis, Mechanism and Applications“. *Journal of The Royal Society Interface* 13 (122): 20160300.

<https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0300>.

Yusoff, Yulisa Binti Mohd. 2022. „Copper Indium Gallium Selenide Solar Cells“. In *Comprehensive Guide on Organic and Inorganic Solar Cells*, 85–113. Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85529-7.00001-3>.

Zobl, Sigrid. 2018. *Strukturfarben im Brennpunkt der Bionik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-20803-5>.

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Titelbild (eigene Abbildung)	1
Abbildung 2: Besuch der Autorin im Schmetterlingshaus der Insel Mainau (eigene Abbildung)	8
Abbildung 3: Schmetterlinge aus dem Schmetterlingshaus der Insel Mainau (eigene Abbildung)	8
Abbildung 4: Reflexionsverhalten an der Oberfläche eines Schmetterlingsflügels mit den drei Effekten Schillern, Absorption und Streuung (Giraldo, 2008, 9)	9
Abbildung 5: Reflexionsverhalten eines Morphofalters im farbigen Bereich (Ahmed u. a., 2018, 27113)	10
Abbildung 6: REM des Technoramas in Winterthur (eigene Abbildung)	11
Abbildung 7: Vorbereiten der Schmetterlingsproben für das Besputtern (eigene Abbildung)	11
Abbildung 8: Besputterung der Schmetterlingsproben (eigene Abbildung)	12
Abbildung 9: Längenskalen und zugehörige Strukturen (eigene Abbildung)	13
Abbildung 10: Kurze Grundschuppe blau eingefärbt und längere Deckschuppe rot eingefärbt (eigene Abbildung)	13
Abbildung 11: Anordnung der Schuppen auf dem Flügel (eigene Abbildung)	14
Abbildung 12: Schuppenarten von unterschiedlichen Schmetterlingen (eigene Abbildung)	14
Abbildung 13: Bestandteile einer Nanostruktur (eigene Abbildung)	15
Abbildung 14: Arten der Nanostrukturen von Schmetterlingen (A, B, C, D, F, G, H: eigene Abbildungen; E: Butt u. a., 2016, 499)	16

Abbildung 15: Rippen- und Wabennanostrukturen schwarzer Schmetterlingsoberflächen (Huang u. a., 2020, 739–741)	16
Abbildung 16: Die Augen und der Kopf eines Schmetterlings (eigene Abbildung)	17
Abbildung 17: Reflexion farbiger Oberflächen in Abhängigkeit der Wellenlänge, blau: Rohdaten, rot: Trendkurve mit Polynomfunktion 5. Grades (eigene Messungen)	20
Abbildung 18: Reflexion schwarzer Oberflächen in Abhängigkeit der Wellenlänge, blau: Rohdaten, rot: Trendkurve mit Polynomfunktion 4. Grades (eigene Messungen)	23
Abbildung 19: Optische Effekte an den Strukturen von Schmetterlingen (eigene Abbildung)	24
Abbildung 20: Konstruktive und destruktive Interferenz (Steglich und Heise, 2019, 41)	25
Abbildung 21: Dünnschichtinterferenz an der Längs-/Querrippenstruktur eines Schmetterlings (eigene Abbildung)	26
Abbildung 22: Tannenbaumstruktur eines schillernden Schmetterlings (Quelle: https://www.nisenet.org/catalog/scientific-image-blue-morpho-butterfly-wing-microribs ; Zugriff: 04.01.2024)	27
Abbildung 23: Modell für die Multischichtinterferenz an der Nanostruktur eines schillernden Schmetterlings (eigene Abbildung)	28
Abbildung 24: Als Beugungsgitter wirkende Nanostrukturen eines schillernden Schmetterlings (A) und eines nicht-schillernden Schmetterlings (B) (eigene Abbildungen)	29
Abbildung 25: 1D, 2D und 3D photonische Kristalle (Lou u. a., 2012, 9204)	30
Abbildung 26: Modell für Reflexion über kurze Bandbreite an einem Schmetterlingsflügel (eigene Abbildung)	31
Abbildung 27: Absorptionseffekte an einem Schmetterlingsflügel (eigene Abbildung)	32

Abbildung 28: Morphofalter (eigene Aufnahme: entstanden im Schmetterlingshaus der Insel Mainau)	33
Abbildung 29: Schwarz-weißer Schmetterling und Morphofalter (eigene Abbildung)	33
Abbildung 30: Schwarz-weißer Schmetterling mit Ethanol besprüht und Morphofalter nur auf linkem Flügel mit Ethanol besprüht (eigene Abbildung)	34
Abbildung 31: Nanostruktur der Grundschuppe (eigene Abbildung)	35
Abbildung 32: Nanostruktur der Deckschuppe (eigene Abbildung)	35
Abbildung 33: Ausprägung der Tannenbaumstruktur bei Deckschuppen und Grundschuppen (Chen u. a., 2021, 4)	36
Abbildung 34: Zufällige Höhenverteilung der Rippen (Kinoshita, Yoshioka, und Miyazaki, 2008, 13)	37
Abbildung 35: Leistung des Photovoltaik-Zubaus und der installierten Photovoltaik-Anlagen in Österreich in Megawatt Peak (Biermayr u. a., 2023)	38
Abbildung 36: Faktoren, die den Wirkungsgrad einer PV-Anlage beeinflussen (eigene Abbildung; Daten: vgl. „Wirkungsgrad moderner Solarzellen – einfach und verständlich erklärt!“ o. J.; „Welche Wirkungsgrade haben Solarzellen?“ 2023)	39
Abbildung 37: Dünnschichtsolarzelle mit Elementen der Nanostrukturen von Schmetterlingen (eigene Abbildung; Daten: KIT: https://www.aph.kit.edu/kalt/img/content/ScilightBild_deutscheVersion_rdx_1200x653.png , Zugriff: 07.01.2024)	40
Abbildung 38: Nippelstruktur REM-Aufnahme (Lou u. a., 2012, 9202)	41
Abbildung 39: Reflexion der Nippelstruktur (Lou u. a., 2012, 9202)	41
Abbildung 40: Wabenstruktur REM-Aufnahme (Han u. a., 2012, 12)	42
Abbildung 41: Streifen auf den Längsrippen (Han u. a., 2015, 5)	43

Abbildung 42: REM-Aufnahme des Schmetterlings ‚Pachliopta aristolochiae‘ (Siddique u. a., 2017a, 2)	43
Abbildung 43: Einfluss des ‚Air Filling‘-Anteils auf Absorption (Siddique u. a., 2017b, 5)	44
Abbildung 44: Modelle der Nanolochstrukturen (Siddique u. a., 2017a, 4)	45
Abbildung 45: Absorption der vier periodischen Modelle unter einem normalen Einfallswinkel (Siddique u. a., 2017, 4)	46
Abbildung 46: Auswirkungen des Einfallswinkels (°) des Lichtes auf Absorption der periodischen Strukturen (Siddique u. a., 2017a, 4)	46
Abbildung 47: Modell der Morphostruktur mit Bragg-Stapel (Bläsi u. a., 2021, 1307)	49
Abbildung 48: Konzept für PV-Modul mit rauer Oberfläche (Bläsi u. a., 2017, 2)	50
Abbildung 49: Auswirkungen von einem grünen Modulglas auf die Farberscheinung eines PV-Moduls (Bläsi u. a., 2017, 2)	50
Abbildung 50: Reflexionsgrad der glasüberzogenen Photovoltaikmodule (Bläsi u. a., 2017, 3)	51
Abbildung 51: Gebäudeintegrierte PV-Module am Fraunhofer ISE (Quelle: https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2023/farbige-pv-module-mit-fraunhofer-ise-patent-erreichen-marktreife.html , Zugriff: 22.11.2023)	51
Abbildung 52: Leistung der vom Morphofalter inspirierten BIPV-Module im Vergleich zu einer herkömmlichen schwarzen Solarzelle (eigene Abbildung; Daten: Bläsi u. a., 2021, 1310)	52
Abbildung 53: Zusammenfassung ausgewählter in der Literatur beschriebener Wege zur Verbesserung von Solarzellen (eigene Abbildung auf der Basis der oben beschriebenen Quellen)	53

Abbildung 54: Oberflächenstrukturierung vom *Morpho achilles* (A, B) und vom *Papilio palinurus* (C) (eigene Abbildung)

56

11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigene REM-Aufnahmen <i>Papilio palinurus</i>	18
Tabelle 2: Eigene REM-Aufnahmen <i>Pachliopta kotzebuea</i>	18
Tabelle 3: Eigene REM-Aufnahmen <i>Morpho achiles</i>	19
Tabelle 4: Eigene REM-Aufnahmen <i>Morpho peleides</i>	19
Tabelle 5: Eigene REM-Aufnahmen <i>Graphium agamemnon</i>	20
Tabelle 6: Eigene REM-Aufnahmen <i>Papilio palinurus</i>	21
Tabelle 7: Eigene REM-Aufnahmen <i>Pachliopta kotzebuea</i>	21
Tabelle 8: Eigene REM-Aufnahmen <i>Papilio memnon</i>	21
Tabelle 9: Eigene REM-Aufnahmen <i>Morpho achiles</i>	22
Tabelle 10: Eigene REM-Aufnahmen <i>Graphium agamemnon</i>	22

Selbstständigkeitserklärung

Name: Ella Taenzer

Ich erkläre, dass ich diese vorwissenschaftliche Arbeit eigenständig angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Feldkirch, 09.02.2024

Ort, Datum

Ella Taenzer

Unterschrift