



Versuch: Beugungsphänomene und
biologisch inspirierte
Materialstrukturierung

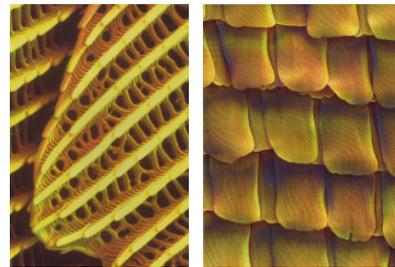
- Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe -

Prof. Dr. -Ing. Frank Mücklich

Was ist dran an Nano-Strukturen?

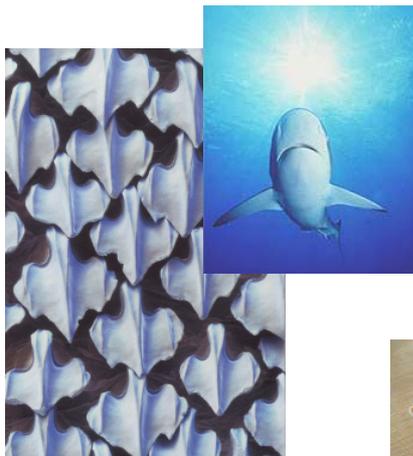
Biologisch inspirierte Materialstrukturierung - Was wir von Schmetterlingen lernen können

Der Flügel eines Schmetterlings ist so konstruiert, dass er gleich mehrere Funktionen auf faszinierende Weise kombiniert: Unter dem Mikroskop wird eine dachziegelartige Struktur sichtbar, deren einzelne Schuppen erneut eine noch feinere periodische Strukturierung aufweisen. Die stufenartige Bauweise ermöglicht dem Schmetterling einen besseren Auftrieb (Strömungsoptimierung) bei minimalem Gewicht (Leichtbauweise). Durch Reflexion und Interferenz an diesen feinen Strukturen entstehen zum einen die schillernden Farben, die bei der Partnerwahl eine wichtige Rolle spielen, und zum anderen kann die Körperwärme reguliert werden. Je nach Flügelstellung und Lichteinfall leitet der Schmetterling die wärmende Infrarotstrahlung zum Körper hin oder in die Umgebung.

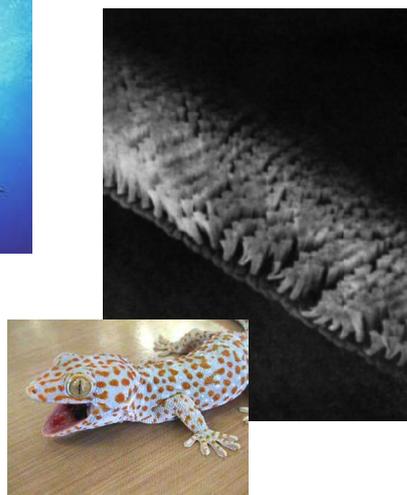


Bilder aus: „Bionik“ von W. Nachtigall

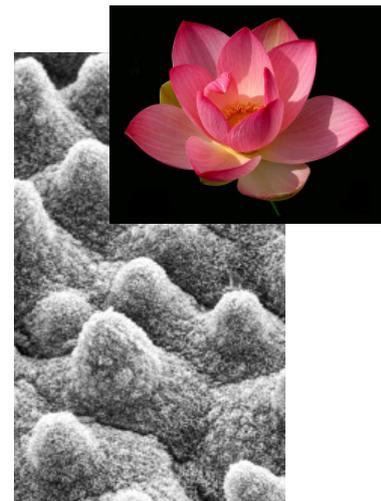
Die **Bionik (Biomimetik)** als Wissenschaft versucht, die Geheimnisse und „Erfindungen“ der Natur zu entschlüsseln und sie auf technische Anwendungen zu übertragen. Oft spielt bei der Optimierung von Oberflächen die Strukturierung auf Mykrometer- und sogar Nanometerebene eine entscheidende Rolle:



Rillen in Haifischschuppen setzen Strömungswiderstand herab



Härchen auf Geckofuß ermöglichen Haftung auf nahezu allen Oberflächen



Hügelartige Strukturen verstärken wasserabweisende Effekte beim Lotusblatt

Schüler - Blatt 2

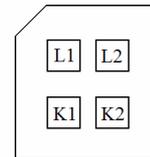
Versuchsbeschreibung

Laserpointer nicht in die Augen richten – Erblindungsgefahr!

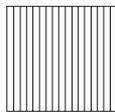
In diesem Versuch werden mit Hilfe von monochromatischem Laserlicht Informationen über die Strukturierung im unteren Mykrometerbereich auf Polymerplättchen gewonnen. Mit ähnlichen Techniken lassen sich die in der Natur vorkommenden Nanostrukturen charakterisieren.

Equipment:

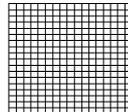
Halterung für Laserpointer
2 Laserpointer (rot, grün)
Probenhalter für Polymer-Plättchen
1 strukturiertes Polystyrol-Plättchen: →



Linienmuster:

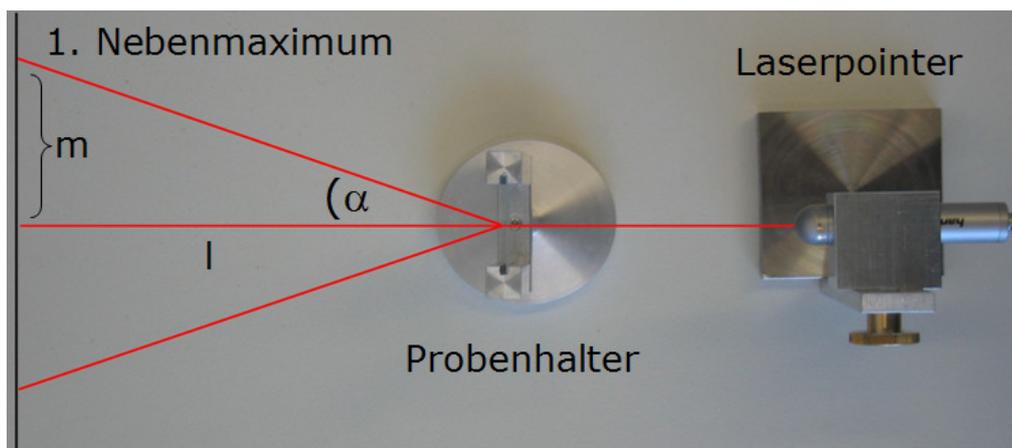


Kreuzmuster:



L1: Linienmuster mit Gitterkonstante 1
L2: Linienmuster mit Gitterkonstante 2
K1: Kreuzmuster mit Gitterkonstante 1
K2: Kreuzmuster mit Gitterkonstante 2

Versuchsanordnung: (Draufsicht)



Der Laserpointer soll entsprechend der obigen Ansicht so ausgerichtet werden, dass er einen strukturierten Bereich des Polymerplättchens im Probenhalter bestrahlt. Hinter dem als Beugungsgitter agierenden Probeplättchen bilden sich Beugungsmuster aus.

1.) Beobachten Sie die Beugungsmuster (insbesondere Abstand m zwischen Hauptmaximum und erstem Nebenmaximum) der verschiedenen Strukturierungen des Probeplättchens mit den beiden Laserpointern.

- Was stellen die Punkte dar, die das Beugungsmuster bilden, und durch welchen Fall der Superposition von Wellen entstehen sie?
- Weshalb ist bei einer Probe mit Linienmuster nur ein eindimensionales Beugungsmuster zu erkennen?
- Was ist der Unterschied zwischen dem roten und dem grünen Laserlicht?
(Warum verursachen diese verschiedene Beugungsmuster?)

Schüler - Blatt 3

Versuchsbeschreibung

Laserpointer nicht in die Augen richten – Erblindungsgefahr!

2.) Zeigen Sie die Beugungsbedingungen für Verstärkung und Auslöschung im Falle des Doppelspalts.

Gehen Sie hierbei von parallel einfallenden Strahlen aus, die durch die beiden Spalte mit dem Winkel α gebeugt werden. Der Gangunterschied zwischen den gebeugten Strahlen sei $\Delta\lambda$ und der Spaltabstand sei a . Zeigen Sie, dass gilt:

Für Maxima :

$$\sin \alpha = \frac{n \cdot \lambda}{a}$$

Für Minima :

$$\sin \alpha = \frac{n \cdot \lambda / 2}{a}$$

Tipp: Um konstruktive Interferenz zu erhalten, muss der Gangunterschied $\Delta\lambda$ gleich einem Vielfachen der Wellenlänge sein. Für destruktive Interferenz muss $\Delta\lambda$ gleich einem Vielfachen von $\lambda/2$ sein. (siehe Superpositionsprinzip)

3.) Die Gitterkonstante der Linienstrukturen (L_1 , L_2) soll bestimmt werden.

- a) Erzeugen Sie mit Hilfe des roten Lasers (λ_{rot} ca.660nm = $6,5 \cdot 10^{-7}$ m) und den Linienmustern ein Beugungsbild. Messen Sie den Abstand m zwischen Haupt- und erstem Nebenmaximum ($n=1$) und den Abstand l zwischen Beugungsgitter und Beugungsmuster möglichst exakt in cm aus. Bestimmen Sie mit diesen Werten den **Beugungswinkel α** und schließlich den **Gitterparameter a** der beiden Linienstrukturen. Tragen Sie die Ergebnisse in die untenstehende Tabelle ein.

Beugungswinkel für $n=1$:

$$\tan \alpha = \frac{m}{l}$$

α - Beugungswinkel

m - Abstand zu 1. Nebenmaximum

l - Abstand Beugungsmuster zu -Gitter

Beugungsbedingung:

$$\sin \alpha = \frac{n \cdot \lambda}{a}$$

λ - Wellenlänge

a - Gitterkonstante

n - Ordnung

- b) Die in 2.a) bestimmten Gitterparameter sollen nun verwendet werden, um auf dem umgekehrten Weg die Wellenlänge des grünen Lasers $\lambda_{\text{grün}}$ zu berechnen.

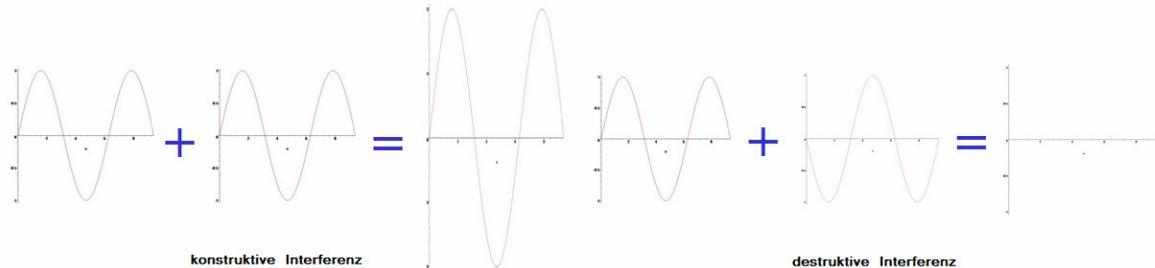
Struktur	Laser	m [cm]	l [cm]	α [°]	a [μm]	$\lambda_{\text{grün}}$ [nm]
L_1	rot					
	grün					
L_2	rot					
	grün					

Wellentheorie des Lichts

Sichtbares Licht ist nichts anderes als eine sich räumlich und zeitlich ausbreitende elektromagnetische Welle, die u.a. durch ihre Wellenlänge charakterisiert werden kann. Diese Welleneigenschaft des Lichts hat gewisse Folgen:

Superpositionsprinzip:

Treffen zwei Wellen in einem Raumgebiet aufeinander, so muss in jedem Punkt die Summe der Einzelwellen gebildet werden. Dies kann in den beiden Extremfällen zu konstruktiver (aufbauender) und destruktiver (auslöschender) Überlagerung führen.



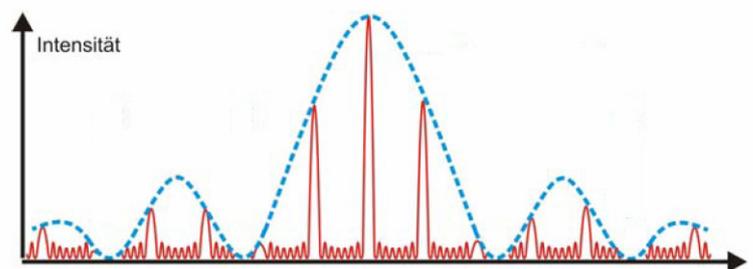
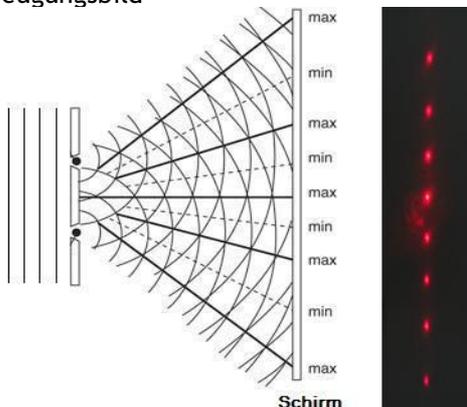
Beugungsphänomene und Huygens'sches Prinzip:

Wenn Wellen mit Hindernissen **der Größenordnung ihrer Wellenlänge** interagieren, so stellt man Abweichungen im Lichtpfad fest, die sich nicht mit den einfachen, geometrischen Gesetzen der Optik erklären lassen. Diese Erscheinung bezeichnet man als Beugung.

Die Wellentheorie versucht, diese Phänomene mit Hilfe des **Huygens'schen Prinzips** zu erfassen. Dieses besagt, dass die beobachteten Beugungserscheinungen aus der Überlagerung mehrerer Wellen entstehen. Als Ursprung dieser Wellen stellt man sich mehrere Punktquellen innerhalb des Spalts vor, die in Phase in alle Raumrichtungen emittieren und durch gegenseitige konstruktive und destruktive Überlagerung die beobachteten Muster erzeugen.

Beugungsmuster lassen sich kontrolliert erzeugen, indem man mehrere Spalte als Ausgangspunkte für solche Punktquellen aneinanderreicht. Dies führt in 2 Dimensionen zu kompletten **Beugungsgittern**. Der Abstand zwischen den Spalten - der **Gitterparameter** - geht direkt in die Beugungsbedingung ein.

Huygens'sches Prinzip am Beispiel zweier sich überlagernder Punktquellen am Doppelspalt und dazugehöriges Beugungsbild



Intensitätsverteilung eines Einfachspalts (blau) und eines Beugungsgitters (rot). Schaut man genau hin, bestehen die Hauptmaxima beim Gitter aus mehreren Maxima der einzelnen Spalte, die den Intensitätsverlauf des Einzelspaltes als Einhüllende haben. Man erkennt mit bloßem Auge also keinen wesentlichen Unterschied zwischen dem Beugungsbild eines Einzelspaltes und dem eines ausreichend großen Beugungsgitters.

Lehrer - Blatt 1

Zusatzinformationen für den/die Lehrer/in

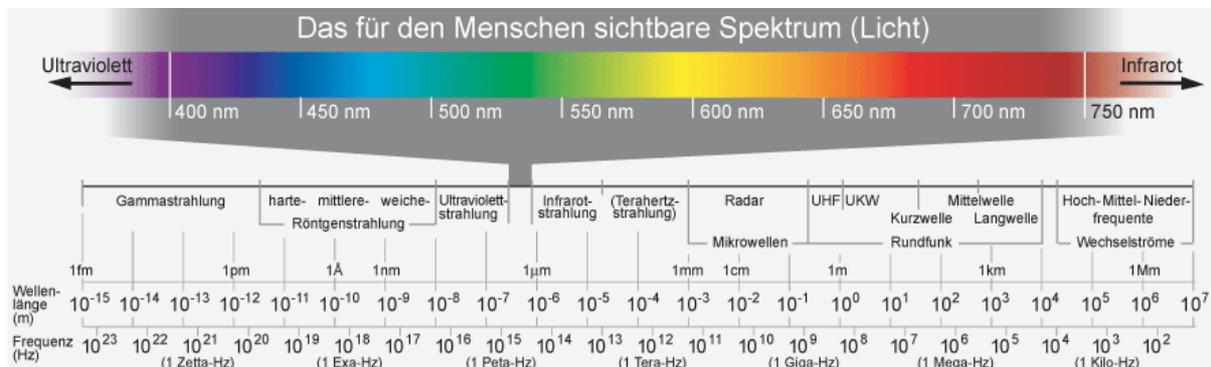
Zu den Fragen:

1.)

a) Die Beugungsmuster bestehen aus mehreren Punkten, in die der ursprüngliche Laserpointer-Strahl aufgesplittet wird. Diese entsprechen den Orten auf dem Schirm, für die es maximale konstruktive Interferenz gibt. *Sie entstehen also im Fall der konstruktiven Überlagerung von Wellen gemäß dem Superpositionsprinzip.* In diesen Punkten bündelt sich die Lichtintensität, die dem Quadrat der Wellenamplitude proportional ist.

b) Hinter dem ganzen Phänomen der Beugung steckt die Vorbedingung, dass die Wellenlänge der Strahlung (hier ca. $0,65\mu\text{m}$) ungefähr in der Größenordnung der Hindernisse (hier Spaltbreite $3\text{-}6\mu\text{m}$) sein muss. Die vertikalen Linienmuster streuen also nur in horizontaler Richtung, da ihre „Spaltbreite“ in vertikaler Richtung viel zu groß für diese Wellenlänge ist. Bei den kreuzförmigen Strukturen treten die Effekte von waagrechtem und senkrechtem Spalt gleichzeitig auf.

c) Verschiedenfarbiges Licht bedeutet verschiedene Wellenlänge. In der Beugungsbedingung für konstruktive Interferenz steht die Wellenlänge im Zähler. Für eine größere Wellenlänge ergibt sich so auch ein größerer Beugungswinkel.



Laserpointer erzeugen einen sehr intensiven Strahl linear polarisierten Lichtes, dessen Ausgangsleistung bei etwa 1mW liegt. Das so genannte Pumplicht wird in einer Laserdiode erzeugt und in einen verspiegelten Kristall (Typ abhängig von Wellenlänge) geleitet. Hier wird der Lichtstrahl mehrfach reflektiert und dadurch erheblich verstärkt, bevor er durch Linsen gebündelt schließlich freigegeben wird.

Lehrer - Blatt 2

Zusatzinformationen für den/die Lehrer/in

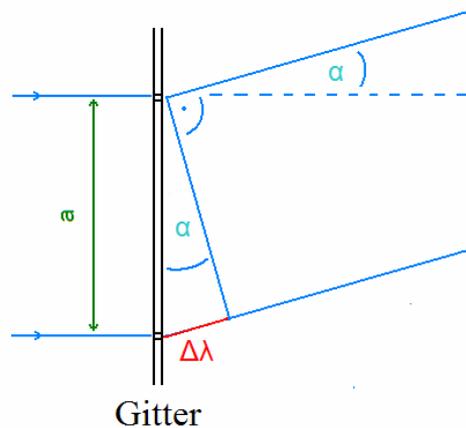
2.) Herleitung:

Für Maxima :

$$\sin \alpha = \frac{n \cdot \lambda}{a}$$

Für Minima :

$$\sin \alpha = \frac{n \cdot \lambda / 2}{a}$$



α - Beugungswinkel

λ - Wellenlänge

a - Gitterkonstante

d - Spaltbreite

n - Ordnung

3.)

a) Hier sollen nur die Linienstrukturen, nicht die Kreuzmuster betrachtet werden. Beide sollen sowohl mit rotem als auch mit grünem Laserlicht bestrahlt werden; m und l müssen also insgesamt 4-mal ausgemessen werden. In einem ersten Schritt wird der Beugungswinkel über den Tangens aus m und l berechnet. Danach wird die Beugungsbedingung für das erste Nebenmaximum nach a aufgelöst und eingesetzt.

b) Zur Bestimmung der Wellenlänge des grünen Laserlichts werden die vorher berechneten Gitterparameter a verwendet. Es muss allerdings der Beugungswinkel für das grüne Licht benutzt werden. Die Wellenlängen der Laserpointer lassen sich nicht exakt berechnen, da jeweils ein kleines Wellenlängenintervall vorliegt. Man errechnet also lediglich Mittelwerte. Folgende Werte sollten sich ergeben:

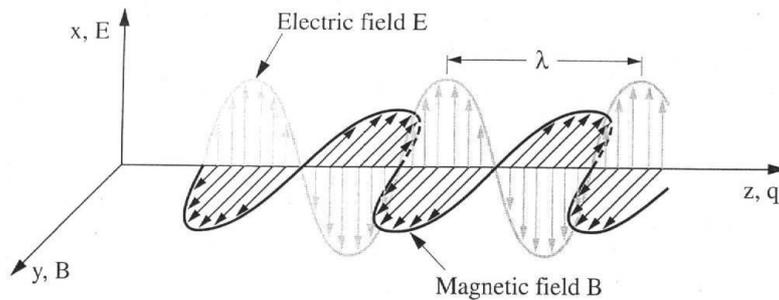
Struktur	Laser	m [cm]	l [cm]	α [°]	a [μm]	$\lambda_{\text{grün}}$ [nm]
L₁	rot				3 (2,8)	520
	grün					
L₂	rot				6 (5,9)	
	grün					

Der Doppelspalt ist das einfachste Beispiel eines Beugungsgitters. Erhöht man die Anzahl der Spalte, ändert sich prinzipiell nichts an der verwendeten Formel, lediglich die Maxima werden schmaler und ihre Intensität erhöht sich.

Zusatzinformationen für den/die Lehrer/in

Welle:

Eine Welle ist eine sich zeitlich und räumlich ausbreitende selbst erhaltende Störung eines Trägermediums. Bei Licht schwingen das magnetische und elektrische Feld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Transversalwelle).



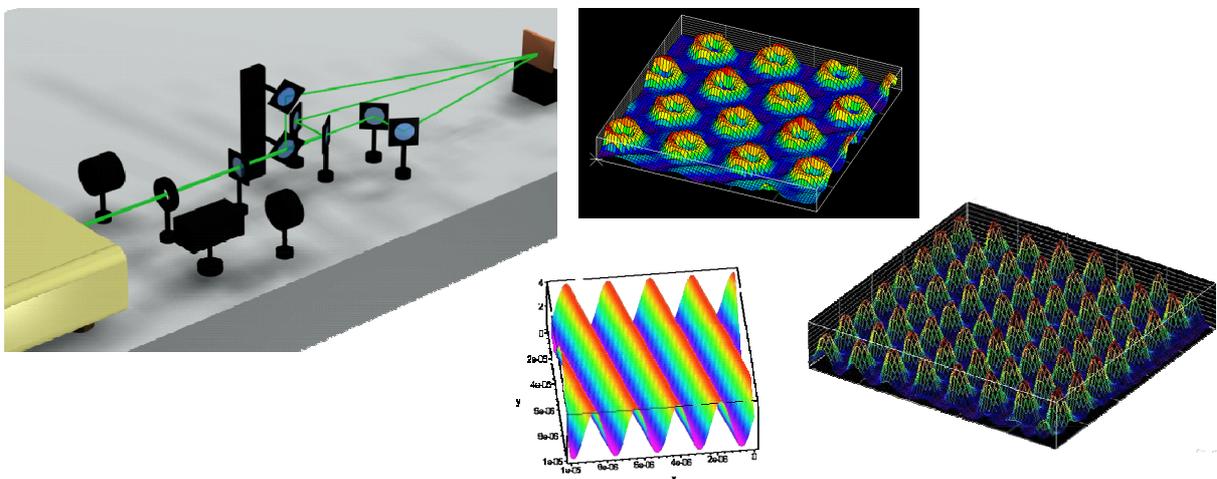
Beugungsgitter:

Wird gebildet aus sich abwechselnden, transparenten und lichtdurchlässigen Bereichen und durch die/den Gitterkonstante/Gitterparameter a beschrieben.



Laser-Interferenzstrukturierung:

Mit Hilfe eines 200 MW Nd-YAG Lasers kann durch Interferenz die Lichtenergie periodisch in die Materialoberfläche eingebracht werden. In den Intensitätsmaxima kommt es zum Materialabtrag und eine periodische Struktur entsteht. Durch Variation der Anzahl der Strahlen, der Winkel und der Laserenergien können zahlreiche unterschiedliche Strukturen erzeugt werden. Die im Versuch verwendeten Polymere wurden mit Hilfe eines solchen Lasers strukturiert. Diese Technik schlägt erneut eine Brücke zur Bionik, da durch sie in der Natur vorkommende Nano- und Mikrostrukturen reproduziert werden können.

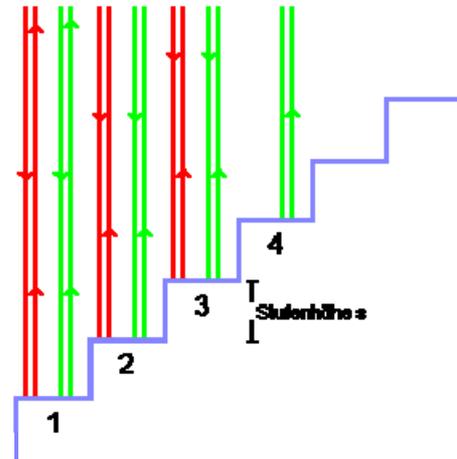


Schüler - Blatt 5

Zusatzblatt

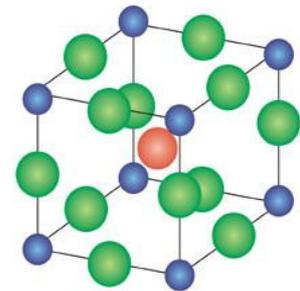
Interferenz am Schmetterlingsflügel:

Die schillernden Farben der Schmetterlingsflügel entstehen ebenfalls durch Interferenzen. Die periodische Struktur (\rightarrow Schüler - Blatt 1) auf den „Schuppen“ der Flügel besteht aus mehreren Stufen. Trifft Sonnenlicht auf diese Stufen, so werden alle Wellenlängen auf jeder Stufe reflektiert. Benachbarte reflektierte Strahlen weisen allerdings einen Gangunterschied von $2x$ der Stufenhöhe auf. Abhängig von der Stufenhöhe hat man so für eine bestimmte Wellenlänge (bestimmte Farben) gerade destruktive Interferenz, für eine andere Farbe gerade Verstärkung. So erscheint u.a. beim Pfauenauge für eine Stufenhöhe von 220nm die Farbe blau (λ_{blau} ca. 440nm) besonders intensiv.

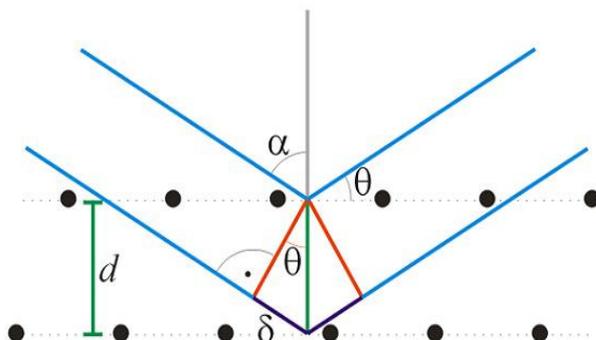


Röntgenbeugung an Kristallen

Passt man die elektromagnetischen Strahlung an, (Beugung nur an Objekten in Größenordnung der Wellenlänge) kann man ähnliche Beugungsphänomene ausnutzen, um kristalline Stoffe zu untersuchen. (Es handelt sich hierbei **nicht** um einfache Reflexion, sondern um Beugung der Röntgenstrahlen an der Elektronenhülle der Atome) Die Röntgendiffraktometrie arbeitet mit Röntgenstrahlen im Bereich von 10^{-11} - 10^{-9}m ; die atomaren Abstände in Kristallen liegen ebenfalls in dieser Größenordnung. Kristalline Stoffe sind durch eine feste, sich periodische wiederholende Anordnung von Atomen gekennzeichnet. Alle notwendigen Informationen (Atomart, Abstand...) sind in der Darstellung der so genannten Einheitszelle (rechts) zu erkennen.



Wie zur Bestimmung des Gitterparameters mit Laserlicht lassen sich Formeln zur Berechnung der Kristallgitterstruktur mittels Röntgenstrahlung aufstellen:



Röntgenstrahlen werden an zwei unterschiedlichen Gitterebenen mit dem Winkel 2α reflektiert. Durch den Gangunterschied 2δ stellt sich im Fall $2\delta = n\lambda$ konstruktive Interferenz ein. So entstehen ebenfalls Beugungsmuster, die mit entsprechenden Sensoren aufgenommen werden. Über sie lässt sich der Beugungswinkel und bei Kenntnis der Wellenlänge der Netzebenenabstand d herleiten:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$