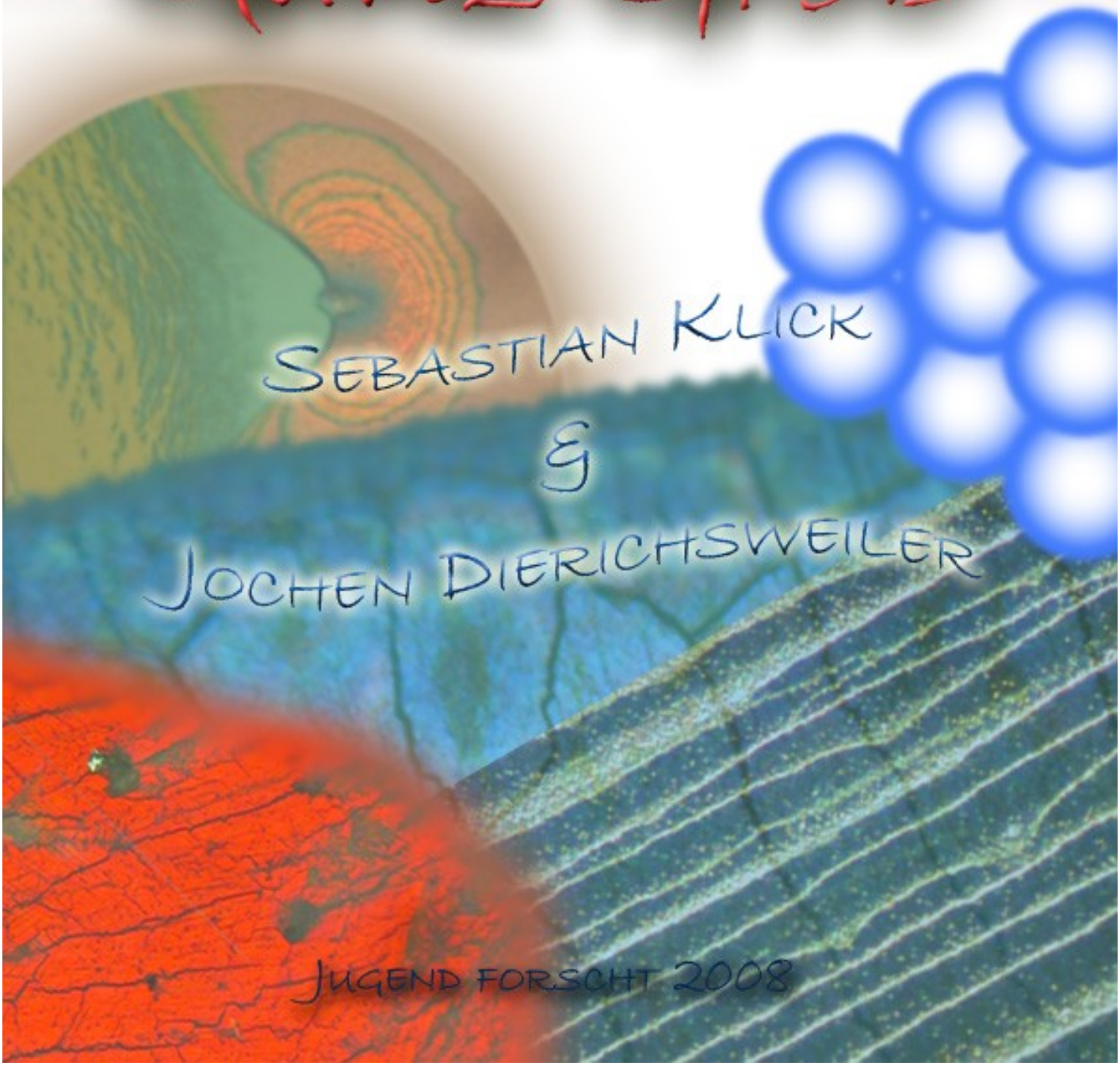
Kleine Kugeln

ganz Groß



Sebastian Klick

&

Jochen Dierichsweiler

Jugend forscht 2008

Kleine Kugeln – ganz groß

1. Kurzfassung

2. Zielsetzung

3. Photonische Kristalle aus SiO_2Kugeln

4. Photonische Kristalle aus Latexkugeln

5. Experimente mit unseren Photonischen Kristalle

6. Diskussion der Ergebnisse

7. Danksagung

8. Literatur- und Linkliste

1. Kurzfassung

In unserer Jugend-forscht-Arbeit haben wir uns das Ziel gesetzt, neue Experimente aus der Nanowelt für den Physikunterricht zu entwickeln. Dieses Ziel erreichten wir, indem wir eine preisgünstige Methode zur Herstellung von Photonischen Kristalle entwickelten. Diese Methode liefert innerhalb von 30min brauchbare Photonische Kristalle. Somit lassen sich Photonische Kristalle in einer Doppelstunde herstellen und experimentell untersuchen (z.B. Braggreflexion im sichtbaren Bereich). Außerdem konnten wir auch das wichtige Problem der Sicherheit lösen, somit steht einer spannenden und motivierenden Reise in die Nanowelt im Physikunterricht nichts mehr im Wege.

2. Zielsetzung

Die Nanotechnologie hat sich zu einer zukunftsträchtigen Schlüsseltechnologie entwickelt. Aus diesem Grund darf sie unserer Meinung nach im Physikunterricht nicht fehlen. Leider gibt es zur Zeit nur wenige Schulexperimente z.B.: Lotuseffekt und magnetische Flüssigkeiten.
In unserer Jugend-forscht-Arbeit haben wir uns das Ziel gesetzt, neue Experimente aus der Nanowelt für den Physikunterricht zu entwickeln. Diese Experimente sollten erstens kostengünstig sein und zweitens in einer Schulstunde bzw. einer Doppelstunde durchzuführen sein. Geeignet hierfür erschienen uns Experimente mit Photonischen Kristallen.

3. Photonische Kristalle aus SiO_2-Kügelchen

Photonische Kristalle werden oft als optische Halbleiter bezeichnet, da sie auch eine Bandlücke im sichtbaren Bereich besitzen. Das heißt, sie reflektieren eine Farbe und lassen den Rest des Lichtes durch. In der Natur gibt es Schmetterlinge, die ihre schillernden Farben Photonischen Kristallen verdanken. Auch Opale bestehen aus Photonischen Kristallen. Solche Farben haben den Vorteil, dass sie im Gegensatz zu chemischen Farbstoffen nicht ausbleichen.

Abb. 3.1 Unser Ultraschallnebler im Einsatz

Um Photonische Kristalle näher erforschen zu können, muss man sie zunächst einmal herstellen. Dazu wollten wir die Reste der SiO_2-Kugelsuspensionen nutzen, die Florian Kotzur und Stefan Krumpen im Jahre 2005 im Rahmen ihrer Jugend-forscht-Arbeit „Photonic Crystals“ hergestellt haben. Um etwaige Verklumpungen zu lösen, benutzten wir einen leistungsstarken Ultraschallnebler, da wir in der Schule kein Ultraschallbad besitzen (Abb. 3.1).

Wie man der Abbildung 3.2 entnehmen kann gelang es uns nicht aus diesen Resten Photonische Kristalle herzustellen, da die SiO_2-Kugeln zu stark verklumpt waren.

Natürlich hätten wir nach dem Stöber-Fink-Bohn-Verfahren neue SiO2-Kugeln herstellen können. Dies ist jedoch sehr zeitaufwendig und die hierzu benötigten Chemikalien sind nicht gerade preiswert. Beides - hohe Kosten und großer Zeitaufwand – entsprachen aber nicht unserer Zielsetzung.

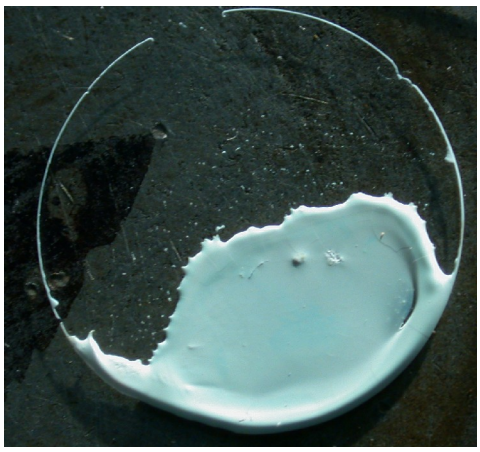


Abb.:3.2: Ergebnis unserer ersten Versuche zur Herstellung von Photonischen Kristallen

4. Photonische Kristalle aus Latexkugeln

4.1 Ein Neuanfang

Zuerst beschlossen wir neue SiO_2-Kugeln zu kaufen. Als wir erfuhren, dass 15ml dieser Kugelsuspensionen über 600€ kosten verwarfen wir diesen Plan. Preiswerter waren Latexkugelsuspensionen, von denen 5ml für 28€ im Handel erhältlich sind. Dies ist immer noch ein stolzer Preis und so beschäftigten wir uns mit der Frage, welches Volumen man mit diesen Kügelchen füllen kann.
In 1ml-Lösung sind nach Herstellerangaben 6,6 x 10^{10} Latexkugeln von 303nm = 0,303µm Durchmesser, d.h. in 5ml Lösung sind 5x 6,6 x 10^{10} Latexkugeln
Für das Volumen einer solchen Kugel gilt: $V = 4/3\pi r^3 = 4/3\pi\ (0{,}1515\mu m)^3 = 0{,}01456553724\mu m^3$?
Also: 5 x 6,6 x 10^{10} x $0{,}01456553724\mu m^3 = 0{,}4806627289 \times 10^{10}\mu m^3 = 4{,}8mm^3$
Damit kann man also einen 4,8mm langen Kanal von 1mm Breite 1mm hoch füllen.
Dies ist in der Tat nicht sehr viel! Wenn man die Zwischenräume zwischen den Kugeln vernachlässigt erhält man diesen Kanal: ▬

Zunächst wollten wir schon resignierend aufgeben, doch dann kam uns die rettende Idee. Aus welchen Gründen müssen Photonische Kristalle groß sein? Alle Schulen besitzen doch Mikroskope. So beschlossen wir Photonische Kristalle im Mikrometerbereich herzustellen. So braucht man nur einen Tropfen um ein Photonisches Kristall zu erzeugen. Aus 5ml Kugelsuspension kann man so ca. 60 Photonische Kristalle herstellen.

4.2 Reise in die Nanowelt

Um die Nanowelt einigermaßen zu verstehen und unsere Versuche nanogerecht planen zu können, versuchten wir uns gedanklich in die Nanowelt zu versetzen.
Dazu muss man sich zunächst an die anderen Bedingungen dieser fremden Welt gewöhnen. Die Schwerkraft spielt hier kaum noch eine Rolle, wohingegen die elektrischen Kräfte (Kapillarkräfte Oberflächenspannung usw.) eine sehr große Bedeutung gewinnen, da die Oberfläche im Vergleich zum Volumen deutlich größer ist als in der Welt an die wir gewohnt sind. Außerdem werden die Latexkügelchen durch die Brownsche Molekularbewegung fortwährend hin und her geschubst.

Wenn wir dies auf uns übertragen, so würden wir in einer sehr seltsamen Welt leben. Wir würden fortlaufend hin und her geschubst, oder wir würden an vielen Stellen einfach kleben bleiben. Auch müssten wir uns erst an diese Größenverhältnisse gewöhnen. Für ein 303nm großes Latexkügelchen ist eine 0,2mm hohe Deckglaskante so hoch wie 7 übereinander gestellte Kölner Dome für einen erwachsenen Menschen.

4.3 Die Deckglasmethode

Mit der von uns entwickelten Deckglasmethode lassen sich innerhalb von 30min brauchbare Photonische Kristalle herstellen.
Dazu wird ein Tropfen Kugelsuspension auf einen sauberen Objektträger gegeben. Danach wird ein Deckglas auf diesen Tropfen gelegt. Die Kugelsuspension wird durch die Gewichtskraft des Deckglases an den Rand gedrückt. Dort kann das Wasser verdunsten und die Kügelchen ordnen sich auf Grund der Kapillarkräfte an der Deckglaskante zu einem Photonischen Kristall an.

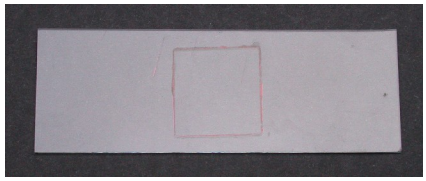


Abb. 4.3.1 ein Photonisches Kristall hergestellt mit unserer Deckglasmethode

Die ca. 500µm großen Kristalle mit ausgeprägten Wülsten (40-80µm) lassen sich unter einem Auflichtmikroskop sehr gut beobachten. Wir waren begeistert von der Farbbrillanz und Formenvielfalt unserer Kristalle (siehe folgende Abbildungen).

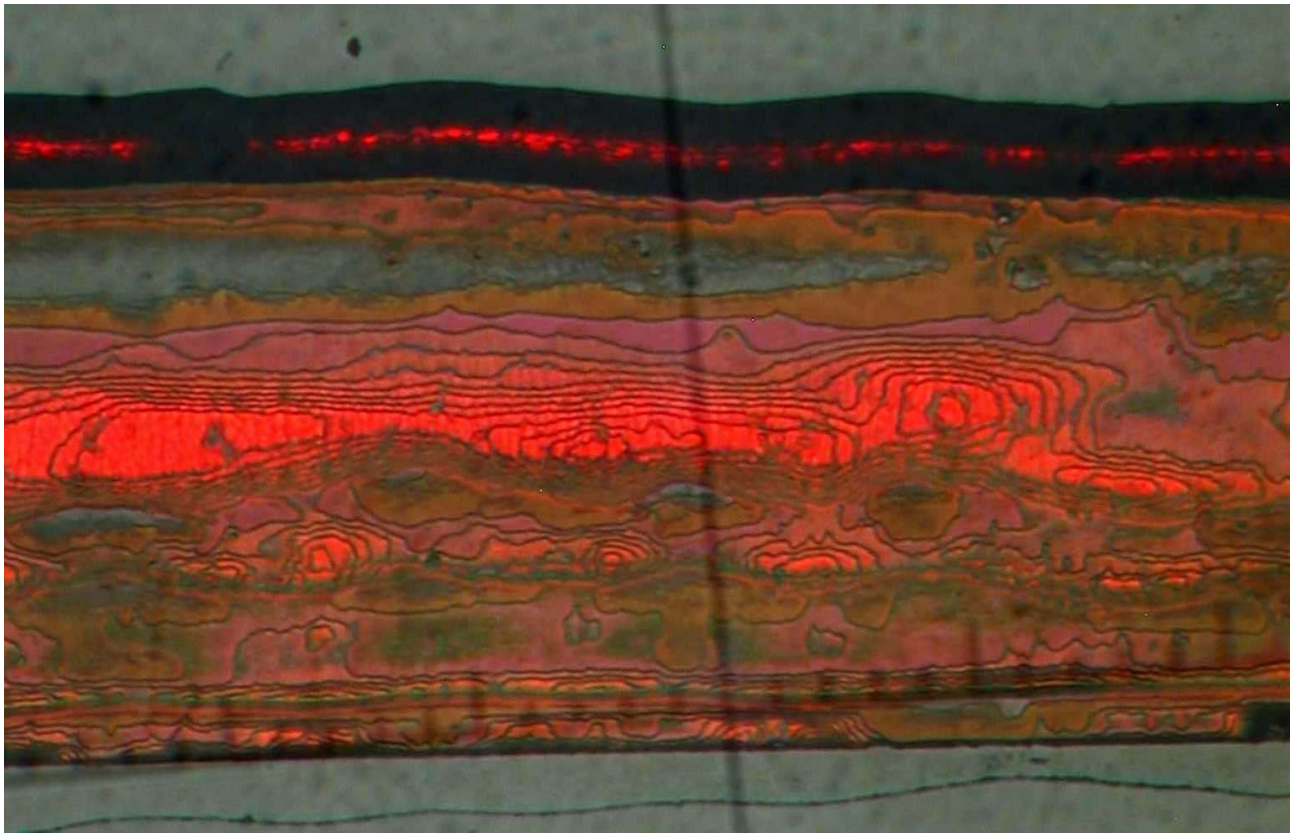


Abb. 4.3.1: Photonisches Kristall aus 303nm Latexkugeln

In Abb. 4.3.1 kann sehr schön die unterschiedliche Schichtdicke der Kugeln erkennen. Durch einen nahezu kugelfreien Bereich getrennt, sieht man oben im Bild einen sehr hohen Wulst, der ein kräftiges Rot zeigt. Abbildung 4.3.2 zeigt diesen Wulst im Durchlicht - erwartungsgemäß in der Farbe grün.

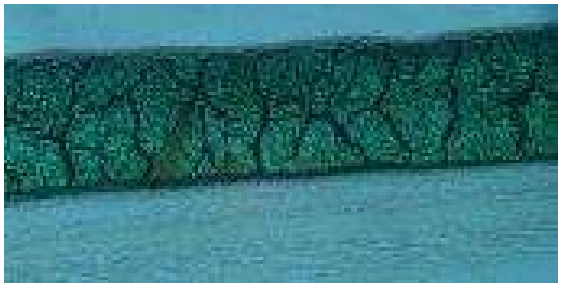


Abb.:4.3.2:Photonisches Kristall aus 303nm Latexkugeln im Durchlicht

Mit 204nm Latexkügelchen konnten wir wunderschöne blaue Kristalle herstellen, die im Durchlicht gelb erscheinen.

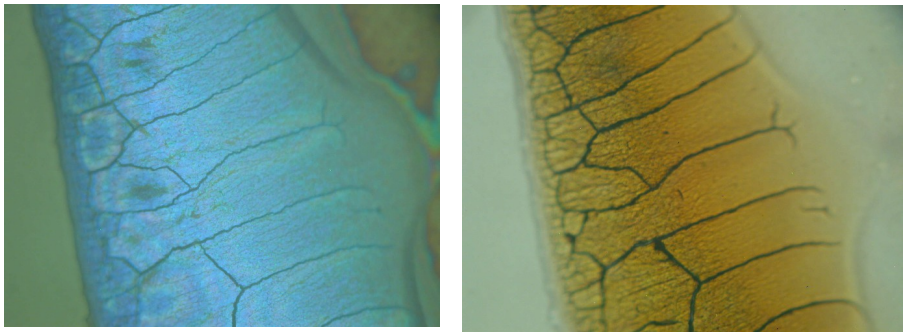


Abb. 4.3.3: Photonisches Kristall aus 204nm Kügelchen

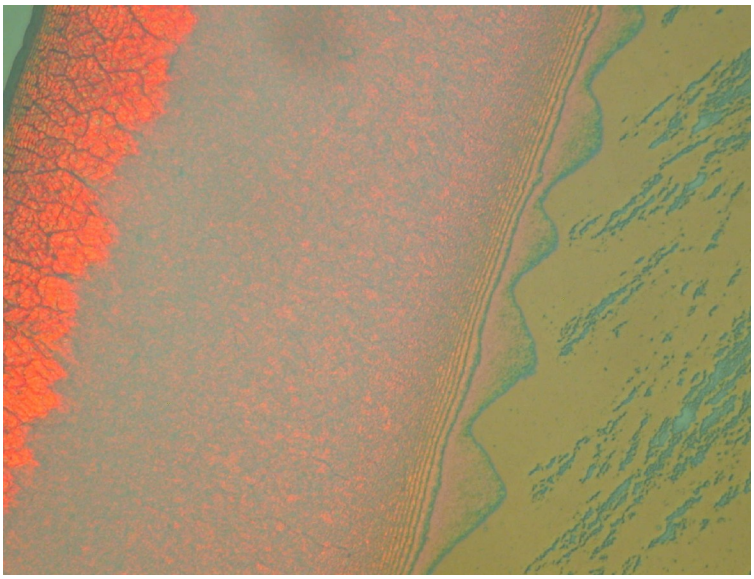


Abb. 4.3.4 Dreiecksbildung bei einem Photonischen Kristall aus 303nm Kügelchen auf polysinem Objektträger

Außerdem stellten wir Photonische Kristalle auf polysinen Adhäsionsobjektträgern, die eine permanente positive Oberflächenladung besitzen, her. Dazu gaben wir einen Tropfen Kugelsuspension auf einen solchen Objektträger und ließen ihn trocknen. Dabei konnten wir eine interessante Dreiecksbildung beobachten (Abb. 4.3.4), für die wir bisher allerdings noch keine Erklärung gefunden haben.

Bei unserer Reise in die Nanowelt haben wir wunderschöne Photonische Kristalle gesehen. Manchmal waren es richtige Gemälde wie zum Beispiel in Abbildung 4.3.5.

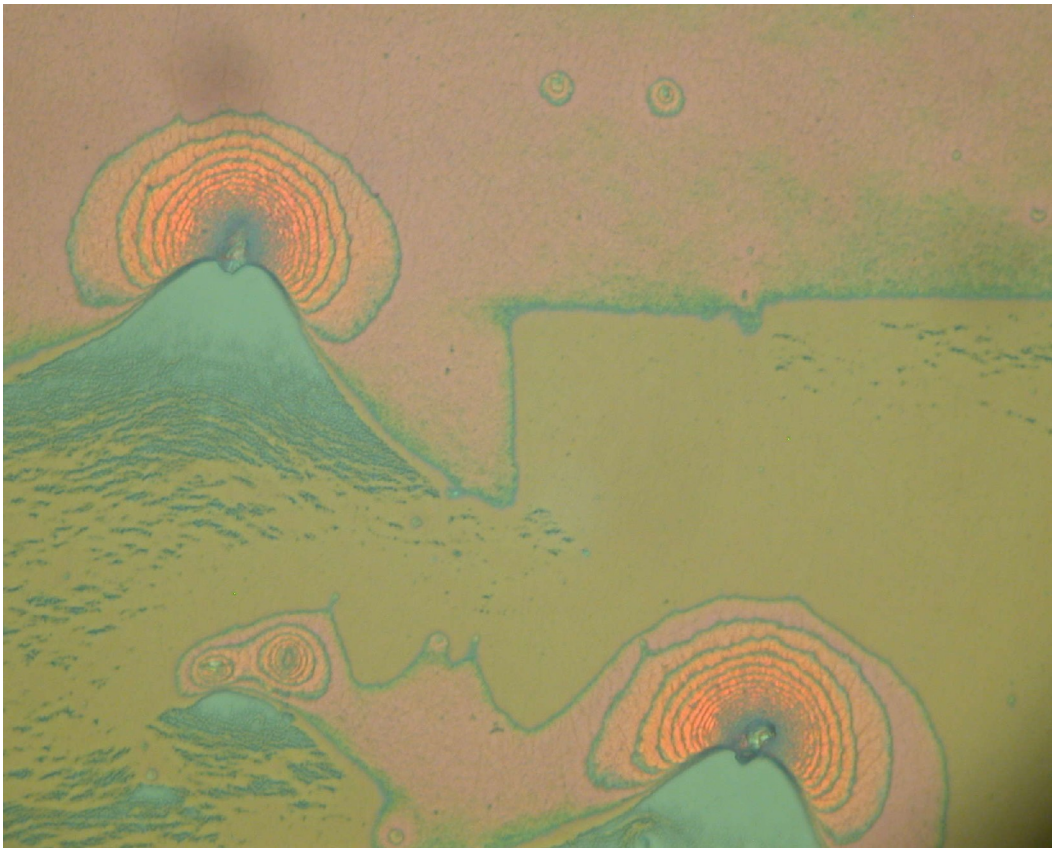


Abb. 4.3.5 Photonisches Kristall aus 303nm Kügelchen auf polysinem Objektträger

5. Experimente mit unseren Photonischen Kristallen

5.1 Braggreflexion

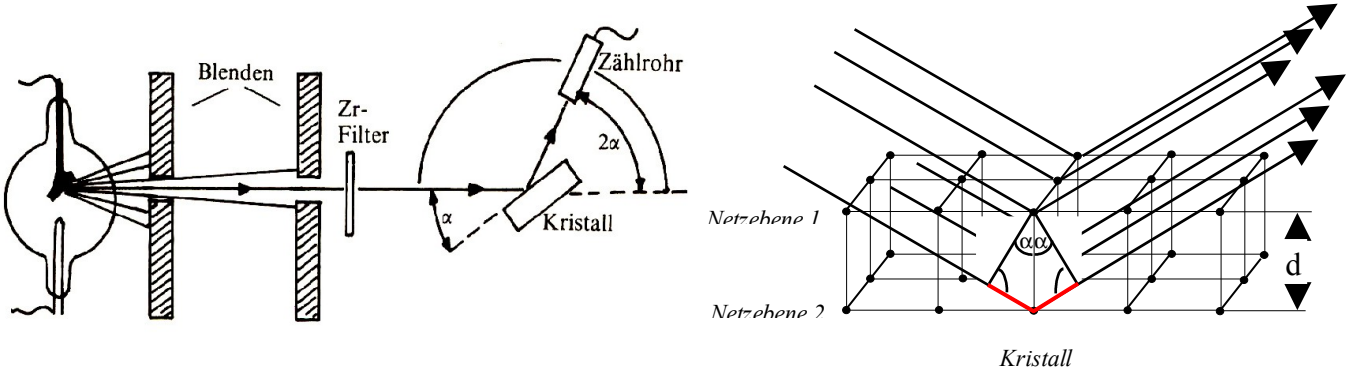


Abb.: 5.1.1 :Braggreflexion mit Röntgenstrahlung an einem drehbaren NaCl-Kristall

In der Schule verbindet man Braggreflexion stets mit Röntgenstrahlung (Abb.5.1.1).

$$2d \cdot \sin\alpha_k = k \cdot \lambda$$

Aber auch die Farben eines Photonischen Kristalls entstehen schlicht und einfach durch Braggreflexion. Nur wenn der Gangunterschied der interferierenden Wellen ein ganzzahliges Vielfaches von λ ist, registriert man ein Helligkeitsmaximum.

Bestrahlt man ein aus 303nm großen Latexkugeln gefertigtes Photonisches Kristall senkrecht zur Kristalloberfläche (sin90° = 1), so ergibt sich nach obiger Gleichung für k = 1 eine durch Interferenzreflexion verstärke Welle mit der Wellenlänge λ = 2d = 2·303nm = 606nm (rot). Dies deckt sich auch mit unseren Beobachtungen, denn die aus 303nm Latexkugeln gefertigten Photonischen Kristalle erscheinen im Auflicht rot.

Doch ganz so einfach ist die Sache nicht (Abb. 5.1.2)!

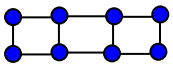
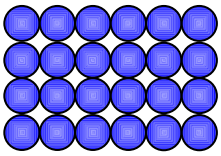
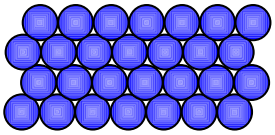


Abb. 5.1.2: Nicht so ...



...auch nicht so...



...sondern so ordnen sich die Kugeln an

Abb. 5.1.3: Unser Murmelversuch

Für den Abstand der Kugelschichten können wir nicht einfach den Kugeldurchmesser einsetzen, da der Abstand der Kugelschichten bei einer dichten Kugelpackung kleiner ist als Durchmesser der Kugeln. Den wirklichen Abstand der Schichten bestimmten wir experimentell mit Murmeln.
Eine Murmel hat den Durchmesser 1,6cm. 4 Murmelschichten sind 5cm hoch. Daraus folgt, dass eine Kugellage 1,25cm hoch ist. Übertragen auf die 303nm Latexkugeln bedeutet das,

dass die Kugellagen aus nur 236,72nm hoch sind. Wenn man diesen Wert nun in die Braggleichung einsetzt, erhält man $\lambda = 473,4nm$. Dies bedeutet, dass unsere Photonischen Kristalle eine blaue Farbe haben müssten. Trotz dieser Rechnung änderte sich die Farbe unserer Kristalle aber nicht. Sie strahlten uns in einem kräftigen Rot entgegen!
Wir zweifelten jedoch nicht an der Gültigkeit der Braggleichung. Nach einiger Überlegung kamen wir auf die Idee, dass auch die Brechzahl n = 1,5 der Latexkugeln eine Rolle spielt. D.h., die Wellenlänge im Photonischen Kristall aus Latexkugeln beträgt $\lambda_{Luft.} = \lambda_{Latex} \cdot 1,5$ somit gilt:
$\lambda = 1,5 \cdot 2 \cdot 237nm = 710nm$ dies entspricht einem zu tiefen Rot, das wir selbst bei einem gut ausgeprägten Photonischen Kristall nicht sehen können. Allerdings ist zwischen den Latexkugeln auch noch Luft (24%) sodass man mit dem Brechungsindex n= 1,39 rechnen muss. Daraus folgt:
$\lambda = 1,39 \cdot 2 \cdot 237nm = 659nm$ also ein rot wie wir es auch sehen können (Abb.: 5.1.4)

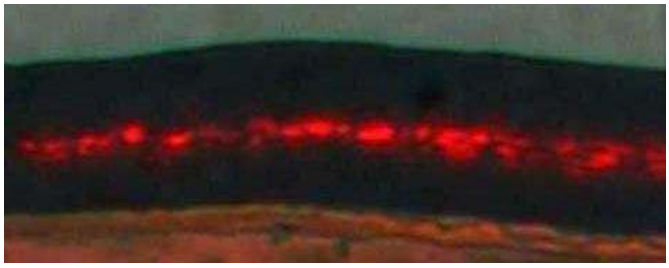


Abb.: 5.1.4: Das kräftige Rot eines gut ausgeprägten Photonischen Kristalls

Auch die Braggsche Drehkristallmethode lässt sich mit Photonischen Kristallen im optischen Bereich realisieren(Abb.5.1.5 und 5.1.6).

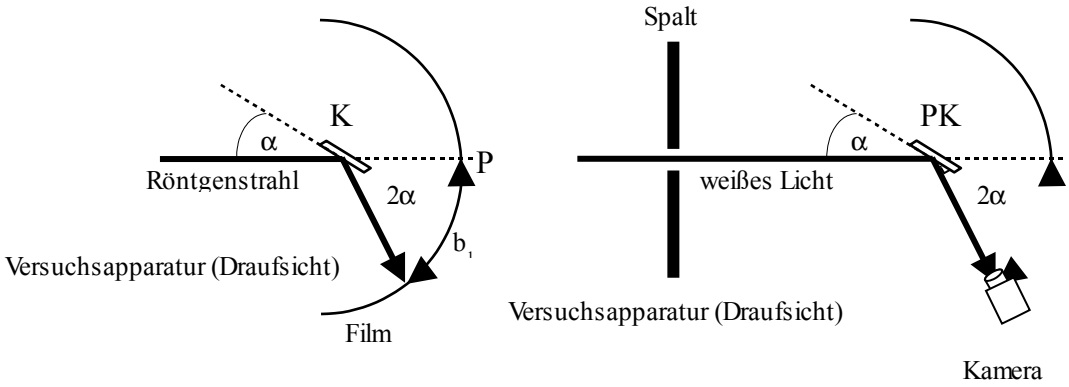


Abb. 5.1.5: Die Braggsche Drehkristallmethode mit Röntgenstrahlung und Licht

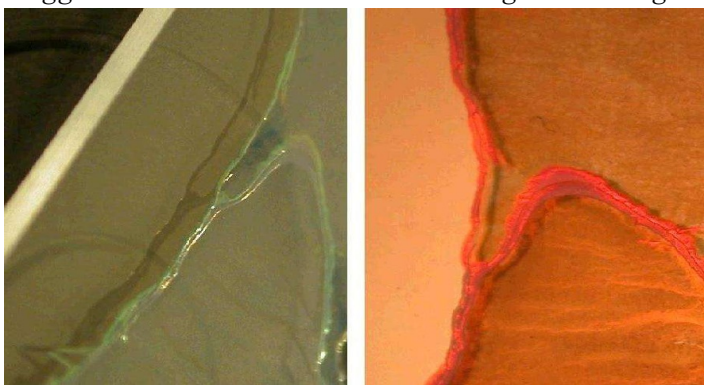


Abb.: 5.1.6 Unser Photonisches Kristall unter einem Glanzwinkel von 90° (links) bzw 30° (rechts)

5.2 Sicherung der Photonischen Kristalle

Unsere Photonische Kristalle waren wunderschön anzusehen, aber auch sehr empfindlich (Abb. 5.2.1). Aus diesem Grund beschlossen wir, sie in Klarlack einzugießen. Dabei wurden die Kristalle aber zerstört. Danach versuchten wir sie ganz vorsichtig mit Haarspray zu sichern. Dabei wurden die Kristalle zwar nicht zerstört, aber sie verloren ihre Farbe. Wir vermuten, dass der Haarlack eine ähnliche Brechzahl wie die Latexkügelchen besitzt und daher keine Interferenzreflexion mehr stattfindet. Aus diesem Grund versuchten wir mit Tesafilm den Photonischen Kristall zu schützen. Aber auch hierbei verlor das Kristall seine Farbe (Abb. 5.2.3). Ein Abdecken des Kristalls mit Glas ist auch nicht zufrieden stellend. Zwar bleibt die Farbe erhalten, sie verliert jedoch erheblich an Glanz.
Letztendlich bauten wir einen aufklappbaren Schutz aus einem Glasobjektträger. Dadurch kann man bei Bedarf die Sicherung vom Photonischen Kristall abklappen und ihn dann in seiner vollen Pracht unter dem Mikroskop betrachten.

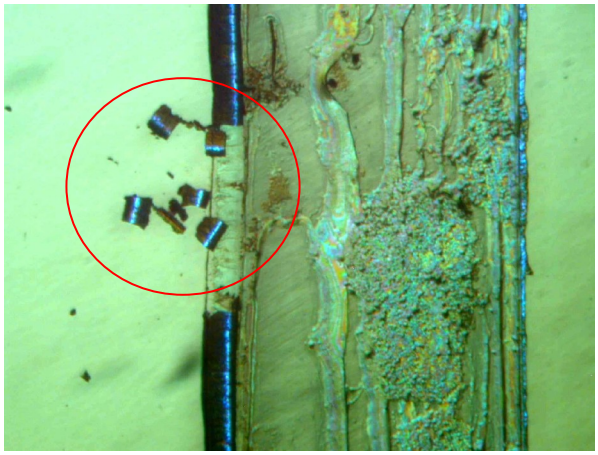


Abb. 5.2.1 Zerstörter Kristall

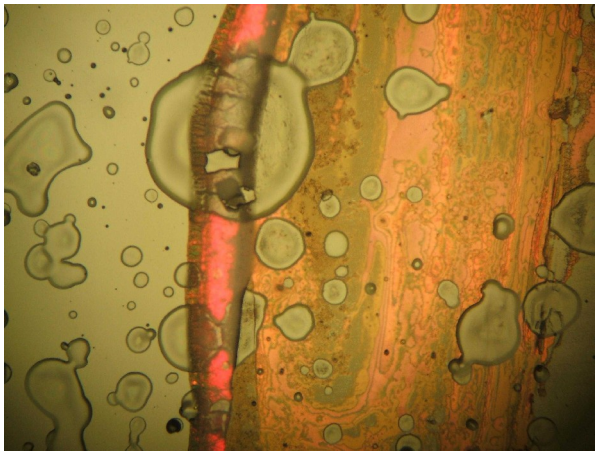


Abb. 5.2.2 Photonischer Kristall mit Haarlack

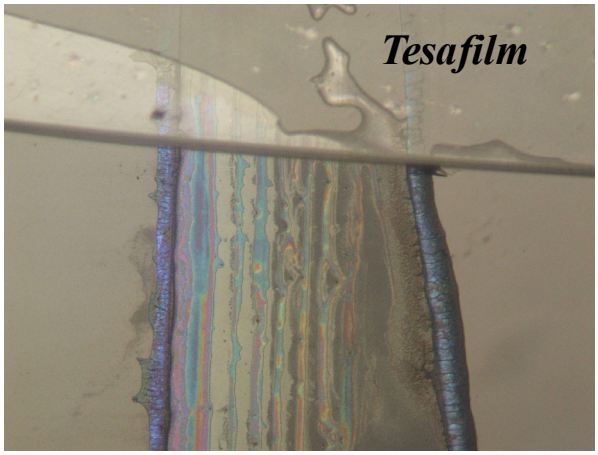


Abb.: 5.2.3: Ein Photonisches Kristall (oben unter einem Streifen Tesafilm)

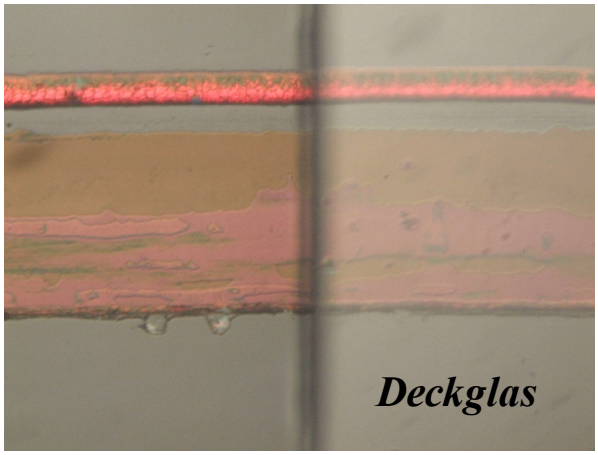


Abb.5.2.4: Ein Photonisches Kristall links ohne Deckglas recht mit Deckglas

5.3 Kanalbau

Um zu untersuchen, ob unsere Kristalle auch Licht auf kleinstem Raum um die Ecke leiten können, versuchten wir zunächst einen Kanal zu bauen. Dieser Kanal muss jedoch an die Anforderungen der Nanowelt angepasst sein, d.h. er darf nicht zu breit sein (max. ca. 20µm), muss aber eine ausreichende Höhe haben, damit sich gute Photonische Kristalle bilden. Wir versuchten diese Kanäle zunächst zu ätzen.
Wir erstellten mit einem Tintenstrahldrucker eine Ätzmaske (Abb. 5.3.1). Dieser kann jedoch maximal Linien mit einer Breite von ¼ DPT drucken - das entspricht 75µm. Danach untersuchten wir sie unter dem Mikroskop. Dabei stellten wir fest, dass auch ein Tintenstrahldrucker nicht perfekt druckt (Abb.: 5.3.3). Man kann jedoch gut erkennen, dass im waagerechten Bereich kaum Tintentröpfchen sind.
Nachdem wir unsere Ätzmaske hergestellt haben, belichteten wir eine Platine. Dazu wird die auf Folie gedruckte Ätzmaske auf die Platine gelegt und mit einer UV-Lampe belichtet. Durch das UV-Licht wird die Schutzschicht beschädigt und kann durch einen Entwickler (wir benutzten 3g NaOH auf 300ml Wasser) entfernt werden. Jetzt geht es an das eigentliche Ätzen. Dafür wird die entwickelte Platine solange in das Ätzbad gelegt bis nur noch die unbelichteten Kupferstücke zu sehen sind. Nun wird die gesamte Platine belichtet und entwickelt, damit die Schutzschicht auf den gewünschten Kupferflächen entfernt wird. Allerdings wird auch Kupfer unter der Lackschicht weggeätzt, sodass die geätzten Kanäle breiter sind als die Gedruckten. Wir hofften, dass dadurch auch die Tintentöpfchen verschwunden waren. Unsere Theorie bestätigte sich, die geätzten Kanäle waren breiter als die Gedruckten und die Tintentröpfchen waren auch verschwunden (Abb. 5.3.4).

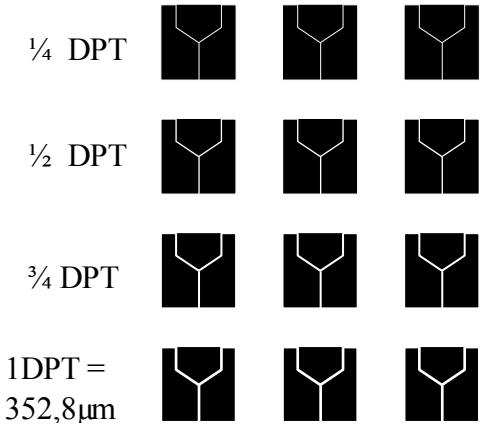


Abb.: 5.3.1: Unsere Ätzmaske

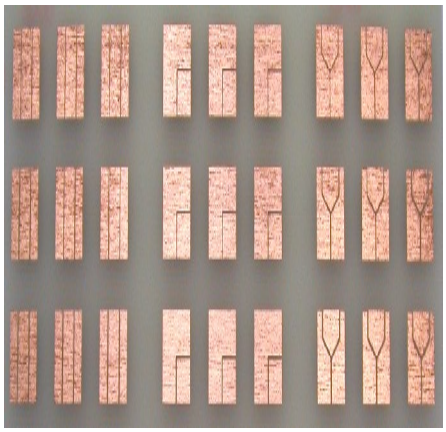


Abb.: 5.3.2: Unsere geätzte Platine

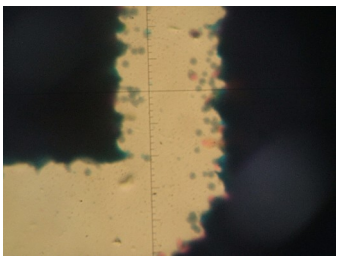


Abb.: 5.3.3: Die Ätzmaske für unseren Kanal unter dem Mikroskop.

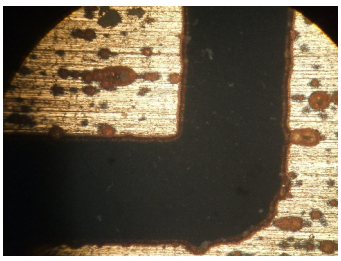


Abb.: 5.3.4: Der geätzte Kanal

Nachdem wir nun Kanäle geätzt hatten, brachten wir die Kugelsuspension auf die Platine auf. Wir dachten, dass die Suspension durch die Kapillarkräfte des Bodens und der Wände der Kanäle in sie hineingesaugt wird, was sich jedoch als falsch erwies. Wir mussten also nach weiteren Methoden zur Herstellung einer Kanalfüllung mit Photonischen Kristallen suchen.

6. Diskussion der Ergebnisse

„Kleine Kugeln – ganz groß“ heißt das Thema unserer Jugend-forscht-Arbeit. Wir glauben, dass wir mit unserer Arbeit die Voraussetzung geschaffen haben, dass die kleinen Nanokugeln in Form von Photonischen Kristallen einen festen Platz im Physikunterricht gefunden haben. Wir haben nicht nur gezeigt, wie man sie preiswert und in kurzer Zeit herstellen kann, sondern auch an Beispielen aufgezeigt, wie man sie motivierend im Bereich der Wellenlehre einsetzen kann. Selbst wenn man in der Schule nur über einfache Mikroskope verfügt so kann man doch mit unseren Photonischen Kristallen in die Wunderwelt der Nanophysik eindringen.

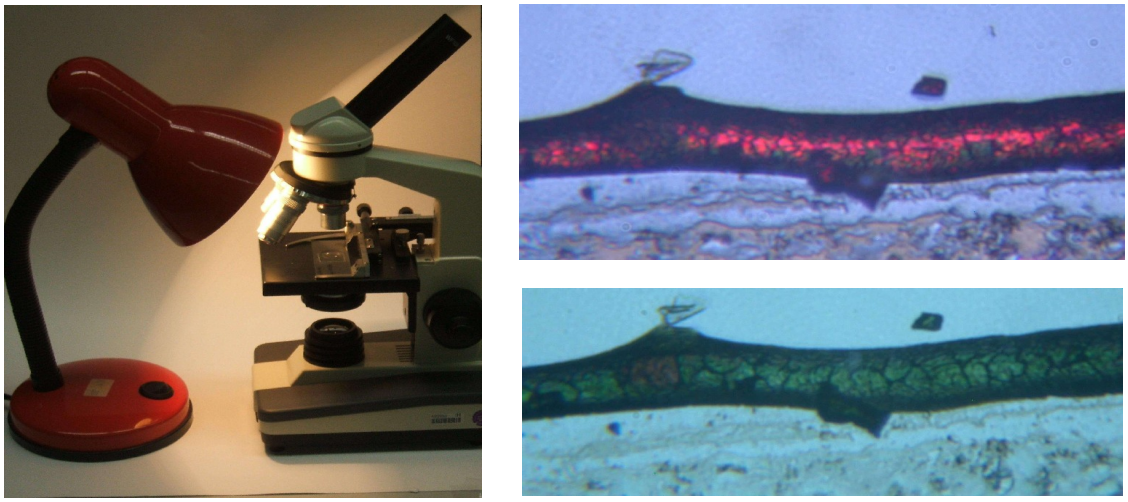


Abb. 6.1 Unsere Photonischen Kristalle unter einem einfachen Schulmikroskop

Natürlich ist unsere Reise in die Nanowelt noch lange nicht beendet. Als wir einen Tropfen mit 80nm Goldkolloiden auf einem Objektträger trocknen ließen, sahen wir unter dem Dunkelfeld-mikroskop eine seltsame Kettenbildung. Hatte das Licht als elektromagnetische Welle die Elektronen in den Goldkolloiden zum schwingen gebracht und diese so zum Dipol gemacht?

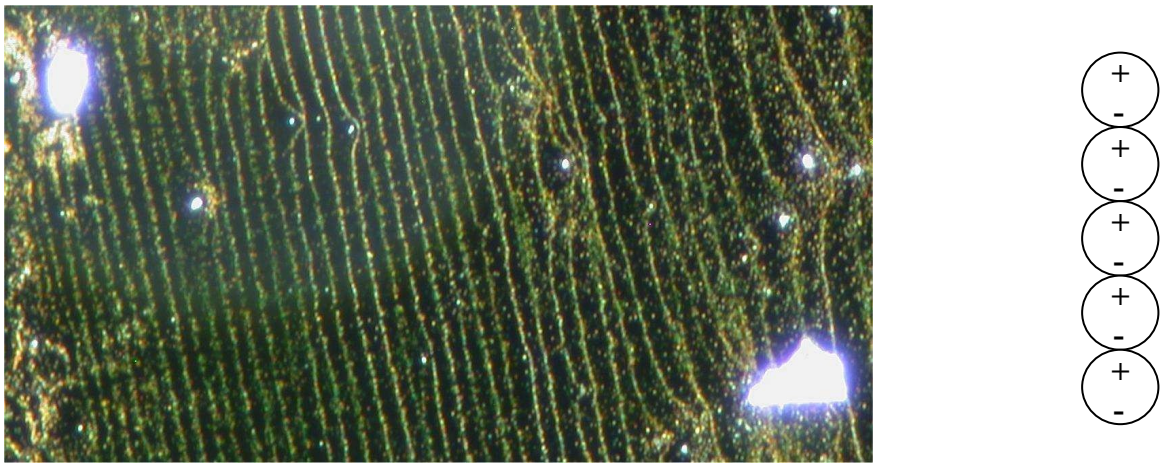


Abb. 6.2: Kettenbildung bei Goldkolloiden

Die Reise in die Nanowelt bleibt auch weiterhin spannend und birgt noch viele verblüffende Geheimnisse.

7. Danksagung

Am Ende dieser Arbeit möchte ich mich (Sebastian Klick) noch bei meinen Eltern für ihre Fahrdienste bedanken, ohne die ich deutlich weniger Zeit gehabt hätte.
Auch bei unserem Betreuer Walter Stein möchte wir uns sehr für sein Engagement auch in den Weihnachtsferien bedanke

8. Literatur- und Linkliste

[1] www.wikipdia.de

[2] www.nano-ev.de

[3] www.nanoreisen.de

[4] www.nanotruck.de

[5] Cheng, Wei u.a. Observation and tuning of hypersonic bandgaps in colloidal crystals
Nature Oktober2006

[6] Egen, Marc Funktionale dreidimensionale Photonische Kristalle aus Polymerlatizes
Mainz 2003

[7] Flück, Eliane Local interaction of light with periodic photonic structures *2003*

[8] Kotzur, Florian
Krumpen, Stefan Photonic Crystals
Bad Münstereifel 2005

[10] Ruhl, Tilman Elastomere kolloidale Kristalle aus hart-weichen Kern-Mantel-Latices
Darmstadt 2003

[11] Schilling, Jörg Herstellung und optische Eigenschaften von 2D- und 3D-photonischen Kristallen aus makroporösem Silizium
Halle 2002