



Abenteuer Naturfeld

Eine Arbeit von Stefan Hück und Florian Kotzur



Jugend forscht 2006

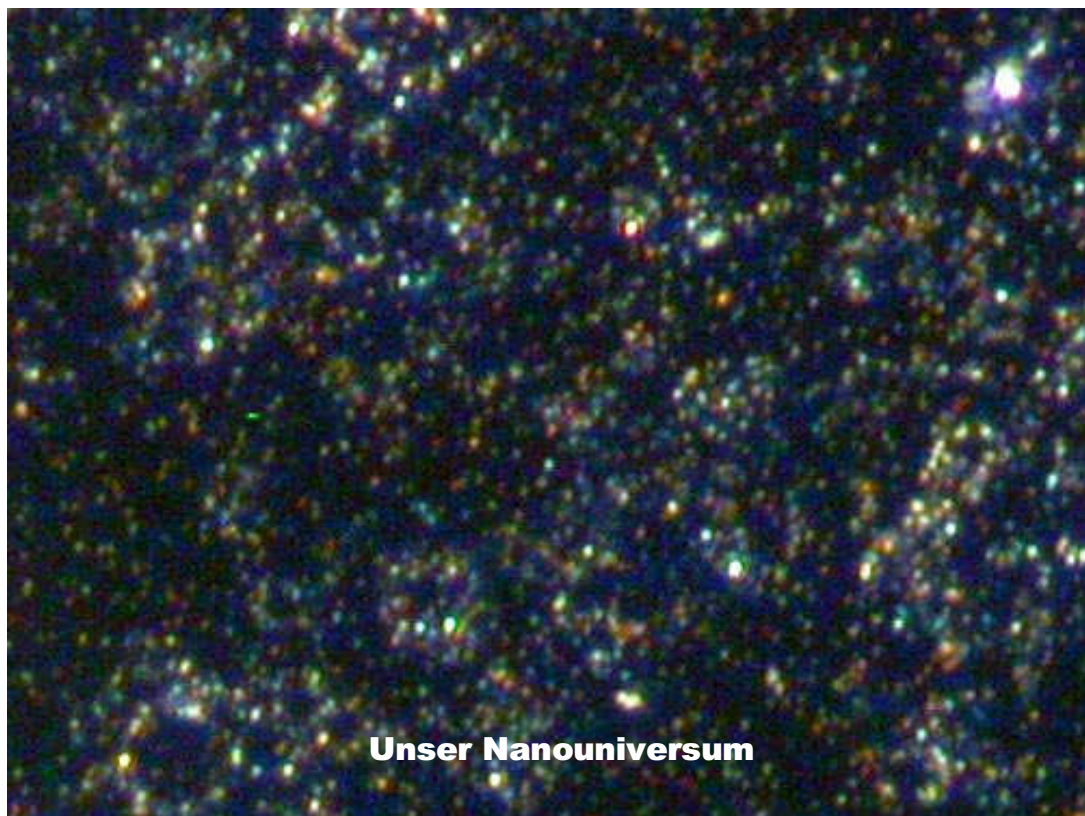
Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Kurzfassung	3
2. Einleitung	4
3. Nahfeld und Totalreflexion	4
3.1 <i>Das Abbe – Limit</i>	4
3.2 <i>Nah- und Fernfeld</i>	5
3.3 <i>Mikrowellennahfeld und optisches Nahfeld</i>	5
3.4 <i>Kugeln im Nahfeld</i>	7
3.5 <i>Die Kugel-Theorie</i>	9
3.6 <i>Bau der Apparatur</i>	10
4. Plasmonen im optischen Nahfeld	11
4.1 <i>Plasmonentheorie</i>	11
4.2 <i>Das Dunkelfeld</i>	12
4.3 <i>Unser „Universum“ auf dem Objekträger</i>	13
5. Kritische Reflexion und Ausblick	14
6. Dank	15
7. Literatur	15

1. Kurzfassung

Ausgangspunkt für unsere Arbeit waren die SiO_2 -Nanokugeln, die wir im Rahmen unserer letzten Jugend-forscht-Arbeit nach dem Stöber-Fink-Bohn-Verfahren hergestellt hatten. Den Durchmesser dieser Nanokugeln kann man aufgrund des Abbe-Limits nicht mit einem Lichtmikroskop bestimmen. Da uns in der Schule kein Elektronenmikroskop zur Verfügung steht, suchen wir in unserer diesjährigen Arbeit nach Möglichkeiten, den Durchmesser dieser Kugeln mit einfachen Mitteln zu bestimmen. Dies gelang uns mit Hilfe der Totalreflexion an der Grenzfläche eines Prismas. Wir benutzen hierzu das im Bereich von 0 - 100nm auftretende Nahfeld. Vorher hatten wir uns mit Mikrowellen mit diesem Nahfeld vertraut gemacht und experimentell eine Nahfeldfunktion ermittelt, die wir auf Lichtwellen übertragen haben.

Besonders interessante Erfahrungen machten wir, als wir anstelle der SiO_2 -Kugeln unterschiedliche Goldkugeln mit einem Durchmesser von 10 – 80nm benutzten. Die Sichtbarmachung dieser Kugeln gelang uns erst mit der Dunkelfeldmikroskopie im optischen Nahfeld. Durch seitliches Anstrahlen mit weißem Licht regten wir in diesen Goldkügelchen Plasmonenschwingungen an, so dass die Kugeln entsprechend ihrem Durchmesser selber farbiges Licht aussendeten (beschleunigte Ladungen strahlen). Der Anblick solcher Kugelgemische war faszinierend, da er uns vorkam wie ein Blick in ein neues Universum.



Der Anblick dieser Goldkugeln ist jedoch nicht nur faszinierend, sondern auch ein äußerst aktuelles Thema für Forschungen im Nanometerbereich. So wie die Lichtmikroskopie in den Bereichen Medizin, Biologie und Materialwissenschaften enorme Fortschritte bewirkt hat, so erhofft man sich von den Informationen aus dem optischen Nahfeld einen ähnlichen Erkenntnisprung. Folgende Entwicklungen deuten sich schon an: Kopplung zwischen Elektronik und Photonik im Nanometerbereich, Datenträger mit einer deutlich höheren Datendichte, preiswerte Nanosensoren und neuartige Nahfeldmikroskope.

2. Einleitung

Ausgangspunkt für unsere Arbeit waren die SiO₂-Nanokugeln, die wir im Rahmen unserer letzten Jugend-forscht-Arbeit nach dem Stöber-Fink-Bohn-Verfahren hergestellt hatten. Den Durchmesser dieser Nanokugeln kann man aufgrund des Abbe-Limits nicht mit einem Lichtmikroskop bestimmen. Da uns in der Schule kein Elektronenmikroskop zur Verfügung steht, suchen wir in unserer diesjährigen Arbeit nach Möglichkeiten, den Durchmesser dieser Kugeln mit einfachen Mitteln zu bestimmen.

3. Nahfeld und Totalreflexion

3.1 Das Abbe – Limit

Die Bildentstehung wird in allen optischen Instrumenten durch Beugung beeinflusst. Wenn man ein Objekt durch ein Mikroskop betrachtet, so wird das räumliche Auflösungsvermögen Δx eines optischen Mikroskops begrenzt. Es gilt:

$$\Delta x = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{N.A.}$$

Dabei bezeichnet λ die Lichtwellenlänge und N.A. die Numerische Apertur des Objektivs. Bei unseren besten Schulmikroskopen ist die Numerische Apertur des Objektivs mit 100facher Vergrößerung 1,25. Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass das Objektiv nur in Immersionsöl verwendet werden sollte, da die N.A. sonst nicht mehr stimmt. Also würde sich nach der obigen Formel ein Δx von ca. $\lambda/2$ ergeben.

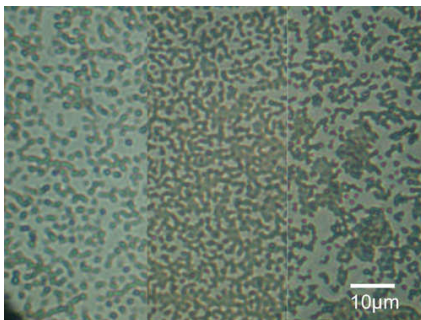


Abb. 3.1 Drei verschiedene Größen unserer SiO₂-Nanokugeln unter dem Lichtmikroskop

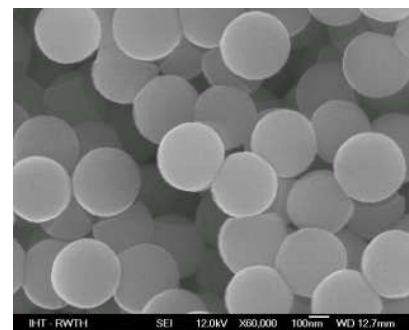


Abb. 3.2 Unsere SiO₂ Kugeln unter dem REM

So musste unser Versuch, den Durchmesser unserer SiO₂-Nanokugeln mit einem Schulmikroskop zu bestimmen misslingen. Das Problem hierbei war, dass wir die Kugeln zwar sehen, aber ihre Größe nicht bestimmen konnten. Wenn man beispielsweise versucht, einen Stern am Himmel zu vergrößern, so gelingt dies zunächst auch. Jedoch sind Sterne so weit entfernt, dass man sie nur als helle Beugungsscheibchen sieht und keine Struktur oder Form erkennen kann. Genauso ist es auch bei den Nanometer großen SiO₂ Kugeln. Man kann sie erkennen, jedoch kann man sie mit dem Lichtmikroskop nicht so auflösen, dass man ihre Größe bestimmen kann (Abb. 3.1). Weiterhin stellt bei optischen Instrumenten jede Linsenfassung eine beugende Öffnung dar. Wenn nun zwei Objekte sehr nahe aneinander liegen, so entstehen zwei Beugungsfiguren (auch Beugungsscheibchen), die nicht voneinander zu trennen sind, weil der Abstand Δx zwischen den beiden Objekten zu gering ist. Das Abbe-Limit besagt also, dass man einen Abstand Δx von mindestens $\lambda/2$ benötigt, um zwei Objekte voneinander unterscheiden und auflösen zu können. Mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) kann man den Durchmesser unserer Kugeln jedoch messen, da die Materiewellen der Elektronen wesentlich kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes (Abb.3.2).

3.2 Nah- und Fernfeld

Wie schon erwähnt wird das räumliche Auflösungsvermögen eines optischen Mikroskops durch das Abbe-Limit beschränkt. Das Objektiv eines konventionellen optischen Mikroskops befindet sich stets in einem relativ großen Abstand von der Probe, im so genannten *Fernfeld* des Lichtes. Wenn es gelingt das evaneszente, exponentiell abklingende Nahfeld der Probe zu detektieren, lässt sich das Abbe-Limit durchbrechen. Unser Ziel war es also, mit Hilfe der Informationen des optischen Nahfeldes den Durchmesser unserer SiO₂ Kugeln zu bestimmen.

Der Detektor des Mikroskops muss sich zu diesem Zweck im *Nahfeld* der Probe befinden. Für unsere Versuche wäre somit ein Optisches Rasternahfeld-Mikroskop, kurz SNOM (Scanning Near-Field Optical Microscope), die perfekte Ausrüstung. Unserer Schule steht natürlich kein SNOM zur Verfügung. Wir brauchten also eine alternative Idee:

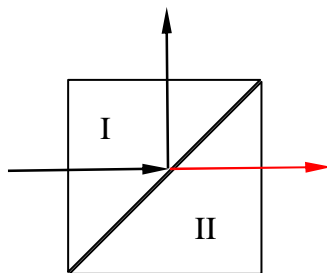


Abb. 3.3 Gestörte Totalreflexion an Grenzflächen

Wir fanden heraus, dass bei einer Totalreflexion von Licht an der Oberfläche eines Prismas auch ein Nahfeld existiert. Bringt man beispielsweise zwei Glasprismen sehr nahe zusammen, so kann man Licht detektieren, wo keins sein dürfte, nämlich hinter dem zweiten Prisma (vgl. Abb.3.3). Aufgrund des evaneszenten Feldes kann Licht transmittiert werden, falls ein zweites Prisma in das evaneszente Feld eintaucht. Wie aber gelangt die Strahlung überhaupt von dem ersten in das zweite Medium?

Da das Strahlenbündel begrenzt ist, findet an den Rändern, also in unmittelbarer Nähe der mit A und B bezeichneten Punkte (siehe Abb. 3.4) Beugung statt. Durch diesen Vorgang der Beugung tritt nun in der Umgebung von A etwas Energie in das zweite Medium über, die in der Umgebung von B wieder in das erste zurückgeliefert wird ([1] S.468).

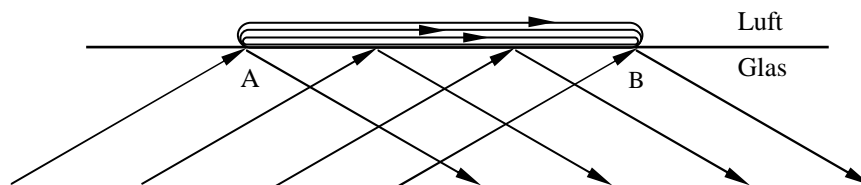


Abb. 3.4 Das evaneszente Nahfeld, welches durch eine Totalreflexion hervorgerufen wird. Nach [1], S 468

Die Energie dieses evaneszenten Feldes wollten wir nutzen, um Strukturen unterhalb $\lambda/2$ zu messen. Mit Informationen aus dem optischen Nahfeld wollten wir mit einfachen schulischen Mitteln das Abbe-Limit durchbrechen.

3.3 Mikrowellennahfeld und optisches Nahfeld

Um uns zunächst mit den Eigenschaften des Nahfeldes vertraut zu machen, haben wir einige Versuche mit Mikrowellen gemacht. Dabei wollten wir versuchen, experimentell eine Funktion zu ermitteln, die möglichst genau das Mikrowellennahfeld beschreibt. Dazu sendeten wir Mikrowellen so durch einen Halbzylinder aus Plexiglas, dass diese an der Grenzfläche zwischen der geraden Seite und der Luft total reflektiert werden. Dann näherten wir dieser geraden Seite des Halbzylinders ein Plexiglasprisma immer weiter an. Wir begannen mit einem Abstand von 3 cm zwischen Halbzylinder und Prisma (Abb. 3.5).

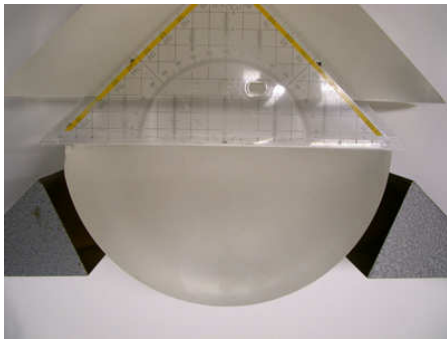


Abb. 3.5 Versuchsaufbau zum Mikrowellennahfeld

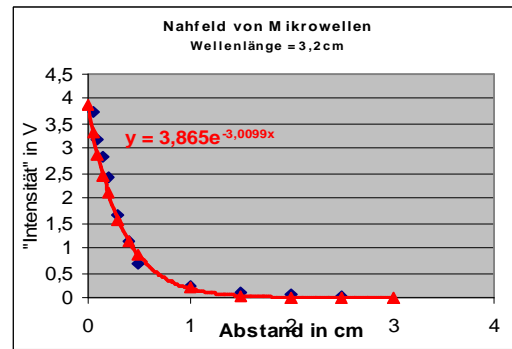


Abb. 3.6 Das Nahfeld von Mikrowellen

Nun schalteten wir den Mikrowellensender ein und konnten die Stärke der total reflektierten Strahlung in Volt messen. Dann haben wir den Abstand zwischen Halbzyylinder und Prisma in gleichmäßigen Abständen verringert und dabei für jeden Abstand die noch am Empfänger ankommende Strahlung gemessen. Je näher das Prisma an den Halbzyylinder kommt, desto mehr Strahlung entweicht auf Grund des Tunneleffekts durch die Luft in das Prisma (Abb. 3.6).

Zu Beginn des Versuchs haben wir die Intensität der totalreflektierten Mikrowellenstrahlung gemessen. Danach haben wir dann von dieser Anfangsintensität die gemessenen Intensitäten bei den verschiedenen Abständen subtrahiert. Somit zeigt das Diagramm also die Intensität an, die durch das Prisma entweicht. Wir haben diese Messung mehrmals durchgeführt und anschließend einen Mittelwert aller Ergebnisse genommen, um den Fehler möglichst gering zu halten. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Aus den blau dargestellten Messwerten ergibt sich die rote Trendlinie. Ihre Funktion $y = 3,865e^{-3,0099x}$ beschreibt somit das Mikrowellennahfeld. Das heißt also, je näher das Prisma an den Halbzyylinder geführt wird, desto weniger Mikrowellenstrahlung kommt am Empfänger an.

Um unserem Ziel, der Bestimmung des Durchmessers unserer SiO_2 Kugeln ein Stück näher zu kommen, haben wir uns gedacht, dass die Funktion für das Mikrowellennahfeld auch auf eine andere Wellenlänge übertragbar sein müsste. Da Laserlicht genau wie Mikrowellen eine elektromagnetische Welle ist, haben wir die Funktion auf die Wellenlänge unseres Schullasers ($\lambda_L = 633\text{nm}$) übertragen ($\lambda_M = 3,2\text{cm}$; $\lambda_L = 633\text{nm}$) (Abb. 3.7).

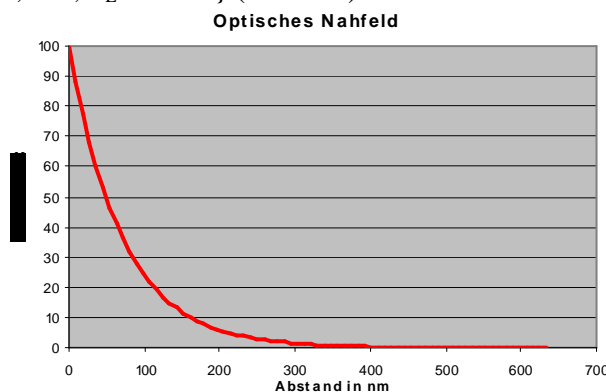


Abb. 3.7 Das optische Nahfeld in erster Näherung

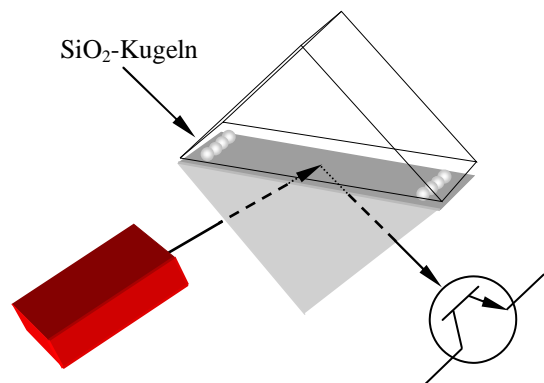


Abb. 3.8 Die SiO_2 -Kugeln dienen als „Abstandhalter“

Der Graph von Abb. 3.7 machte uns große Hoffnung, dass wir über die Messung des Intensitätsverlustes der totalreflektierten Strahlung den Durchmesser von Objekten im Bereich von 0-100nm mit einfachen Mitteln bestimmen können müssten. Mit unserem Aufbau können wir im Fernfeld Informationen, die aus dem Nahfeld kommen auswerten. (So glaubten wir jedenfalls).

Wir wollten also einen Versuch - analog zu unseren Mikrowellenversuchen - mit zwei Glasprismen und einem Laser durchführen.

Unsere Idee hierbei war, dass wir unsere SiO_2 -Kugeln zwischen die beiden Prismen legen. Der Abstand der beiden Prismen ist somit gleich dem Kugeldurchmesser. Über den Intensitätsabfall beim Jugendforscht 2006 Stefan Hück & Florian Kotzur

totalreflektierten Licht hätten wir so nach Abb. 3.7 den Durchmesser der SiO_2 -Kugeln bestimmen können. Wir nahmen also ein Prisma und platzierten einen Tropfen unserer Kugellösung auf die rechte und einen Tropfen auf die linke Seite. Nachdem das Ethanol verdampft war und sich nur noch die Kugeln auf dem Prisma befanden, legten wir ein zweites Prisma auf das erste. Durch das zweite Prisma wird etwas des Laserlichts aus dem Nahfeld ausgekoppelt. Dadurch ist der reflektierte Laserstrahl natürlich weniger intensiv als noch vor dem Auflegen der Nanokügelchen und des Prismas und der damit verbundenen Lichtauskopplung. An der anderen Seite des Prismas haben wir einen Phototransistor eingespannt, dessen Basis so ausgerichtet ist, dass der reflektierte Laserstrahl direkt darauf trifft. Über diesen Phototransistor können wir also die Intensität des Laserlichtes messen. Dazu haben wir eine Brückenschaltung aufgebaut (Abb. 3.9). Die beiden Festwiderstände haben den Wert $100\text{k}\Omega$ und das Poti hat einen Maximalwiderstand von $10\text{k}\Omega$. Nun mussten wir den Unterschied zwischen einer Totalreflexion ohne und mit SiO_2 -Kugeln und Prisma aufzeigen. Mit der Spannungsteiler-Schaltung kann man eine Spannungsdifferenz am Fototransistor und folglich einen Intensitätsverlust des reflektierten Lichtes messen. Dazu haben wir zunächst die Basis des Phototransistors mit dem total reflektierten Laserstrahl ohne SiO_2 -Kugeln angestrahlt. Unser Messgerät (ΔU) zeigt nun die Differenzspannung zwischen Phototransistor und Poti an. Über das Poti stellen wir diese auf 0V ein. Somit muss also die Differenzspannung steigen, sobald weniger Licht auf die Basis des Transistors trifft, da dessen Widerstand größer wird (Beim Spannungsteiler bekommt der größte Widerstand die meiste Spannung. Somit bekommt der Transistor auch die komplette Spannung wenn kein Licht auf die Basis fällt.). Nun ist die Schaltung also für die Messung fertig eingestellt. Nach einigen anfänglichen Versuchen mussten wir das Experiment erfolglos einstellen. Leider waren unsere Prismenflächen nicht ideal eben. Dies stellt natürlich insofern ein Problem dar, als die nm großen Kugeln so auch keinen Abstand ihrem Durchmesser entsprechend herstellen konnten. Um dies auch zu verifizieren, haben wir noch zwei weitere Experimente gemacht. Wir haben zuerst beide Prismen einfach aufeinander gelegt. Hierbei erwarteten wir, dass relativ viel Licht von dem einen in

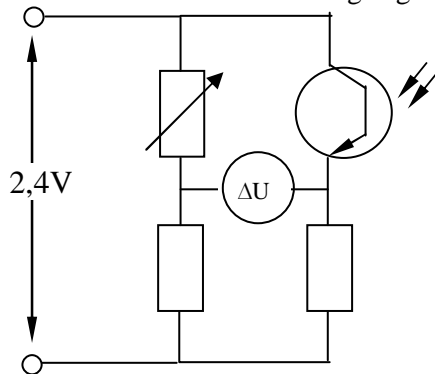


Abb. 3.9 Unsere Brückenschaltung

das andere Prisma ausgekoppelt wird, weil sich das eine Prisma im Nahfeld des anderen Prismas befinden müsste. Entgegen unseren Erwartungen geschah jedoch nichts. Dann haben wir zwischen beide Prismen Immersionsöl getan. Nun wurde das Laserlicht nicht mehr total reflektiert, sondern trat in das zweite Prisma über und trat dort aus. Dies war für uns der Beweis, dass die Oberfläche der Prismen viel zu ungenau war, denn der interessante Bereich des Nahfeldes sollte laut der Funktion in Abb. 3.7 bei ca. 100nm über der Oberfläche enden. Wir brauchten also eine neue Idee für einen besseren Versuch. Dazu begannen wir zunächst wieder mit einem Mikrowellenversuch.

3.4 Kugeln im Nahfeld

Da wir also nun eine Funktion hatten, welche das Nahfeld von Mikrowellen näherungsweise beschreibt, wollten wir versuchen, die Mikrowellen aus dem Nahfeld auszukoppeln, indem wir folgenden Versuch durchführten:

Wir haben wieder den Plexiglashalbzyylinder genommen. Diesmal haben wir ihn jedoch aufrecht eingespannt und ihn wieder so mit Mikrowellen bestrahlt, dass diese an der geraden Seite total reflektiert wurden und an der anderen Seite des Halbzyinders wieder empfangen werden konnten (vgl. Abb. 3.10).

An der oberen Seite des Halbzyinders haben wir ein Klebeband angebracht, denn wir wollten auf die Oberseite des Halbzyinders Glasmurmeln mit einem Durchmesser von $1,6\text{cm}$ legen. Der Klebestreifen dient nur dazu, die Murmeln auf dem Halbzyylinder zu halten.

Zunächst haben wir die Mikrowellenanlage eingeschaltet und die Intensität der totalreflektierten Mikrowellenstrahlung gemessen. Die gemessene Spannung betrug ca. $3,27\text{V}$. Dann haben wir nach



Abb. 3.10 Totalreflexion von Mikrowellen im eingespannten Halbzylinder.



Abb. 3.11 Auskopplung der Mikrowellen aus dem Nahfeld mittels Glasmurmeln.

und nach immer mehr Glasmurmeln auf die Oberseite des Halbzylinders gelegt. Dabei konnten wir deutlich beobachten, dass die Intensität der reflektierten Mikrowellen zunehmend weniger wurde (Abb. 3.11). Weiterhin ist uns aufgefallen, dass die Intensität mit steigender Murmelzahl stärker abnimmt, bis sie schließlich fast 0V betrug.

Diese neuen Erkenntnisse wollten wir nun auf Laserlicht und unsere SiO_2 Kugeln übertragen. Dazu haben wir dann ein Glasprisma eingespannt und es mit dem Laser so angestrahlt, dass der Laserstrahl total reflektiert wird. An der anderen Seite des Prismas haben wir wieder die Intensität des Lasers mit der oben beschriebenen Schaltung gemessen. Wir haben also dann SiO_2 -Kugeln mit einem Durchmesser von 500nm auf das Prisma gelegt. Dabei konnten wir eine Spannungsdifferenz von ca. 14mV feststellen. Danach haben wir SiO_2 -Kugeln mit einem unbekanntem Durchmesser auf das Prisma gelegt. Hierbei konnten wir eine Spannungsdifferenz von 24mV feststellen. Auf Grund dieser Ergebnisse fragten wir uns, wieso wir unterschiedliche Werte für die beiden Kugelgrößen erhalten hatten. Nachdem wir den Versuch mehrmals wiederholten, erhielten wir jedes Mal das gleiche Ergebnis. Um nun aber auch hier eine Art „Nahfeldfunktion“ zu erhalten, brauchten wir mehr SiO_2 -Kugeln mit bekannter unterschiedlicher Größe. Wir haben also versucht, durch eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung bei der Kugelherstellung Kugeln mit unterschiedlichen Durchmessern zu erhalten. Wir haben dann von jedem der beiden Ansätze eine Probe zur RWTH Aachen geschickt, da wir in der Schule natürlich kein REM haben. Ob dies gelungen ist, werden wir erst erfahren, wenn wir die Ergebnisse der REM Aufnahmen aus Aachen erhalten. Wenn wir dann wissen, wie groß unsere Kugeln sind, können wir versuchen, durch weitere Versuchsreihen eine Funktion zu ermitteln, mit deren Hilfe wir ganz leicht den Durchmesser von SiO_2 -Kugeln in der Schule auch ohne REM bestimmen können.

Obwohl wir noch keine Ergebnisse haben, haben wir unsere neuen SiO_2 Kugeln auf das Prisma gelegt. Wir hatten also Kugeln mit 500nm Durchmesser und zwei verschiedene mit unbekanntem Durchmesser. Das einzige, was wir auf Grund der Herstellung wissen ist, dass die Kugeln kleiner als 500nm sein müssten. Das Ergebnis unserer Messung war wie folgt: Die Kugeln mit 500nm Durchmesser wiesen ein ΔU von 14mV auf. Die vermeintlich kleineren Kugeln wiesen ein ΔU von 40mV und die vermeintlich kleinsten Kugeln wiesen eine Spannungsdifferenz ΔU von 65mV auf.

Da wir keine definierte Kugelgrößen und auch zu wenig Kugeln von unterschiedlicher Größe hatten, haben wir eine Firma in Wetzlar gefunden, die solche Nanopartikel vertreibt. Nach einem kurzen Telefonat mussten wir leider erfahren, dass es dort keine SiO_2 - Partikel gibt. Jedoch schickte man uns freundlicherweise verschieden große Gold-Nanopartikel mit Durchmessern von 5, 10, 20 und 80nm. Diese Goldpartikel wurden für uns jedoch erst viel später interessant. Trotzdem haben wir zunächst versucht, Schlüsse aus unseren Ergebnissen mit den SiO_2 - Kugeln zu ziehen. Dazu haben wir eine *Kugel-Theorie* entwickelt, die in Kapitel 3.5 näher erläutert wird.

3.5 Die Kugel-Theorie

Nachdem wir die in Kapitel 3.4 beschriebenen Versuche durchgeführt hatten, entwickelten wir auf Grund unserer Ergebnisse unsere *Kugel-Theorie*.

Der „Versuchsaufbau“ wird nochmals schematisch in den Abbildungen 3.12 und 3.13 dargestellt.

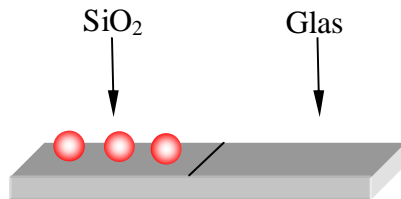


Abb. 3.12 Schemazeichnung der Probe auf dem Objektträger

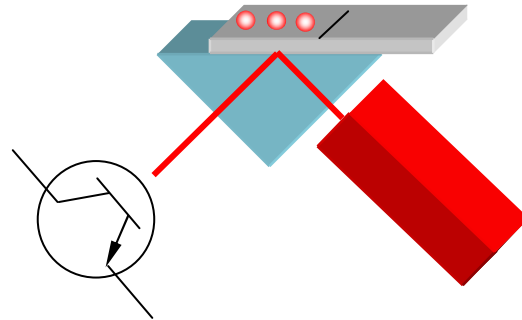


Abb. 3.13 Schemazeichnung des Versuchsaufbaus

Wir haben auf die eine Hälfte eines Objektträgers SiO_2 - Kugeln getropft und die andere Hälfte frei gelassen. Den Objektträger haben wir dann mittels Immersionsöl mit dem Prisma verbunden. Somit verhindern wir, dass das Licht zwischen Prisma und Objektträger nochmals gebrochen und reflektiert wird. Weiterhin können wir den Objektträger ganz leicht hin und her schieben, um so die Differenzspannung mit und ohne Kugeln schneller ablesen zu können. Wir erhielten nach der Durchführung des Versuchs mit den beiden unterschiedlichen Kugelarten die in Kapitel 3.4 angegebenen Ergebnisse. Die Ergebnisse der Differenzspannung variierten jedoch bei jeder Kugelgröße ein wenig, da die Kugelschichten auf dem Objektträger nicht ganz gleichmäßig waren. Es fällt aber auf, dass bei den größeren Kugeln (500nm) die Differenzspannung näherungsweise ca. halb so groß ist, das heißt also, dass mehr Licht auf die Basis des Phototransistors trifft. Um diese Beobachtung abzusichern müsste man den Versuch mit mehreren definierten Kugelgrößen durchführen und eventuell die Spannung verstärken, sodass man einen deutlicheren Unterschied erkennen kann. Die hier gemessenen Spannungen sind sehr klein, was gleichzeitig bedeutet, dass der Messfehler größer ist, da das Messgerät in diesem Bereich nicht so genau ist.

Trotzdem kann man an den gemessenen Werten erkennen, dass bei den größeren Kugeln mehr Licht wieder am Phototransistor ankommt, da die Differenzspannung kleiner ist.

Diese Beobachtung erklären wir uns folgendermaßen:

Wenn man eine Kugel mit einem Durchmesser von 500nm hat und sich in dieser Kugel eine zweite Kugel vorstellt, die einen Durchmesser von genau 250nm hat, stellt man fest, dass mathematisch gesehen die Auflagefläche jeder Kugel nur ein Punkt ist, da jede Kugel nur an einer Stelle den Untergrund tangiert.

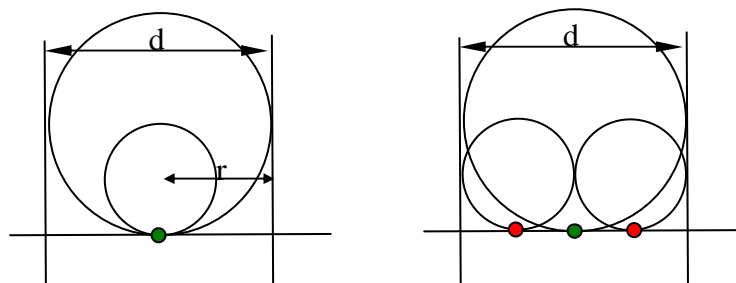


Abb. 3.14 Die Erläuterung der *Kugel-Theorie*

Man stelle sich eine Kugel mit dem Durchmesser (d) vor. Wenn nun in diesem Intervall (d) zwei Kugeln nebeneinander liegen, die genau die Hälfte des Durchmessers der großen Kugel haben, befinden sich in dem besagten Intervall insgesamt zwei Punkte, an denen das Licht durch die Kugeln das Prisma verlassen kann (Abb. 3.14). Somit hat das Licht bei kleineren Kugeln wesentlich mehr

Stellen, an denen es das Prisma verlassen kann. Dadurch würde wiederum weniger Licht auf die Basis des Phototransistors fallen. Folglich wird die Differenzspannung erhöht.

Die *Kugel-Theorie* ermöglicht es also durch gestörte Totalreflexion von Laserlicht die Größe von SiO₂-Nanopartikeln näherungsweise mit einfachen schulischen Mitteln zu bestimmen, wozu man bisher mindestens ein Elektronenmikroskop brauchte.

Um unsere Versuche und vor allem unsere Theorie zu bestätigen, müssen natürlich noch weitere Versuche folgen. Dazu mussten wir aber die Ergebnisse unserer REM - Aufnahmen aus Aachen abwarten. Dann könnten wir für definierte Kugelgrößen die Differenzspannungen messen und somit experimentell eine Funktion ermitteln, die die einfache Bestimmung sämtlicher Durchmesser von SiO₂-Nanopartikeln erlaubt. Gegenüber einem Rasterelektronenmikroskop hat unsere Methode den Vorteil, dass der Kugeldurchmesser relativ schnell und preiswert bestimmt werden kann. Das Problem bei einem REM ist, dass die SiO₂ - Kugeln durch den Elektronenstrahl verspritzt und sich bewegen. Dadurch ist es relativ schwierig und zeitaufwändig, gute Aufnahmen von den Partikeln zu machen. Wir haben also einen Weg aufgezeigt, mit einfachen und preiswerten Mitteln in der Schule die Größe von Nanopartikeln auch ohne komplizierte REMs zu bestimmen.

3.6 Bau der Apparatur

Nachdem wir die Ergebnisse der REM-Aufnahmen hatten, versuchten wir anhand der Durchmesser und der gemessenen Differenzspannungen eine Funktion zu ermitteln, mit der man zuverlässig die Kugelgrößen bestimmen kann. Hierfür standen uns SiO₂-Kugeln der Größen 500nm, 475nm und 418nm zur Verfügung. Damit die Messungen reproduzierbar sind, mussten wir eine Möglichkeit finden, wie diese Versuche stets unter gleichen Bedingungen durchgeführt werden können. Da unser Aufbau zu diesem Zeitpunkt noch relativ raumeinnehmend war, beschlossen wir, eine Apparatur zu bauen, mit deren Hilfe die oben genannten Voraussetzungen erfüllt sind. Hierzu haben wir eine Konstruktion aus einer Holzplatte, Gewindestangen, Aluminiumröhrchen, einer Aluminiumplatte und einigen Plexiglasteilen entworfen. In der Aluminiumplatte ist unser Glasprisma eingelassen, welches von einer Plexiglashalterung auf der Platte fixiert wird. Im Inneren der Apparatur befindet sich die Schaltung in einem Verteilerkasten und eine Halterung für einen handelsüblichen Laserpointer. Weiterhin ist der Phototransistor an der Aluminiumplatte so angebracht, dass er im Falle eines Defekts ohne Mühe ausgetauscht werden kann.



Abb. 3.15 Vorderansicht der Apparatur



Abb. 3.16 Geöffnete Apparatur

Mit der neuen Apparatur haben wir unsere Messungen durchgeführt. Natürlich haben wir die Versuche mehrmals und an unterschiedlichen Tagen wiederholt. Zu unserer großen Freude waren die Messwerte reproduzierbar. Folglich konnten wir also eine „Kugelfunktion“ aufstellen, mit deren Hilfe es mit einfachen Mitteln und ohne REM möglich ist, in der Schule die Größe von SiO₂-Nanopartikeln zu ermitteln (Abb. 3.17). Für den von uns untersuchten Bereich lautet die Kugelfunktion

$$U = -0,2682 \frac{mV}{nm} x + 146mV$$

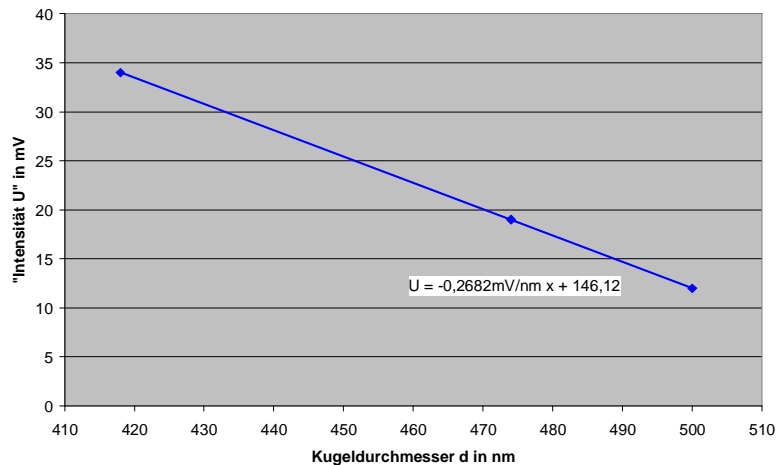


Abb.3.17 Unsere experimentell ermittelte Kugelfunktion

4. Plasmonen im optischen Nahfeld

4.1 Plasmonentheorie

Da wir nun Goldkugeln besaßen, überlegten wir uns, diese auch einmal ins Nahfeld zu bringen und zu beobachten was passieren würde. Da die Kugeln eine Größe von 5, 10, 20 und 80nm besitzen und somit noch kleiner als die SiO₂-Kugeln sind, waren wir natürlich gespannt ob auch hier eine



Abb. 4.1 Das Hertz'sche Gitter ist parallel zur Schwingungsebene ausgerichtet.

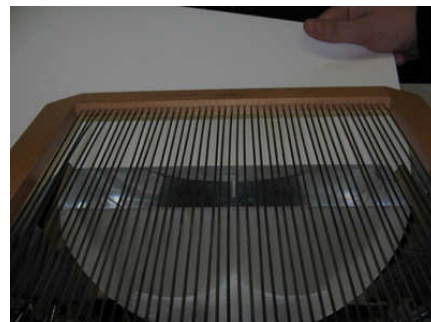


Abb. 4.2 Das Hertz'sche Gitter ist senkrecht zur Schwingungsebene ausgerichtet.

Lichtauskopplung aus dem Nahfeld zu messen wäre und wenn ja, in welchen Dimensionen. Tatsächlich stellten wir eine Lichtauskopplung fest. Dies erstaunte uns sehr, da Goldkugeln schließlich nicht transparent sind. Schließlich erinnerten wir uns an einen Mikrowellenversuch, dem wir vorher wenig Beachtung geschenkt hatten. Wir hatten ein Hertz'sches Gitter in das Nahfeld der Totalreflexion gebracht und beobachtet, dass sich die Mikrowellenauskopplung bei einem parallel zur Schwingungsrichtung angebrachten Gitter anders verhielt als bei einem senkrecht ausgerichtetem Gitter (vgl. Abb. 4.1 und Abb.4.2).

Bei dem parallel angeordneten Gitter erhielten wir bei dem Empfänger für die totalreflektierten Wellen eine wesentlich kleinere Spannung. Hierbei wurde also mehr Strahlung ausgekoppelt als bei einem senkrecht ausgerichtetem Gitter. Wenn man das Gitter von dem Halbzylinder entfernte, wurde die Spannung am Empfänger wieder größer. Auch mit einem einzelnen Kupferdraht konnten wir Energie aus dem Nahfeld auskoppeln. Außerdem tauchten wir eine Empfangsdiode für Mikrowellen immer weiter in das

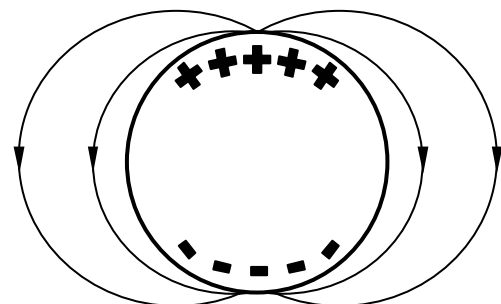


Abb. 4.3 Der durch ein lichtelektrisches Feld angeregte Nano-partikel



Abb. 4.4 Im linken Gefäß sind die 80nm großen Goldkugeln. Im rechten Gefäß sind die SiO₂-Kugeln



Abb. 4.5 Im linken Gefäß sind die 80nm großen Goldkugeln. Im rechten Gefäß sind die SiO₂-Kugeln (je mit Wasser verdünnt 1:10)

Nahfeld über den Plexiglaszylinder ein und konnten so eine immer stärker werdende Spannung messen. Aus diesen Versuchen folgerten wir, dass das Mikrowellennahfeld die Elektronen in den Gitterstäben zum schwingen anregt, so dass diese selbst zu Sendern werden. Diese Elektronenanregung im Mikrowellennahfeld sollte unserer Meinung nach auf Goldkugeln im Lichtwellennahfeld zu übertragen sein. Wir suchten nun einen Weg, diese Elektronenanregung bei den Goldkugeln zu messen. Um zu verstehen was genau bei einer solchen Anregung geschieht, beschäftigten wir uns zuerst mit der Theorie.

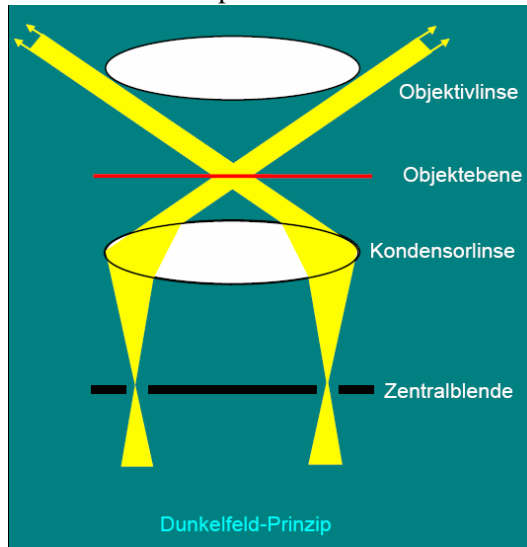
In metallischen Nanopartikeln trennt ein einfallendes lichtelektrisches Feld die elektrischen Ladungen im Metall (siehe Abb. 4.3). Die gesamte Elektronenwolke des Metallnanopartikels stellt ein schwingendes System dar, das eine Eigenfrequenz besitzt. Infolge dieser Anregung kommt es zu einer schmalbandigen Lichtabsorption und einer spektral analog verlaufenden Lichtstreuung ins Fernfeld. Des Weiteren tritt ein verstärktes lokales Lichtfeld um das Teilchen herum auf.

Diese Schwingungen der Elektronen in Metallpartikeln werden im Allgemeinen als Plasmonen bezeichnet. Diese können in Form von bunten Lichtpunkten unter bestimmten Umständen sichtbar gemacht werden. Als wir die Goldkugeln mit dem Durchmesser von 80nm erhalten hatten, beachteten wir nicht, dass die Lösung eine rötliche Färbung aufweist (Abb. 4.4). Im Nachhinein war dies für uns jedoch sehr von Interesse, da wir erkannten, dass der Farbton durch eine Plasmonenanregung hervorgerufen werden musste. Der direkte Vergleich der beiden Abbildungen 4.4 und 4.5 zeigt, dass die Färbung bei weißem Hintergrund rötlich ist, während sie in der Reflexion vor schwarzem Hintergrund grünlich bis gelb ist. Des Weiteren wird deutlich, dass die SiO₂-Kugeln das Licht nur streuen, während man bei den Goldkugeln ein farbiges Licht sieht, wenn man sie mit weißem Licht bestrahlt. Bereits im Mittelalter wurde genau diese Eigenschaft von Gold schon genutzt um Glas rot zu färben.

4.2 Das Dunkelfeld

Nun wollten wir die Goldkugeln mit den unterschiedlichen Durchmessern unter dem Lichtmikroskop betrachten. Wir erhofften uns bunte Lichtpunkte zu sehen, was bedeuten würde, dass Licht aus dem Nahfeld ausgekoppelt würde, welches dann wiederum auf die Plasmonenanregung zurückzuführen ist. Also legten wir einen Objektträger mit Goldkugeln unter das Mikroskop. Leider konnten wir nur das Licht der Mikroskoplampe sehen, während das Licht, das durch die Plasmonenanregung hervorgerufen wird, überstrahlt wurde. Wir versuchten die Kugeln auf dem Objektträger von der Seite zu beleuchten, so dass nur die Goldkugeln angestrahlt werden und wir durch das Objektiv das von den Goldkugeln emittierte Licht sehen wollten. Dieser Versuch misslang jedoch. Wir suchten also nach einer Lösung, dieses Problem zu beheben. Ein Dunkelfeldkondensator (Abb. 4.6) brachte uns schließlich einen großen Schritt weiter. Dieser wird unterhalb der Objektebene montiert. Dabei fällt der Strahl nicht direkt in die Linse ein. Nur das vom Objekt reflektierte Licht gelangt durch die Objektivlinse ins Auge des Betrachters. Deshalb sieht man nur Dunkelheit, wenn kein Objekt im Präparat ist. Nach einigem herumfragen erfuhren wir dann, dass unsere Schule ein solches Dunkelfeldmikroskop besitzt,

jedoch ein sehr altes. Trotzdem haben wir voller Erwartung dann versucht, unsere Nanokugeln unter diesem Mikroskop leuchten zu sehen. Leider wurden wir bereits nach kurzer Zeit enttäuscht. Man



konnte das Mikroskop nur bis zu einer 150fachen Vergrößerung verwenden. Wenn man ein größeres Objektiv verwendet, muss dieses auch näher an die Probe gebracht werden. Dies hat aber zur Folge, dass es sich dann nicht mehr im Dunkelfeld befindet, sondern schon im Lichtkegel ist (vgl. Abb. 4.6). Also brauchten wir einen anderen Dunkelfeldkondensator, bzw. ein anderes Mikroskop. Ein Mikroskop hatten wir noch, doch leider mussten wir über eine Firma aus Köln, die Mikroskope repariert erfahren, dass es keinen Dunkelfeldkondensator für dieses Mikroskop gibt. Freundlicherweise hat uns die Firma aber eines ihrer Mikroskope mit einem Dunkelfeldkondensator zur Verfügung gestellt.

Abb. 4.6 Das Prinzip des Dunkelfeldes

4.3 Unser „Universum“ auf dem Objektträger

Nachdem wir also ein einfaches Dunkelfeldmikroskop in der Schule hatten, haben wir unsere SiO_2 – Kugeln darunter gelegt und konnten ein viel kontrastreicherer Bild sehen. Nun wollten wir versuchen die 80nm kleinen Goldpartikel mit dem Lichtmikroskop sichtbar zu machen. Dazu haben wir zunächst einen Objektträger mit Glasreiniger, im Ultraschallbad und anschließend mit einem Brillenputztuch gründlich gereinigt, denn uns ist bei den Vorversuchen aufgefallen, dass bereits ein kleines Staubkörnchen im Dunkelfeld sichtbar gemacht wird. Dann haben wir einen Tropfen von der Goldkolloidlösung genommen und ihn mit entionisiertem Wasser verdünnt, da die Goldkonzentration sehr hoch ist. Dadurch wollten wir erreichen, dass die Goldkugeln weit voneinander entfernt liegen. Dann kam der große Augenblick. Wir haben den Objektträger unter das Dunkelfeldmikroskop gelegt. Zunächst haben wir uns die Kugeln bei 100facher Vergrößerung angesehen. Dabei konnten wir beobachten, dass winzige kleine Punkte, die jedoch keine Farbe besaßen, sondern einfach nur leicht hell waren, sich hin und her bewegten. Dies geschah auf Grund der Brownschen Molekularbewegung, da die Kügelchen in Wasser schwimmen. Erst als das Wasser verdunstet war, hörte die Bewegung nach und nach auf. So richtig zufrieden waren wir jedoch mit dieser Beobachtung noch nicht. Also haben wir die Vergrößerung erhöht. Wir haben uns eine Mischung aus 20nm und 80nm Kugeln dann bei 400facher Vergrößerung angesehen. Hierbei konnte man die winzigen Partikelchen schon viel besser erkennen, doch bunte Farben konnten wir leider immer noch nicht sehen. Vielleicht war unser Dunkelfeldmikroskop doch nicht gut genug. Deshalb haben wir sie mit einer Digitalkamera fotografiert, und haben dazu eine lange Belichtungszeit von etwa einer Sekunde gewählt. Zu unserer Freude stellten wir fest, dass man auf den Fotos wirklich winzige kleine bunt leuchtende Punkte sehen kann. Wir hatten es doch noch geschafft. Wir konnten also über die Goldnanokugeln die Information des Nahfeldes erhalten.

Bei der näheren Betrachtung der Nanopartikel ist uns aufgefallen, dass die leuchtenden Goldpartikel wie ein kleines „Universum“ auf dem Objektträger aussehen. Wir hatten auf diesem Objektträger Goldkugeln mit 20nm und 80nm Durchmesser. Nun fällt es aber auf, dass man viele verschiedene bunte Farben erkennen kann. Dies liegt ganz einfach daran, dass die Farbe des durch die Plasmonen emittierten Lichtes zum einen von der Größe der Partikel und zum anderen von der Form der Partikel abhängt. Nun ist es vorgekommen, dass durch den Trocknungsprozess die winzigen Kügelchen teilweise aneinander klebten. Sie werden durch die elektrische Kraft aneinander gezogen und verklumpen somit. Dies erkennt man ganz deutlich an den großen hellen Flecken und auch an den anderen etwas größeren Lichtflecken (grün, gelblich).

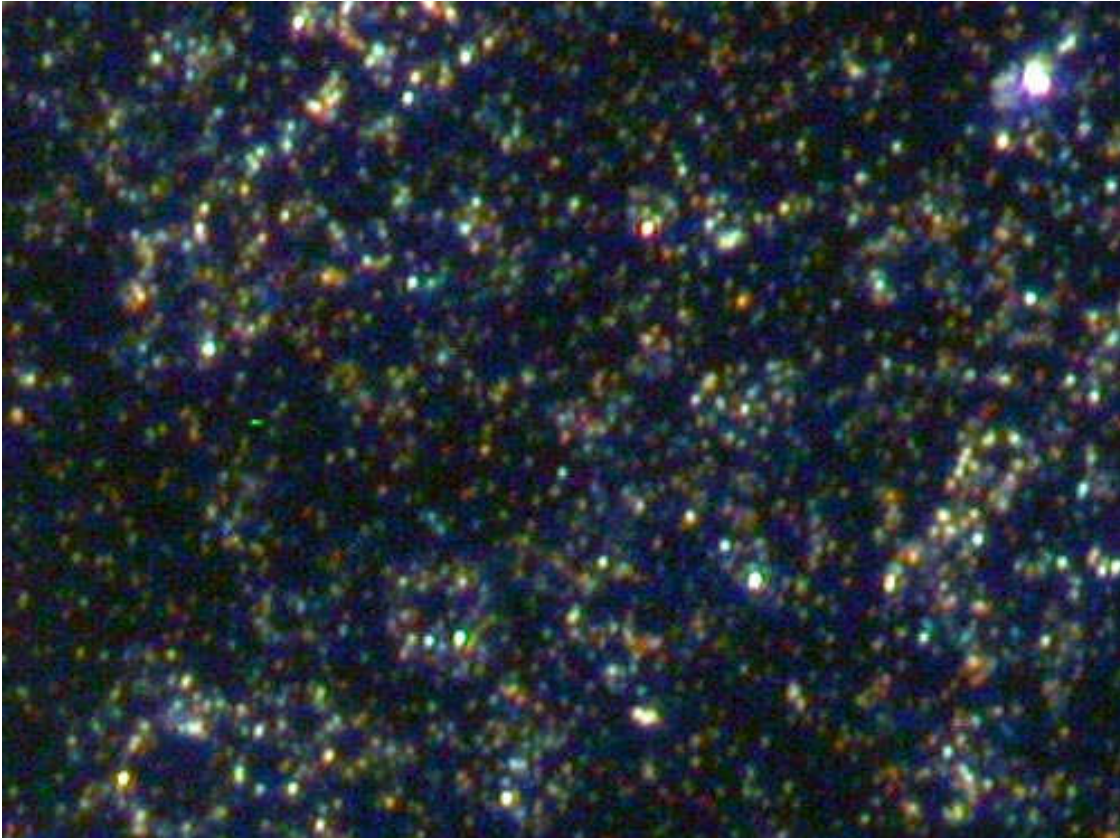


Abb. 4.7 Die Farbe der Goldteilchen ist auf die Größe und Form zurückzuführen.

5. Kritische Reflexion und Ausblick

Die Lichtmikroskopie hat in den Bereichen Medizin, Biologie und Materialwissenschaften enorme Fortschritte bewirkt. Somit eröffnen die winzigen Lichtpunkte, die aussehen wie ein kleines „Universum“, ein neues Tor in der Forschung. Wenn man alleine die Erkenntnisse sieht, die die konventionelle Lichtmikroskopie erbracht hat, erkennt man, dass es mit der Anregung von Plasmonen möglich ist, völlig neue Mikroskope herzustellen, welche die Medizin noch einen großen Schritt weiter bringen könnten. Weiterhin ermöglicht die Anregung von Plasmonen und die Auskopplung der Information aus dem Nahfeld die Herstellung von CDs und DVDs mit einer wesentlich höheren Datendichte, als es bisher der Fall ist. Dazu könnten beispielsweise einfach die nm-großen Goldpartikel auf die CD aufgetragen werden, mit deren Hilfe man an die Nahfeldinformation gelangen kann. Eines der wichtigsten und reizvollsten Ziele ist mit Sicherheit auch die Kopplung von Elektronik und Photonik. In der Zukunft wird die Photonik aus der Kommunikations- und Informationstechnologie gar nicht mehr weg zu denken sein.

Wir haben mit unseren einfachen schulischen Mitteln den Einstieg in einen hochaktuellen und zukunftssträchtigen Forschungsbereich geschafft, welcher die Grundlage für eine Weiterentwicklung in der Computertechnologie, der Biologie, den Materialwissenschaften und vor allem aber in der Medizin ist.

6.Dank

Unser besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. von Plessen von der RWTH Aachen für anregende Gespräche. Außerdem danken wir Herrn Weber von der Firma MODIS in Köln, der uns ein Mikroskop und einen Dunkelfeldkondensator zur Verfügung gestellt hat. Zum Schluss gilt natürlich unser besonderer Dank unserem Betreuungslehrer Walter Stein für seine Unterstützung und Motivation.

7. Literatur

- [1] Hrsg.: H. Gobrecht Bergmann-Schaefer - Lehrbuch der Experimentalphysik Band III
Optik, Berlin, 1974