Herstellung von Silber-Nanodrähten

Jugend forscht: Neue Möglichkeit für transparente leitende Beschichtungen

Benedikt Pintat, ABI Lab im Technologie- und Gründerzentrum Bitterfeld-Wolfen GmbH

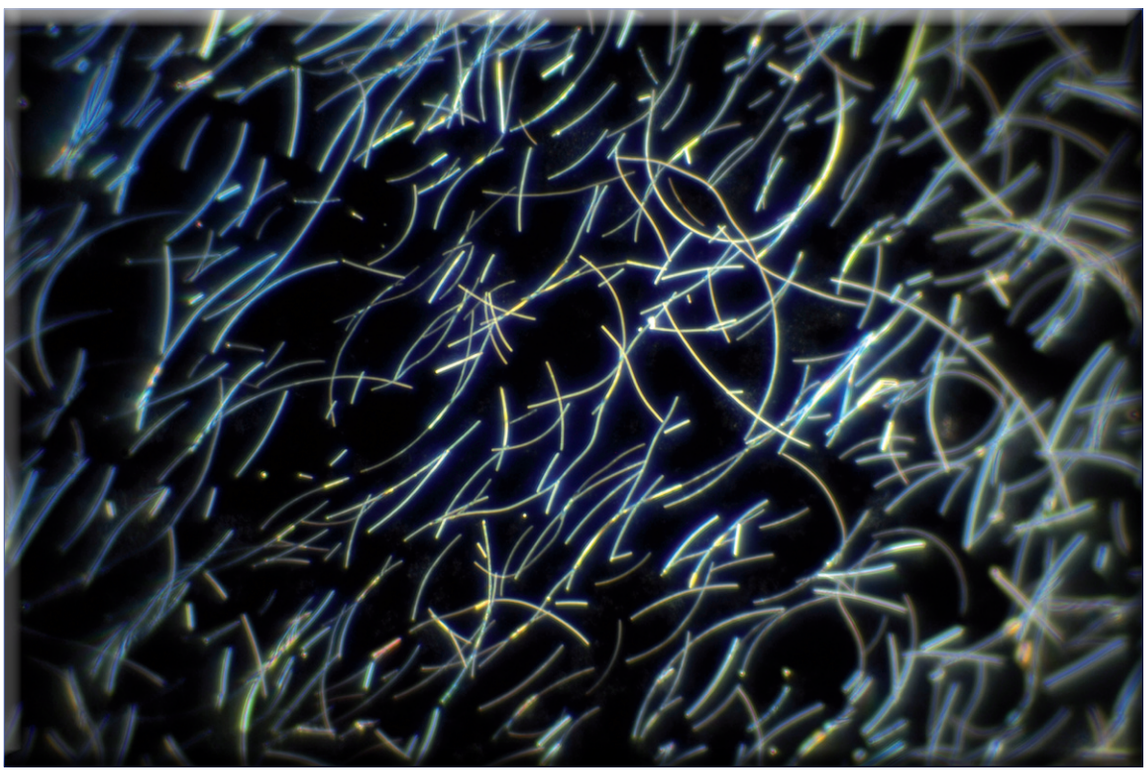


Abbildung 1: Silber-Nanodrähte unter dem Mikroskop. Sie haben eine Länge von ca. 20-60 µm.

Heutzutage sind transparente leitende Schichten stark in den Focus der Wissenschaft und Industrie geraten. Ihre Anwendung in der Optoelektronik ermöglicht die Herstellung von Dünnschichtsolarzellen und Sensoren mit vorher nicht dagewesenen Eigenschaften. Außerdem eröffnen sich komplett neue Möglichkeiten für die Display-Technologie und deren Anwendung. Jedoch weisen die kommerziellen Beschichtungen auch einige Nachteile auf, denn bekannte ITO- Beschichtungen sind sehr spröde und bringen einen hohen Kostenaufwand mit sich. Daher ist es das Ziel, eine alternative Beschichtung zu entwickeln, die in ihren Eigenschaften und im Herstellungsaufwand die bisherigen Verfahren übertrifft. Nanopartikel weisen dafür die richtigen Grund-Eigenschaften auf. Jedoch muss dafür ein geeigneter Stoff gefunden und funktionalisiert werden, um eine bessere Beschichtung realisieren zu können.

Es ist mir gelungen, Silber-Nanodrähte zu synthetisieren (Abbildung 1). Diese weisen ein sehr hohes Verhältnis von Leitfähigkeit zu Transparenz auf und lassen sich um ein Vielfaches kostengünstiger herstellen. Um das zu realisieren, wurden Polyol basierte Synthesen in der flüssigen Phase durchgeführt. Die entstanden Produkte wurden daraufhin sowohl unter dem Auflichtmikroskop als auch unter einem Dunkelfeldmikroskop analysiert und im Anschluss aufgearbeitet.

Der Autor:
Benedikt Pintat (19) studiert jetzt Ingenieurswesen in Leipzig. Er erreichte in diesem Jahr bei „Jugend forscht“ den 3. Preis Chemie, gestiftet vom Fonds der Chemischen Industrie. Auch der Preis für eine Arbeit aus dem Bereich der chemischen Nanotechnologie – gestiftet vom Fonds der Chemischen Industrie – ging an ihn. Zudem darf er am Stockholm International Youth Science Seminar (SIYSS) teilnehmen und auch der Nobelpreisverleihung in Stockholm beiwohnen; dies stifteten die SIYSS Förbundet Unga Forskare und die Ernst A. C. Lange-Stiftung, Bremen.

Einleitung

Die denkbaren Anwendungsmöglichkeiten von transparenten leitenden Schichten hatten meine Aufmerksamkeit sehr schnell geweckt. Denn mir war bekannt, dass auch ziemlich alle Halbleiter und Funktionsschichten in der Displaytechnologie transparent verarbeitet werden können. Jedoch ist die Entwicklung von Displays mit solchen Eigenschaften noch nicht möglich, da die bekannten Beschichtungsmethoden nicht für einen flexiblen und transparenten Einsatz geeignet sind.

Daher war die Überlegung schnell gemacht, Nanopartikel-Strukturen zu verwenden, die den genannten Anforderungen gerecht werden können. Dabei traten folgende Fragen auf:

- Welche Nanopartikel sind am besten geeignet?
- Wie kann man dieses Nanopartikel effizient und kostengünstig herstellen?
- Wie können sie als Beschichtung genutzt werden?

Es ist schon einiges über Nanopartikel bekannt, doch aufgrund von Recherchen kamen nur Silber-Nanodrähte in Frage, da diese ein extrem hohes Verhältnis von Leitfähigkeit und Transparenz aufweisen. Jedoch besteht immer noch das Problem, dass heutzutage verwendete Verfahren viel zu komplex und kostenaufwändig sind und eine industrielle Nutzung der Nanodrähte kaum realisierbar ist.

Daher entwickelte ich ein Verfahren, um Silber-Nanodrähte einfach und schnell herzustellen und zu verwenden. Im Folgenden stelle ich nun meine entwickelten Prozesse vor.

Synthese

Ethylenglycol basierte Synthese

Die Synthese, mit der die Silber-Nanodrähte hergestellt wurden, basiert auf einer Reaktion in der flüssigen Phase. Dabei finden alle Prozesse in Ethylenglycol statt. Dieses findet dabei Gebrauch aufgrund der Möglichkeit, Reaktionstemperaturen von bis zu 190 °C zu realisieren und der Eigenschaft, dass sich Ethylenglycol, ab einer bestimmten Temperatur, in Glycolaldehyd zersetzt.

$$2\ HOCH_2CH_2OH + O_2 \rightarrow$$
$$2\ HOCH_2CHO + 2\ H_2O$$

Dieses wirkt reduzierend und kann die vorhandenen Silber-Ionen in Silber- Atome umwandeln. Des Weiteren wird der Lösung Polyvinylpyrrolidon zugesetzt, denn dieses hat eine Schlüsselrolle für den Prozess, auf welche später eingegangen wird. Zusätzlich werden Chlorid-Ionen in Form von Natriumchlorid und auch Bromid-Ionen in Form von Natriumbromid in einer modifizierten Synthese zugeführt. Daraus resultiert, dass die Aggregation der Silber-Atome sich verändert.

Ablauf der Synthese

Zu Beginn der Synthese werden Maßlösungen vorbereitet. Diese bestehen aus jeweils Ethylenglycol sowie:

A: Natriumchlorid
B: Natriumbromid
C: Polyvinylpyrrolidon (PVP MW 58.000)
D: Silbernitrat

Abbildung 2: Der Aufbau für die Synthese.

Danach wird ein Rundkolben in einem Ölbad platziert, dass sich über eine Heizplatte mit magnetischem Rührer erhitzen lässt. Daraufhin wird Ethylenglycol als Ausgangslösung in den Rundkolben gefüllt und mit Teilen der Maßlösungen versetzt. Dabei sollte die Lösung D zum Schluss hinzugefügt werden, um ein vorzeitiges Ausfällen und somit die Bildung von Silber-Teilchen zu verhindern, denn Silbernitrat in Lösung bildet sowohl mit Chlorid- als auch Bromid-Ionen einen Niederschlag. Sobald sich alle Lösungen zusammen mit dem Ethylenglycol im Rundkolben befinden wird das Gemisch mit einem Magnetrührer für 10 Minuten bei 500 U/min bei Raumtemperatur gerührt (Abbildung 2).

Während dieser Zeit reagieren die Silber-Ionen mit den Lösungen A und B und erste Silberatom-Cluster entstehen. Das ist daran zu erkennen, dass die Lösung perlmuttfarben schimmert, was wiederum das Vorhandensein von Silber- Nanopartikeln beweist. Nach dem Rührvorgang wird die Heizplatte eingeschaltet und das Gemisch wird zügig auf eine Temperatur von 170 °C erwärmt. Dabei finden gleich mehrere Prozesse statt. Auf der einen Seite entsteht Glycolaldehyd, welches noch mehr Silber-Ionen reduziert. Die entstandenen Silber-Atome in der Lösung beginnen sich zu Clustern zusammenzuschließen, welche in speziellen Formen immer größer wachsen. Unter anderem entstehen bei diesem Prozess kugelförmige Teilchen, doch die Cluster, aus denen die Silber-Nanodrähte entstehen sind, Dekaeder. Diese können nur entstehen, indem die Parameter für das spezielle Kristallwachstum gegeben sind. Dazu sind auch die Chlorid- und Bromid-Ionen notwendig, denn sie lenken die Anlagerung der Silberatome so, dass die gewünschten Dekaeder entstehen (Abbildung 3).

In Abhängigkeit der Konzentrationen der Lösungen und der Dauer des Rührvorganges kann

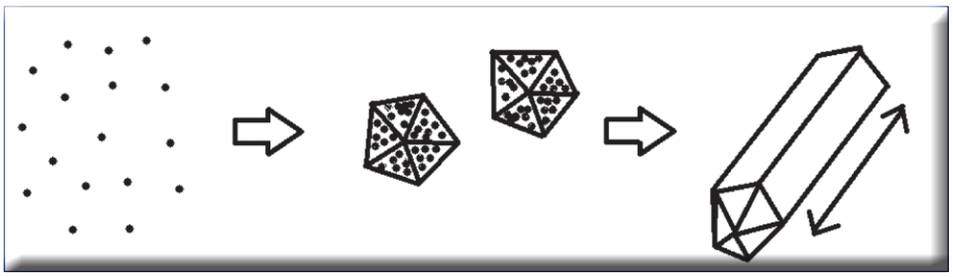


Abbildung 3: Entstehung von Silber-Nanodrähten.

die Größe dieser Kristalle variiert werden und somit auch der Durchmesser der Nanodrähte. Ist eine bestimmte Größe und Temperatur erreicht beginnt sich das PVP an die Facetten {100} anzulagern und beschränkt somit das Wachstum des Kristalls auf die Dreiecksflächen des Dekaeders. Weil sich die Silberatome nur noch an die Facetten {111} anlagern, wächst der Kristall nur noch eindimensional, und der Silber-Nanodraht entsteht. Nach dem Aufheizen wird der Rührer abgestellt, denn das Rühren würde den Wachstumsprozess nur stören.

Eine weitere kritische Bedingung für die Entstehung solcher Nanopartikel ist die Eliminierung des Sauerstoffs aus der Reaktionslösung. Denn der Sauerstoff lagert sich so an die entstehenden Silber- Cluster an, dass keine Dekaeder und somit auch keine Nanodrähte entstehen können. Um eine Inertisierung zu gewährleisten, ist es möglich Kupferchlorid zur Lösung zuzusetzen, doch die Nutzung von Schutzgas hat sich als effizienter herausgestellt. Jedoch ist ein passendes Verhältnis wichtig, denn die Umwandlung von Ethylenglycol zu Glycolaldehyd benötigt auch Sauerstoff. Nach ungefähr einer Stunde ist der Synthese-Prozess abgeschlossen. Das kann man auch an der Farbänderung erkennen. Je nach Länge und Durchmesser der Nanodrähte erhält die Lösung eine typische Farbe. Diese kann von Braun-Grau bis Grün-Grau reichen, aber auch hierbei bestätigt ein Schimmern der Lösung das Vorhandensein der Nanodrähte.

Die Parameter und deren Auswirkungen

Reaktionstemperatur

Die Temperatur spielt für den Erfolg der Nanodrahtsynthese eine große Rolle. Unter einer bestimmten Temperaturgrenze ist die Entstehung von Nanodrähten nicht möglich, da die Energie nicht ausreicht dafür, dass sich Silberatome so anordnen, dass die benötigten Dekaeder-Kristalle entstehen. Ist die Temperatur jedoch zu hoch, verringert sich der Durchmesser und die Länge der Nanodrähte, da die Kristalle viel schneller wachsen und somit auch die Silber-Atome in der Lösung schneller verbraucht sind. Trotzdem muss die Temperatur hoch genug sein, damit eine Umsetzung von Ethylenglycol in Glycolaldehyd erfolgt.

Natriumchlorid-Konzentration

Das Vorhandensein von Natriumchlorid ist ein wichtiges Kriterium für die erfolgreiche Synthese von Silber-Nanodrähten. Die anwesenden Chlorid-Ionen in der Lösung verhindern den Zusammenschluss von Silber-Nanopartikeln zu größeren Clustern und ermöglichen somit, dass Dekaeder-Kristalle in ihrer Form bestehen bleiben und der Wachstumsprozess gewährleistet werden kann. Sie stabilisieren also den Prozess und führen zu einer größeren Ausbeute. Außerdem stellt der Silberchlorid-Niederschlag der sich zu Beginn der Synthese bildet einen Samen dar, aus dem dann Dekaeder-Kristalle wachsen können. Ist jedoch die Konzentration zu hoch, so entstehen hauptsächlich große Partikel mit Größenordnungen im Mikrometerbereich, da der Überschuss an Chlorid- Ionen zu einem unkontrollierbaren Kristallwachstum führt.

Verhältnis von PVP zu Silbernitrat

Die Entstehung von Silber-Nanodrähten ist ohne Zusatz von PVP nicht realisierbar, da es das eindimensionale Wachstum der Nanodrähte ermöglicht. Befindet sich jedoch zu wenig Polyvinylpyrrolidon in der Lösung, können nicht alle Facetten {100} komplett abgedeckt werden und die gewünschte Anlagerung der Silber-Partikel kann nicht stattfinden. Auf der anderen Seite wirkt sich ein Überschuss an PVP auch nachteilig auf die Synthese aus, denn das übrige Polymer bedeckt dann auch die Facetten {111} und verhindert somit das eindimensionale Wachstum des Nanodrahtes. Das hat zur Folge, dass sich große Silber-Teilchen bilden und die Ausbeute enorm sinkt.

Aufbereitung des Reaktionsprodukts

Um die Nanodrähte auch wirklich nutzbar zu machen, ist es notwendig, sie von den vorhanden Nanopartikeln, deren Bildung nicht ganz ausgeschlossen werden kann, zu trennen. Bei Prozessen, die in einem so mikroskopisch kleinen Raum stattfinden, ist das um ein Vielfaches komplexer, da gänzlich andere Eigenschaften und Reaktionen der Nanoteilchen beachtet werden müssen.

Von daher wurden sehr einfache, aber trotzdem hoch effiziente Methoden entwickelt, um eine Trennung zu realisieren.

Selektive Fällung

Bei der selektiven Fällung macht man sich die Eigenschaften der Reaktionslösung zu nutze. Nach dem Synthese-Prozess wird die Lösung

mit Wasser versetzt, um das Gemisch schlagartig herab zu kühlen und die Reaktion zu stoppen. Danach wird die Lösung im Verhältnis 1:5 mit Aceton versetzt. Dabei beginnen sich die Silber-Nanodrähte anzusammeln kleine Klumpen zu bilden. Der Grund dafür ist, das, sich PVP nicht in Aceton lösen lässt. Da jedoch der Großteil der Nanodrähte mit diesem bedeckt ist, agglomerieren sie sich und fallen als grober Niederschlag aus (Abbildung 4). Nur die Silber-Nanopartikel bleiben in der Schwebe und lassen sich so einfach durch Dekantieren von den Silber-Nanodrähten trennen. Diese Methode ist sehr einfach und effizient, denn es ist möglich, optisch genau bestimmen zu können, wann alle Nanodrähte ausgefallen sind. Die sich bildenden Klümpchen sind groß und können klar erkannt werden. Außerdem setzen sie sich sehr schnell ab sodass innerhalb von einer Stunde eine Verarbeitung möglich ist. Nach dem Dekantieren wird das Gemisch wieder mit einer wässrigen PVP-Lösung versetzt und erneut Aceton hinzugefügt. Somit lässt sich der Prozess wiederholen. Nach 2-4 Wiederholungen ist die höchste Reinheit der Nanodrähte erreicht. Abschließend werden die Silber-Nanodrähte in Ethanol suspendiert, wobei sich auch das Polyvinylpyrrolidon löst und eine zur Beschichtung nutzbare Lösung entsteht.

Zentrifugieren

Eine weitere Möglichkeit der Aufbereitung ist das Zentrifugieren. Dabei wird die Reaktionslösung für eine bestimmte Zeit bei einer speziellen Umdrehungszahl zentrifugiert. Das führt dazu, dass die schwereren Nanodrähte sich zuerst absetzen und die Lösung über ihnen hauptsächlich Nanopartikel enthält. Danach kann die obere Flüssigkeit abgehebert werden und das entnommene Volumen wird wieder durch Aceton aufgefüllt. Auch hierbei kann der Prozess wiederholt werden, um die Reinheit zu erhöhen und zum Schluss wird das Gemisch mit Ethanol versetzt, um das restliche PVP zu lösen.

Versuche zur Trennung der Nanoteilchen durch Zentrifugieren

Da die optimale Zeit und Umdrehungszahl stark von der Länge der Nanodrähte abhängt, führte ich Versuchsreihen durch. Diese erfolgten jedoch in Ethanol anstatt in Aceton. Dabei betrug die Probemenge im Mikrozentrifugen-Röhrchen ca. 1 ml. Die verwendete Zentrifuge ist von Bio-Rad vom Typ Mikrocentrifuge 16K.

Nach dem Zentrifugieren wurden 10 μl der oberen Phase auf einen rotierenden Objektträger getropft (Spin-Coating; Abbildung 5). Daraufhin wurde die Probe getrocknet mit Immersionsöl (n=1,516) eingedeckt und ein Deckglas aufgelegt (Dicke 0,17 mm). Anschließend wurde die obere Phase entfernt und der Bodensatz in ca. 1 ml Ethanol aufgeschwemmt. Davon wurden 10 μl entnommen und nach dem gleichen Prinzip auf den Objektträger gebracht und untersucht (Abbildung 6).

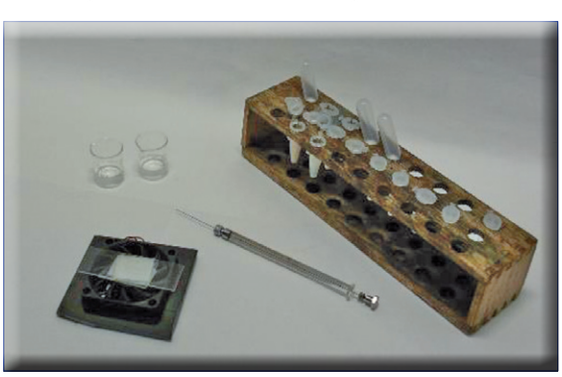
Abbildung 4: Abgesetzte Nanodrähte.

Membranfiltration

Außerdem ist es möglich, dass synthetisierte Gemisch ab zu filtrieren. Dabei wird sich der Umstand zu Nutze gemacht, dass die Nanodrähte um ein Vielfaches größer sind als die Nanopartikel. Von daher ist es möglich, die beiden Teilchenarten komplett zu trennen, indem man Filter mit einer Porengröße benutzt, sodass Nanopartikel durch ihn hindurch wandern können und Nanodrähte nicht. Danach kann der Filter ausgewaschen werden und es bleiben die reinen Silber-Nanodrähte zurück.

Dabei wurden zwei verschiedene Filtersorten benutzt, jeweils Nitrocellulose- Filter mit einer Porengröße von 0,2 μm und 0,4 μm. Dabei muss jedoch mit einer wässrigen Lösung gearbeitet werden, denn sowohl Aceton als auch Ethanol würden das Filtermaterial auflösen oder aufquellen lassen. Außerdem wird eine weitere Eigenschaft der Nitrocellulose-Filter genutzt. Unter dem Mikroskop betrachtet haben sie eine stark faserige Struktur, was dazu führt, dass sich die Nanopartikel leicht in der Nitrocellulose verfangen und nicht wieder mit ausgespült werden können. Das kann man auch auf den mikroskopischen Bildern erkennen. Auf Abbildung 7 sind die Nanoteilchen zu sehen, die sich in der Cellulose verfangen haben. Dadurch wird es möglich sehr hohe Reinheit bei einer großen Ausbeute zu erreichen.

Abbildung 5: Aufbau beim Spin-Coating.



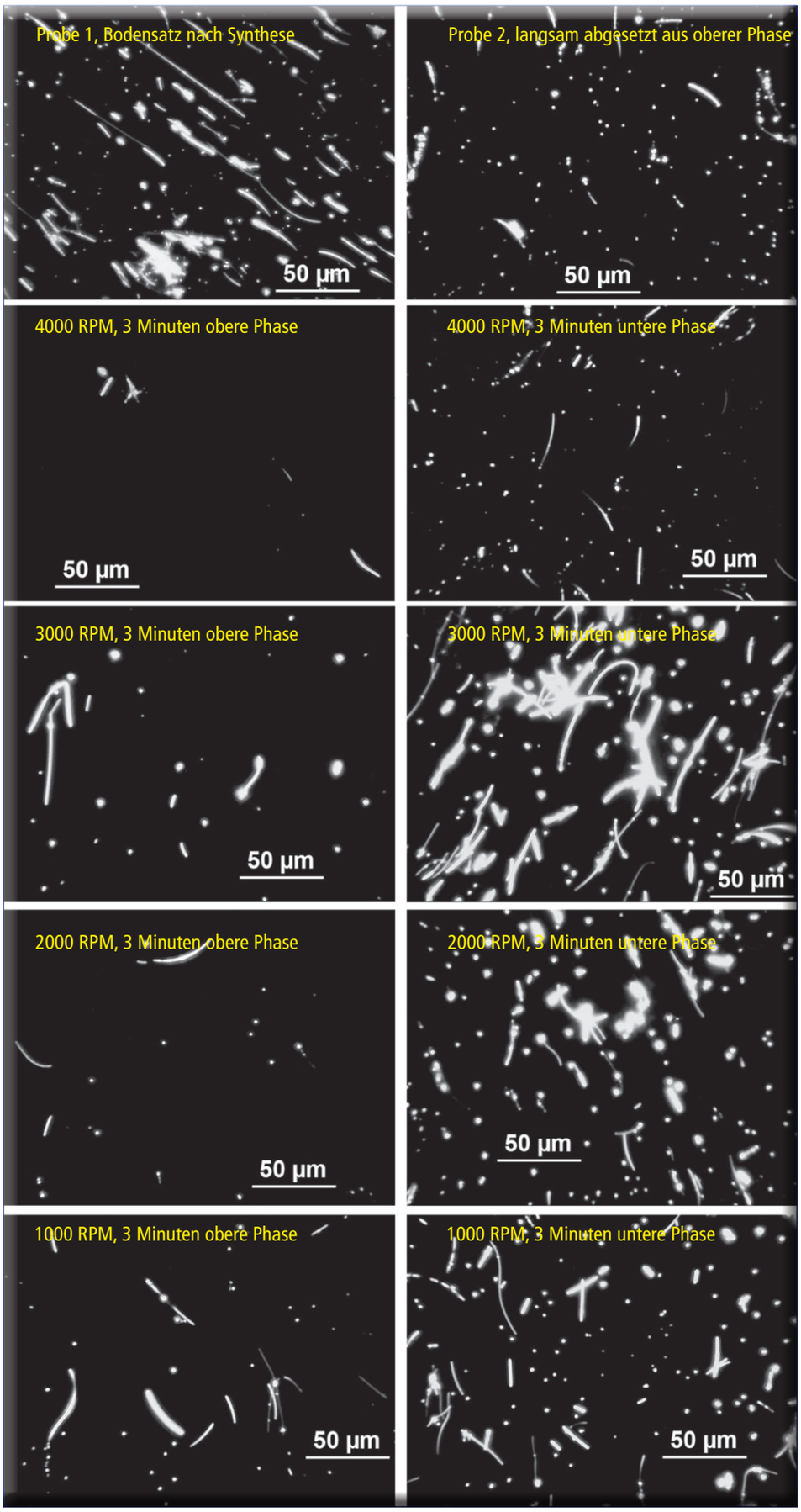


Abbildung 6: Trennung der Nanoteilchen durch Zentrifugieren. Linker Teil: Ausgangsmaterial 1 (Bodensatz nach Synthese); rechter Teil: Ausgangsmaterial 2 (langsam abgesetzt aus oberer Phase).

Analyse der Reaktionsprodukte durch Lichtmikroskopie

Für die Charakterisierung der Syntheseprodukte konnte ich nur lichtmikroskopische Methoden einsetzen.

Die Abbildung der wahren Struktur von Nanoteilchen liegt weit unterhalb der Auflösungsgrenzen von Lichtmikroskopen.

Diese Grenze kann man grob nach folgender Formel abschätzen. Der Abstand zwischen bzw. deren Größe muss mehr als die Hälfte der Wellenlänge des eingesetzten Lichtes betragen. Für grünes Licht liegt die optische Auflösungsgrenze also bei ca. 270 nm = 0,27 μm. Die Dicke der Nanowires beträgt lt. Literatur nur wenige Nanometer, wobei deren Länge mehr als 10 000 nm sein soll.

Trotzdem kann man das Vorhandensein solch kleiner Teilchen mit einem Lichtmikroskop nachweisen.

Dazu nutzt man z. B. die Dunkelfeld-Mikroskopie. Hierbei wird durch eine zentrale Rundblende bzw. mit einem speziellen Dunkelfeld-Kondensor der zentrale Bereich der Beleuchtung ausgeblendet. Die Objekte werden dann nur durch schräge Lichtstrahlen beleuchtet. Diese Lichtstrahlen sind so schräg zur optischen Achse des Mikroskops, dass sie am Objektiv vorbeigehen. Sind kleine Partikel im Weg der Lichtstrahlen, so wird das Licht an diesen Teilchen gestreut und sie werden hell auf dunklem Hintergrund sichtbar.

Bei den anfänglichen Synthesen waren nur wenige Nanowires, aber viele kleinere Partikel entstanden. Daher erfolgte die Untersuchung mit immergiertem Spiegelkondensor und Immersionsobjektiv, um möglichst hohe Vergrößerungen zu erzielen. Nach der Optimierung der Synthesen entstanden deutlich mehr Strukturen mit Längen > 20 000 nm.

Diese Partikel lassen sich auch mit einfachem Dunkelfeld (eigene Zentralblenden) und Trockenobjektiven (z. B. 40 x) gut nachweisen (Abbildung 7).

Bei den Untersuchungen kann man erkennen, dass nicht alle vorhandenen Teilchen gleichzeitig sichtbar sind. Bei kleinsten Veränderungen der konischen Beleuchtung leuchten bisher nicht sichtbare Teichen auf und bisher leuchtende Wires werden unsichtbar. Auffällig ist auch die unterschiedliche Färbung der Wires je nach Orientierung (Abbildung 8)!

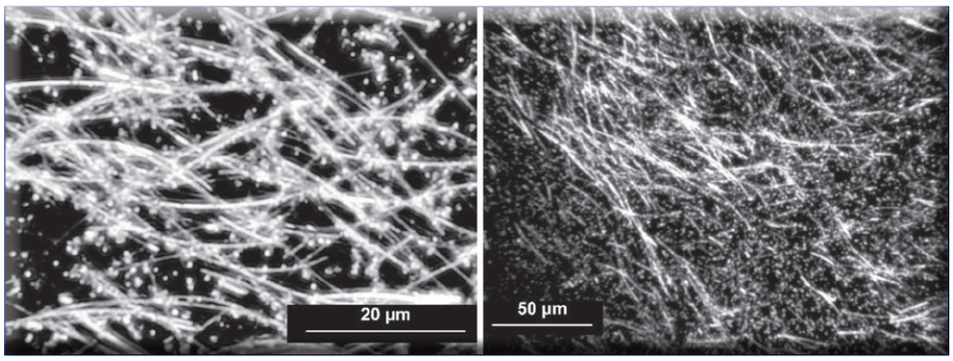


Abbildung 7: Zwei Aufnahmen von Silber-Nanodrähten in Dunkelfeld-Mikroskopie mit unterschiedlicher Vergrößerung.

Rückschlüsse auf die wahre Struktur der vorhandenen Nanoteilchen sind mit diesen lichtoptischen Untersuchungsmethoden nicht möglich. Die genaue Struktur der Nanoteilchen soll mittels Elektronenmikroskopie ermittelt werden.

Weitere Untersuchungen wurden mittels Auflichtmikroskopie durchgeführt. Hier konnte ebenfalls Dunkelfeld-Beleuchtung eingesetzt werden. Zum Einsatz kommen hier Ringspiegel, die das auffallende Licht seitlich schräg auf das Objekt lenken.

Mit der Methode der Auflicht-Interferenzmikroskopie kann man Differenzen optischer Weglängen im Präparat durch Farbkontraste verdeutlichen. Erste Untersuchungen an kleinteiligen Syntheseprodukten sind bereits erfolgt und die Untersuchung an Nanowires ist in Bearbeitung.

Die eingesetzten lichtmikroskopischen Methoden ermöglichen eine Einschätzung des Erfolges der Synthese- und Reinigungsmethoden!

Ergebnisse

Im Verlaufe der vielen Experimente konnten Stück für Stück die komplexen Zusammenhänge des Synthese-Prozesses erarbeitet werden. Zu Beginn der Forschung war noch nicht klar gewesen, wie schwer es sein würde, den Vorgang präzise einzustellen und das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Dabei wurden einige Synthesen durchgeführt bei denen auf eine Inertisierung durch Schutzgas verzichtet wurde. Diese führten jedoch lediglich nur zur Erzeugung von Silber-Nanopartikeln. Dadurch wurde erst klar, wie wichtig die Austreibung des Sauerstoffs aus der Synthese-Lösung, in bestimmten Phasen des Synthese- Prozesses ist. Des Weiteren musste die Verzögerung, die beim Erhitzen der Lösung durch das Ölbad auftritt ausgeglichen werden, um eine stabile Temperatur gewährleisten zu können. Denn die Temperatur während des Prozesses ist ausschlaggebend für den Erfolg der Synthese. So konnte nach vielen Versuchen das System richtig eingestellt werden und eine schnelle und einfache Herstellung von Silber-Nanodrähten wurde entwickelt. Dabei ist besonders anzumerken, dass die Ausbeuten des Prozesses sehr groß und die weitere Verarbeitung sehr einfach sind.

Mit der Nutzung des Prinzips der selektiven Fällung konnte eine sehr günstige und leichte Methode entwickelt werden, um die Nanodrähte effizient von den Nanopartikeln zu trennen. Dies stellt mit das wichtigste Ergebnis dar, denn eine Trennung von Teilchen dieser Größenordnung ist sehr kompliziert. Dabei hat sich auch das Zentrifugieren als nicht optimales Verfahren erwiesen, denn je nach Verwendung von Ethanol oder Aceton verändert sich auch die Viskosität der Lösung. Das hat zur Folge, dass Umdrehungszahl und Zeit der Zentrifugierung abgeändert werden müssen, was wiederum das Verfahren zu aufwendig und ineffizient macht. Außerdem wurde mit der Nutzung von Membranfiltern eine weitere Methode

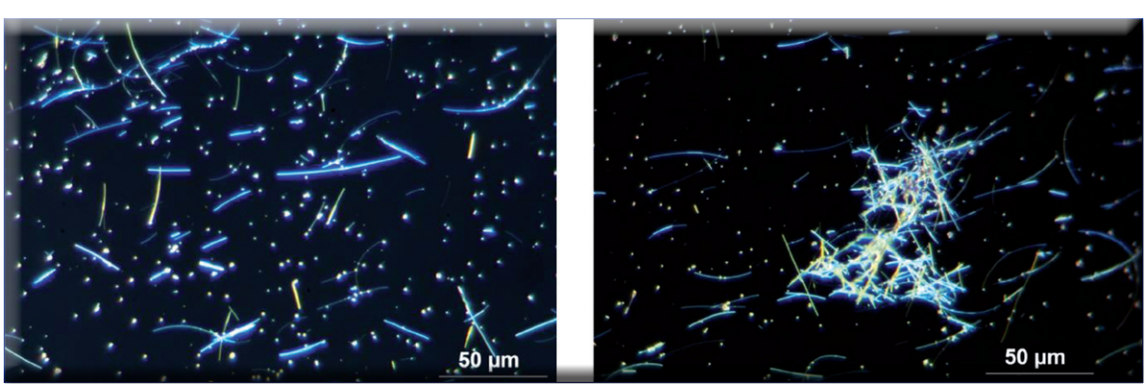


Abbildung 8: Aufnahmen von Silber-Nanodrähten mit spezieller Beleuchtung.

genutzt, die eine einfache Aufarbeitung ermöglicht. Durch die faserige Struktur der Nitrocellulose-Filter verfangen sich die Nanopartikel sehr leicht im Filter und können beim Auswaschen der Nanodrähte nicht wieder mit ausgespült werden. Dieses Verfahren ermöglicht eine hohe Ausbeute und kann mit wenig Aufwand durchgeführt werden. Schlussendlich konnte hat sich auch die Nutzung eines Lichtmikroskops als geeignet erwiesen, denn um das Vorhandenseien von Nanodrähten zu beweisen, reicht die optische Vergrößerungsgrenze aus. Dabei entspricht die dargestellte Größe der Teilchen nicht der Originalgröße, denn durch Brechungsvorgänge an den Nanodrähten können sie vergrößert erscheinen. Mit der Synthese war es möglich, Nanodrähte mit großer Länge und gleichzeitig kleinem Durchmesser zu erzeugen, wodurch sich ein optimales Verhältnis von Transparenz und Leitfähigkeit der Beschichtung ergibt.

In Bezug auf vorhandene wissenschaftliche Erkenntnisse wird deutlich, dass dieses Verfahren um ein vielfaches einfacher und kostengünstiger ist als andere kommerzielle. Außerdem ist mit diesem Prozess eine gezielte Kontrolle aller Eigenschaften der Nanodrähte wie Länge und Durchmesser möglich. Das macht die Synthese auch für eine industrielle Nutzung hochinteressant, denn die einfachen Aufarbeitungsmethoden könnten auch im großen Maßstab realisiert werden. Mit einer kontinuierlichen Injektion der Maßlösungen in die Ausgangslösung und mit einer stabileren Reaktionstemperatur kann der Prozess noch weiter verbessert werden.

Die Forschungsarbeit kann einen großen Einfluss auf die Entwicklung von industriellen Herstellungsprozessen für Silber-Nanodrähten haben und somit zu einer vermehrten Nutzung dieser Strukturen in der Optoelektronik und Displaytechnologie führen.

Zusammenfassung und Anwendung

Abschließend lässt sich anmerken, dass das Ziel der Entwicklung eines kostengünstigen und effizienten Synthese Prozesses für Silber-Nanodrähte, erreicht wurde. Dabei konnte auf alle Forschungsprobleme eingegangen und eine passende Lösung gefunden werden. Trotz allem mussten viele Schwierigkeiten überwunden werden, denn die vielen Parameter der Synthese mussten korrekt eingestellt werden, um eine effiziente und einfache Herstellung zu ermöglichen. Es hat sich auch herausgestellt, dass diese Nanodrähte die optimale Grundlage für transparente leitende Beschichtungen darstellen, denn sie bieten eine große Transparenz bei trotzdem hoher Dichte der Strukturen. Diese Eigenschaften machen die Nanopartikel geeignet, um in ihrer Funktion das kommerziell verwendete ITO zu übertreffen, wobei die Nanodrähte im Verbund vor allem nicht die leichte Brüchigkeit des ITOs aufweisen.

In Zukunft könnten solche Schichten für transparente Solarzellen oder auch LEDs verwendet werden. Außerdem ist es möglich, flexible Materialien damit zu beschichten, denn durch den Verbund von vielen Einzelstrukturen lässt sich eine Elastizität erzeugen, welche die Beschichtung nicht beschädigt. Schlussendlich wird die Forschung zu diesen Vorgängen weitergeführt, denn es soll ein Prototyp für eine transparente LED entstehen und die Prozesse sollen noch weiter verbessert werden. ***CLB***

Danksagung

Für die freundliche Unterstützung meiner Arbeit möchte ich mich bei allen Beteiligten recht herzlich bedanken:
Betreuung: Dipl.-Chem. Egbert Lange (TGZ)
Schülerlabor im TGZ Technologie- und Gründerzentrum Bitterfeld-Wolfen GmbH Chemie Park, Areal A, Andresenstr. 1a Ortsteil Wolfen, 06766 Bitterfeld- Wolfen

Literaturverzeichnis

[1] Luis Jose Andres, Rapid synthesis of ultra-long silver nanowires for trailor- made transparent conductive electrodes, 2015 IOP Publishing Ltd

[2] Amanda L. Tiano, Solution-based synthetic strategies for one-dimensional metal-containing nanostructures, Chem. Commun 2010, 46

[3] Younan Xia, One Dimensional Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Application, 2003 Wiley-VCH Verlag & Co.

[4] Yugang Sun, Crystalline Silver Nanowires by Soft Solution Processing, 2002 American Chemical Society