



1. Einleitung

"The Next Big Thing is Really Small" betiteln Jack Uldrich und Deb Newberry ein populärwissenschaftliches Buch im Jahr 2003 [1]. Damit ist die Nanotechnologie gemeint, die den Mesokosmos auf der Größenskala zwischen 2 und 200 nm abdeckt. Bis zu drei Billionen Dollar soll das Weltmarktvolumen von nano-optimierten Produkten im Jahr 2015 sein, was ca. 15 % der globalen Güterproduktion entspräche [2] und somit das derzeitige Bruttoinlandsprodukt der Bundesrepublik Deutschland übersteigen würde. Das Potential dieser Zukunftstechnologie hat auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung erkannt und strebt mit dem gerade veröffentlichten „Aktionsplan Nanotechnologie 2015“ eine Position an der technologischen Weltspitze an [3].

Das große Interesse an Nanostrukturen rührt von ihren außergewöhnlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften her, die über die Veränderung der Strukturgröße gezielt eingestellt werden können. Wie diese Eigenschaften in Anwendungen nutzbar gemacht werden können, wird in den Ingenieur- und Naturwissenschaften zurzeit intensiv erforscht. In dieser Arbeit wird beispielhaft eine Methode dargestellt, mit der elektrische Bauelemente aus Nanopartikeln hergestellt werden können.

1.1. Elektrische Bauelemente aus Nanopartikeln

Elektrische Bauelemente mit mesoskopischen Abmessungen sind allgegenwärtig: Die Herstellung der aktuellen Prozessorgeneration von Intel erfolgt lithografisch in einem 32 nm-Prozess [4]. Neben den mit jeder weiteren Miniaturisierung stark steigenden Produktionskosten erreicht man hier auch physikalisch einen Grenzbereich. Die quantenmechanischen Eigenschaften der Elektronen, welche als Informationsträger dienen, beginnen den Betrieb des Prozessors zu stören. Die quantenmechanischen Effekte in den Nanostrukturen lassen sich aber auch nutzen, um neuartige Bauelemente zu konstruieren: Zum Beispiel können Ein-Elektron-Transistoren hergestellt [5] und verschiedenfar-

1. Einleitung

bige LEDs (Light Emitting Diodes) auf Basis von Cadmiumselenid-Nanopartikeln gebaut werden [6].

Nanopartikel sind freie Nanostrukturen, die in allen drei Raumrichtungen Abmessungen zwischen 2 und 200 nm besitzen. Ihre Herstellung ist mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand möglich, und auch bei den erzeugbaren Stoffsystemen ist man im Gegensatz zu den lithografischen Verfahren weniger eingeschränkt. Durch die gezielte Kontrolle der Partikelgröße und Größenverteilung lassen sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften maßschneidern, weshalb Nanopartikel bereits heute in vielen Bereichen Anwendung finden. Beispiele hierfür sind kratzfeste Autolacke (Mercedes Benz Nano Paint), antibakterielle Oberflächen (Cloucryl Nano Finish) und Sonnenschutzcreme (Nivea Pflegende Sonnenmilch LF 15) [7].

Für viele dieser Anwendungen reicht eine willkürliche Anordnung der Nanopartikel aus. In anderen Bereichen wie insbesondere der Herstellung von elektrischen Bauelementen ist eine gezielte Positionierung der Partikel erwünscht, wobei das laterale Auflösungsvermögen der Lithografie erreicht werden soll.

Durch die Vorbehandlung einer Oberfläche ist es möglich, Material aus der Gas- oder Flüssigphase am gewünschten Ort abzuscheiden: Bei elektrisch geladenen Partikeln erreicht die Nanoxerografie Strukturgrößen von 80 nm [8]. Dabei werden von einem Stempel Ladungen auf das Substrat transferiert, die die Partikel anziehen. Auch durch die lithografische Herstellung von Elektroden und das Anlegen einer Spannung lassen sich solche Ladungen erzeugen [9]. Nicht geladene Partikel können unter Ausnutzung der Kapillarität beim Verdampfen von Lösungen direkt entlang der lithografischen Strukturen angeordnet werden [10, 11], oder sie werden wie bei der Xerografie von einem Stempel übertragen [12]. Umgekehrt lassen sich vorher aufgebraute Partikel durch die Nanoimprinting Lithography (NIL) mit einem Stempel in Form pressen [13]. Ersetzt man einen Aufdampfschritt der Lithografie durch eine Partikeldeposition, so können beim Entfernen des Fotolacks überschüssige Partikel entfernt werden [14]. Die resultierenden Strukturgrößen der beschriebenen Methoden liegen im Bereich von 10 bis 70 nm und sind im Wesentlichen durch die lithografischen Schritte limitiert.

Andere Verfahren zur Positionierung verwenden Masken oder Blenden, durch die hindurch deponiert wird. Beim Verdampfen von z.B. Platin lassen sich so Nanopartikel mit einem Durchmesser bis herunter zu 35 nm herstellen [15]. Mit einer Lochmaske und einer elektrostatischen, virtuellen Verkleinerung des Lochdurchmessers wurde jüngst eine

Strukturbreite von 80nm bei der direkten Deposition von 20nm großen Silber-Nanopartikeln erreicht [16].

Eine direkte und gezielte Anordnung der Partikel kann auch mit Hilfe geeigneter Sonden erfolgen. Das Aufbringen von dispergierten Nanopartikeln mit einem Tintenstrahldrucker ist eine schnelle und technisch ausgereifte Methode zur Herstellung von Strukturen mit μm -Auflösung [17, 18]. Mit der „Dip-Pen Nano-Lithography“ können mit der in eine Partikel-beladene Tinte getauchten Spitze eines Rasterkraftmikroskop (engl.: Atomic Force Microscope) (AFM) Strukturen kleiner als 100nm erzeugt werden [19]. Mit den dargestellten Methoden ist es jedoch nicht möglich, einzelne, wenige Nanometer große Partikel gezielt zu positionieren.

Bis heute existieren nur wenige Techniken, mit denen eine Anordnung von sub-10nm großen Partikeln mit nm-Auflösung möglich ist. Durch Nanomanipulation mit einem AFM können beispielsweise vorher auf ein Substrat aufgebrachte Nanopartikel einzeln bewegt werden [20, 21], was insbesondere mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden ist. Zuvor müssen die Partikel in geeigneter Menge auf das Substrat aufgebracht werden. Die Verwendung von chemisch und physikalisch unterschiedlichen Spezies, wie es für die Erzeugung von z.B. Dioden oder Transistoren notwendig ist, ist so nicht möglich.

Um Bauelemente aus Nanopartikeln mit definierten Eigenschaften herstellen zu können, ist nicht nur eine gezielte Positionierung der Partikel notwendig. Vielmehr benötigt man ein Verständnis der mikroskopischen elektrischen Transportvorgänge, die das Verhalten von elektrischen Bauelementen maßgeblich bestimmen. Der Ladungstransport in niederdimensionalen elektronischen Systemen, insbesondere in Quantenpunkten, wurde und wird intensiv erforscht [22]. Bei der Verwendung von Nanopartikeln und -ensembles verursachen unter anderem deren Größe und Größenverteilung, die Beschaffenheit der Partikelgrenzflächen und die mechanische Ordnung Unterschiede zwischen den mikroskopischen Eigenschaften der Partikel und den makroskopischen Eigenschaften des Ensembles [23].

1.2. Zielsetzung dieser Arbeit

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Gasphasen-basierten Systems, mit dem gröbenselektierte, halbleitende Nanopartikel mit einer räumlichen Auflösung im Nanometer-Bereich zur Herstellung von funktionalen elektrischen Bauelementen positio-

1. Einleitung

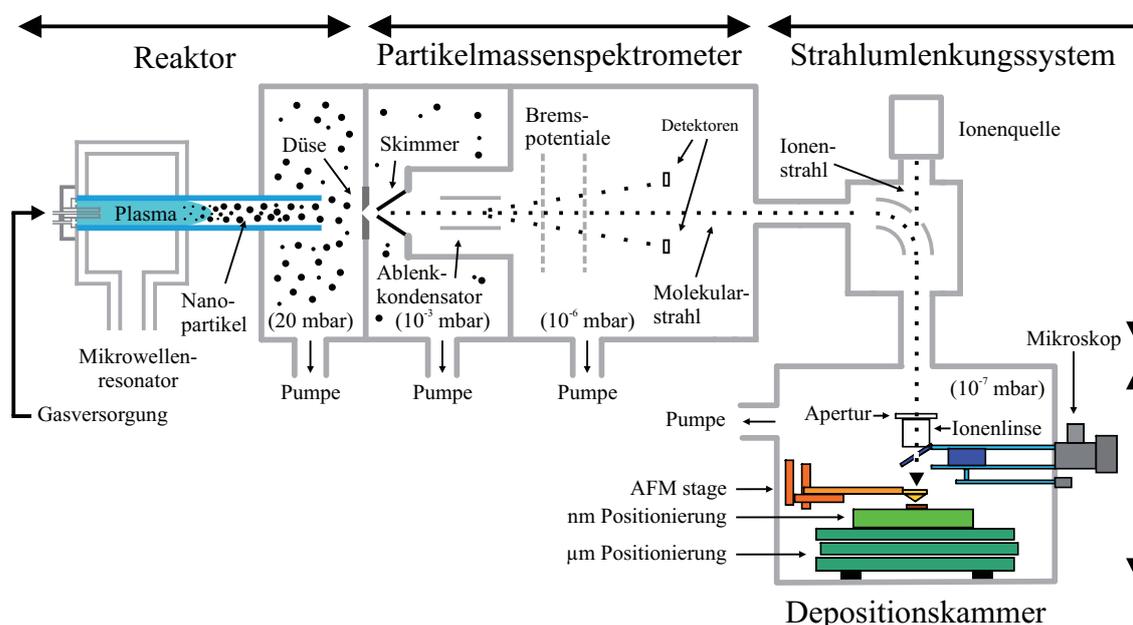


Abbildung 1.1.: Schematische Darstellung des Gesamtsystems

nirt werden können. Das Konzept des geplanten Gesamtsystems ist schematisch in Abbildung 1.1 dargestellt. Es besteht aus den folgenden vier Baugruppen:

Nanopartikel-Reaktor Im Nanopartikel-Reaktor werden mittels chemischer Gasphasensynthese (CVS) Nanopartikel mit wohldefinierten Eigenschaften hergestellt, die über die Syntheseparameter gezielt eingestellt werden können. Die notwendige Energie wird durch ein mikrowelleninduziertes Niederdruck-Plasma bereitgestellt.

Partikelmassenspektrometer (PMS) Mit dem PMS kann das Massenspektrum der im Nanopartikel-Reaktor hergestellten Partikel in line gemessen werden. Dazu wird ein mit Partikeln beladener Molekularstrahl aus dem Nanopartikel-Reaktor entnommen und mit einem Plattenkondensator entsprechend dem Verhältnis von Ladung und Masse der Partikel aufgefächert und detektiert.

Strahlumlenkungssystem Die Nanopartikel verlassen das PMS auf einer waagerechten Trajektorie und müssen um 90° nach unten abgelenkt werden, damit sie die Depositionskammer erreichen. Dies wird durch die Verwendung eines gebogenen Ablenk-kondensators erreicht. Zusätzlich ist es möglich, einen Ionenstrahl in die Depositionskammer einzukoppeln. Dieser lässt sich deutlich besser steuern als der

mit Nanopartikeln beladene Molekularstrahl und dient zum Test der Depositionskammer.

Depositionskammer In der Depositionskammer wird der aus dem Strahlumlenkungssystem vertikal einfallende Ionenstrahl durch eine Ionenoptik auf die durchbohrte Spitze eines Rasterkraftmikroskops (engl.: Atomic Force Microscope, AFM) fokussiert. Durch die Kontrolle der AFM-Spitze kann mit hoher lateraler Auflösung auf ein Substrat deponiert werden. Da die Nanopartikel und die Gasionen vergleichbare kinetische Energien besitzen, ist die Ionenoptik in beiden Fällen ohne Modifikation für eine Deposition durch die AFM-Spitze verwendbar. Der Ionenstrahl wird zum Justieren der Ionenoptik und dem Test der Depositionskammer verwendet.

Als Stoffsystem wird Silizium verwendet, welches zurzeit das dominierende Material in der Halbleiterindustrie ist. Es bietet die Vorteile, dass die Eigenschaften des Volumensmaterials wohlbekannt sind, es ungiftig und in praktisch unbegrenzter Menge verfügbar ist.

Diese Arbeit wurde zusammen mit dem RUBION an der Ruhruniversität Bochum im Rahmen des Kooperationsprojekts „Cluster-jet addressing of nano-particles to provide functional structures“ angefertigt, das von der VolkswagenStiftung in der Förderinitiative „Komplexe Materialien“ finanziert wurde.

In den folgenden Kapiteln werden die Baugruppen des Cluster-jets im Detail beschrieben. Anhand von Tests mit den verschiedenen Baugruppen soll gezeigt werden, dass zukünftig die Nanopartikel-Deposition mit einer räumlichen Auflösung im Nanometerbereich mit diesem System möglich ist. Nanopartikel wurden mit der Depositionskammer bisher noch nicht deponiert.

In Hinblick auf die Herstellung elektrischer Bauelemente auf Silizium-Nanopartikel-Basis werden neben den experimentellen Methoden zur Erzeugung deponierter Nanopartikel als zweiter Schwerpunkt die mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Nanopartikel-Pulvern anhand von Kompaktierungsmessungen untersucht. Nach der Entnahme aus dem Nanopartikel-Reaktor besitzt das Probenpulver eine hohe Porosität, welche zu einer geringen oder nicht vorhandenen elektrischen Leitfähigkeit führt. Für eine Charakterisierung der elektrischen Pulvereigenschaften ist deshalb eine Verringerung der Porosität d.h. eine Kompaktierung des Pulvers notwendig. Die Kompaktierungsmessungen sollen zum Verständnis der mikroskopischen Ladungstransportmechanismen inner-



1. Einleitung

halb von Partikelnetzwerken beitragen, wie sie auch bei der gezielten Deposition von Partikeln auf Substraten entstehen. Anhand der Ergebnisse der Kompaktierungsmessungen sollen die für Herstellung der Bauelemente vorteilhaften Partikeleigenschaften identifiziert werden, um diese dann im „Cluster-jet“ gezielt herzustellen.

Diese Arbeit ist wie folgt gegliedert:

- Im Anschluss an diese Einleitung werden in Kapitel 2 die relevanten Grundlagen dargestellt. Die besonderen mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Silizium-Nanopartikeln und Partikelensembles werden beschrieben. Darüber hinaus werden die Grundlagen der Herstellung und in line Größenselektion von halbleitenden Nanopartikeln dargestellt.
- Die Beschreibung der experimentellen Methoden der Kompaktierung von Partikelensembles sowie von Nanopartikel-Synthese, in line Größenselektion, Strahlumlenkung und Deposition erfolgt in den Kapiteln 3 und 4.
- In den Kapiteln 5, 6 und 7 werden die Ergebnisse der Kompaktierungsexperimente an Pulverproben, der Synthese und Charakterisierung von Silizium-Nanopartikeln und der Ionen- und Nanopartikel-Deposition dargestellt und im gemeinsamen Kontext diskutiert.
- Kapitel 8 fasst die Ergebnisse und Schlussfolgerungen noch einmal zusammen.
- Der Anhang und das Literaturverzeichnis schließen diese Arbeit ab.