

Mikroskopieren mit einzelnen Ionen

Ein neuartiges Ionenmikroskop nutzt einzelne Ionen, um rauschfreie Abbildungen mit einer Auflösung im Nanometerbereich zu erzeugen

In der klassischen Lichtmikroskopie ist die Auflösung durch Beugung und damit durch die Wellenlänge des verwendeten Lichts begrenzt. Gleiches trifft auch auf Elektronenmikroskope zu, die allerdings mit massiven Teilchen arbeiten. Aufgrund der deutlich kleineren Wellenlänge dieser Partikel können solche Mikroskope deshalb eine wesentlich höhere Auflösung erzielen [1,2]. Physikalisch gilt dabei, je größer die Masse der Teilchen, desto kleiner die Wellenlänge. Wegen der im Vergleich zu Elektronen noch größeren Teilchenmasse werden aus diesem Grund auch Ionenmikroskope gebaut.

Historisch gesehen war die Auflösung dieser Mikroskope zunächst durch technische Einschränkungen in der Abbildungsoptik und der Quellgröße begrenzt. Im Laufe der Zeit konnte aber durch Verbesserungen beider eine erhebliche Steigerung der Auflösung als auch Fortschritte bei vielen anderen Eigenschaften dieser Mikroskope erzielt werden. Bei den Ionenmikroskopen fand diese Entwicklung mit dem Einführen von Galliumquellen [3] sowie etwas später Heliumquellen [4] ihren vorläufigen Höhepunkt und ist in ihrer Bedeutung durch viele Anwendungen in den verschiedensten Bereichen der Wissenschaft bestätigt [5].

Um die Entwicklung der Quellen voranzutreiben, kommen neuerdings vermehrt Methoden aus der Physik der kalten Atome zum Einsatz. Ziel ist es die Quellen hinsichtlich ihrer Emissionsqualität [6,7], der zeitlichen Kontrolle [8,9] oder dem Bereitstellen deterministischer Emissionseigenschaften [10,11] zu verbessern. Die prinzipielle Machbarkeit des Letzteren konnte nun in einem Experiment, durchgeführt von unserer Arbeitsgruppe an der Universität Mainz, gezeigt werden. Dabei wurde eine deterministische Ionenquelle auf Basis einer Paulfalle realisiert und zur Transmissionsmikroskopie eingesetzt. Bei einer solchen Quelle kann der Emissionszeitpunkt eines einzelnen Teilchens exakt festgelegt werden. Was die Implikationen dieser deterministischen Quelle sind und welche Vorteile sie gegenüber Quellen mit herkömmlicher Emissionsstatistik bietet, soll im Folgenden erläutert werden.

Auf die Statistik der Quelle kommt es an

Fast alle Quellen, die in der Mikroskopie eingesetzt werden - seien es nun Photonen-, Elektronen- oder Ionenquellen - gehorchen einer Poissonstatistik und weisen deshalb ein inhärentes Rauschen auf. Dies bedeutet, dass der Fluss, d.h. die mittlere Zahl der Teilchen pro Zeiteinheit, bekannt ist, jedoch gilt dies nur im Mittel und kann deshalb für ein festes Zeitintervall davon abweichen. Weil diese statistische Abweichung mit der Wurzel der mittleren Anzahl der Teilchen skaliert, ist sie im Verhältnis gesehen umso kleiner, je größer das betrachtete Zeitintervall ist.

Im vorliegenden Fall der Transmissionsmikroskopie (für andere Arten der Mikroskopie gelten ähnliche Überlegungen), wird eine Probe im Fokus eines Teilchenstrahls gerastert. Durch Detektieren der Teilchen hinter der Probe wird so sukzessive jeder Punkt der Probe auf ihre Durchlässigkeit hin überprüft. Dadurch wird nach und nach eine Art Schattenbild der Probe erstellt (Abbildung 1).

Detektiert man für einen bestimmten Punkt weniger Teilchen als im Mittel ausgesandt wurden, lässt sich jedoch nicht sagen ob dies wegen der Abdeckung durch die Probe oder aufgrund der Schwankung bedingt durch das Rauschen der Quelle geschieht. Da die Fluktuationen aber für längere Zeitintervalle abnehmen, kann dieser Effekt des Rauschens einfach durch eine längere Detektionszeit oder ein Erhöhen des Flusses unterdrückt werden.

Für manche Proben jedoch, kann ein hoher Fluss unerwünscht sein. Dies ist der Fall wenn bei hohem Fluss durch die geladenen Teilchen Aufladungen entstehen oder eine empfindliche Probe sogar beschädigt wird. Einen Weg diese Fluktuationen zu vermeiden und so die Notwendigkeit hoher Flüsse zu umgehen, ist Gegenstand des vorliegenden Experiments.

Eine Paulfalle als deterministische Einzelionenquelle

Ionenfallen, zu denen auch die Paulfallen gehören, erlauben es, einzelne Ionen zu fangen und zu speichern. In den letzten drei Jahrzehnten seit ihrer Erfindung wurde eine Vielzahl an technischen Verbesserungen und experimentellen Instrumenten hervorgebracht, die eine bis dahin beispiellose Kontrolle aller Freiheitsgrade der gefangenen Teilchen ermöglichen. Dazu zählt beispielsweise das Laserkühlen, welches das Kühlen der Ionen bis auf wenige hundert Mikrokkelvin erlaubt. Solche Möglichkeiten haben die Ionenfalle zu einem wichtigen Instrument in vielen Bereichen der Grundlagenforschung gemacht, wie dies zum Beispiel in der Spektroskopie oder der experimentellen Quantenphysik der Fall ist. Sie wird aber auch in anwendungsorientierteren Feldern wie der Quanteninformationsverarbeitung verwendet.

Die einzigartigen Eigenschaften der Paulfalle lassen sich aber auch einsetzen um eine Ionenquelle zu realisieren. Die kleinen Temperaturen sowie eine gute räumliche Lokalisierung der Teilchen bieten ideale Voraussetzungen für eine Ionenquelle die in einem Mikroskop zum Einsatz kommen soll. Das Beschleunigen beziehungsweise Extrahieren der Teilchen aus der Falle geschieht dabei über das Zuschalten eines elektrischen Feldes [12,13].

Da man die Ionen in der Falle einfach zählen kann ist eine solche Quelle inhärent deterministisch, d.h. bei jedem Extraktionsvorgang ist die Anzahl der Ionen genau bekannt. Folglich weist eine so realisierte Quelle auch kein Rauschen auf. Beim Mikroskopieren erlaubt es diese Eigenschaft auch bei geringen Flüssen brauchbare Abbildungen zu generieren und so die Probe zu schonen. Am stärksten tritt dieser Unterschied gegenüber herkömmlichen Quellen zu Tage, wenn für eine Abbildung nur ein Ion pro Bildpunkt verwendet wird. Um dies zu verdeutlichen wurde im Experiment ein Objekt (Abbildung 2a)) mit nur einem deterministisch extrahierten Ion pro Bildpunkt abgebildet (Abbildung 2b)). Zum Vergleich wurde das selbe Objekt mit einer fluktuierenden Quelle die nur im Mittel ein Ion pro Bildpunkt aussendet aufgenommen (Abbildung 2c)). Der Unterschied ist sichtbar: das mit der fluktuierenden, poissonischen Quelle aufgenommene Bild ist wesentlich verrauschter.

Auch die mit der deterministischen Quelle generierten Bilder sind nicht komplett rauschfrei. Die Ursache dafür liegt in der Detektion der Ionen. Zum einen werden die Teilchen nur mit einer 96 prozentigen Wahrscheinlichkeit detektiert, was schließlich zu einem zwar geringen, aber unvermeidbaren Bildrauschen führt. Zum anderen irrt der Detektor manchmal und zählt ein Teilchen obwohl keines vorliegt. Das mittlere Auftreten solcher irrtümlicher Detektionen wird typischer Weise in der Dunkelzählrate eines Detektors angegeben. Auch hier hilft die deterministische Natur der Quelle: Da der

Extraktionszeitpunkt und somit auch der Zeitpunkt der erwarteten Detektion sehr genau bekannt ist, kann der Detektor nur zu genau diesem Zeitpunkt eingeschaltet werden. Im Experiment konnte so die Dunkelzählrate um bis zu sechs Größenordnungen unterdrückt werden.

Maximaler Informationsgewinn

Letztlich geht es beim Aufnehmen eines Bildes um Informationsgewinn. Bei Objekten bei denen bereits Information über die Form bekannt ist, wie zum Beispiel bei einem kreisförmigen Loch, lässt sich dies nutzen um den Informationsgewinn pro Teilchen auf die Spitze zu treiben. Unter Zuhilfenahme eines Algorithmus der in der Literatur als „Bayes experimental design“ bekannt ist [14], konnte dies experimentell realisiert werden.

Im Falle des Lochs ist schließlich bekannt, dass es kreisförmigen ist. Dies bedeutet es fehlt lediglich die Information wie groß der Radius ist und an welcher Stelle sich das Loch befindet. Der Algorithmus betrachtet diese Größen zunächst als unbekannt. Durch punktgenaues Sondieren der Probe mit einzelnen Ionen können diese Stellen auf Durchlässigkeit untersucht und somit die gesuchten Größen immer weiter eingegrenzt werden. Die Auswahl der zu sondierenden Stellen obliegt dabei dem Algorithmus. Dieser berechnet für jede einzelne Extraktion genau jene Stelle, bei der der potentielle Informationsgewinn maximal ist.

Im Experiment gelang es dadurch, die Mitte eines solchen Loches mit einer zehnmal höheren Genauigkeit zu bestimmen als dies mit einem linearen Rastern der Probe möglich war, während dabei gleichzeitig dreimal weniger Ionen benötigt wurden.

Auch wenn diese Experimente bereits zum Teil beeindruckende Resultate zeigen, gibt es dennoch viel Raum für Verbesserungen. So ist beispielsweise die Auflösung noch mehr als eine Größenordnung von der eines modernen Helium-Ionen-Mikroskopes entfernt. Diese Diskrepanz planen wir in der Zukunft durch geeignete Maßnahmen, darunter ein deutlich stabilerer experimenteller Aufbau, zu überbrücken. Zudem schränkt die Wiederholrate von drei Teilchen pro Sekunde, mit der aktuell die Ionen extrahiert werden können, die Zahl der möglichen Anwendungen stark ein. Auch dies wollen wir zukünftig verbessern indem wir die Ionen aus einem kalten Reservoir laden, wie es bereits in anderen Ionenfallenexperimenten praktiziert wird. Zudem ist es unsere Absicht die Ionen magnetisch (Spin) zu polarisieren. Dadurch könnten dann gezielt magnetische Eigenschaften von Proben untersucht werden.

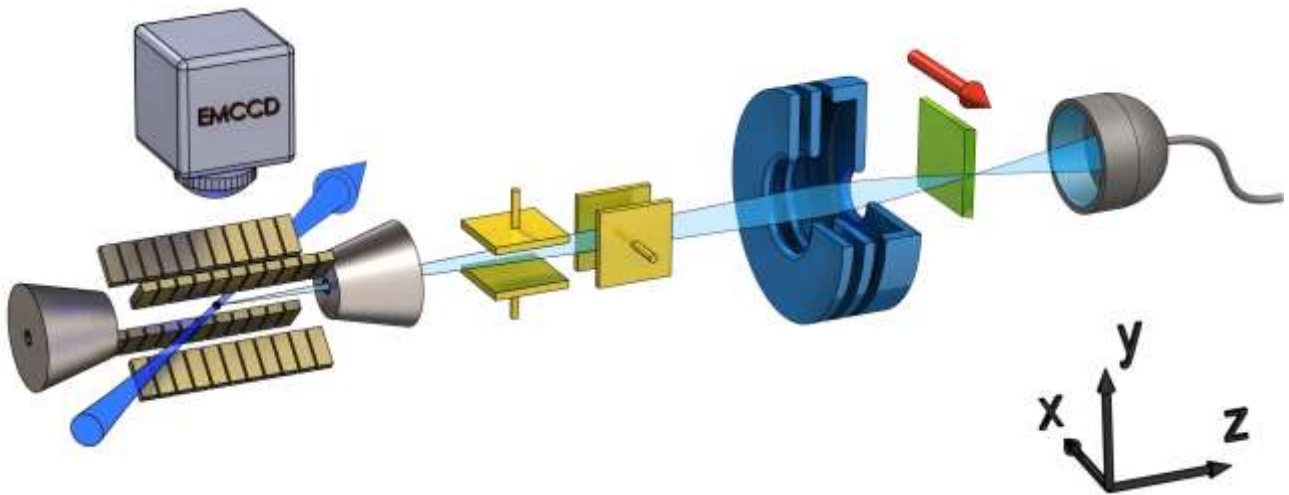


Abbildung 1: Funktionsprinzip des deterministischen Einzelionenmikroskops. Links abgebildet ist die Paulfalle in der einzelne Ionen gefangen und lasergekühlt (blauer Pfeil) werden. Sie werden mit einer Kamera (von oben) gezählt. Durch Extrahieren der Ionen (hellblauer Strahl), wird eine Quelle realisiert. Anschließend werden diese Ionen mittels einer Linse (blau, Schnitt) fokussiert. Je nachdem, ob die Probe (grün) den Strahl blockiert, werden die Ionen mit dem dahinter liegenden Detektor (grau) registriert, oder nicht. Durch Bewegen (roter Pfeil) der Probe relativ zum Strahl kann sie nach und nach abgebildet werden.

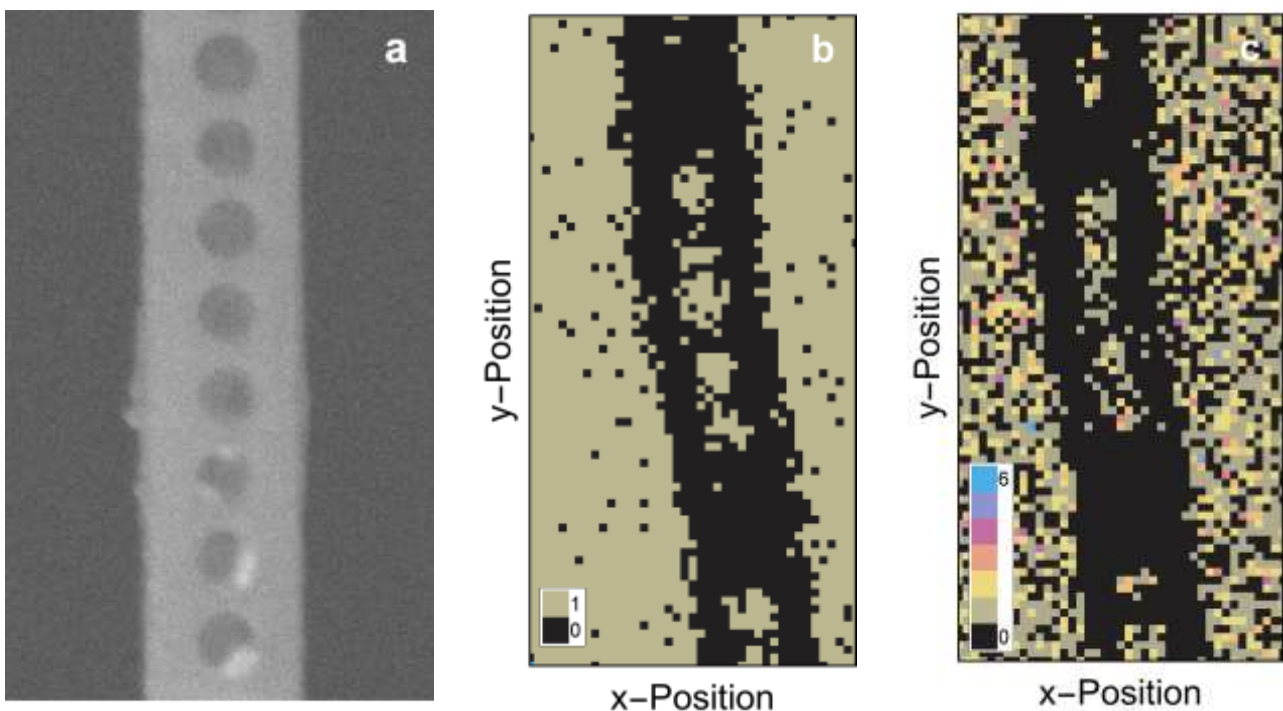


Abbildung 2: a) Bild der Probe, aufgenommen mit einem Elektronenmikroskop. Die Löcher haben einen Durchmesser von rund 150nm. b) Aufnahme der selben Probe unter Verwendung von einem Ion pro Bildpunkt, bei einer Auflösung von 25x25nm. c) Aufnahme mit einer Poisson'schen Quelle: Das stärkere Rauschen im Vergleich zu (b) ist deutlich sichtbar.

Originalpublikation:

Georg Jacob, Karin Groot-Berning, Sebastian Wolf, Stefan Ulm, Luc Couturier, Samuel T. Dawkins, Ulrich G. Poschinger, Ferdinand Schmidt-Kaler, and Kilian Singer, *Transmission Microscopy with Nanometer Resolution Using a Deterministic Single Ion Source*, Physical Review Letters 117, 20. Juli 2016

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.043001>

Literaturliste:

- [1] R. Erni et al., Phys. Rev. Lett. 102, 096101 (2009).
- [2] E. Ruska, Rev. mod. Phys., 59 (3), 627 (1987).
- [3] J. H. Orloff, J. Vac. Sci. Technol. (1975).
- [4] B. Ward et al., B: Microelectronics and Nanometer Structures 24, 2871 (2006).
- [5] N. Bassim et al., MRS Bull. 39, 317 (2014).
- [6] B. Knuffman et al., J. Appl. Phys. 114, 044303 (2013).
- [7] P. Hommelhoff, et al., Ultramicroscopy 109, 423 (2009).
- [8] A. McCulloch et al., Nat. Phys. 7, 785 (2011).
- [9] P. Hommelhoff et al., Phys. Rev. Lett. 97, 247402 (2006).
- [10] A. G. Manning et al., Phys. Rev. Lett. 113, 130403 (2014).
- [11] C. Ates et al., Phys. Rev. Lett. 110, 213003 (2013).
- [12] W. Schnitzler, et al., Phys. Rev. Lett. 102, 070501 (2009).
- [13] K. Izawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. 79, 4502 (2010).
- [14] D. V. Lindley, Ann. Math. Stat. , 986 (1956).

Kontakt:

Georg Jacob
WA Quantum, Institut für Physik
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Staudingerweg 7
55128 Mainz
Tel: 0049-6131-39-23671
Fax: 0049-6131-39-23428
<http://www.quantenbit.de>
georg.jacob@uni-mainz.de