

Einfluss des optischen Systems auf interferometrische Durchmesserbestimmungen von Silizium-Präzisionskugeln für das Avogadro-Projekt

Guido Bartl, Arnold Nicolaus

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

<mailto:guido.bartl@ptb.de>

Der Artikel umfasst eine kurze Beschreibung des Experiments zur Volumenmessung der Silizium-Präzisionskugeln für das Avogadro-Projekt mit dem Kugelinterferometer der PTB sowie das Resultat einer vorläufigen Untersuchung zum Einfluss des optischen Systems auf die ermittelten Durchmesserwerte.

1 Einleitung

Für die Neudefinition der Einheit Kilogramm, die bis heute noch auf einer einzelnen Maßverkörperung – dem Internationalen Kilogramm Prototyp – basiert, wird die Rückführung auf eine Naturkonstante angestrebt [1]. Eine Möglichkeit der Realisierung ergibt sich über die Festlegung der Avogadro-Konstante N_A , die zu diesem Zweck im Rahmen einer internationalen Kooperation neu bestimmt werden soll [2]. Um die nötige relative Unsicherheit von 10^{-8} zu erreichen, müssen molare Masse und Gitterkonstante von Silizium, sowie Masse und Volumen einer Si-Präzisionskugel genauestens ermittelt werden. Für die Volumenmessung wurde das Kugelinterferometer der PTB [3] entwickelt, mit dem absolute Durchmesserbestimmungen im Nanometerbereich möglich sind.

2 Messprinzip

Das Kugelinterferometer besteht im Zentrum aus einer Dreipunktauflage, auf der die zu vermessende Kugel abgelegt werden kann. Beidseitig davon angeordnet befinden sich zwei sphärische Fizeau-Objektive, deren zur Kugel gerichtete Flächen als Referenzflächen für die interferometrische Messung des Kugeldurchmessers dienen. Die Mittelpunkte von Kugel und Krümmungsradius der Objektive stimmen dabei überein. Den Kugeldurchmesser d erhält man als Differenz aus dem Abstand der Referenzflächen D und den beiden Abständen zwischen Kugel und Referenzflächen d_1 und d_2 (Abb. 1) gemäß $d = D - (d_1 + d_2)$. Zur Messung von D wird die Kugel von einer Bewegungsvorrichtung aus dem Strahlengang gehoben, wo sie dann um zwei Achsen gedreht werden kann.

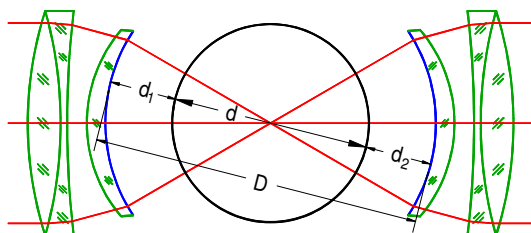


Abb. 1 Prinzipskizze des Kugelinterferometers.

Im Gegensatz zur Verwendung von Planflächen ermöglicht es diese Konfiguration, innerhalb des 60° -Sichtfelds der Objektive statt nur eines einzelnen Wertes gleichzeitig ca. 10.000 Durchmesserwerte – gegeben durch die Kamerapixel – zu erhalten. Dieser zweidimensional ausgedehnte Messbereich erlaubt die großflächige Messung von Kugeloberflächensegmenten, die mit entsprechender Überlappung in ihrer Gesamtheit die vollständige Topografie der Kugel ergeben.

Da die Kugel durch eine Abfolge von Drehungen um die vertikale und horizontale (= optische) Achse in jede gewünschte Orientierung bewegt werden kann, ist es möglich, einen ausgewählten Punkt auf der Kugeloberfläche an verschiedene Positionen innerhalb des Sichtfelds der Objektive zu bringen. Unabhängig von der Position im Sichtfeld muss eine Messung dabei jedes Mal den selben Durchmesserwert ergeben. Auftretende Abweichungen deuten deshalb auf Unregelmäßigkeiten der Eigenschaften der Optik hin.

Für die Messung wurde ein Punkt auf der Oberfläche der Kugel *Avo#3* ausgesucht und in verschiedene Bereiche des Sichtfelds gebracht, um die resultierenden Durchmesser abhängig von der

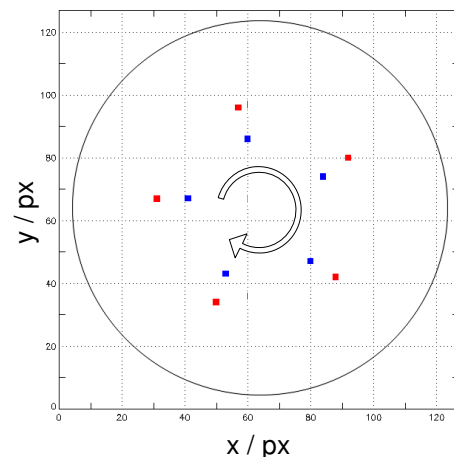


Abb. 2 Positionen des ausgewählten Punkts auf dem CCD-Array. Der Kreis deutet das Sichtfeld der Objektive an und der Pfeil die Reihenfolge der Messungen.

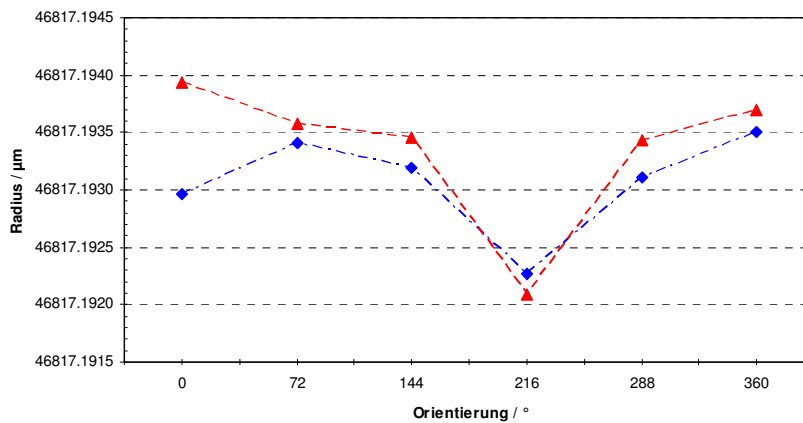


Abb. 3 Radien von Avo#3, gemessen an der ausgewählten Stelle auf der Kugeloberfläche, abhängig von der Position im Sichtfeld der Objektive, gegeben durch den Drehwinkel für die Kugelorientierung. Die Symbolfarben entsprechen der Farbgebung in Abb. 2.

jeweiligen Position im Sichtfeld zu vergleichen. Es wurden zwei Messreihen durchgeführt, wobei der ausgewählte Punkt mit verschiedenen Abständen vom Sichtfeldzentrum im Uhrzeigersinn um die optische Achse gedreht worden ist. Die so erhaltenen Positionen sind in Abb. 2 spezifiziert. Beide Messreihen beginnen an den zwei Positionen ganz links und sind um 10° bzw. 15° aus der Mitte ausgelenkt. Alle weiteren Positionen ergeben sich aus einer Abfolge von 72°-Rotationen um die optische Achse (Mittelpunkt des CCD-Arrays).

3 Messergebnisse

Die Auswertung der Interferogramme ist in [3] beschrieben. Jedes Kamerapixel führt zu einem Durchmesserwert. An jeder der oben genannten Positionen im Sichtfeld wird der Mittelwert von drei mal drei benachbarten Pixeln berechnet. Die resultierenden Radien, d. h. die Hälfte des jeweiligen Durchmessers, sind in Abb. 3 gegen den zugehörigen Drehwinkel aufgetragen.

Bei grober Betrachtung stimmen beide Messreihen entlang der x-Achse im Rahmen der bisher erreichbaren Messunsicherheit von 1 nm sehr gut überein. Die weitere Untersuchung zeigt allerdings eine signifikant größere Abweichung vom Mittelwert der Radien beim Rotationswinkel von 216°. Dafür konnte eine Eigenschaft der Bewegungsapparatur verantwortlich gemacht werden. Denn im Gegensatz zur sonst üblichen Abfolge der Rotationsbewegungen wurden für die hier beschriebenen Messungen nur eine Drehung um die vertikale Achse und mehrere aufeinander folgende Drehungen um die optische Achse durchgeführt. Bei der näheren Untersuchung einzelner Topografieauschnitte ist zu erkennen, dass gerade im Fall der Drehung um 216° eine reproduzierbare Fehlpositionierung um ca. 2° vorlag, durch die eine etwa 1 nm tiefer liegende Stelle der Kugeloberfläche in den drei mal drei Pixel großen Auswertungsbe- reich gelangte.

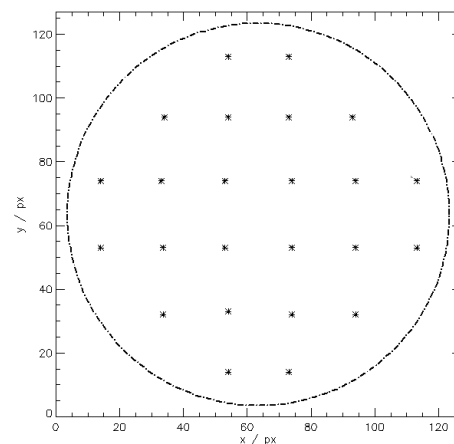


Abb. 4 Schema der Verteilung der Messpositionen innerhalb des Sichtfelds der Objektive (Kreis) auf dem CCD-Array der Kamera.

Um diese ersten Resultate zu erweitern, nehmen wir eine zusätzliche Messreihe in Angriff, bei der das Sichtfeld mit einer größeren Anzahl an Messpositionen dichter abgedeckt werden soll. Ein Schema dafür ist in Abb. 4 dargestellt. Dazu wurden bereits die Motor- und Getriebeeinheiten erneuert, um den Einfluss gealterter Getriebe auf die Orientierungsprozedur zu beseitigen. Danach konnte keine Fehlpositionierung mehr festgestellt werden. Die radiale Abhängigkeit und der Bezug zu Auffälligkeiten der Referenzflächen sind Gegenstand weiterer Untersuchungen mit reduzierter Unsicherheit.

Literatur

- [1] Becker et al., „Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units“ in: *Metrologia* **44**, 1-14 (2007)
- [2] Becker et al., „Determination of the Avogadro constant via the silicon route“ in: *Metrologia* **40**, 271-287 (2003)
- [3] A. Nicolaus, G. Bönsch, „Absolute volume determination of a silicon sphere with the spherical interferometer of PTB“ in: *Metrologia* **42**, 24-31 (2005)