

Uwarunkowania interferometrycznych pomiarów nierówności powierzchni

Dawid Kucharski

Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Politechnika Poznańska

4 czerwca 2018

- 1 Dlaczego powierzchnia jest ważna ?
- 2 Metody pomiaru nierówności powierzchni
Dobór metody pomiarowej
- 3 Zakłócenia
- 4 Pomiary interferometryczne
- 5 Obecne badania
- 6 Literatura

Dlaczego powierzchnia jest ważna ?

- inżynieria precyzyjna,
- produkcja,
- medycyna,
- technologie informacyjne,
- transport,
- wiele innych.



Mechanika [1]

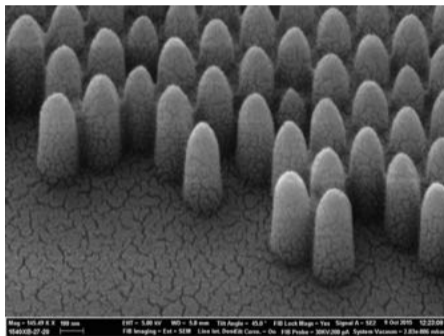


Optyka [2]



Produkcja [3]

Dlaczego powierzchnia jest ważna ?



Powierzchnia hydrofobowa [4]

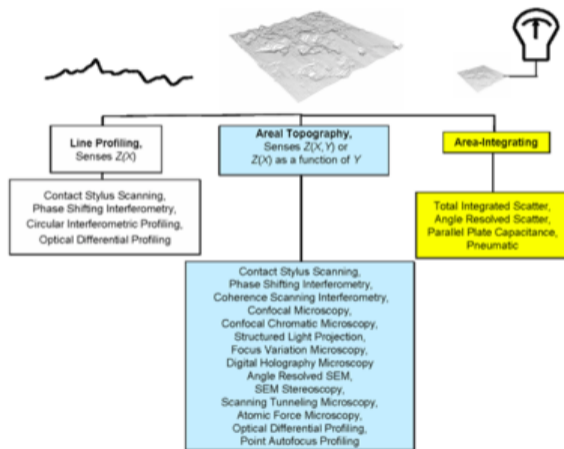


Efekt super-hydrofobowy [5]



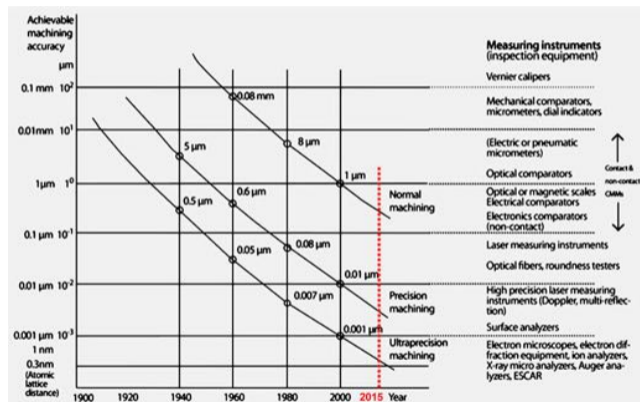
Szkło samoczyszczące [6]

Metody pomiaru nierówności powierzchni



Klasyfikacja systemów do pomiaru nierówności powierzchni [7]

Metody pomiaru nierówności powierzchni



Norio Taniguchi, *On the Basic Concept of 'Nano-Technology'*, Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part III, Japan Society of Precision Engineering 1974 [8]

Dobór = odp. na pytania

- 1 Jaki jest rodzaj powierzchni ?
 - 1 Jakie parametry geometryczne?
 - 2 Jaki rodzaj materiału?
- 2 Rozmiar ?
- 3 Szybkość pomiaru?
- 4 Jaki jest wymagana niepewność pomiaru?
- 5 Jaki budżet ?

Jeśli odpowiedzi na powyższe pytania skłaniają nas do wykorzystania optycznych systemów pomiarowych, wciąż wymagane są odpowiedzi na wiele innych pytań szczegółowych.

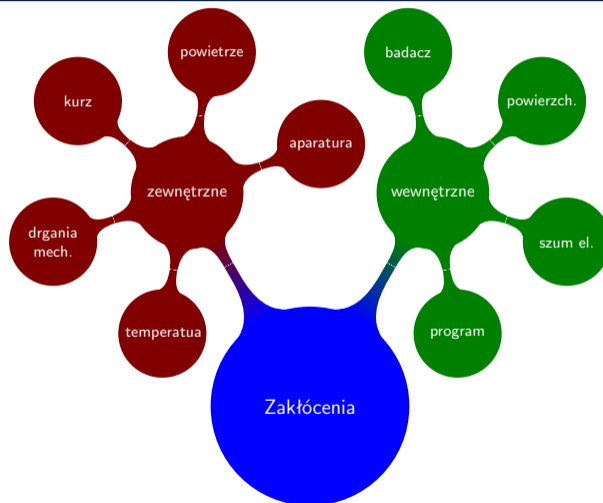
Ograniczenia - rozdzielczość lateralna / przestrzenna

$$r = 0.61 \cdot \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

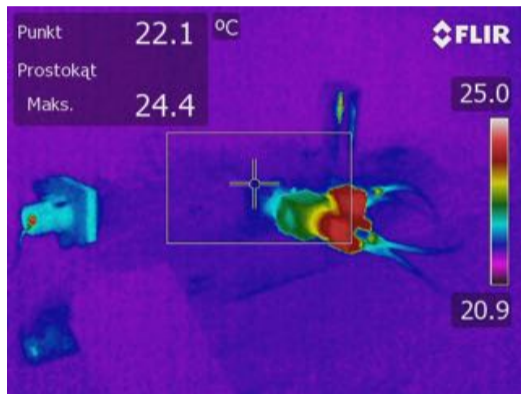
$$r = 0.82 \cdot \frac{\lambda}{NA}, \quad (2)$$

$$NA = n \sin(\theta). \quad (3)$$

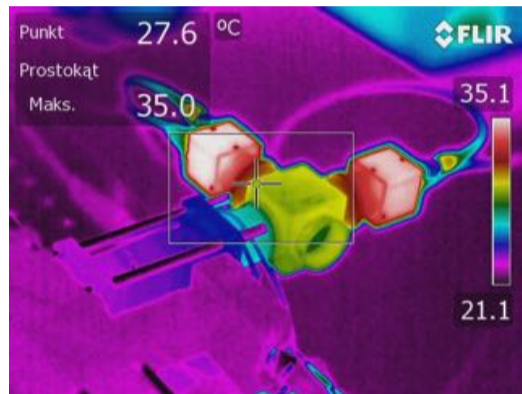
Zakłócenia



Np. Temperatura

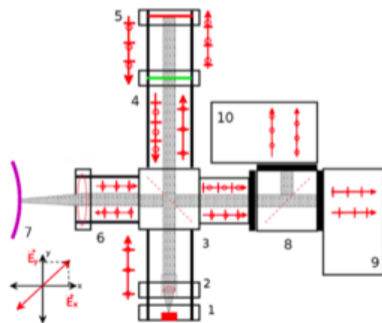


Źródła ciepła (laser, CCD)

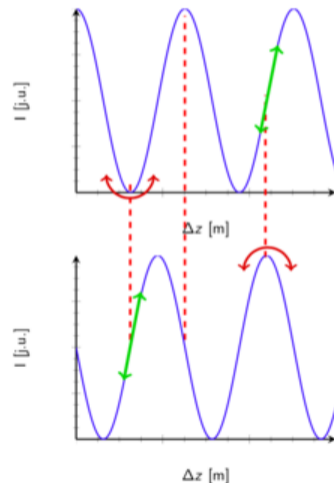


Źródła ciepła (CCD)

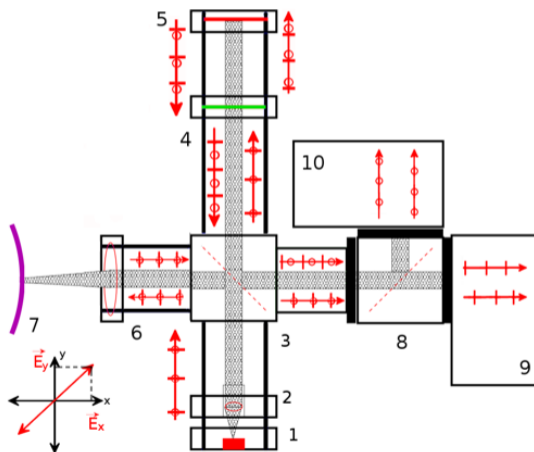
PSI - Phase Shifting Interferometry



1 - laser diodowy, 2 - kolimator, 3 - dzielnik wiązki 50/50,
4 - opóźniacz fazy, 5 - zwierciadło, 6 - soczewka, 7 - przedmiot,
8 - dzielnik polaryzacji, 9-10 - detektory



PSI - Phase Shifting Interferometry



1 - laser diodowy, 2 - kolimator,
3 - dzielnik wiązki 50/50, 4 -
opóźniacz fazy, 5 - zwierciadło,
6 - soczewka, 7 - przedmiot,
8 - dzielnik polaryzacji, 9-10 -
detektory [9, 10]

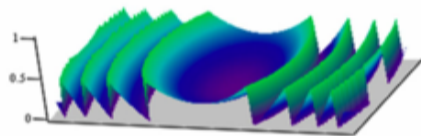
PSI - Phase Shifting Interferometry

Phase unwrapping

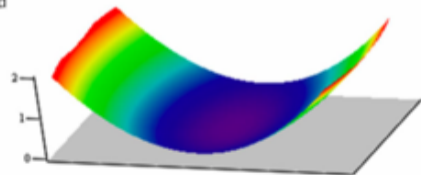


Śledzenie fazy [9]

wrapped



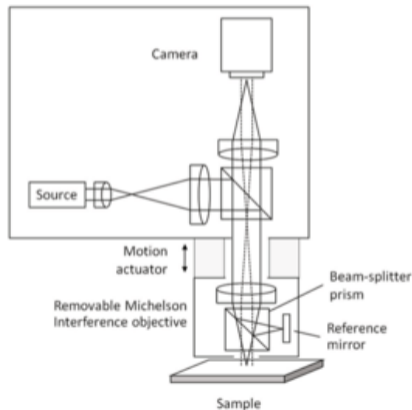
unwrapped



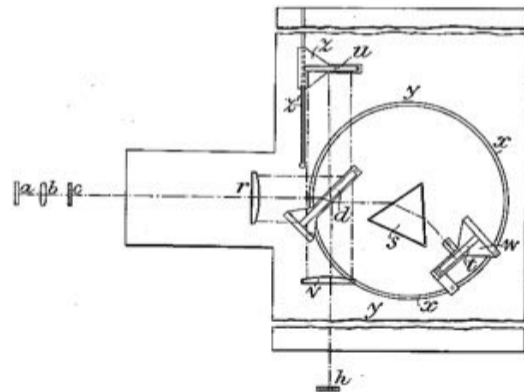
Przykład [11]

PSI - Phase Shifting Interferometry

Interferometry



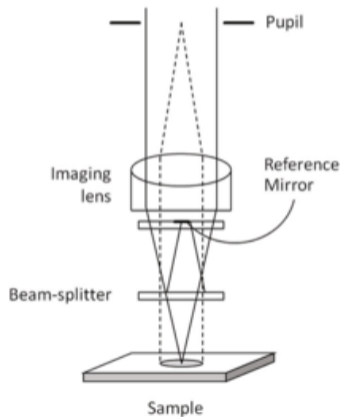
Interferometr Michelsona [11]



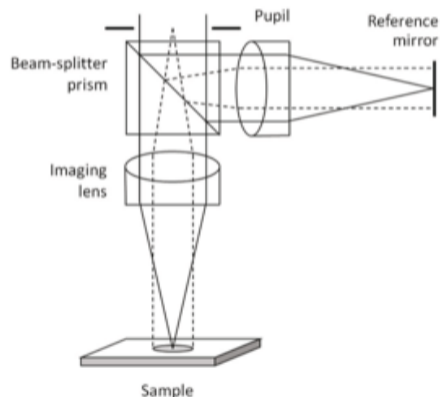
Interferometr Twymana-Greena [12]

PSI - Phase Shifting Interferometry

Interferometry



Interferometr Mirau [11]



Interferometr Linnika [11]

PSI - Phase Shifting Interferometry

Rozdzielczość lateralna

$$ITF(\nu) = \frac{2}{\pi} [\phi - \cos(\phi) \sin(\phi)], \quad (4)$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{\lambda\nu}{2A_N}\right). \quad (5)$$

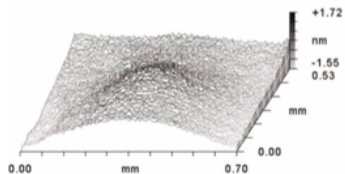
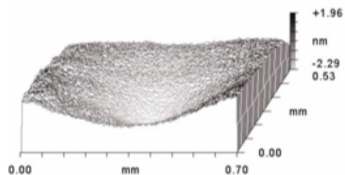
$$\nu_{0\%} = \frac{2A_N}{\lambda}, \quad (6)$$

$$\nu_{50\%} = \frac{A_N}{1.22\lambda}. \quad (7)$$

+ Abberacja, błąd ogniskowania, wahania natężenia światła ...

PSI - Phase Shifting Interferometry

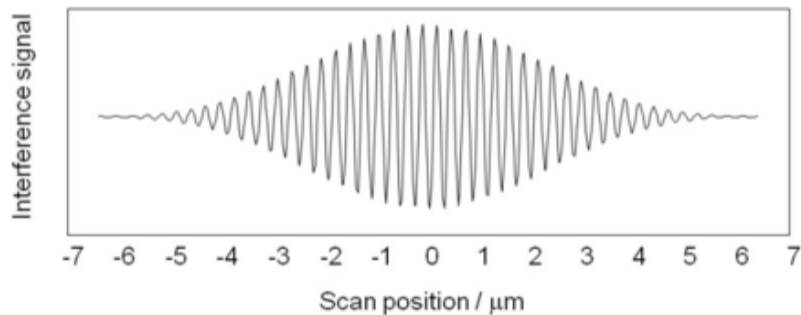
Ogniskowanie



SiC ($f = \pm 3 \mu\text{m}$, $M = 10\times$, $NA = 0.25$) [11]

PSI - Phase Shifting Interferometry

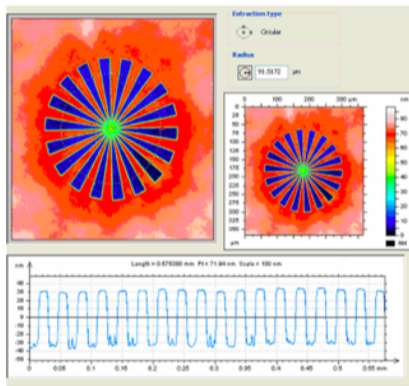
Źródła światła



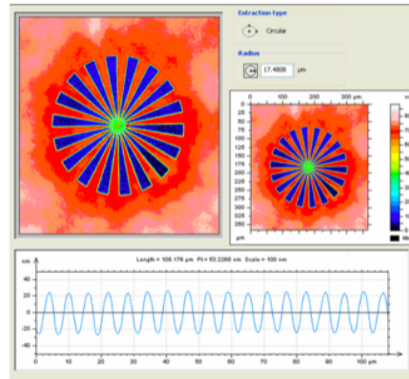
Sygnal z mikroskopu interferencyjnego ($\lambda = 550 \pm 20$ nm, $M = 10\times$, $NA = 0.3$) [11]

PSI - Phase Shifting Interferometry

Kalibracja



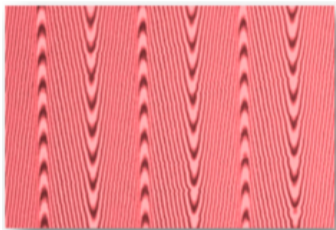
Wzorzec „gwiazda”, $\phi = 91.5 \mu m$ [13, 14]



Wzorzec „gwiazda”, $\phi = 17.5 \mu m$ [13, 14]

PSI - Phase Shifting Interferometry

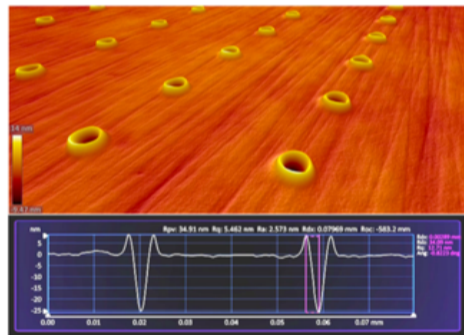
Przykładowe wyniki



Obraz interferencyjny [11]

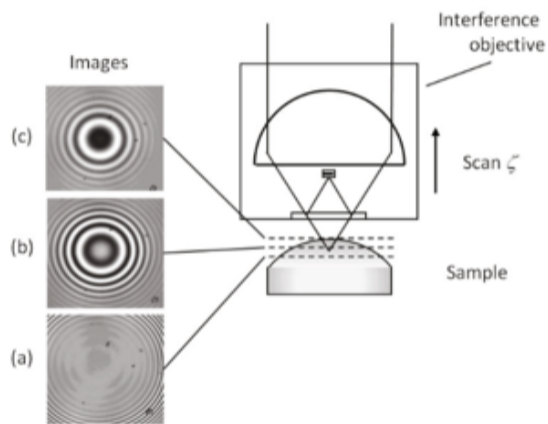


Powierzchnia po analizie [11]



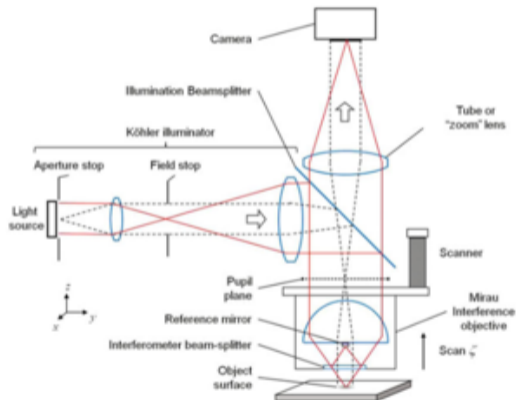
Warstwa magnetyczna dysku (Zemetrics) [11]

CSI - Coherence Scanning Interferometry

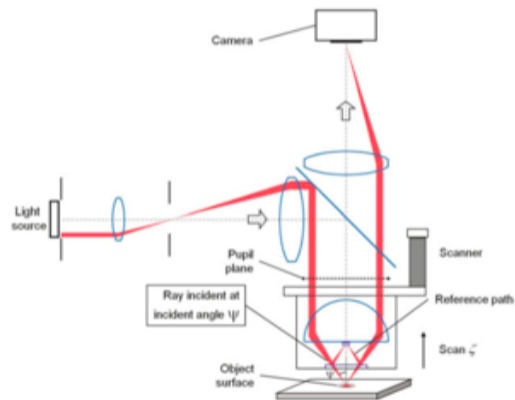


Obrazy interferencyjne z udziałem zakrzywionej powierzchni [11]

CSI - Coherence Scanning Interferometry



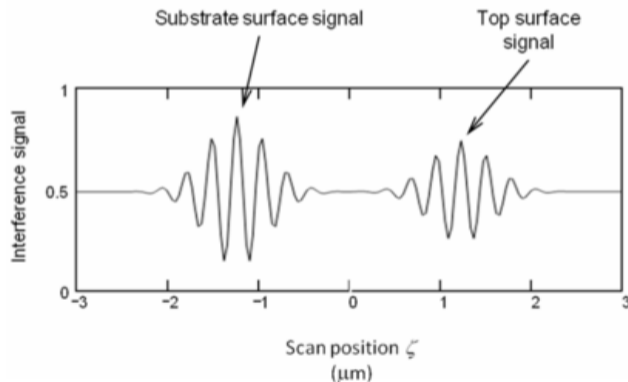
Schemat mikroskopu w/g CSI [11]



Kierunek pojedynczej wiązki w CSI [11]

CSI - Coherence Scanning Interferometry

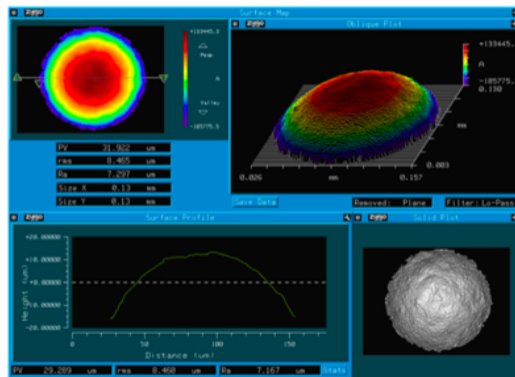
CSI - Powłoki epitaksjalne



Sygnal z CSI - pojedyncza powłoka półprzepuszczalna o grubości kilku μm [11]

CSI - Coherence Scanning Interferometry

CSI - Elementy lutowane



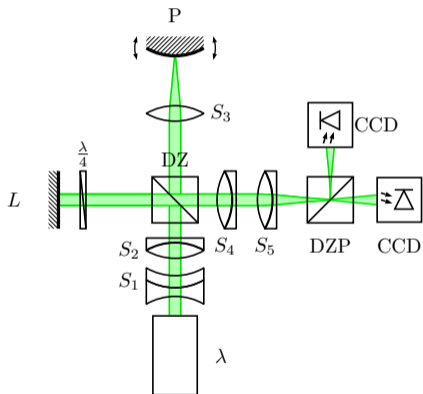
Przykład archiwizacji i analizy danych w technice CSI. "Guz" lutowniczy [11]

CSI - Coherence Scanning Interferometry

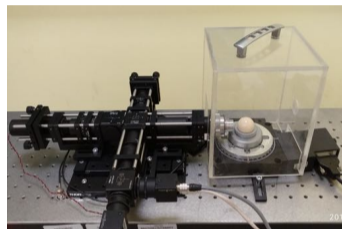
Podsumowanie

- CSI jest obecnie dominującą techniką w badaniach interferencyjnych.
- W porównaniu z PSI, pozwala na znacznie szersze zastosowania w metrologii tekstury powierzchni ("step heights").
- Dane dla każdego pojedynczego piksela w obrazie, są zbierane w dokładnym punkcie najlepszego skupienia dla tego piksela.
- CSI zapewnia przewagę w zakresie pionowej rozdzielczości (sub-nm), niezależnie od apertury numerycznej lub pola widzenia mikroskopu.
- Technika rozwija się w zakresie badań warstw półprzepuszczalnych i innych analiz struktury powierzchni.

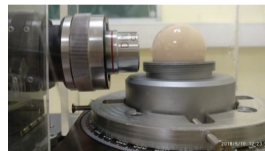
Obecne badania – T-G PSI



Schemat optyczny skonstruowanego interferometru [9]



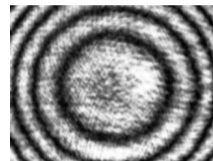
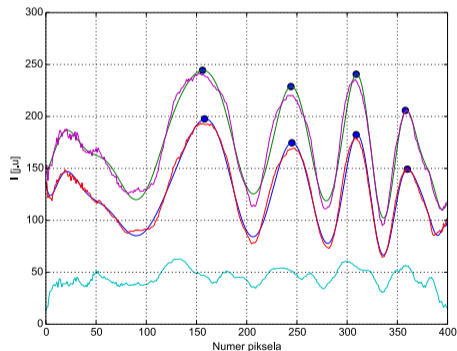
Zdjęcie układu pomiarowego z dn. 10.05.2018



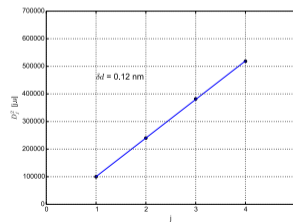
Zdjęcie układu pomiarowego z dn. 10.05.2018

T-G PSI Profiling

Badania tekstury powierzchni



Obraz interferencyjny [9]

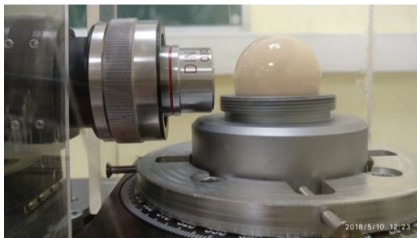


$$D_j^2 = f(j) \text{ [9]}$$

Rozkład radialny intensywności pikseli [9]

T-G PSI

Badania tekstury powierzchni – wzorzec



Wzorzec okrągłości $\phi = 29,9588$ mm

Measuring conditions:
The measurements were made with a form measurement device F4004 of the Hommel-Etamic GmbH.

Ball tip diameter	D = 1,0 mm
Probe force	F ≤ 0,03 N
Probe speed	vt = 4 1/min
Ball tip material	Diamond
Number of measuring points	1024 points around the circumference
Temperature	20 °C ± 1

Measurement position plan:
The specified measured values were determined based on the following measurement position plan.

The marking of the standard (red point) was at angle position 0°. For using the roundness standard it is recommended to use the same position and number of measurement positions as in the measurement position plan.

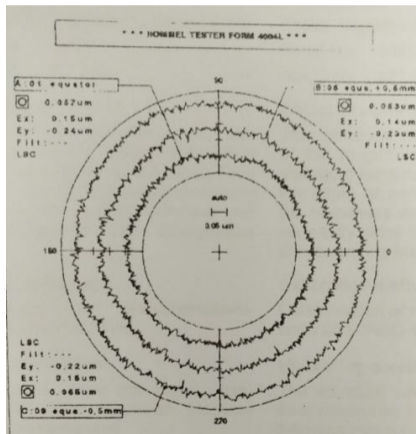
Reference standards:
The standards calibrated by the PTB with the following official marks were used as reference standards:

- Glass hemisphere: determination of rotational deviation
official mark: 50780 PTB 12, (Ser.Nr. 11314)
- Magnification standard: Testing of sensitivity and transmission behaviour
official mark: 50776 PTB 12, (Ser.Nr.: 122 / 435); 50778 PTB 12, (Ser.Nr.: 50004)

Certyfikat kalibracji [15]

T-G PSI

Badania tekstury powierzchni – wzorzec



Certyfikat kalibracji [15]

Suppl/Customer:	xxx	Gage Plan:	FN:11 R 2mm #01
Component:	RoundnessStandard FN111	Sample No.:	1000x
Drawing No.:	LSC, Gauß 50%, D=1mm	HOMMEL TESTER FORM 4004	
Order No.:	point on 0 degree probe		
Remarks:	FORM 4004; FT1 77600 horizontal; cal.freq. 1,0000x		
Inspector:	Felicit	Date:	28.01.04
		Time:	16.03.22

Certyfikat kalibracji [15]

T-G PSI

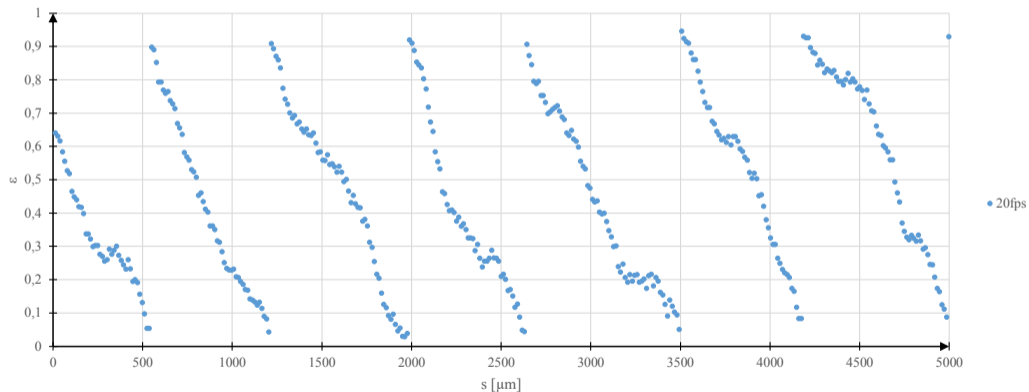
Badania tekstury powierzchni [16]

- ceramiczny wzorzec okrągłości $\phi = 29,9588$ mm;
- odcinek $5000 \mu\text{m}$ (5% całego obwodu);
- 383 punkty pomiarowe;
- 20 fps;
- $\omega = 1^\circ/\text{s}$;
- $\alpha_{na \text{ obr.}} = 400^\circ$;
- całkowita liczba obrazów 8000.

- Odcinek elementarny $262 \mu\text{m}$;
- 20 punktów pomiarowych.

T-G PSI

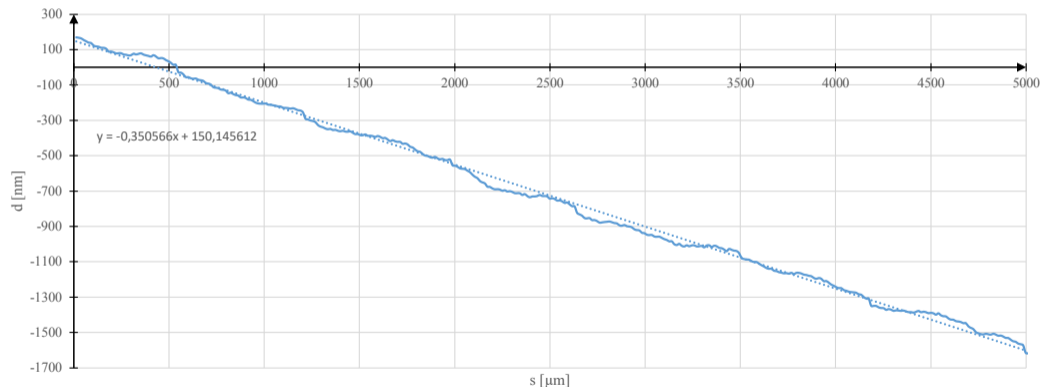
Badania tekstury powierzchni [16]



Przesunięcia fazowe ϵ . Pomiar ceramicznego wzorca okrągłości $\phi = 29,9588 \text{ mm}$ [16]

T-G PSI

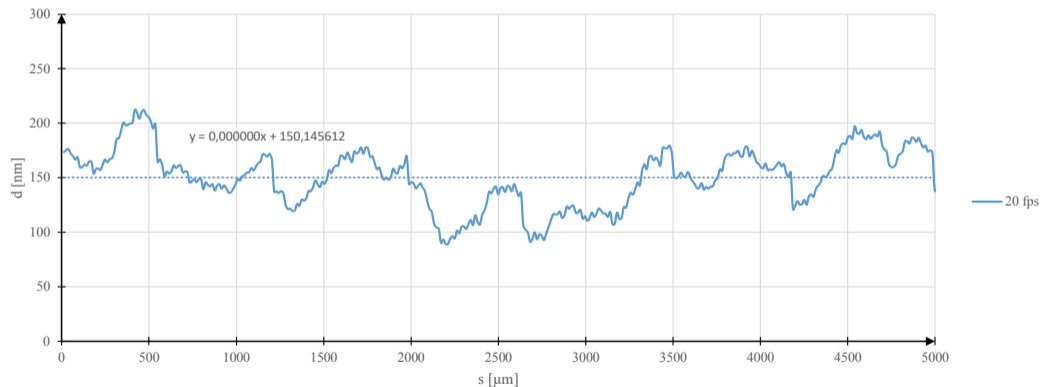
Badania tekstury powierzchni [16]



Śledzenie fazy. Pomiar długości d ceramicznego wzorca okrągłości $\phi = 29,9588$ mm [16]

T-G PSI

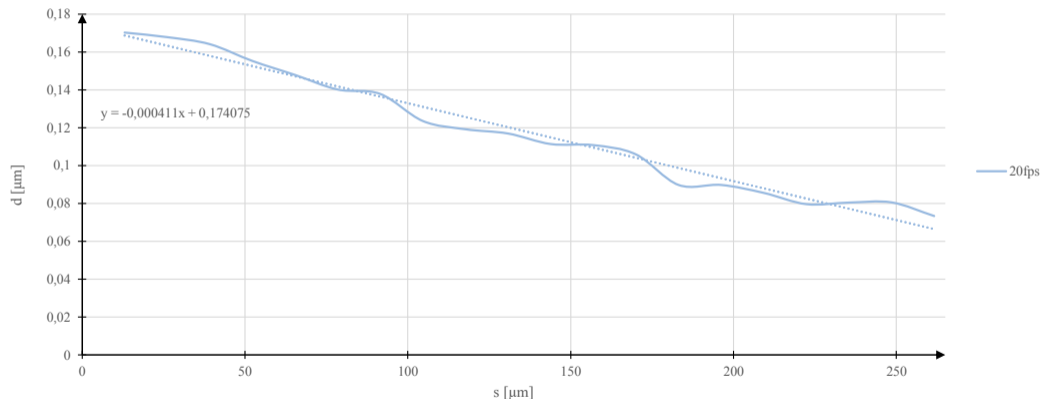
Badania tekstury powierzchni [16]



Tekstura powierzchni ceramicznego wzorca okrągłości $\phi = 29,9588$ mm [16]

T-G PSI

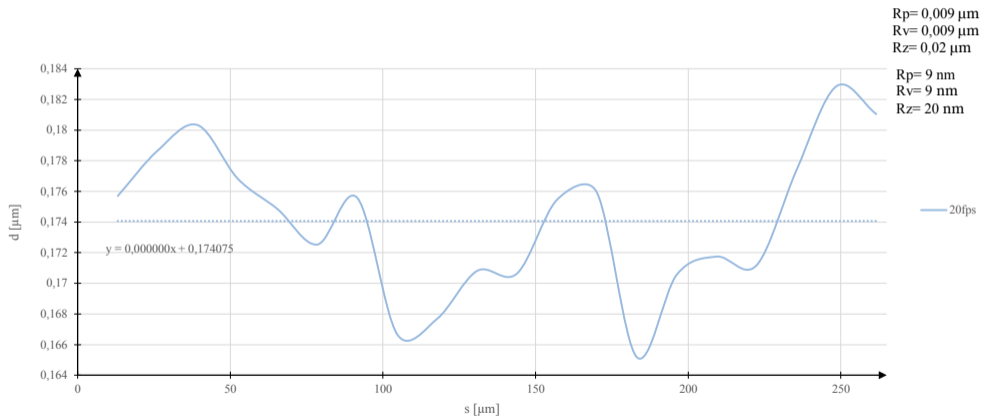
Badania tekstury powierzchni [16]



Śledzenie fazy. Pomiar długości d dla wybranego odcinka elementarnego ceramicznego wzorca okrągłości $\phi = 29,9588 \text{ mm}$ [16]

T-G PSI

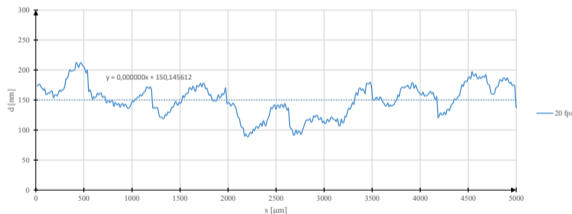
Badania tekstury powierzchni [16]



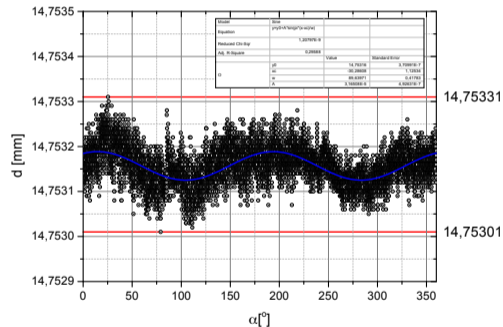
Tekstura powierzchni dla wybranego odcinka elementarnego ceramicznego wzorca okrągłości
 $\phi = 29,9588 \text{ mm}$ [16]

T-G PSI

Badania porównawcze ?



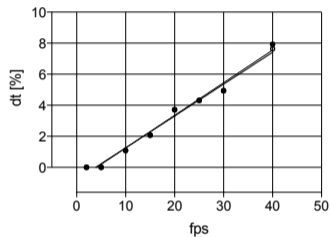
Tekstura powierzchni ceramicznego wzorca okrągłości $\phi = 29,9588$ mm. Pomiar T-G PSI [16]



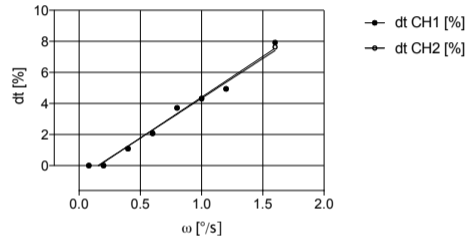
Zmiana odległości powierzchni ceramicznego wzorca okrągłości $\phi = 29,9588$ mm w funkcji kąta obrotu. Pomiar stykowy (Hommel) [9]

T-G PSI

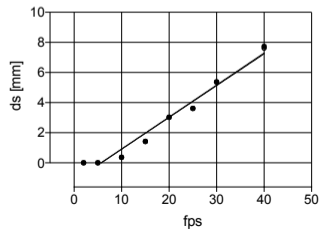
Analiza korelacji czasowych przesunięć danych [17]



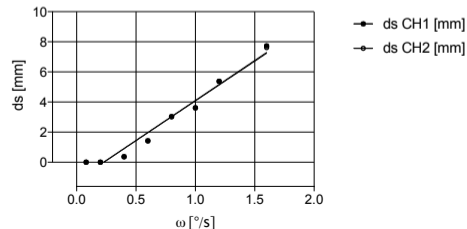
● dt CH1 [%]
● dt CH2 [%]



● dt CH1 [%]
● dt CH2 [%]



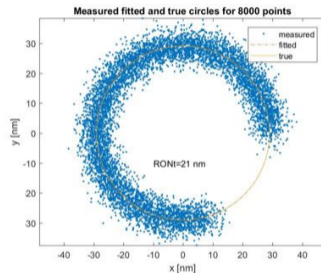
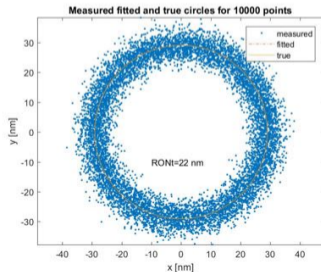
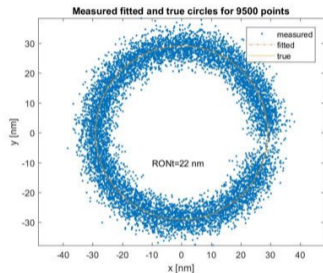
● ds CH1 [mm]
● ds CH2 [mm]



● ds CH1 [mm]
● ds CH2 [mm]

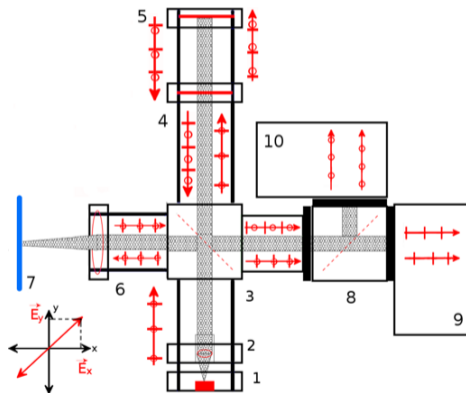
T-G PSI

Analiza korelacji czasowych przesunięć danych [17]



T-G PSI

Konstrukcja układu translacyjnego do interferometrycznych pomiarów tekstury powierzchni [18]



Pomiary wzorca chropowatości. Układ translacyjny [9]

Dalsze plany badawcze. Prace

- 1 Obliczenia porównawcze. Analizy interferogramów. Manuscript submitted (2018).
- 2 Przygotowanie manuskryptu - przesunięcia czasowe.
- 3 Badania porównawcze tekstury powierzchni. Analizy statystyczne.
- 4 Przygotowanie manuskryptu publikacji (2018) - chropowatość/okrągłość.
- 5 Badania wzorców chropowatości w układzie translacyjnym.
- 6 Konstrukcja interferometru porównawczego ?

Ostatni artefakt

Redefinicja kg – inf. z dn. 20.05.2018



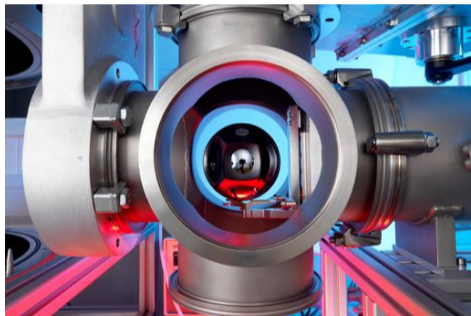
#SuperheroDay [19, 20]



#SuperheroDay [21, 20]

Projekt „Avogadro”

Redefinicja kg przez liczbę Avogadro



Laserowe zliczanie pojedynczych atomów
SI-28 [22]



Laserowe zliczanie pojedynczych atomów
SI-28 [23]

Literatura I

- [1] Applied Nano Surfaces. (2018) Crankshaft. [Online]. Available: <http://media.appliednanosurfaces.com/2013/04/crankshaft.png>
- [2] Canon Global. (2018) Zoom optics. [Online]. Available: <https://shop.usa.canon.com/wcsstore/ExtendedSitesCatalogAssetStore/ef28-300`35-56isusm`1`xl.jpg>
- [3] BrakerLink. (2018) Car door. [Online]. Available: <https://www.breakerlink.com/blog/wp-content/uploads/2016/02/door.jpg>
- [4] H. Knight. (2018) Intelligent windows self-clean and regulate temperature of buildings. [Online]. Available: <https://www.theengineer.co.uk/intelligent-windows-self-clean-and-regulate-temperature-of-buildings/>
- [5] Balconette. (2018) Hydrophobic glass. [Online]. Available: <https://www.balconette.co.uk/content/uploads/1fcc0487-179b-4088-931f-868b3d4d890d/contact-of-water-droplet-with-hydrophobic-glass.jpg>
- [6] Polypane Glasindustrie N.V. (2018) Self-cleaning glass. [Online]. Available: <https://www.polypane.be/data/images/categories/wide/201503270825041v0fn.jpg>

Literatura II

- [7] R. Leach, *Optical Measurement of Surface Topography*, R. Leach, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, Mar. 2011. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-12012-1>
- [8] N. Taniguchi, "On the basic concept of nano-technology Proceedings of the International Conference on Production Engineering Tokyo Part II Japan Society of Precision . . .," 1974. [Online]. Available: [http://scholar.google.comjavascript:void\(0\)](http://scholar.google.comjavascript:void(0))
- [9] D. Kucharski, "Interferometric system for shape deviation measurements," Ph.D. dissertation, Poznan University of Technology, Poznan, Nov. 2015.
- [10] D. Kucharski, F. Meijer, E. Stachowska, and C. J. Jermak, "Method for contactless measurement of deviation of shape by interferometric method," Patent PL405 952 (A1), May, 2015.
- [11] P. de Groot, *Optical Measurement of Surface Topography*, R. Leach, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, Mar. 2011. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-12012-1>
- [12] F. Twyman and A. Green, "Method and apparatus for finishing prisms or lenses or combinations of the same." Patent, 1918. [Online]. Available: <http://www.google.com/patents/US1252512>

Literatura III

- [13] R. Leach and C. Giusca, *Optical Measurement of Surface Topography*, R. Leach, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, Mar. 2011. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-12012-1>
- [14] M. Xu, T. Dziomba, G. Dai, and L. Koenders, "Self-calibration of scanning probe microscope: mapping the errors of the instrument," *Measurement Science and Technology*, vol. 19, no. 2, p. 025105, 2008.
- [15] "Roundness standard fn 111 calibration certificate."
- [16] M. Michalska, "Ocena zdolności rozdzielczej interferometrycznego układu pomiarowego w badaniach tekstury powierzchni," Master's thesis, Poznan University of Technology, Poznan, 2018 in progress.
- [17] J. Nowak, "Analiza korelacji czasowych przesunięć danych w optycznych badaniach tekstury powierzchni," Master's thesis, Poznan University of Technology, Poznan, 2018 in progress.
- [18] M. Jagodziński, "Konstrukcja układu translacyjnego do interferometrycznych pomiarów tekstury powierzchni," Master's thesis, Poznan University of Technology, Poznan, 2018 in progress.
- [19] National Institute of Standards and Technology. (2018) #superheroday. [Online]. Available: <https://www.facebook.com/usnistgov/photos/a.213811945364.172453.211075745364/10156274309910365/?type=3>

Literatura IV

- [20] ——. (2018) Redefining the kilogram, silicon spheres and the international avogadro project. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/physical-measurement-laboratory/silicon-spheres-and-international-avogadro-project>
- [21] ——. (2018) #superheroday. [Online]. Available: <https://www.facebook.com/usnistgov/photos/a.213811945364.172453.211075745364/10156274297750365/?type=3>
- [22] newscientist.com. (2018) Vacuum transfer advance will help redefine kilogram next year. [Online]. Available: <https://d1o50x50snmhul.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/01/25174330/c0042786-avogadro`project`silicon`sphere-spl.jpg>
- [23] Phys.org. (2018) More precise estimate of avogadro's number to help redefine kilogram. [Online]. Available: <https://3c1703fe8d.site.internapcdn.net/newman/csz/news/800/2015/moreprecisee.jpg>

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ