

ANALIZA MIKROUSZKODZEŃ W OBIEKTACH ZABYTKOWYCH PRZY UŻYCIU METOD OPTYCZNYCH I AKUSTYCZNYCH

MICHAŁ ŁUKOMSKI

Obszary badań nauk ścisłych w ochronie dziedzictwa

- **przemiany** w materiałach i obiektach zabytkowych
- techniki i procedury **zapobieganie** niszczeniu
- bezpieczne **udostępnianie**



Gentile da Fabriano, (ok. 1370-1427), tempera na desce

Powstawanie i narastanie uszkodzeń w obiektach wykonanych z materiałów higroskopijnych

sorpcja/desorpcja pary wodnej spowodowana zmianą wilgotności względnej otoczenia



odpowiedź metryczna materiałów

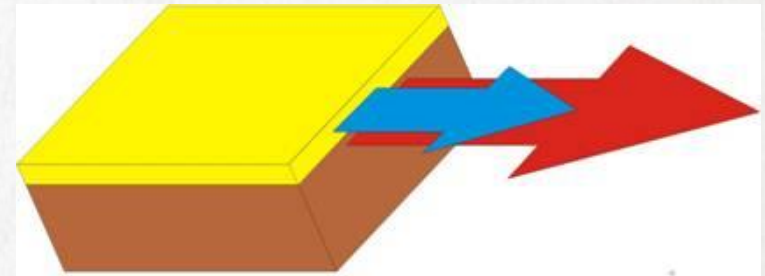


powstanie naprężeń na granicach warstw



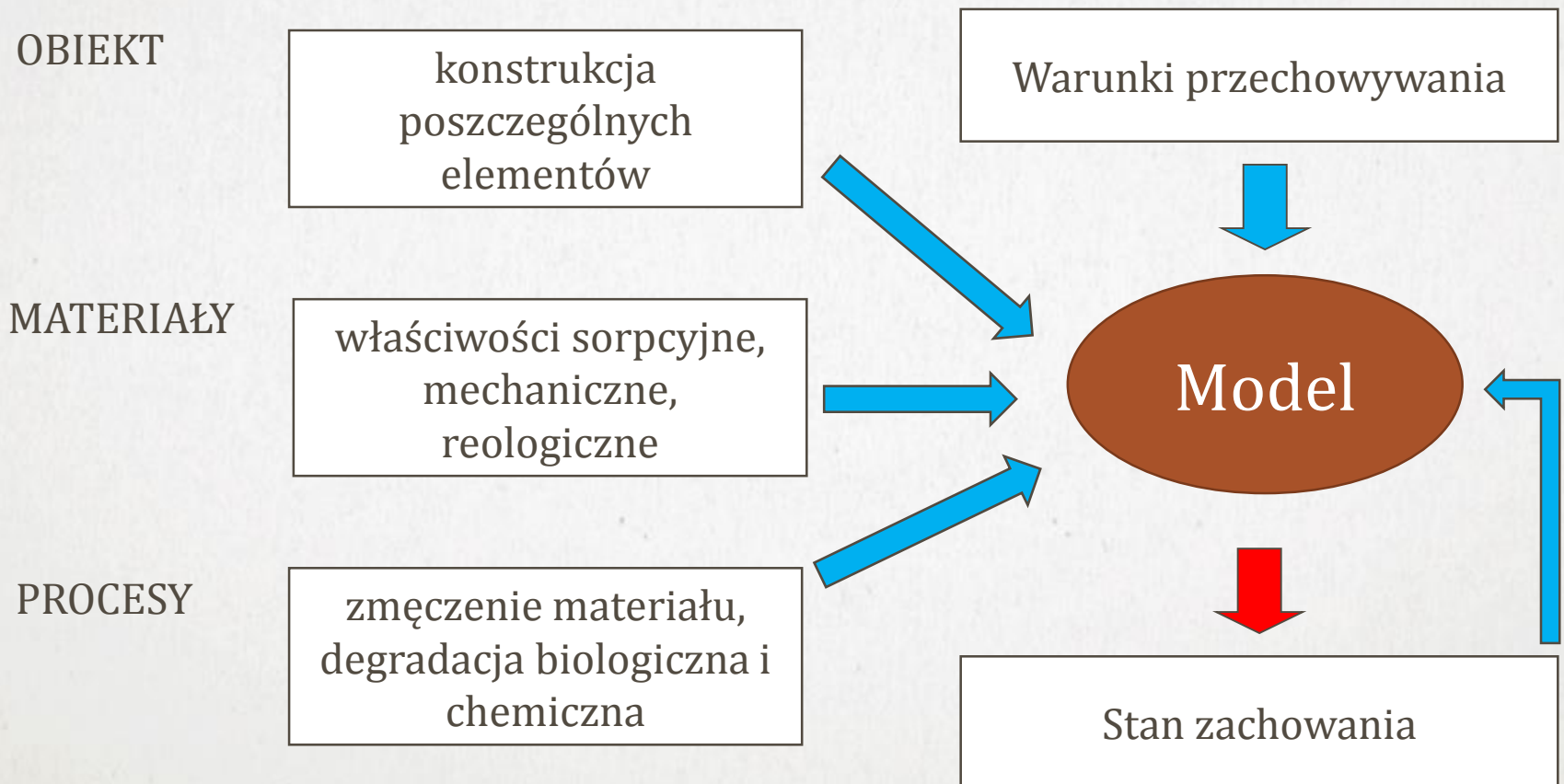
uszkodzenia: pękanie i odspajanie

Warunki przechowywania



Stan zachowania

Powstawanie i narastanie uszkodzeń w obiektach wykonanych z materiałów higroskopijnych



Zmiany wywołane bodźcami klimatycznymi – *powolne, kumulacyjne*

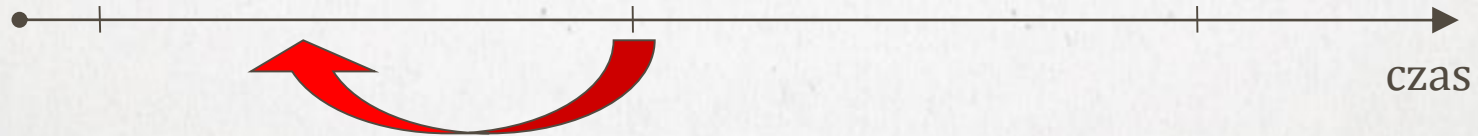
obiekt
nieuszkodzony



mikro-uszkodzenie



widoczne
uszkodzenie



Cechy systemu pomiarowego:
czułość; możliwość częstego powtarzania pomiarów

Bezpośrednie metody śledzenia narastania mikro-uszkodzeń wywołanych przez bodźce klimatyczne

- Interferometria plamkowa
 - Emisja akustyczna
 - Interferencyjne siatki Bragga
-

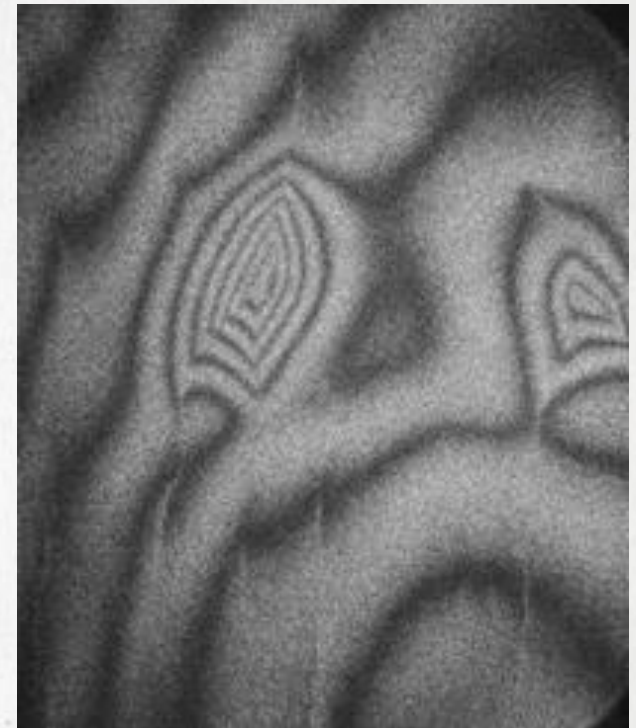
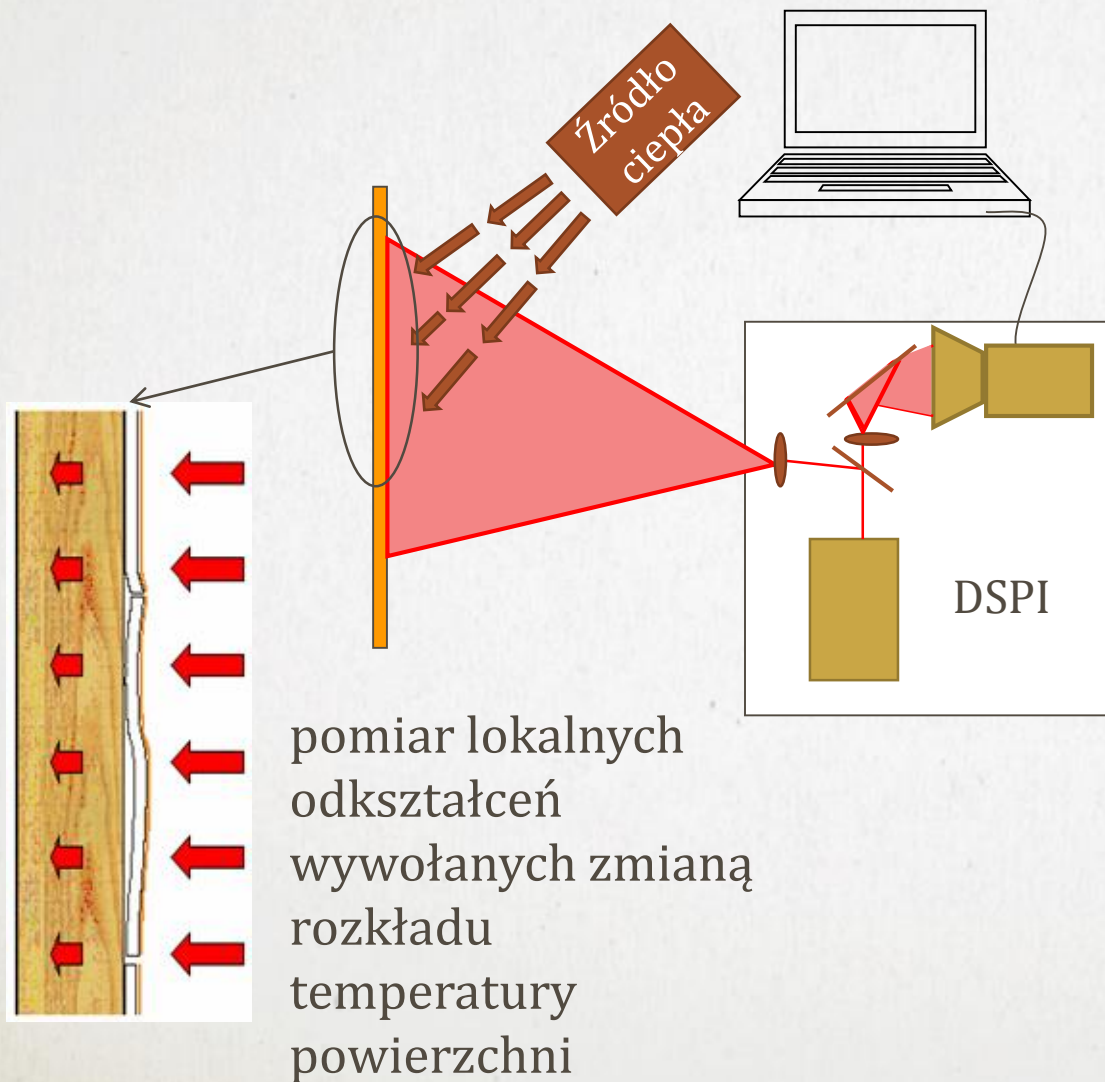
Interferometria plamkowa - digital speckle pattern interferometry (DSPI)

- wykrywanie uszkodzeń powierzchni
- charakterystyka wykrytych uszkodzeń
- monitorowanie zmian w czasie



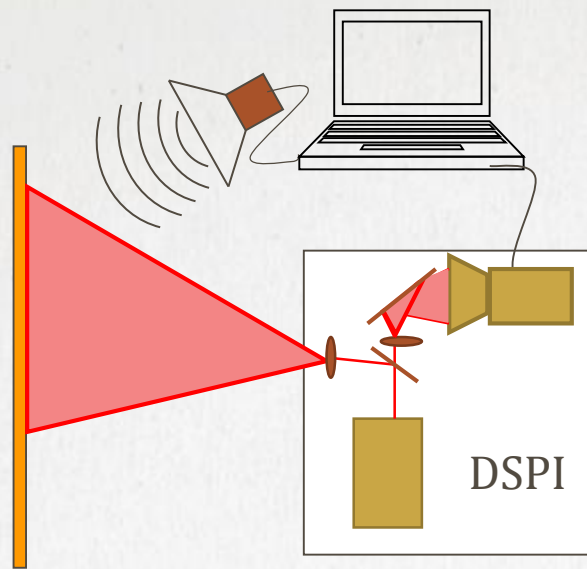
wysoka czułość
łatwość użycia
automatyczna analiza wyników pomiarowych

DSPI ze wzbudzeniem termicznym

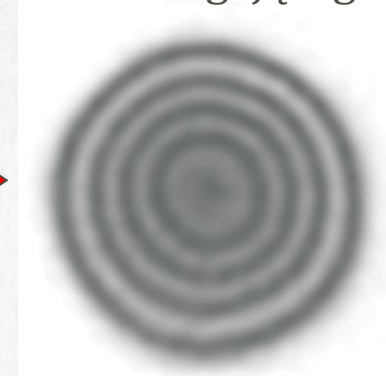


- Bardzo czuła
- ale**
- niepowtarzalna
- jakościowa

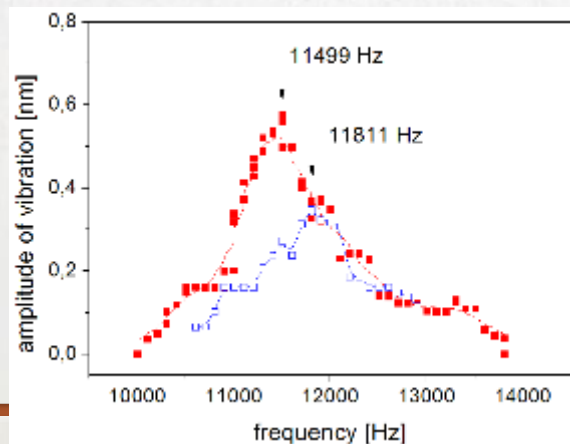
Analiza wibracji powierzchni



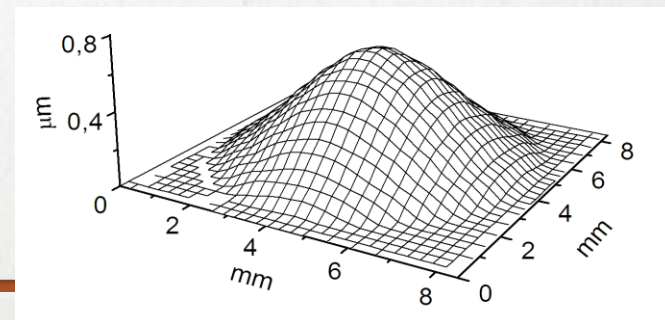
Rozmiar drgającego obszaru



Częstotliwość rezonansowa



Przestrzenny rozkład amplitudy wibracji

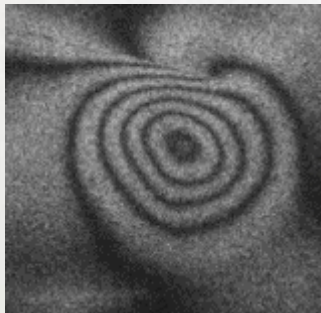


Time-averaged DSPI – zasada działania

$$I_{01}(r) = I_i + I_r + 2\sqrt{I_i I_r} \cos[\varepsilon(x, y)]$$

$$I_{02}(r) = I_i + I_r + 2\sqrt{I_i I_r} \cos[\varepsilon(x, y) + \Delta\varepsilon(x, y)]$$

$$I(r) = I_{02}(r) - I_{01}(r)$$

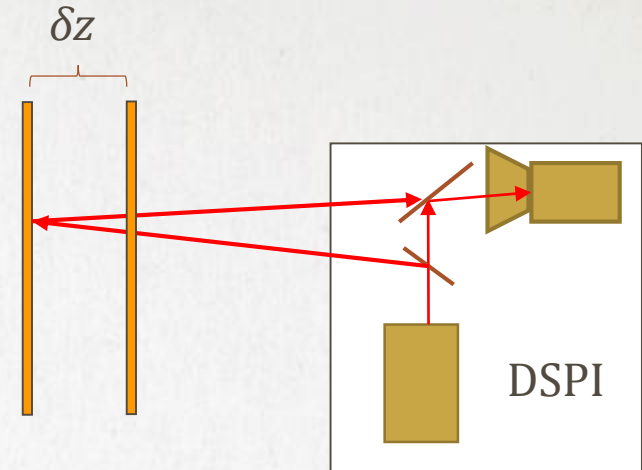


$$\Delta\varepsilon(r) = 2n\pi$$

maksymalna korelacja

$$\Delta\varepsilon(r) = (2n + 1)\pi$$

minimalna korelacja



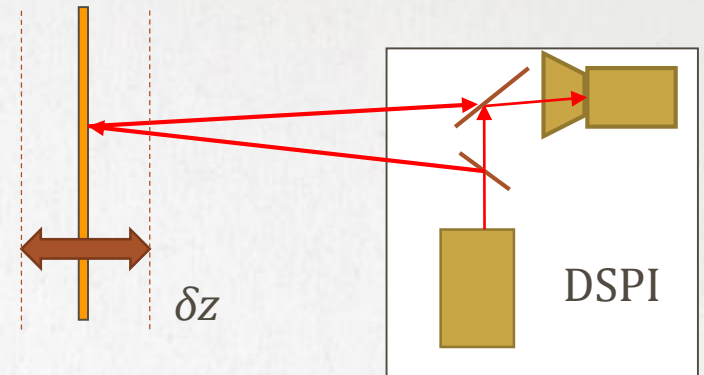
Przesunięcie powierzchni obiektu o δz powoduje powstanie dodatkowej różnicy faz

$$\Delta\varepsilon(r) = \frac{4\pi \delta z(x, y)}{\lambda}$$

Time-averaged DSPI – analiza drgań

wibracja obiektu na jednej częstotliwości:

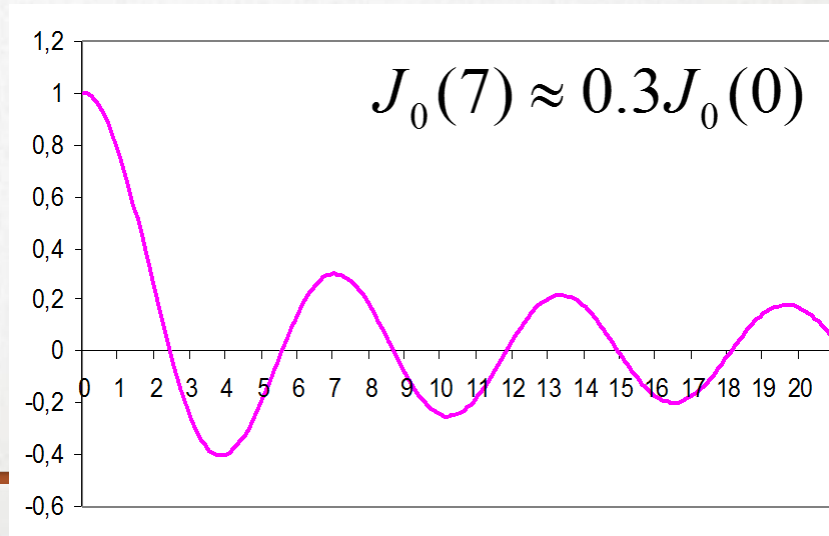
$$\Delta\varepsilon(r, \omega) = \frac{4\pi \delta z(r)}{\lambda} \cos(\omega t)$$



czas obserwacji >> okres wibracji:

$$I_\omega(r) = \int I(r) dt$$

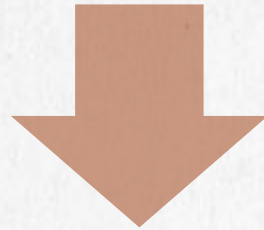
$$I_\omega(r) = I_i + I_r + 2\sqrt{I_i I_r} \cos[\varepsilon(r)] J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} \delta z(r)\right)$$



Time-averaged DSPI - analiza fazowa

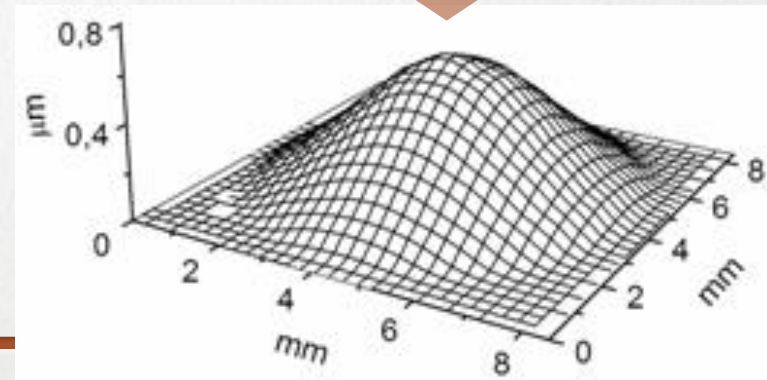
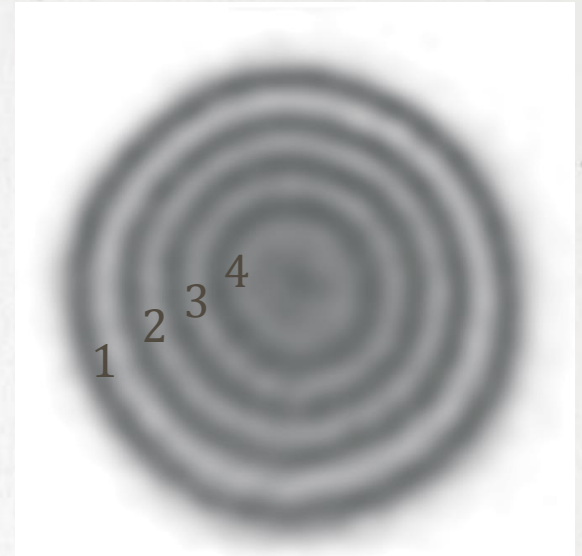
$$I = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos[\varepsilon(r)] J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} a\right)$$

phase
stepping
algorithm

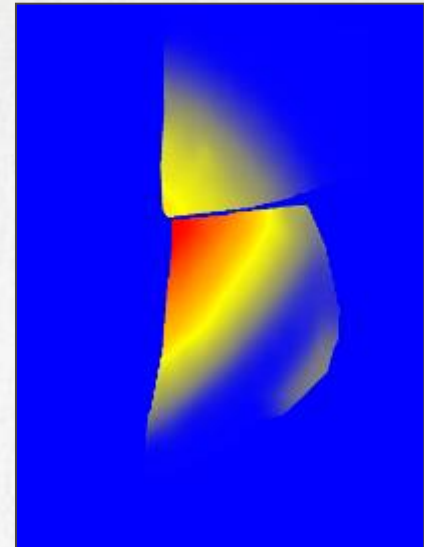
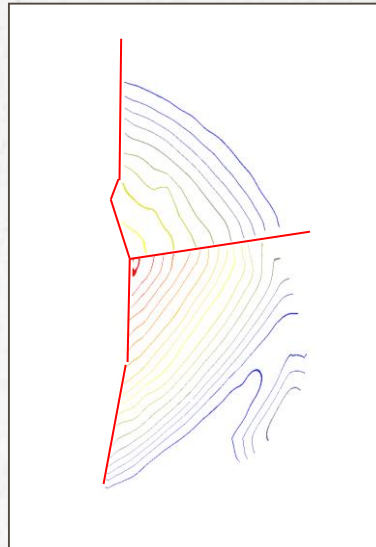


$$I = 2\sqrt{I_r I_o} J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} a\right)$$

Rejestrowane natężenie światła jest niemonotoniczną funkcją amplitudy wibracji obiektu



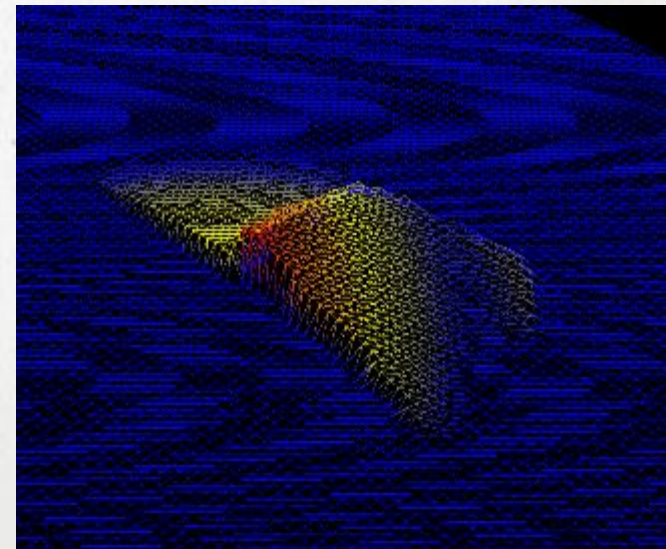
Pęknięcia i odspojenia warstwy malarskiej



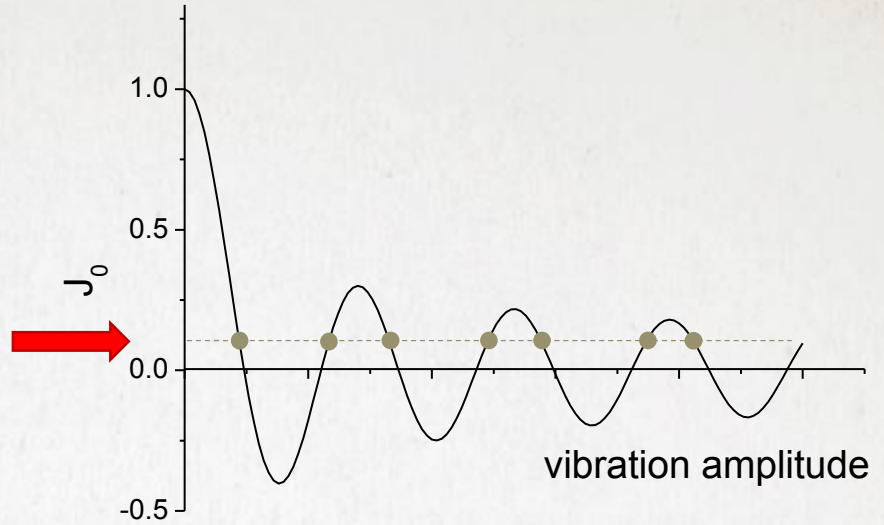
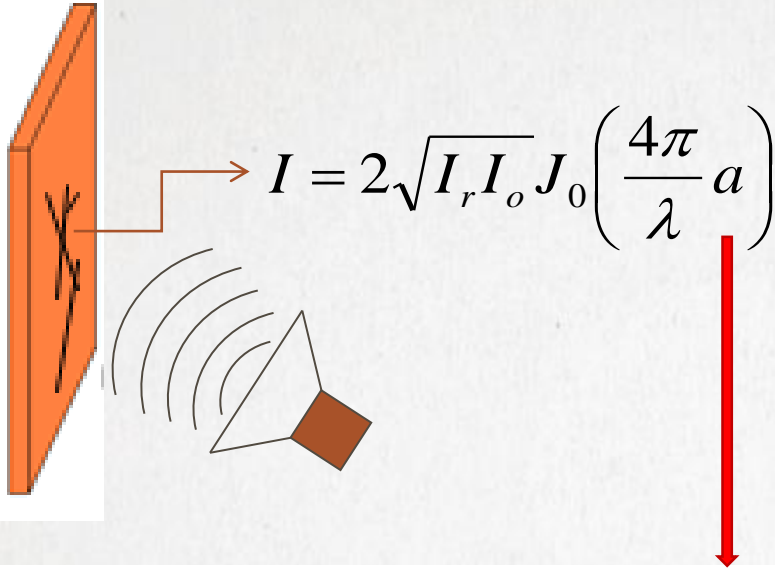
Analiza jest tylko **częściowo automatyczna**.

Wymaga:

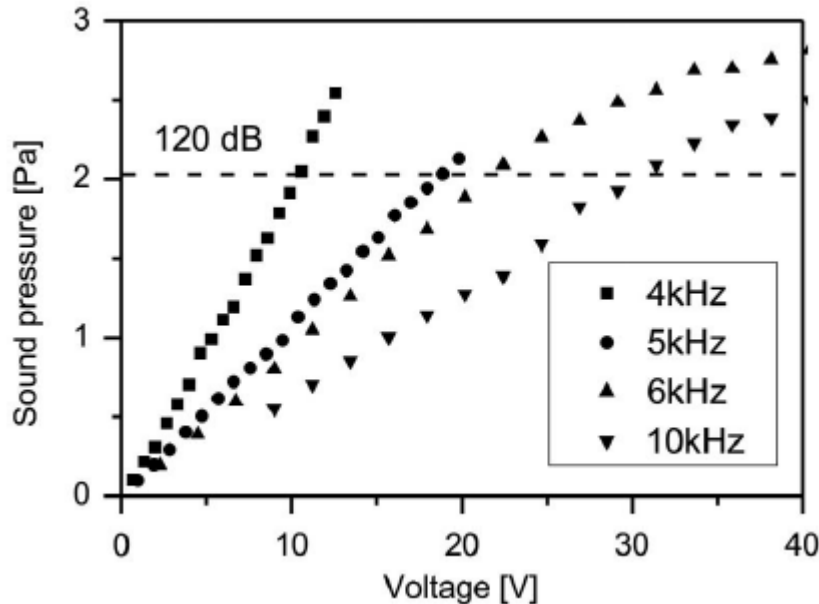
- Podziału na oddzielnie drgające fragmenty powierzchni
- Określenia pozycji pierwszego maksimum funkcji J_0 w rejestrowanym obrazie interferencyjnym



Inne podejście

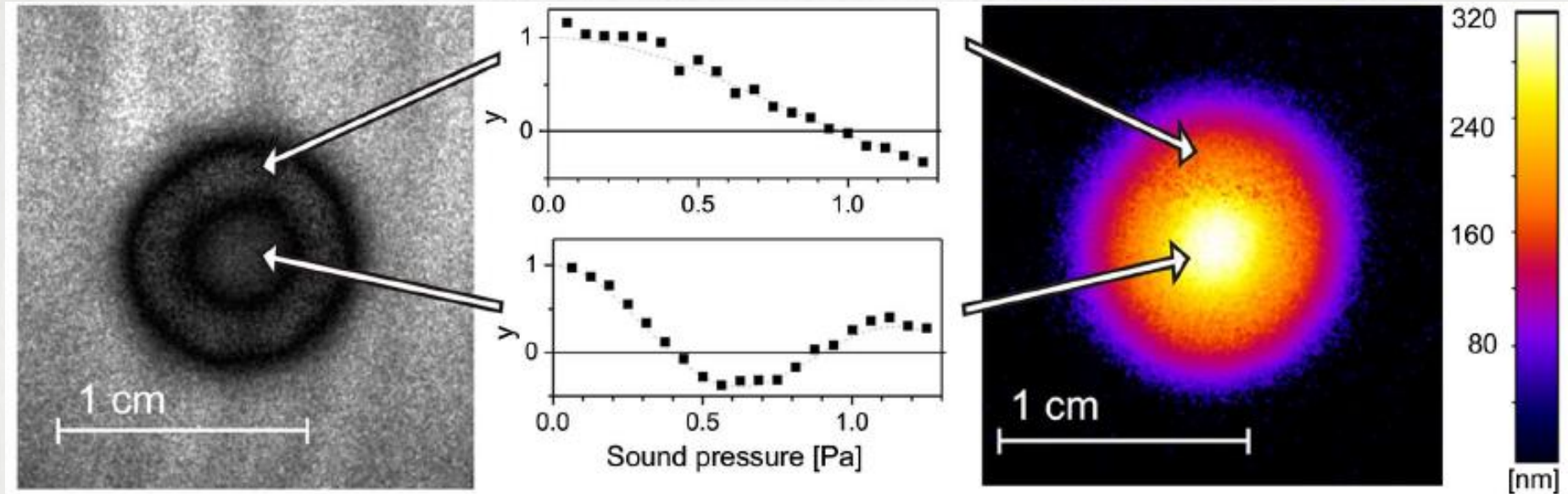


Amplituda wibracji ~ ciśnienie



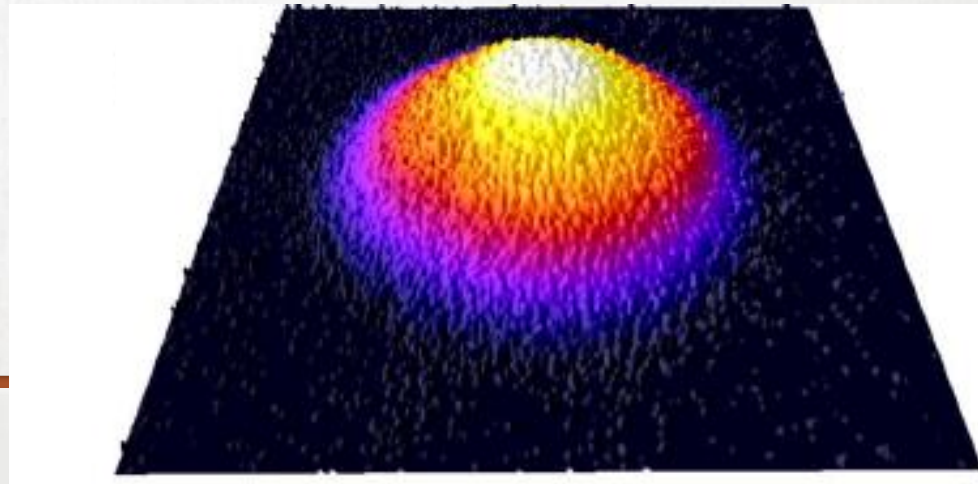
Wykonywanie serii pomiarów ze zwiększającym się natężeniem dźwięku pozwala na "śledzenie" funkcji J_0 i określenie w ten sposób amplitudy drgań w każdym punkcie obrazu niezależnie.

Odtworzenie amplitudy wibracji

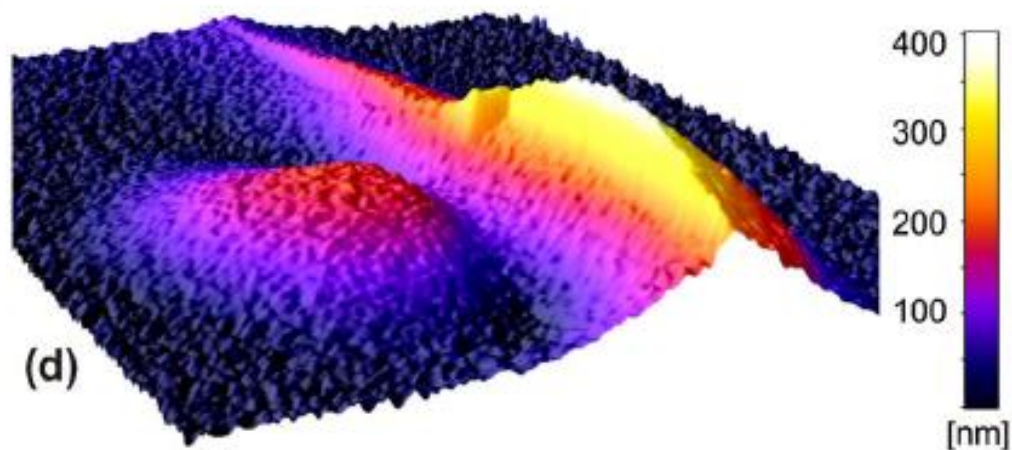
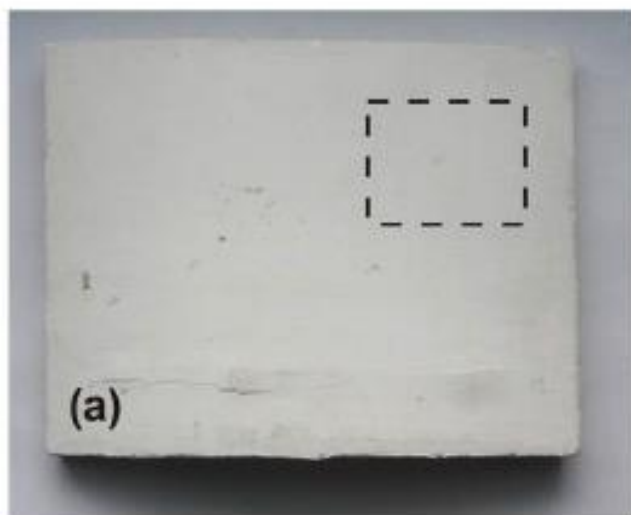
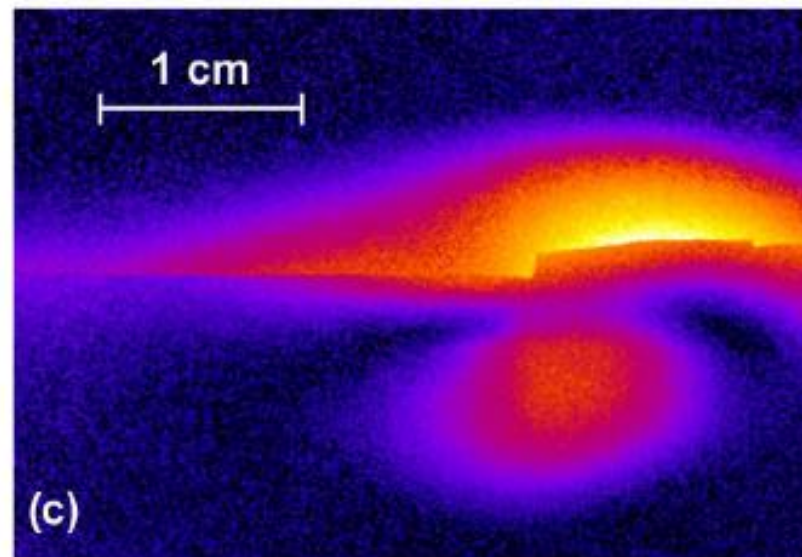
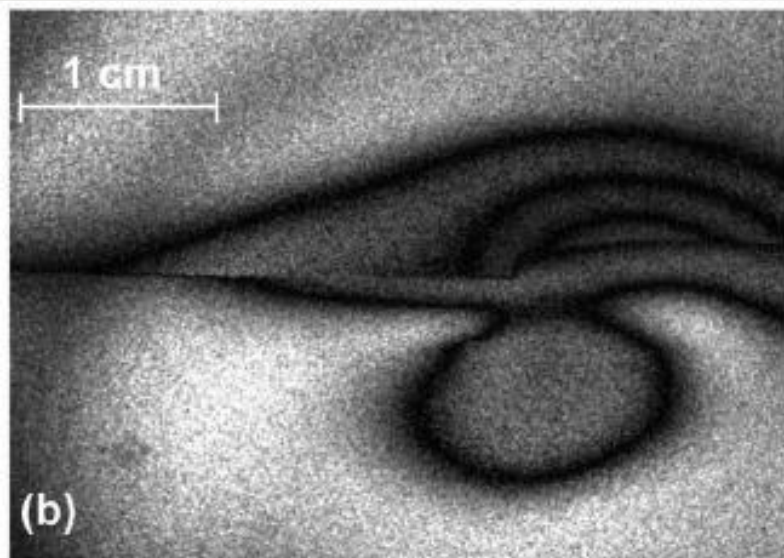


Amplituda wibracji jest wyznaczana przez numeryczne dopasowanie funkcji J_0 do zmierzonego natężenia światła w każdym punkcie obrazu.

$$I(x, y) = J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} a\right)$$

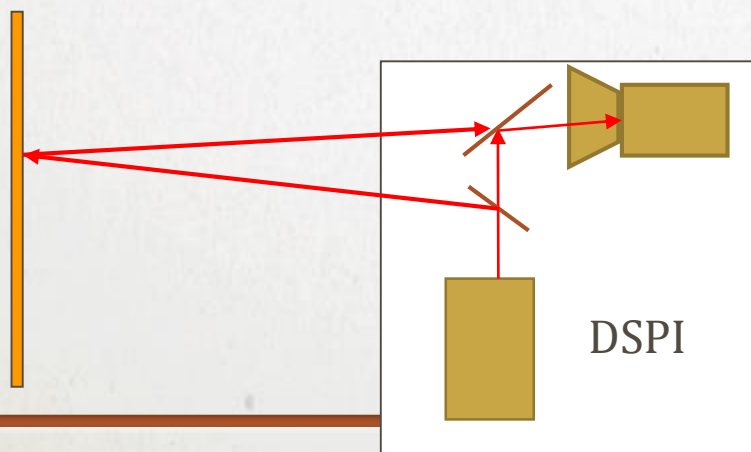


Automatyczna analiza wyników

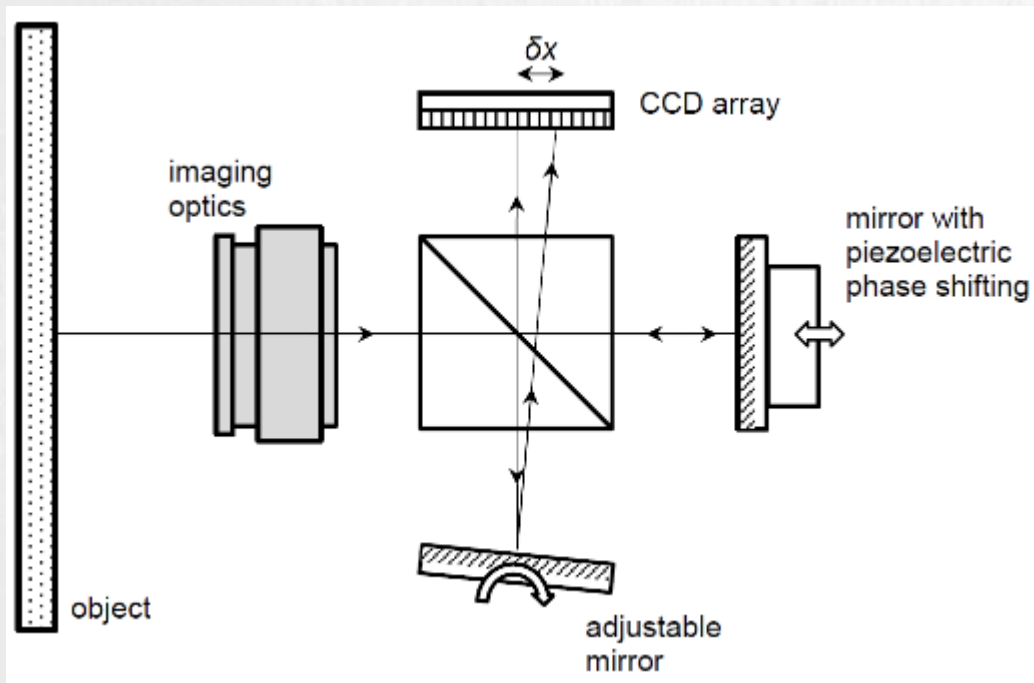


Stabilność układu pomiarowego – kolekcja Faras

Nawet bardzo niewielkie drgania układu pomiarowego względem badanej powierzchni prowadzą do niekontrolowanych, skokowych zmian fazy i zaburzają procedurę pomiarową.



Układ szero graficzny - digital speckle shearing pattern interferometry (DSSPI)

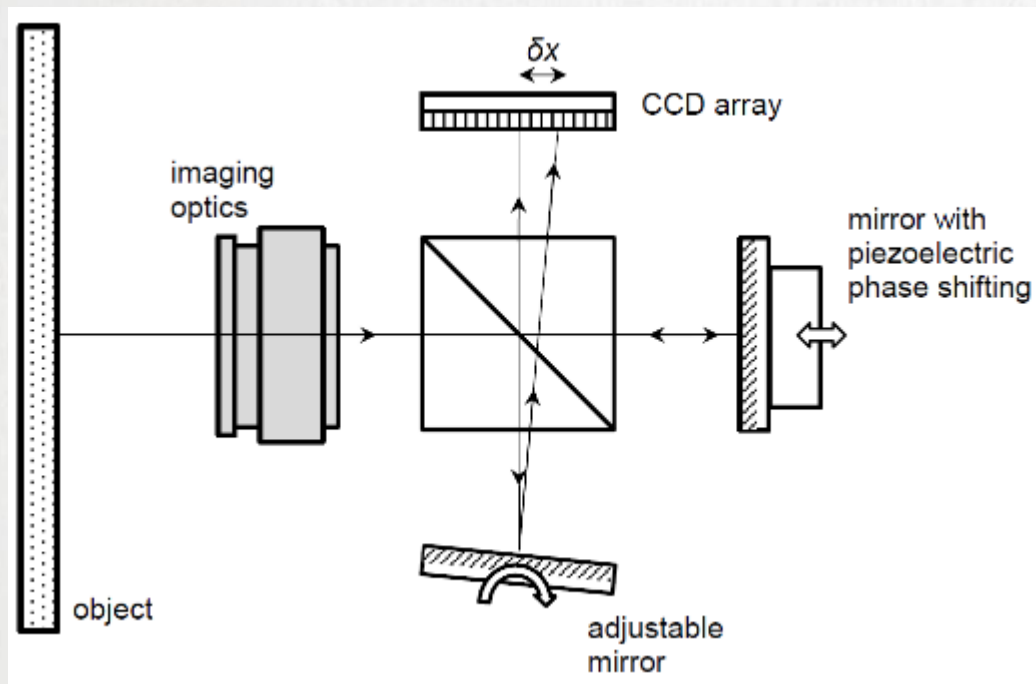


Rejestracja w układzie interferometru Michelsona: przesunięcie obrazu uzyskiwane przy pomocy obrotu lustra.



Dwa obrazy plamkowe interferują w każdym punkcie matrycy.

DSSPI

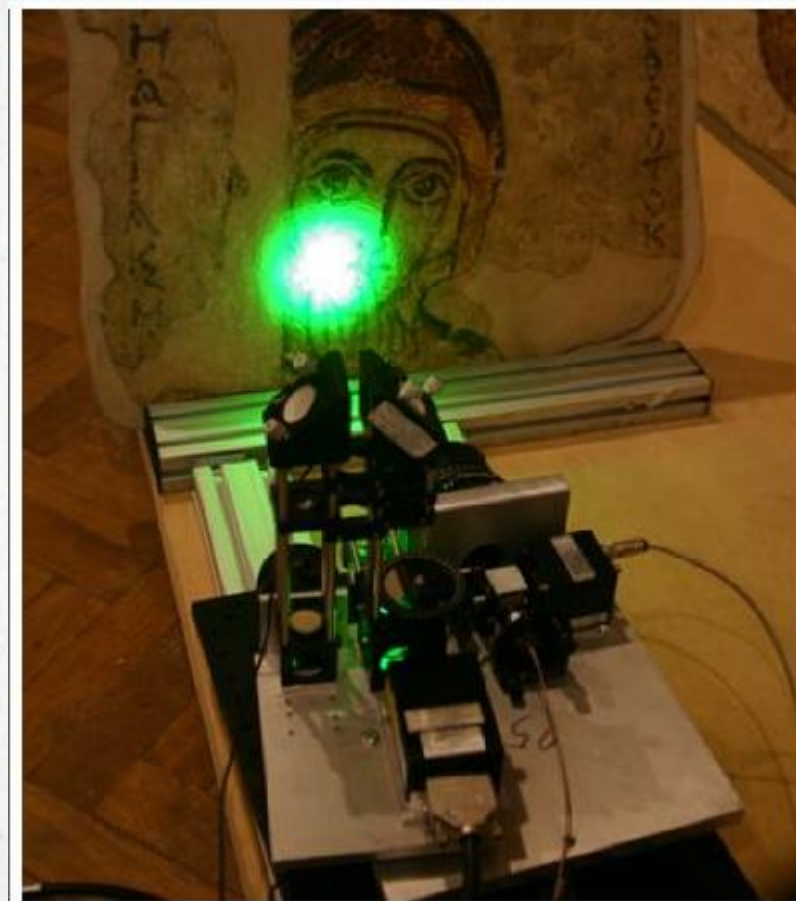
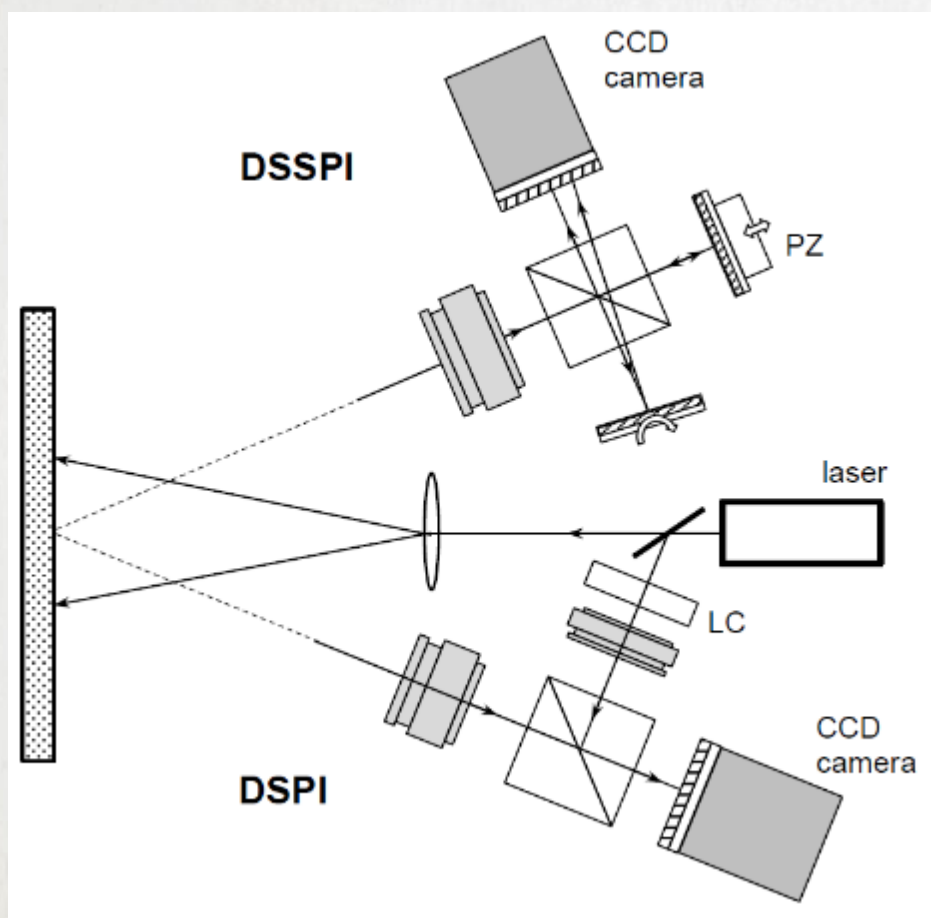


- wysoka czułość
- możliwość pomiaru w niestabilnych warunkach (poza laboratorium)
- możliwość zastosowania automatycznej metody analizy wyników pomiaru (dla δx większego od rozmiaru analizowanego defektu)

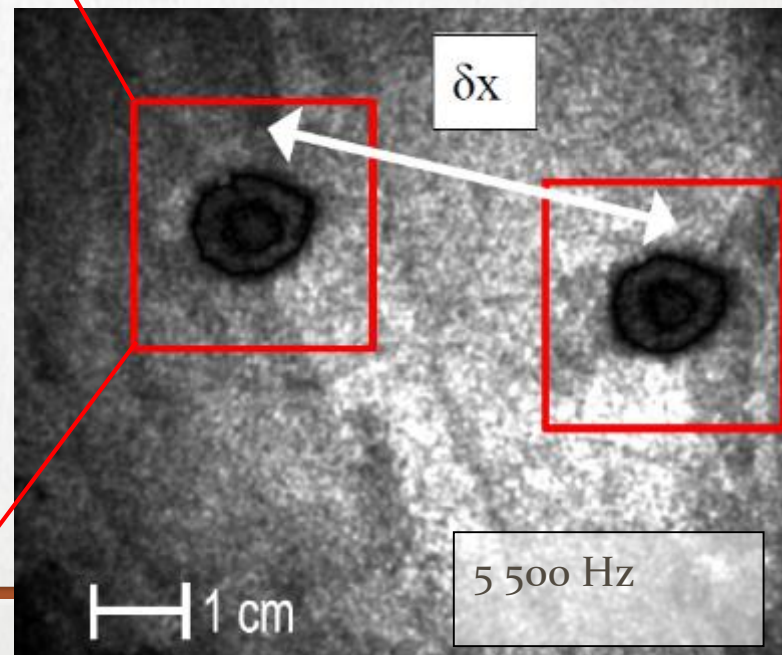
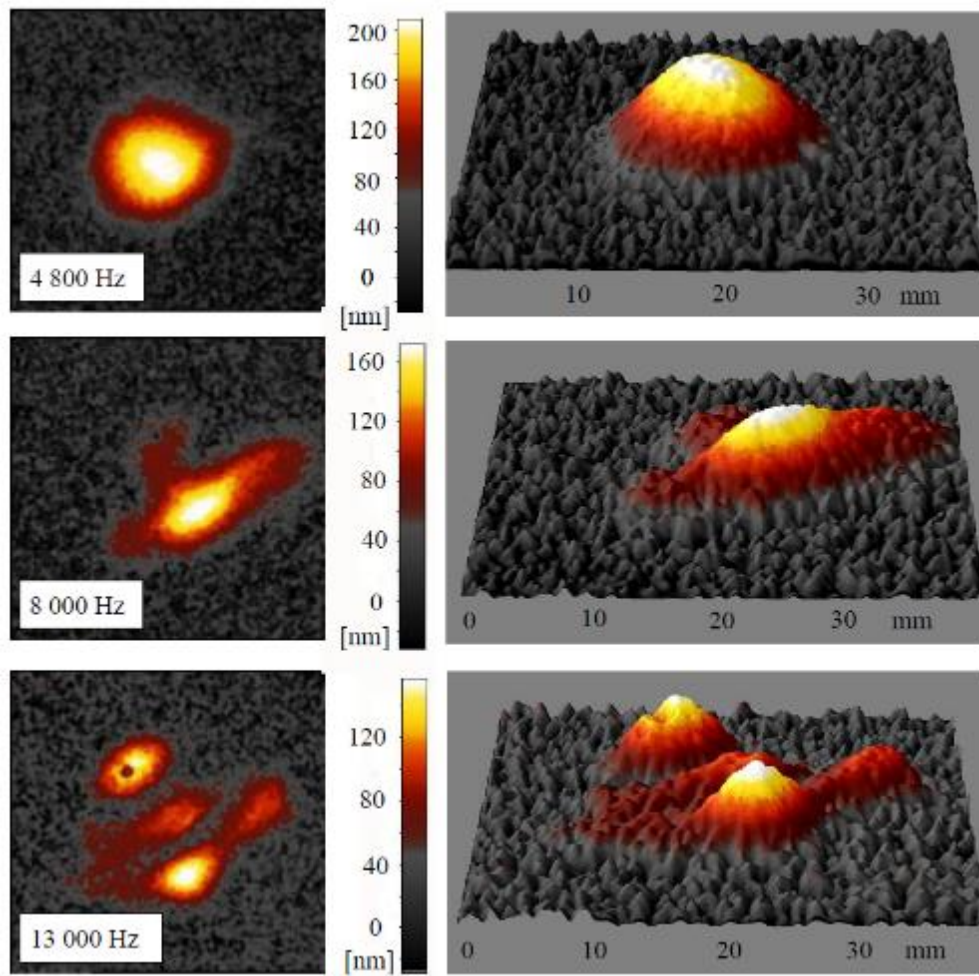
ALE

Trudności w interpretacji gdy analizowana jest duża liczba defektów, lub gdy defekty są bardzo duże.

DSPI oraz DSSPI w jednym urządzeniu pomiarowym



Analiza defektów powierzchni fresku



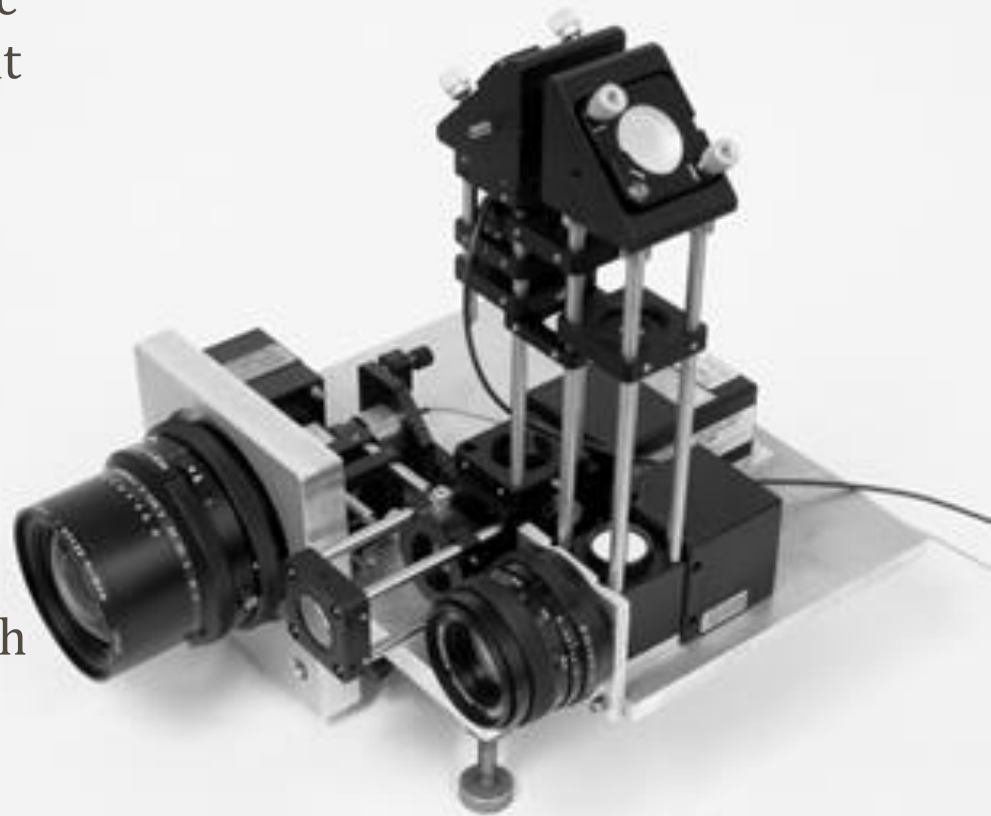
Inerferometr plamkowy

Może skutecznie wspierać proces zarządzania warunkami przechowywania obiektów dostarczając opiekunom zbiorów informacji na temat stanu zachowania obiektów.

Prosty w użyciu.

W pełni automatyczna analiza danych pomiarowych, szybka i odporna na propagację błędów.

Sprawdzony na rzeczywistych obiektach muzealnych również w warunkach in situ.



Emisja akustyczna w pomiarze rozwoju mikrouszkodzeń

Pomiar fali akustycznej powstającej podczas mikro-pęknięcia struktury obiektu



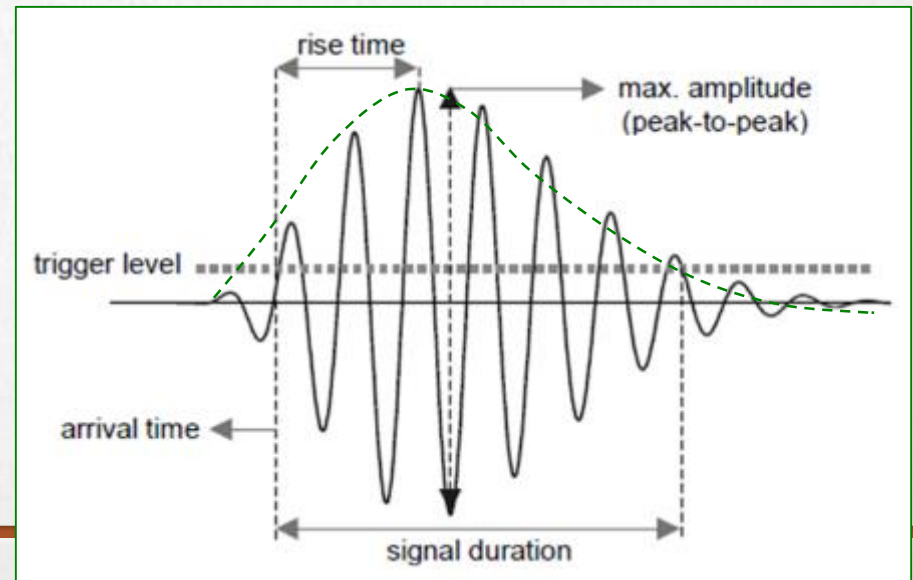
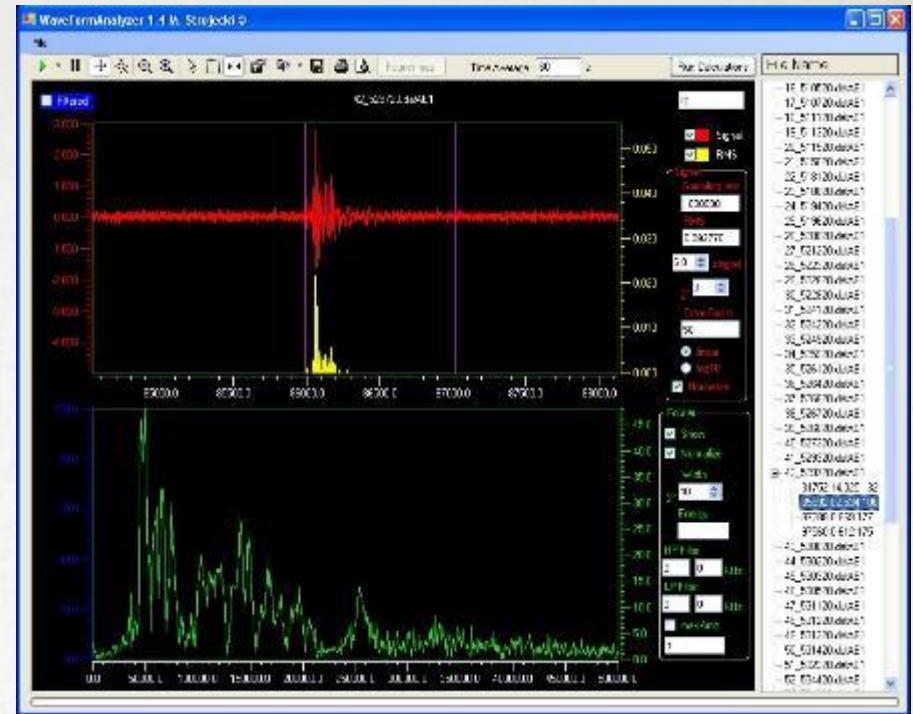
Metoda jest:

- pasywna
- nieniszcząca
- bardzo czuła

sygnał EA: $10 \mu\text{m}^2$
W objętości
 $30 \times 15 \times 15 \text{ cm}$

Pomiar narastania uszkodzeń

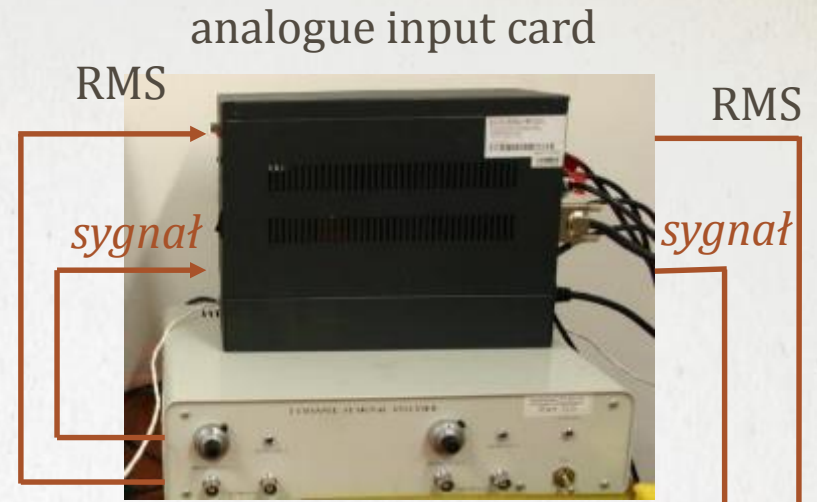
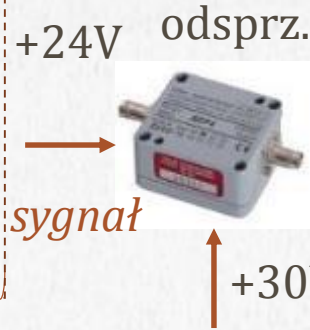
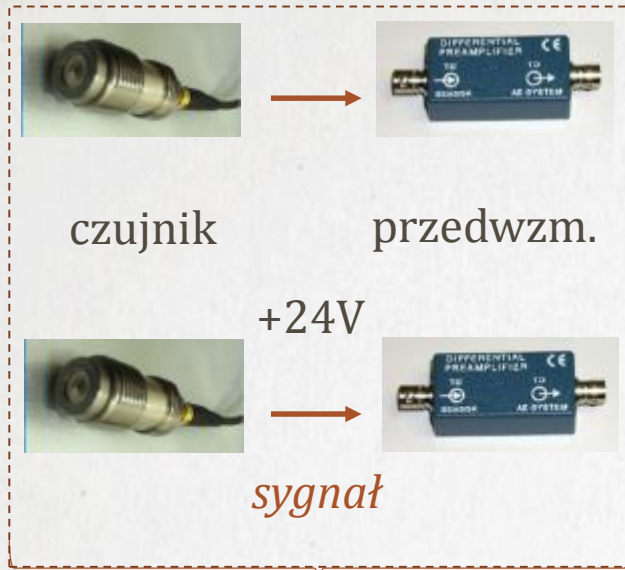
- Metoda umożliwia ciągły pomiar mikro-pęknięcia materiałów, wywołanego zmianami temperatury i wilgotności otoczenia.
- Pozwala lokalizować powstające uszkodzenia w przestrzeni i w czasie.



Emisja akustyczna w monitorowaniu obiektów zabytkowych

- Bezpieczeństwo
 - Długoczasowa stabilność
 - Redukcja środowiskowego szumu
 - Ilościowa interpretacja wyników
-

System pomiarowy



W pobliżu obiektu

- bezpieczeństwo
- stabilność
- redukcja szumu

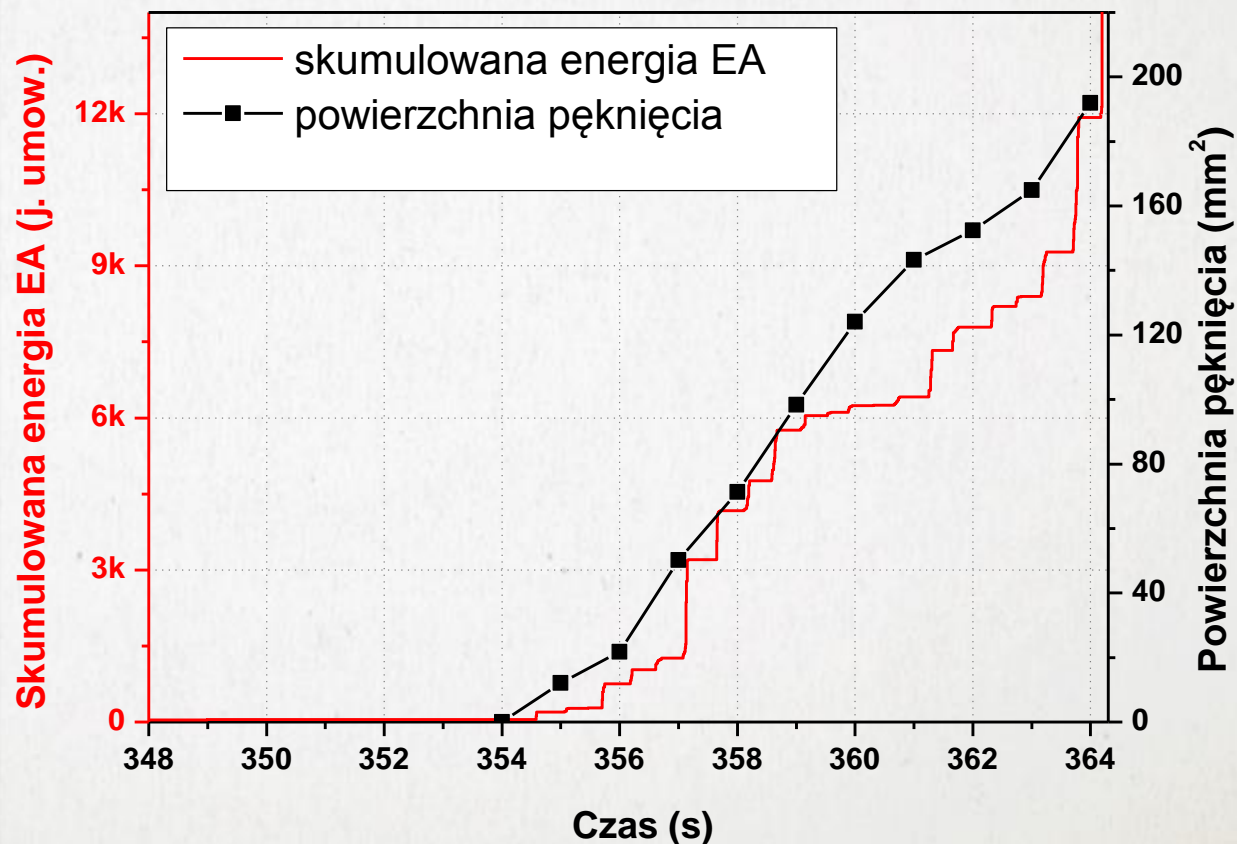
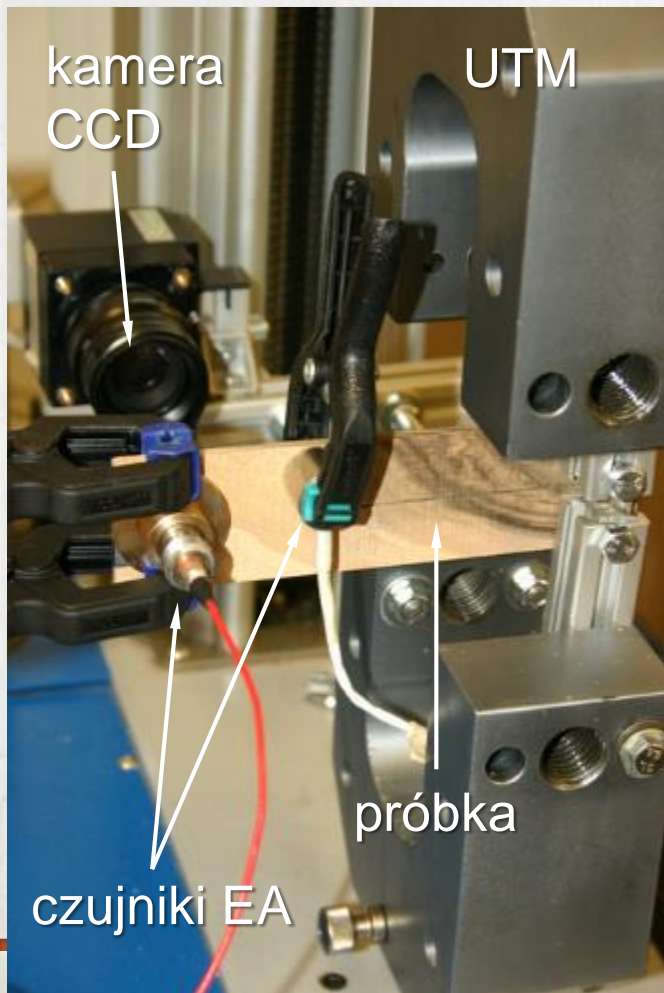


zasilacz



Kalibracja układu pomiarowego

Zmierzona energia Emisji Akustycznej jest przeliczana na długość pęknięcia próbki.



**Komoda, XVIII w.,
konstrukcja dębowa, pokryta laką japońską**



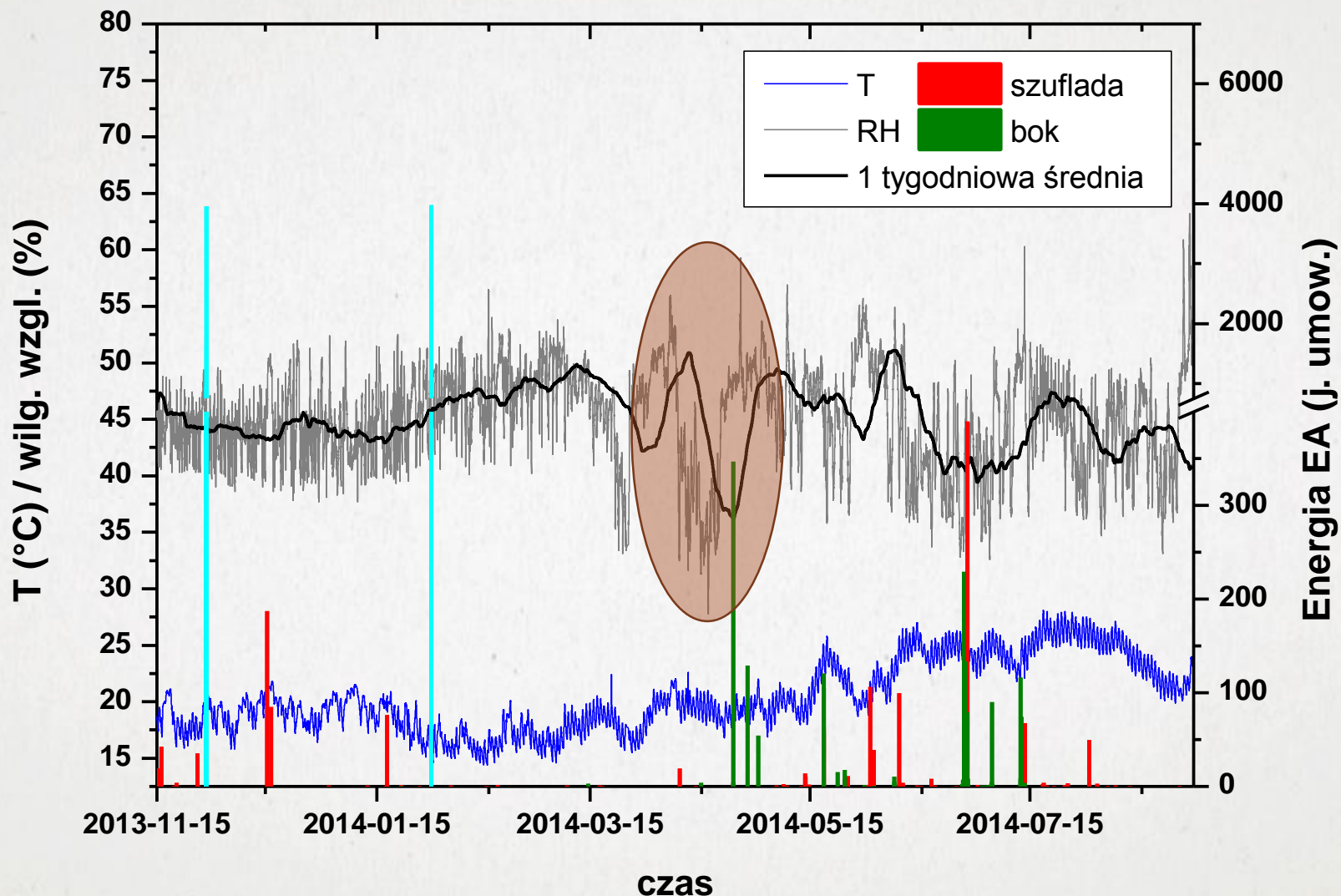
V&A

Instalacja czujników

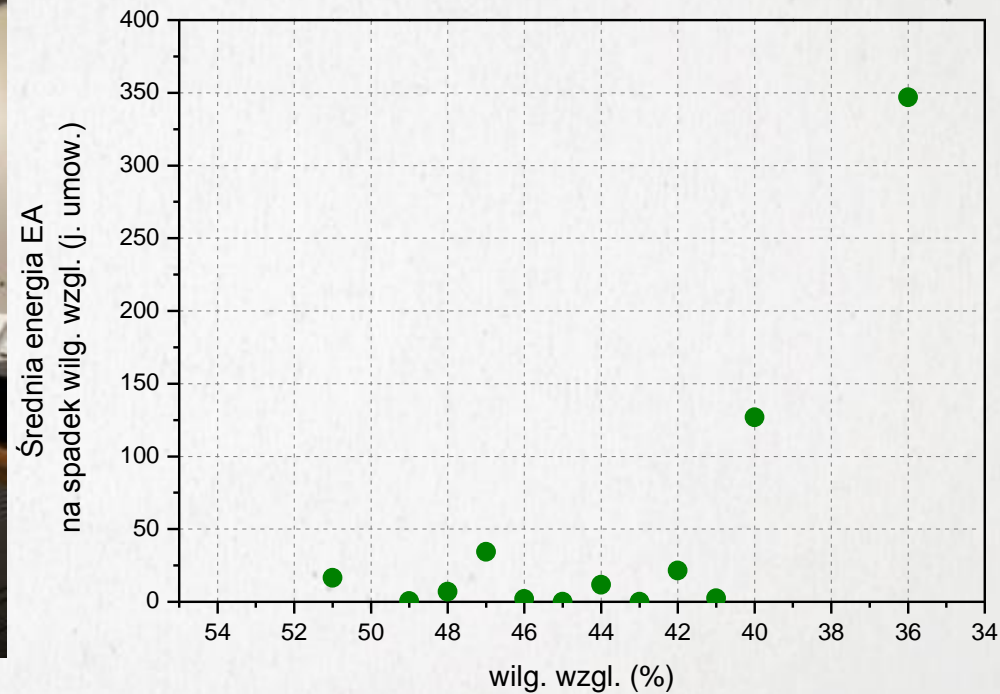
Dwa czujniki EA przyklejono (odwracalnie) do szuflady i ściany bocznej komody w pobliżu widocznych uszkodzeń drewna i laki.



Wstępne wyniki monitorowania



Analiza korelacji sygnału EA i wilgotności względnej w galerii



Całkowity rozmiar uszkodzenia nie przekracza 1 mm^2

Emisja akustyczna w monitorowaniu obiektów zabytkowych

- bardzo czuła, stabilna, odporna na szum środowiskowy,
 - pozwala ustalić korelacje między narastaniem uszkodzenia i wywołującym je bodźcami
 - komplementarna względem metod optycznych
-

Obiekty tekstylne

Interferometria plamkowa

☹️ niestabilne geometrycznie

Emisja Akustyczna

☹️ luźna struktura i wysoki
współczynnik tłumienia
dźwięku

Źródłem zagrożeń jest odkształcenie

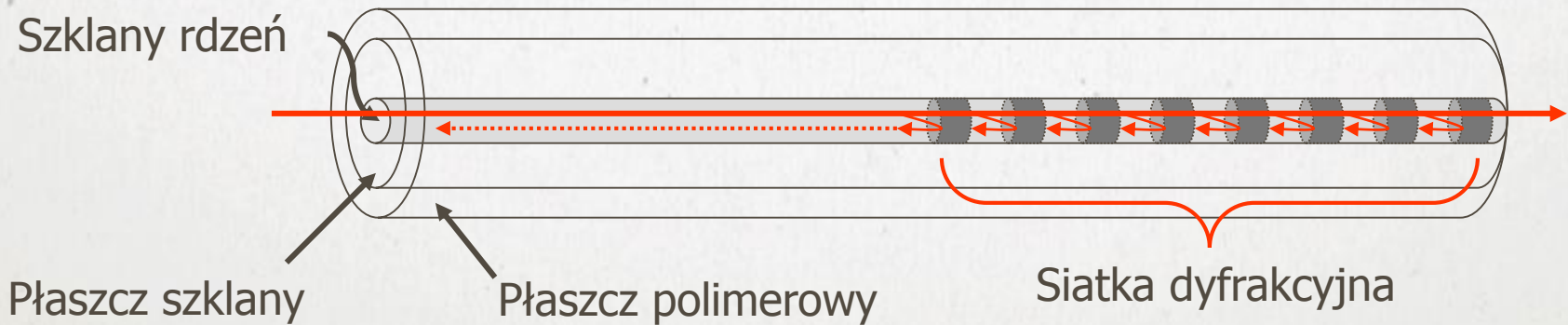
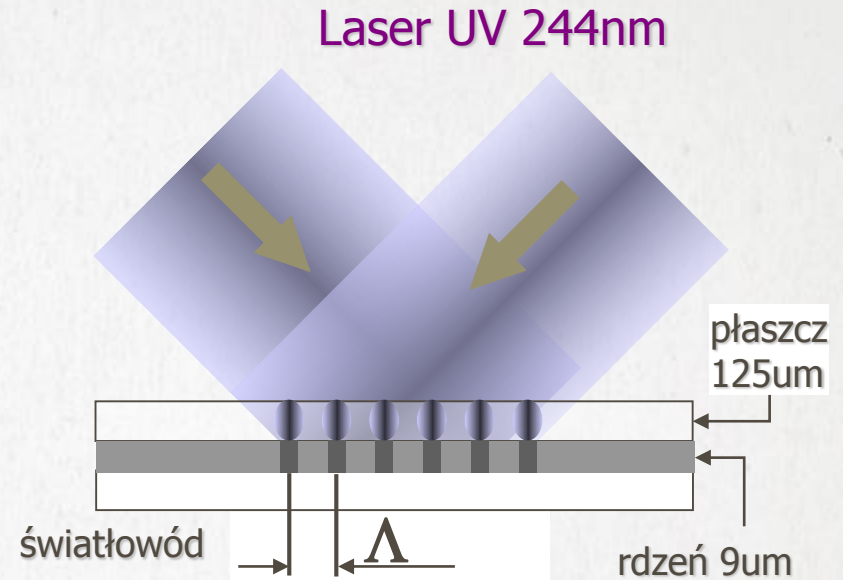


Potrzebujemy odpowiedniego **tensometru**

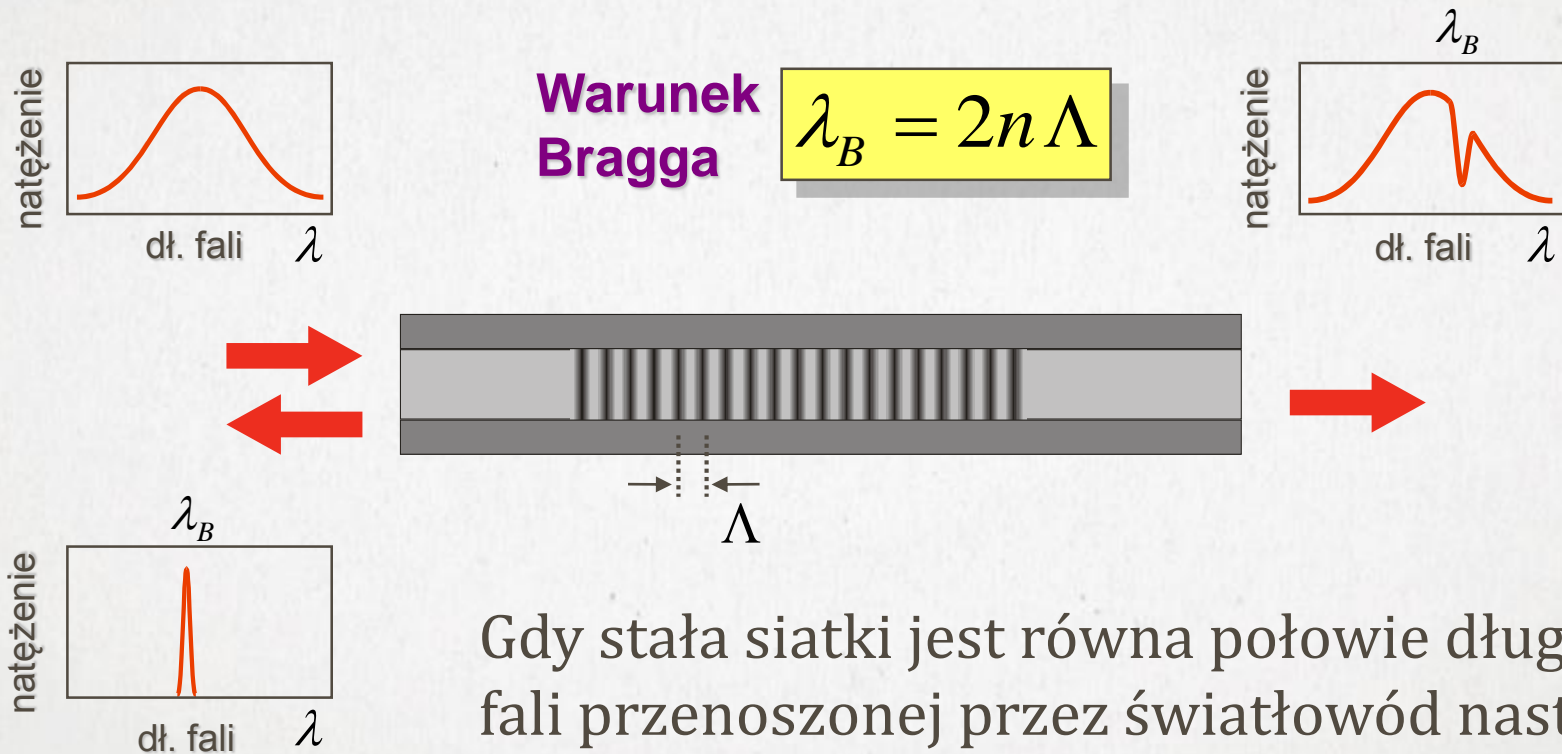


Światłowodowe siatki Bragga (FBG)

W wyniku interferencji ultrafioletowych wiązek laserowych następuje zmiana periodyczna współczynnika załamania światła rdzenia.



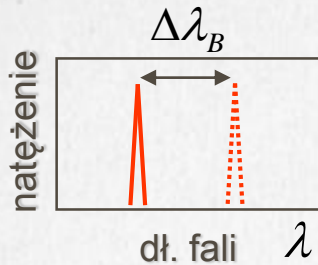
Światłowodowe siatki Bragga (FBG)



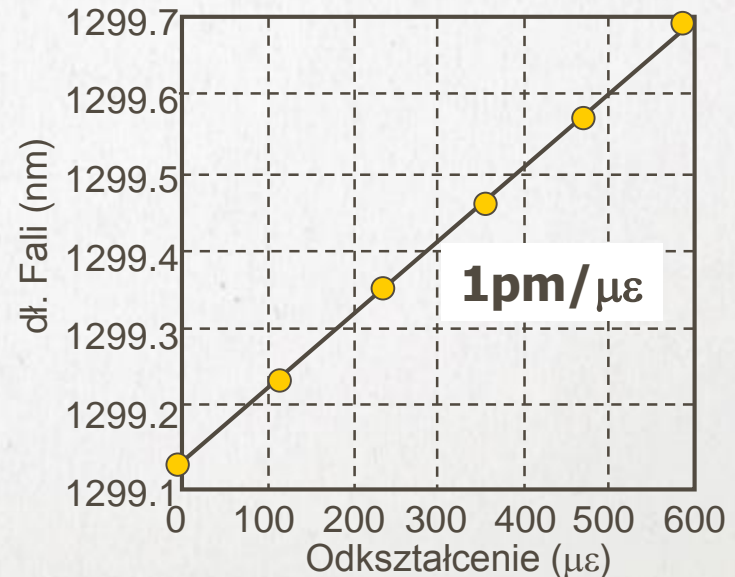
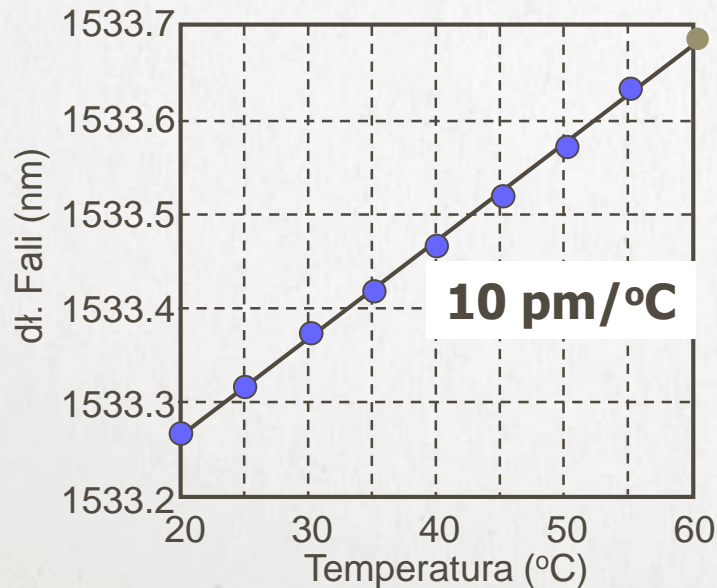
Gdy stała siatki jest równa połowie długości fali przenoszonej przez światłowód następuje spójne odbicie.

Światłowodowe siatki Bragga (FBG)

dł. fali Bragga zmienia się liniowo w funkcji odkształcenia i temperatury



$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n\Lambda)}{n\Lambda} = a \varepsilon + b \Delta T$$



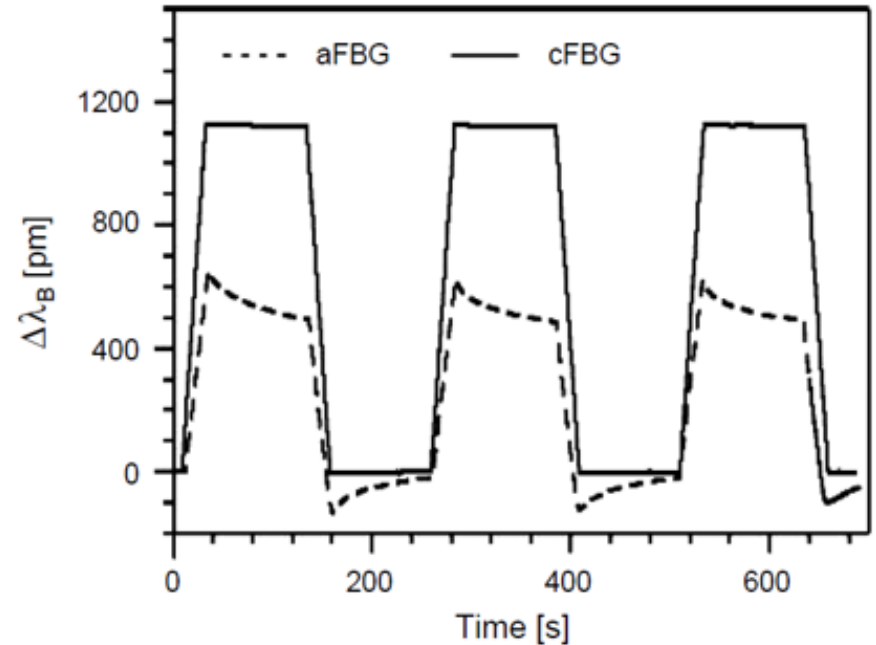
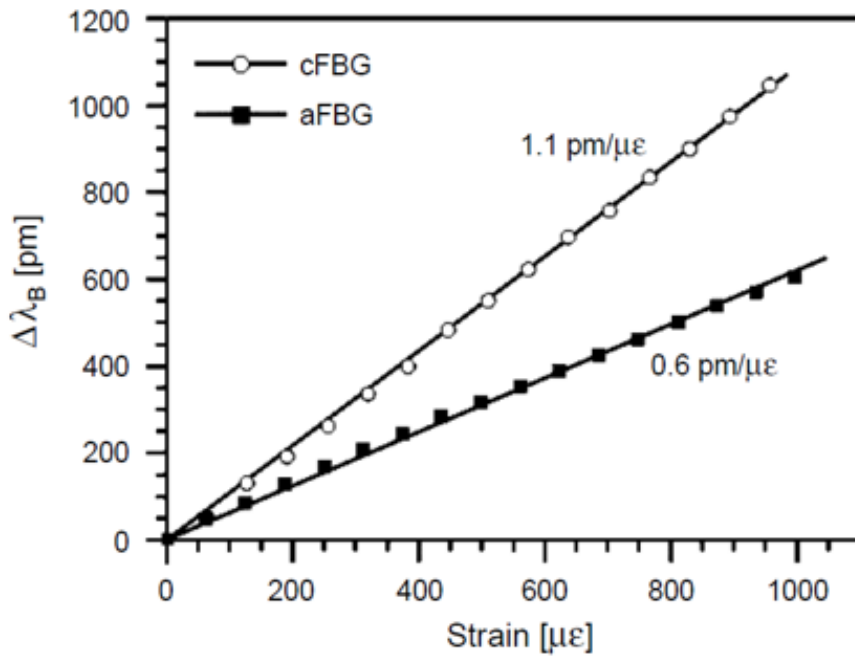
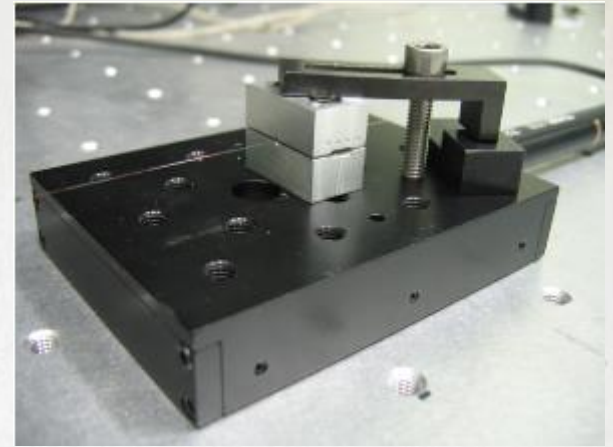
Czujniki FBG do monitorowania zabytkowych obiektów tekstylnych

- Dobór odpowiedniego światłowodu (rdzeń i pokrycie).
- Kompensacja wpływu temperatury i wilgotności względnej na deformację światłowodu w czasie pomiaru (dodatkowy czujnik).
- Połączenie czujnika z badaną tkaniną.

-
- Nie jest konieczna stabilizacja źródła światła.
 - Pomiar jest bardzo szybki.

Światłowód

Właściwości mechaniczne czujników światłowodowych z pokryciem akrylowym (aFBG) oraz ceramicznym (cFBG).

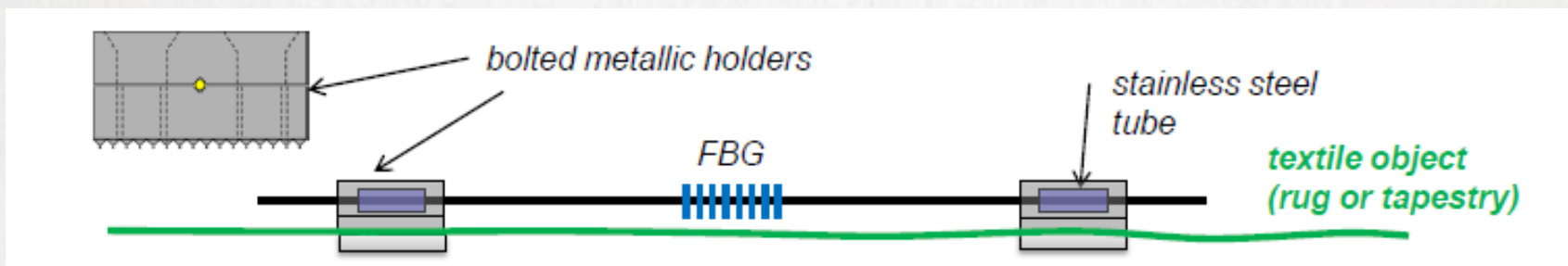


stopień przeniesienia odkształcenia z płaszczka do rdzenia

odpowiedź czujnika na cykliczną zmianę odkształcenia

Monitorowanie deformacji tkanin

Połączenie światłowodu z tkaniną : klejenie, wszywanie, wplatanie ...



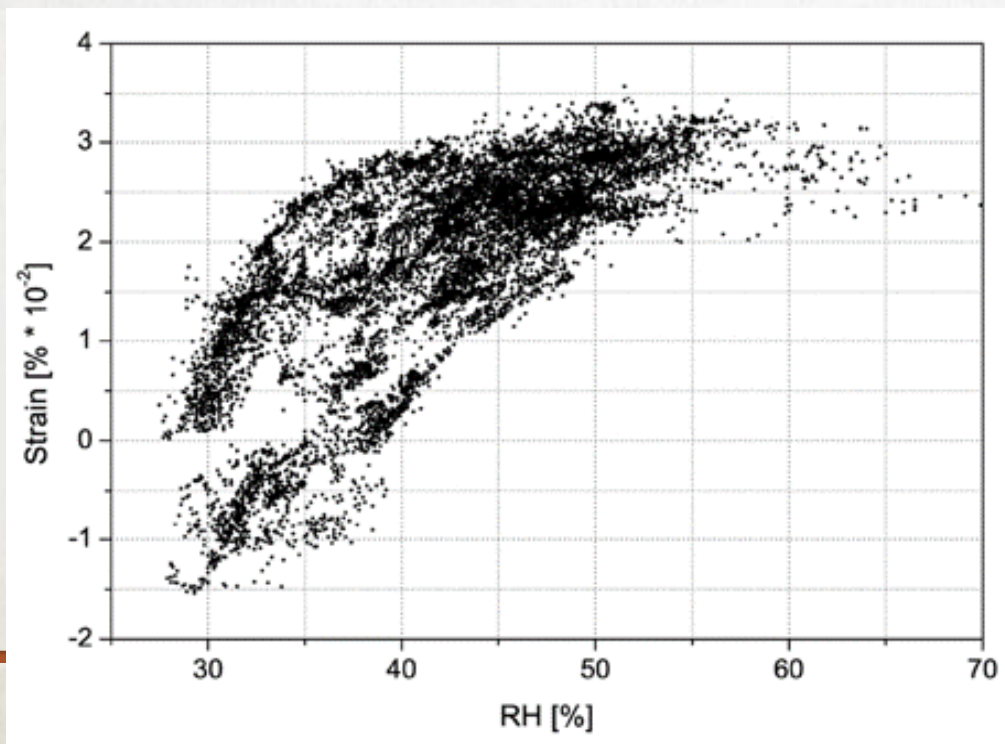
Uchwyty magnetyczne:

- nieniszczące
- zapewniają dobre przeniesienie odkształceń
- wielokrotnego użycia - łatwe do zamontowania i zdemontowania

Roczny monitoring gobelinu w Muzeum Narodowym w Krakowie

Zakres odkształceń występujących podczas ekspozycji

Nieliniowa zależność pomiędzy zmianą wilgotności względnej otoczenia a odkształceniem tkaniny



Co dalej?

Charakteryzowanie stanu obiektów na poziomie mikro

- *Potwierdzanie autentyczności*
- *Określanie atrybucji*
- *Analiza materiałów i technik malarskich*



Simone Martini,
Zwiastowanie (1333) - fragment