

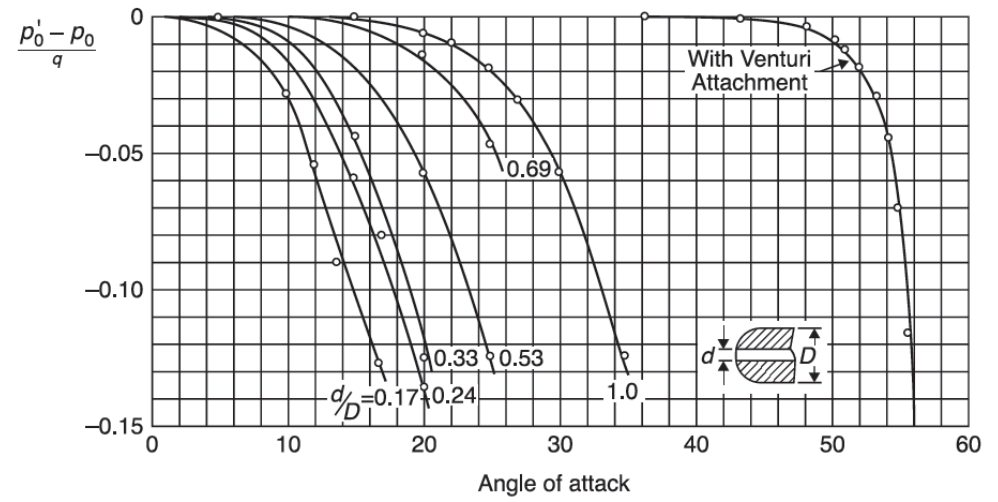
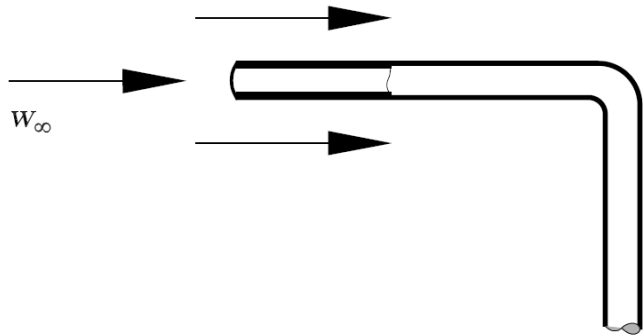
# *AERODYNAMIKA 2*

## **WYKŁAD 12**

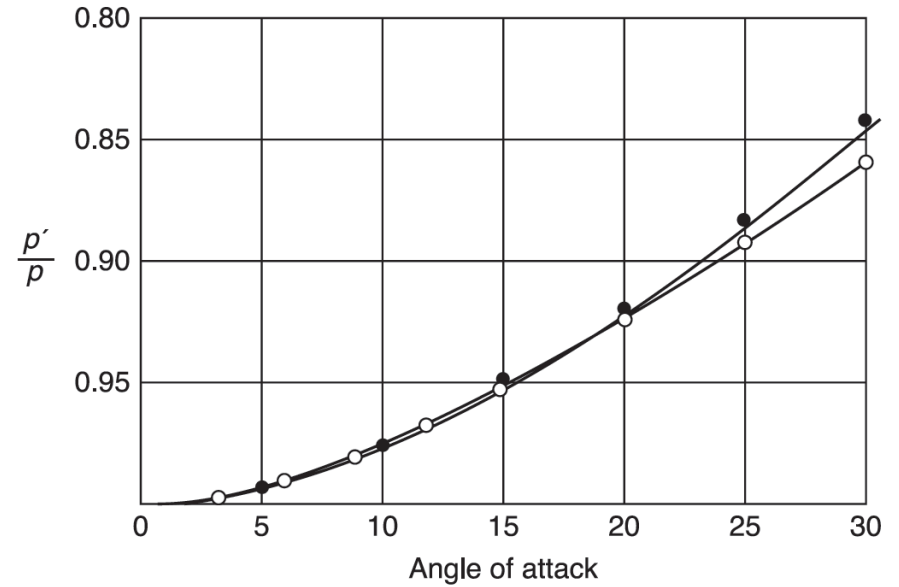
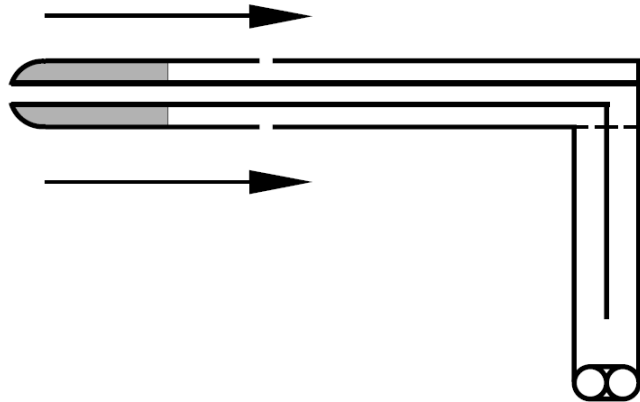
### **AERODYNAMIKA EKSPERYMENTALNA / TECHNIKI POMIAROWE**

# Pomiary ciśnienia

## Rurka Pitot

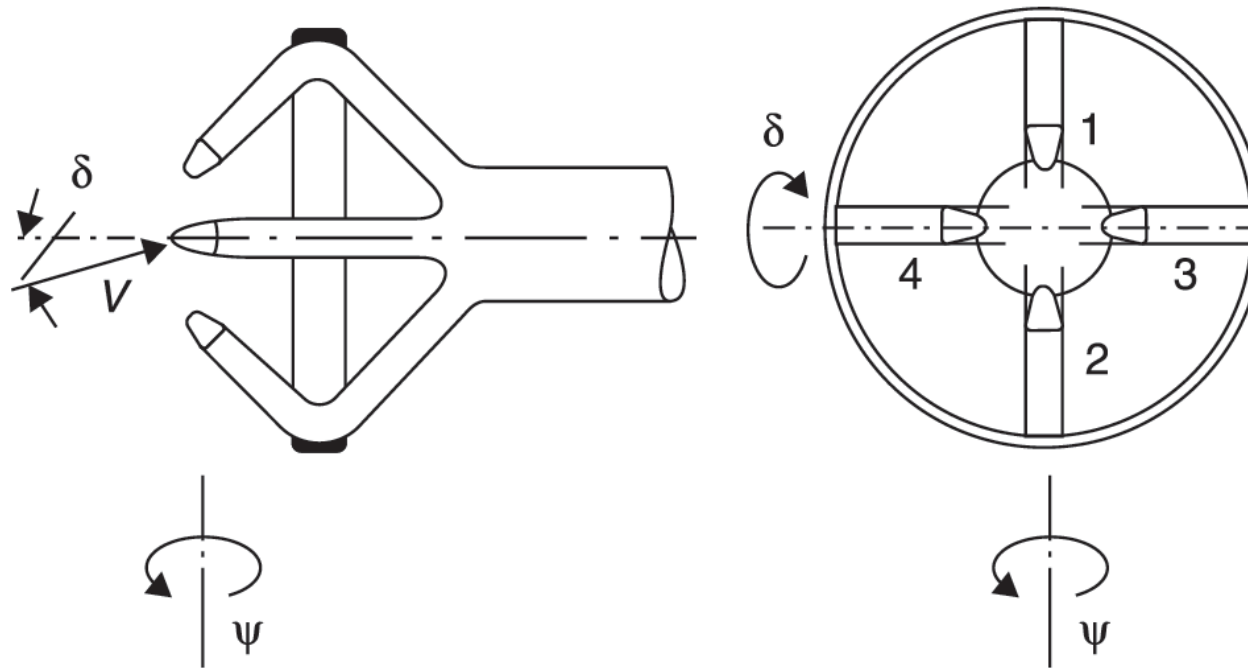


## Rurka Prandtla



## Pomiary lokalnego wektora prędkości poprzez pomiary ciśnienia

Pomiar wektora prędkości może być realizowany na kilka sposobów wykorzystując rurki Pitot/Prandtla. Jednym z najczęściej wykorzystywanych jest podejście przedstawione poniżej. W tym przyrządzie, pomiar polega na zastosowaniu czterech rurek Pitot ustawionych w parach (dwie rurki pod kątem  $\pm 45^\circ$  w odniesieniu do osi). W niektórych rozwiązaniach stosowana jest jeszcze dodatkowa rurka Pitot w osi. Wartości ciśnienia są odczytywane ze wszystkich rurek jednocześnie. Następnie wykorzystując stałe/dane empiryczne można w prosty i szybki sposób wyznaczyć wektor prędkości oraz ciśnienie statyczne i całkowite. Istotną wadą/ograniczeniem tego podejścia jest brak możliwości stosowania w bliskim sąsiedztwie ścian.

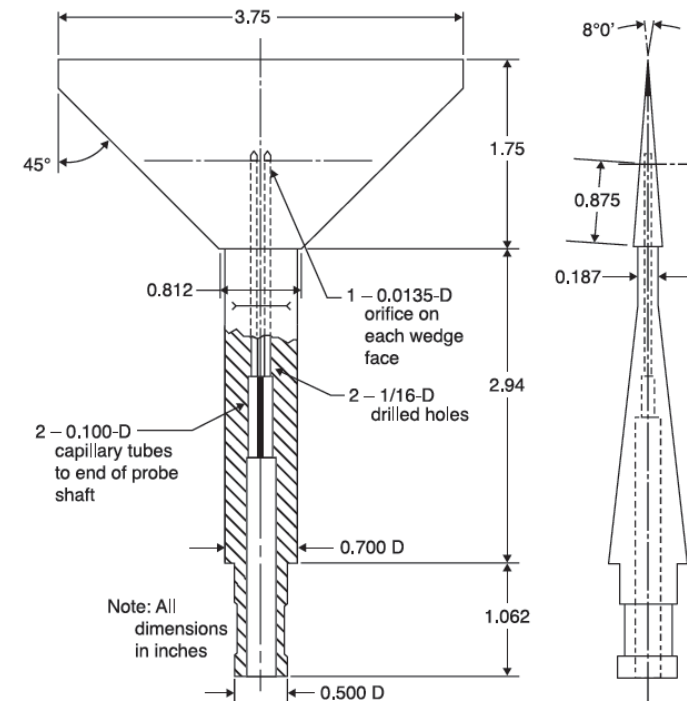
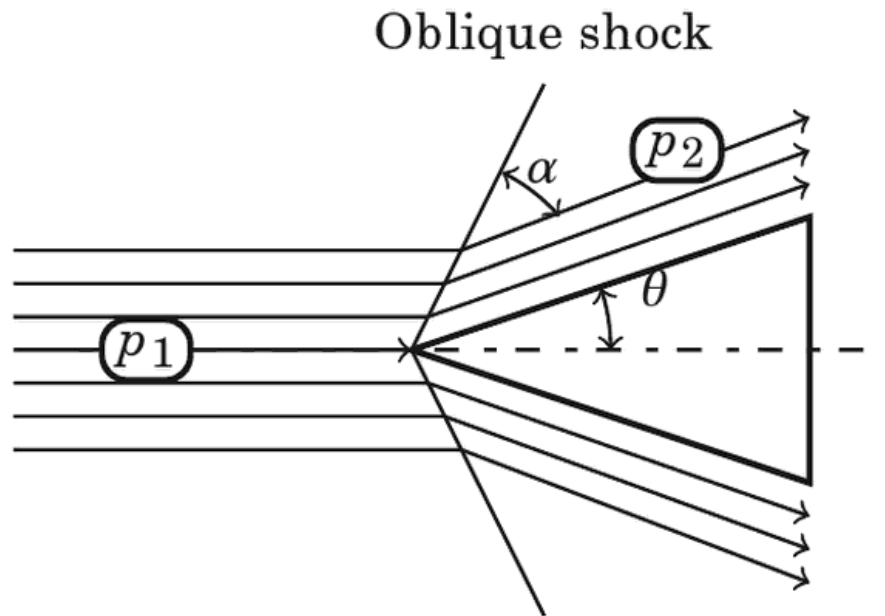


# Pomiary ciśnienia w zakresie prędkości naddźwiękowych

W zakresie wysokich prędkości, tj.  $2 \leq M \leq 5$ , w celu pomiaru ciśnienia stosowane są sondy stożkowe lub klinowe – przykład przepływu i sondy został przedstawiony poniżej. Wykorzystując stosunek ciśnień statycznych za i przed falą uderzeniową możemy wyznaczyć liczbę Macha w jednorodnym napływie, tj.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2k}{k+1} M_1^2 \sin^2 \alpha - \frac{k-1}{k+1}$$

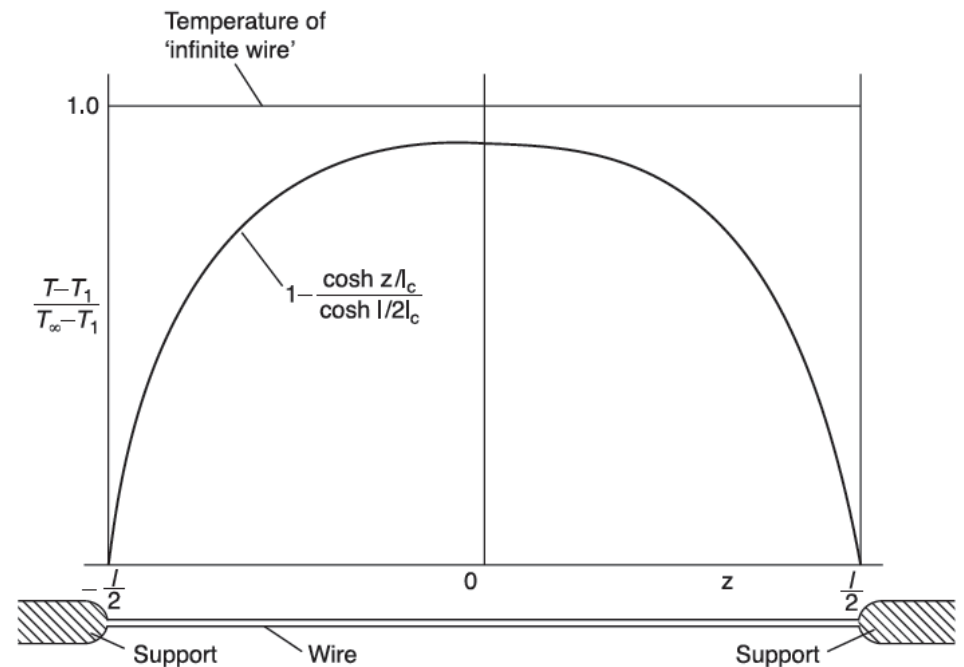
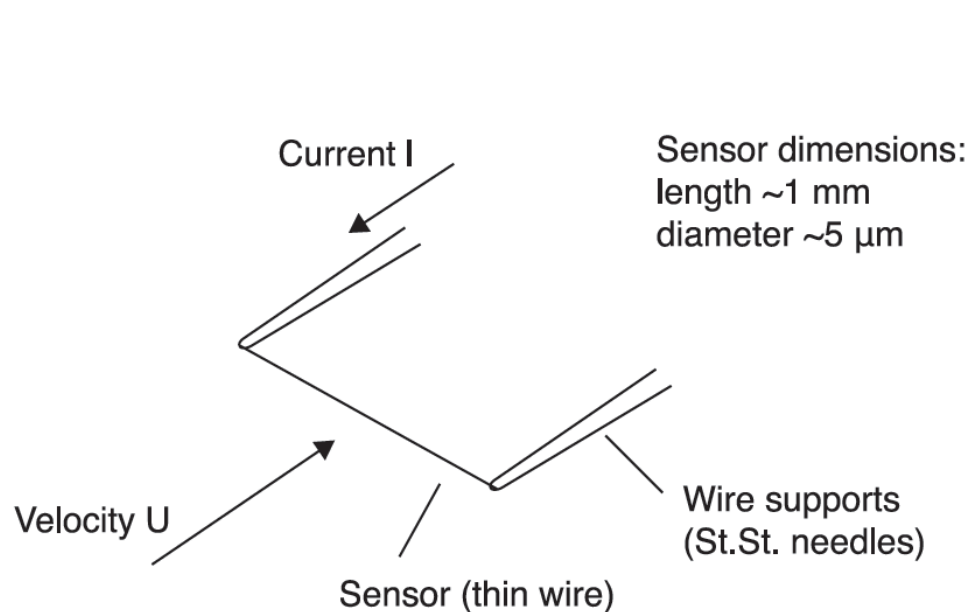
Bazując na tym, możemy wyznaczyć pozostałe parametry przepływowe, uwzględniając oczywiście fakt występowania słabych skośnych fal uderzeniowych.



Rysunki z *Aerodynamic measurements* by G.P. Russo

## Pomiary prędkości: Termoanemometry

Wartości prędkości uzyskiwane przy użyciu danych z pomiarów ciśnienia odpowiadają w zasadzie wartościom uśrednionym w czasie. W przypadku przepływu turbulentnego, aby zmierzyć poprawnie wartości prędkości chwilowej, konieczne są pomiary uwzględniające (precyzyjnie) fluktuacje prędkości. Jednym z przyrządów, który pozwala na pomiar lokalnej prędkości chwilowej jest termoanemometr. Podstawowym elementem w termoanemetrze jest czujnik wykonany z drutu oporowego, który jest rozciągnięty między dwoma wspornikami (rysunek po lewej stronie). W celu zapewnienia odpowiednio wysokiej zmienności oporu, włókno pomiarowe jest najczęściej wykonane z następujących materiałów: wolfram, platyna lub platynoiryd.



Pomiar prędkości jest wykonywany pośrednio wykorzystując zjawisko wymiany ciepła między czujnikiem termoanemometru a otaczającym płynem i prawo Joule'a.

$$\frac{c_w dT_w}{dt} = W - \dot{Q} \quad (12.1)$$

Gdzie  $c_w$  – pojemność cieplna włókna pomiarowego,  $W$  – moc elektryczna doprowadzona do włókna oraz  $\dot{Q}$  – strumień wymienianego ciepła między czujnikiem termoanemometru a otaczającym płynem.

W ogólnym przypadku wymiana ciepła może być oczywiście realizowana wskutek konwekcji, przewodnictwa i promieniowania cieplnego. Ponieważ temperatura włókna pomiarowego nie przekracza temperatury 300°C udział promieniowania cieplnego jest pomijalny. W związku z tym wymiana ciepła jest realizowana poprzez konwekcję swobodną i wymuszoną. W przypadku, typowych w Aerodynamice liczb Reynoldsa (odniesionych do średnicy włókna) konwekcja swobodna może być również pominięta. W przypadku konwekcji wymuszonej, strumień wymienianego ciepła między czujnikiem termoanemometru a otaczającym płynem może zostać wyznaczony z następującej zależności.

$$\dot{Q} = \alpha A (T_w - T_a) \quad (12.2)$$

gdzie  $\alpha$  – współczynnik przejmowania ciepła,  $A$  – pole powierzchni bocznej włókna,  $T_w$  – temperatura włókna,  $T_a$  – temperatura płynu.

Jak łatwo możemy wywnioskować z równania (12.1), w przypadku ustalonej w czasie wymiany ciepła moc elektryczna ( $W$ ) doprowadzona do włókna oraz strumień ciepła  $\dot{Q}$  są równe. W takim przypadku można wyprowadzić tzw. zależność Kinga, która łączy prędkość przepływu ze spadkiem napięcia na włóknie pomiarowym.

$$I^2 R_w = \frac{E^2}{R_w} = (A + B\sqrt{U})(T_w - T_a) = (A + B\sqrt{U}) \frac{R_w - R_a}{bR_a} \quad (12.3)$$

Gdzie  $I$  – natężenie prądu,  $R_w$  – opór elektryczny włókna pomiarowego,  $E$  – spadek napięcia,  $A$  i  $B$  – stałe,  $U$  – prędkość przepływu,  $R_a$  – opór elektryczny włókna pomiarowego w temperaturze odniesienia oraz  $b$  – temperaturowy współczynnik oporu.

Wiązanie prędkości przepływu ze spadkiem napięcia na włóknie pomiarowym w równaniu (12.3) może być realizowane na dwa sposoby:

- utrzymując stały opór włókna pomiarowego lub temperaturę pozwalając na zmianę natężenia prądu ze zmianą prędkość przepływu. Termoanemometr stałotemperaturowy, ang. Constant Temperature Anemometer (CTA).
- utrzymując stałe natężenie prądu pozwalając na zmianę temperatury włókna, a co za tym idzie również jego oporu elektrycznego ze zmianą prędkość przepływu. Termoanemometr stałoprądowy, ang. Constant Current Anemometer (CCA).

W przypadku termoanemometru stałotemperaturowego bezwładność cieplna włókna nie ma wpływu na pomiar. W związku z tym pasmo przenoszenia termoanemometrów stałotemperaturowych jest zdecydowanie wyższe (100 kHz w porównaniu z 1kHz dla termoanemometrów stałoprądowych).

## Pomiary temperatury: Termopary

Termoparę można uzyskać łącząc dwa różne druty A i B jak pokazano na rysunku poniżej. W przypadku, gdy temperatura łącza obu drutów  $T_{jct}$  różni się od temperatury odniesienia  $T_{ref}$  występuje powstaje różnica potencjału  $E$  na łączach  $+/-$ .



Wartość różnicy potencjału  $E$  wynika bezpośrednio z różnicy temperatur łącza i odniesienia oraz właściwości materiałowych drutów A i B.

$$E = \int_{T_{ref}}^{T_{jct}} (\varepsilon_A - \varepsilon_B) dT \quad (12.4)$$

Gdzie  $\varepsilon_A, \varepsilon_B$  – współczynniki Seebecka metali, z których są wykonane druty A i B.

W przypadku niedużych różnic temperatur (zakładając linowy przebieg), mamy następujące rozwiązanie całki (12.4).

$$E = (\varepsilon_A - \varepsilon_B)(T_{jct} - T_{ref}) \quad (12.5)$$

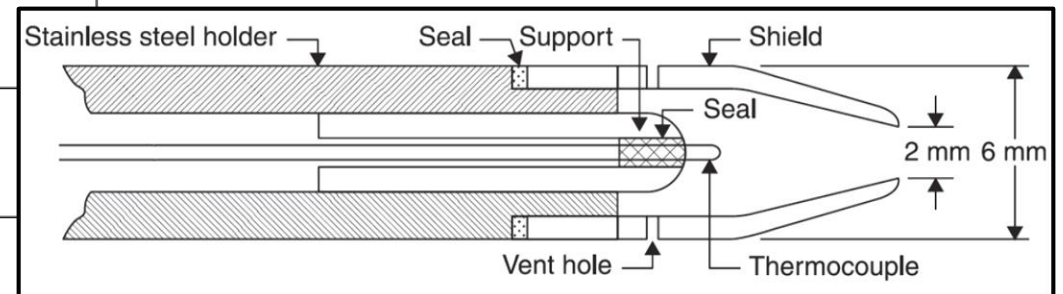
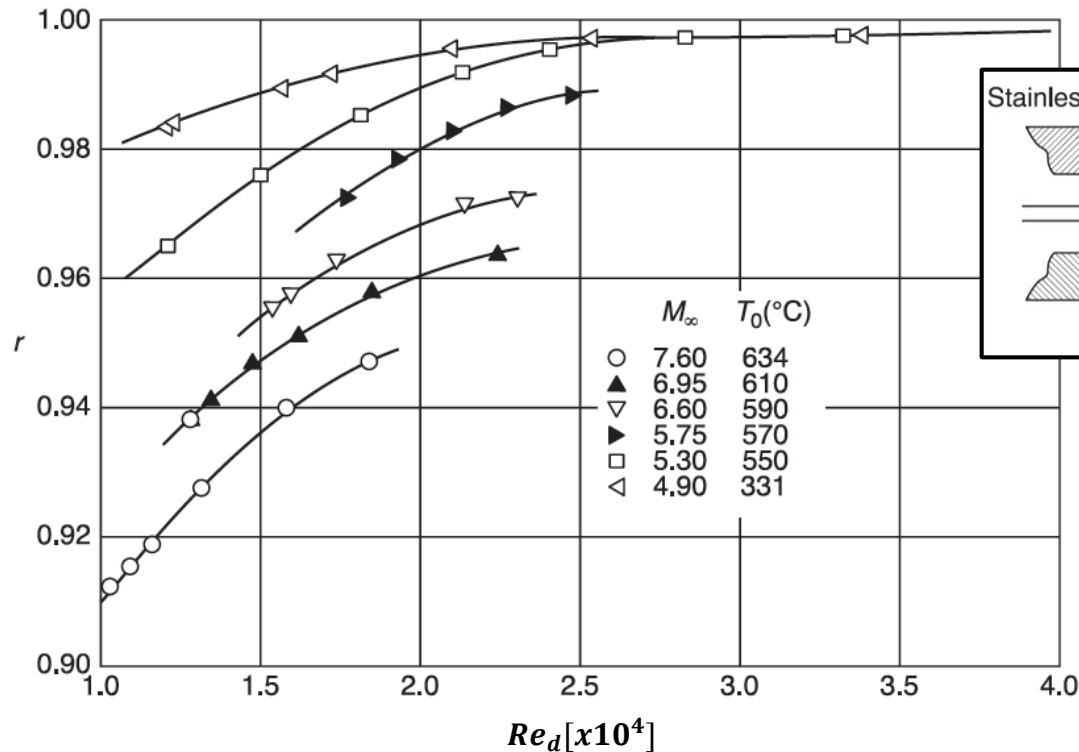
Metale i stopy metali, z których są wykonane druty A i B dobierane są odpowiednio do zakresów mierzonych temperatur.



## Pomiary temperatury spiętrzenia

Pomiar temperatury spiętrzenia w zakresie wysokich prędkości wymaga stosowania czujników/termopar umieszczonych na przykład w rurce Pitot (rysunek poniżej). W takim układzie najistotniejszy wpływ na dokładność pomiaru mają straty ciepła wynikające z przewodzenia i promieniowania ciepła przez obudowę czujnika, przewodzenia ciepła przez układ mocowania i druty termopary. Dokładność pomiaru jest zależna oczywiście również od liczby Reynoldsa i liczby Macha.

$$r = \frac{T_m - T_\infty}{T_{0\infty} - T_\infty} \quad (12.6)$$



# Pomiary prędkości: Laserowy Anemometr Dopplerowski (ang. Laser Doppler Anemometer (LDA))

Laser Doppler Anemometer (LDA) wykorzystuje efekt Dopplera, tj. skutek względnego ruchu źródła i odbiorcy powstaje różnica w częstotliwości sygnału między źródłem i odbiorcą. Rozważmy ruch niewielkiej cząstki/drobiny z prędkością  $\bar{U}$  (rysunek poniżej). W tym uproszczonym przykładzie mamy jedną padającą wiązkę laserową o długości fali  $\lambda_0$  i częstotliwości  $f_0$  (pamiętamy, że  $f_0 = c/\lambda_0$ ). Wiązka ta napotykając przeszkodę w postaci małej cząstki/drobiny ulega rozproszeniu we wszystkich kierunkach, oczywiście z niejednorodną kierunkowością rozproszonych promieni. W związku z tym, w ogólnym przypadku w jakimś kierunku  $\bar{e}_s$ , światło rozproszone ma długości fali  $\lambda_s$  i częstotliwości  $f_s$ . Efekt Dopplera w tym przypadku sprowadza się do różnicy między  $f_s$  i  $f_0$ .



W układzie odniesienia związanym z drobiną prędkość propagacji fali w kierunku  $\mathbf{e}_i$  jest równa  $c - \mathbf{U} \cdot \mathbf{e}_i$ . W związku z tym częstotliwość w tym układzie odniesienia jest określona następująco

$$f' = \frac{c - \mathbf{U} \cdot \mathbf{e}_i}{\lambda_0} = f_0 - \frac{\mathbf{U} \cdot \mathbf{e}_i}{\lambda_0} \quad (12.7)$$

W układzie odniesienia odbiorcy w kierunku  $\mathbf{e}_s$ , długość fali jest równa  $\lambda_s = c/f'$ . Natomiast częstotliwość fali u odbiorcy jest zdefiniowana jak poniżej.

$$f_s = \frac{c + \mathbf{U} \cdot \mathbf{e}_s}{\lambda_s} = f' + \frac{\mathbf{U} \cdot \mathbf{e}_s}{\lambda_s} \quad (12.8)$$

Łącząc zależności (12.7) i (12.8) otrzymujemy:

$$f_s = f_0 + \mathbf{U} \cdot \left( \frac{\mathbf{e}_s}{\lambda_s} - \frac{\mathbf{e}_i}{\lambda_0} \right) \quad (12.9)$$

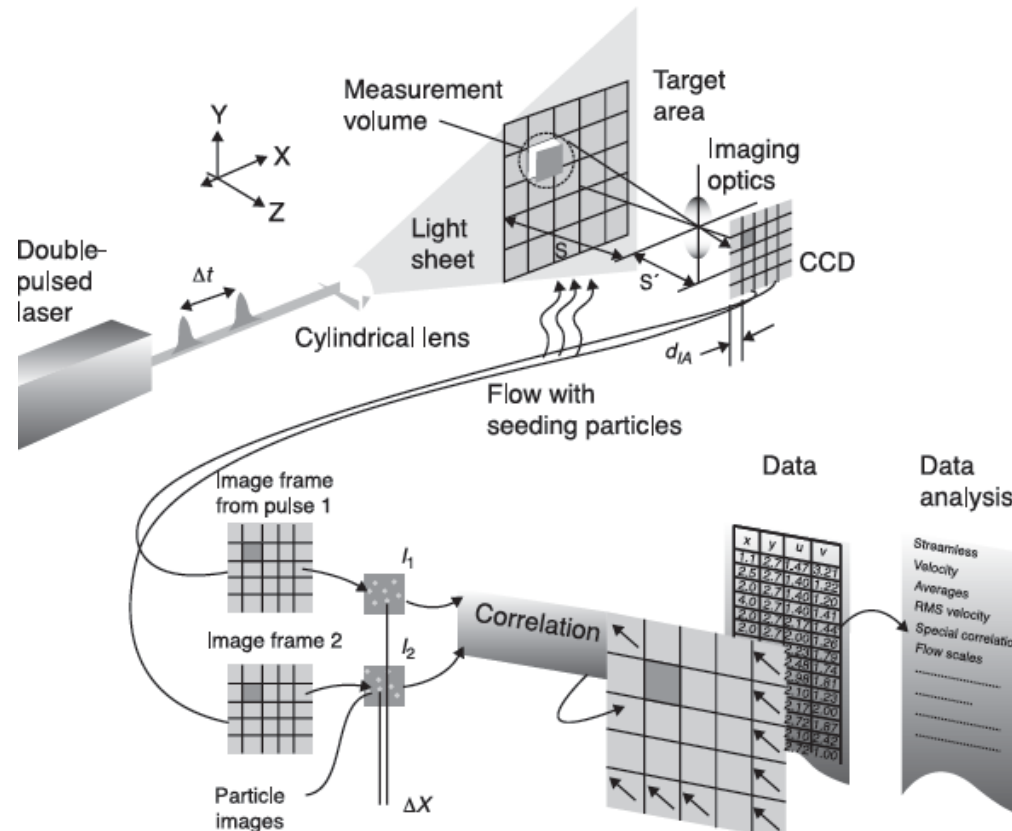
W ogólnym przypadku możemy założyć, że długości fal nie ulegają zmianie (tj.  $\lambda_s = \lambda_0$ ) w związku z tym (12.9) upraszcza się do:

$$f_s = f_0 + \frac{\mathbf{U}}{\lambda_0} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_i) \quad (12.10)$$

W przypadku przestrzeni trój-wymiarowej (3D) należy zastosować taki układ i ilość wiązek laserowych, aby wygenerować trzy równania (12.10) dla każdej składowej prędkości. Istnieje wiele rodzajów laserowego anemometru Dopplerowskiego, które umożliwiają punktowe pomiary prędkość.

# Pomiary prędkości: Anemometria obrazowa (ang. Particle Image Velocimetry (PIV))

Metoda PIV umożliwia wykonywanie pomiarów prędkości zarówno w płaszczyźnie (przestrzeń dwuwymiarowa (2D)) jak również w przestrzeni trójwymiarowej (3D), tzw. Stereo PIV. Dla porównania, laserowy anemometr dopplerowski (LDA) umożliwia jedynie punktowy pomiar prędkości. Podobnie jak w metodzie LDA, w celu zapewnienia efektu wizualizacji przepływu jest zanieczyszczony niewielkimi cząstkami/drobinami stałymi.



W metodzie PIV płaszczyzna pomiarowa jest oświetlona odpowiednim światłem laserowym poprzez układ soczewek. Wygenerowany obraz rejestrowany jest na światłoczułej matrycy kamery CCD (ang. charge-coupled device). Obraz ten jest podzielony na podobszary/sektory, natomiast każdy podobszar jest podzielony na piksele. Bazując na podejściu korelacji przestrzennej między kolejnymi obrazami (generowanymi z krokiem  $\Delta t$ ) wyznaczone jest lokalne (średnie w podobszarze) przemieszczenie  $\Delta \mathbf{S} = [\Delta x, \Delta y]$ . Z przemieszczenia natomiast średni w podobszarze wektor prędkość.

$$\mathbf{U} = \frac{\Delta \mathbf{S}}{\Delta t} \quad (12.11)$$

Przestrzenna korelacja krzyżowa (ang. cross-correlation) między dwoma kolejnymi w czasie obrazami w tych samych podobszarach jest zdefiniowana następująco

$$R(s, t) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} F'_{I,J}(i, j) F''_{I,J}(i + s, j + t) \quad (12.12)$$

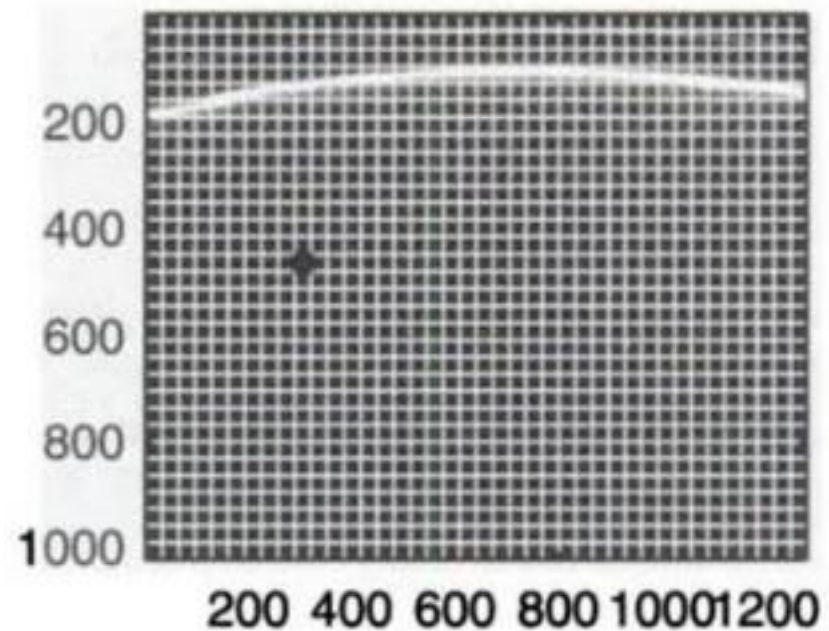
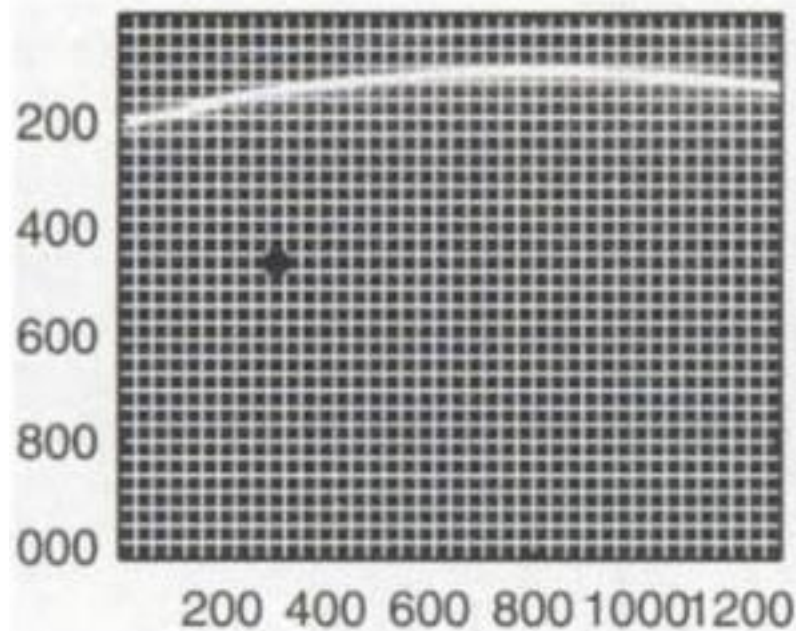
Gdzie  $R(s, t)$  jest cykliczną korelacją krzyżową rozkładu położenia cząstek w podobszarze  $I, J$  dla kolejnych obrazów w czasie, tj.  $F'$  i  $F''$ .  $i, j$  są indeksami położenia pikseli w podobszarach. Parametry  $s, t$  odpowiadają natomiast średniemu przemieszczeniu cząstek w podobszarze.

W celu wyznaczenia średnich przemieszczeń w podobszarach należy wyznaczyć kowariancję przestrzenną. Kowariancja może być wyznaczona w różny sposób, niemniej jednak najczęściej jest wyznaczana przy użyciu transformaty Fouriera.

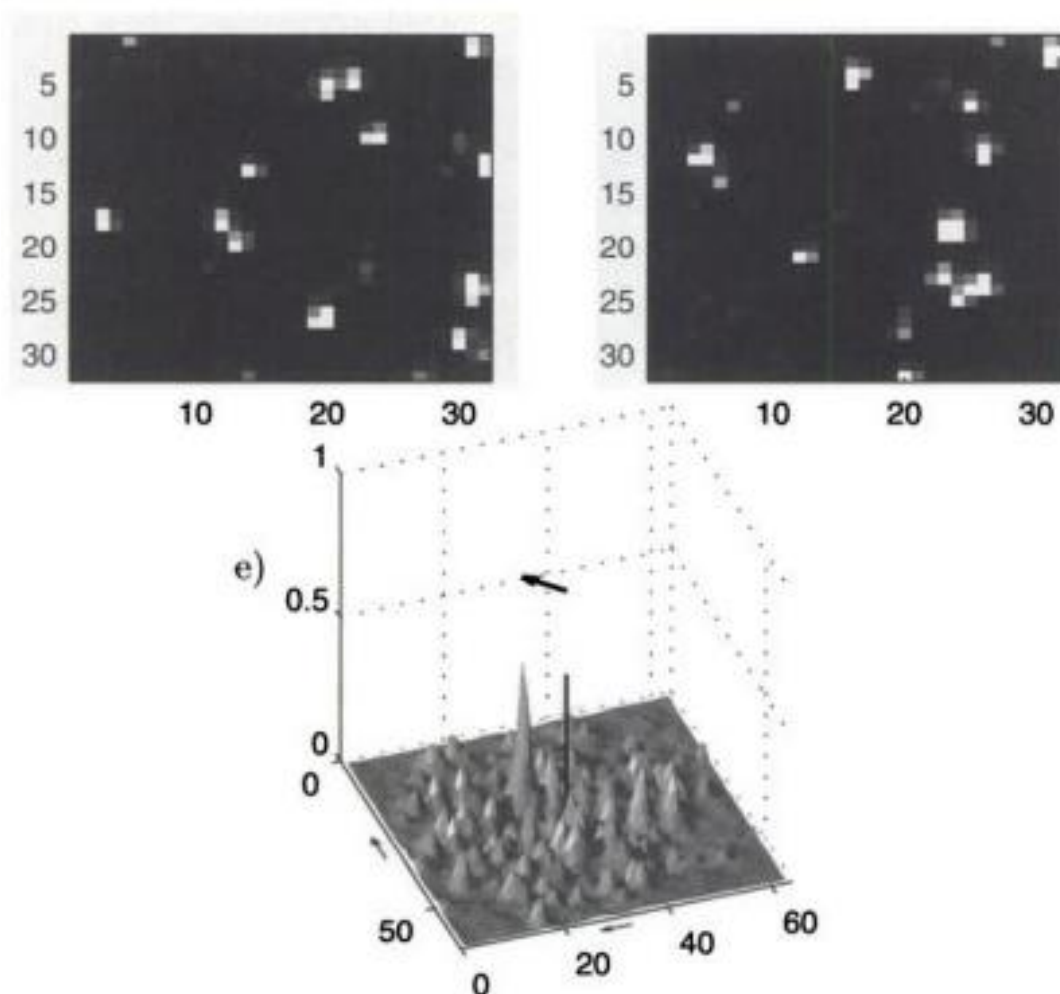
Spodziewana wartość kowariancji krzyżowej zależności (12.12) jest następująca.

$$E\{R(s, t)\} = \left(1 - \frac{|s|}{N}\right) \left(1 - \frac{|t|}{N}\right) R(s, t) \quad (12.13)$$

Przykład dwóch kolejnych w czasie matryc z zaznaczonymi podobszarami jest przedstawiony poniżej. Na czarno jest zaznaczony podobszar, który będzie dalej rozważany.



Dwa kolejne w czasie obrazy położenia cząstek w podobszarze (zaznaczonym na czarno w poprzednim slajdzie) zostały pokazane poniżej. Natomiast rozkład korelacji przestrzennej (krzyżowej) w podobszarze dla dwóch kolejnych obrazów cząstek został pokazany na dolnym, rysunku. Na tym rysunku zostało również pokazane średnie przemieszczenie wynikające z rozkładu korelacji przestrzennej.



## Wizualizacja przepływów: metody optyczne

Metody optyczne pozwalają na wizualizację zmian gęstości w badanej przestrzeni poprzez wykorzystanie zjawiska refrakcji (odchylenie promienia świetlnego) lub zmianę fazy promienia świetlanego. Związek współczynnika załamania światła z gęstością może być określony przy użyciu wzoru Lorentza-Lorenza.

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \rho R(\lambda) \quad (12.14)$$

Gdzie  $n = c_0/c$  – współczynnik załamania światła,  $c_0$  – prędkość światła w próżni,  $c$  – prędkości światła w ośrodku o gęstości  $\rho$  oraz  $R(\lambda)$  - stałą zależną od ośrodka i długości fali światła.

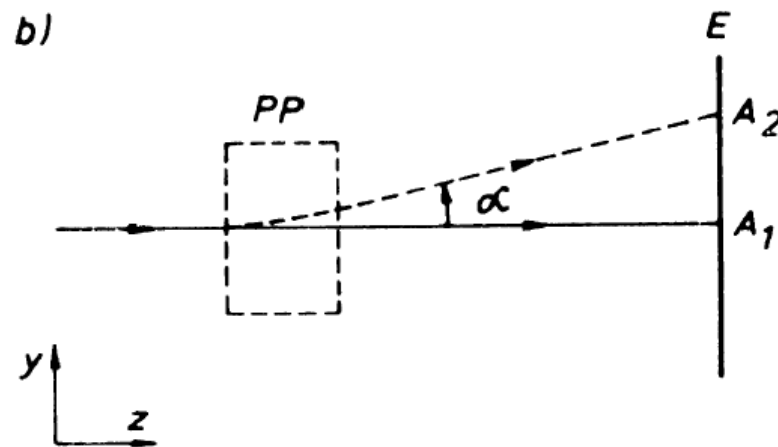
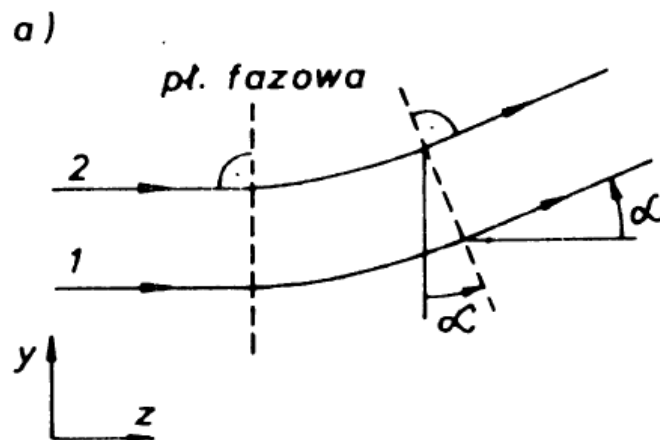
W przypadku, gdy współczynnik załamania światła  $n \cong 1$  (przypadek gazów) zależność (12.14) może zostać zapisana przy użyciu szeregu. Biorąc pod uwagę jedynie dwa pierwsze człony otrzymujemy zależność Gladstone–Dale's

$$\frac{n - 1}{\rho} = K(\lambda) \quad (12.15)$$

Gdzie  $K(\lambda) = 1.5R(\lambda)$  jest stałą Gladstone–Dale'a.



W wyniku przejścia promienia świetlnego przez badany ośrodek ulega on odchyleniu (refrakcja światła). Poniżej przedstawiono dwie techniki wykorzystujące zjawisko refrakcji, rysunek a) metoda smug, rysunek b) metoda cieni.



Zakładając małe kąty odchylenia otrzymujemy:

$$\alpha = \int_L \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (12.16)$$

Gdzie  $L$  – szerokość przestrzeni pomiarowej.

W metodzie smug wykorzystujemy się zmianę kąta  $\alpha \sim \frac{\partial \rho}{\partial y}$ , natomiast w metodzie cieni przesunięcie

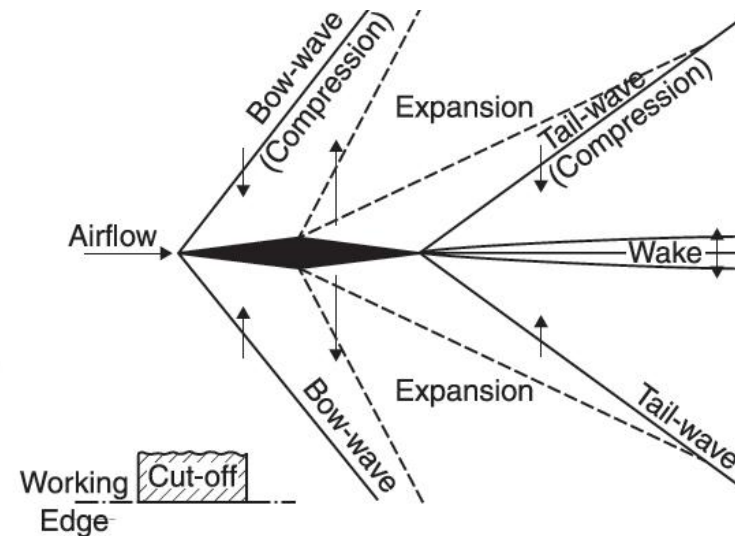
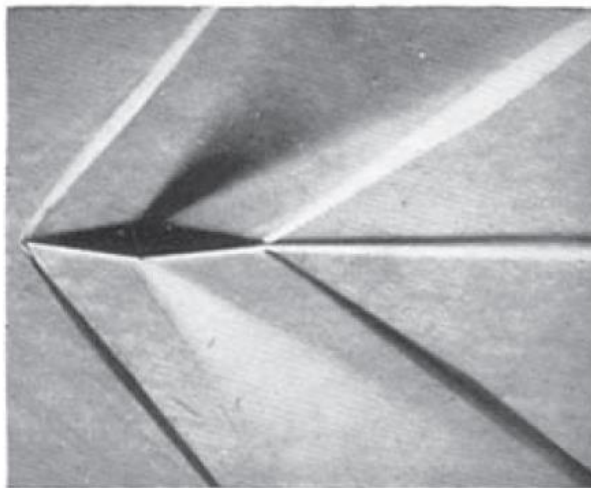
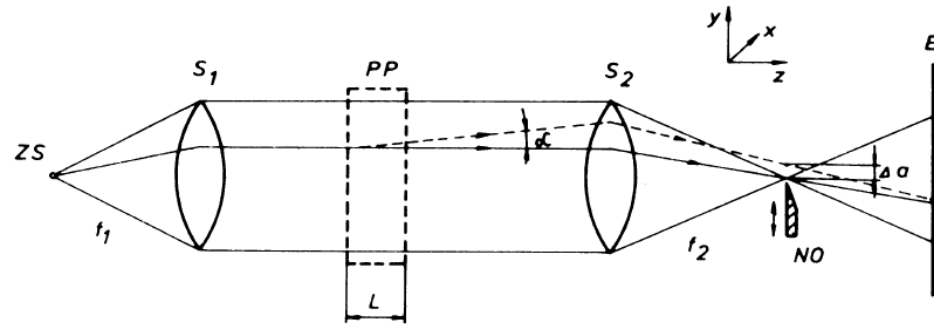
$$A_1 A_2 \sim \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2}.$$

## Wizualizacja przepływów: metoda smug

W przypadku metody smug kontrast w danym punkcie ekranu wyraża się następującą zależnością.

$$\frac{\Delta I}{\bar{I}} = \frac{I - \bar{I}}{\bar{I}} = \frac{f_2}{a_k n_a} \int_L \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (12.17)$$

Gdzie  $I$  – natężenie światła na ekranie,  $f_2$  – ogniskowa soczewki  $S_2$ ,  $a_k$  – wielkość przesłonięcia obrazu źródła światła,  $n_a$  – współczynnik załamania światła poza przestrzenią pomiarową.

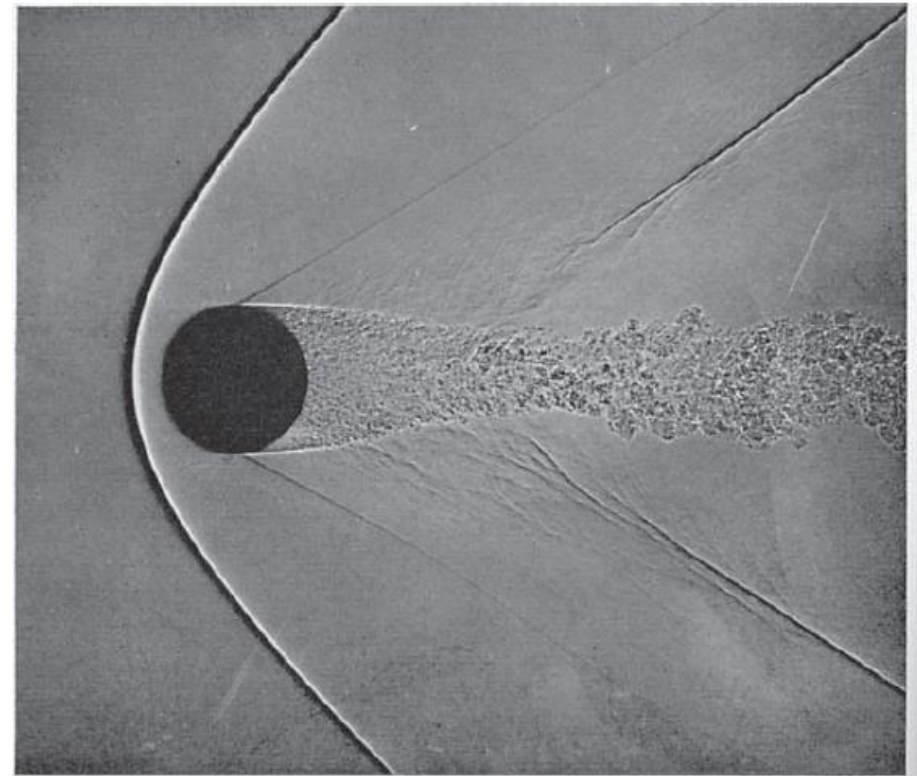
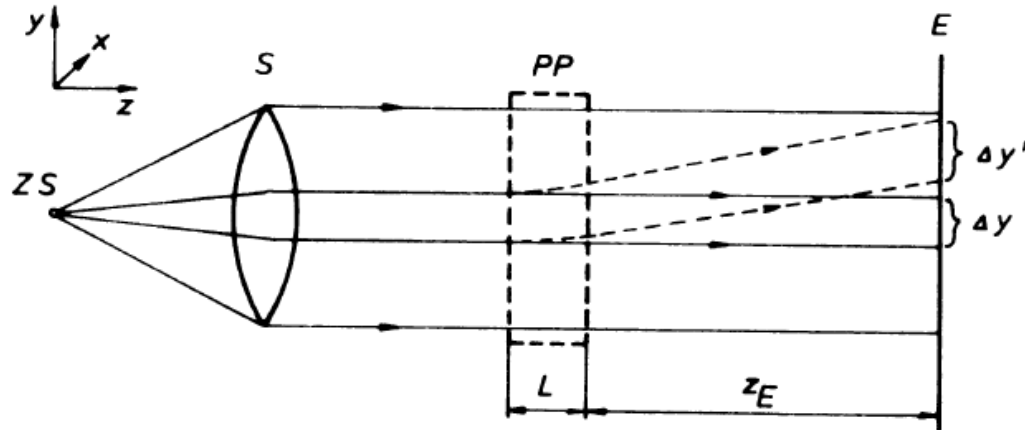


## Wizualizacja przepływów: metoda cieni

W metodzie cieni kontrast na ekranie zależy od liniowego przesunięcia odchylonych promieni światła, a w związku z tym od drugiej pochodnej współczynnika załamania światła.

$$\frac{\Delta I}{\bar{I}} = \frac{I - \bar{I}}{\bar{I}} = -\frac{z_E}{n_a} \int_L \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} dz \quad (12.18)$$

Gdzie  $I$  – natężenie światła na ekranie,  $z_E$  – odległość ekranu od przestrzeni pomiarowej,  $n_a$  – współczynnik załamania światła poza przestrzenią pomiarową.

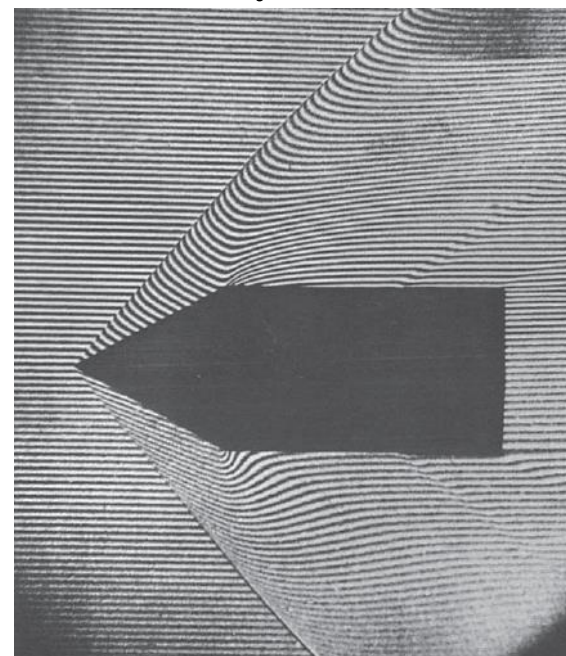
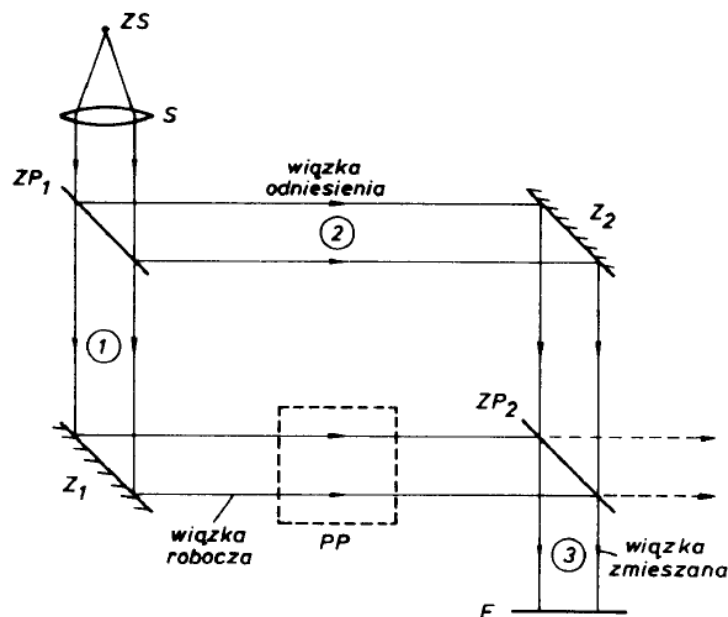


## Wizualizacja przepływów: Metoda interferencyjna

Zjawisko interferencji wykorzystywane w tego typu wizualizacji uzyskiwane jest poprzez nałożenie dwóch wiązek światła monochromatycznego, z których jedna przechodzi przez przestrzeń pomiarową, natomiast druga nie przechodzi. W ogólnym przypadku, gdy w przestrzeni pomiarowej występują gradienty gęstości występuje różnica dróg optycznych (różnica fazy) obu wiązek, co prowadzi do pojawiania się na ekranie tzw. prążków interferencyjnych.

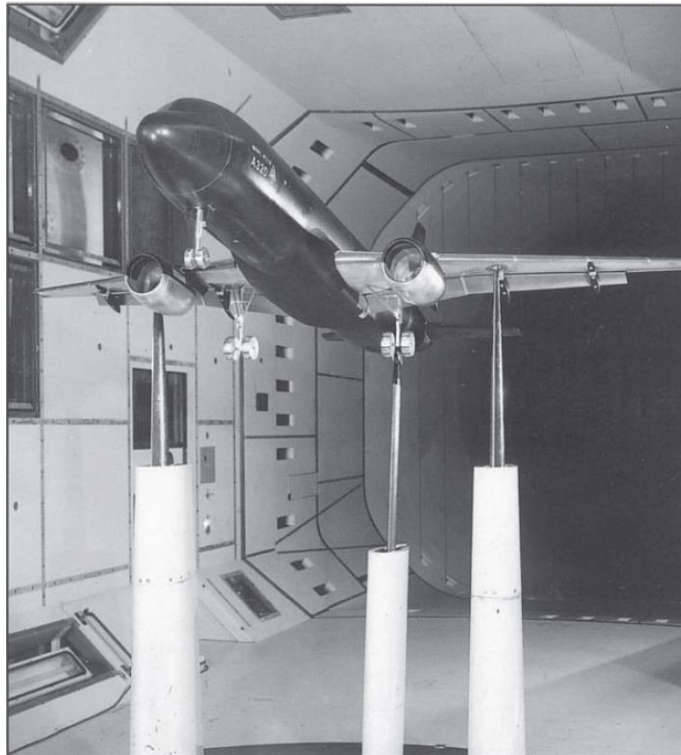
$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta DL}}{\lambda_0} = \frac{1}{\lambda_0} \int_L (n_r - n_{od}) dz \quad (12.19)$$

Gdzie  $\lambda_0$  – długość fali w świetlnej w próżni,  $n_r$  – wartość współczynnika załamania światła w wiązce roboczej,  $n_{od}$  – wartość współczynnika załamania światła w wiązce odniesienia.



## Pomiary wagowe sił aerodynamicznych

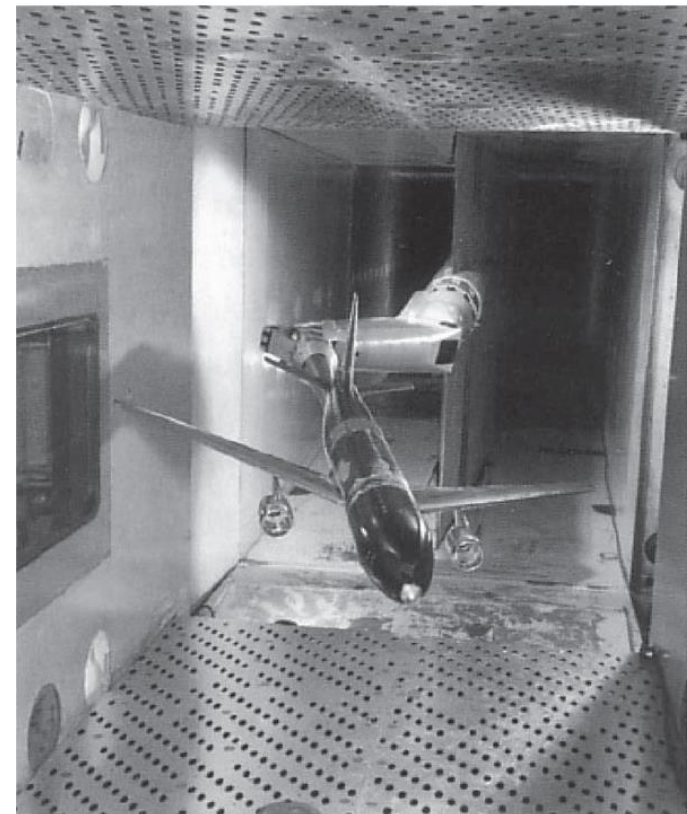
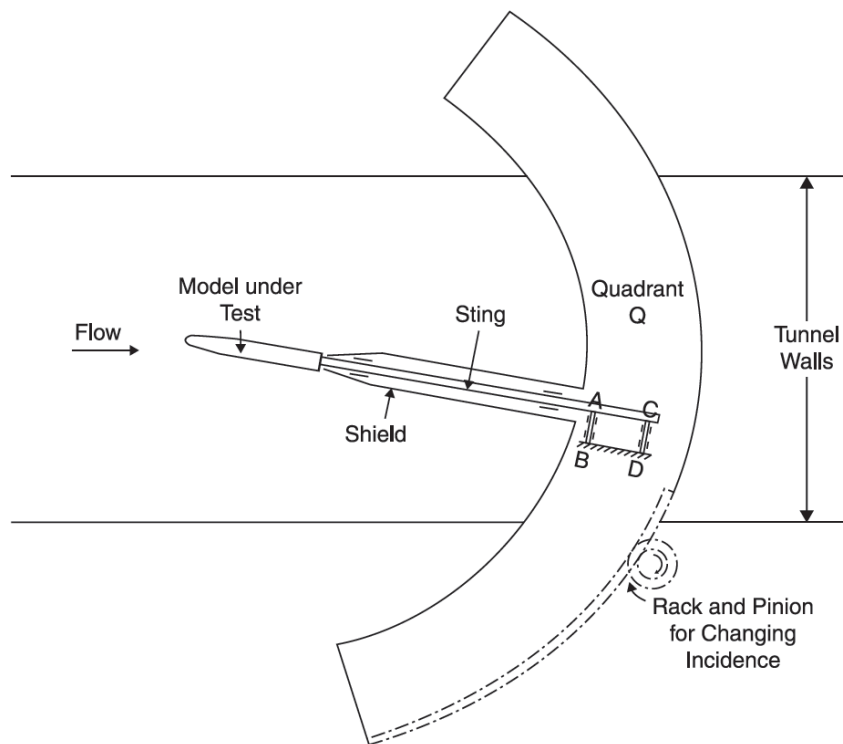
Pomiary wagowe są najczęściej realizowane instalując model do układu pomiarowego poprzez „jakiś” układ podtrzymujący. Poniżej został przedstawiony układ podtrzymujący składający się z trzech prętów z dodatkowymi owiewkami (w celu redukcji oporu). Mierząc siły reakcji w podporach prętów można wyznaczyć wszystkie siły i momenty aerodynamiczne. W przeszłości powszechnie wykorzystywane były układy podtrzymujące przy użyciu drutów, których dużą zaletą był brak przenoszenia momentów. Niemniej jednak tego typu układy wskutek interferencji aerodynamicznej cechują się około dziesięciokrotnie wyższym oporem w porównaniu z konfiguracją przedstawioną poniżej.





## Pomiary wagowe sił aerodynamicznych

W przypadku przepływów transonicznych i naddźwiękowych w układzie podtrzymującym przedstawionym na poprzednim slajdzie występowałyby słabsze bądź silniejsze zjawiska falowe, które oddziaływałyby bezpośrednio na opływ badanego modelu. W związku z tym stosowane są wagi w układzie tzw. żądła (ang. sting). Układy tego typu są również stosowane w opływach poddźwiękowych, ponieważ umożliwią badanie w szerszym zakresie kątów natarcia i ślizgu. Tego typu układ pozwala minimalizować wpływ układu podtrzymującego na badany model, niemniej jednak wpływa bezpośrednio na opór aerodynamiczny poprzez redukcję/wpływ na ślad aerodynamiczny.

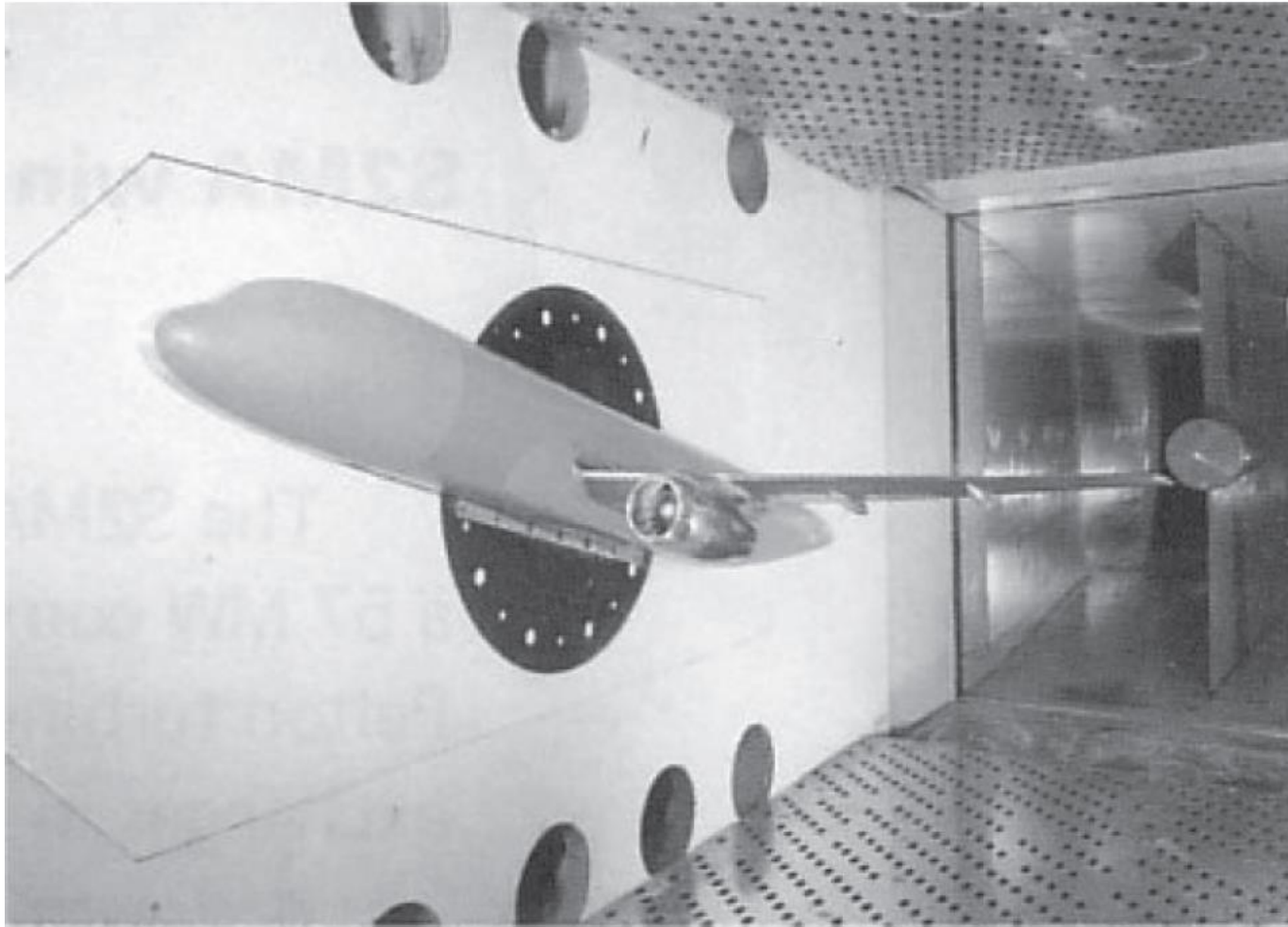


Source: ONERA S2MA

*Rysunki z Aerodynamic measurements by G.P. Russo*

## Pomiary wagowe sił aerodynamicznych

W celu podniesienia liczby Reynoldsa, realizowane są również pomiary poprzez mocowanie większego modelu, na przykład do bocznej ściany przestrzeni pomiarowej tunelu (jak pokazano poniżej dla tunelu transonicznego).



Source: ONERA S2MA