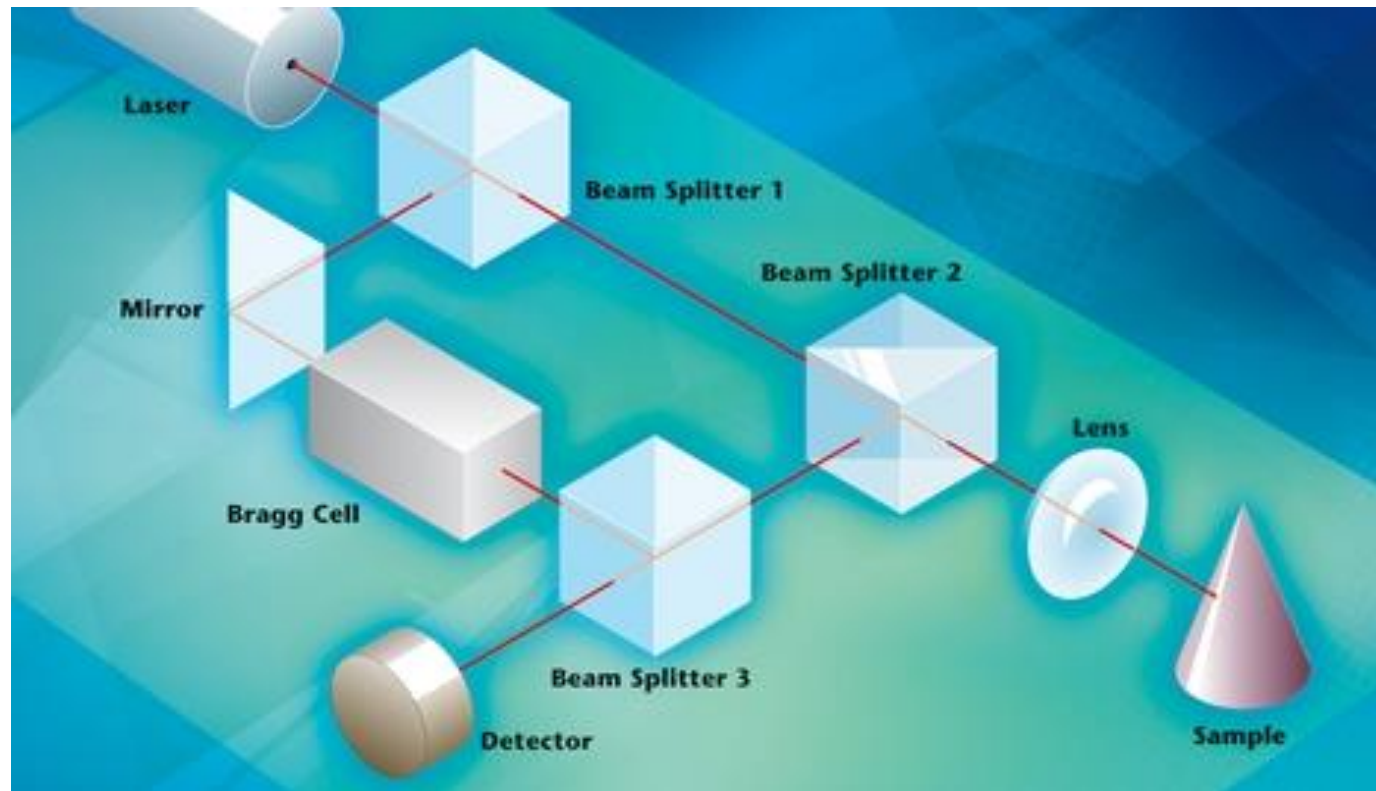




laboratoire de mécanique et d'acoustique



# Schéma de principe vibromètre



# Unités

Valeur	Unité	Correspond à	Valeur 0dB
Accélération a	$1 \text{ ms}^{-2}$ ( $\text{m/s}^2$ )	$= 0,102 \text{ g} = 39,4 \text{ in/s}^2$	$a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$
Vitesse v	$1 \text{ ms}^{-1}$ ( $\text{m/s}$ )	$= 3,6 \text{ km/h} = 39,4 \text{ in/s}$	$v_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$
Déplacement s	1 m	$= 1000 \text{ mm} = 39,4 \text{ in}$	$s_0 = 10^{-12} \text{ m}$

$$1\text{g} \equiv 9.80665 \text{ m/s}^2$$

# Mesure de quelle grandeur?

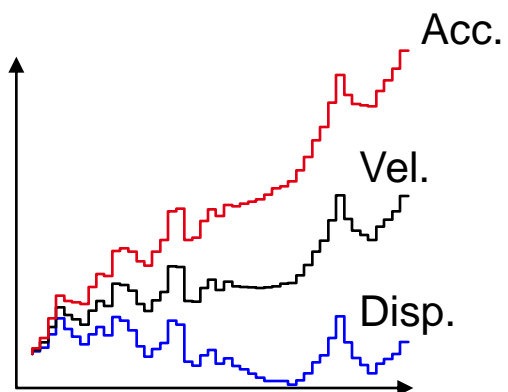
Pour la mesure de vibrations dans une large bande fréquentielle, il est crucial de choisir la bonne grandeur de mesure

## **Pourquoi ?**

- Chaque système de mesure a des gammes de mesures différentes
- La gamme doit être choisie de manière à pouvoir acquérir l'amplitude maximale pouvant survenir
- Pour une large variation des amplitudes dans le spectre, les amplitudes les plus petites sont éventuellement noyées dans le bruit de fond

# Mesure de quelle grandeur?

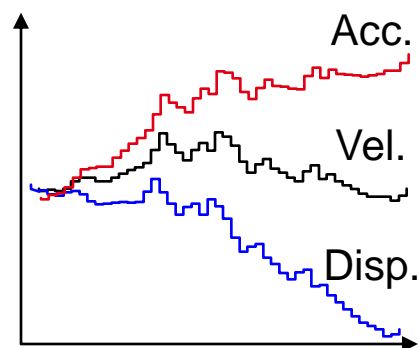
**Mesure  
A**



Mesure du déplacement

Avec un vibromètre  
laser Doppler  
avec décodeur  
de déplacement

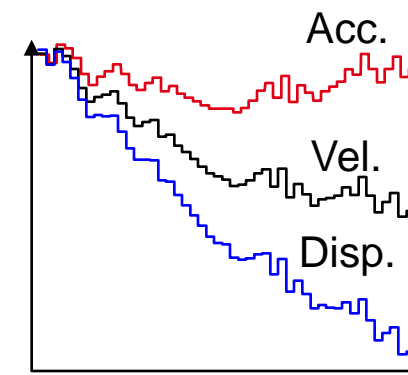
**Mesure  
B**



Mesure de la vitesse

Avec un vibromètre  
laser Doppler  
avec décodeur  
de vitesse

**Mesure  
C**



Mesure de l'accélération

# Mesure de quelle grandeur?

La mesure de déplacement est particulièrement adaptée pour les basses fréquences.

La mesure d'accélération est particulièrement adaptée pour les hautes fréquences.

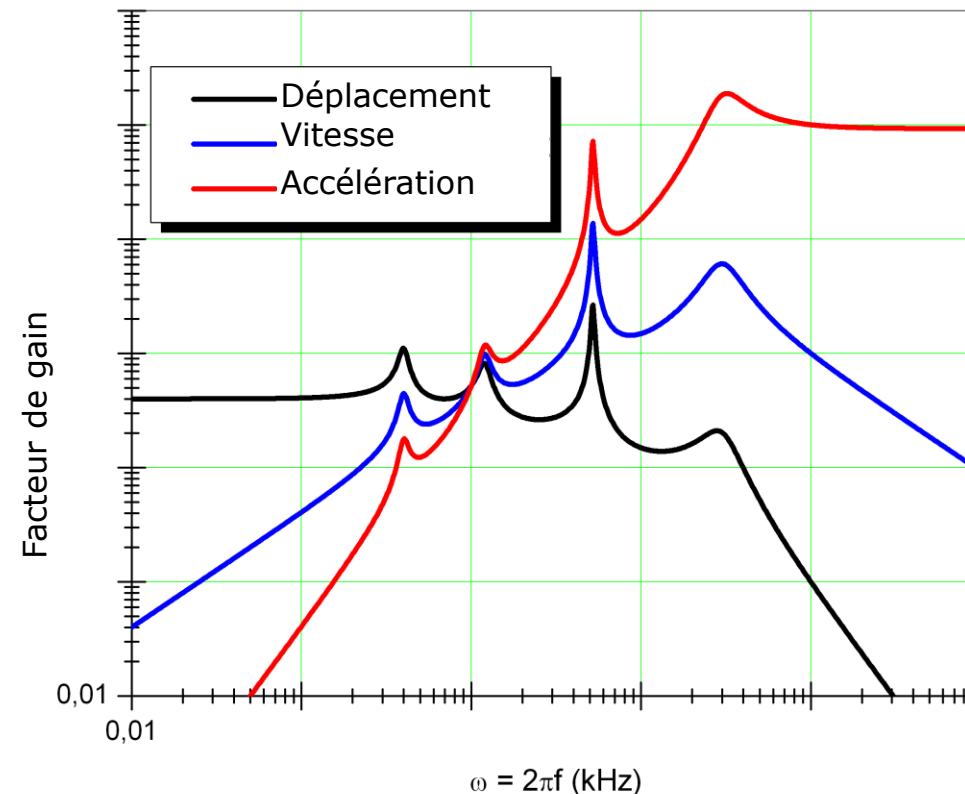
## **Important:**

Conversion des unités ne résout pas ce problème

# Mesure de quelle grandeur?

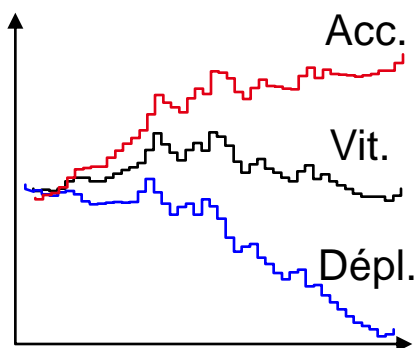
L'expérience montre que la mesure de vitesse révèle au mieux la gravité d'une vibration.

Beaucoup de machines montrent un spectre relativement plat en vitesse



# Mesure de vitesse ou de déplacement?

## Mesure B



Mesure de vitesse

Avec un vibromètre  
laser Doppler  
avec décodeur  
de vitesse

Si le vibromètre contient des décodeurs vitesse et déplacement, il peut fournir les deux grandeurs indépendamment. Souvent, la mesure de vitesse est plus facile. Pour des vibrations harmoniques,  $v$  et  $s$  sont liés:

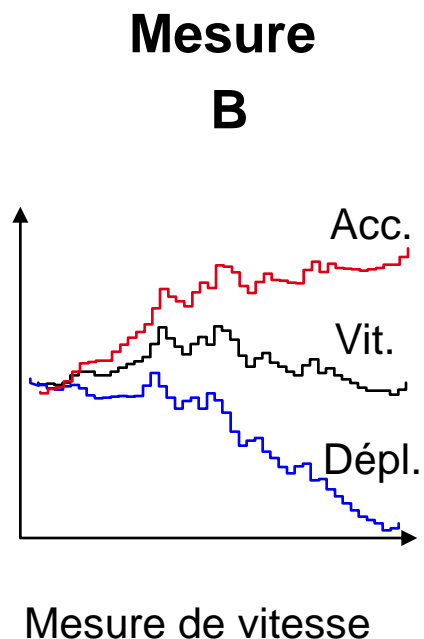
$$v = \frac{ds}{dt} = S\omega \cos \omega t$$

$$\hat{v} = S\omega = S2\pi f$$

Les mouvements transitoires sont mieux visualisés avec le signal de déplacement



# Mesure de vitesse ou de déplacement?

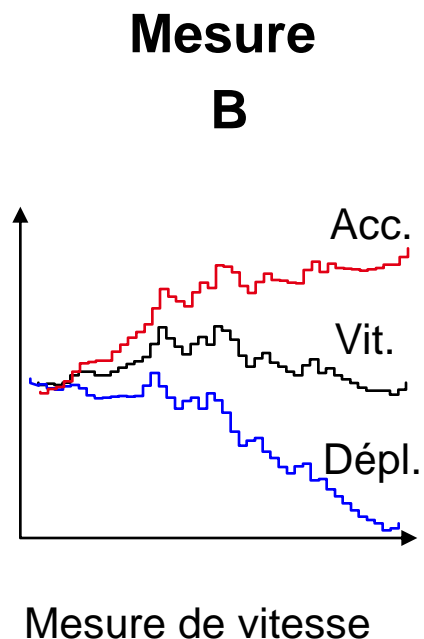


Pour les très hautes fréquences les amplitudes en déplacement sont très petites et ne peuvent plus être résolues avec un décodeur de déplacement.

La mesure de vitesse avec conversion en déplacement améliore la résolution à haute fréquence.

Avec un vibromètre  
laser Doppler  
avec décodeur  
de vitesse

# Mesure de vitesse ou de déplacement?



Avec un vibromètre  
laser Doppler  
avec décodeur  
de vitesse

Souvent les vibrations ambiantes se superposent aux vibrations à mesurer. En général, ces perturbations sont à basses fréquences mais avec de très grandes amplitudes. Afin d'éviter une saturation, il faut choisir la gamme en tenant compte de l'amplitude de ces vibrations perturbantes.

- Chaque vibration peut être décrite par un signal de déplacement, de vitesse ou d'accélération.
- Il est important de choisir pour chaque application la grandeur et la gamme les plus appropriées.
- En pratique, la mesure de vitesse est dans la plus part des applications la plus appropriée.


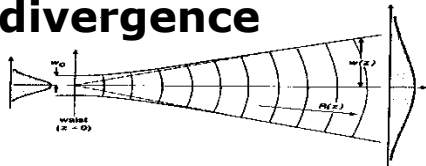


***L*** ight  
***A*** mplified by  
***S*** timulated  
***E*** mission of  
***R*** adiation

# Pourquoi utiliser des Lasers?

- Vibromètres laser exploitent un signal d'interférence optique
- Interférence entre deux parties d'un même faisceau, dont une a interagité avec l'objet de mesure
- Interférence doit être visible sur une certaine distance
- Laser est l'outil idéal

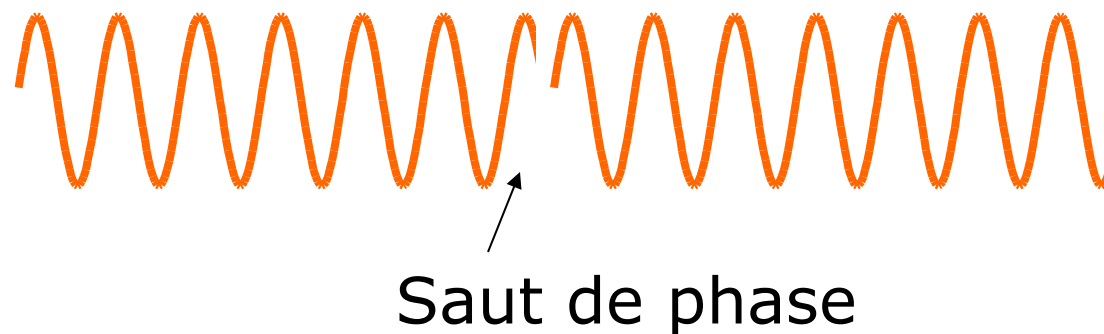
# Propriétés du rayonnement Laser

	Laser	Lampe Incandescente
<b>Monochromatique</b>	Une couleur Une longueur d'onde	Spectre étendu 
<b>Directionnel</b>	Faible divergence 	Pas de direction préférée
<b>Cohérent</b>	Relation de phase temporellement et spatialement constante	Sauts de phase arbitraires

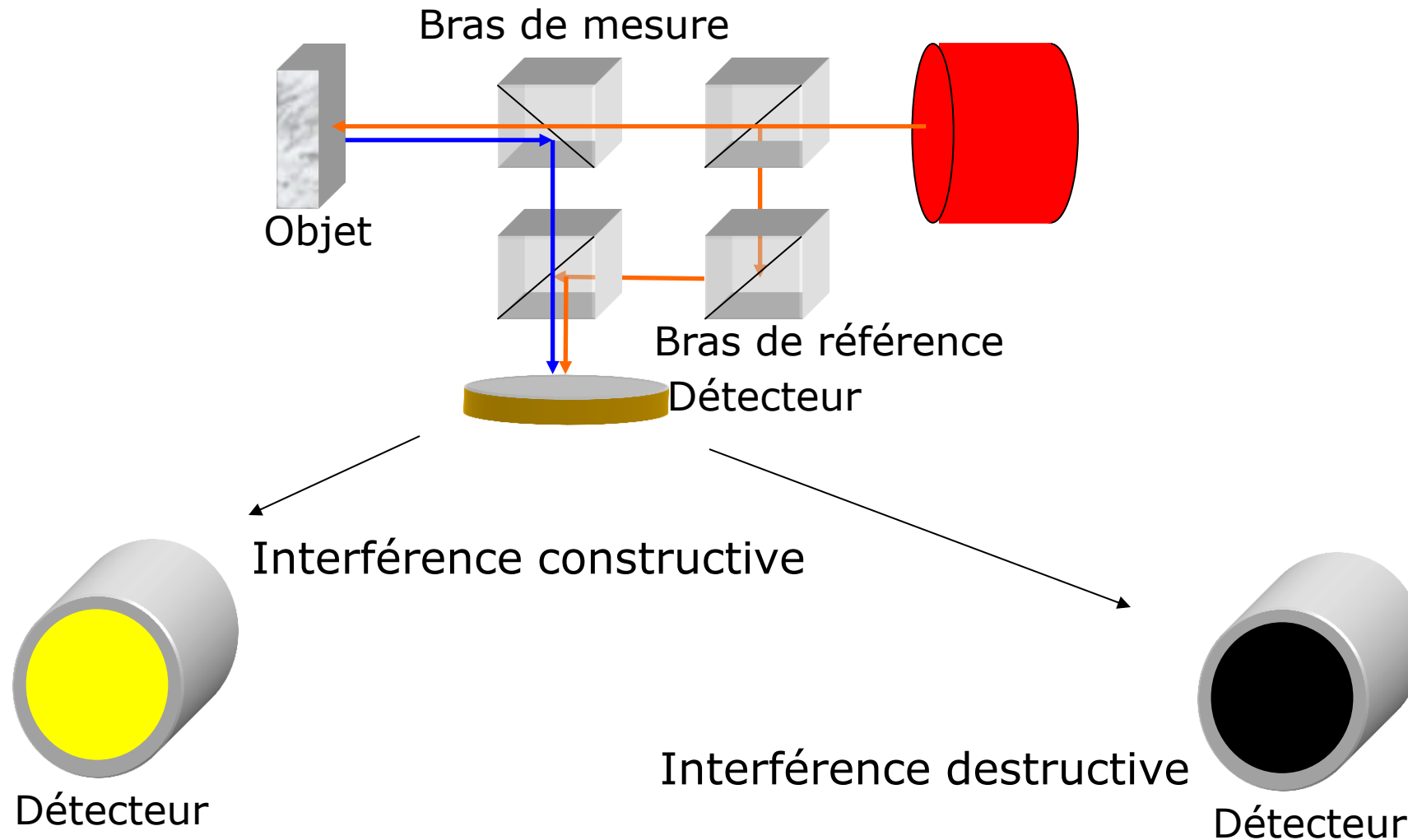
La combinaison de ces propriétés en font l'outil idéal pour la vibrométrie

# Cohérence

- Le rayonnement Laser possède une grande cohérence (temporelle):
- La phase de l'onde n'a que peu de discontinuités

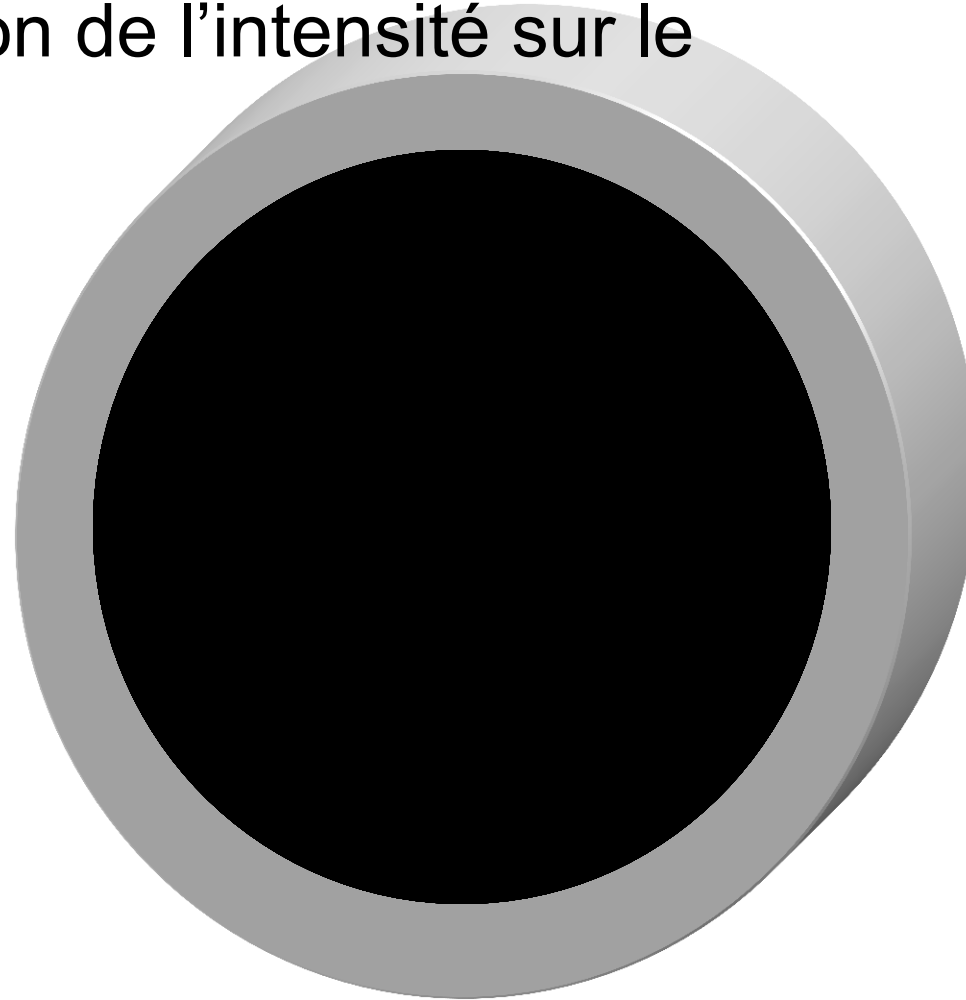
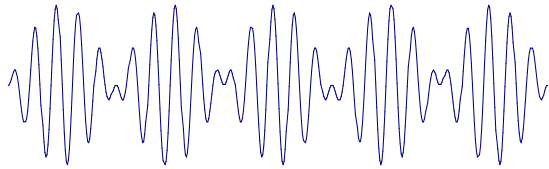


# Interféromètre Mach-Zehnder





# Objet en mouvement: modulation de l'intensité sur le détecteur



# Motivation

- L.D.V. signifie Laser Doppler Vibrometer
- Les vibromètres Laser utilisent l'effet Doppler

# L'effet Doppler

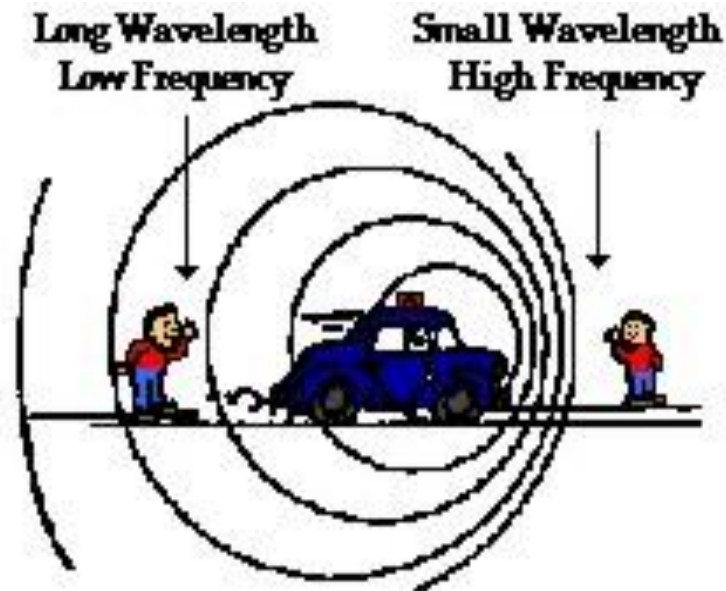
- Décalage, noté par un observateur, de la fréquence d'une onde lorsqu'il y a un mouvement relatif entre la source et l'observateur



# Un exemple d'effet Doppler



- Le véhicule est à l'arrêt
  - Le son du klaxon est constant
- Le véhicule se rapproche de l'observateur
  - Le son devient plus aigu
- Le véhicule s'éloigne de l'observateur
  - Le son devient plus grave

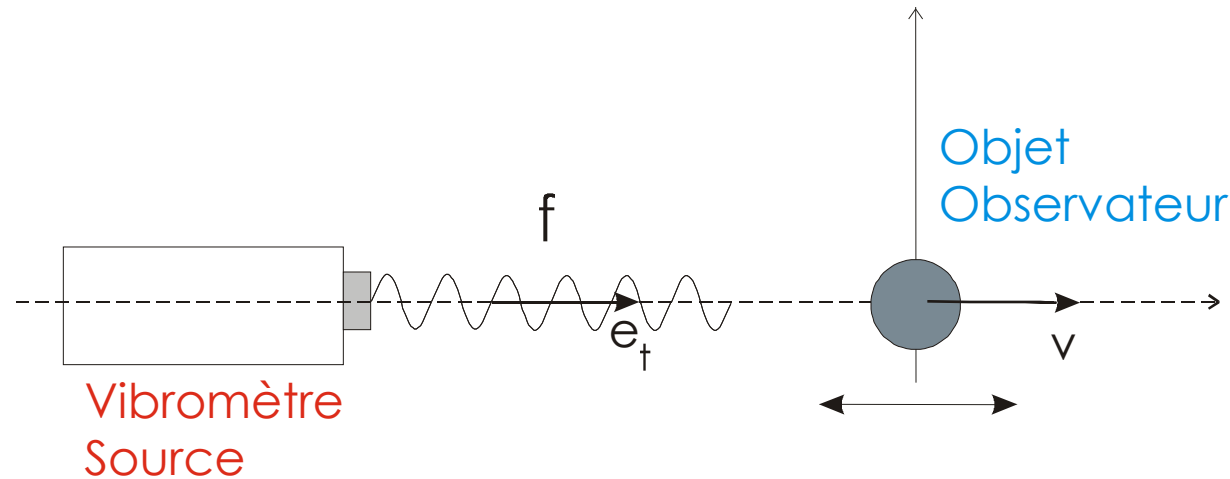


# Expression du décalage en fréquence

- Source en mouvement & observateur au repos
  - Les ondes sont comprimées devant la source
  - Les ondes sont étirées après la source
  - Changement de la longueur d'onde
  - La vitesse du train d'onde est inchangée

# Vibromètre laser

- L'objet s'éloigne du vibromètre à la vitesse  $v$
- Vibromètre = source de fréquence  $f$
- L'objet agit comme un observateur et reçoit la fréquence  $f'$

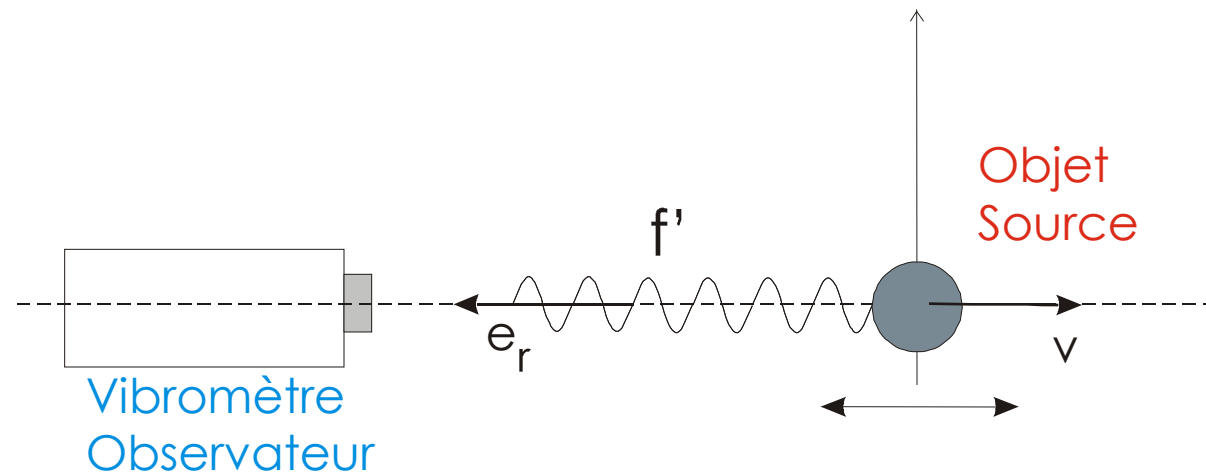


$$f' = \frac{(c - \vec{v} \cdot \vec{e}_t)}{c} f$$

$\vec{e}_t$  Vecteur unitaire

# Vibromètre laser

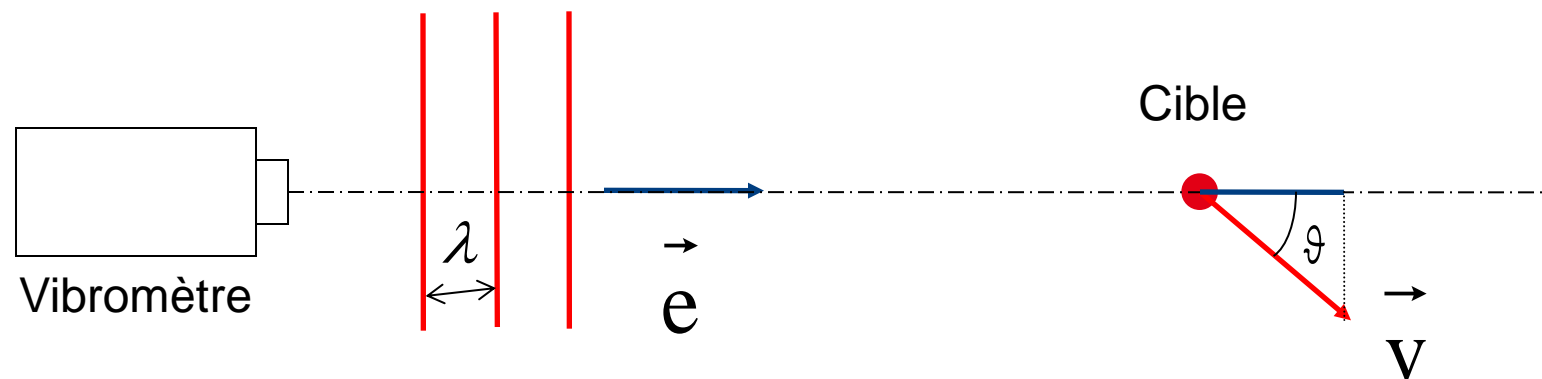
- L'onde de fréquence  $f'$  est réfléchiée par l'objet vers le vibromètre.
- L'objet agit comme une source en mouvement
- Le vibromètre reçoit la fréquence  $f''$



$$f'' = \frac{c}{c - \vec{v} \cdot \vec{e}_r} f' \quad \vec{e}_r \text{ Vecteur unitaire}$$

# Vibromètre Laser

- Mesure du vecteur de vitesse de vibration parallèle au faisceau laser
- Quand il y a un angle entre la direction de vibration et le faisceau laser: erreur de l'amplitude mesurée!



$$\Delta f = \frac{2\vec{v} \cdot \vec{e}}{\lambda} = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta$$

$\theta = 2^\circ \Rightarrow 0.06\%$  Erreur d'amplitude

$\theta = 8^\circ \Rightarrow 1\%$  Erreur d'amplitude



# Conclusion

- Effet Doppler: Changement de la fréquence d'ondes lorsqu'il y a un mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur.
- Mesure de la vitesse sans contact.
- Décalage en fréquence dépend de la direction.

## 2 façons d'interpréter : 1) déplacement

### **1: Déplacement mène à des transitions claire-sombre, des « franges »**

D'un maximum de l'intensité au prochain:  
Déplacement de longueur d'onde /2

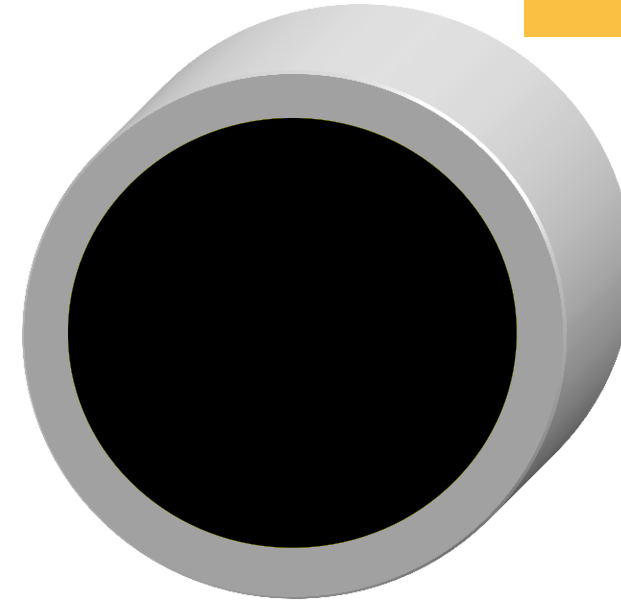
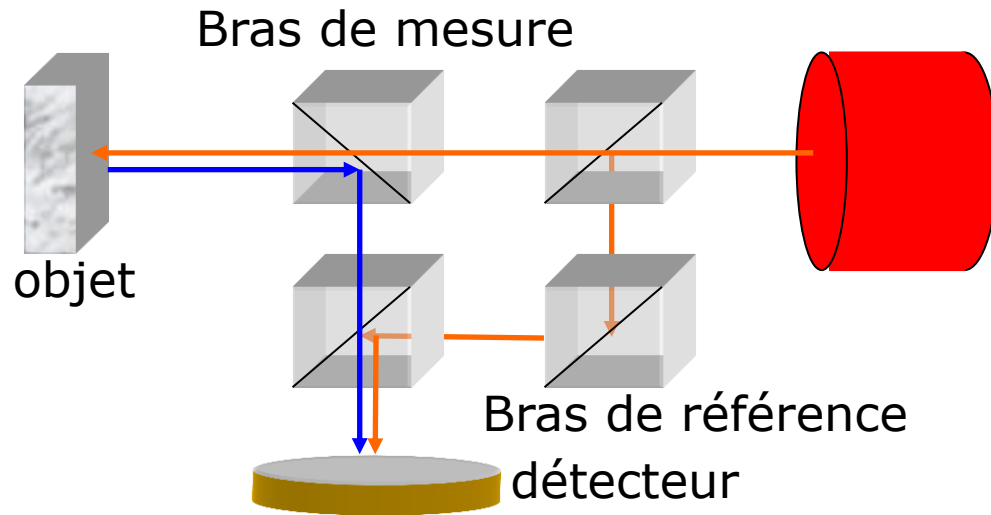
$$\Delta s = \frac{\lambda}{2} * N$$

$\Delta s$ : déplacement,

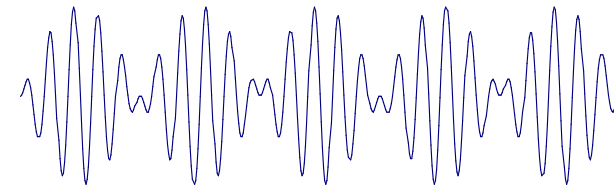
$\lambda$ : longueur d'onde Laser

$N$ : nombre de franges

## 2 façons d'interpréter : 2) Doppler shift



Interférence des faisceaux mesure et référence:  
Battement, modulation d'intensité avec la fréquence Doppler



# Déplacement et vitesse

2 façons de mesurer la même vibration:

**1. Compter les franges claires-sombres sur le détecteur:**

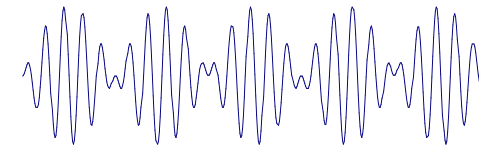
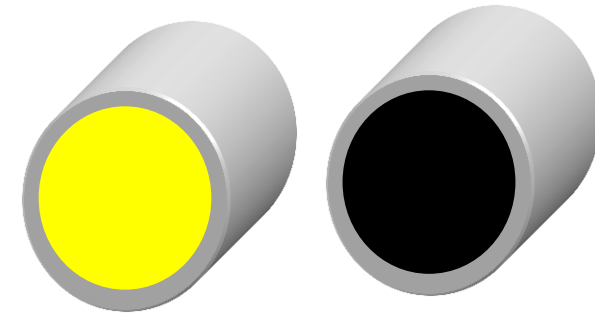
**Déplacement**

(liées à la phase du signal Doppler)

**2. Déterminer la fréquence de la modulation d'intensité**

**Vitesse**

(liée à la fréquence du signal Doppler)



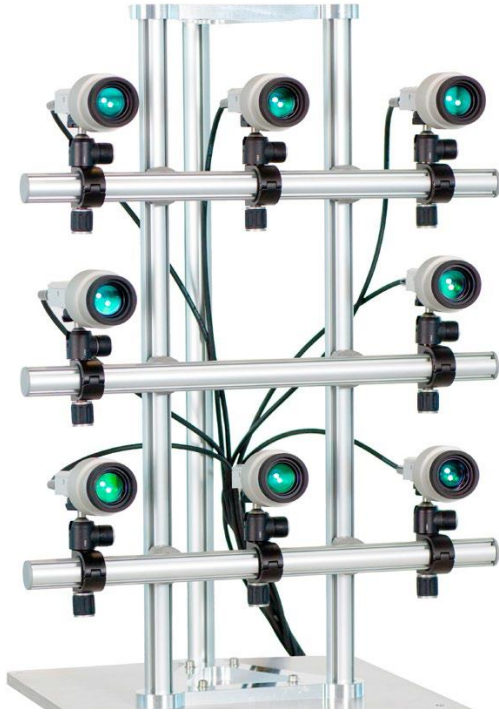
# Résumé

- Vibromètres utilisent des interféromètres Mach-Zehnder
- Mouvement crée des transitions claire-sombres sur le détecteur
- 2 possibilités de l'exploitation:
  - Compter les franges: déplacement
  - Mesure de la fréquence: vitesse



PDV-100 Singlepoint Vibrometer





# MPV-800 Multipoint Vibrometer

Synchronous Optical Vibrometry



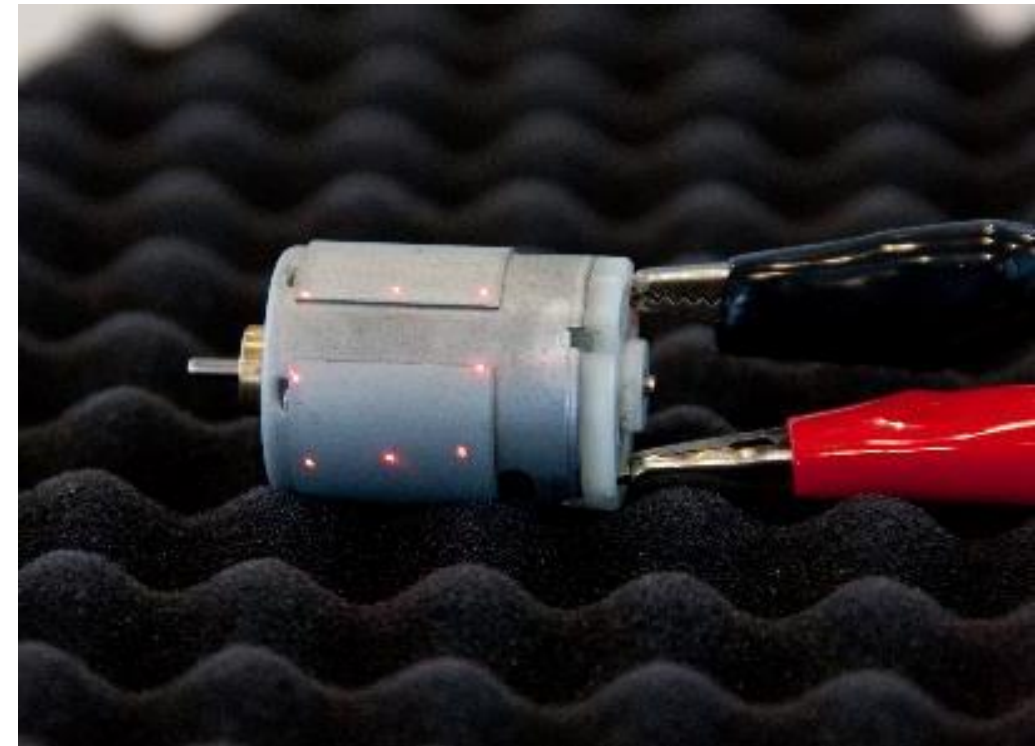
# Multipoint Vibrometry

“The laser-based MPV-800 Multipoint Vibrometer enables synchronous measurement with multiple channels and reconstructs operational deflection shapes resolved in time and frequency.”



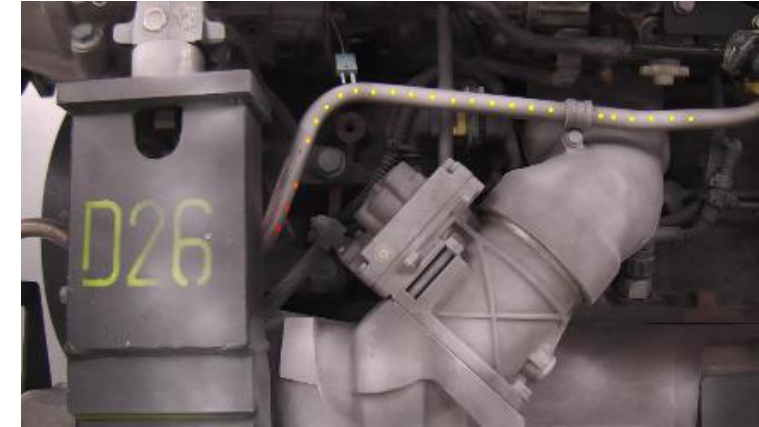
# What is Multipoint Vibrometry?

- MPV provides non-contact vibration measurement
  - for non-stationary tasks
  - for time variant Operational Deflection Shapes (ODS)
  - for transient events
  - where tactile methods crucially affect the result
  - where environmental conditions are demanding
  - capturing non-repeatable events from all perspectives
- MPV avoids surface preparation and sensor gluing

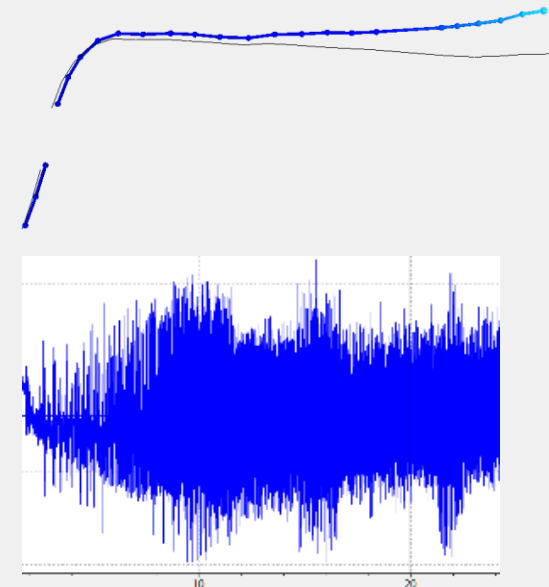


# Applications

- Full-field evaluation of settling & decay events
- Non-stationary processes (e.g. fluid machines, valves)
- Environmental tests with variable excitation profiles or temperatures
- Run-up of electric drives and combustion engines
- Transient events (e.g. shock, switching, door-slam)
- Measurements on hot and sensitive surfaces
- Lightweight components, where reactionless sensing is required
- Biomedical applications (on human body)



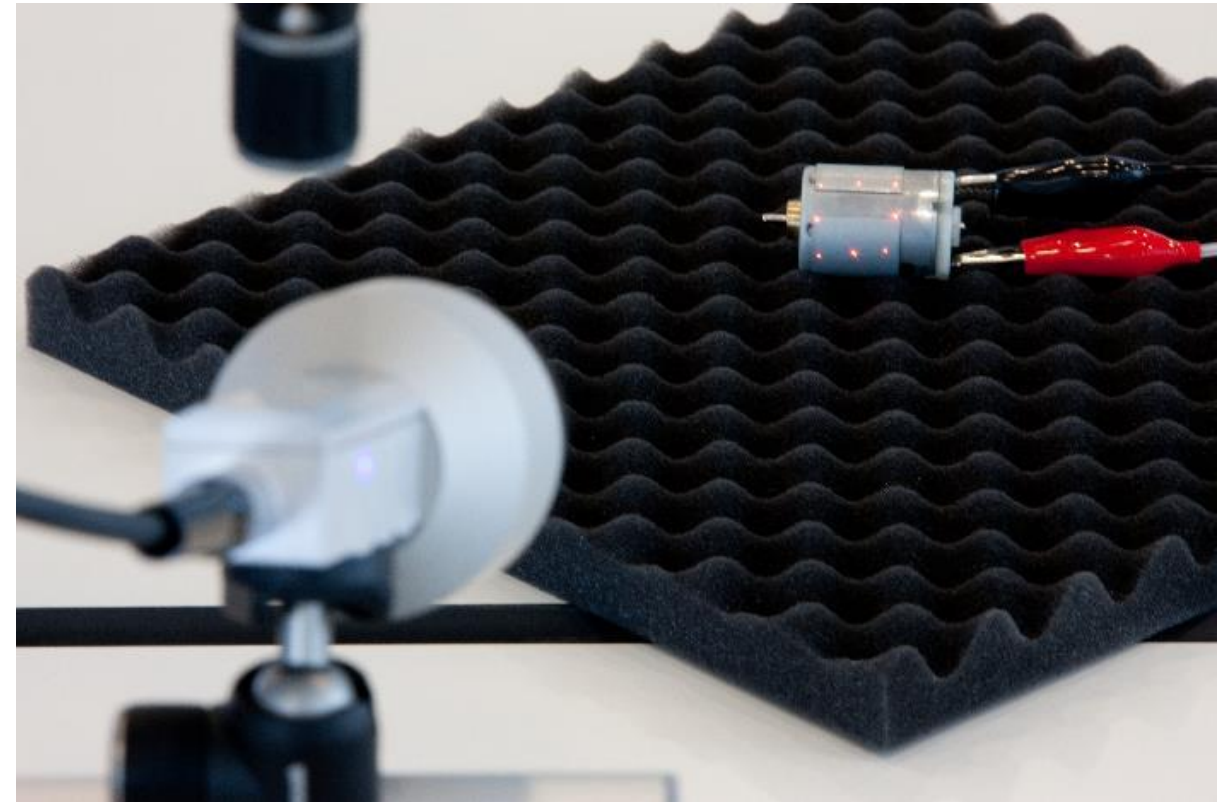
*Diesel engine tubing*



# MPV-800 Multipoint Vibrometer

## Synchronous optical measurement

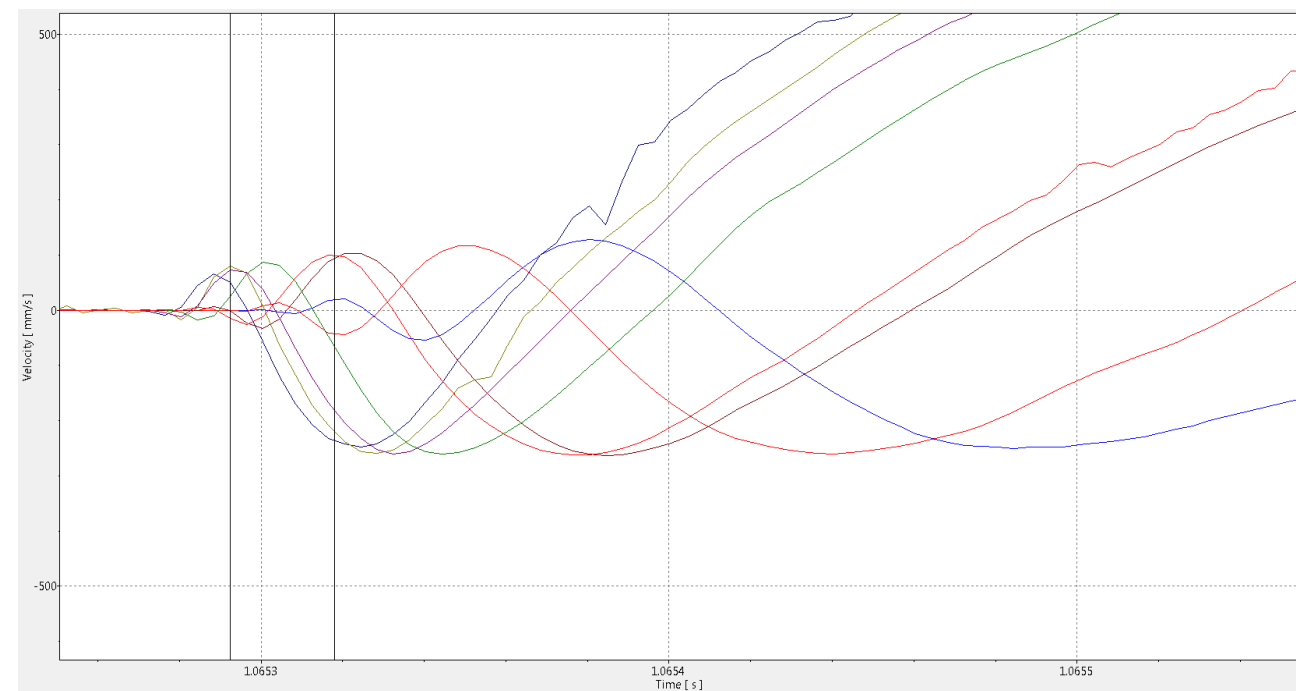
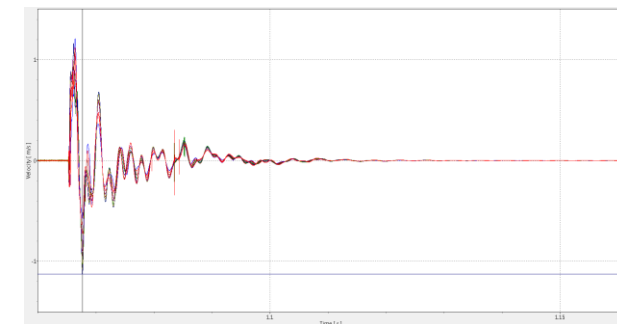
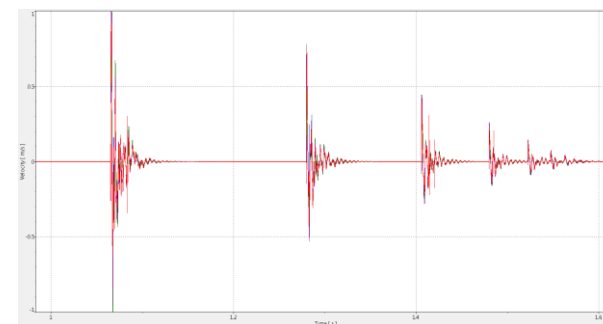
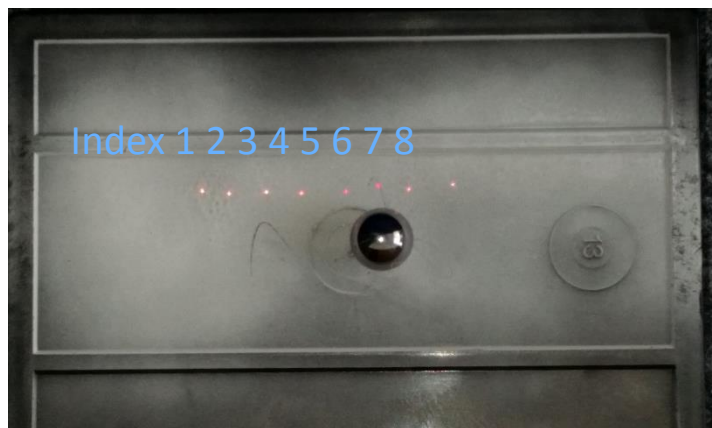
- full-field operational deflection shapes
- User-configurable array of fiber coupled sensors allows for
  - flexible non-contact measurements
  - single direction or
  - around a complex shaped object





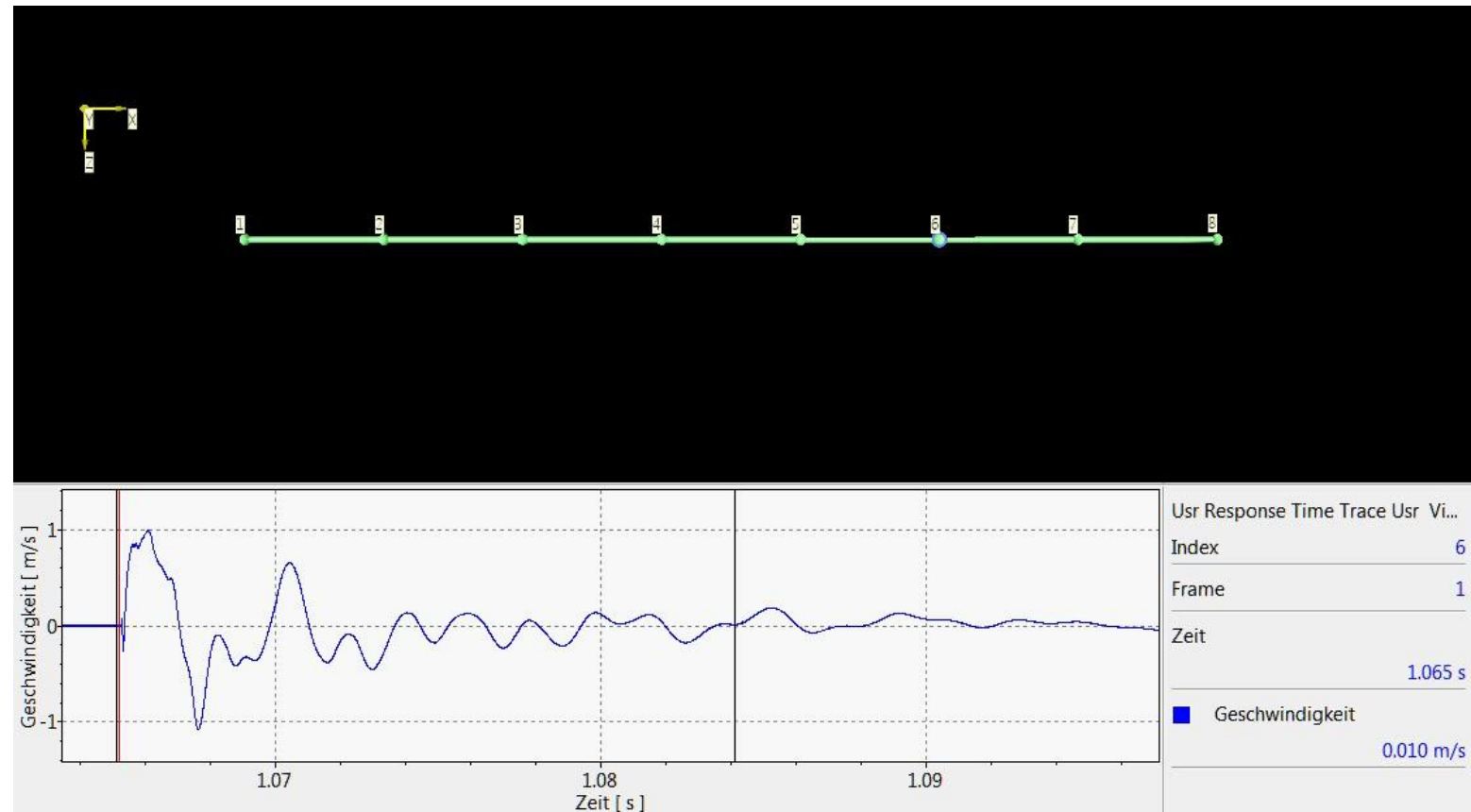
# Results Elastic Impact

- First impact and subsequent bouncing
- #6 first response:  
Speed of impact wave  $\sim 2100$  m/s  
(difference of arrival time)



# Results Elastic Impact

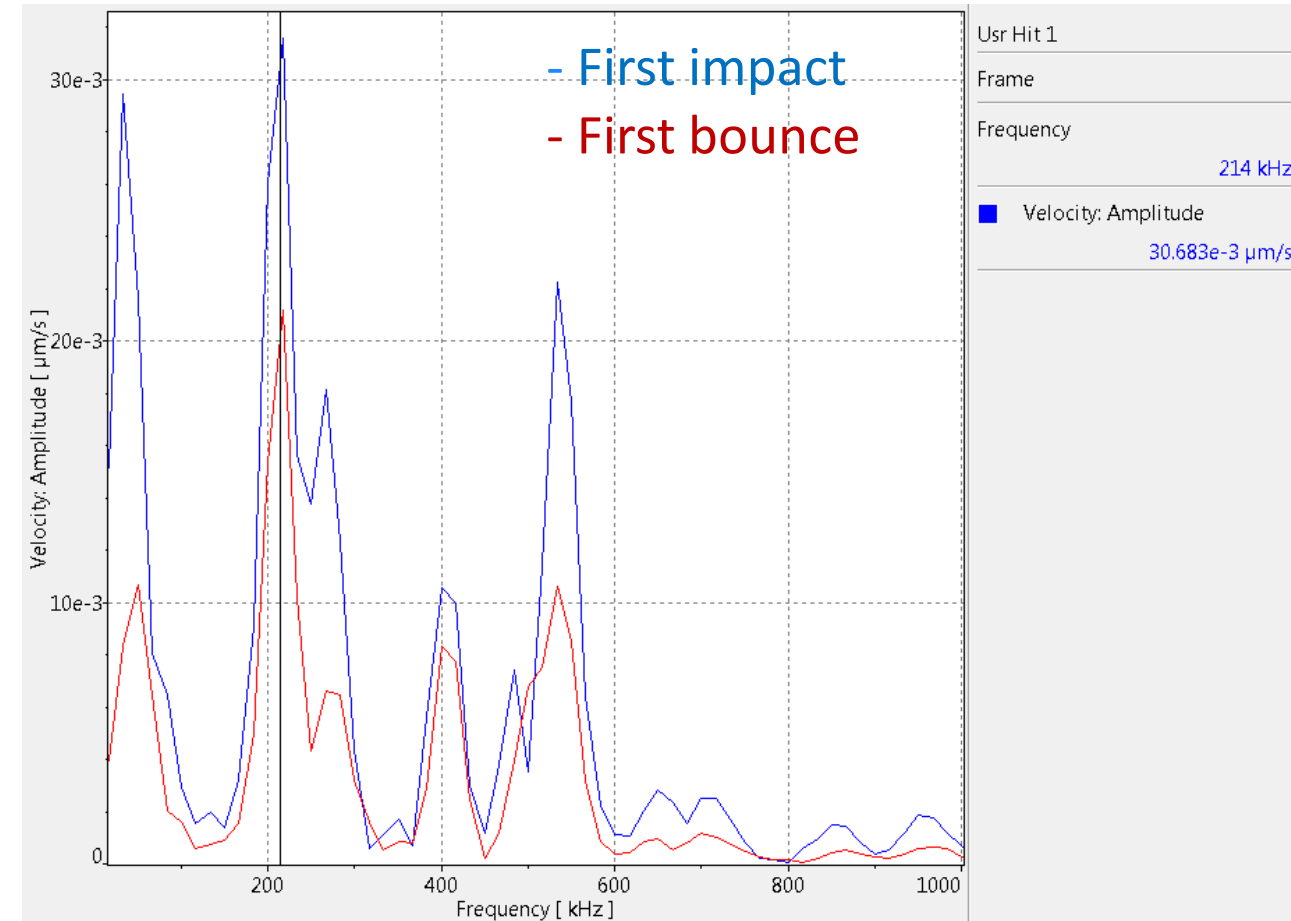
- First impact



# Results Elastic Impact

Assumption for elastic impact:

*Eigen frequencies don't change between first impact and (first) bounces.*



# Results Elastic Impact

Deflection shape line profile at

- 214 Hz
- 959 Hz

derived from impact test

