

Okan Üniversitesi MYO

MUTK216

TAHRİBATSIZ MALZEME MUAYENESİ

Ders Yürütücüsü:

Öğr. Gör. Eren Kayaoğlu

eren.kayaoglu@okan.edu.tr

DERS **12**

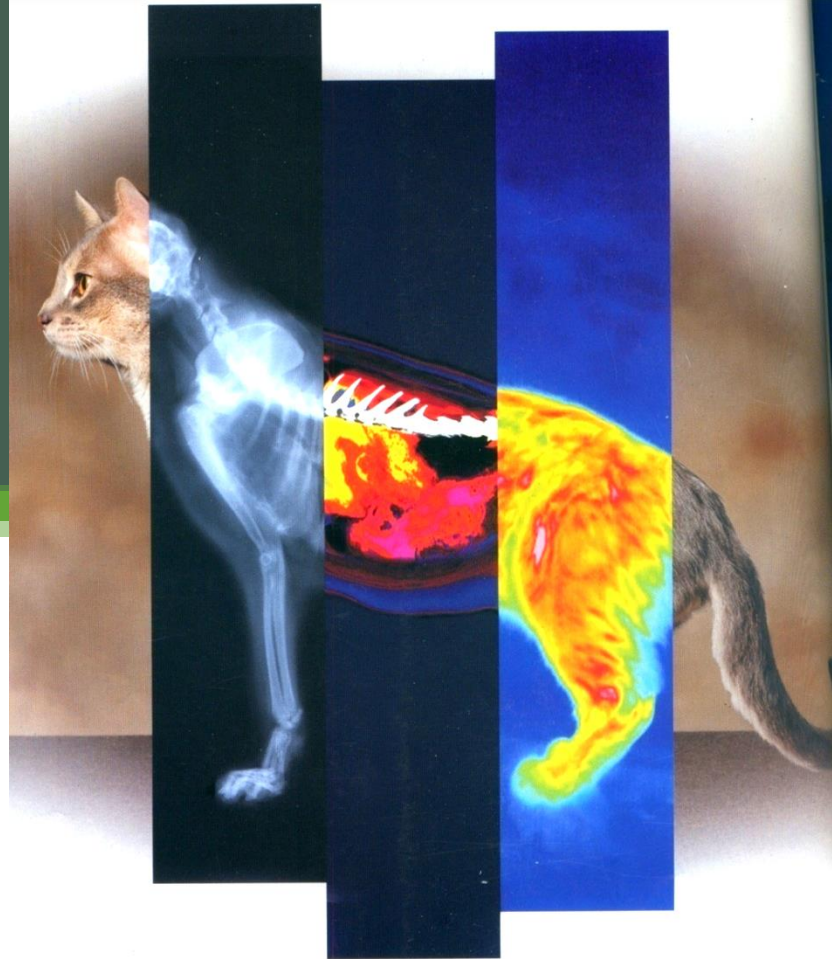
MUTK216 – Tahribatsız Malzeme Muayenesi

Ders Sunumları (.pdf) + Kaynaklar

<http://okanuni.eren.xyz>

Web adresinden indirebilirsiniz.

MUTK216 – Tahribatsız Malzeme Muayenesi



Zarar vermeden incele veya ölç!

MUTK216 – Tahribatsız Malzeme Muayenesi

DİĞER TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

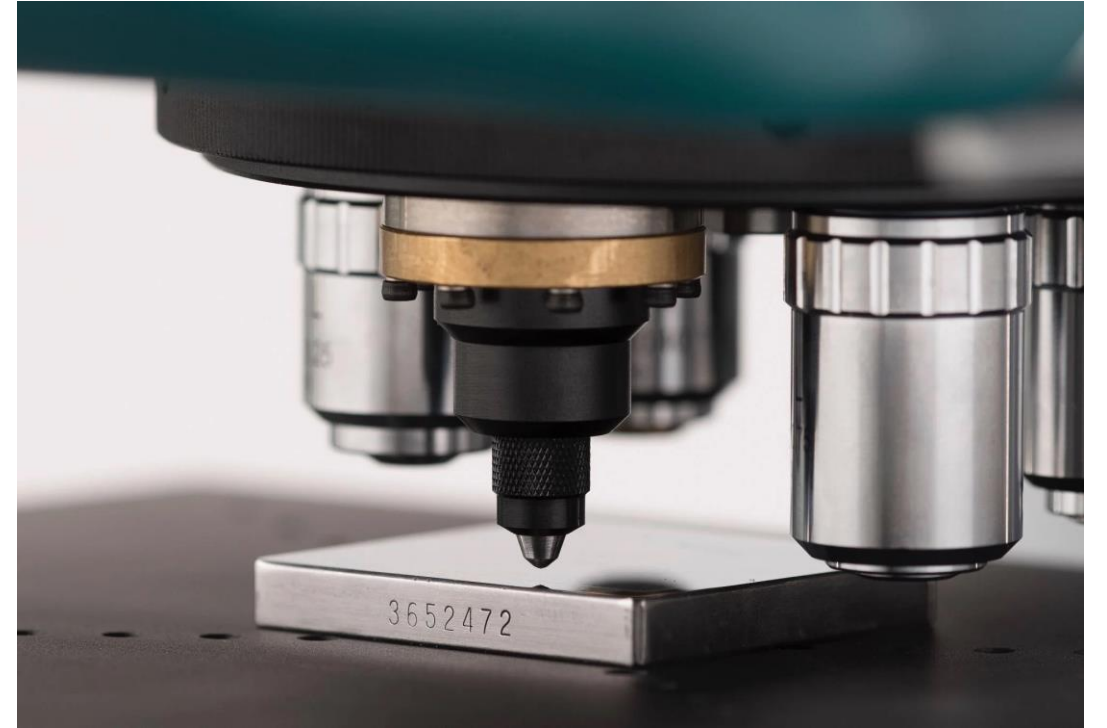
- **Sertlik Testleri**
- **Mekanik Dalga (Ses, Titreşim, Darbe) Esaslı Yöntemler**
- **Elektriksel Yöntemler**
- **Elektromanyetik Dalga (Optik, Lazer, Işık) Esaslı Yöntemler**

SERTLİK TESTLERİ

Hardness Testing

Sertlik Testleri

- Sertlik Testi (Makro ve Mikro test), malzemelerin sertliğini ölçmek için kullanılan bir yöntemdir.
- Sertlik, bir malzemenin kalıcı girintiye (çentik) karşı direncini ifade eder.



Sertlik Testleri

- Sertlik testi, malzemelerin değerlendirilmesi, üretim süreçlerinin kalite kontrolü ve araştırma ve geliştirme çalışmaları için yararlı bir araçtır.
- Bir malzemenin mukavemet, süneklik ve aşınma direnci gibi özelliklerinin bir göstergesidir.



Sertlik Testleri

- Mikro sertlik testi için test yükleri, 1 kgf'den azdır ve çok küçük girintilere neden olur. Mikro sertlik, sertlik testini makro girinti testleri için çok ince veya çok küçük malzemelere kadar genişletir; yük aralığı spesifik olarak 1 gf –1000 gf'dir.
- Mikro sertlik testi, oluşturulan girintiyi doğru bir şekilde ölçmek için Mikroskop büyütmesi gerektirir.
- Vickers ve Knoop sertlik testi, ASTM E 92 (1 kgf ila 120 kgf arası girinti kuvvetleri için) ve ASTM E 384 (1 kgf'nin altındaki girinti kuvvetleri için) standartları tarafından tanımlanırken, ASTM E 10 Brinell Sertlik Testi standardıdır.

Sertlik Testleri (*Hardness Testing*)

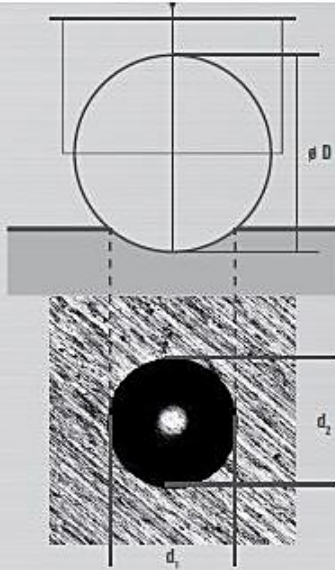
En yaygın dört sertlik ölçüğü şunlardır:

- Brinell
- Vickers
- Knoop
- Rockwell

$$HBW = \text{Constant} \times \frac{\text{Test load } F}{\text{Surface of the indentation}}$$

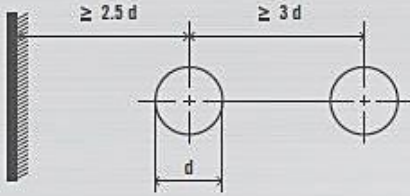
$$= 0.102 \times \frac{2F}{\pi D^2 (1 - \sqrt{1 - d^2/D^2})}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ (mean indentation-}\phi\text{)}$$



BRINNEL

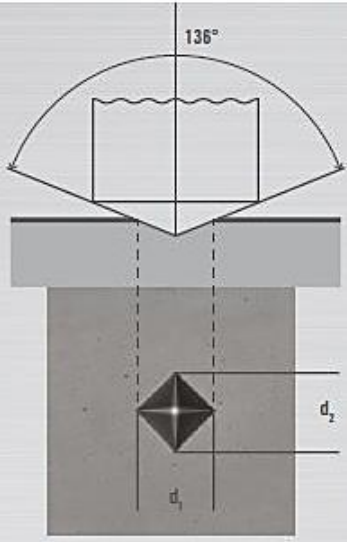
INDENTATION- AND EDGE DISTANCE
In order that the results will not be affected, the following distances have to be kept:



$$HV = \text{Constant} \times \frac{\text{Test load } F}{\text{Surface of the indentation}}$$

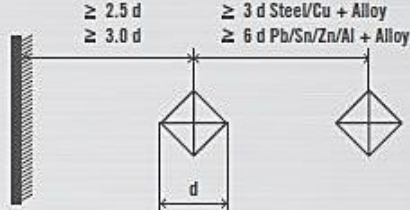
$$= 0.102 \times \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0.1891 \times \frac{F}{d^2}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ (mean diagonal length)}$$



VICKERS

INDENTATION- AND EDGE DISTANCE
In order that the results will not be affected, the following distances have to be kept:

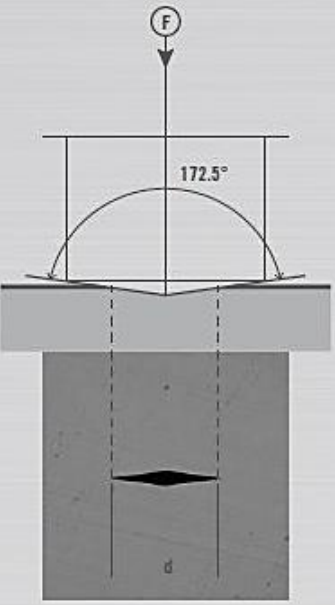


Sertlik Testleri (*Hardness Testing*)

- Brinell
- Vickers
- Knoop
- Rockwell

KNOOP HARDNESS HK

$$HK = \text{Constant} \times \frac{\text{Test load } F}{\text{Surface of the indentation}}$$

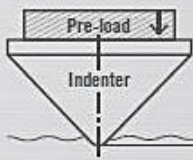
$$= 0.102 \times \frac{F}{A} = 1.451 \times \frac{F}{d^2}$$


KNOOP

FUNCTION PRINCIPLE HR

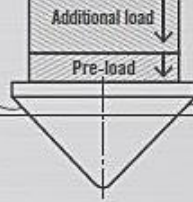
ROCKWELL

(1. step)



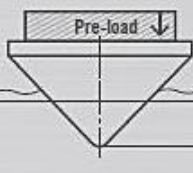
Pre-load
Indenter

(Total load)



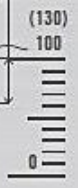
Additional load
Pre-load

(Measurement result)



Additional load
Pre-load

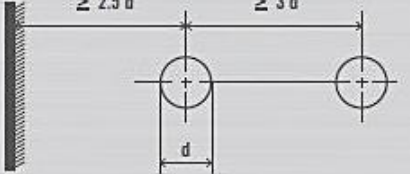
Lasting impression depth (h)



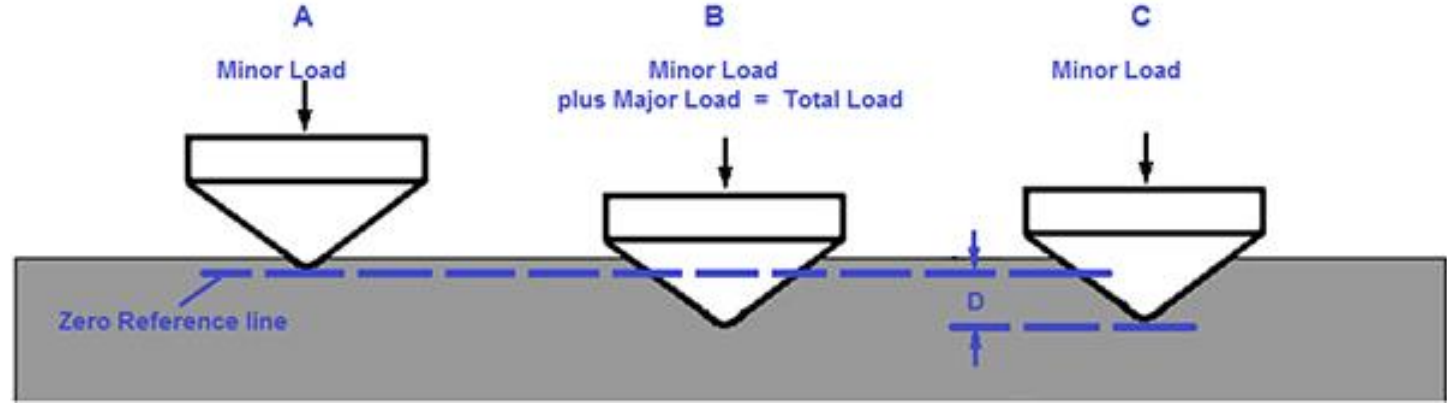
	Base
HRA	= 100 Units
HRC	(1 E = 0.002 mm)
HRD	
HRBW	
HREW	
HRFW	= 130 Units
HRGW	(1 E = 0.002 mm)
HRHW	
HRKW	
HRN	= 100 Units
HRTW	(1 E = 0.001 mm)

INDENTATION- AND EDGE DISTANCE

In order that the results will not be affected, the following distances have to be kept:



Rockwell Sertlik Testi



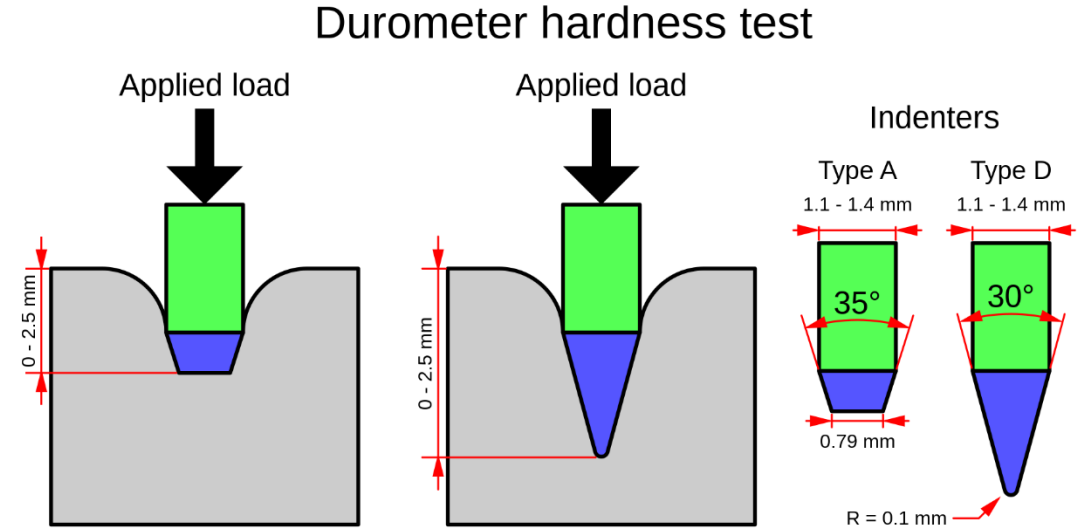
- Ön test yükleri (ön yükler) 3 kgf ("Yüzeysel" Rockwell ölçeğinde kullanılır) ile 10 kgf ("Normal" Rockwell ölçeğinde kullanılır) arasında değişir. Toplam test kuvvetleri 15kgf ila 150 kgf (yüzeysel ve normal) ila 500 ila 3000 kgf (makrosertlik) arasında değişir.
- A = Ön yüklemenin uygulanmasından sonra girintinin ulaştığı derinlik (*minor load*)
- B = Toplam yük sırasında girintinin konumu, Küçük artı Büyük yükler (*minor + major*)
- C = Numune malzemenin elastik olarak geri toparlanmasından sonra girintili uç tarafından ulaşılan son konum
- D = Ön yük ile ana yük konumu arasındaki farkı temsil eden mesafe ölçümü. Bu mesafe Rockwell Sertlik Numarasını hesaplamak için kullanılır.

Shore Durometer

- Shore durometresi (şormetre), malzemelerin, tipik olarak **polimerlerin sertliğini ölçmek** için kullanılan bir cihazdır.
- Ölçekteki daha yüksek sayılar, girinti oluşumuna karşı daha fazla direnç olduğunu gösterir. Daha düşük sayılar daha az direnci ve daha yumuşak malzemeleri gösterir.



Shore Durometer



- Bu terim aynı zamanda bir malzemenin ölçekteki derecelendirmesini tanımlamak için de kullanılır.

Durometer	Indenting foot	Kilogram-force (kgf)	Newton (N)
Type A	Hardened steel rod 1.1 mm – 1.4 mm diameter, with a truncated 35° cone, 0.79 mm diameter	0.822	8.064
Type D	Hardened steel rod 1.1 mm – 1.4 mm diameter, with a 30° conical point, 0.1 mm radius tip	4.550	44.64

Shore Durometer

- Shore A ve
- Shore D ölçekleri

Shore A

20A
Rubber Band



30A
Mouse Pad



40A
Inner Tube



50A
Pencil Eraser



60A
Tire Tread



70A
Shoe Sole



80A
Leather Belt

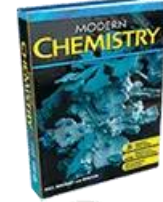


90A
Phone Cord



Shore D

40D
Book Cover



50D
Golf Ball



60D
Swivel Wheel



70D
Wooden Ruler



80D
Computer Casing



90D
Bone



Mekanik Dalga (Ses, Titreşim, Darbe) Esaslı

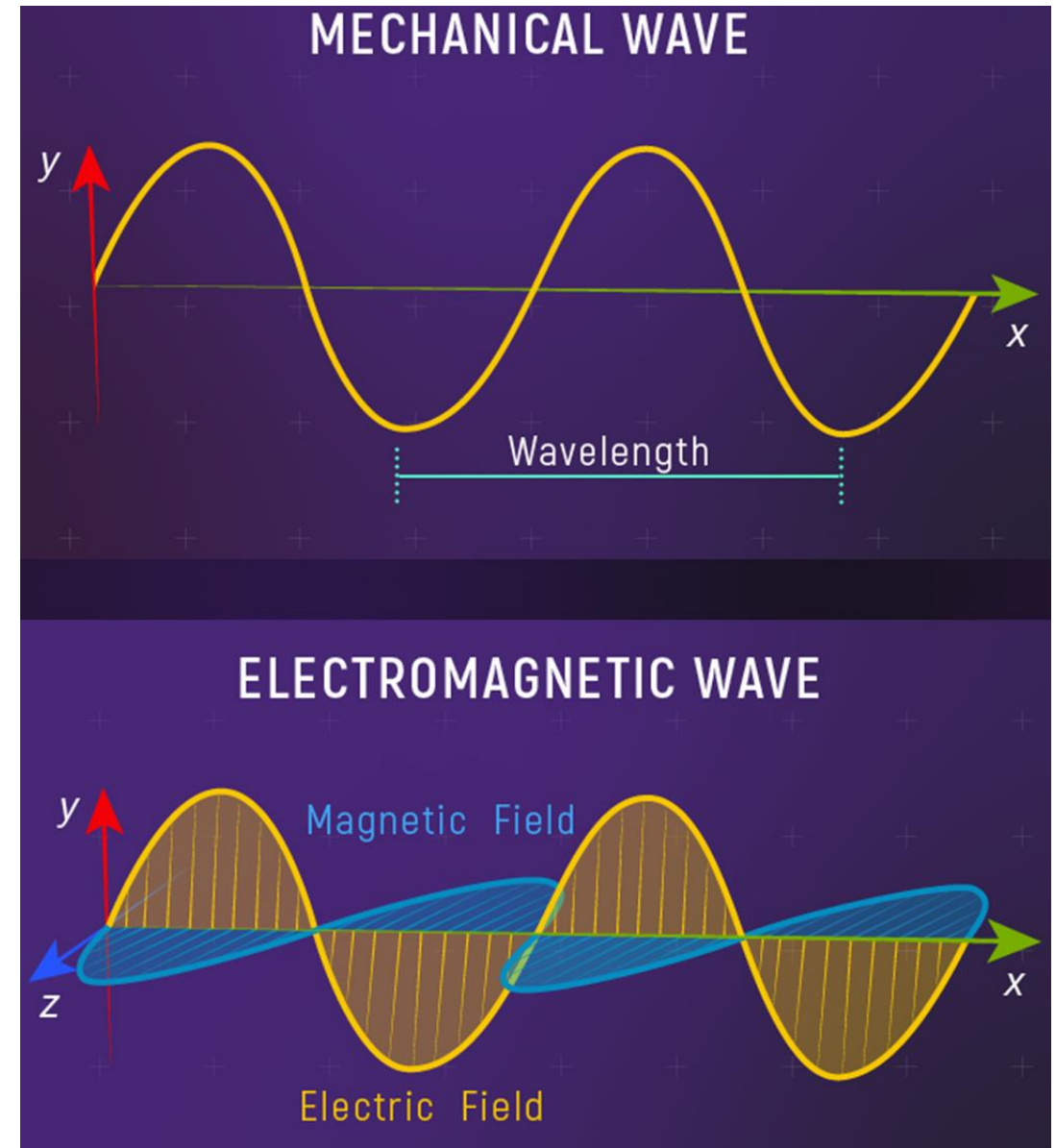
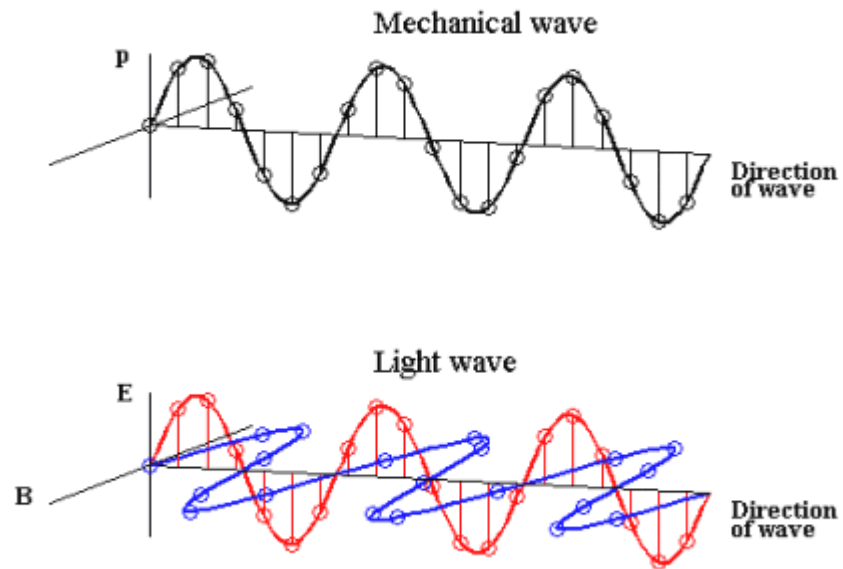
- **Tap Testing (Tap: Hafifçe Vurma / Tıklatma)**
- **Titreşim Ölçümü ve Analizi**

Dalgalar (Waves)

- *Dalga, bir fizik terimi olarak uzayda ve maddede yayılan ve enerjinin taşınmasına yol açan titreşime (salınıma) denir. Dalga hareketi, orta parçaların yer değişimi sıklıkla olmadan, yani çok az ya da hiç kütle taşınımı olmadan, enerjiyi bir yerden başka bir yere taşır. Dalgalar sabit konumlarda oluşan titreşimlerden oluşurlar ve zamanla nasıl ilerlediğini gösteren bir dalga denklemi ile tanımlanırlar. Bu denklemin matematiksel tanımı dalga çeşidine göre farklılık gösterir.*
- *İki çeşit dalga vardır:*
 - **Mekanik dalgalar** bir ortam aracılığıyla yayılırlar ve deforme edilirler. Deformasyon ile kendini tersine çevirerek eski halindeki güçleri geri getirir. Mesela, ses dalgaları çarpışan hava molekülleri yolu ile yayılır. Hava molekülleri çarpıştığında, moleküller birbirleri boyunca sıçrarlar. Bu, moleküllerin dalganın yönünde yol almasını devam ettirir.
 - Dalgaların ikinci çeşidi **elektromanyetik dalgalar**dır. Elektromanyetik dalgalar bir ortama ihtiyaç duymazlar. Bunun yerine yüklü parçacıklar tarafından, elektrik ve manyetik alanların periyodik titreşimlerinden meydana gelirler. Ve böylece boşlukta ilerlerler. Bu tip dalgaların ve radyo dalgalarının, mikrodalgaların, kızılötesi ışınların, görünür ışınların, morötesi ışınların, gama ışınlarının ve x ışınlarının dalga boyu değişir.

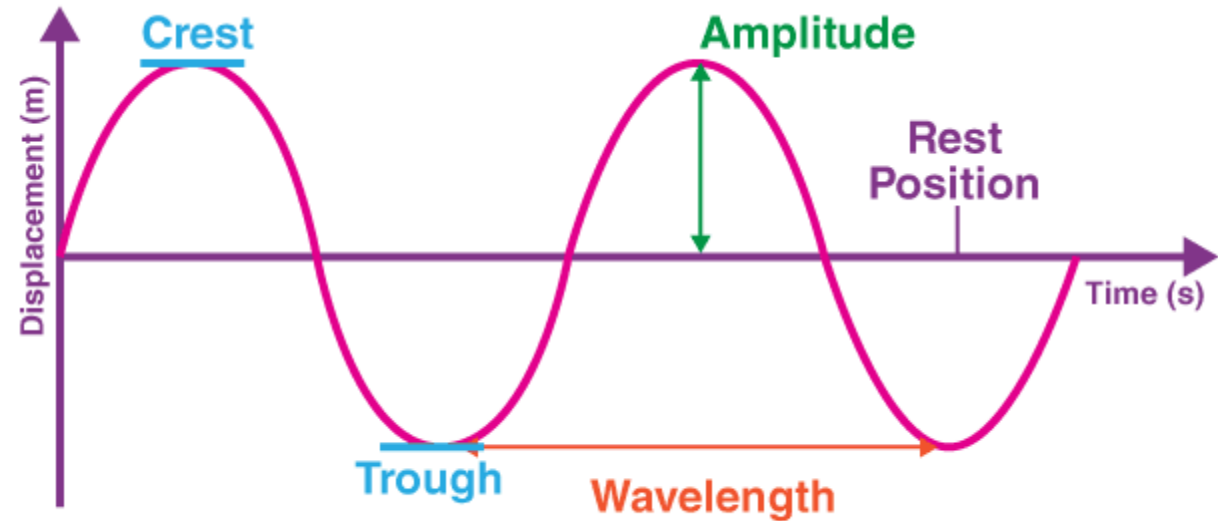
Dalgalar (*Waves*)

- Mekanik Dalga
- Elektromanyetik Dalga



Dalgalar (*Waves*)

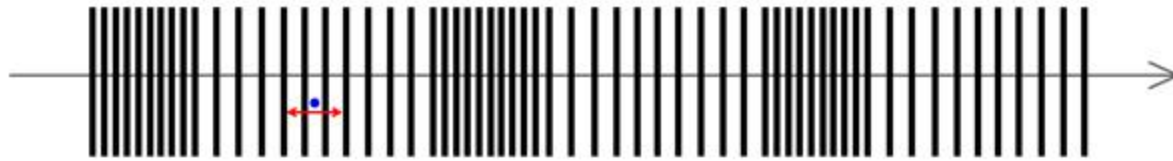
- *Amplitude*: Genlik
- *Wavelength*: Dalga Boyu
- *Crest*: Tepe
- *Trough*: Çukur
- *Displacement*: Deplasman / yer değiştirme



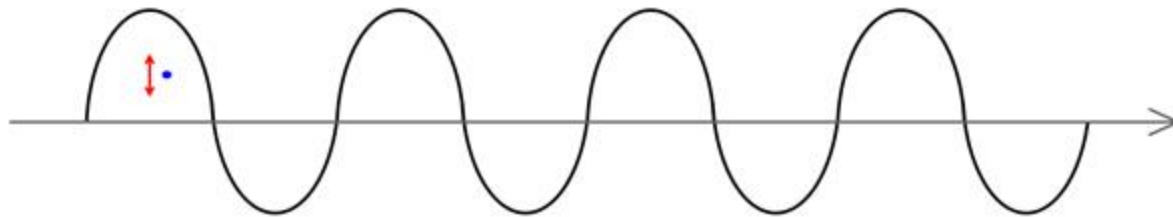
Dalgalar (*Waves*)

Types of Mechanical Waves

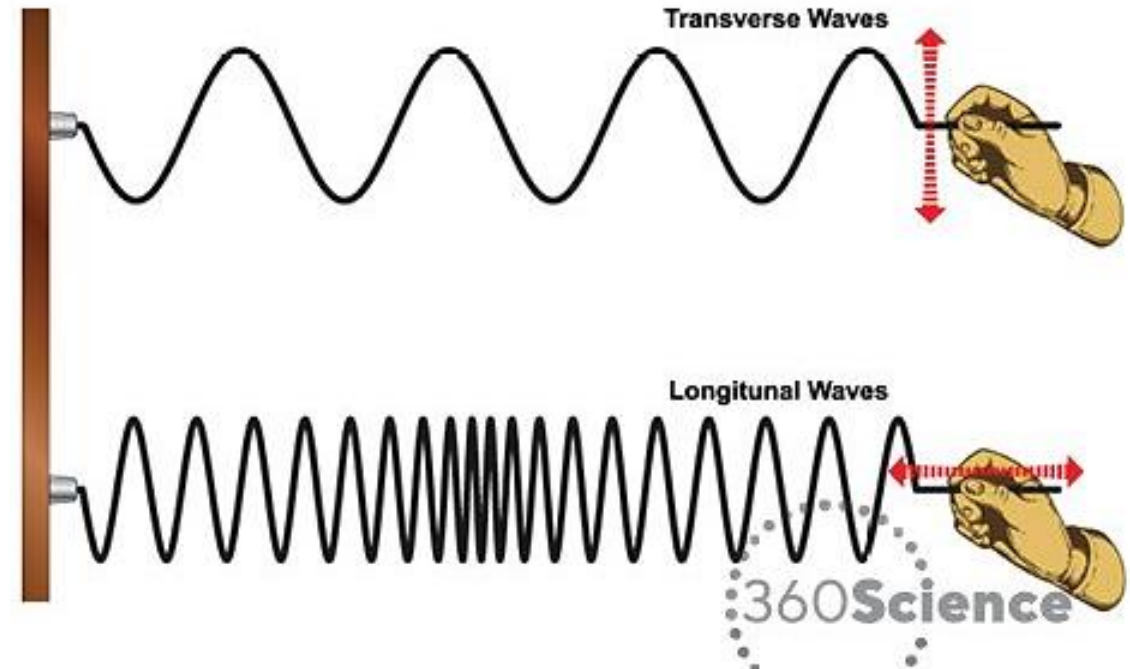
Longitudinal Wave: Particles vibrate parallel to the direction of propagation of the wave.



Transverse Wave: Particles vibrate perpendicular to the direction of propagation of the wave.



Science Facts .net



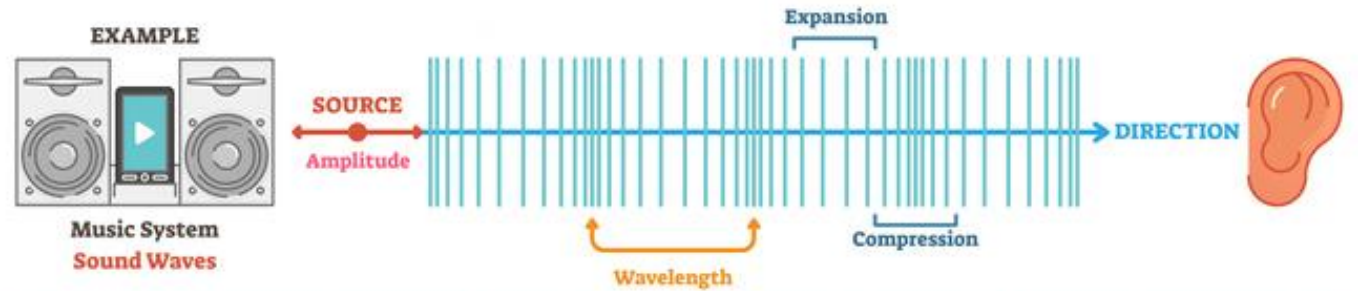
- *Transverse Waves:* Enine Dalgalar
- *Longitudinal Waves:* Boyuna Dalgalar

Dalgalar (Waves)

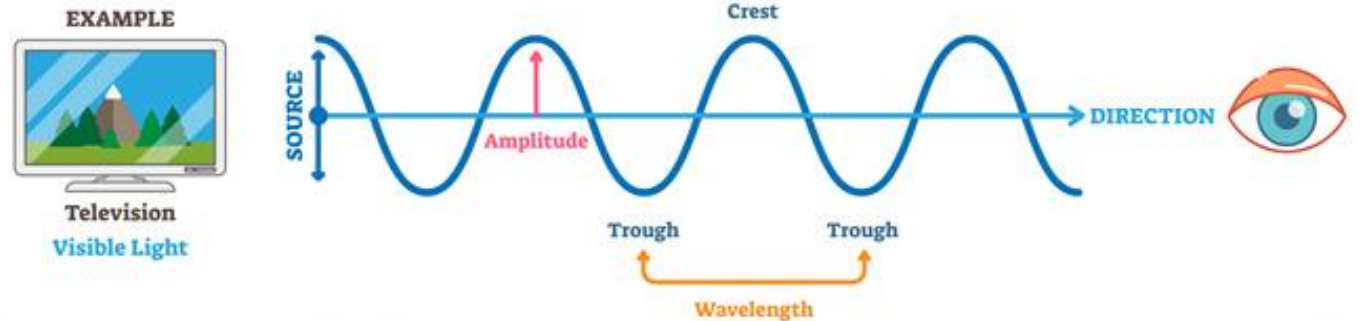
Enine ve Boyuna Dalgalar

- *Titreşimin yönüne bağlı olarak enine dalgalar ve boyuna dalgalar oluşabilir. Yayılmaya (enerji transferinin yönüne) dik açılarda bir titreşim oluşursa enine dalgalar meydana gelir. Titreşimlerin yayılmanın yönüne paralel olduğu durumda ise boyuna dalgalar meydana gelir. Mekanik dalgalar enine ve boyuna olabilirken, bütün elektromanyetik dalgalar eninedir.*

LONGITUDINAL WAVES



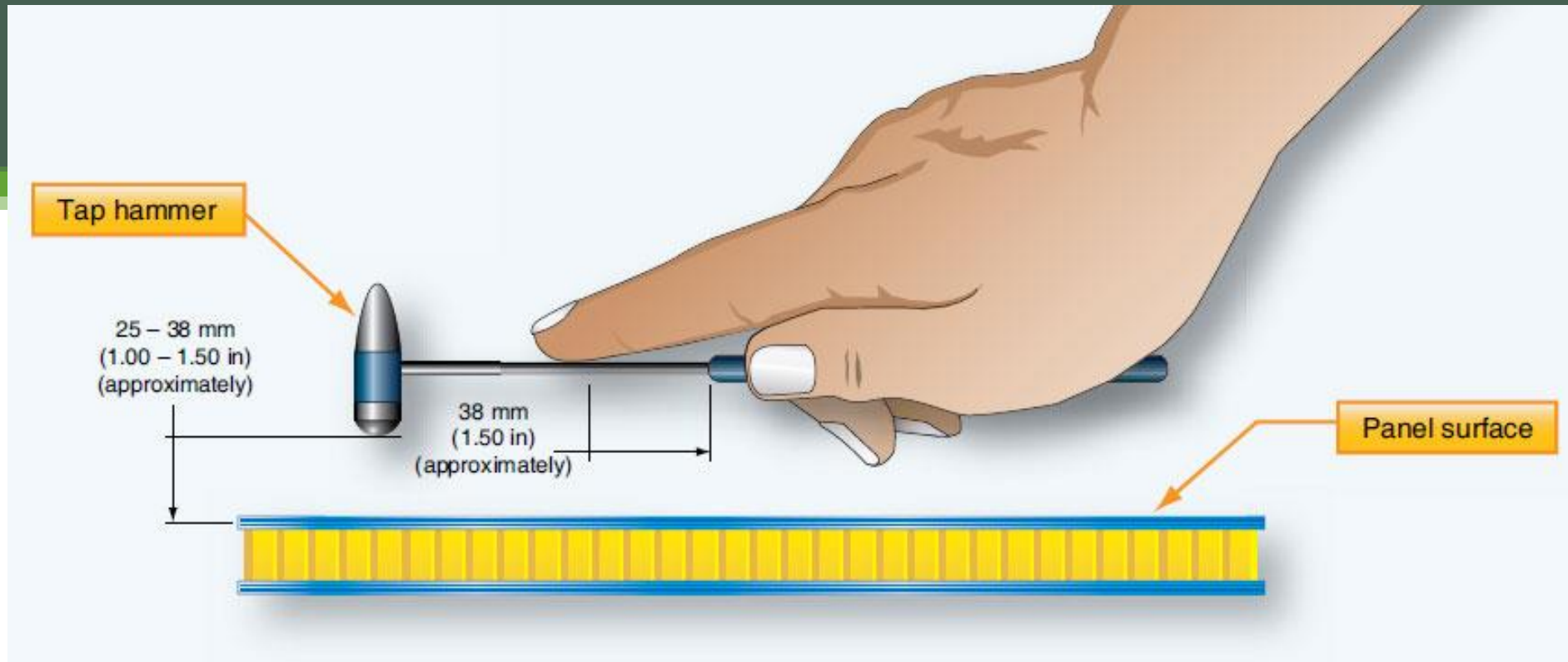
TRANSVERSE WAVES



Tap Testing

Hafifçe Vurma ile Muayene

Tap Testing



Tap Testing

- Hafif vuruş veya tıkırtı testi (**Tap Testing**), bir nesnenin yüzeyine küçük bir çekiç veya madeni para ile vurulmasını ve çarpmanın bir sonucu olarak nesneden çıkan sesle, bütünlüğünün değerlendirilmesini içeren, Madeni Para Testi (**Coin Testing**) olarak da bilinen eski ve son derece basit bir NDT tekniğidir.
- Daha sönük bir ses, muhtemelen bir kusurun varlığı nedeniyle darbenin sönümlendiğini gösterir. Ancak teknik el ile uygulandığında çok fazla veri veya yanıt kaydı sağlamaz ve doğal olarak değerlendirmenin güvenilirliği sorgulanır. Çünkü operatörün algısı, deneyimi vb. şartlar, kusurun varlığını, yerini ve boyutunu tespit sürecini etkiler. Son zamanlarda, kusurun varlığını belirleme, boyutunu ve yerini tespit etmede, sürecin kalıcı bir kaydını gerçek zamanlı olarak görüntüleyebilen otomatik Tap Testing cihazları ortaya çıkmıştır.

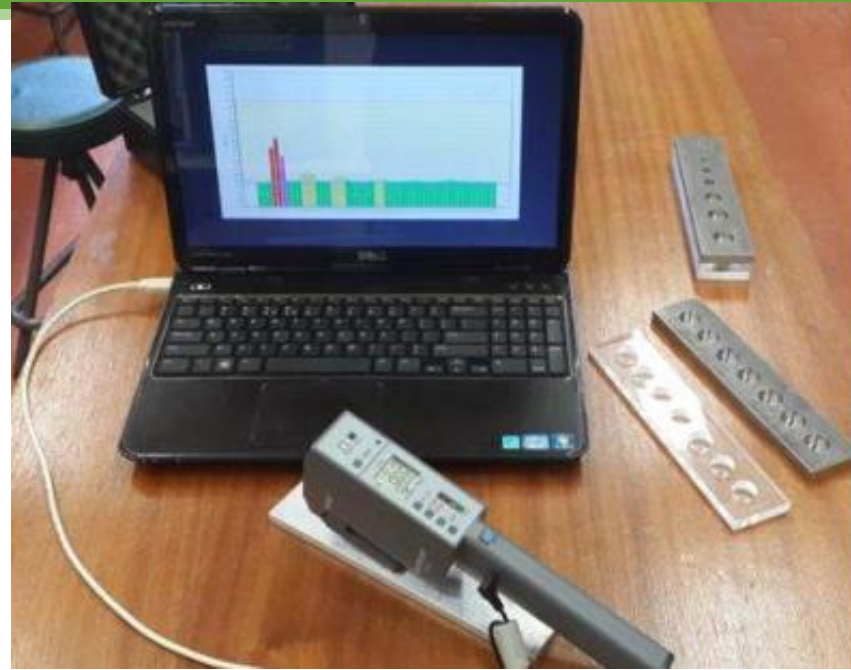
Tap Testing

- Komponentin yüzeyindeki otomatik darbe, aslında, vurma kuvvetinin büyüklüğü veya çekicin yüzeyle temas süresi gibi değişkenlerin seçimine imkân veren, **yerel bir titreşim testi**dir.
- Test nesnesinin yüzeyi ile temas süresinin kaydedilmesini veya ölçülmesini sağlayan, çekiç tertibatında yerleşik bir sensöre sahip olan cihazlardan yararlanır. Temas süresinin, yüzeyin altındaki malzemenin yerel sertliğine büyük ölçüde bağlı olduğu bu yöntem, kusurun varlığını belirlemede kullanılır.
- Temas süresi (t), çekicin kütesinin (m) ve malzemenin yerel sertliğinin (k) (katılık/stiffness) bir fonksiyonudur: $\tau = \pi (m/k)^{1/2}$

Tap Testing

Örnek Donanım:

- Mitsui Woodpecker WP-632AM Automatic Tap Tester



Hammer Head & Feet

Start button

PC port



TAP TESTING UYGULAMASI

Video: Otomatik hafif vuruş çekicinin sandviç kompozit panel üzerinde kullanımı

<https://www.youtube.com/watch?v=SrFrAW0UM2g>

00:05 – 04:19

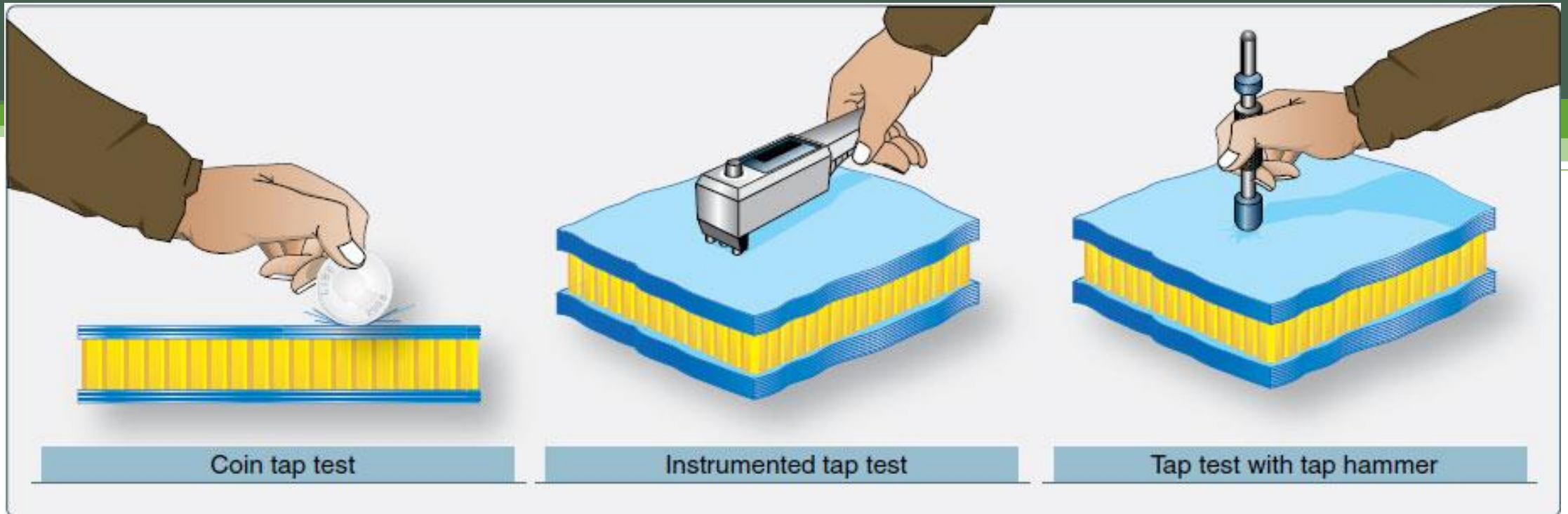
(How to use Woodpecker WP632AM)

TAP TESTING UYGULAMASI

Otomatik
Çekiç
kullanımı



Tap Testing (*Coin Testing*)



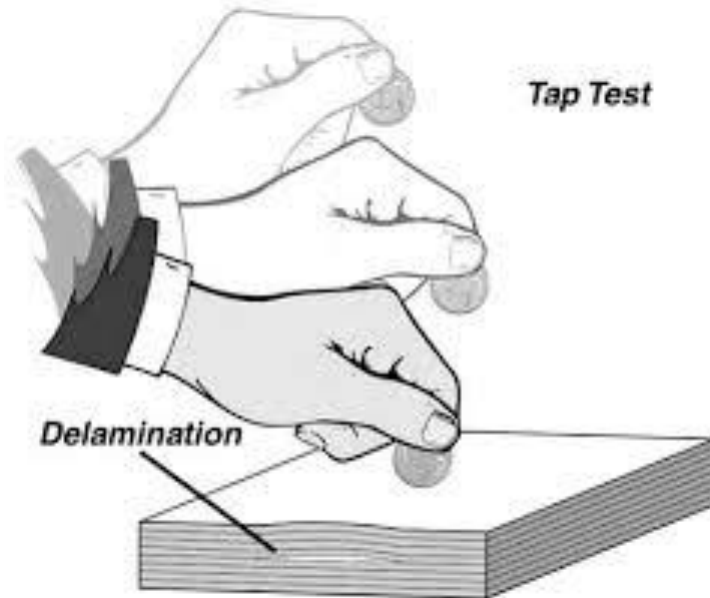
Hafif Vurma ile Kompozit Malzemedede Delaminasyon Tespiti

- Tap Testing

Video:

<https://www.youtube.com/watch?v=9w6vVhRcM4U>

(BGA how to inspect a dent for delamination on a composite wing with a tap test)



Hafif Vurma ile Kompozitlerde Delaminasyon Tespiti

- Tap Testing

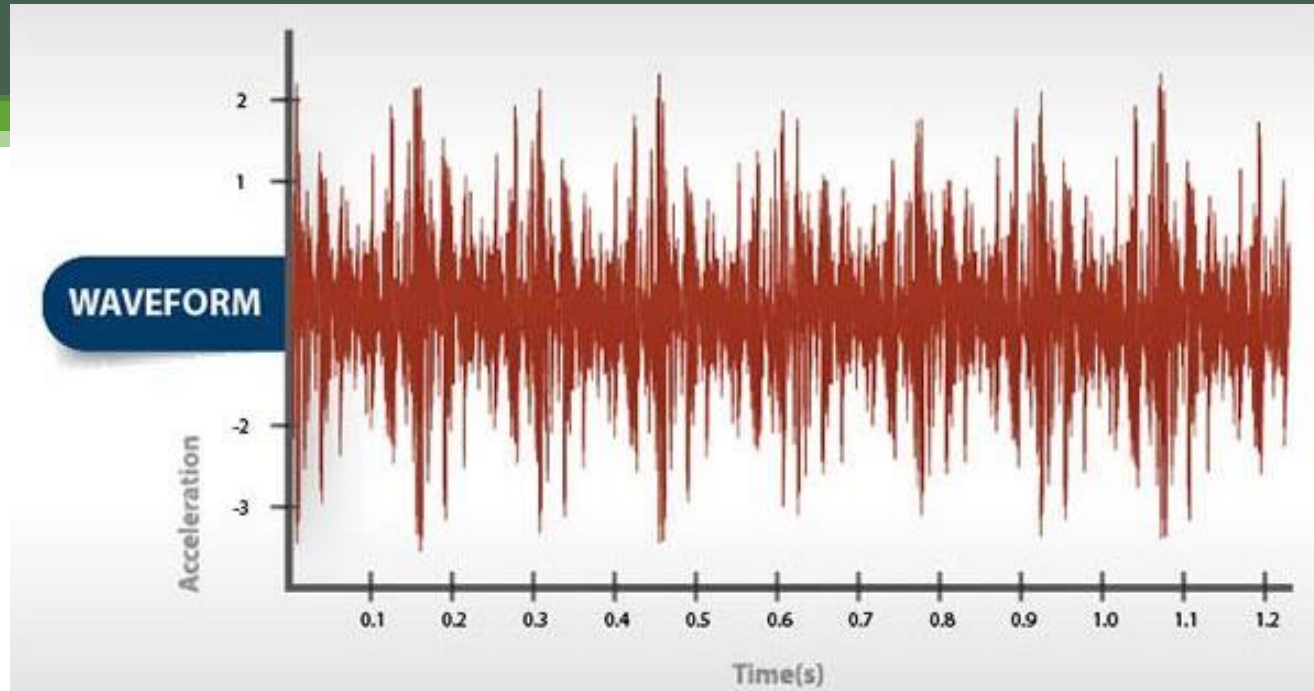
Video:

<https://www.youtube.com/watch?v=a3HbpmjG9-0>

(Tapping out a composite rotor blade)



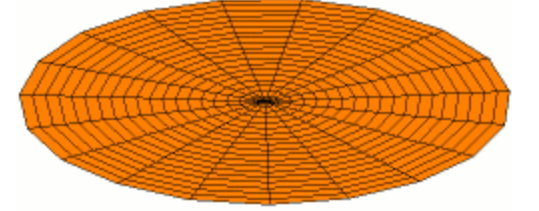
Titreşim Ölçümleri



TEMEL KAVRAMLAR: **Titreşim**

- **Titreşim** bir denge noktası etrafındaki mekanik salınımdır. Bir sarkacınki gibi düzenli ve periyodik ya da pürüzlü bir yolda ilerleyen tekerleğinki gibi rastgele olabilir.
- Titreşim bazen arzu edilir. Örneğin; bir hoparlörde koninin hareketi. Çoğunlukla, titreşim istenmeyen bir harekettir, çünkü boşa enerji harcanmasına, istenmeyen ses ve gürültü oluşumuna, **malzemedeki yorulmaya (*material fatigue*)** sebep olur.
- Titreşimler motorlardaki dönen parçaların balanssızlığından, düzensiz sürtünmeden, dişli çarkların hareketinden kaynaklanabilir. Dikkatli tasarımlar genellikle istenmeyen titreşimleri minimize ederler.
- Ses ve titreşim çalışmaları birbirleriyle yakın şekilde bağlantılıdır. Gürültüyü azaltmaya çalışmak sıklıkla, bir titreşim azaltma problemidir.

TEMEL KAVRAMLAR: **Titreşim**



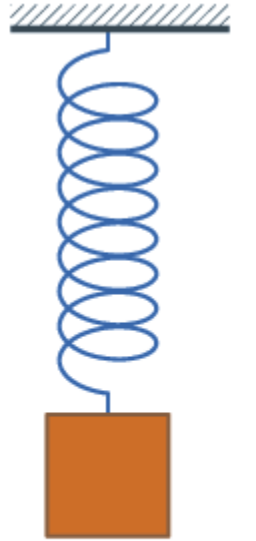
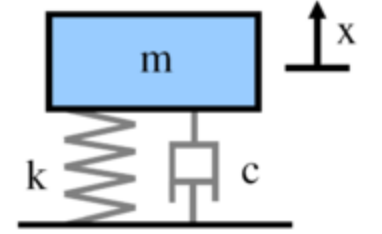
Titreşim türleri

- **Serbest titreşim**, bir başlangıç hareketi verilen ve daha sonra **serbestçe salınmaya bırakılan sistemlerde meydana gelen titreşim türüdür**. Bir çocuğu salıncakta sallanırken ardından ittirmek ve daha sonra serbest bırakmak veya bir akort çatalına vurmak ve daha sonra salınmaya bırakmak bu titreşim türünün örnekleridir. Mekanik sistem daha sonra kendi **doğal frekansı veya frekanslarında titreşecek ve hareket sıfıra** gidecektir.
- **Zorlamalı titreşim**, değişen bir kuvvet veya hareket bir mekanik sisteme uygulandığında oluşan titreşim türüdür. Dengesizlik dolayısıyla çamaşır makinesinin titreşimi, araç titreşimleri (motordan, yaylardan veya yoldan kaynaklanan), uçak kanatlarındaki titreşimler veya deprem sırasında bir binanın titreşimleri bu titreşim türünün örneklerine dahildir. Zorlamalı titreşimde titreşimin frekansı uygulanan zorlamanın veya hareketin frekansına bağlıdır, fakat titreşimin genliği ise sistemin mekanik davranışına bağlıdır.

Titreşim

Titreşim analizi

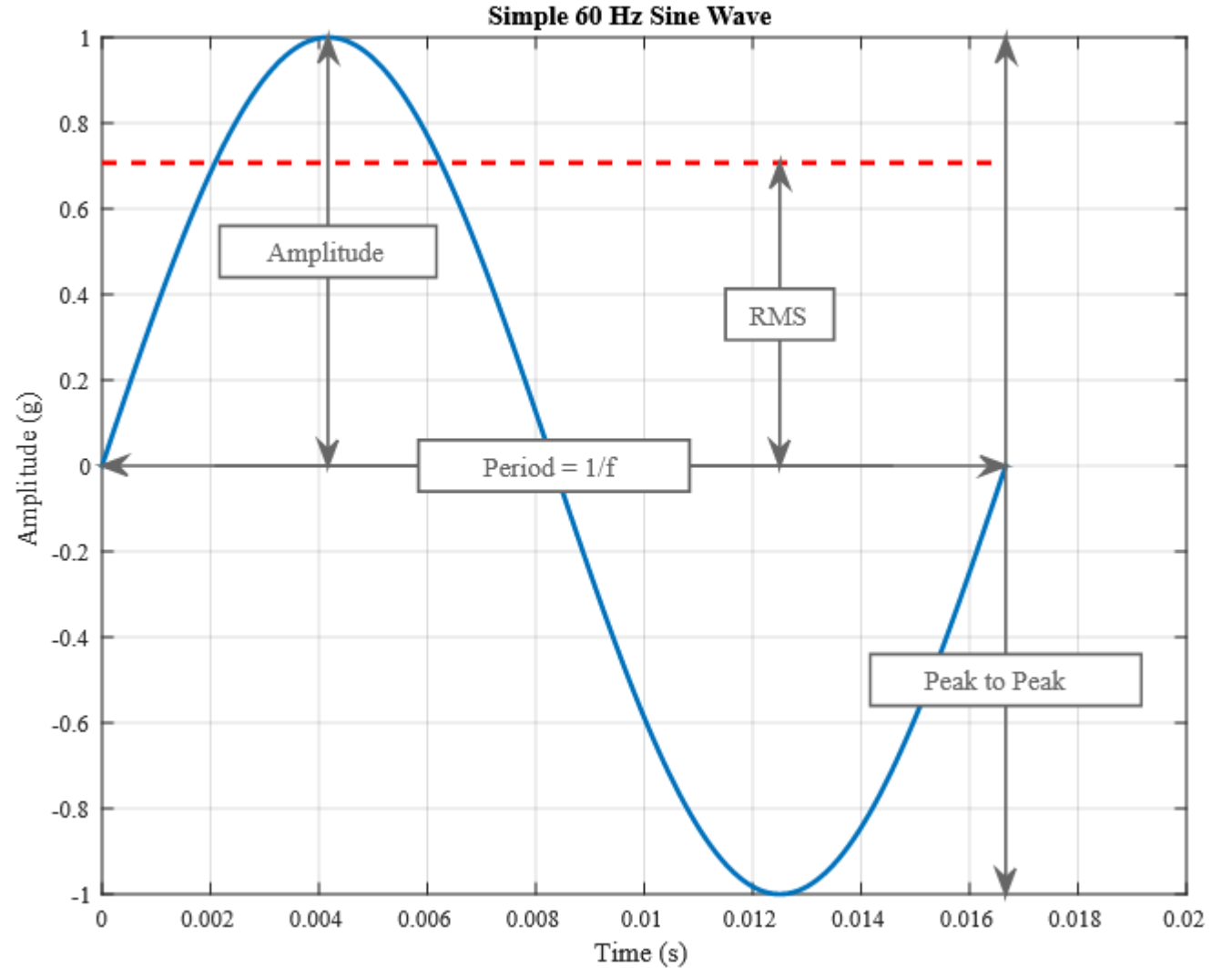
- Titreşim analizinin temelleri, basit kütle-yay-sönüm elemanı modeli incelenerek anlaşılabilir. Bir otomobil gibi karmaşık bir yapı dahi bir basit kütle-yay-sönüm modellerinin toplamı olarak modellenebilir.
- Kütle-yay-sönüm modeli ise bir basit harmonik osilatör örneğidir ve bu yüzden bunun davranışını tanımlamak için kullanılan matematik RLC devresi gibi diğer basit harmonik osilatörlerdeki ile aynıdır.



Titreşim

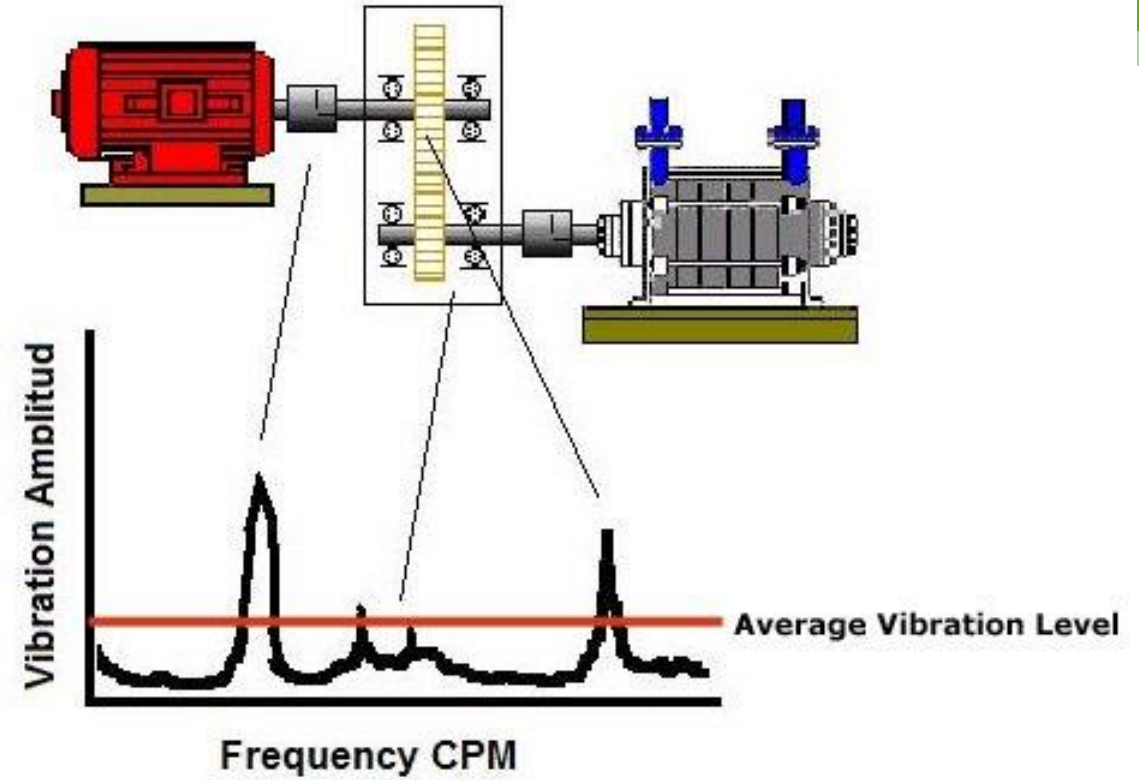
Titreşim analizi

- 60 Hz Sinüzoidal Dalga
- *Amplitude*: Genlik
- RMS (*Root Mean Square*): Ortalama karekök
- *Peak*: En üst sınır



Titreşim

Titreşim analizi



- Titreşim ölçümleri ve analizinde, ivmeölçer (*accelerometer*), strain gage, load cell, piezoelektrik sensörler gibi transdüserlerden faydalanılır.
- Mekanik enerjinin transdüserde elektrik voltajına dönüştürülmesi esası ile ölçüm yapılır.
- Titreşim testleri ile malzeme veya makinede meydana gelen kusurlar ve dengesizlikler tespit edilebilir.

Titreşim Ölçümleri

Vibration Analysis

Titreşim Analizi

- Titreşim analizi, dönen bir makinenin parçaları tarafından üretilen titreşim imzalarını izleyerek ve bunlarda olağandışı değişimler olduğunda algılamak üzere yorumlama çalışmalarıdır.
- İzleme ve algılama için girdap akımları sensörleri, hız sensörleri, ivmeölçerler, yer değiştirme sensörleri veya strain gage'ler kullanılabilir.

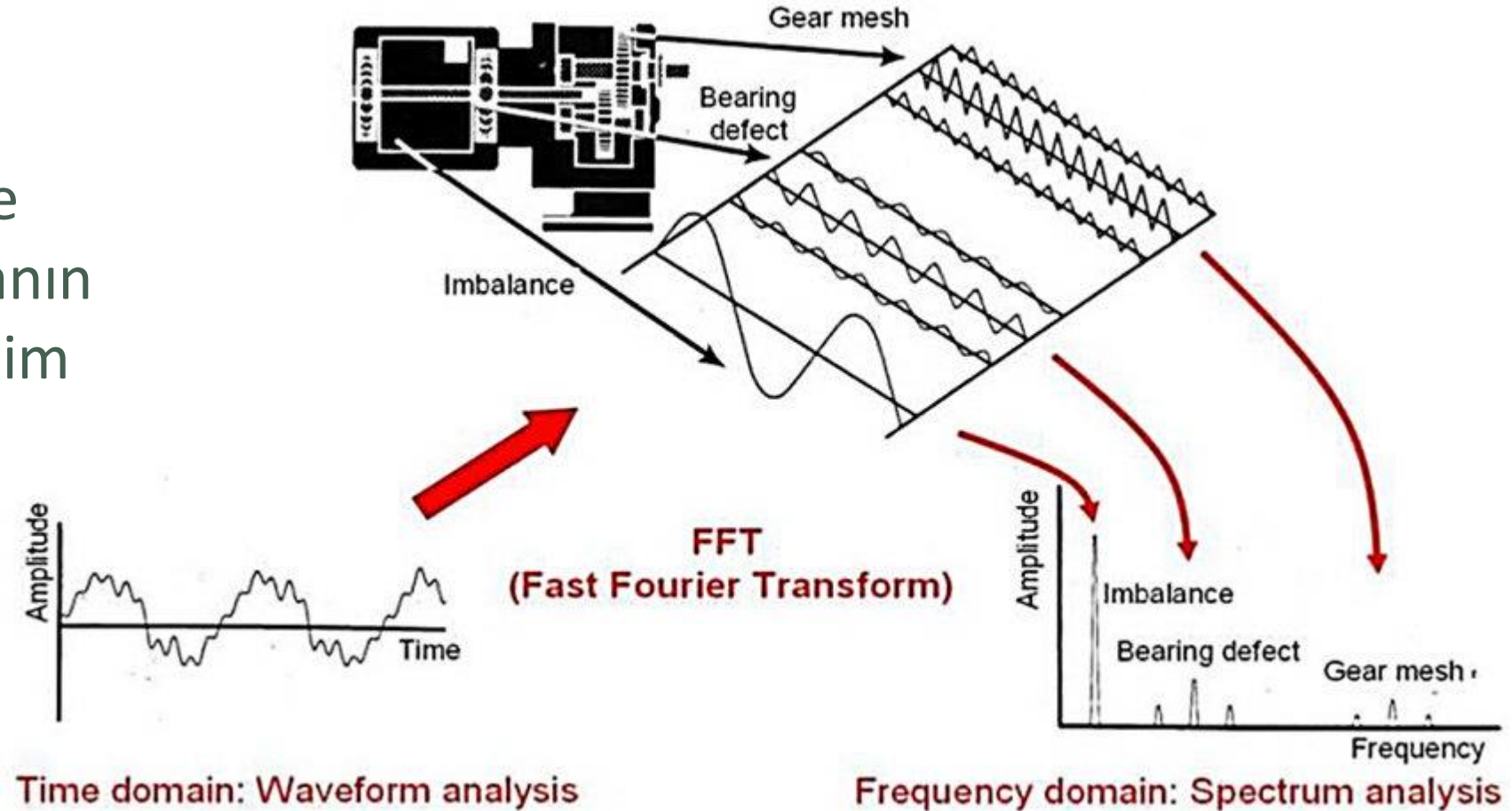
Titreşim Ölçümleri

- Dönen makinelerin (*rotating machinery*) titreşim ölçümlerinde genellikle ivmeölçer (*accelerometer*) kullanılır.



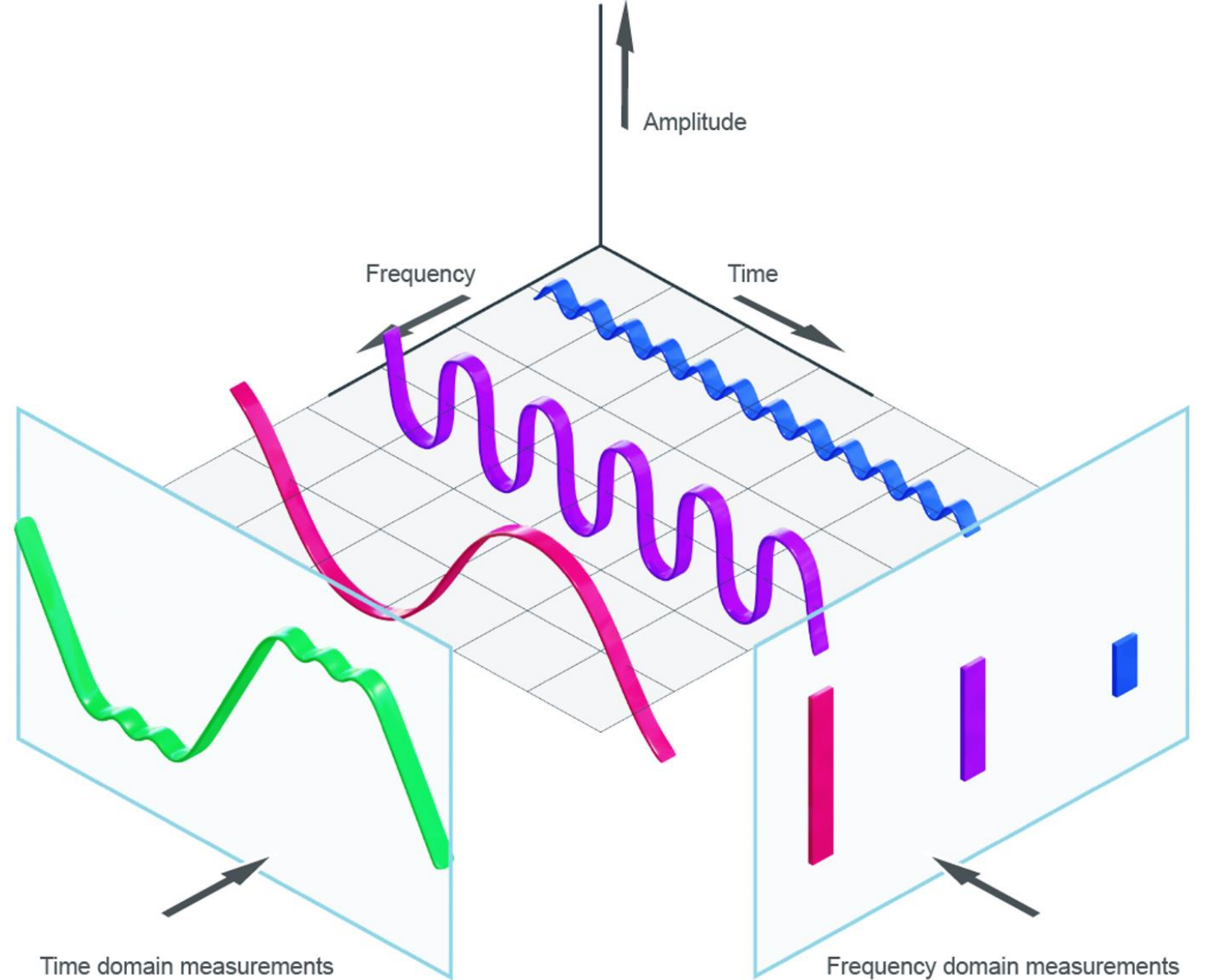
Titreşim Analizi

- Çalışan bir makinede dönen her bir elemanın kendine ait bir titreşim imzası vardır.



Titreşim Analizi

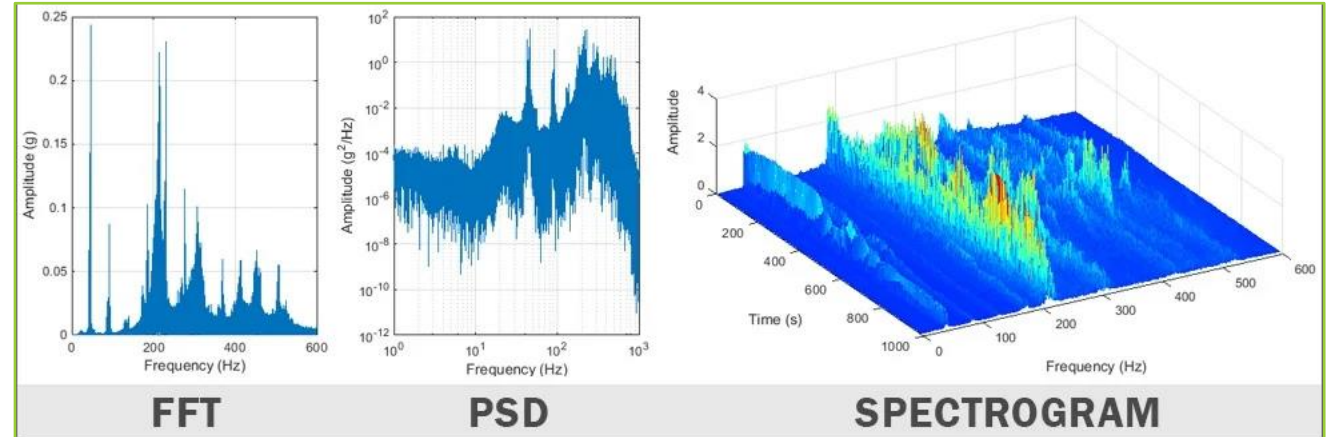
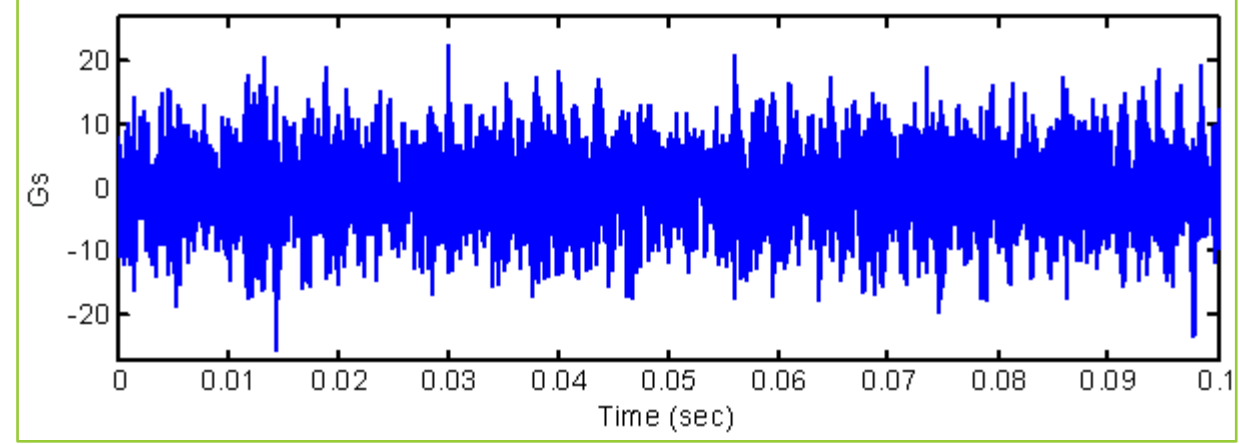
- Zamana bağlı (*time domain*) ölçümler, frekans uzayına (*frequency domain*) aktarılır veya dönüştürülür.



Titreşim Analizi

FFT Analizi

- Hızlı Fourier dönüşümü (**Fast Fourier Transform – FFT**) ile bir dizinin ayrık Fourier dönüşümünü (DFT) ya da ters ayrık dönüşümünü hesaplayan bir algoritmadır.
- Fourier analizinde bir sinyal bulunduğu uzaydaki (genellikle zaman uzayı) gösteriminden, frekans uzayındaki gösterimine dönüştürülür. (Time Domain to Frequency Domain)
- Karışık bir sinyalin içindeki harmoniklerin ve frekansları ortaya çıkarır. Frekans tayfının incelenmesini sağlar.

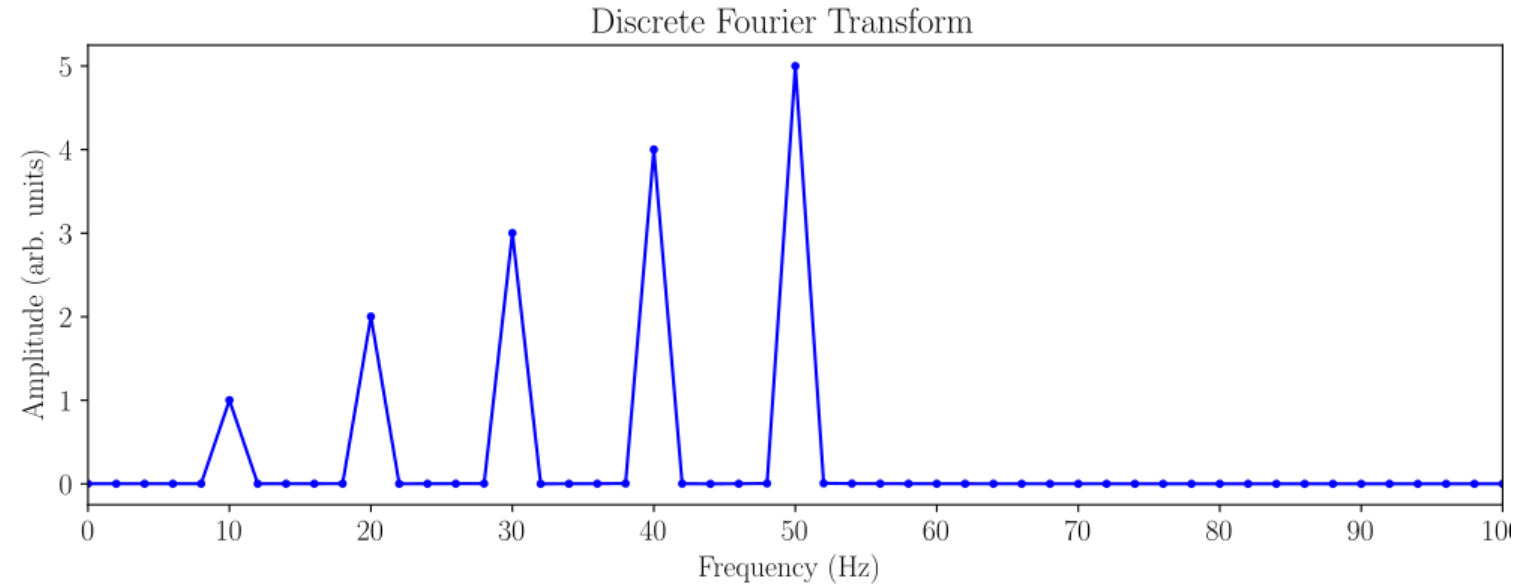
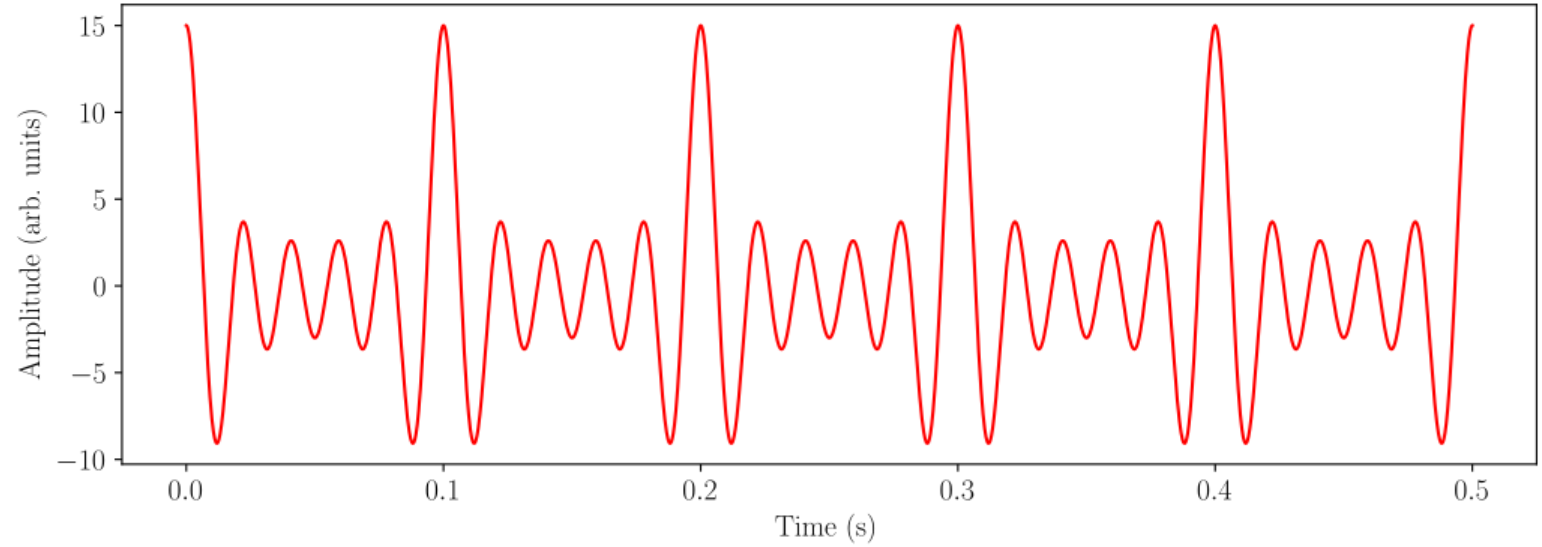


Titreşim Analizi

Örnek Görsel:

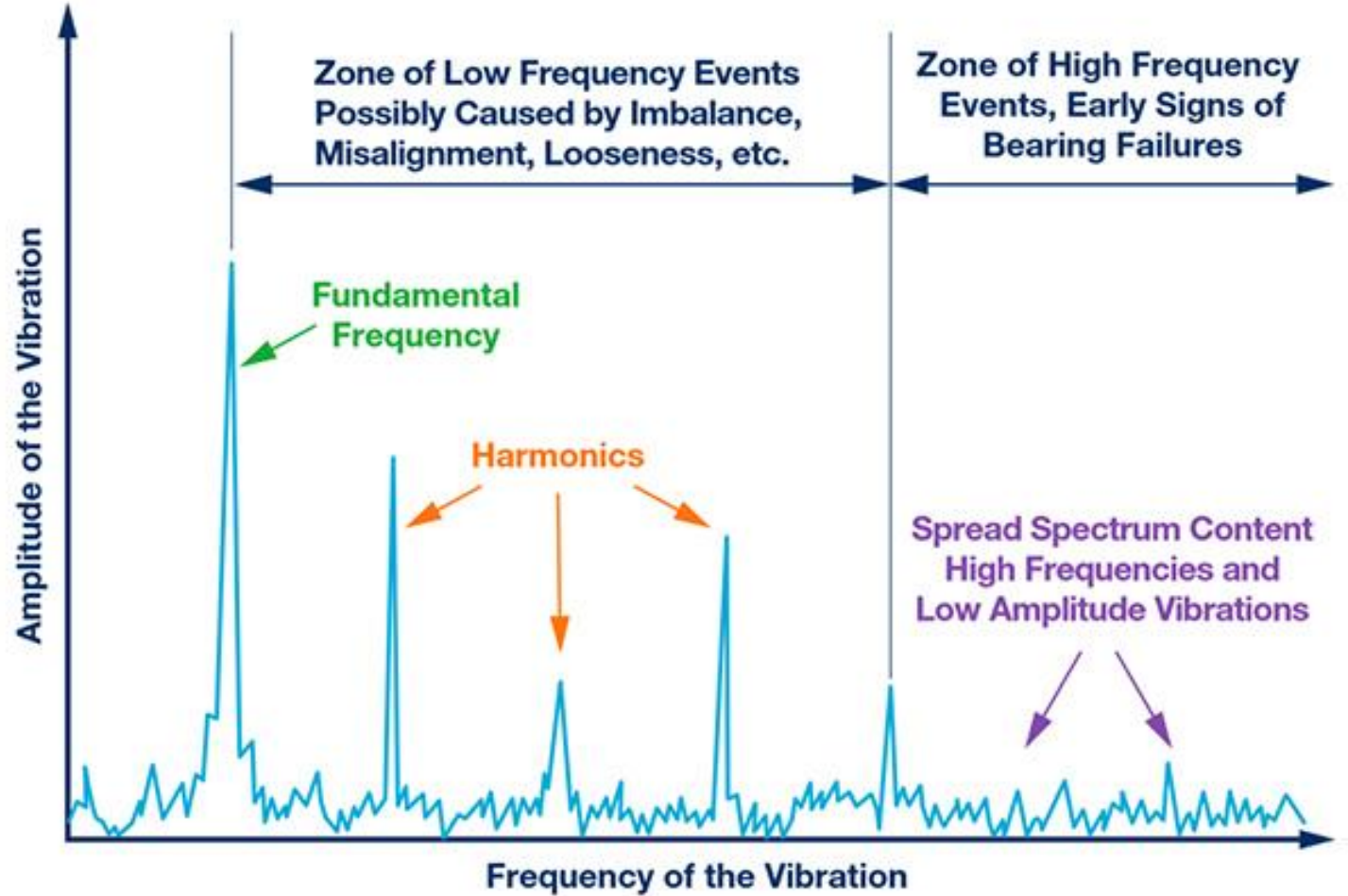
- Kosinüs dalgalarının toplamının ayırık Fourier analizi (FFT)
- Üstteki grafikte zaman uzayında kosinüs dalgaları
- Altteki grafikte frekans uzayındaki ifadesi, spektrum (10, 20, 30, 40 ve 50 Hz)

$$\sum_{n=1}^5 n \cos(n\omega t), \quad \omega = 10 \times 2\pi$$



Titreşim Analizi

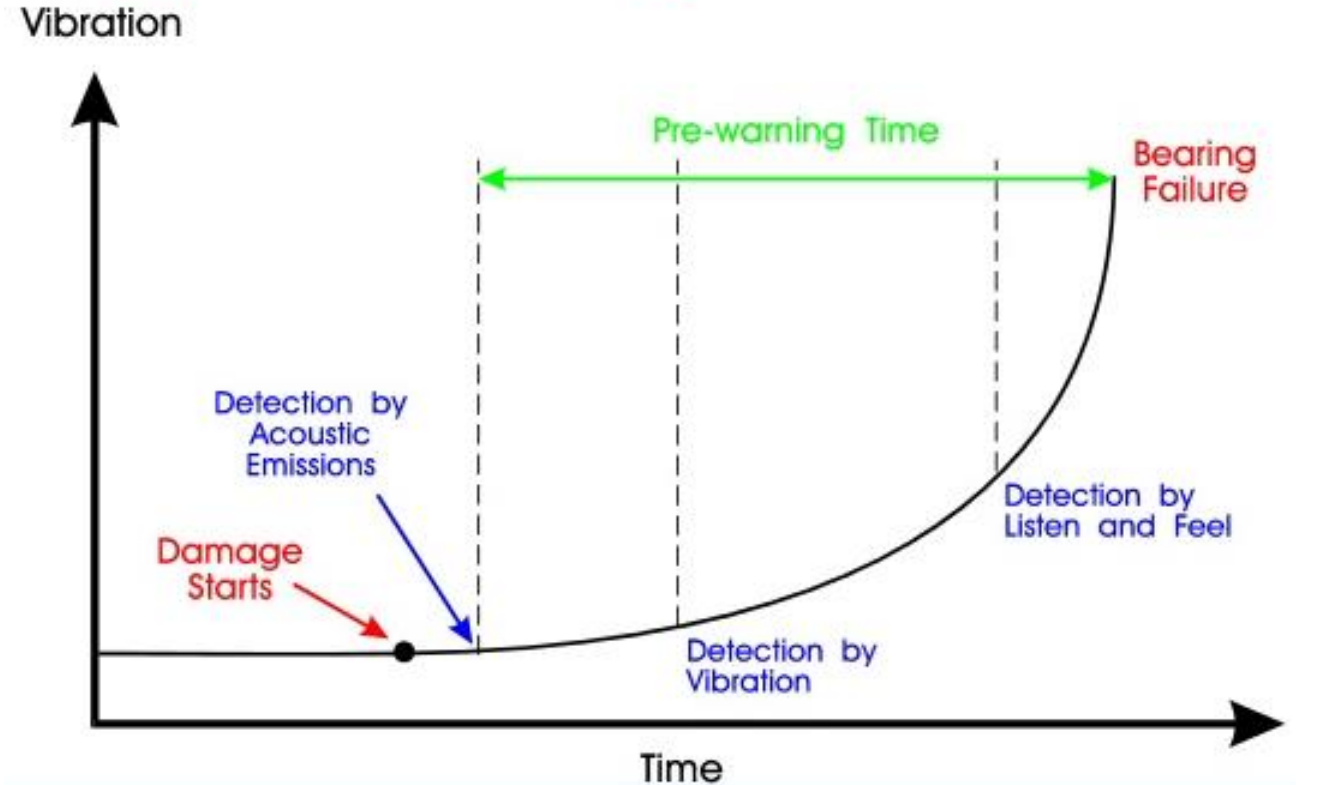
- Titreşim analizi yapılırken kaydedilmiş olan frekans spektrumu incelenir



Titreşim Ölçümleri

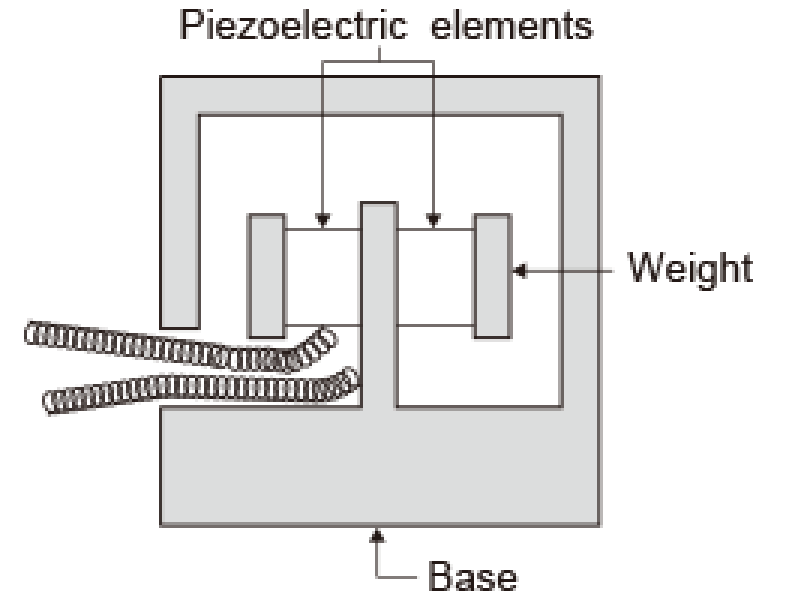
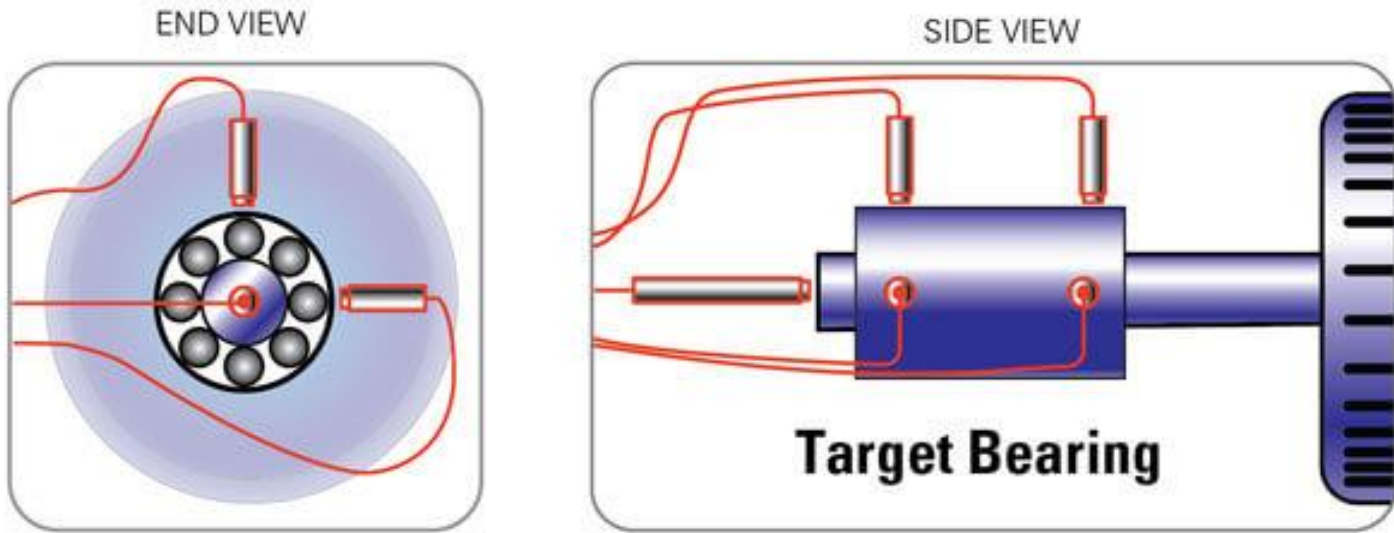
- Çeşitli makine elemanı ve gövde parçalarında hasar oluşmadan önce önlem alınmasını sağlar

Typical Bearing Failure Rate



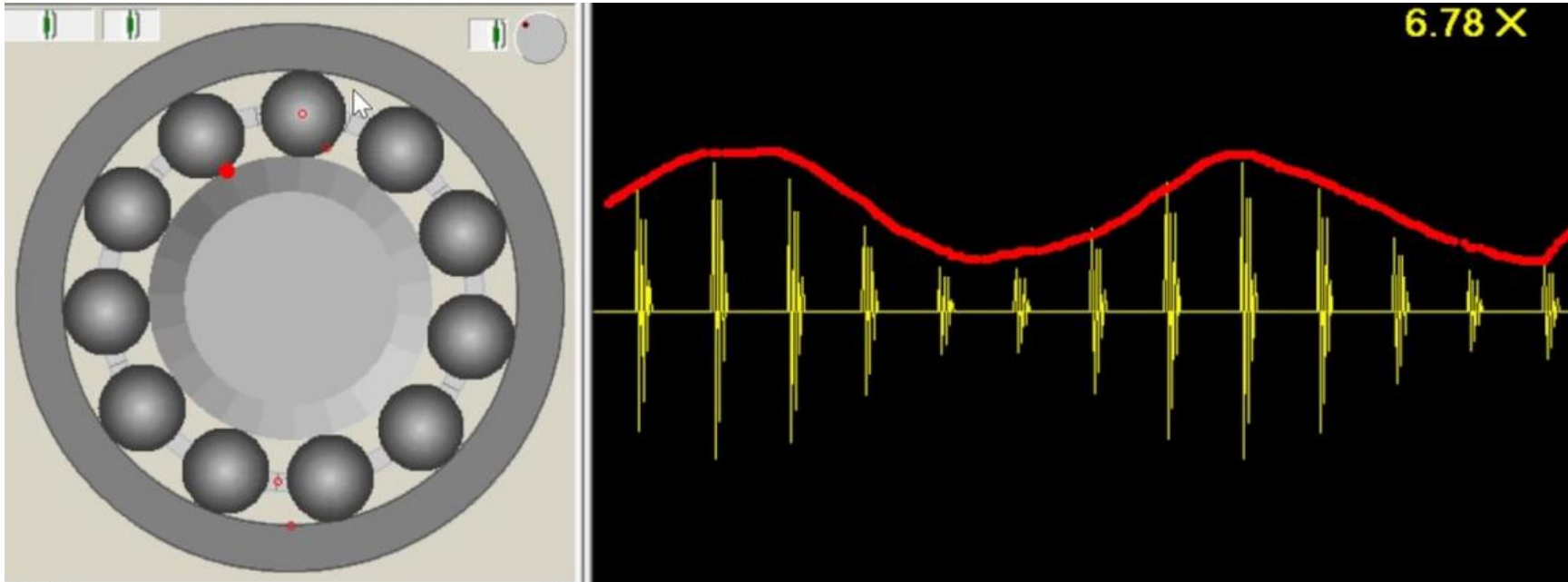
Titreşim Ölçümleri

- *Örnek Görsel*: İvmeölçerlerin titreşim ölçümünde kullanımı



Titreşim Ölçümleri

- *Örnek Görşel*: Titreşim analizi ile rulmanlı yataklarda hataların tespiti (olası hasarların önceden engellenmesini sağlar)



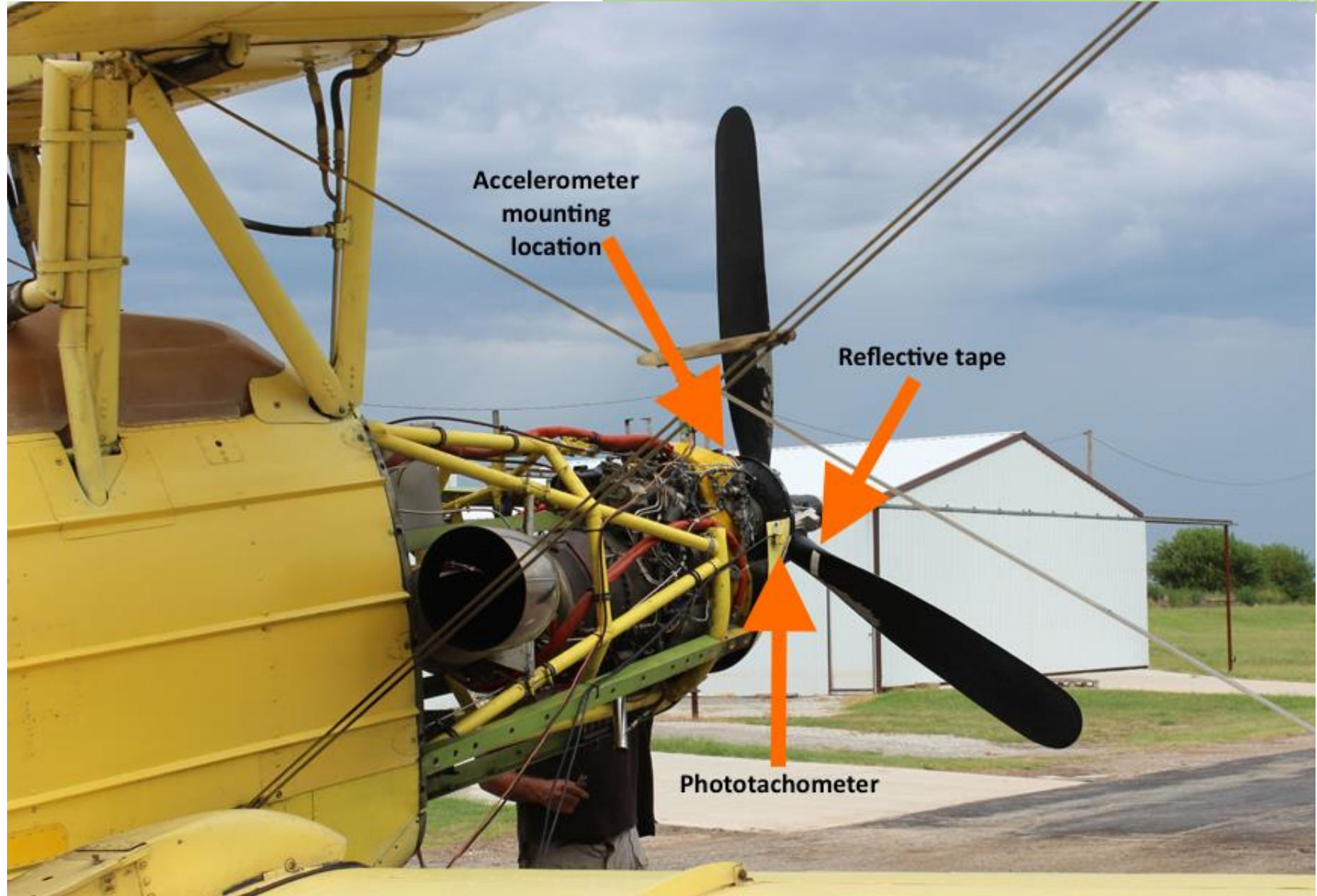
Titreşim Ölçümleri

- Havacılıkta, pervane vb. yüksek hızla dönen ve kritik önemi olan parçaların tahribatsız muayenesi, durum izlemesi ve incelenmesi için titreşim ölçümlerinden faydalanılır.



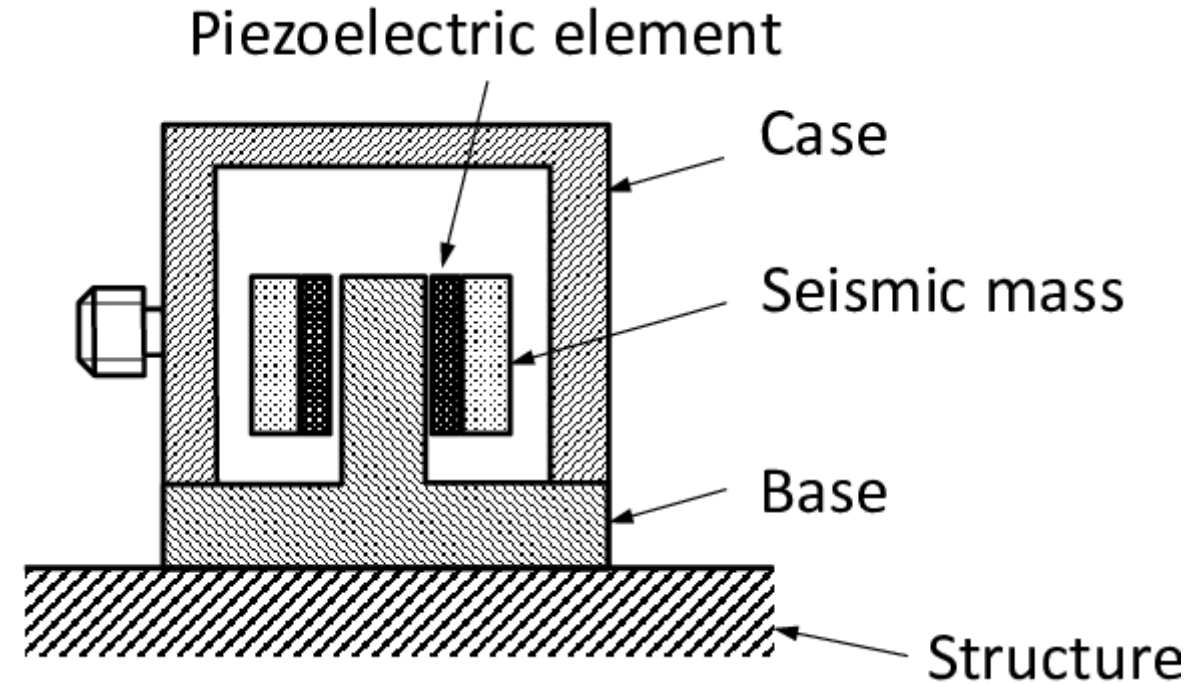
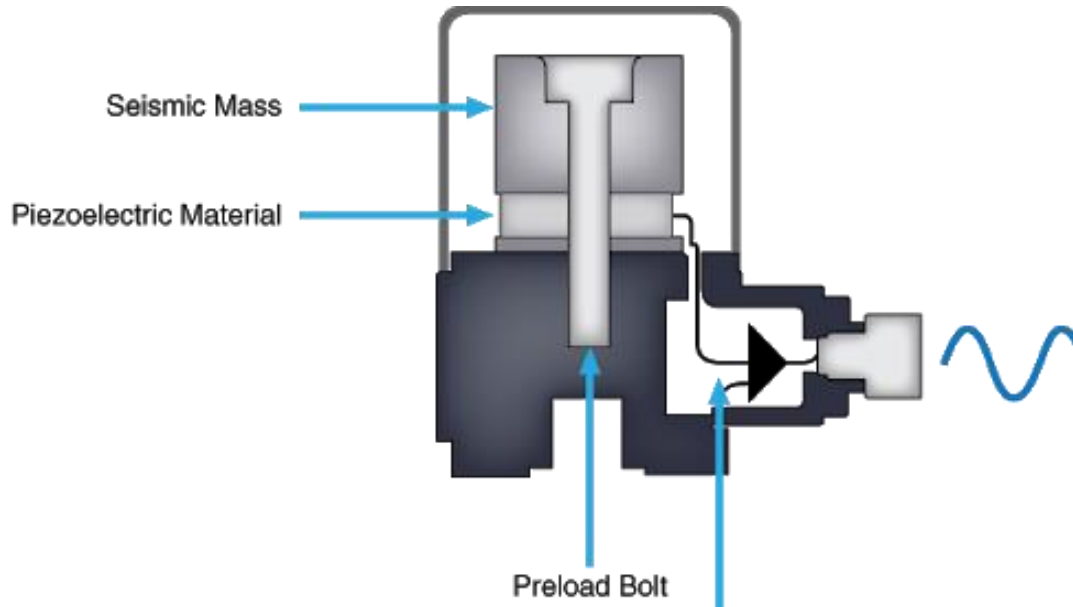
Titreşim Ölçümleri

- *Örnek Görsel:* Pervane palalarının ivmeölçer ve foto-takometre vasıtasıyla muayenesi



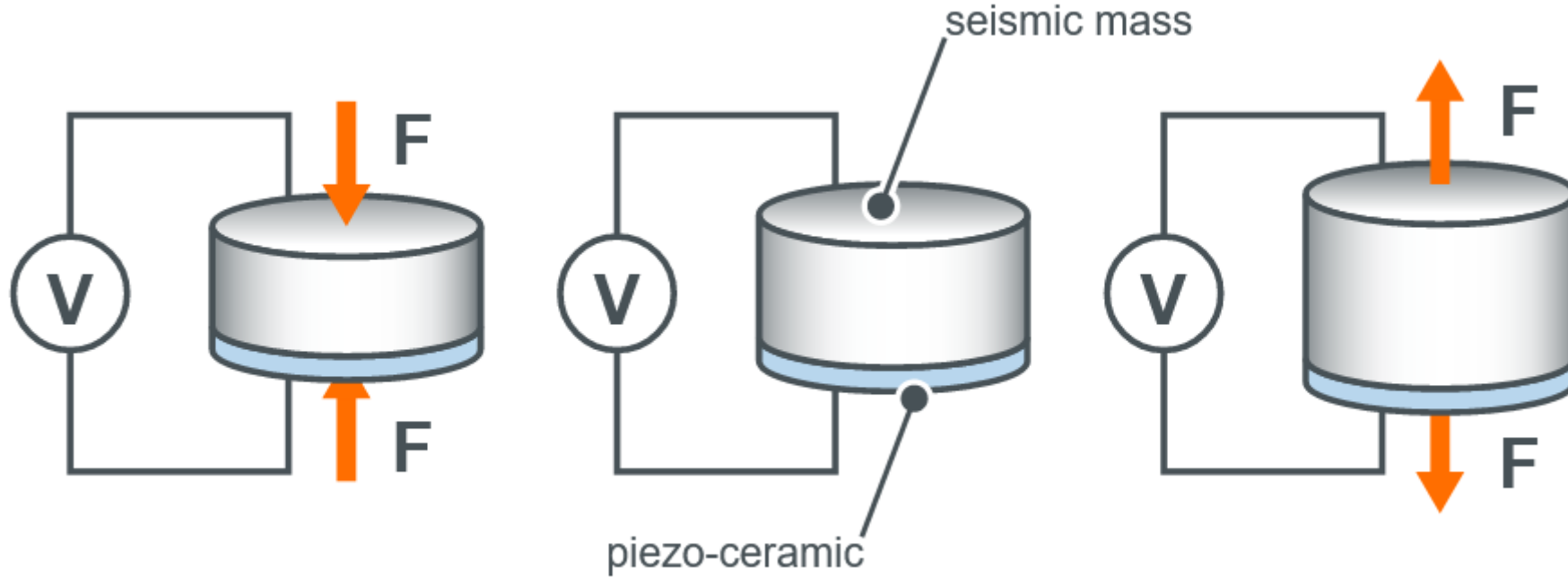
İvmeölçerler

- Bağlandığı yapıya uygulanan ivmeyi ölçen cihazlardır.
- Yapı kuvvete maruz kaldığında, sensör içindeki sismik kütle ile sensör gövdesi arasındaki piezoelektrik elemanın basınç altında meydana getirdiği gerilim (voltaj) değişimlerinin tespit edilmesi ilkesiyle çalışırlar.



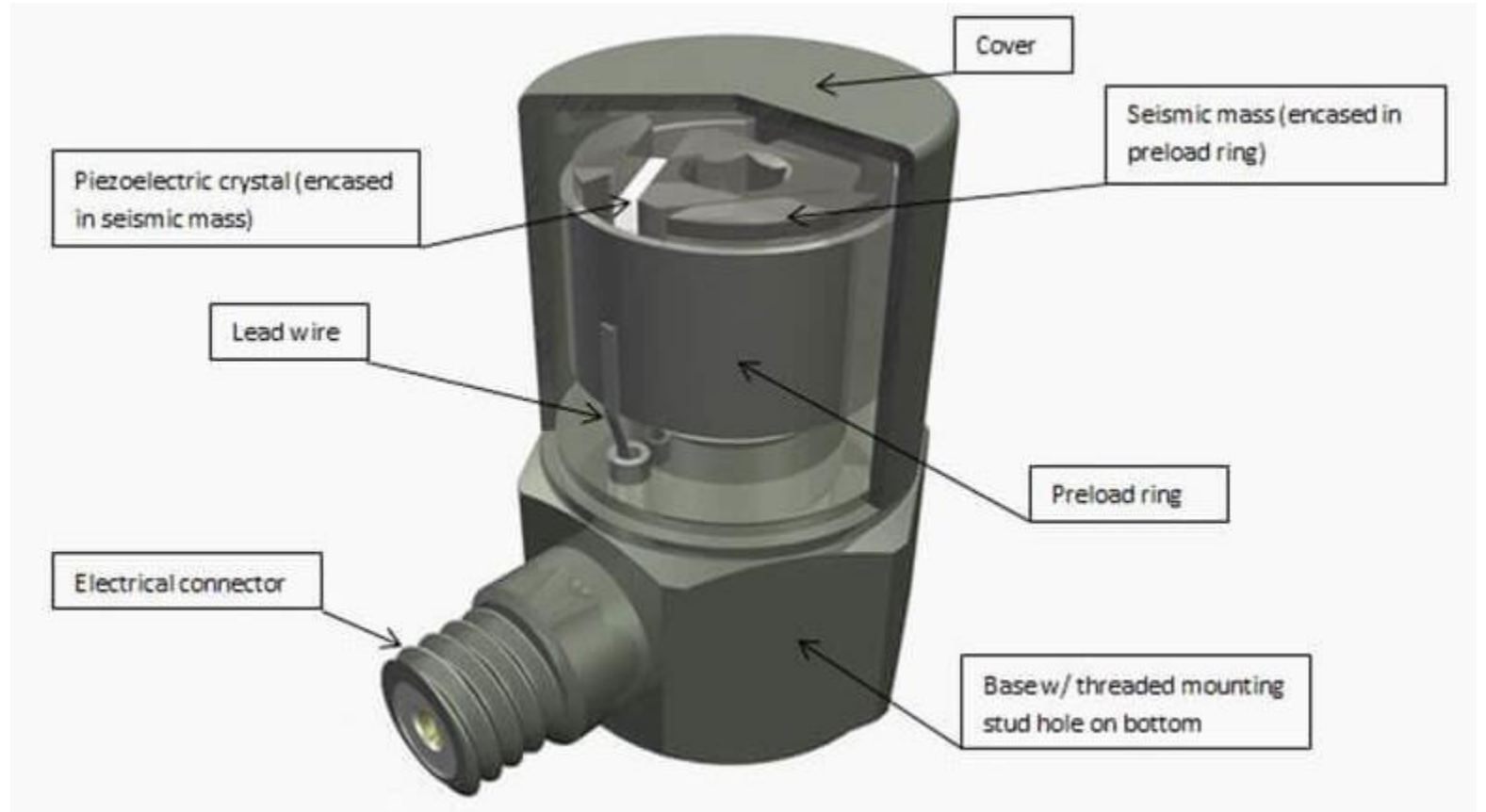
İvmeölçerler

- Piezo-seramik elemanın çalışma prensip şeması



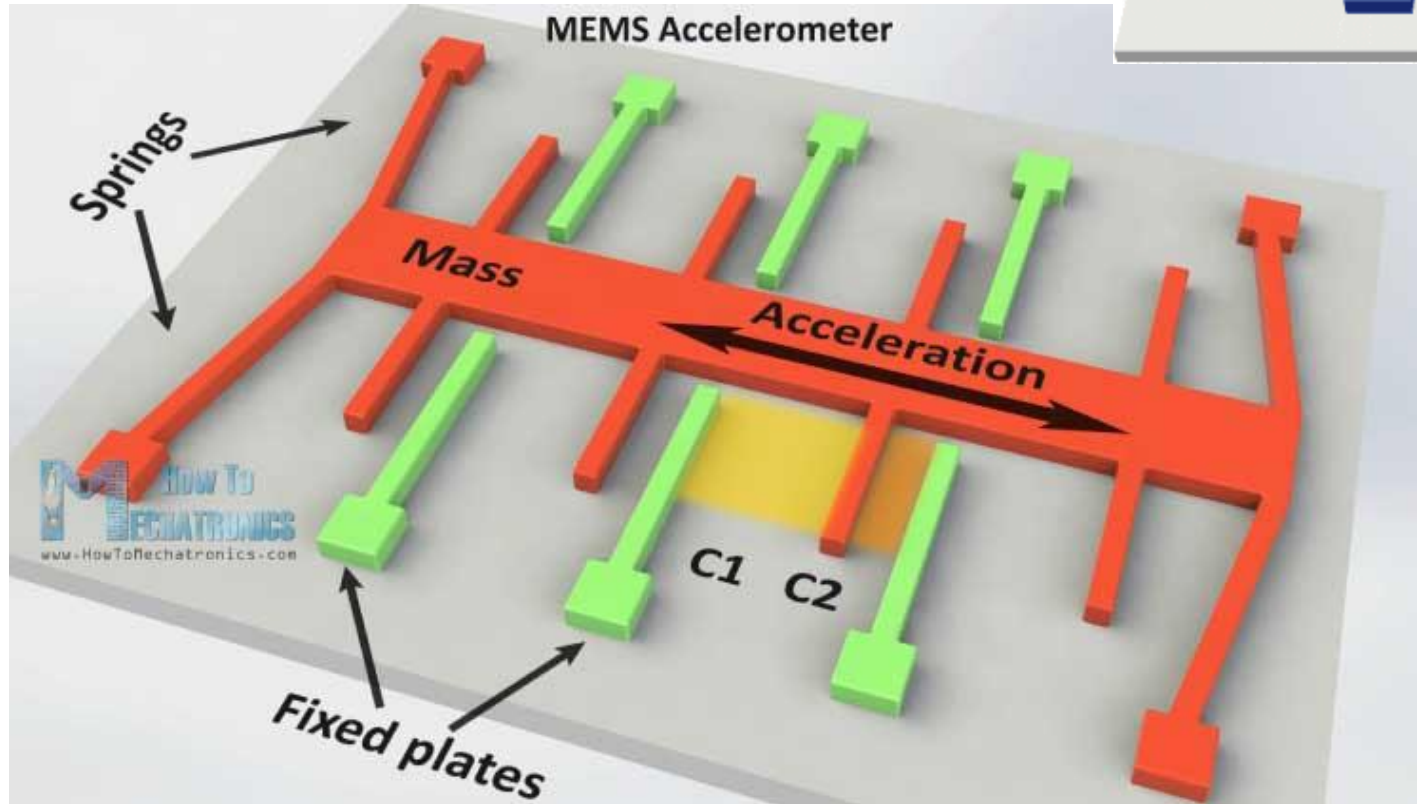
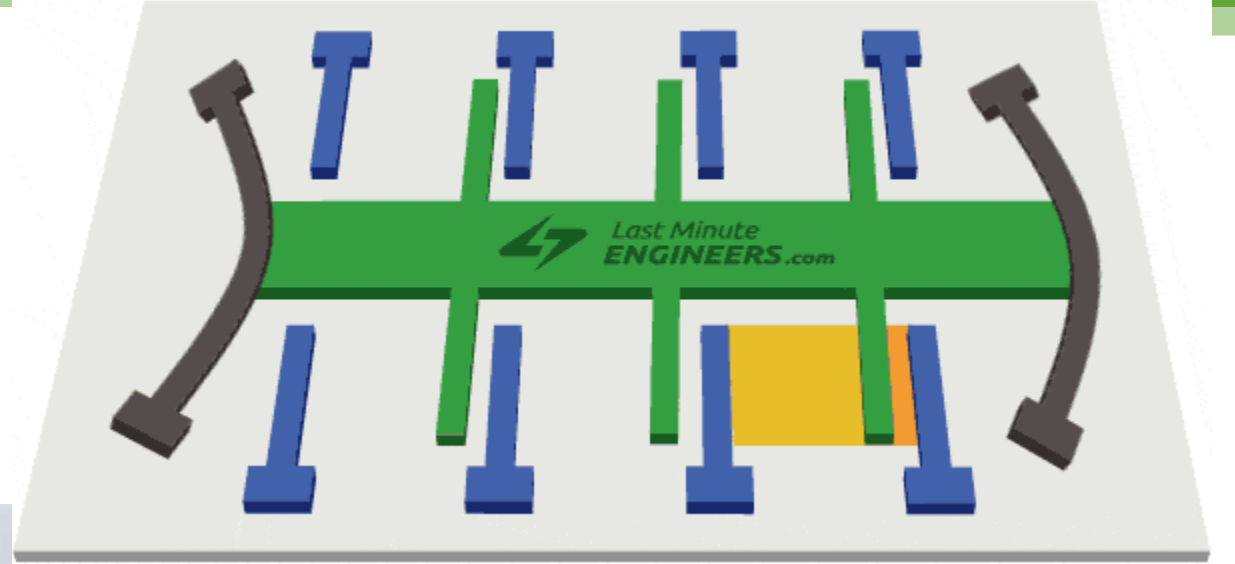
İvmeölçerler

- *Örnek GörSEL*: İvmeölçer iç yapısı



İvmeölçerler

- Örnek Görseller:



MEMS tipi ivmeölçer
iç yapısı

ELEKTRİKSEL YÖNTEMLER

Çatlak Derinliği Ölçümü
Strain Gauge Tekniği

TEMEL KAVRAMLAR: Elektriksel Özellikler

- Malzemelerin elektriksel direnç ve iletkenliklerindeki değişimlerin gözlenmesi suretiyle çeşitli ölçüm ve muayene teknikleri geliştirilmiştir.
- **Strain gage** tekniğinde, malzeme üzerine yapıştırılan ölçüm transdüserinin boyundaki uzamaya bağlı olarak değişen elektrik direnci (resistance) ölçülür.
- Kaplama kalınlığı ölçümü, **çatlak derinliği ölçümü** gibi muayenelerde yine elektriksel iletkenlik farkından faydalanan yöntemler vardır.

Çatlak Derinliği Ölçümü

Crack Depth Measurement

Çatlak Derinliği Ölçümü



Çatlak Derinliği Ölçümü

- Metal parçalarda önceden tespit edilen yüzey çatlaklarının derinliğini ölçmek için, kolay kullanımlı, elektriksel cihazlar ile yapılır.
- Manyetik Parçacık Testi (MT) veya Penetrant Sıvı Testi (PT) ve benzeri yöntemlerle ortaya çıkarılan çatlakların uzantısını, yönünü veya eğim açısını değerlendirmek veya artan çalışma süresi ile bir çatlağın büyümesini izlemek için kullanılır.

Çatlak Derinliği Ölçümü

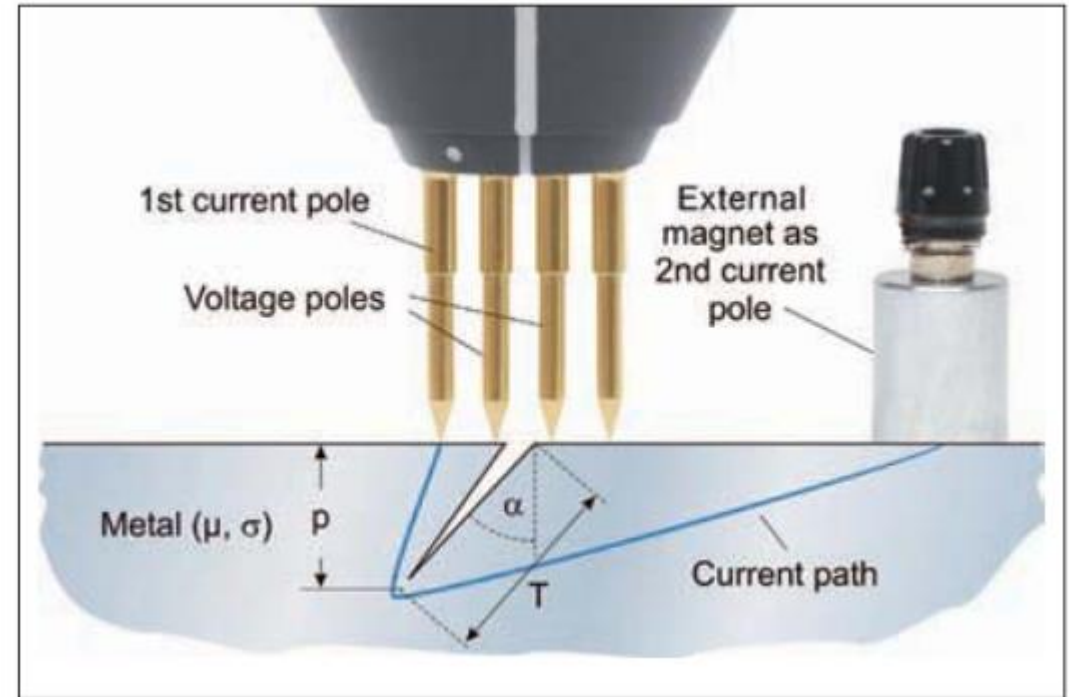
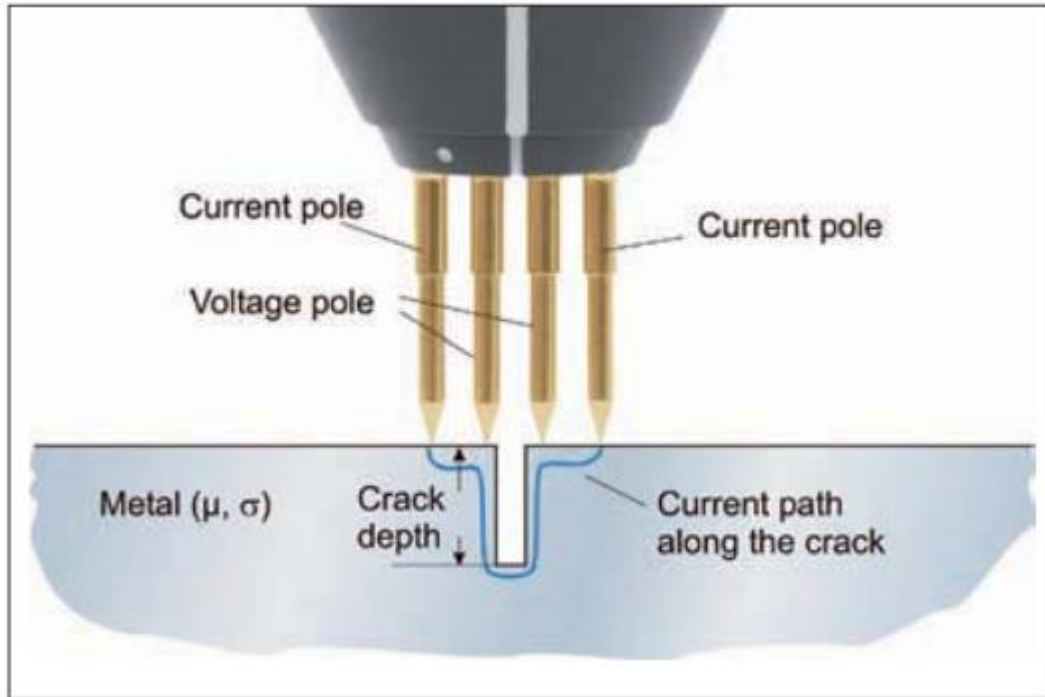
- Çatlağın iki ayrı tarafından sabit alternatif akım (AC) geçirilir.
- Çatlak sağında ve solunda bulunan **iki ek kutup arasındaki gerilim düşmesi çatlak derinliği ile orantılıdır.**
- Güvenilir bir ölçüm yapılabilmesi için çatlağın çevresindeki malzemenin elektrik ve manyetik özellikleri homojen olmalıdır.

Çatlak Derinliği Ölçümü / Uygulaması

- Çatlak genişliğinin ölçüm üzerinde neredeyse hiçbir etkisi yoktur.
- Eğimli çatlakların derinlik ölçümü için elektrik akımının frekansı iş parçasında daha geniş bir alanı kaplayacak şekilde otomatik olarak düşürülür.
- Harici akım kutup pozisyonuna bağlı olarak (çatlağa göre sola veya sağa yerleştirilmiş) çatlak açısını hesaplamak için kullanılan farklı voltaj düşümleri uygulanır.

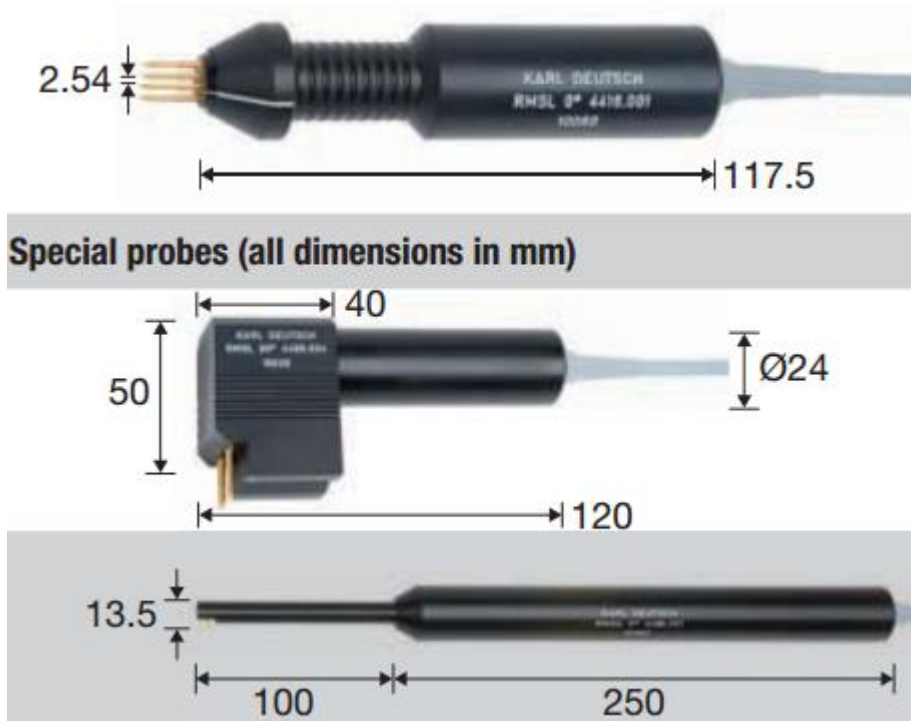
Çatlak Derinliği Ölçümü / Uygulaması

- Düz ve eğimli çatlaklarda derinlik ölçümü



Çatlak Derinlik Ölçer

Kullanılan Donanım (*Crack Depth Gauge*)



Crack depth measurement of an inclined crack after angle determination



Measurement of a normal crack on a small area

Strain Gage Tekniği

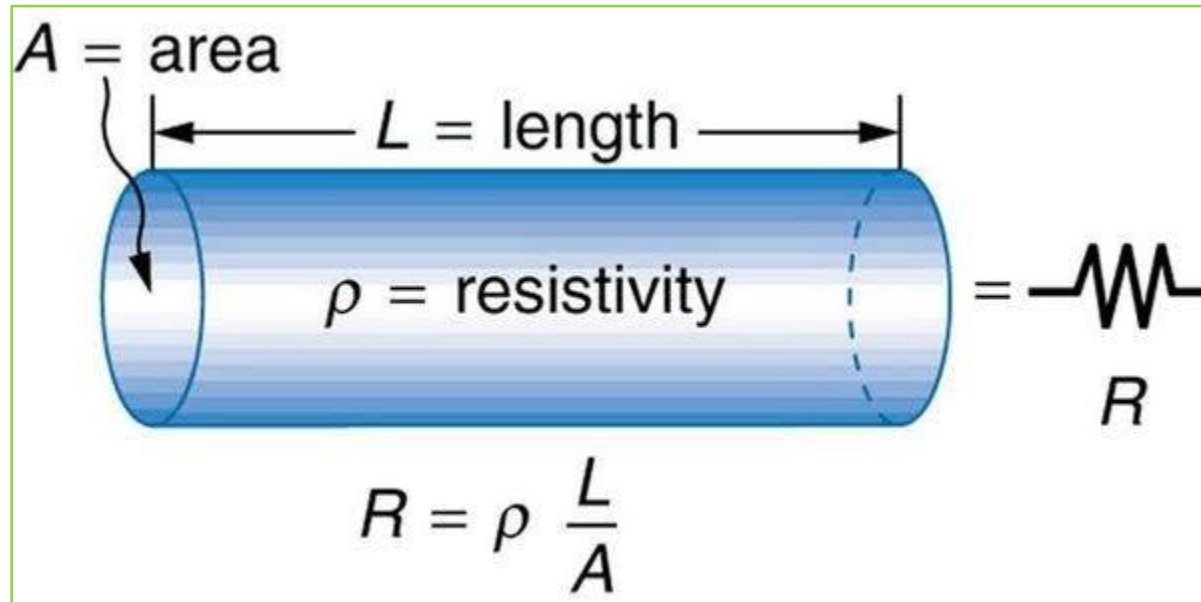
Strain Gauge

Strain Gage (Gauge) Tekniği

- Strain Gage'ler, kesiti çok küçük iletken bir telin çok ince bir şerit üzerine tekrarlı sarımlar şeklinde yerleştirilmesinden oluşur.
- Strain Gage'ler üzerine yapıştırdıkları parça (yüzey) ile birlikte deformasyona uğrarlar. Bu sırada Strain Gage'ler üzerindeki tellerin çapı ve uzunluğu değişir.

Strain Gage (Gauge) Tekniği

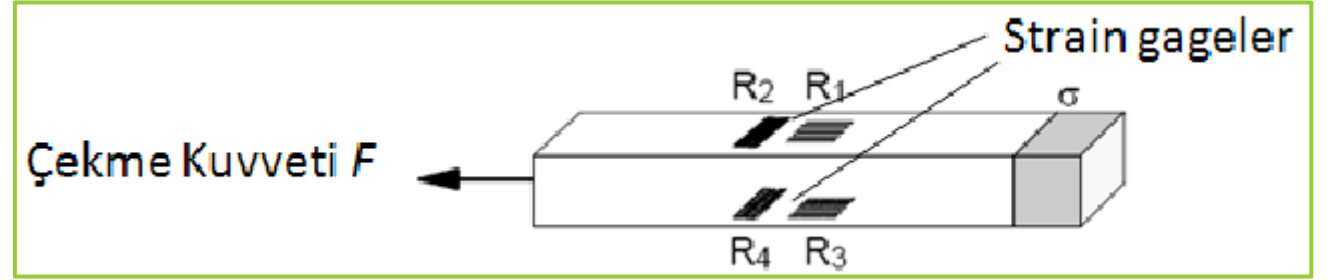
- Çapı ($A = \pi \cdot r^2$ Area) ve boyu (L : length) değişen tellerin direnci (rezistans) de değişerek üzerinden geçen akımın voltajını değiştirir.



Strain Gage (Gauge) Tekniği

- i. Voltaj değişimi ölçülerek tellerdeki ve dolayısıyla üzerine yapıştırılan parçadaki Şekil değişimi ölçülmüş olur.
- ii. Daha sonra elastisite teorisinin bilinen denklemleri kullanılarak ölçülen birim Şekil değişimi veya birim uzama (***strain***) mekanik gerilmeye dönüřtürölür.
- iii. Her bir Strain Gage, üretici firma tarafından belirlenmiş olan Şekil değişirme ile direnç arasında uygunluğu sağlayan ve gage faktörü (k) denilen, hassasiyet faktörüne sahiptir.

Strain Gage Tekniği



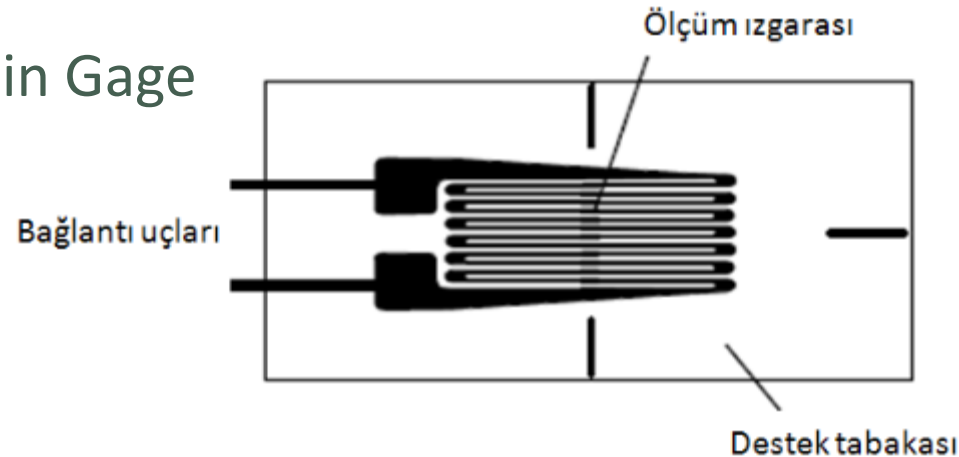
- Strain Gage ile birim uzama (şekil değiştirme) ve gerilme ölçümü

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}$$

Burada ε = Uzama , R_0 = Sıfır noktasındaki direnç (yük yok) Ω (Ohm) , ΔR =Yük uygulandıktan sonra dirençteki değişim Ω (Ohm). Metalik strain gage'ler için gage faktörü (k) genel olarak 2 civarındadır.

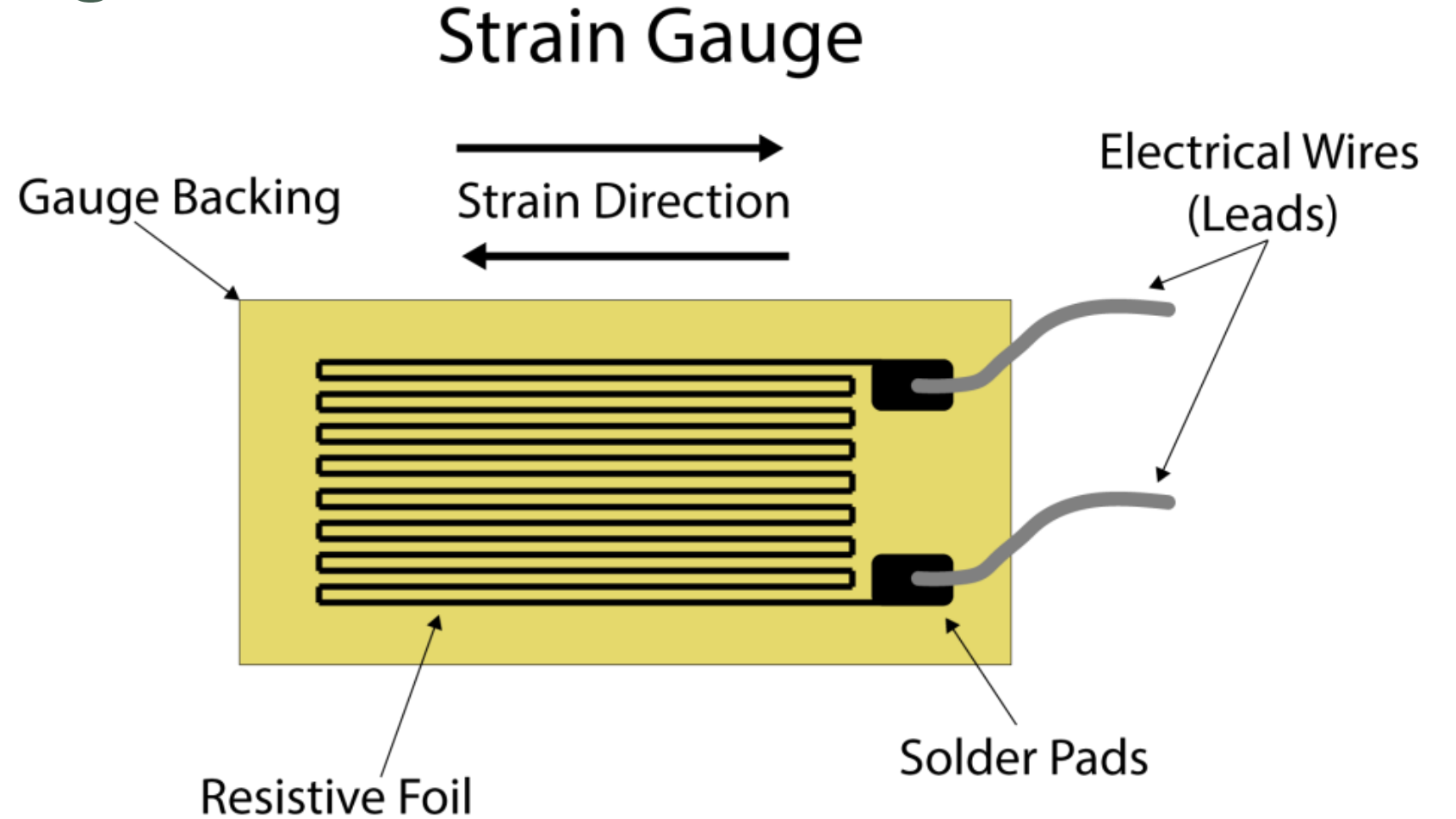
$$\sigma_{\zeta} = \frac{F}{A} \quad \sigma_{\zeta} = E \cdot \varepsilon$$

- Yaprak tipi Strain Gage



Strain Gage Tekniği

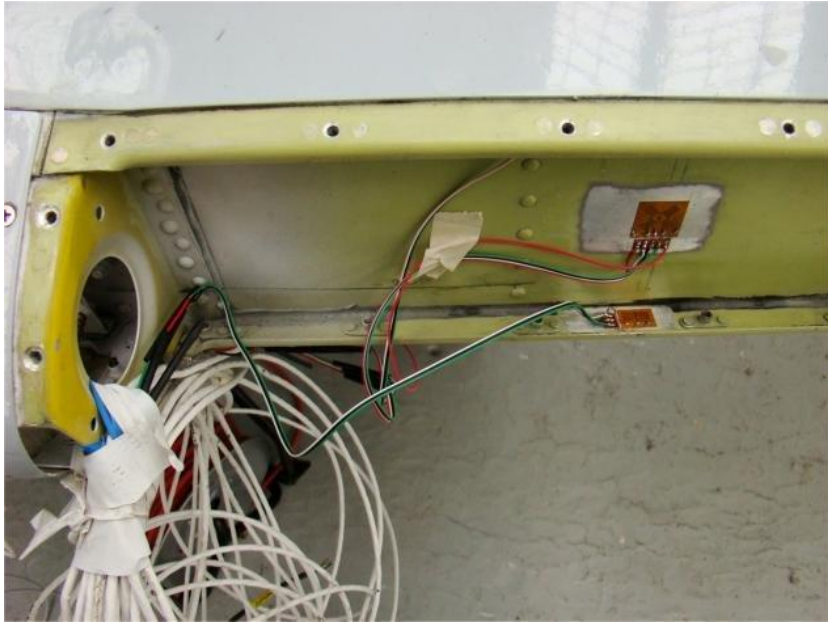
- *Örnek Görsel:*
Strain Gage Yapısı



Strain Gage Uygulaması

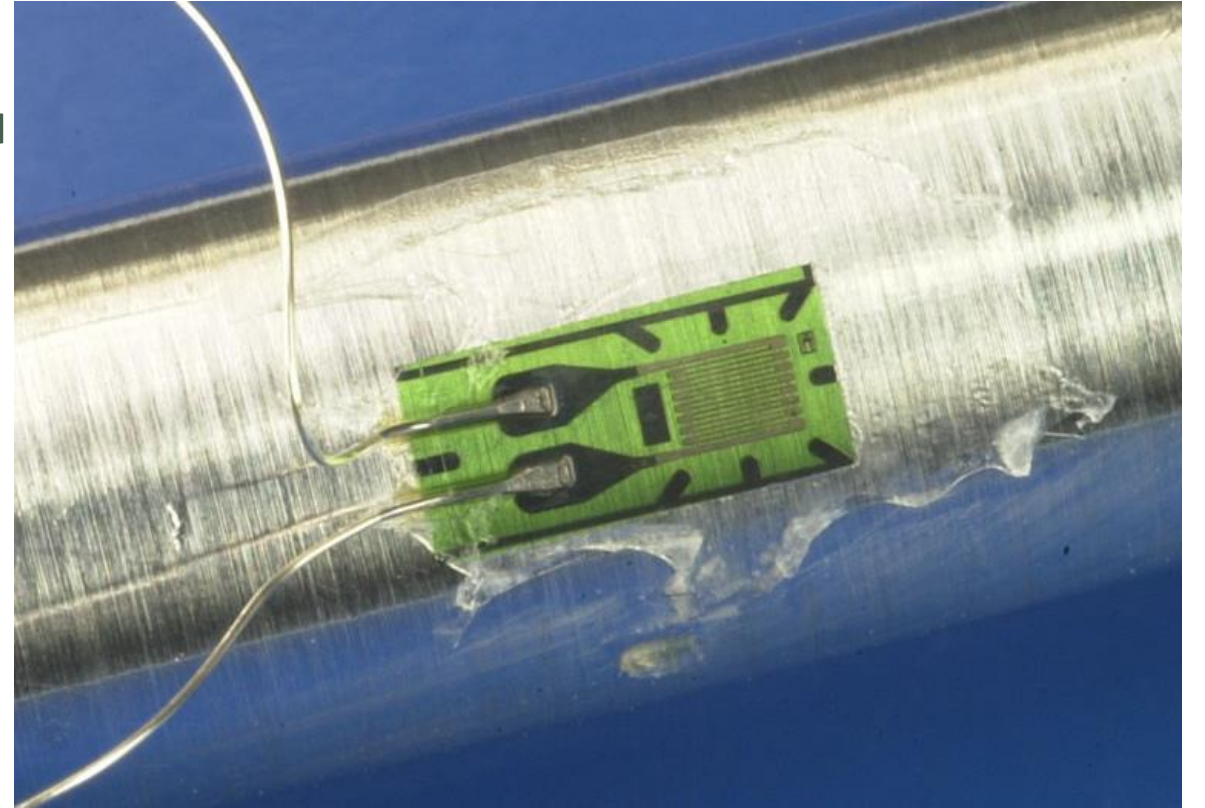
Örnek Görseller:

- Strain Gage'lerin yüzeylere uygulanması



Soldaki Fotoğraf:

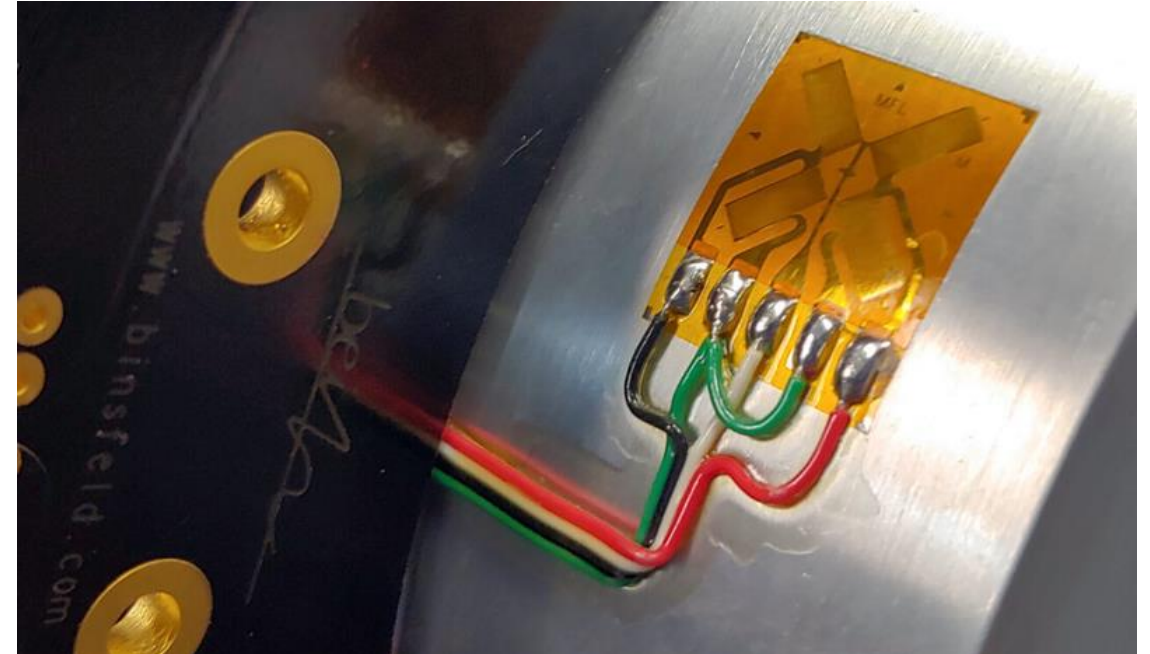
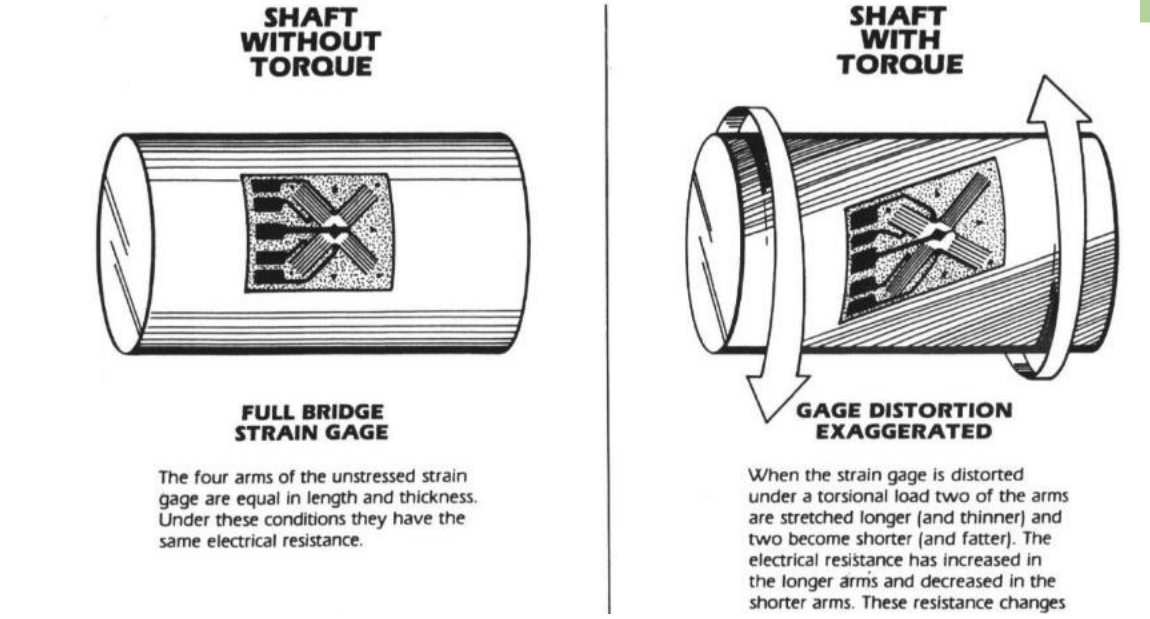
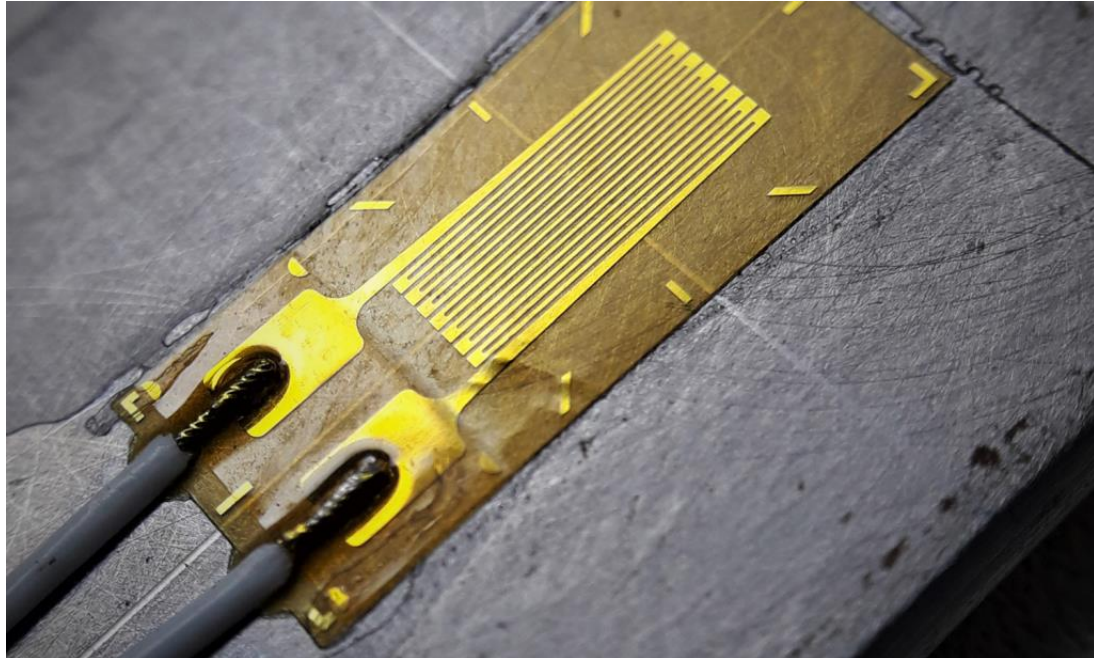
Uçak kanat orta bölüm ön spar üzerine yapıştırılmış strain gage



Strain Gage Uygulaması

Örnek Görseller:

- Yüzeye yapıştırılmış tekli strain gage (solda) ve rozet tipi full-bridge strain gage (sağda)



Elektromanyetik Dalga Esaslı OPTİK YÖNTEMLER (Işık / Lazer)

3B Tarama

Lazer İnterferometri

3D Scanning

3B Tarama / Optik Tarama

Optik / 3B Tarama

3 Boyutlu tarama cihazları içerisinde optik tarayıcı olarak adlandırılan sistemler, beyaz ışık tarayıcı sistemi olarak da geçmektedir. Ancak son dönemlerde gelişen teknoloji ile beyaz ışık yerine farklı renklerde ve farklı teknoloji ile çalışan ışık kaynakları tercih edilmektedir. Örneğin; beyaz, mavi kırmızı ve yeşil ışık teknolojisi kullanılmaktadır.

Optik / 3B Tarama

- *Örnek Görsel:*
3B tarama ile kontrol ve ölçme.



3B Tarama / Temel Prensiptir

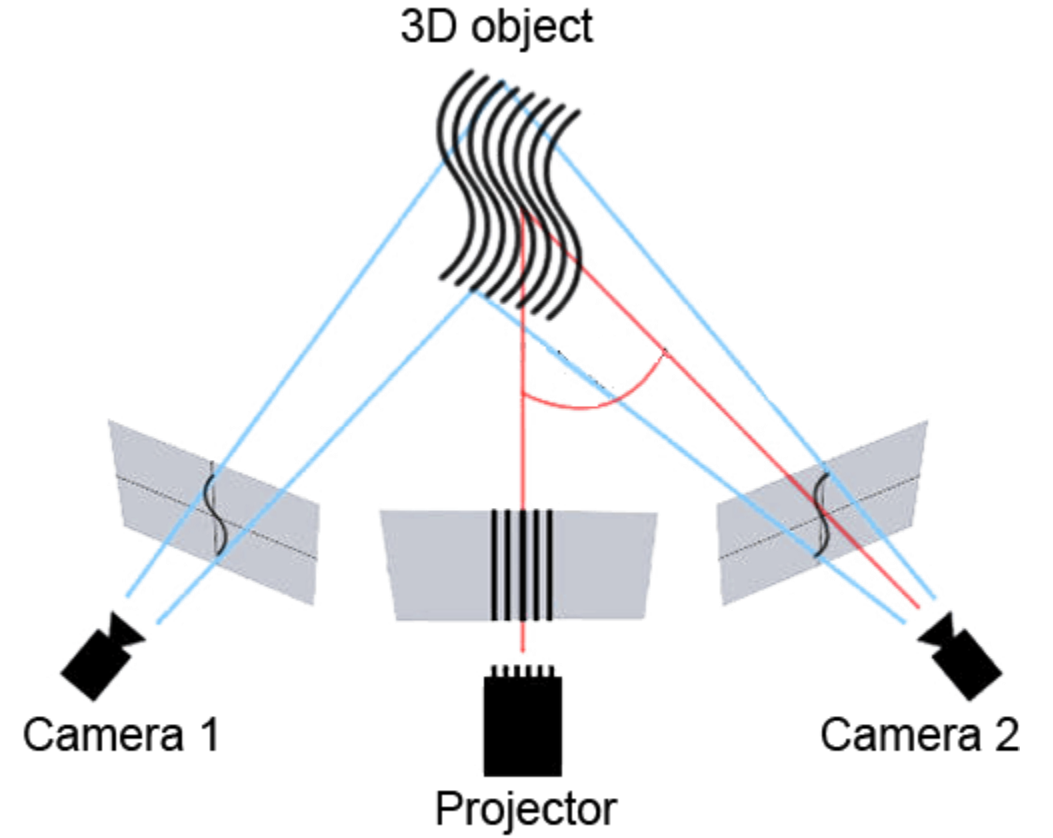
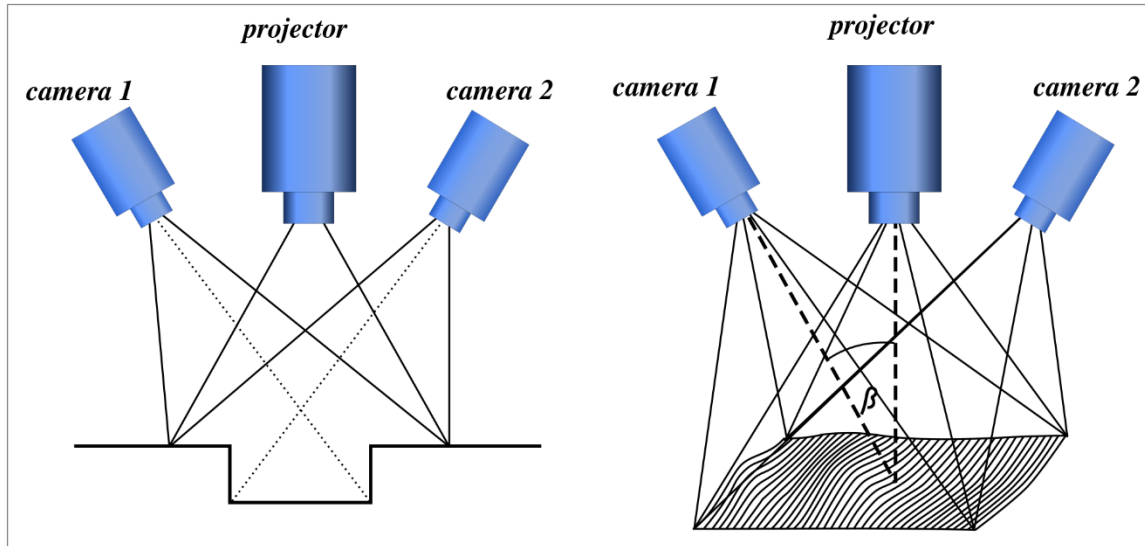
Işık kaynağı olarak kullanılan projeksiyon, parça yüzeyine ışık düşürürken, içerisindeki bir sistem ışık kaynağının önünde ızgara şeklinde gölgelerin oluşmasını sağlar (*structured light*) ve bu esnada sistemin kamerası da birden fazla görüntü alır. Elde edilen görüntüler, görüntü işleme teknolojisiyle sayısallaştırılır ve milyonlarca nokta elde edilir. Kullanılan renkli ışık kaynağının rengi ve teknolojisi, parça yüzeyinden geri yansımaları ve dış ortam ışık kaynağından etkilenme oranını değiştirmektedir.

3B Tarama / Temel Prensipte

Örnek Görseller:

Yapılandırılmış ışık ile 3B tarama

Işık kaynağı olarak kullanılan projektörden gelen yapılandırılmış ışık, taranan parçanın yüzeylerinden yansır; yansıyan ışık, ikili (stereoskopik) kamera sistemi ile tespit edilir.



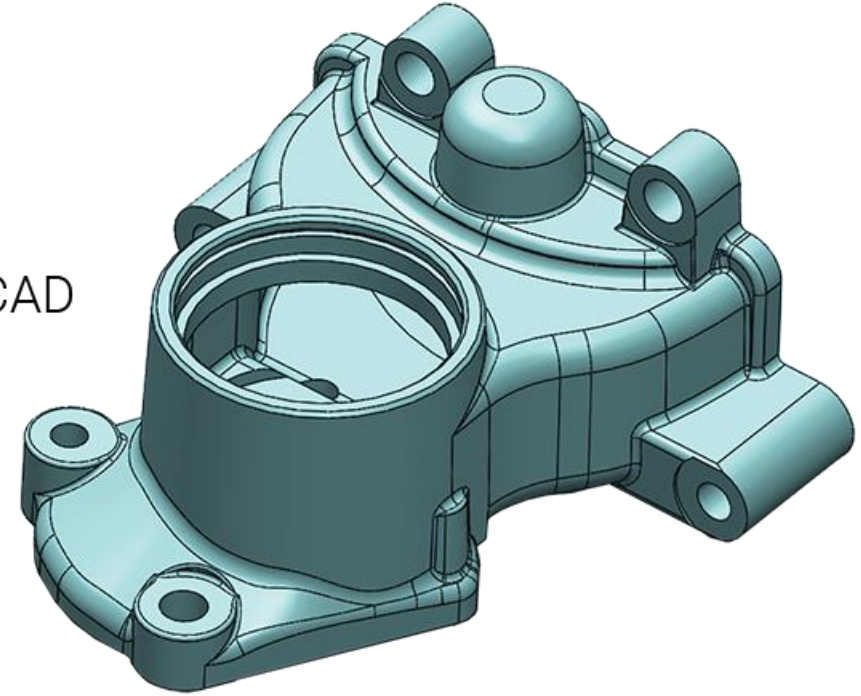
Optik / 3B Tarama

Boyutsal Kontrol



Scan Data

→
Scan to CAD



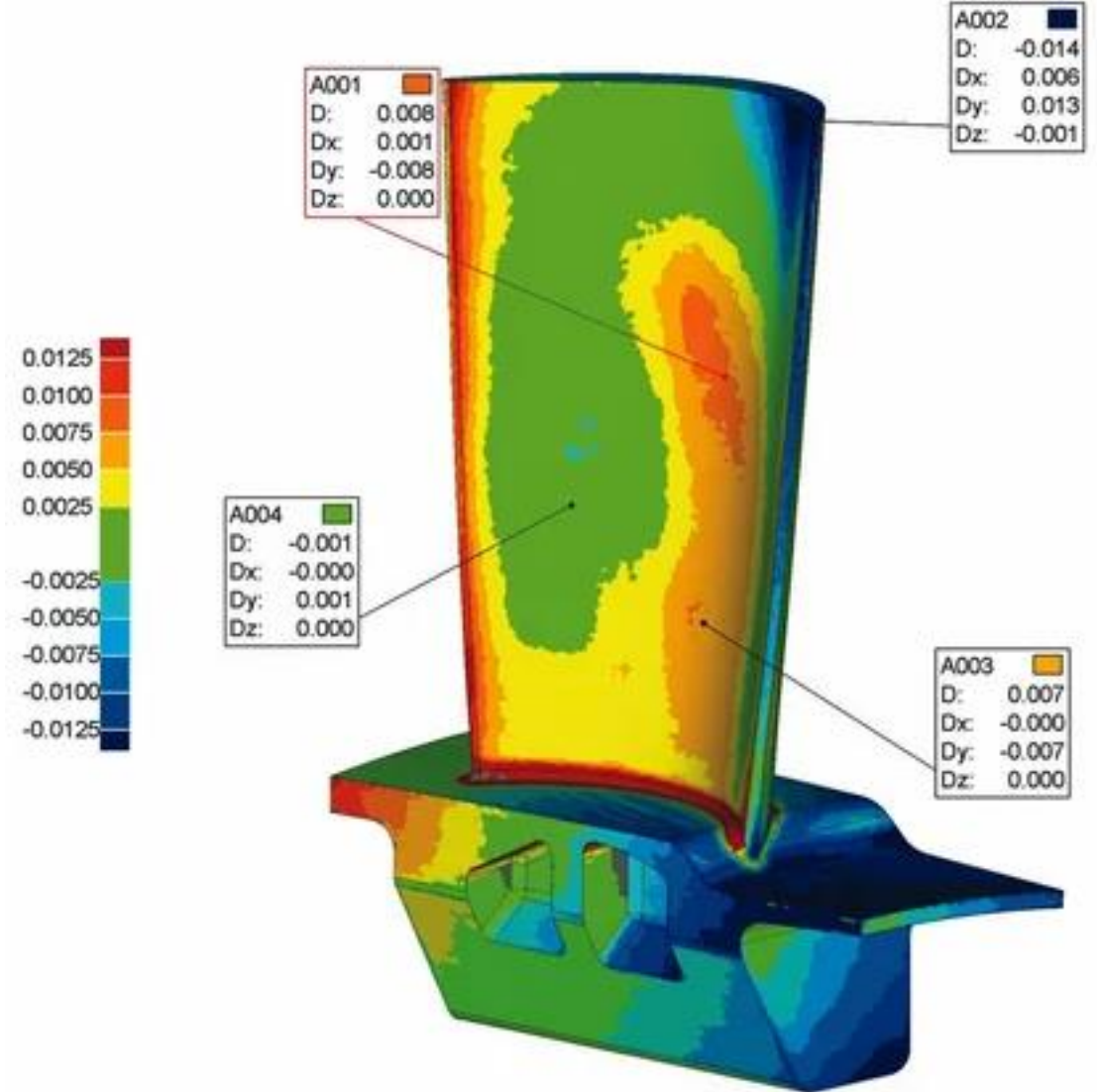
CAD Model

- Tarama verisinin (*Scan Data*) CAD Model (*CAD Data*) ile bilgisayar ortamında karşılaştırılması ile komponentlerin boyutsal kalite kontrolü yapılabilir.

Optik / 3B Tarama

Boyutsal Kontrol

- Nokta bulutu (*point cloud*) şeklindeki tarama verisi, **boyut ve biçim muayenesi** için referans geometrik model (CAD veya STL dosyası) ile karşılaştırılır.



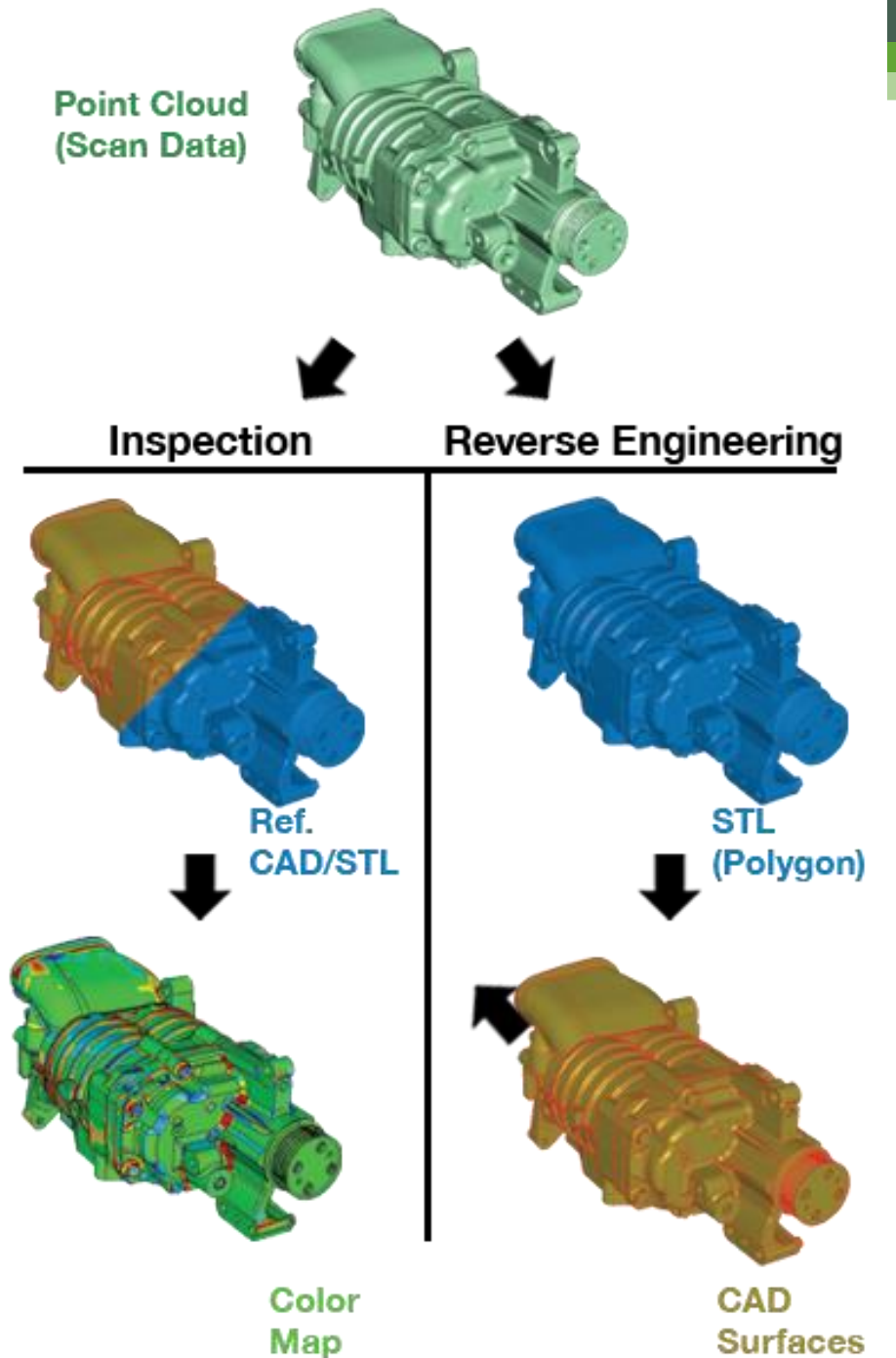
Optik / 3B Tarama

Boyutsal Kontrol (inspection)

- Yazılım, karşılaştırma sonucunu görselleştirip, renk haritası olarak kullanıcıya sunar.
 - Scan Data (Point Cloud) >> Inspection >> CAD Model >> Reference Check >> Results (Color Map)
 - *Tarama Verisi (Nokta Bulutu) >> Muayene >> Geometrik CAD Modeli >> Karşılaştırma >> Sonuçlar (Renk Haritası)*

Tersine Mühendislik (reverse engineering)

- Tarama noktaları birleştirilerek poligonlar oluşturulur (STL dosyası).
- Poligonlar yüzeylere dönüştürülür (CAD data).



Optik / 3B Tarama

Optik Taramanın Avantajları:

- 3 Boyutlu Tarama ile elde edilen veriler, bakım ve kontrol elemanlarına tersine mühendislik, **boyutsal kalite kontrol** ve **yüzey muayenesi** gibi farklı alanlarda önemli kaynaklar sağlamaktadır.
- Parça ve sistem proje süresince hareket edebilir.
- Konfigürasyonuna göre en yüksek çözünürlüklü veri bu yöntemle elde edilebilir.
- Parça boyut limiti yoktur. Birkaç mm'den metrelerce büyüklükteki parçalar aynı sistem ile taranabilir.

Optik / 3B Tarama

Sınırlamaları:

- Yüzeysel bir yöntemdir.
- Parça boyutu büyüdükçe hassasiyet düşer ve boyutsal hata payı artar.
- Ortamdaki titreşim ve darbeler boyutsal hassasiyeti olumsuz etkiler.

UÇAK DIŞ YÜZEY TARAMA UYGULAMASI

Video: Üç Boyutlu Tarayıcı ile Dış Yüzey Muayenesi

<https://www.youtube.com/watch?v=YyPWyjkvy18>

00:05 – 01:20

(3D scanning solution for aircraft surface inspection)

UÇAK DIŞ YÜZEY TARAMA UYGULAMASI

3B Tarayıcı
ile Dış Yüzey
Muayenesi



Laser Interferometry

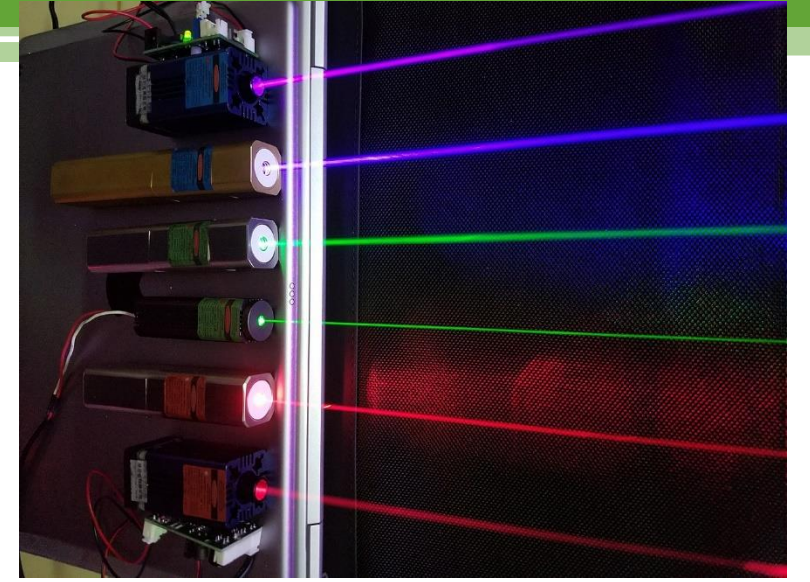


Lazer interferometri

TEMEL KAVRAMLAR: **Lazer**

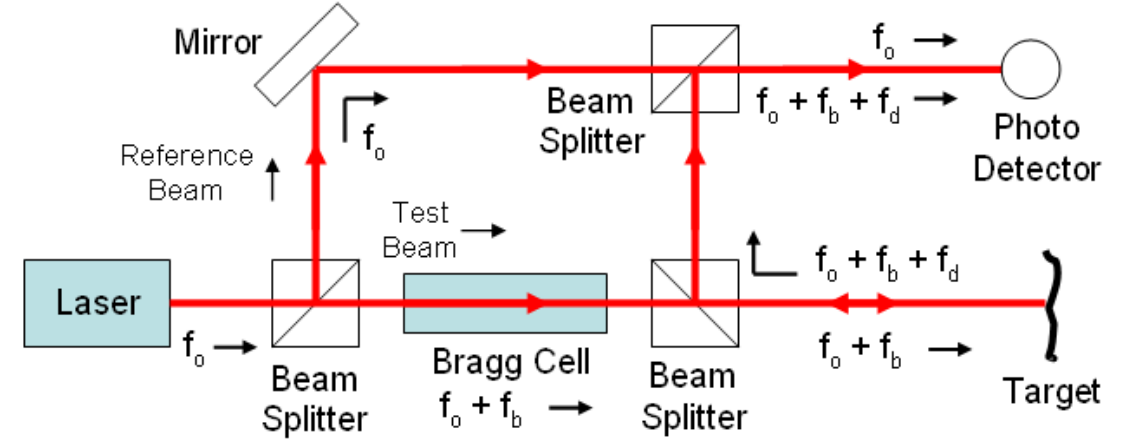
- İngilizcesi "laser" olan lazer, ismini "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" tamlamasının baş harflerinden alan bir kısaltmadır.
- Bu tamlama "ışığın uyarılmış ışımaya ile yükseltilmesi" anlamına gelmektedir. Lazerler, fotonları uyumlu bir hüzmeye şeklinde oluşturur.
- Lazeri diğer ışık kaynaklarından ayıran ana özellik lazer ışınının "tutarlı, odaklı" (coherent) olmasıdır: **Bu ışık hüzmelerinin çok ufak bir bölgeye odaklanabilmesini ve tek renk ışık üretilebilmesini sağlar.** Lazerler aynı zamanda femtosaniye darbeler ("ultra kısa darbe") üretebilmektedir.
- Günümüzde lazer ışını endüstriyel süreçlerde, mühendislik alanında, tıpta, bilimsel araştırmalarda, meteorolojide, fiber optik iletişim, holografide ve savunma donanımlarında kullanılmaktadır.

TEMEL KAVRAMLAR: Lazer



- Lazer kelimesi "ışığın uyarılmış ışınla yükseltilmesi" tamlamasının İngilizce baş harflerinden ortaya çıkmıştır. Bu kullanımdaki ışık kelimesi sadece görünür ışığı ima etmez; **elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerine tekabül eden frekanslar için lazerler üretilebilir**. Bunlara kızılötesi lazerler, morötesi lazerleri, X ışını lazerleri ve varsayımsal gama ışını lazerleri örnek gösterilebilir.
- Kendi başına ışık üreten lazerler teknik olarak optik yükseltgeçlerden ziyade optik osilatörlerdir.

Lazer

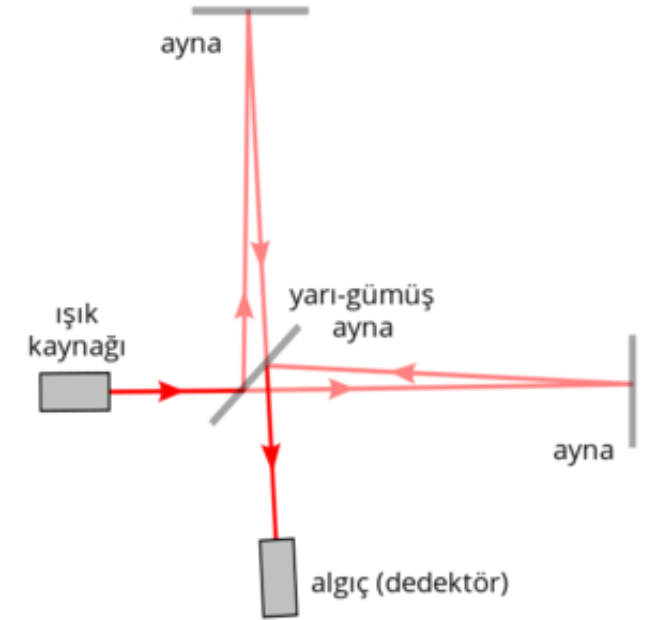


- Lazerler, ölçme tekniği ve tahribatsız muayene açısından, **interferometri** tekniği uygulanarak mekanik gerilme ve birim uzamaların ölçülmesi (*stress/strain measurement*), titreşim ölçümü (*vibrometry, velocimetry*), malzeme içindeki süreksizliklerin tespiti (**shearography**) gibi alanlarda kullanım yeri bulur.

Lazer

İnterferometri

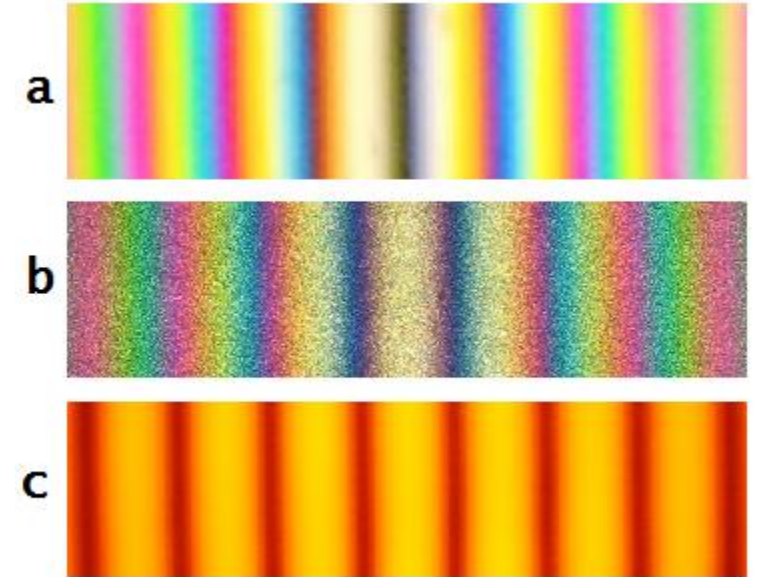
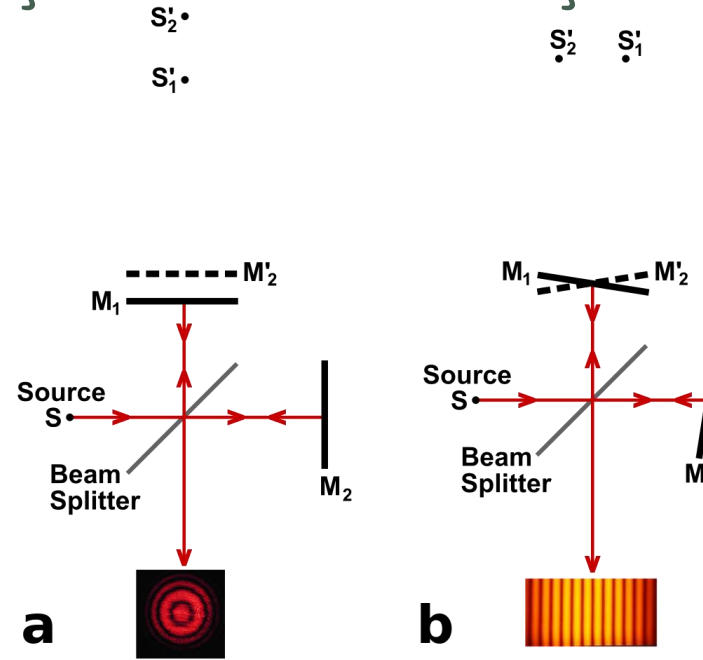
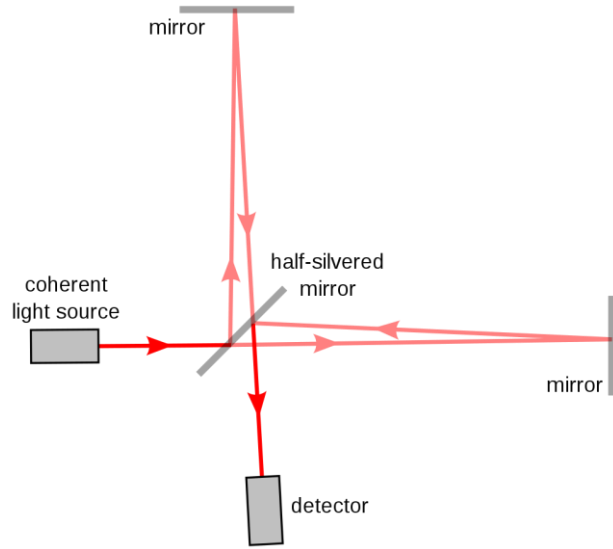
- Ölçüm ve bilgi çıkarımı için elektromanyetik dalgaların üst üste getirildiği tekniktir.
- **Girişimölçer** ya da **İnterferometre** ışığın girişim özelliğinden faydalanılarak çok küçük mesafelerin ve maddelerin kırılma indislerinin ölçümünde ve saydam cisimlerin yüzey düzgünlüğünün kontrolü için kullanılan bir ölçü aletidir.



Lazer

İnterferometri

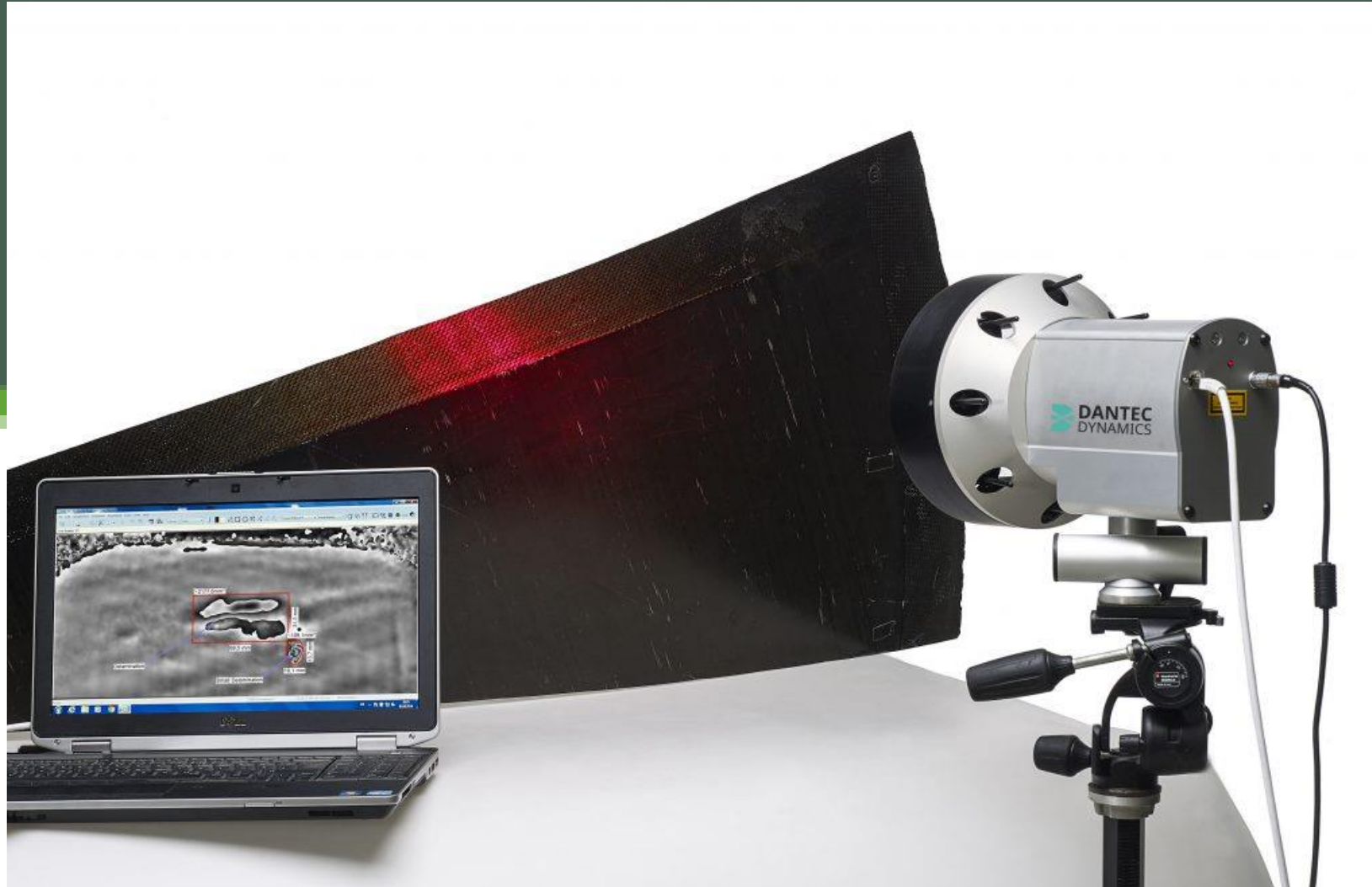
- Ayna sürekli yaklaştırılırsa karanlık ve aydınlık görünüm birbirini takip eder. Kararma sayısı, aynanın yaklaşma miktarını, dalga boyuna bağlı olarak verir. Bu durumda ayna, mikrometre olarak kullanılır. Girişimölçerde lazer ışını kullanılarak ölçümler daha duyarlılaştırılmıştır.



Laser Shearography NDT

Lazer Işını ile Yüzey Muayene Yöntemleri

Laser Shearography NDT



Shearography – Laser Shearography NDT

Lazer ışını ile yüzey hatalarının tespit edilmesi

Kaynak:

<https://bias.com.tr/48/81/dantec-dynamics/shearography-tahribats%C4%B1z-muayene.php>

<https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/laser-shearography>

<https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/laser-shearography-ndt/>

Shearography

- Shearography, homojen olmayan malzemeler içindeki malzeme süreksizliklerinin ve anomalilerinin hızlı ve kesin biçimde gözlemlenmesini sağlayan bir tahribatsız muayene (NDT) tekniğidir.
- Lazer ışığı kullanılarak, bir kesme girişimölçer (*shear interferometer*) aracılığıyla, oldukça küçük (mikrometre altı) düzlem dışı **yüzey değişimleri tespit edilebilmektedir.**

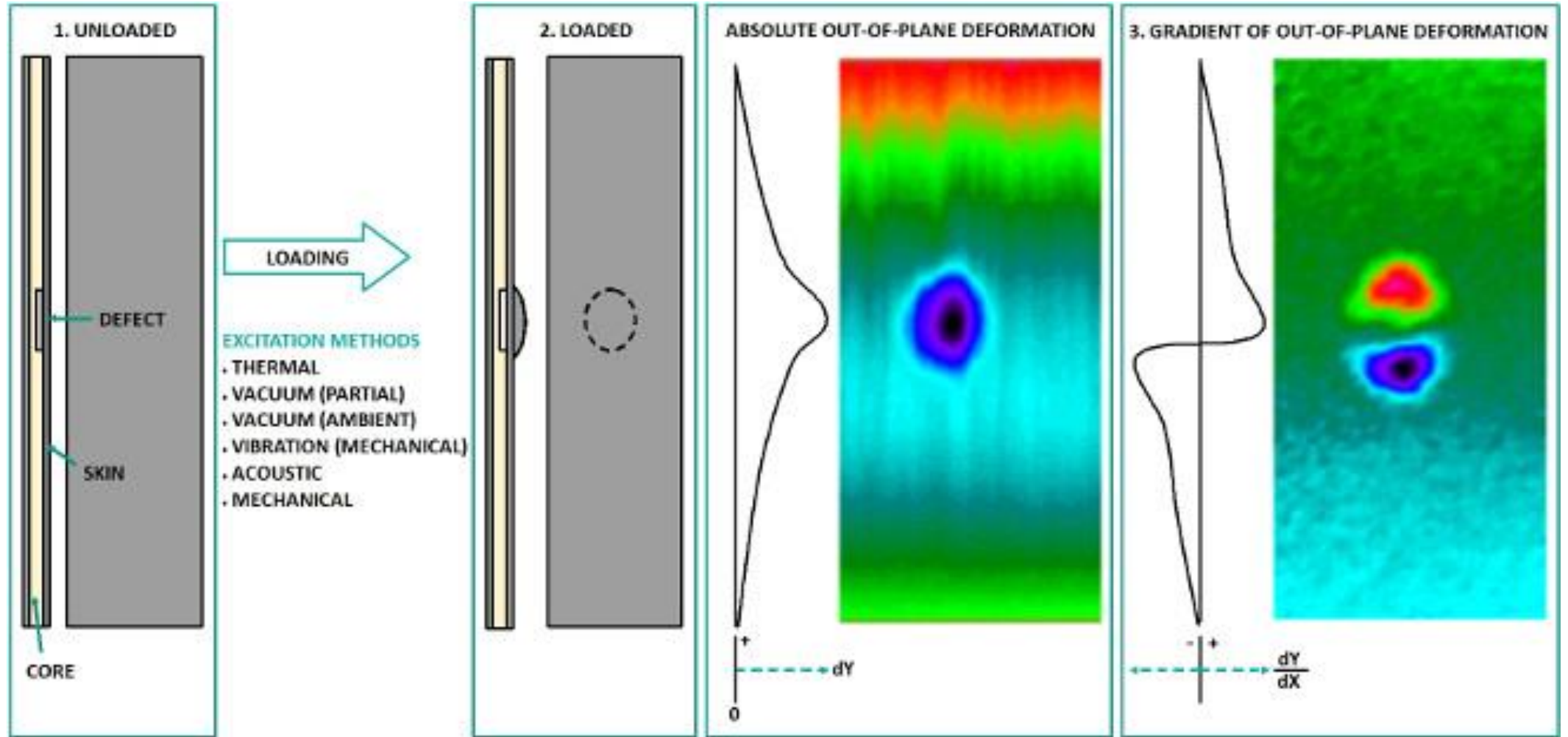
Shearography

- Uygun bir yükleme altında, test yüzeyi üzerinde orantılı birim şekil değişimleri (gerinim / **strain**) oluşur. Eğer malzeme süreksizlikleri mevcutsa, yüzey, bu bölgelerde eşit deformasyona uğramaz. Bu bilgi, bir kesme (*shear*) girişimölçer aracılığıyla lazer ışığının fazındaki değişim olarak değerlendirilir.
- Shearography, kullanıcıların hem büyük hem de küçük boyutlu, karmaşık geometrilere sahip parçalar üzerinde etkili ve neredeyse gerçek zamanlı ölçümler yapabilmelerini sağlar.

Laser Shearography - Uygulama

- Yükleme yapılmadan önce, yüzeyin bir görüntüsü referans olması amacıyla alınır. Yükleme sonrasındaki durumlar, bu referans görüntü ile karşılaştırılır.
- Yükleme öncesi ve sonrası yüzey yapısı karşılaştırılarak, oluşan düzlem dışı gerinme, dolayısıyla da malzemedeki anomaliler (hata, çatlak vb.) tespit edilebilir.

Laser Shearography - Uygulama



Lazer ışını ile yüzey muayenesi

Laser Shearography

- Shearographic bir inceleme, **bileşen yüzeyinin gerilime maruz bırakılmasını veya uyarılmasını (*excitation*)** gerektirir.
- Gerilme oluşturmak için, **mekanik yük, termal yük, bölgesel vakum, ortam vakumu, mekanik titreşim ve akustik titreşim** tekniklerinden biri kullanılabileceği gibi başka **tahrik yöntemlerinden** de faydalanılabilir.

Laser Shearography

- Bu **uyaranların çeşitliliği**, *shearography* yönteminin diğer tahribatsız muayene yöntemlerine oranla daha **esnek ve geniş olanaklı** olmasını sağlar.
- Yük tipi ve miktarı, **farklı malzemeler için optimize** edilebilir.
- Doğru uyarma metodu kullanıldığında, ölçüm görüntüleri, eğer mevcutsa, yüzey altı zayıflık ve anomalilerini gösterir.

Laser Shearography

- Ölçüm sonuçları gerçek zamanlı görüntülenebileceği gibi, son işlem aşamasında, önceden kaydedilmiş ölçüm adımları olarak da incelenebilir.
- Bu kademeli inceleme yöntemi, yüzeydeki hareketin yönünü yorumlamak ve kusurların daha ayrıntılı çözünürlükte görülebilmesini, böylece kusurların boyutunun daha doğru tahmin edilmesini sağlar.

Laser Shearography

Özellikleri:

- Hızlı ve geniş alan tarama (+)
- Temassız (+)
- Yüksek hassasiyet (birkaç mikrometre) (+)
- Farklı malzeme tiplerine uygun (+)
- Sadece yüzeylerdeki hasar ve kusurların tespiti (-)
- Test parçasının yüklenmesi (tahrik) gerekliliği (-)

Laser Shearography

Kullanım alanları:

- Havacılık
- Kompozit, metal, elastomer malzemedeki yapılar
- Rüzgar türbinleri
- Sanayi ve imalatta kalite kontrol
- İnşaat endüstrisi

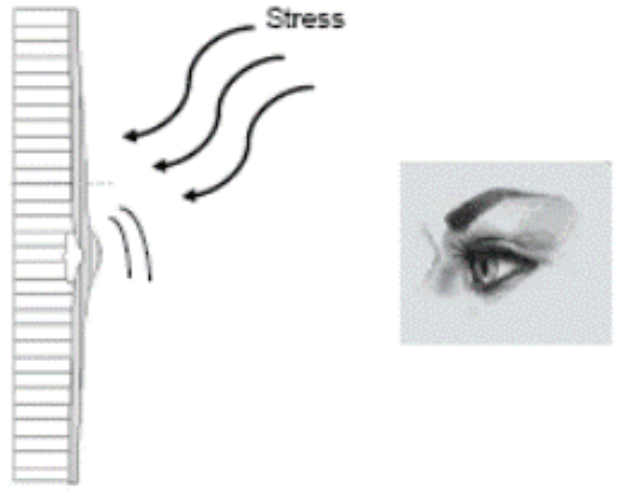
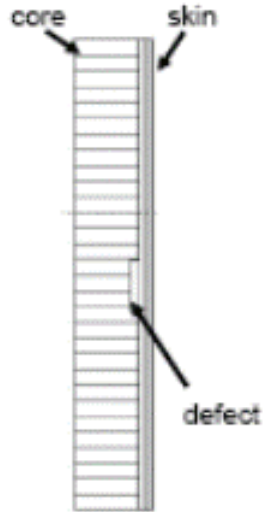
Laser Shearography

Örnek Donanım:



Laser Shearography

Örnek Donanım:



Kaynaklar: (web)

- MCE 476 - Nondestructive Testing Methods / Doç.Dr. Mostafa RANJBAR / AYBÜ
- https://aybu.edu.tr/mranjbar/dosya_listesi-297-531-mce-476---nondestructive-testing-methods.html
- Nondestructive Evaluation Techniques / Iowa State University
- <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/index.xhtml>
- NDT Encyclopedia / Open Access Portal of Nondestructive Testing (NDT)
- <https://www.ndt.net/ndtaz/ndtaz.php>
- <https://www.szutest.com.tr/tahribatsiz-muayeneler>
- https://www.ktuweb.com/page_showdoc?course=ME367&dopage=study
- <https://www.ktunotes.in/ktu-non-destructive-testing-me367-notes/>

Kaynaklar: (web)

- <https://ndtsupply.com/woodpecker-wp-632am-automatic-tap-tester-with-optional-xy-plotter.html>
- <https://www.poligonmuhendislik.com/hizmetlerimiz/kalite-kontrol-ve-raporlama/3-boyutlu-olcum/optik-tarama>
- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Lazer>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Interferometry>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>
- <https://bias.com.tr/48/81/dantec-dynamics/shearography-tahribats%C4%B1z-muayene.php> (Shearography – Laser Shearography NDT)
- <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/laser-shearography>
- <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/laser-shearography-ndt/> (Shearography – Laser Shearography NDT)
- [https://tr.wikipedia.org/wiki/Dalga_\(fizik\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Dalga_(fizik))
- https://tr.wikipedia.org/wiki/Boyuna_dalga
- https://tr.wikipedia.org/wiki/Enine_dalga
- <https://binsfeld.com/what-is-a-strain-gage-and-how-does-it-work/>
- <https://www.hardnesstesters.com/test-types/rockwell-hardness-testing>
- <https://www.corrosionpedia.com/5-ways-to-measure-the-hardness-of-a-material/2/6733>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Shore_durometer
- <https://hapcoincorporated.com/resources/guide-to-shore-hardness/>