

**Ringvorlesung  
Sensorische Materialien**

**Structural Health Monitoring (SHM) und  
Bauteilprüfung mit geführten Wellen**

Björn Maack  
Faserinstitut Bremen e.V.

- **Begriffsklärung und Konzept**
- **Relevanz und Nutzen**
- **Analyseverfahren und Methoden**
- **Geführte Wellen zur Analyse - Ultraschall**

## Definition (DGfZP, Fachausschuss Zustandsüberwachung 2014)

„Unter Structural Health Monitoring (SHM) wird die kontinuierliche oder periodische und automatisierte Methode zur Bestimmung und Überwachung des Zustandes eines Überwachungsobjektes innerhalb der Zustandsüberwachung (gemäß DIN ISO 17359) verstanden. Dies erfolgt durch Messungen mit permanent installierten bzw. integrierten Aufnehmern und durch Analyse der Messdaten.“

## Basiskomponenten

- System/Struktur
- Wandler und Wandlerysteme (mit der Struktur fest verbunden)
- Datenerfassungssysteme
- Messdatenspeicherung und -transfer
- Messdatenmanagement
- Interpretation und Diagnose der Messdaten

## Grundaufgaben

Level I: Schadensdetektion



Level II: Schadenslokalisierung



Level III: Schadensausdehnung



Level IV: Restlebensdauerprognose



Level V: Selbstdiagnose



Level VI: Selbstheilung

(Nach A. Rytter 1993)

## Sicherheit



Aloha Airlines Flug 243: Materialermüdung



United Airlines Flug 811: Technikversagen



Wing strike



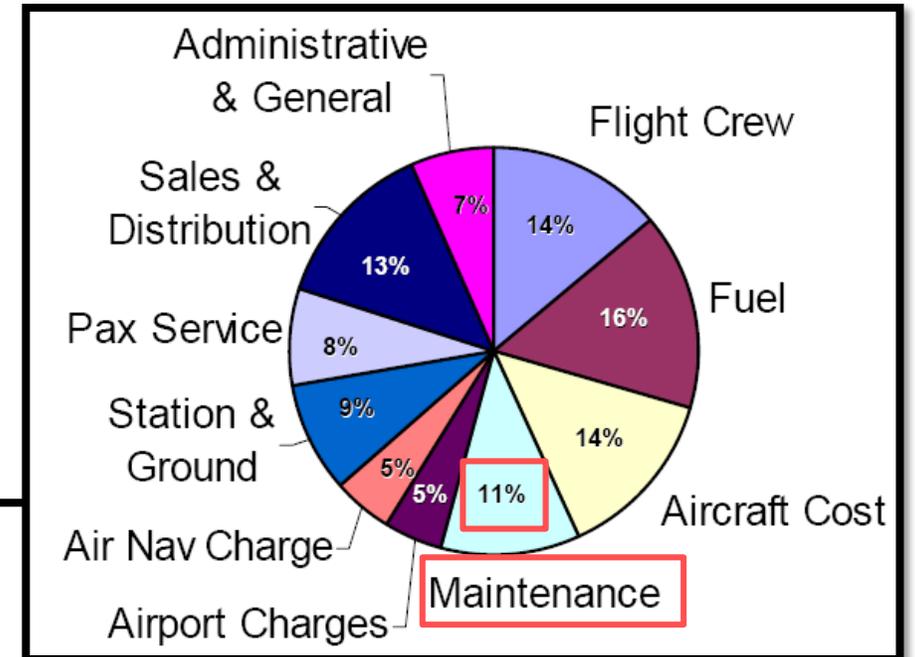
Tail strike

## Kosten und Zeiten: Wartung

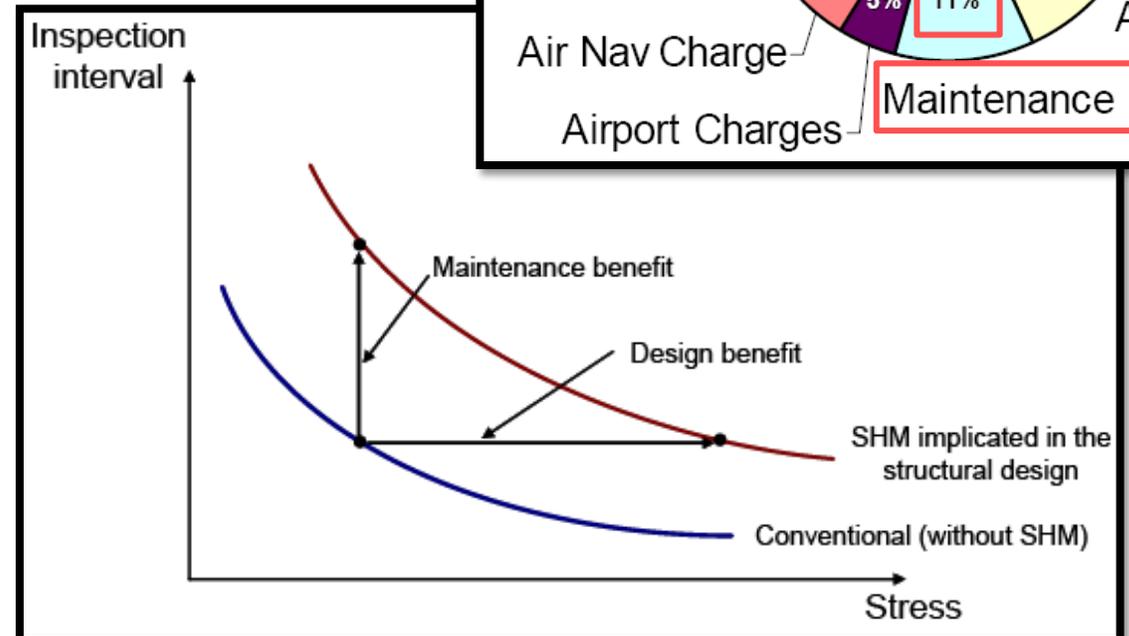
### Inspektionen

- Pre-Flight-Check - vor jedem Flug
- Ramp-Check – täglich
- S-Check - jede Woche
- A-Check - alle 350–650 Stunden
- B-Check - alle 5 Monate / 1000 Stunden
- C-Check - alle 12–18 Monate
- IL-Check - 48 Monate
- D-Check - 72 Monate

### Direkte Betriebskosten



(Smith 2004)



(Schmidt u.a. 2007)

## Kosten: Strukturdesign und Materialien



### Kerosineinsparung Flugzeug:

**1 kg weniger Gewicht =  
0,9 Tonnen  
Kraftstoffeinsparung  
in 20 Betriebsjahren**

(<https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/versteckte-kosten-bei-duty-free-produkten-14365615.html>)



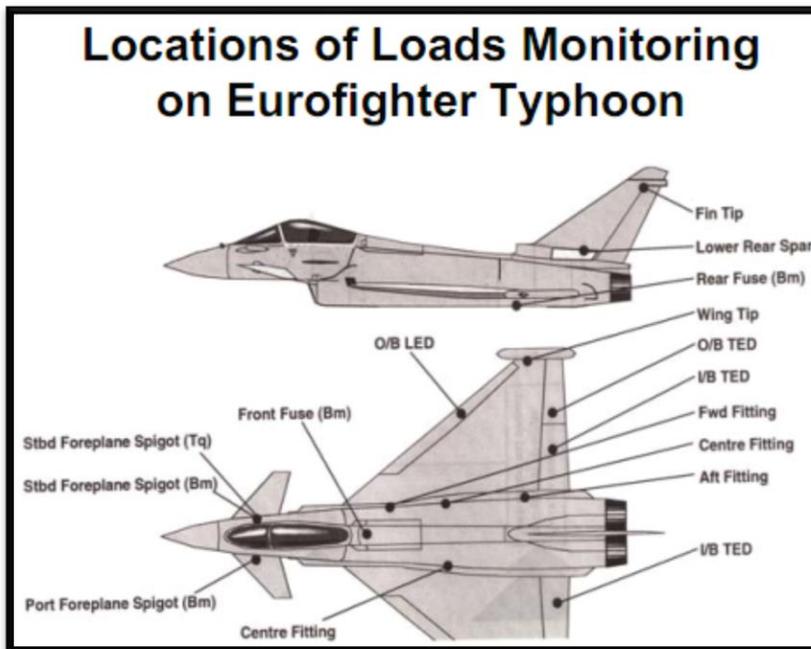
### Kraftstoffeinsparung Pkw:

**100 kg weniger Gewicht =  
0,3l/100 km weniger Kraftstoff  
Bei 300.000 km Laufleistung =  
1000 Liter weniger Kraftstoff**

([https://www.welt.de/print/die\\_welt/wissen/article11417880/Leichtes-Metall-fuer-die-Autos-von-morgen.html](https://www.welt.de/print/die_welt/wissen/article11417880/Leichtes-Metall-fuer-die-Autos-von-morgen.html))

## Anwendung - Luftfahrt

- Fast keine Anwendung von direktem SHM entsprechend der Grundaufgaben
  - ➔ Ursache: Probleme bei Nachrüstbarkeit, Reparierbarkeit, Sensoreinsatzgrenzen, Akzeptanz, Kosten, Gewicht, Datenverarbeitung
- Häufiger wird reines Load Monitoring betrieben (FBG, DMS), um Überlastungen festzustellen und Eingangswerte für Ermüdungssimulationen zu gewinnen



(C. Boller 2010)



Tail-strike-Sensor

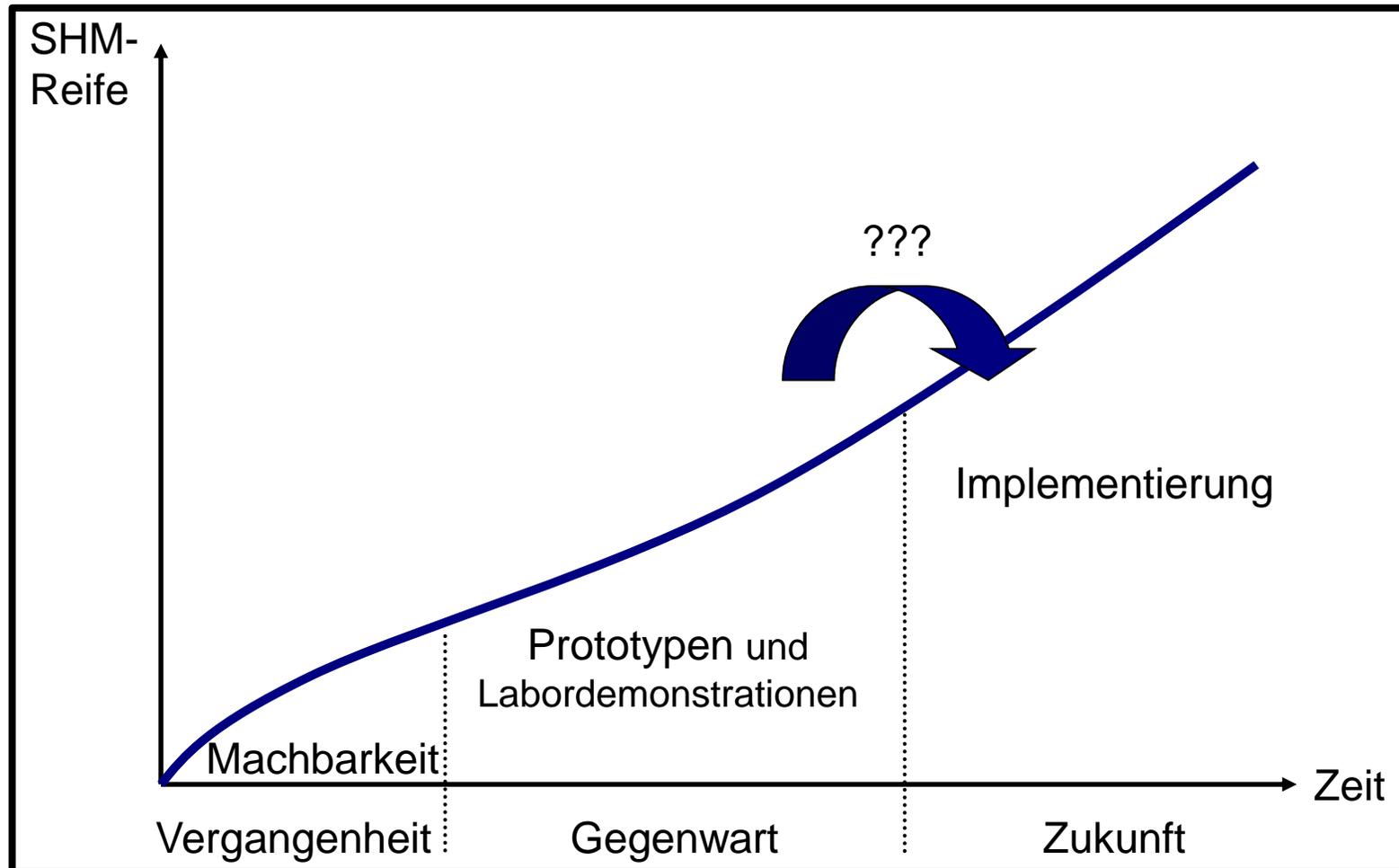
## Stand der Technik

- Eine Reihe neuartiger SHM-Methoden wurden in den letzten 30 Jahren für die zivile Luftfahrt entwickelt
- **Richtline ARP6461 SAE** „Implementierung von SHM im Flugzeug“
- Prototypen unter Laborbedingungen funktionsfähig
- SHM-Methoden sind eher komplementär zu verstehen
- **Feldversuche und Implementation stehen meistens noch aus**
- Fortgeschritten und im Einsatz ist besonders Load Monitoring von Kampfflugzeugflotten (Eurofighter)

## Hindernisse für SHM

- Zum Teil **unzureichend entwickelte Systeme**, Schwierigkeiten bei Übertragung von Laborergebnissen auf komplexe Strukturen
- Probleme bei Trennung von **Umwelteinflüssen und Schädigung**
- Schwierige Unterscheidung von **Struktur- und Sensorschäden**
- Probleme bei **Sensorbeständigkeit und Reparatur**
- Nicht vorhandene **Normen und Zulassungen**
- **Eingeschränkte Anwendbarkeit** einzelner Systeme für bestimmte Anwendungen
- **Ungenügender Automatisierungsgrad** bei Sensorierung

## Überblick des Fortschritts

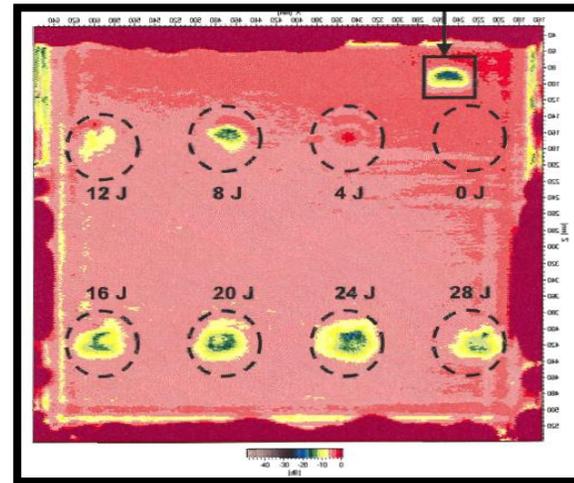


## Zerstörungsfreie Prüfen - Luftfahrt

Existenz einer Reihe von Verfahren, die z. T. seit Jahrzehnten erfolgreich angewandt werden

Abnehmende Bedeutung

- Sichtprüfung
- Ultraschall (A-, B-, C-Scans)
- Wirbelstrom
- Schallemission
- Thermografie
- Scherografie



US- C-Scan (Impaktprobe)



Wirbelstromprüfung  
(Staszewski u.a. 2004)

Wesentlicher Einfluss auf die Ergebnisse durch den Faktor Mensch!

## Einteilungsmöglichkeiten SHM-Systeme

### Überwachte Größe

- Dehnung/Auslenkung
- Eigenfrequenz
- Steifigkeit
- ...

### Art der Überwachung

- Global ↔ Lokal
- Aktiv ↔ Passiv
- ...

### Überwachtes Phänomen

- Ultraschallwellen
- Wirbelstromfelder
- Akustische Emission/Schallwellen
- ...

## Art der Überwachung

### Globale Methoden

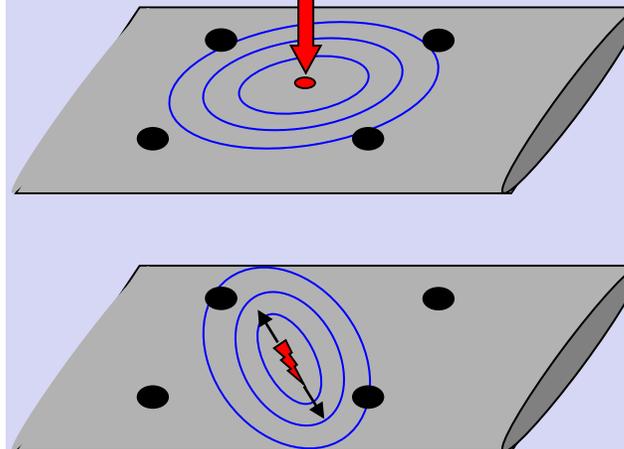
- Statische Auslenkungen
- Eigenfrequenzanalyse
- Schwingungen im Niederfrequenzbereich
- ...

### Lokale Methoden

- CVM™ (Comparative Vacuum Monitoring)
- Dehnungsmessung (DMS/FBG)
- **Ultraschall (Geführte Wellen)**
- ...

### Passive Methoden

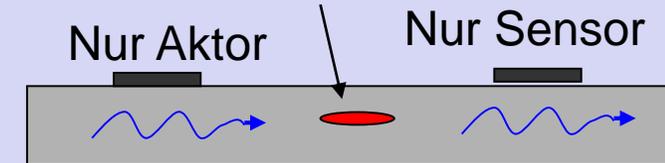
- Sensoren für Signalaufnahme
- Anregung durch externe Quellen (z. B. Impakt, Schallemission, etc.)



### Aktive Methoden

- Sensoren für Aufnahme und Aktoren zur Anregung

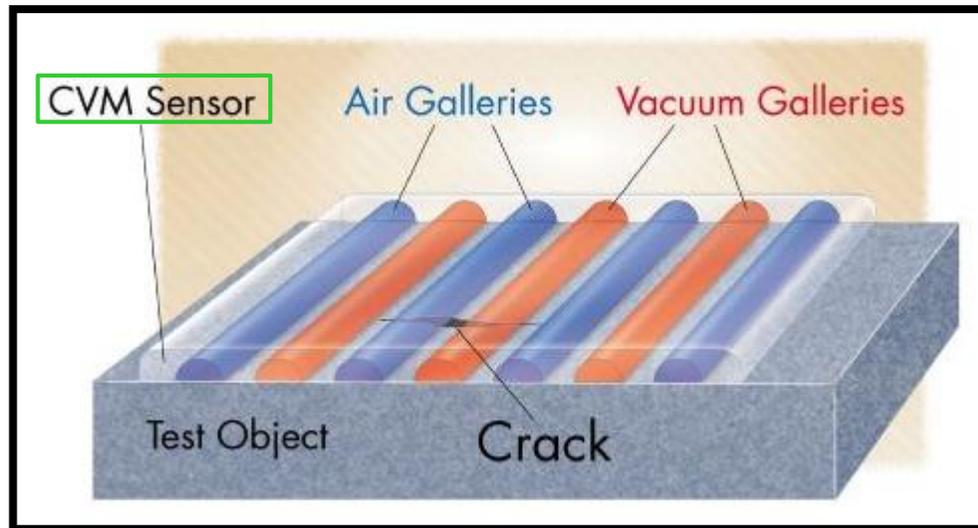
- Pitch-Catch Methode  
Delamination



- Puls-Echo Methode  
Delamination

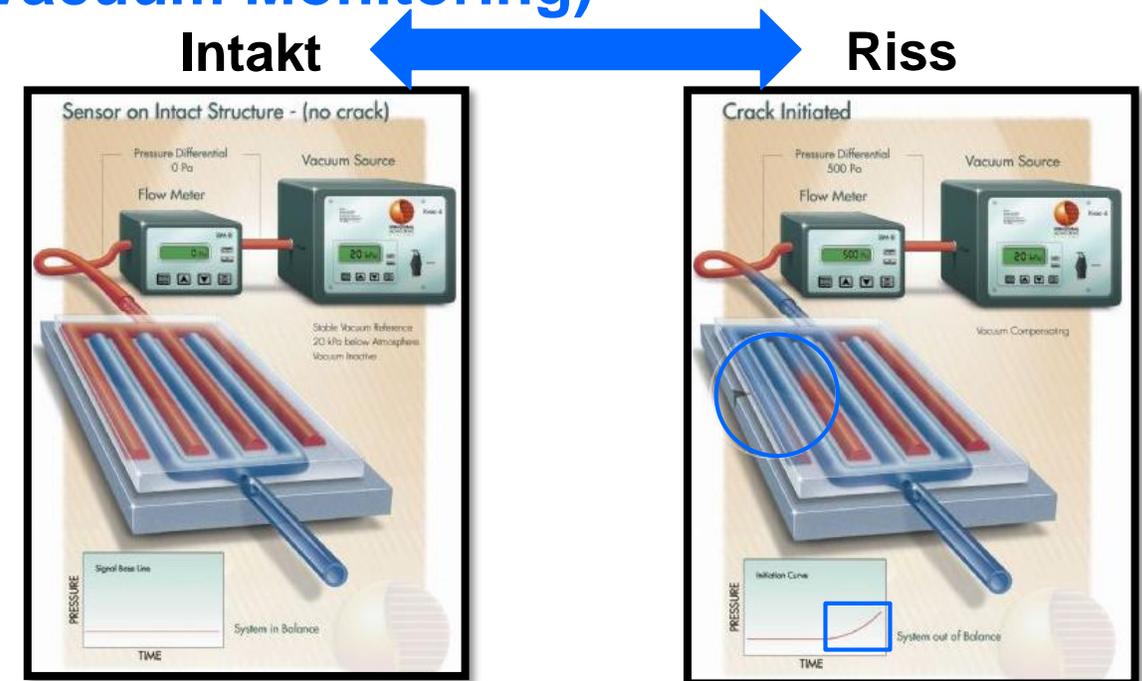


## CVM<sup>TM</sup> (Comparative Vacuum Monitoring)



Funktionsprinzip von CVM<sup>TM</sup>-Sensoren  
([www.smsystems.com.au](http://www.smsystems.com.au))

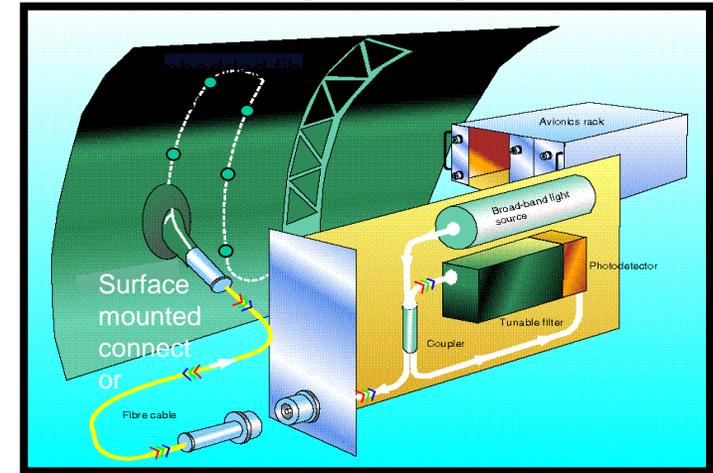
Riss in der Struktur verbindet Galerien miteinander und bewirkt Verlust des Unterdruckes in den Unterdruckgalerien



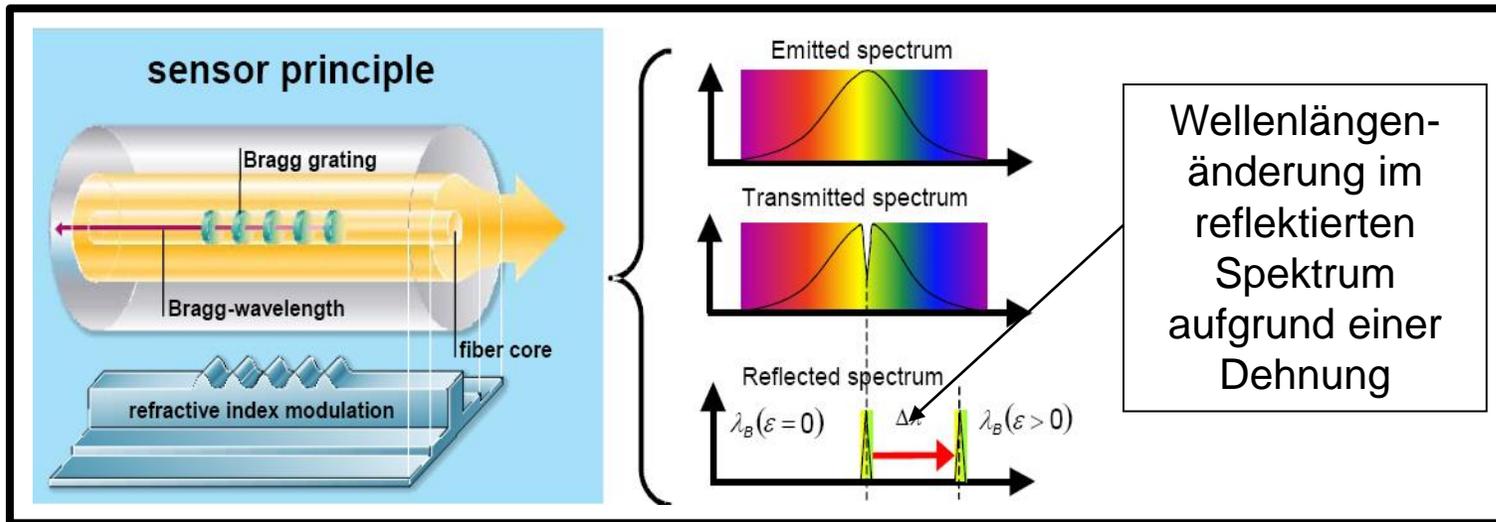
([www.smsystems.com.au](http://www.smsystems.com.au))

## Dehnungsmessung mit Dehnungsmessstreifen (DMS)

- Faseroptische Sensoren:  
Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBGS)
- Elektrische DMS

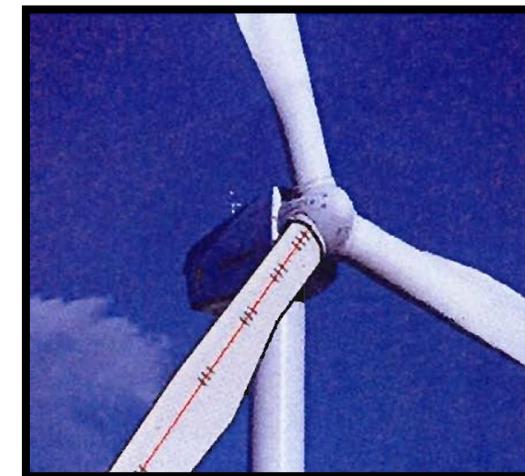


Verwendung im Flugzeugrumpf  
(Volanhan u.a. 2006)



Wellenlängen-  
änderung im  
reflektierten  
Spektrum  
aufgrund einer  
Dehnung

Funktionsprinzip  
(Fa. Insensys 2006)



Verwendung im Rotorblatt  
(Windenergie-Forum 2006)

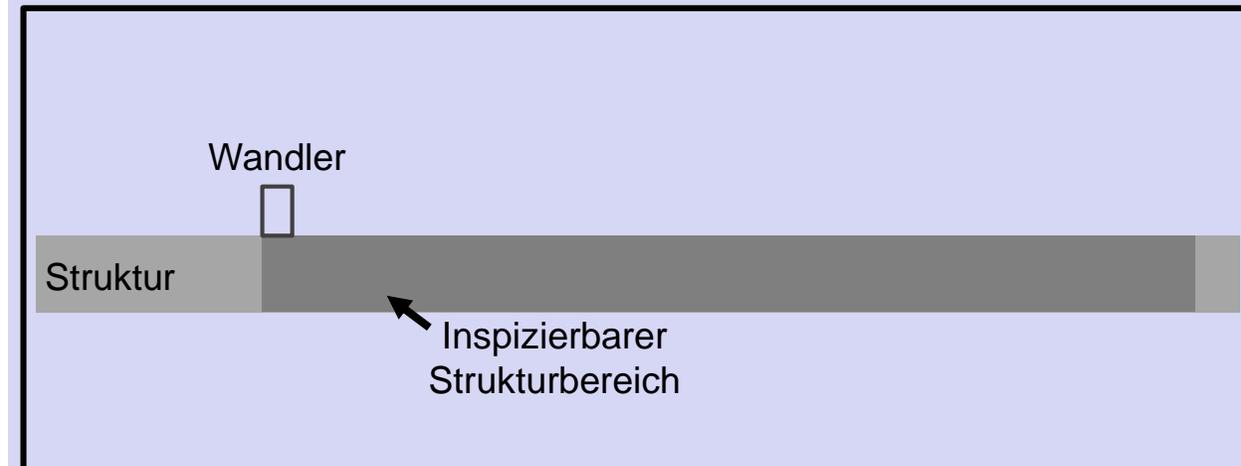
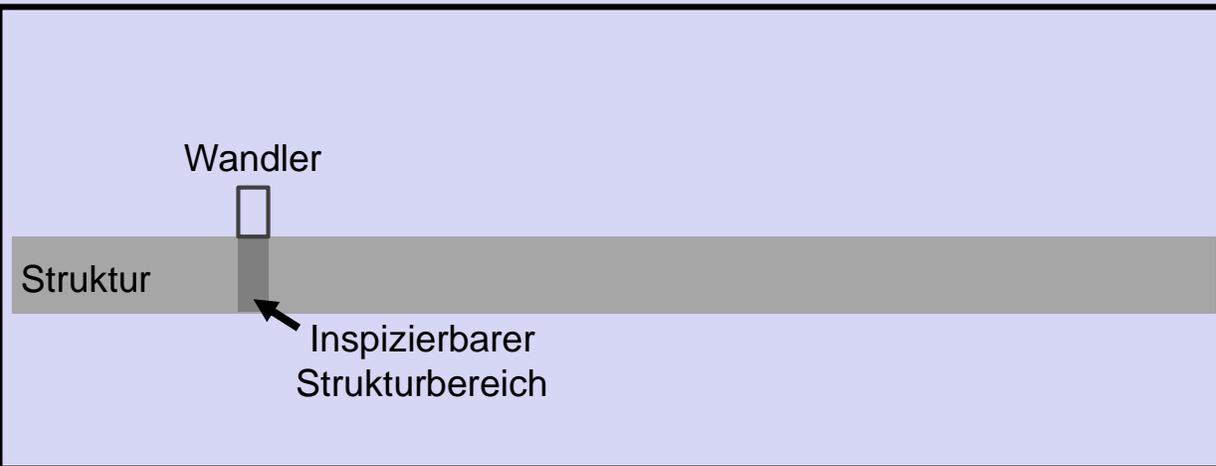
## Verwendungsgrund

Situation: Ultraschallwellen in dünnen Platten

### Konventionelle Ultraschallwellen



### Geführte Wellen

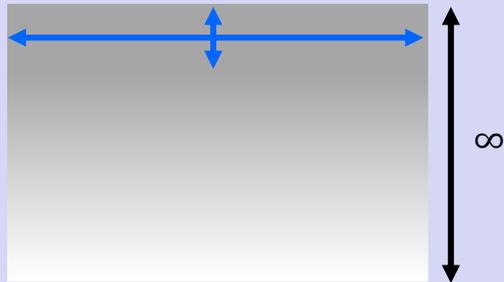


Effiziente Untersuchung größerer Flächen

## Geführte Wellen in Platten

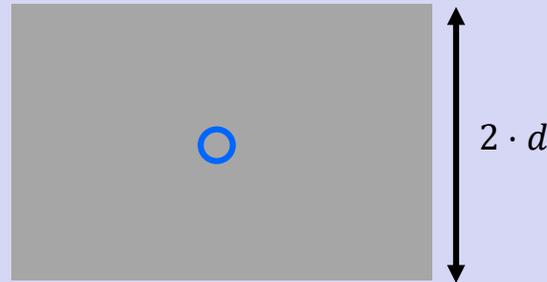
### Rayleigh-Wellen (Oberflächenwellen)

Gekoppelte Longitudinalwellen und vertikale Transversalwellen



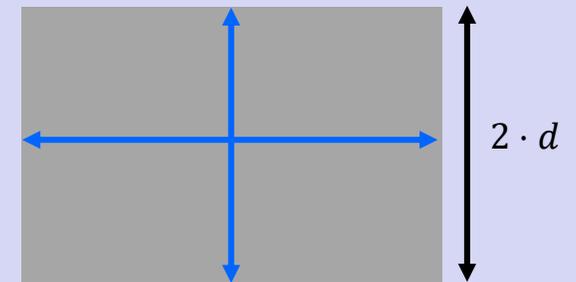
### SH-Wellen (Shear Horizontal)

Horizontal polarisierte Transversalwellen



### Lamb-Wellen

Gekoppelte Longitudinalwellen und vertikale Transversalwellen

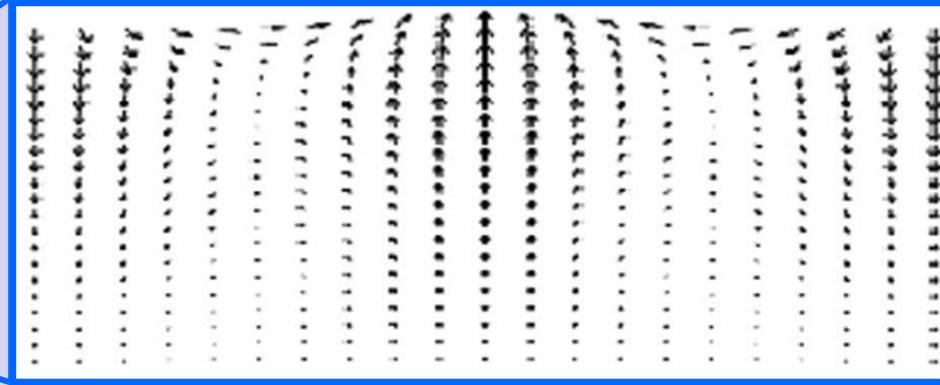


y: Dicke



↕ Teilchenbewegung

## Geführte Wellen – Rayleigh-Wellen



**Teilchenbewegung (Modenform)**  
(Giurgiutiu 2008)

x-Richtung:

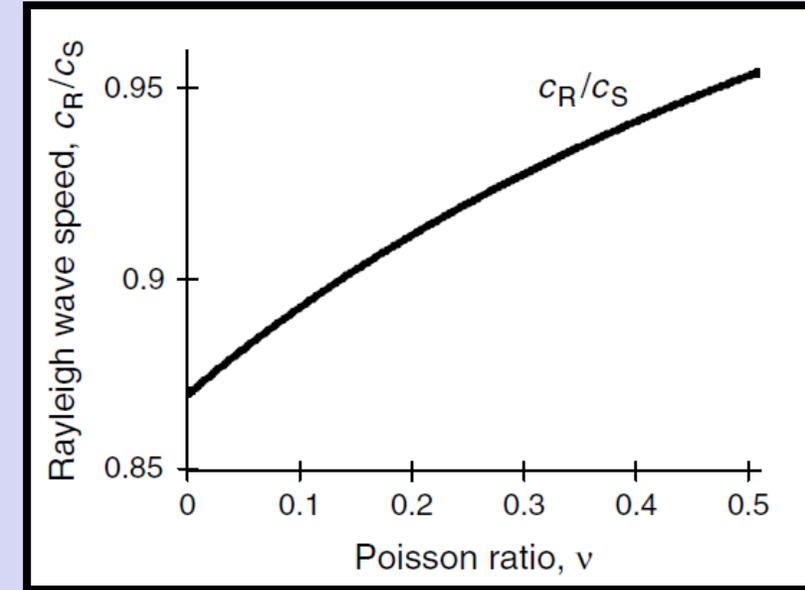
$$u_x(x, y, t) = A \cdot i \cdot \left( \xi_R \cdot e^{-\alpha \cdot y} - B \cdot e^{-\beta \cdot y} \right) \cdot e^{i \cdot (\xi_R \cdot x - \omega \cdot t)}$$

Evaneszente  
Welle

Harmonische  
ebene Welle

y-Richtung:

$$u_y(x, y, t) = A \cdot \left( -\alpha \cdot e^{-\alpha \cdot y} + i \cdot C \cdot e^{-\beta \cdot y} \right) \cdot e^{i \cdot (\xi_R \cdot x - \omega \cdot t)}$$

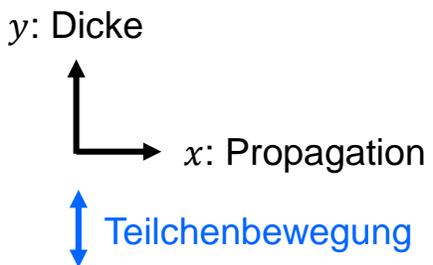
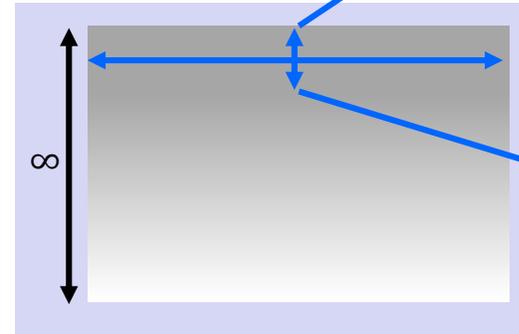


### Näherung Wellengeschwindigkeit

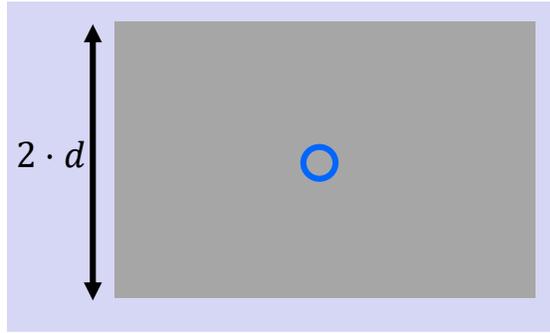
(Giurgiutiu 2008)

$$c_R = c_S \cdot \left( \frac{0,87 + 1,12 \cdot \nu}{1 + \nu} \right)$$

(0,87; 1)



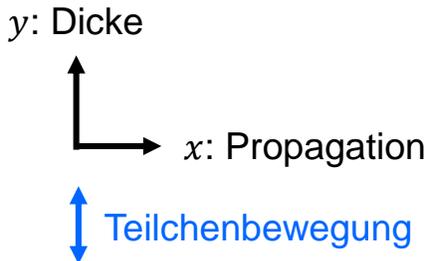
## Geführte Wellen – SH-Wellen



### Teilchenbewegung (Modenform)

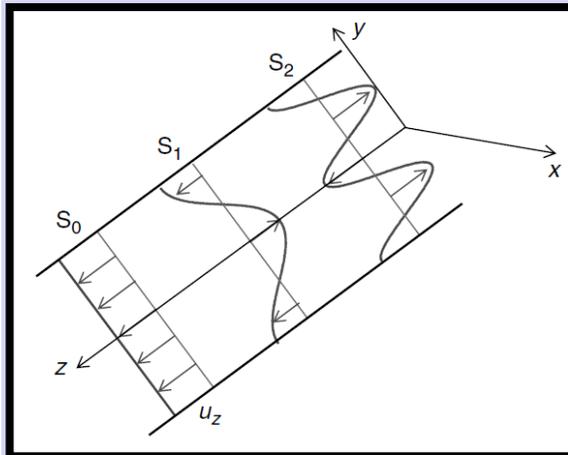
Stehende Welle Harmonische ebene Welle

$$z\text{-Richtung: } u_z(x, y, t) = h(y) \cdot e^{i \cdot (\xi_{SH} \cdot x - \omega \cdot t)}$$

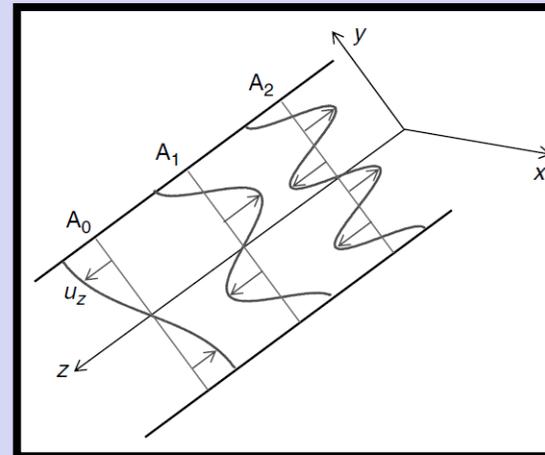


Symmetrische Moden  $S_n$   
 $h(y) = C_2 \cdot \cos(\eta \cdot y)$   
 mit  $\eta \cdot d = (2 \cdot n) \cdot \frac{\pi}{2}$   
 $n \in \mathbb{N}_0$

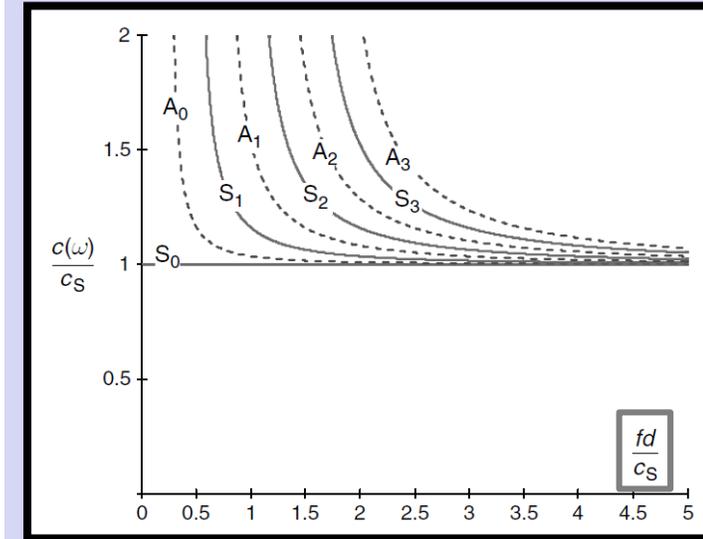
Antisymmetrische Moden  $A_n$   
 $h(y) = C_1 \cdot \sin(\eta \cdot y)$   
 mit  $\eta \cdot d = (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{\pi}{2}$   
 $n \in \mathbb{N}_0$



(Giurgiutiu 2008)



(Giurgiutiu 2008)



Dispersionskurven Wellengeschwindigkeit (Giurgiutiu 2008)

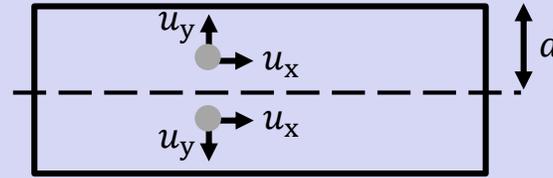
$$c(\omega) = \frac{c_S}{\sqrt{1 - (\eta \cdot d)^2 \cdot \left(\frac{c_S}{\omega \cdot d}\right)^2}}$$

Mode

➔  $c(\omega) = \text{imaginar}$   
Evaneszente Welle

## Geführte Wellen – Lamb-Wellen

### Symmetrische Teilchenbewegung



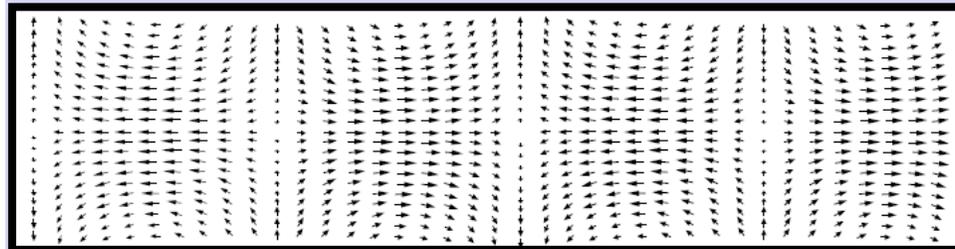
x-Richtung:

$$u_x = -B_1 \cdot \cos(q \cdot d) \cdot \cos(p \cdot y) + B_2 \cdot \cos(p \cdot d) \cdot \cos(q \cdot y)$$

y-Richtung:

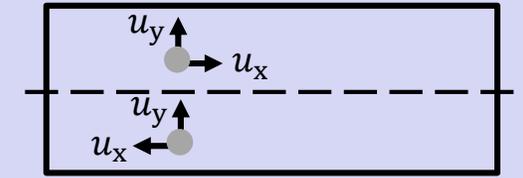
$$u_y = -C_1 \cdot i \cdot \cos(q \cdot d) \cdot \sin(p \cdot y) - C_2 \cdot i \cdot \cos(p \cdot d) \cdot \sin(q \cdot y)$$

Mode Unterschiede



Symmetrische  $S_0$  –Welle  
(Giurgiutiu 2008)

### Antisymmetrische Teilchenbewegung

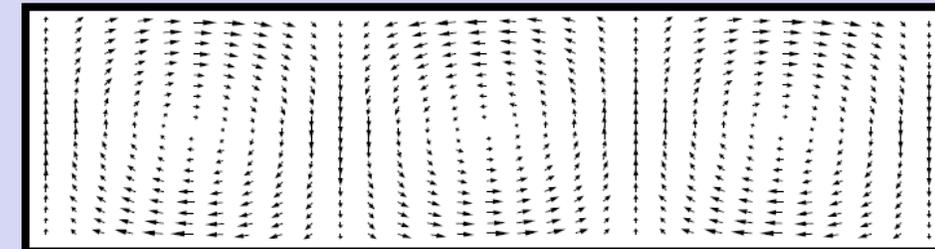


x-Richtung:

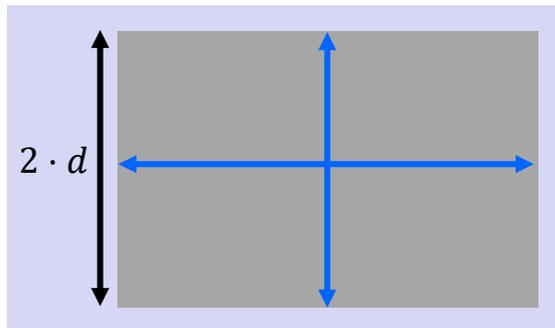
$$u_x = -B_1 \cdot \sin(q \cdot d) \cdot \sin(p \cdot y) + B_2 \cdot \sin(p \cdot d) \cdot \sin(q \cdot y)$$

y-Richtung:

$$u_y = C_1 \cdot i \cdot \sin(q \cdot d) \cdot \cos(p \cdot y) + C_2 \cdot i \cdot \sin(p \cdot d) \cdot \cos(q \cdot y)$$



Antisymmetrische  $A_0$  –Welle  
(Giurgiutiu 2008)



Stehende Welle

y: Dicke

x: Propagation

Propagierende Welle

Teilchenbewegung

$\omega$  = Kreisfrequenz;  $c$  = Wellengeschwindigkeit; S = Transversalwelle; P = Longitudinalwelle;  $\xi = \frac{\omega}{c}$ ;  $p(\xi, \omega, c_p)$ ;  $q(\xi, \omega, c_s)$

## Geführte Wellen – Lamb-Wellen

### Symmetrische Teilchenbewegung

Rayleigh-Lamb-Gleichung für symmetrische Moden

$$\frac{\tan(p \cdot d)}{\tan(q \cdot d)} = -\frac{(\xi^2 - q^2)^2}{4 \cdot \xi^2 \cdot p \cdot q}$$

➔ Eigenwerte  $\xi_n^S$  mit  $n = \mathbb{N}_0$

➔ Dispersive Wellengeschwindigkeit

$$c(f \cdot d)$$

### Antisymmetrische Teilchenbewegung

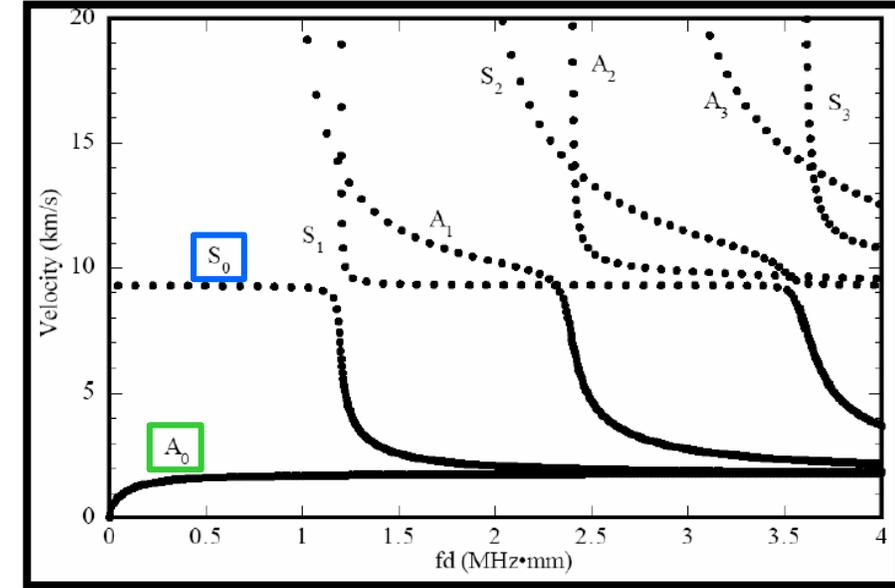
Rayleigh-Lamb-Gleichung für antisymmetrische Moden

$$\frac{\tan(p \cdot d)}{\tan(q \cdot d)} = -\frac{4 \cdot \xi^2 \cdot p \cdot q}{(\xi^2 - q^2)^2}$$

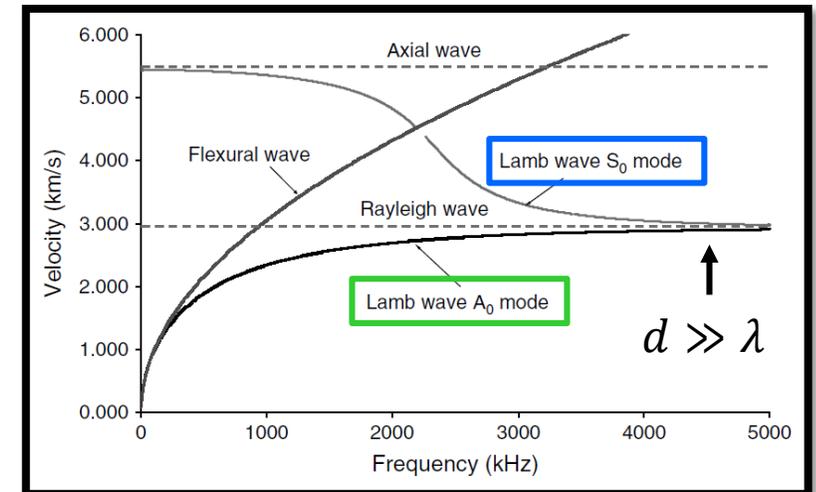
➔ Eigenwerte  $\xi_n^A$  mit  $n = \mathbb{N}_0$

➔ Dispersive Wellengeschwindigkeit

$$c(f \cdot d)$$



Dispersionsdiagramm



Frequenzabh. A<sub>0</sub> und S<sub>0</sub> (2 · d = 1 mm) (Giurgiutiu 2008)

$\omega$  = Kreisfrequenz;  $f$  = Frequenz;  $c$  = Wellengeschwindigkeit; S = Transversalwelle;  
 P = Longitudinalwelle;  $\xi = \frac{\omega}{c}$ ;  $p(\xi, \omega, c_P)$ ;  $q(\xi, \omega, c_S)$ ;  $\lambda$  = Wellenlänge

## Lamb-Wellen – Verbundmaterialien

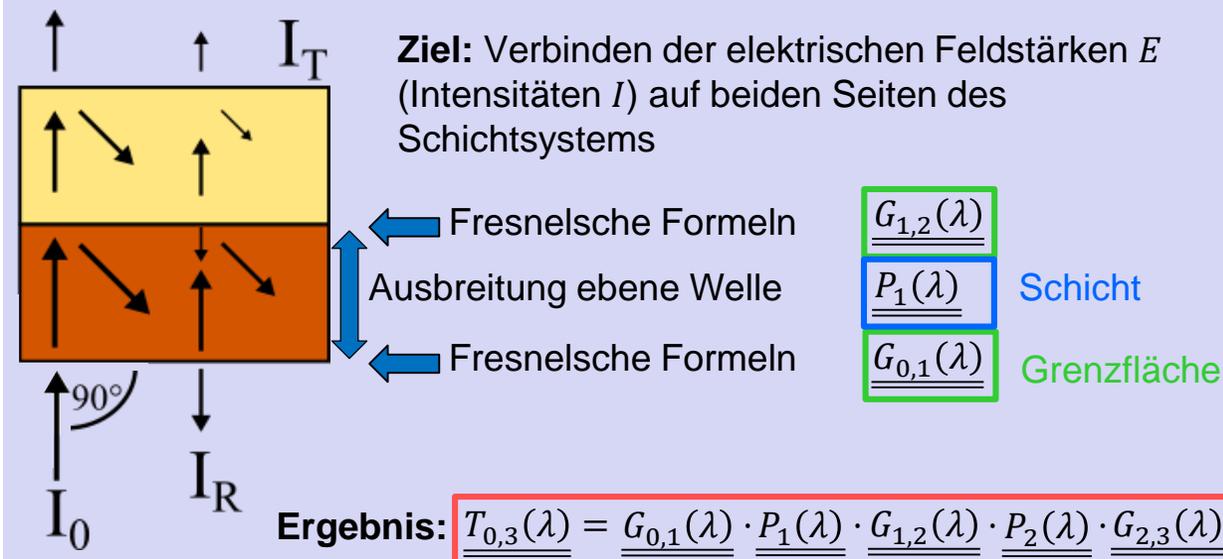
**Ziel:** Berechnung Moden der Dispersionskurve für Schadensdetektion

**Grund:** Wellenmechanismen werden untersucht → Grenzflächen: Transmission und Reflexion

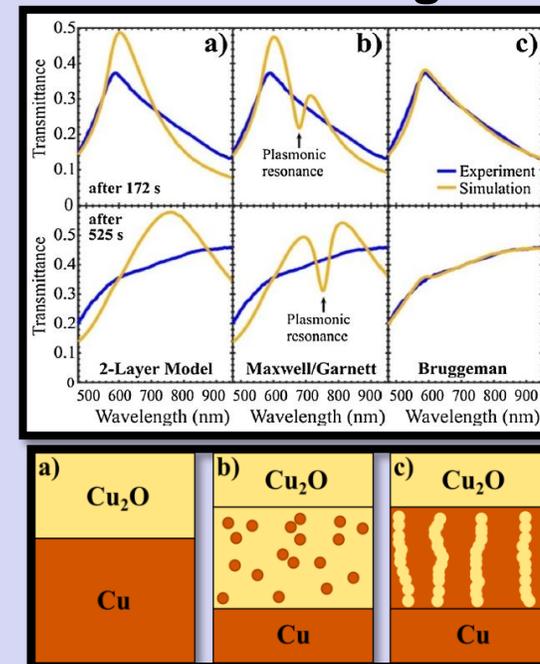
**Methoden:** Matrix-Formulierungen → z.B. **Transfermatrix**, Globalmatrix, Steifigkeitsmatrix

## Transfermatrix-Methode in der Optik

### Grundidee



### Anwendung



$\lambda =$  Wellenlänge

$\underline{\underline{G(\lambda)}}$  = Übergangsmatrix

$\underline{\underline{P(\lambda)}}$  = Propagationsmatrix

$\underline{\underline{T(\lambda)}}$  = Transfermatrix

## Lamb-Wellen – Verbundmaterialien

### Transfermatrix-Methode für Ultraschallwellen

#### Elektromagnetische Wellen

Verbinden der **elektrischen Feldstärken**  $E$  (Intensitäten  $I$ ) auf beiden Seiten des Schichtsystems

$$\begin{matrix} \boxed{E^+(f)} \\ 2 \times 1 \end{matrix} = \begin{matrix} \boxed{T(f)} \\ 2 \times 2 \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \boxed{E^-(f)} \\ 2 \times 1 \end{matrix}$$



#### Ultraschallwellen

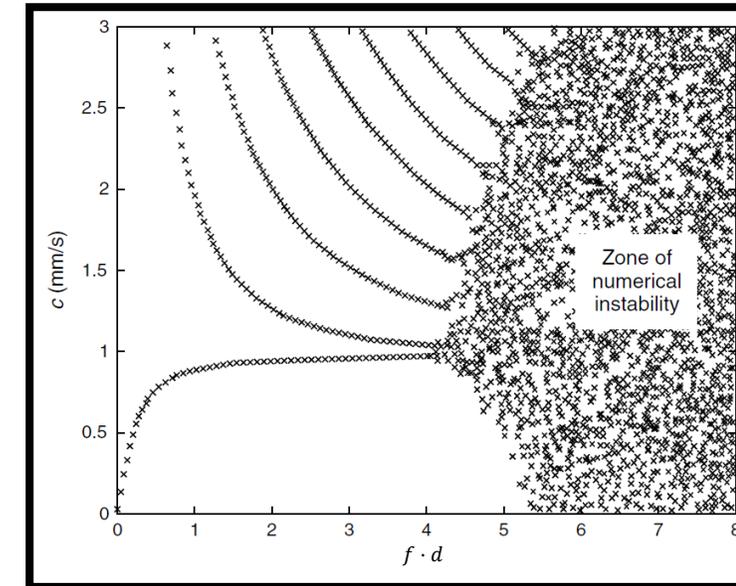
Verbinden der **Verschiebungen**  $u$  und **mechanischen Spannungen**  $\sigma$  auf beiden Seiten des Schichtsystems

$$\begin{matrix} \boxed{u^+(f)} \\ \boxed{\sigma^+(f)} \\ 3 \times 1 \end{matrix} = \begin{matrix} \boxed{T_{uu}(f)} & \boxed{T_{u\sigma}(f)} \\ \boxed{T_{u\sigma}(f)} & \boxed{T_{\sigma\sigma}(f)} \\ 3 \times 3 \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \boxed{u^-(f)} \\ \boxed{\sigma^-(f)} \\ 3 \times 1 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \boxed{T(f)} \\ \text{Transfermatrix} \\ 6 \times 6 \end{matrix} = \prod_{k=1}^N \begin{matrix} \boxed{X_k} & \boxed{D_k(f)} & \boxed{X_k^{-1}} \\ \text{Wellenausbreitung} & \text{Schicht} & \end{matrix}$$

➔ **Dispersionskurve**

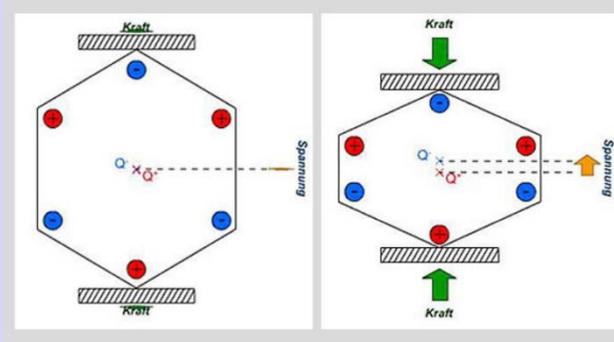
$$|T_{u\sigma}(f)| = 0$$



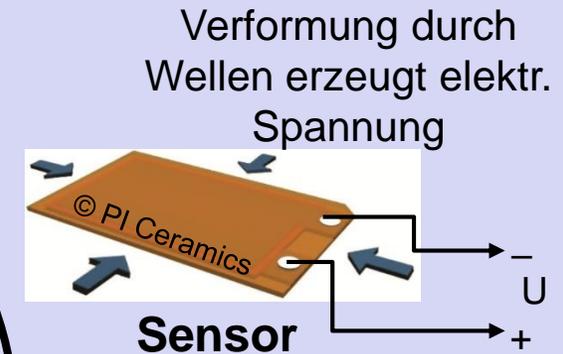
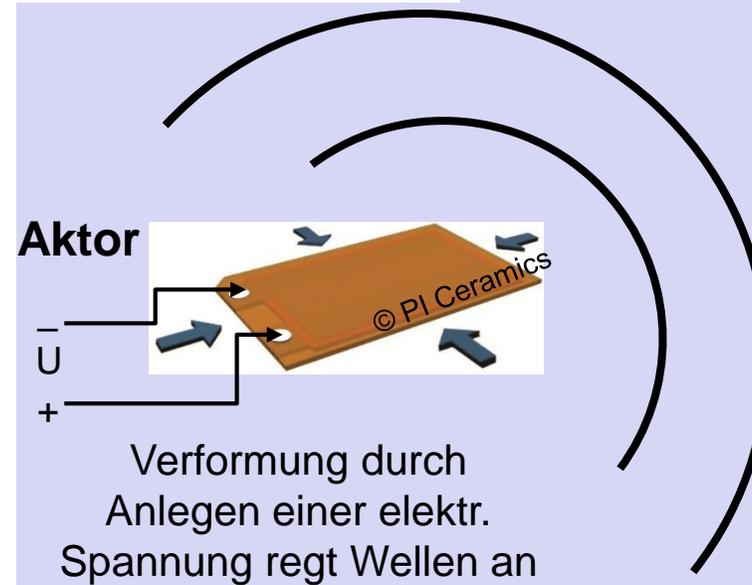
Dispersionskurve für eine Verbundplatte aus einer Schicht unidirektionaler Fasern (Giurgutiu 2008)

## Sensoren und Aktoren

elektrische Spannung ↔ elastische Verformung



(<https://vetsuisse.com/vet-iml/lernmodule/htmls/slide.html?radiosurfvet|radgeneral|sonography|sonobasics|2>)



Materialien:

- PZT (Blei-Zirkonat-Titanat)
- PVDF (Polyvinylidenfluorid)

**PWAS**

d=7 mm  
t=0.2 mm

- Masse ~ 80 mg
- Preis ~ 5 €

**PZT Wandler**

vergrößerte Darstellung

Elektrodenanordnung (+/-)

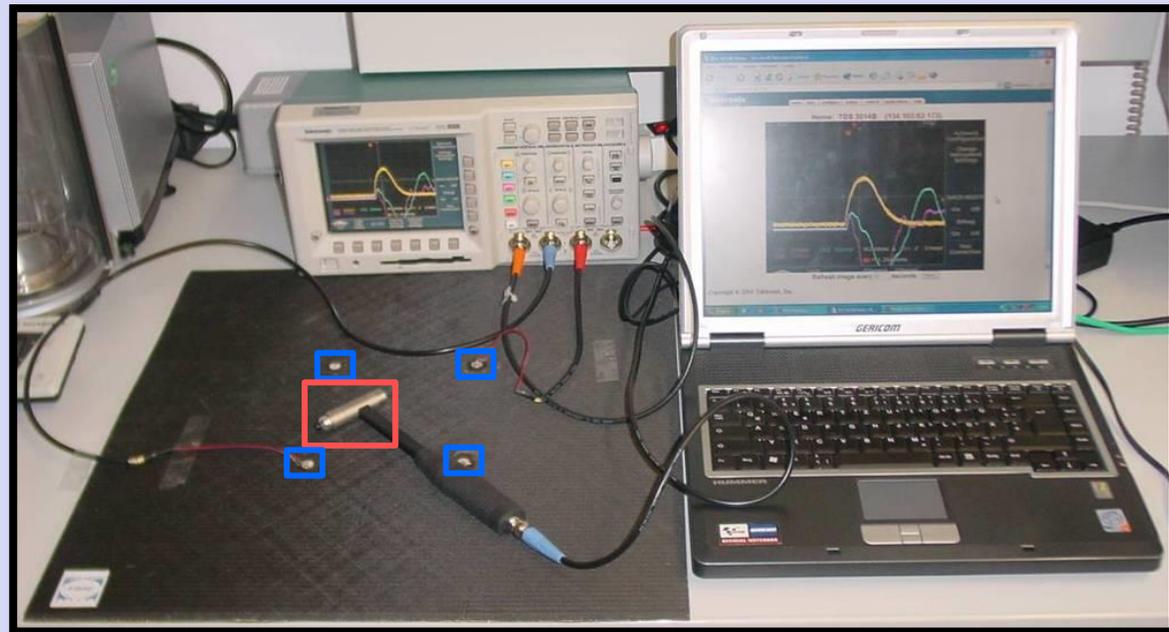
Elektroden

Piezofasern

PZT-Wandler, auch PWAS (piezoelectric wafer active sensors)

## Passive SHM

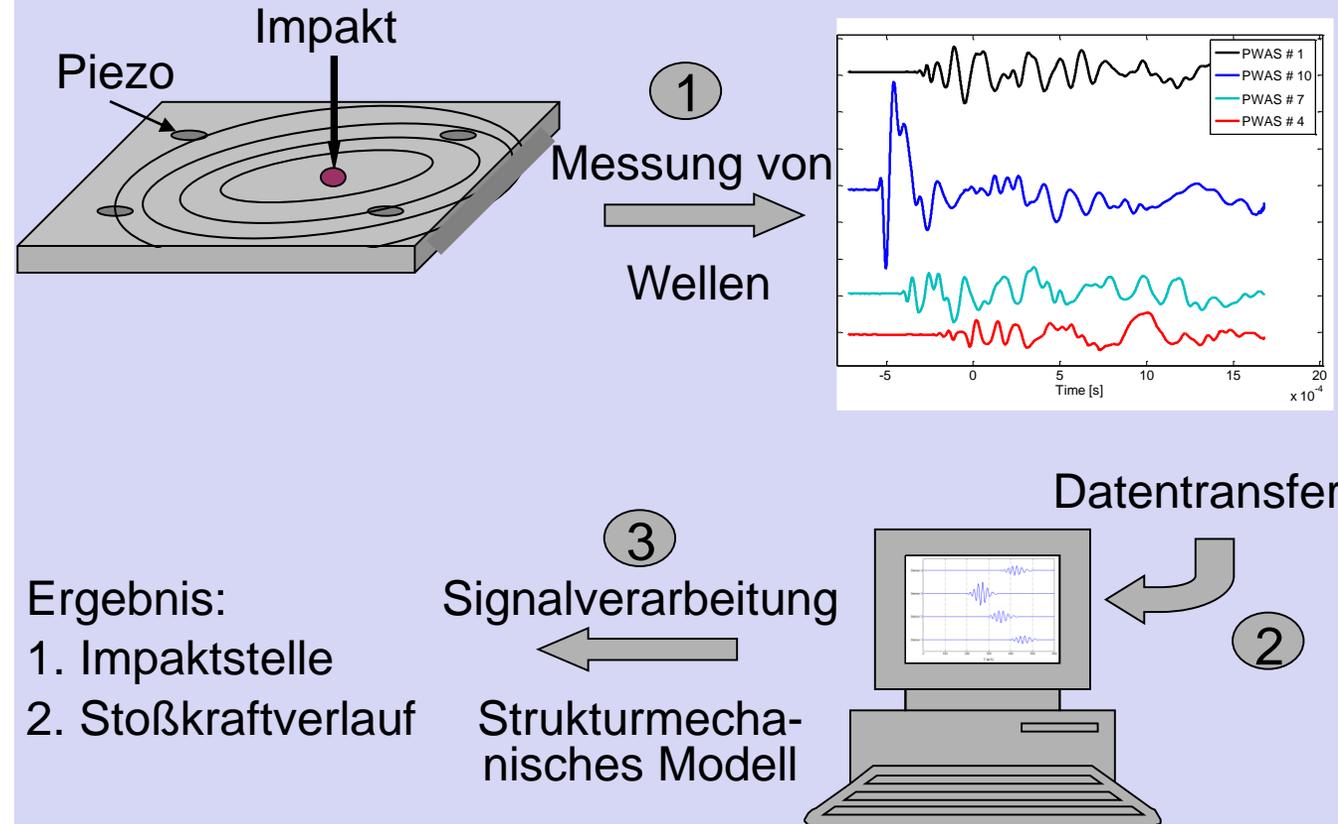
Experimenteller Versuchsstand:  
Impaktdetektion



Piezo: Sensoren

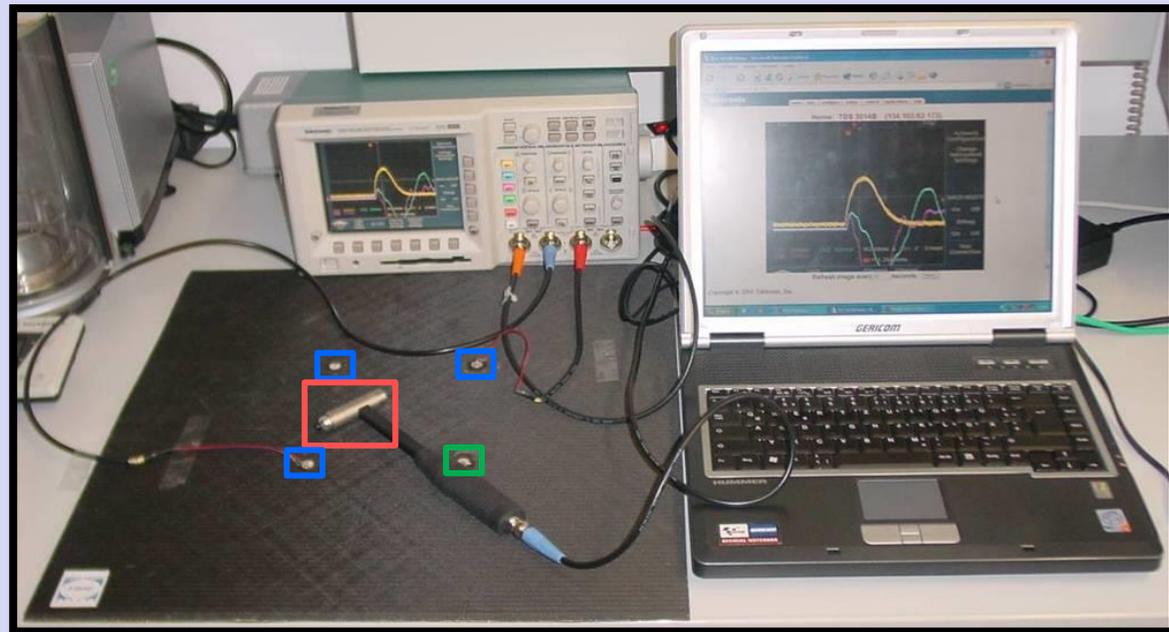
Impaktquelle: Aktive Ausführung

Verfahren zur Detektion und Bewertung von  
Impaktvorgängen an anisotropen Strukturen



## Aktive SHM

Experimenteller Versuchsstand:  
Schadensdetektion

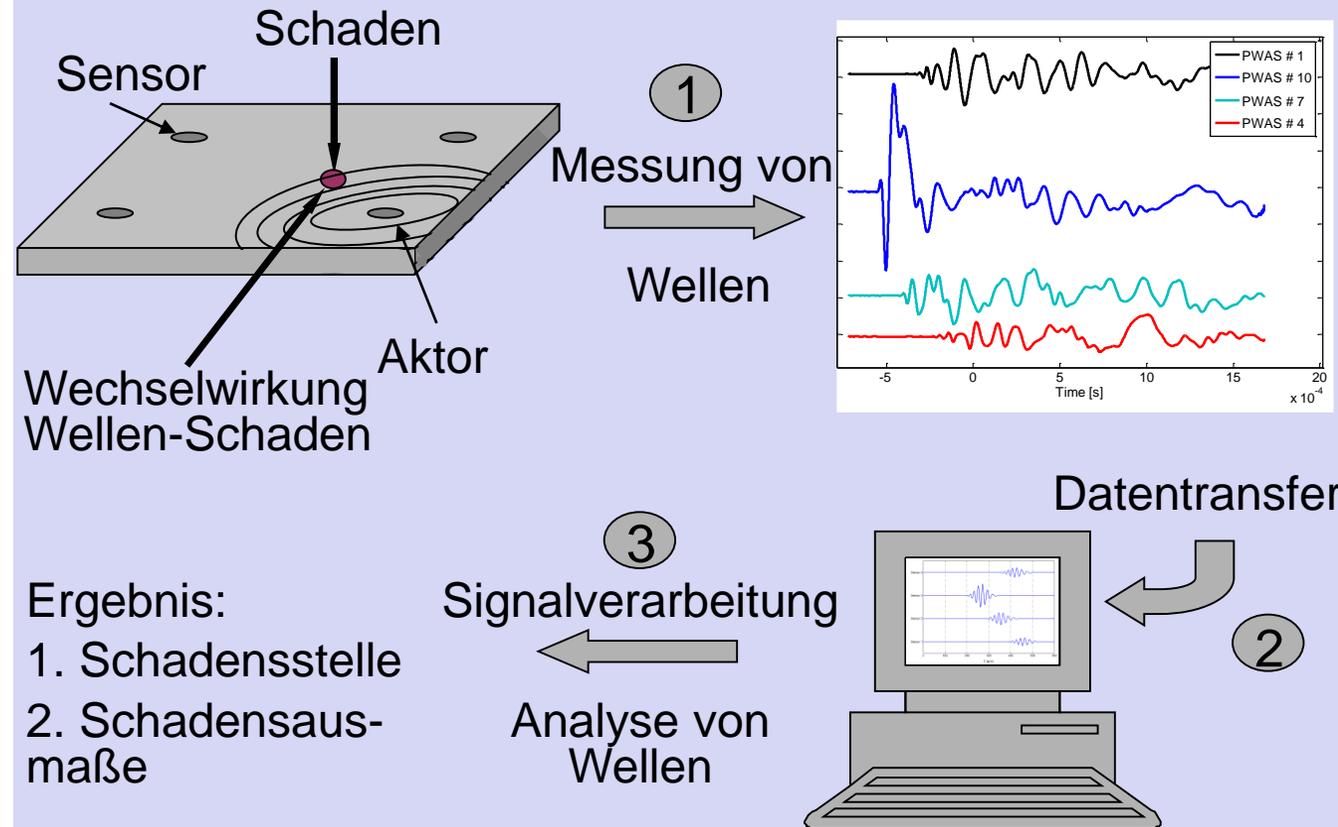


Piezo: Sensoren

Piezo: Aktor

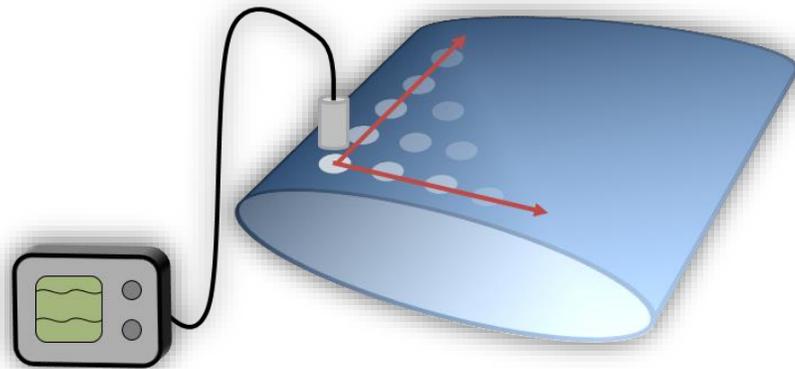
Schadensquelle: Bereits ausgeführt

Verfahren zur Detektion und Bewertung von  
Schäden an anisotropen Strukturen

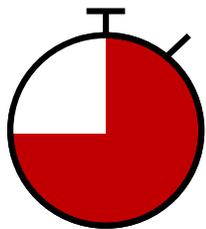


## Aktuelle Forschung: TransducerPad

### Stand der Technik



Großflächige Bauteilprüfung mit konventionellem Ultraschall

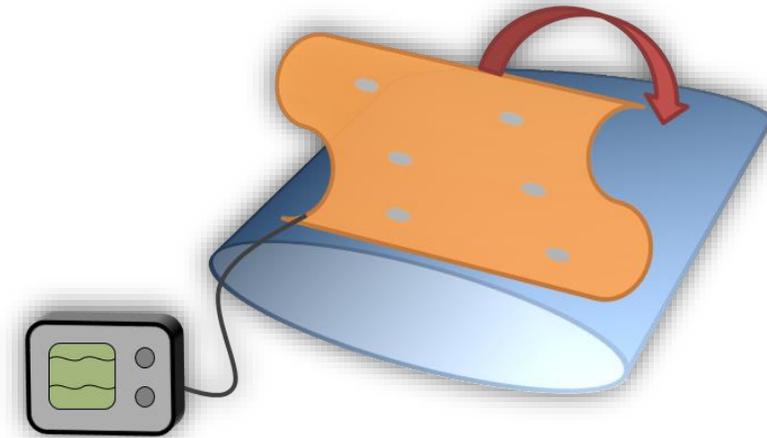


Entwicklung

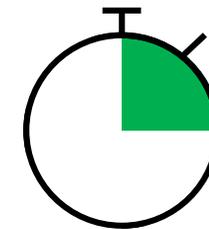
### Herausforderungen

- Ankopplung
- Sensornetzwerk und Trägerstruktur
- Signalverarbeitungs- und Analyseverfahren
- Umwelteinflüsse
- Bauteileinflüsse

### Zukunft



Großflächige Bauteilprüfung mit geführten Wellen



- SHM besitzt ein enormes Anwendungspotential, jedoch existiert noch eine Vielzahl von Hindernissen
- Verwendung von geführten Ultraschallwellen kann die Inspektionseffizienz und Sicherheit erheblich erhöhen
- Zur detaillierten Interpretation eines Bauteilzustandes mit geführten Ultraschallwellen ist das Verständnis der Wellenausbreitung im Material elementar