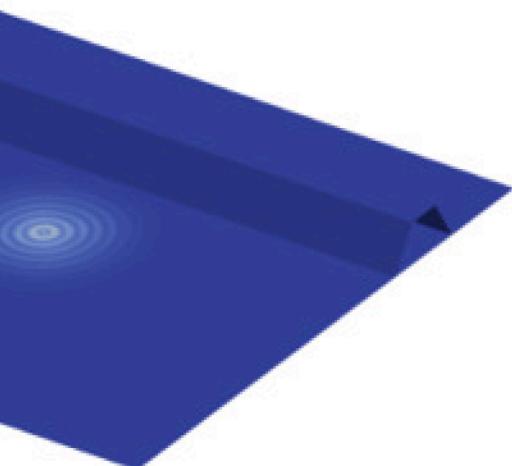
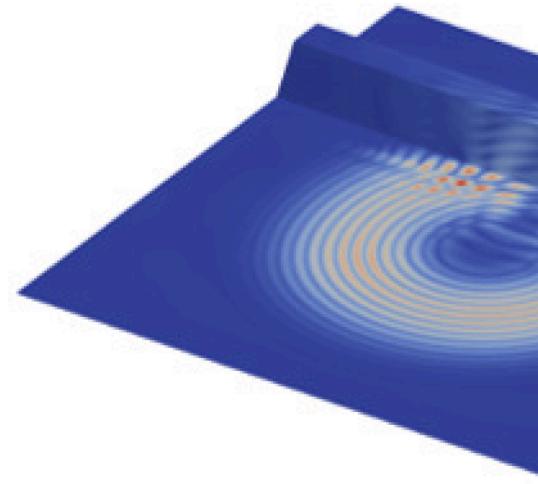


$\approx 70 \mu\text{s}$



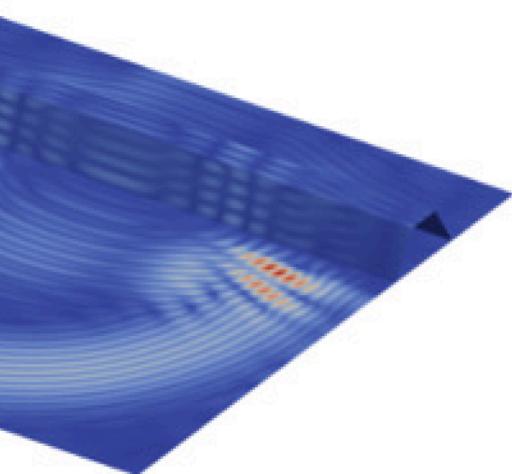
(a)

$t = 140$



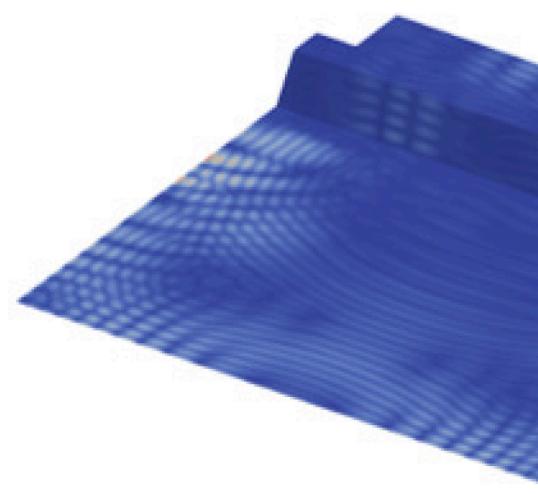
(b)

$\approx 210 \mu\text{s}$



(c)

$t = 280$



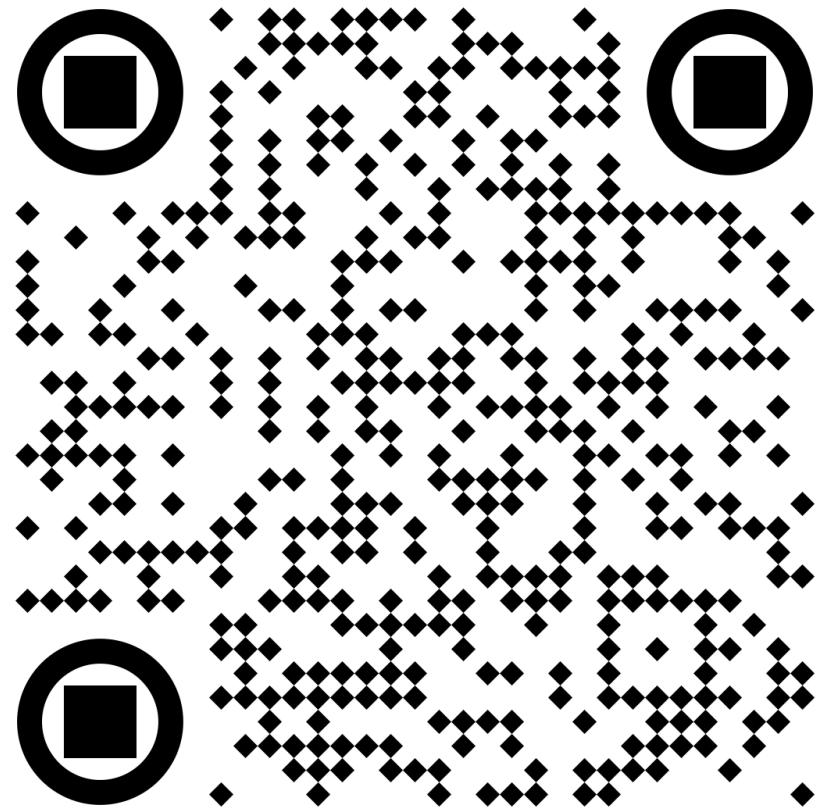
(d)

Vorlesung MTI - Zerstörungsfreie Prüfung

Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg^{id}
Hochschule Magdeburg-Stendal

Kontakt: christian.willberg@h2.de

Inhalte



Zerstörungsfreie Prüfung

Ziele der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP)

Entwicklungsstufen

ZfP 1.0 – Werkzeuge (zur Schärfung der Sinne)

ZfP 2.0 – Analoge Systeme (zur Ansicht innerhalb der Komponenten)

ZfP 3.0 – Digitale Verarbeitung und Automatisierung

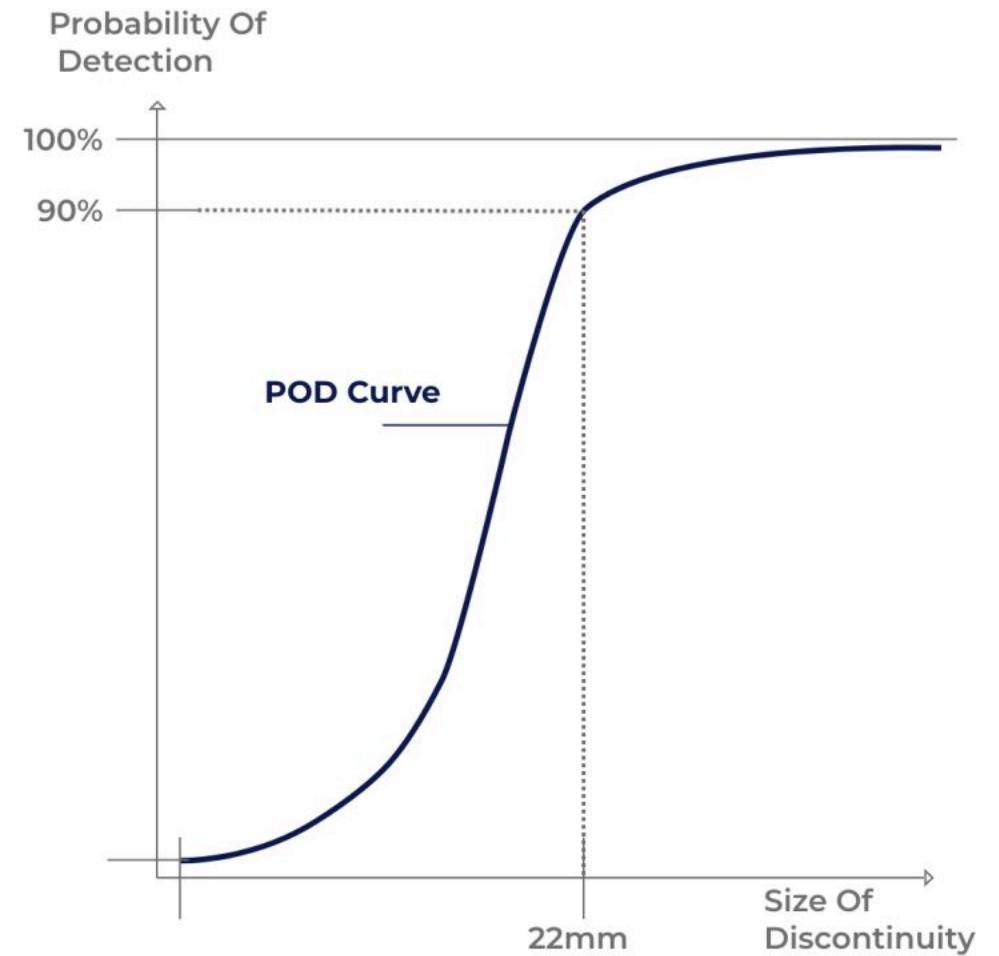
ZfP 4.0 – Transparenz von Informationen, technische & digitale Hilfsmittel und autonome und dezentralisierte Entscheidungen

Verfahren

- jede messbare physikalische Größe kann im Prinzip genutzt werden
 - mechanisch
 - optisch
 - elektromagnetisch
 - elektrisch
 - thermisch
 - magnetisch

Probability of Detection

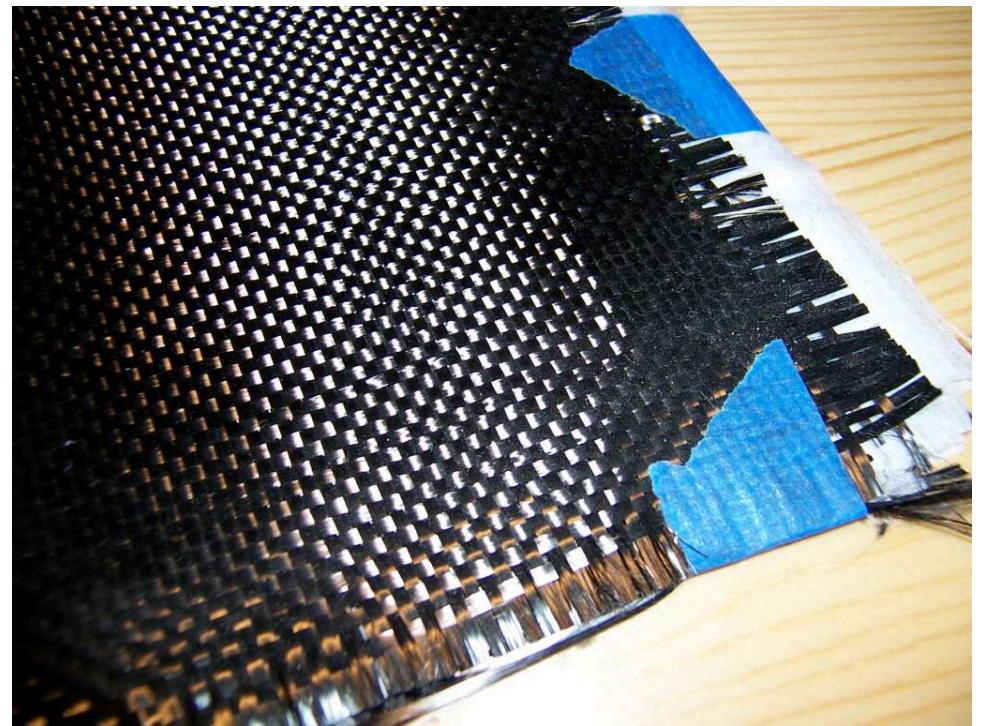
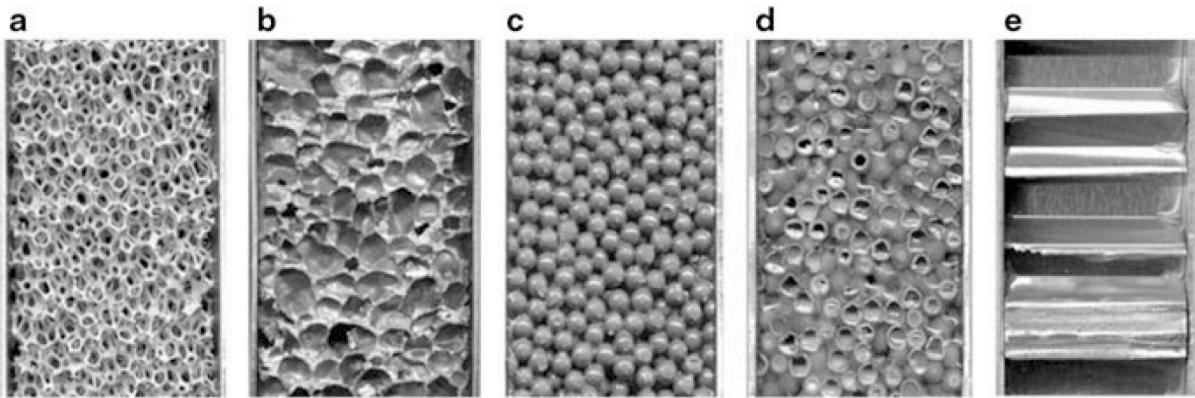
- Metrik, welche die Wahrscheinlichkeit der Detektion eines Fehlers einer bestimmten Größe angibt
- Die zulässige Fehlergröße ist bekannt
- mit einer Konfidenz von 95% angeben. D.h. zu 95% werden 90% der Fehler detektiert.



Schadensgröße

- je nach Verfahren variiert die detektierbare Schadensgröße
- es gilt nicht immer *kleine Schadensgröße = besser*
- minimaler Schaden $l = \frac{\lambda}{2}$ -> Abstasttheorem
- c ist die Licht- oder Schallgeschwindigkeit

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{6000m/s}{10^6 1/s} = 6mm$$



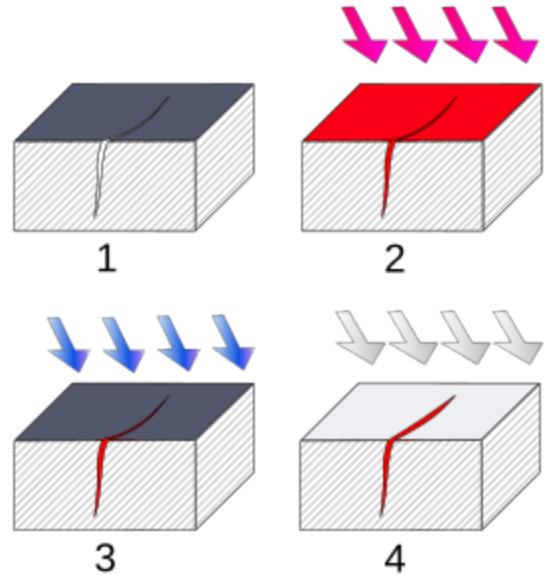
Kompromiss

- kleine Wellenlänge = größere Auflösung = größere Interaktion = kleinere Reichweite
- große Wellenlänge = kleinere Auflösung = weniger Interaktion = größere Reichweite
- 5G vs. 4G, UKW vs. Langwelle, usw.

Sichtprüfung

- kann mit verschiedenen Werkzeugen stattfinden und ist sehr verbreitet
- direkte Sichtprüfung
 - Auge
 - Boroskope (Elastoskope, Endoskope, Spiegelrohre, ...)
- indirekte Sichtprüfung
 - Kameras
 - Drohnen

Eindringprüfung



1. Reinigung, 2. Farbe auftragen und eindringen lassen, 3. Oberflächliches reinigen, 4. Entwickler auftragen
- bei Tageslicht oder im dunkeln

Durchstrahlungsprüfung

- Röntgen-, Mikrowellen-, Gammastrahlung
- Synchrotronstrahlung
(Spezialfälle, eher selten)
- auch als Computertomographie nutzbar

Thermographie

aktive

- Bauteil ist warm und wird vermessen
- Unterschiede in der Temperaturverteilung können zur Identifikation von Fehlern genutzt werden
- Prozessanpassungen sind möglich

passive

- Bauteil wird angeregt und die Reaktion wird vermessen
- induktive Erwärmung bei Kohlefaserverbundbauteilen

Modalanalyse

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{0}$$

- Eigenformen
- Eigenfrequenzen

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$$

Federpendel

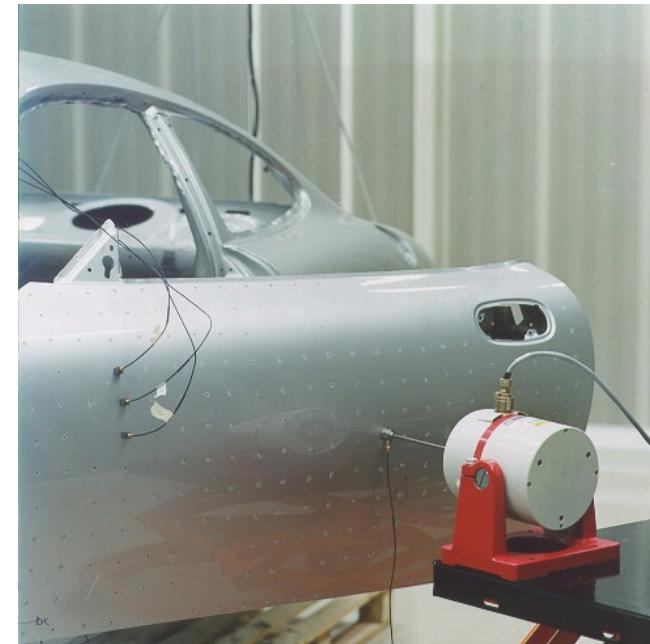
$$m\ddot{u} + cu = 0$$

$$c - \omega^2 m = 0$$

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

Modalanalyse

- Anregung mit einem Shaker oder Impulshammer
- Messpunkte mit Beschleunigungssensor oder Laser
- Ein Anregungspunkt -> viele Messpunkte
- Viele Anregungspunkte -> ein Messpunkt



Ultraschallprüfung

Wellenarten

Longitudinalwellen (P Wellen)

Transversalwellen (S Wellen)

Love Wellen

Rayleighwellen

Lambwellen, bzw. geführte Ultraschallwellen

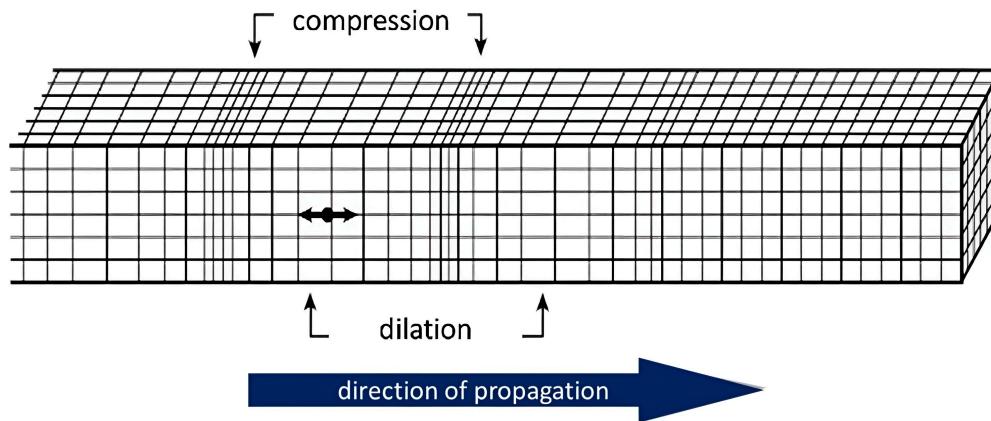
Symmetrische, unsymmetrische und Schubwellen

Torsionswellen

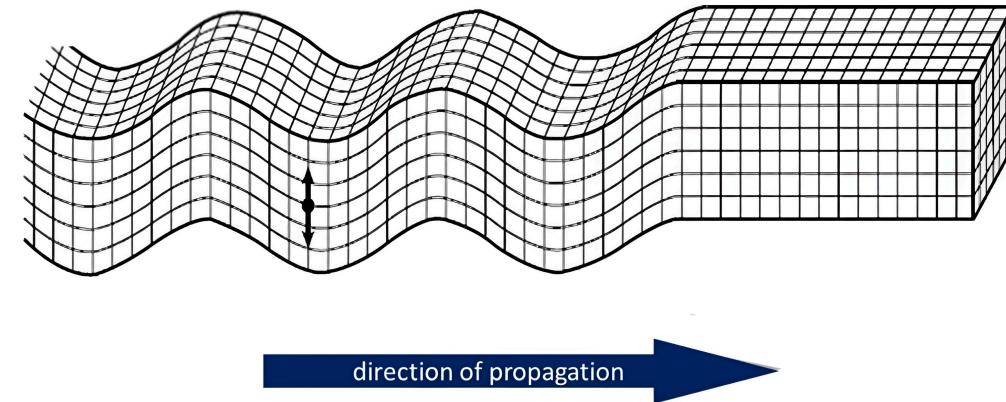
Schubwellen

Body Waves

P Wave

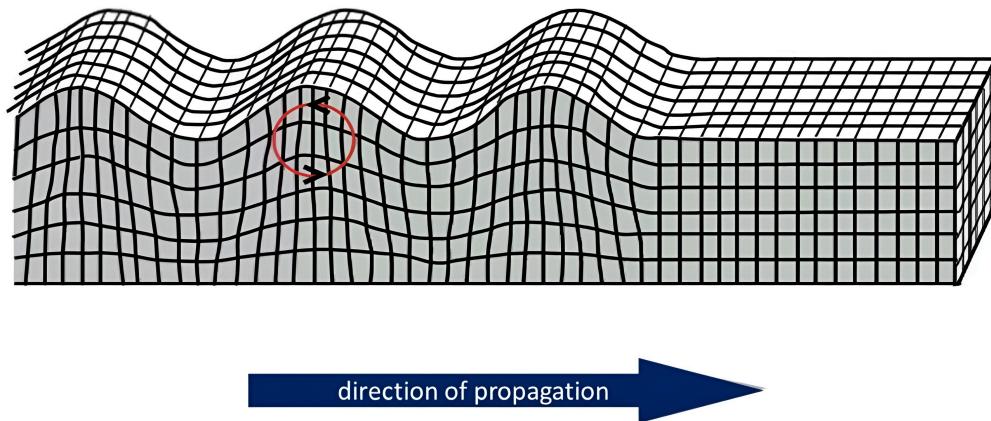


S Wave

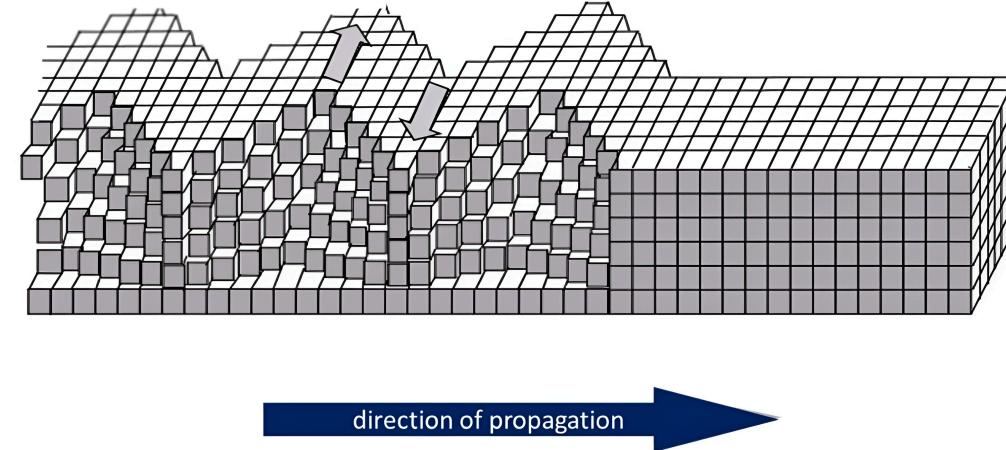


Surface Waves

Rayleigh Wave



Love Wave



Symmetrische Moden (Longitudinalwellen)



Anti-Symmetrische Moden (Transversalwellen)

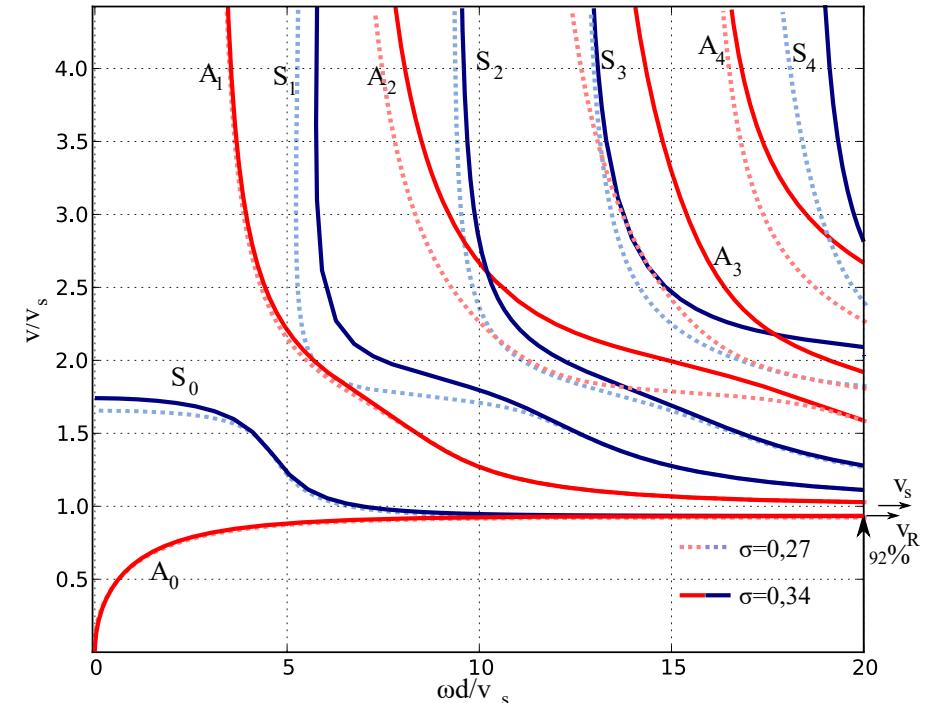


Schallgeschwindigkeiten

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-\nu^2)}}$$

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Geführte Ultraschallwellen sind dispersiv sie haben eine Gruppen und Phasengeschwindigkeit



Dispersion

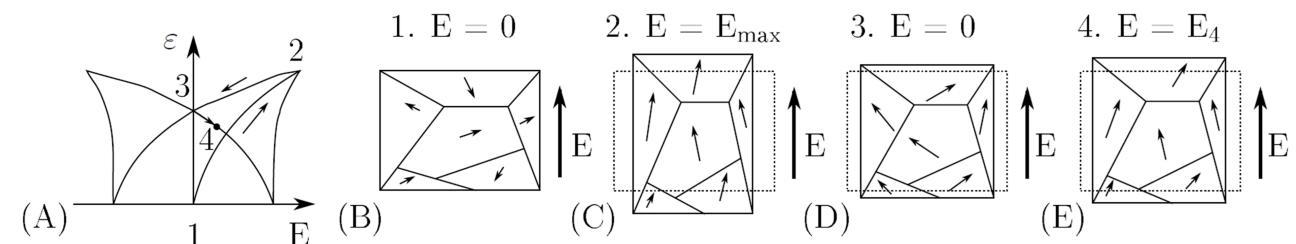
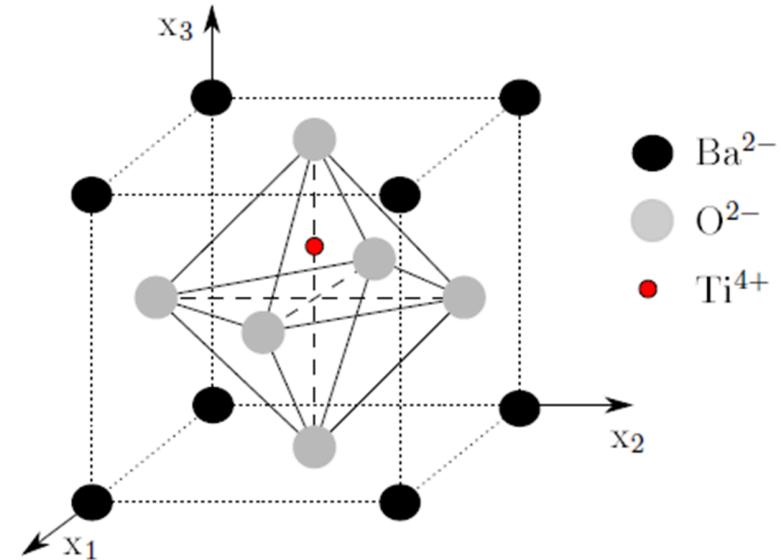
- Gruppengeschwindigkeit - wie schnell bewegt sich die Hüllkurve
- Phasengeschwindigkeit - wie schnell bewegt sich die Phase (einzelne Frequenz)
- für eine Frequenz sind Gruppen und Phasengeschwindigkeiten identisch



- Für frequenzabhängige Phasengeschwindigkeiten verbreitert sich die Hüllkurve -> Dispersion

Piezoelektrischer Effekt

- Aktuatoreffekt
- Sensoreffekt
- d_{31} ; el. Spannung in 3 Richtung und Deformation in 1, bzw. 2 Richtung
- d_{33} ; el. Spannung in 3 Richtung und Deformation in 3 Richtung



Reflexionen an Grenzflächen

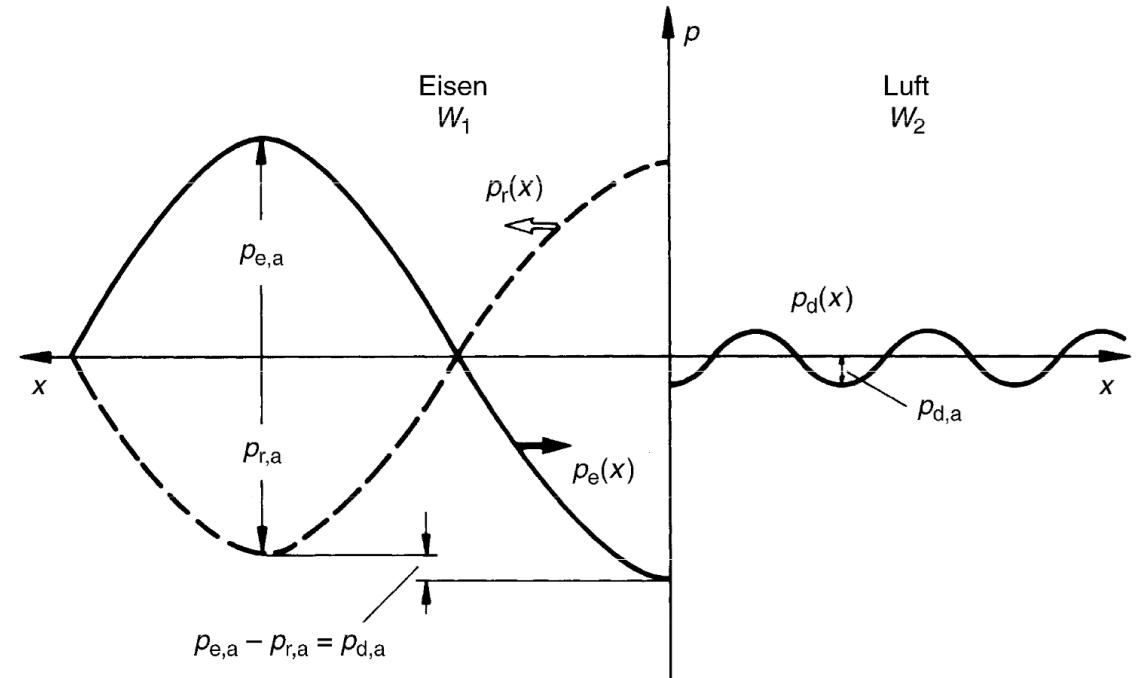
- Schallwiderstand $W = c_L \rho$

Reflektierender Schall

$$\frac{p_{a,r}}{p_{a,e}} = \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1}$$

Durchgehender Schall

$$\frac{p_{a,d}}{p_{a,e}} = \frac{2W_2}{W_2 + W_1}$$



Rechenaufgabe

- > Wasser - Stahl
- > Luft - Stahl
- > Wasser - Aluminium
- > Luft - Aluminium
- > Wasser - PMMA
- > Luft - PMMA

Signal - Rausch Verhältnis

$$SNR = \frac{P_{Signal}}{P_{Rauschen}}$$

- Mehrfachmessungen reduzieren den Rauschanteil

Messaufbau

- 1 - 2 Wandler
- Messverstärker
- Messaufnehmer



Bildreferenz

Anbindung des Prüfkopfs an die Oberfläche

Wasser

- billig
- gut automatisierbar

Motoröl, Schmierfett

- bereits vorhanden im Bauteil
- nicht optimiert auf Prüfung

Glycerin, Gel

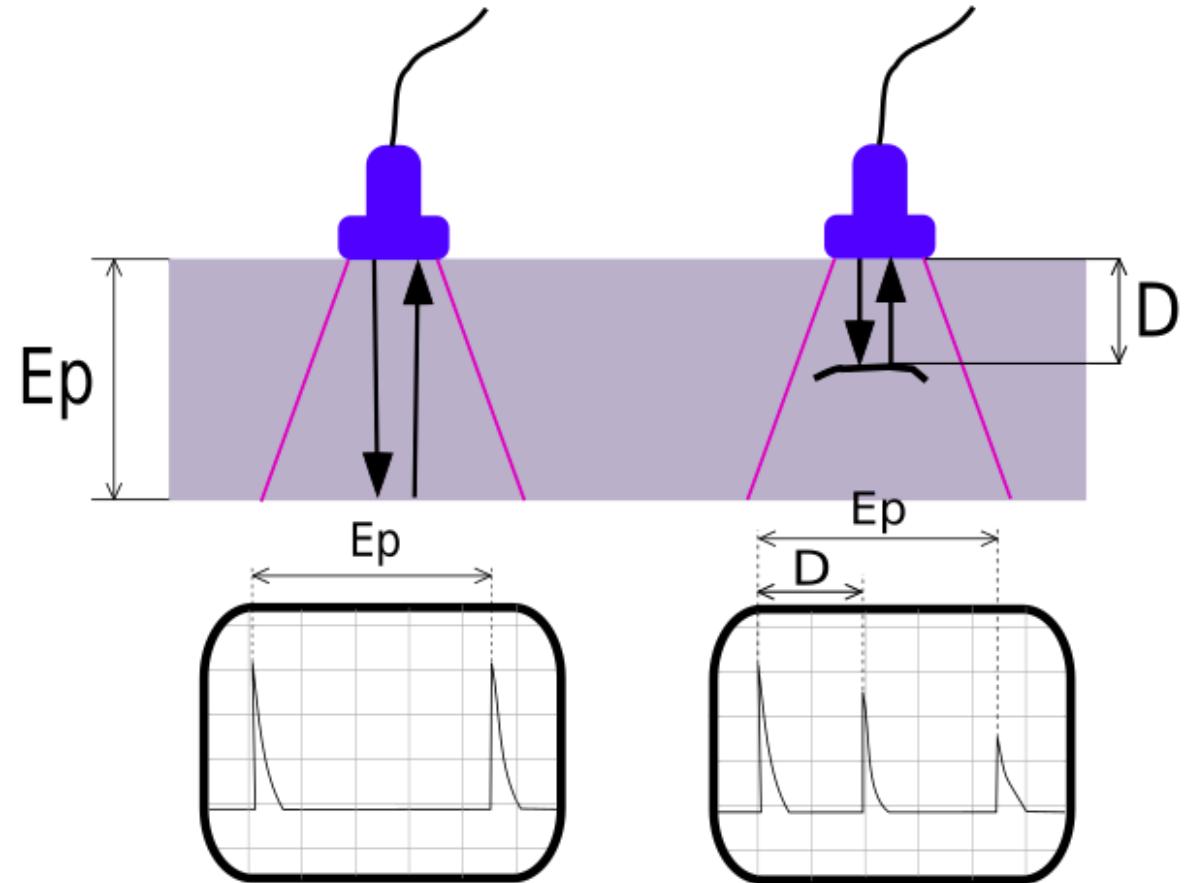
- Vorteilhaft ist die hohe Viskosität und die hohe akustische Impedanz
- raue Oberflächen und stark dämpfende Materialien (Schweißnahtprüfung)

Luft

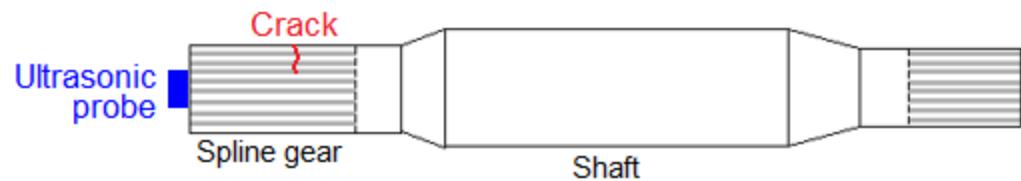
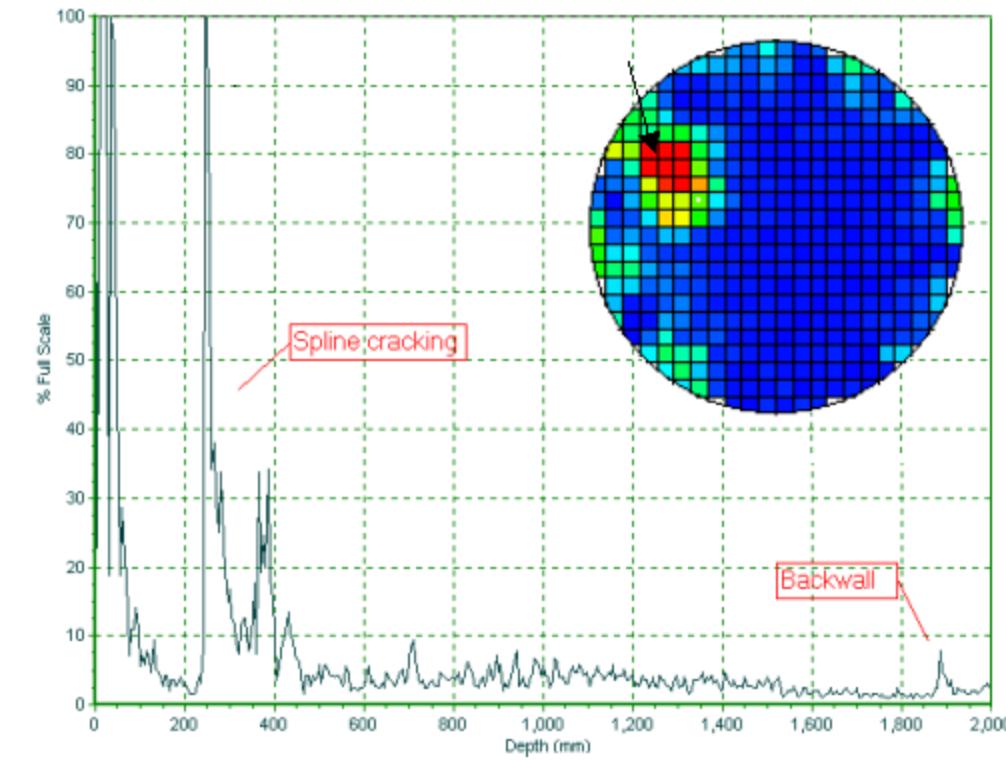
- spart Koppelmedium
- viel Rauschen

Impuls-Echo Verfahren

- Zone des "Todes"
 - Zeit für Wechsel von Sender zum Empfänger
- Doppelsensorsystem
 - Messung auf beiden Seiten
 - Zugänglichkeit und Aufwand



Messbild

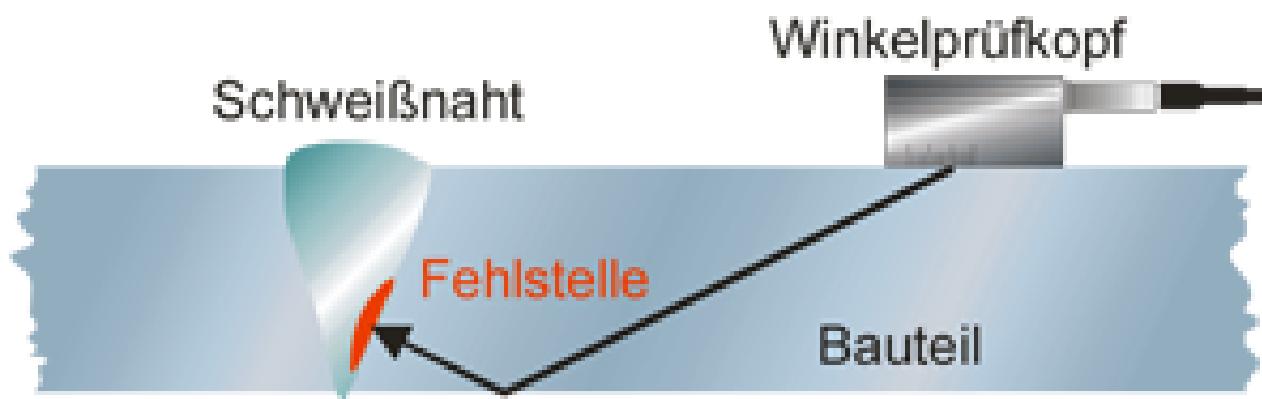


Schweißnahtprüfung

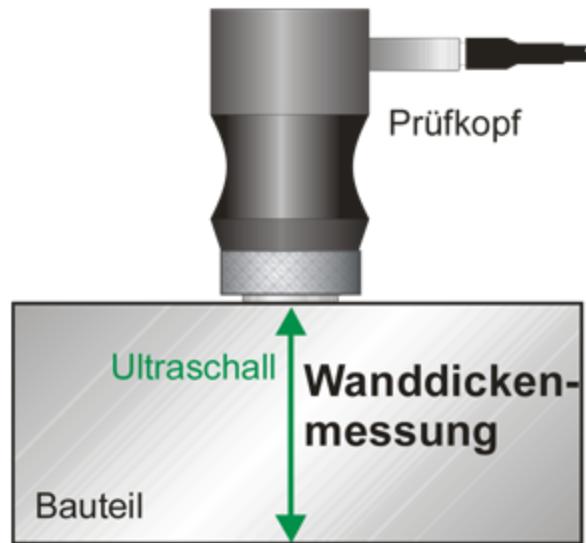
- Schrägschallung aufgrund der schwierigen Ankopplung

Klebschichten

- werden ähnlich geprüft
- es kann sogenannte "kissing bonds" geben



Wanddickenmessung

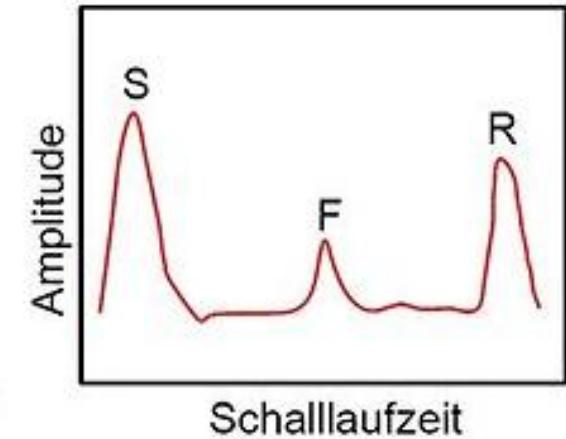
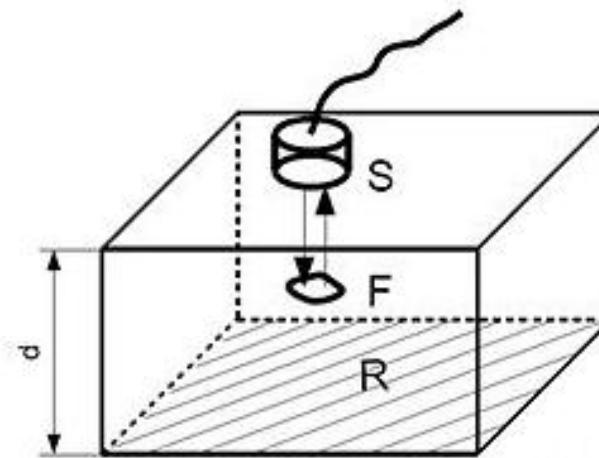


Bildgebung

- Messdaten können auf verschiedene Weise dargestellt werden

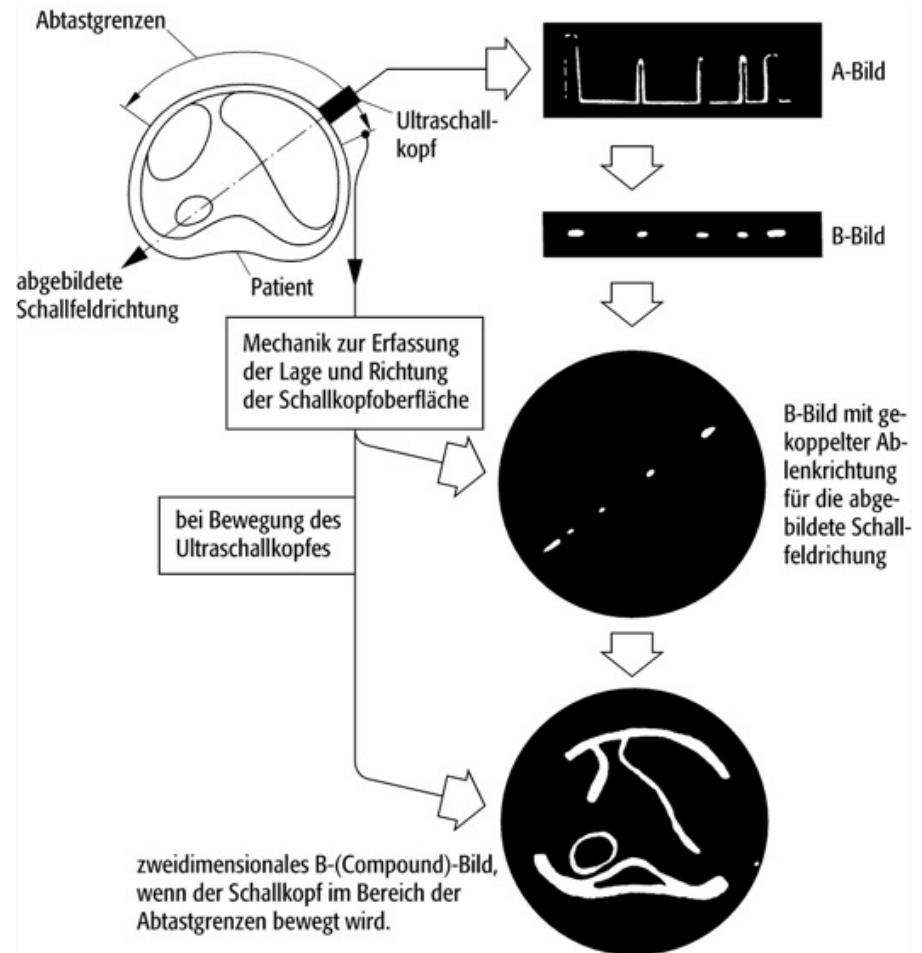
A Bild (amplitude)

- Laufzeit vs. Amplitude
- bei konstanter Geschwindigkeit kann für einen Punkt eine Fehlstelle im Signal detektiert werden



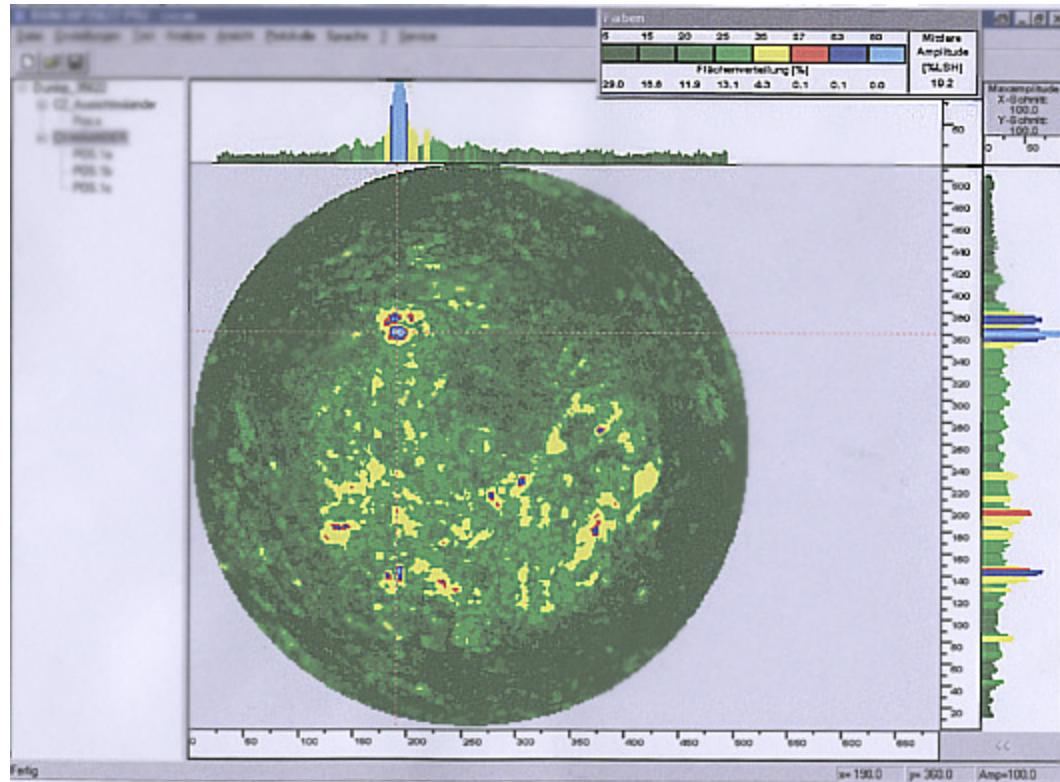
B Bild (brightness)

- Einzelpunkt ist nur eine andere Darstellung des A Bildes
(Intensität des Echos wird durch Helligkeit dargestellt)
- Durch die Erfassung der Schallrichtung können 2D oder 3D Bilder erzeugt werden



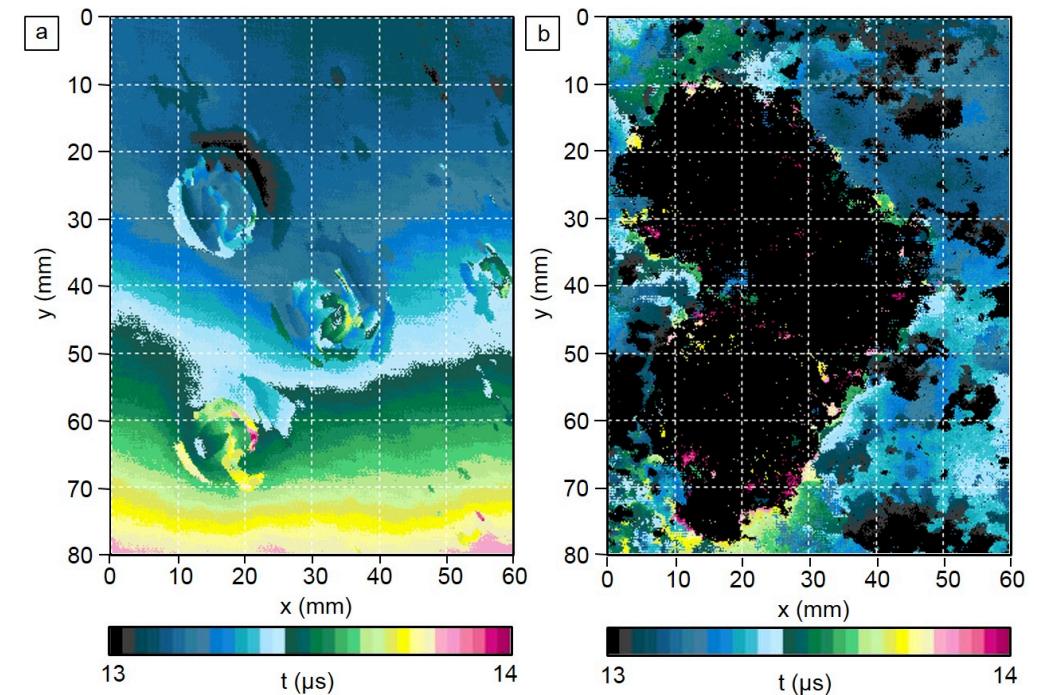
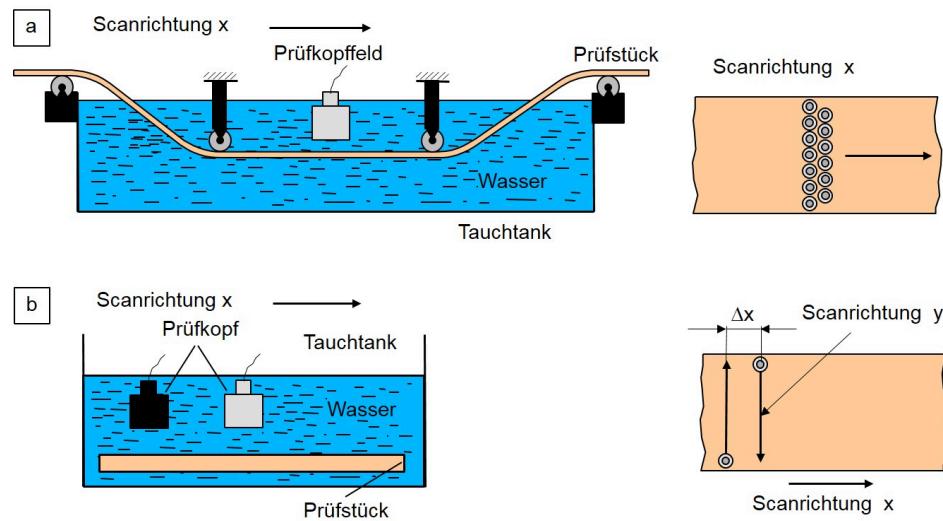
C Bild

- ein projiziertes Bild der Größen der Fehlstellen

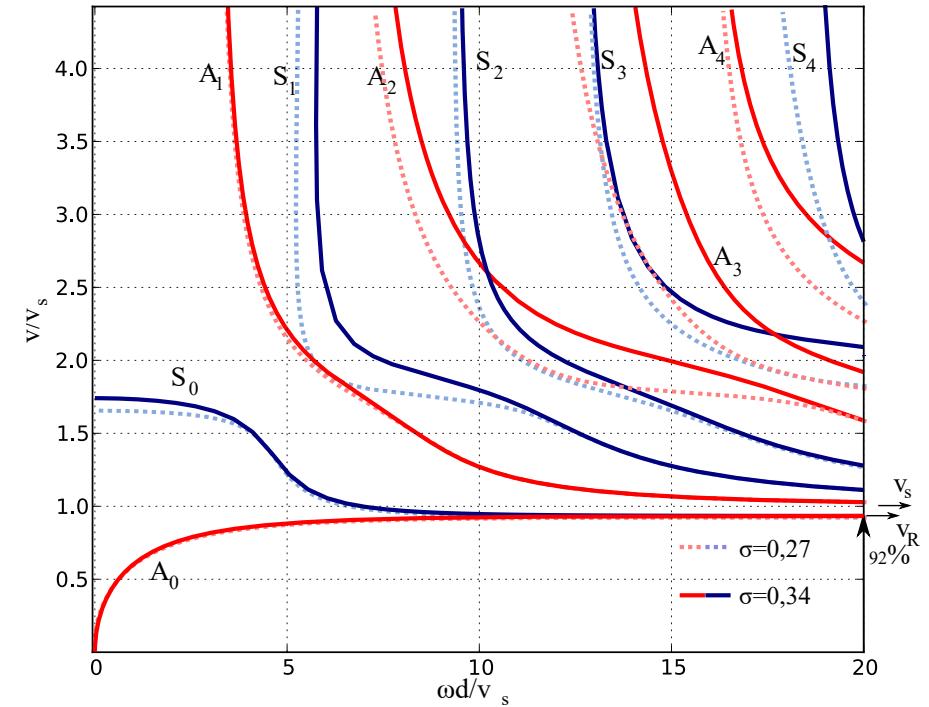


D Bild

- flächiger Scan



Dickenmessung mittels Geführten Ultraschallwellen



Structural Health Monitoring

- Überwachung einer Struktur während des Betriebs
- Verwand mit dem Condition Monitoring
 - bspw. Getriebeüberwachung -> Detektion von Lagerschäden

Ziele:

Wartungskosten senken

- weniger Reparaturen
- einfache Prüfung
- rechtzeitige Wartung
- Lastanpassung bei Schäden
- Lebensdauer verlängern
- Sicherheit erhöhen

Es gibt 4 Stufen.

Stufe 1

Ein System kann feststellen, dass ein Event passiert ist

Stufe 2

Ein System kann feststellen, dass ein Event passiert ist und wo es stattfand

Stufe 3

Ein System kann feststellen, dass ein Event passiert ist, wo es stattfand und was stattgefunden hat (Typ des Events)

Stufe 4

Ein System kann feststellen, dass ein Event passiert ist, wo es stattfand, was stattgefunden und wie schädlich dieses Event für die Struktur ist

Verfahren

- Modalanalyse
- Geführte Ultraschallwellen
- Akustische Emission
- Lastpfadanalysen
 - Beispiel Parallelfeder rechnen
- Dehnungsmessung
- Modellbasierte Ansätze

Technische Anwendungen

Brücken

- Second Penang Bridge - Penang, Malaysia



Pipelines

Technische Anwendungen

Flugzeug

- Lastpfadanalyse
- Überwachung von Anbindungen
- Sicherheit ist nicht der Hauptfokus in der Luftfahrt

Windenergie

Modalanalyse

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \hat{\mathbf{x}} = 0$$

- Eigenfrequenz $\omega = 2\pi f$
- Eigenformen $\hat{\mathbf{x}}$
 - **MAC** Kriterium
 - Winkelberechnung zwischen Eigenformen

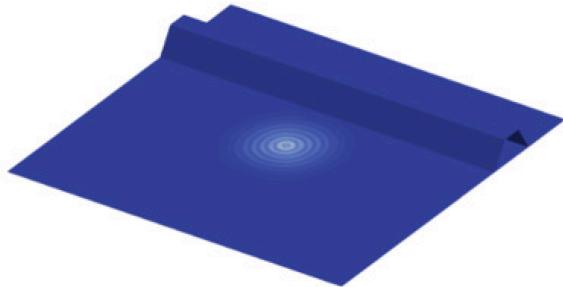
$$MAC = \frac{|\hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_{i,ref}|^2}{(\hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_{i,ref})(\hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_{i,ref})}$$

Software

Geführte Ultraschallwellen

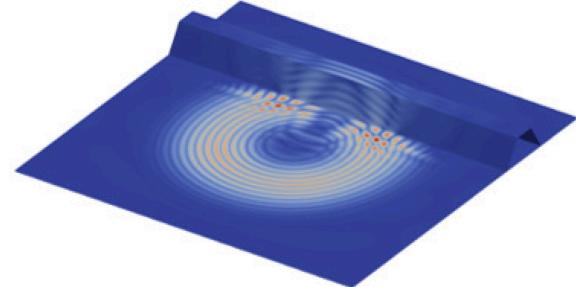
- Anregung über Piezokomposite
- Empfang mit Piezokompositen oder Fibre Bragg Gittern

$t = 70 \mu\text{s}$



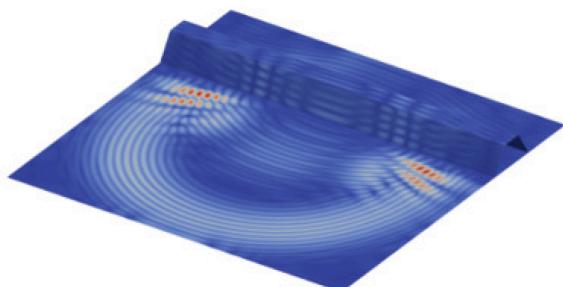
(a)

$t = 140 \mu\text{s}$



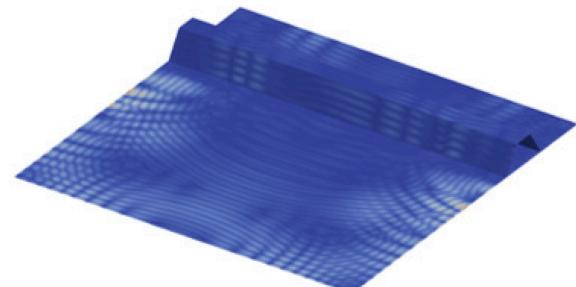
(b)

$t = 210 \mu\text{s}$

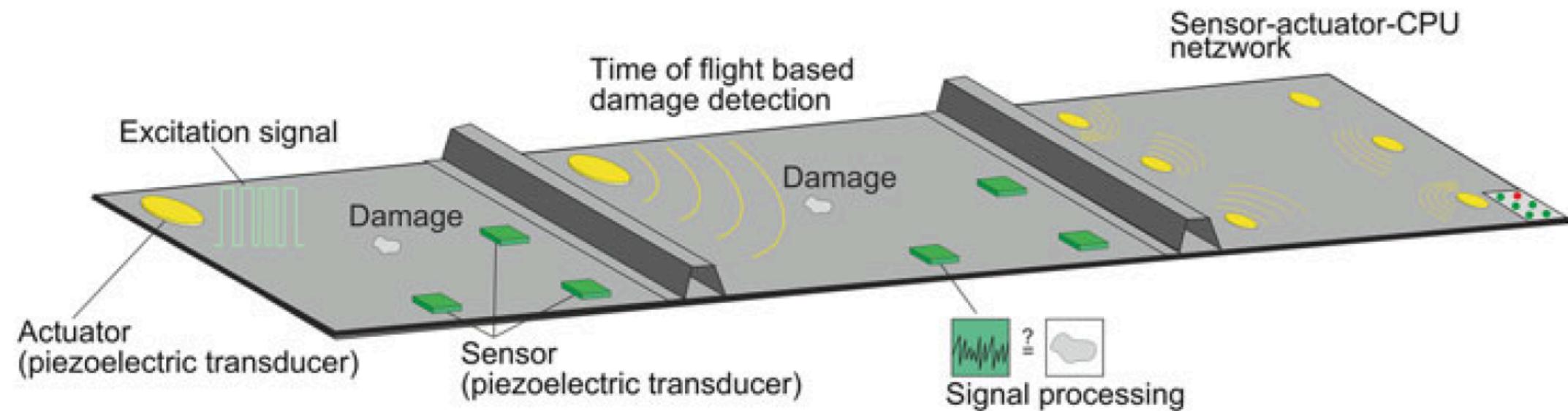


(c)

$t = 280 \mu\text{s}$



(d)



Schadensinteraktion

Herausforderungen

- Temperatur
- Feuchte
- innere Struktur des Materials
- Modenkonversion
- Spannungen in der Struktur
- Alterung

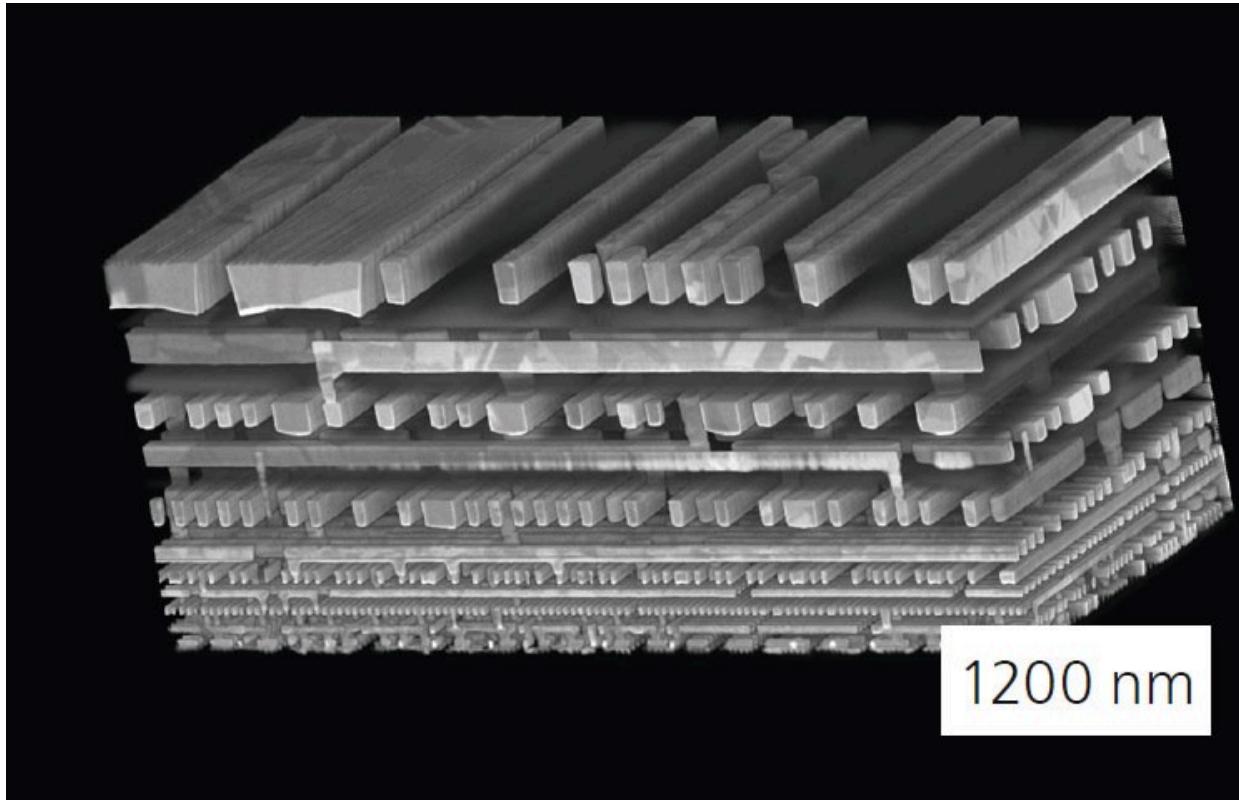
Potentiale

Beispiel Flugzeug

- BVI (barely visible impact)
- Größe ist durch Sichtbarkeit definiert
 - Leitwerk ist der Schaden größer als am Flügel
- SHM System erlauben kleinere Schäden bei der Auslegung
- Abgeschätzt der 1 - 5% Strukturmasse könnte reduziert werden

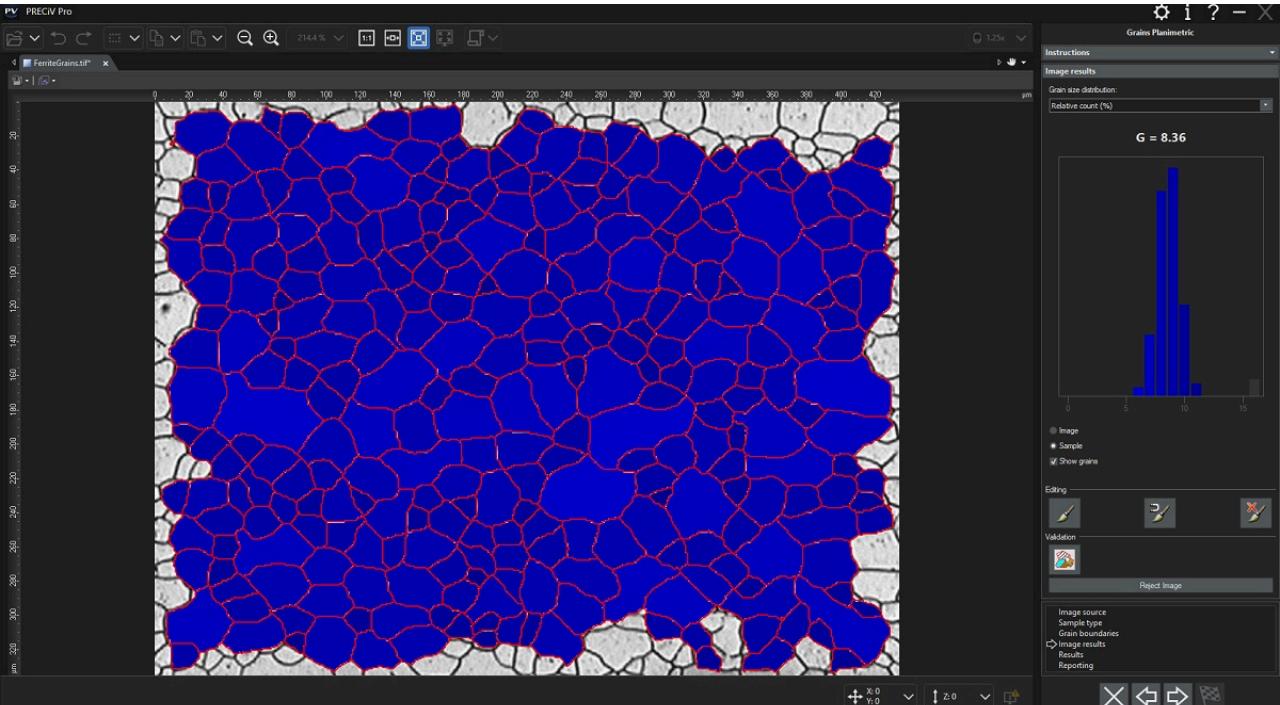
Mikroskopie

- Analyse der Mikrostruktur von Werkstoffen
- Lokale Analyse der Werkstoff- oder Kornzusammensetzung
- Präparation der Probe (Schleifen, Oberflächenbehandlung, usw.)
- Lichtquellen beeinflussen maßgeblich den Kontrast
- Filter



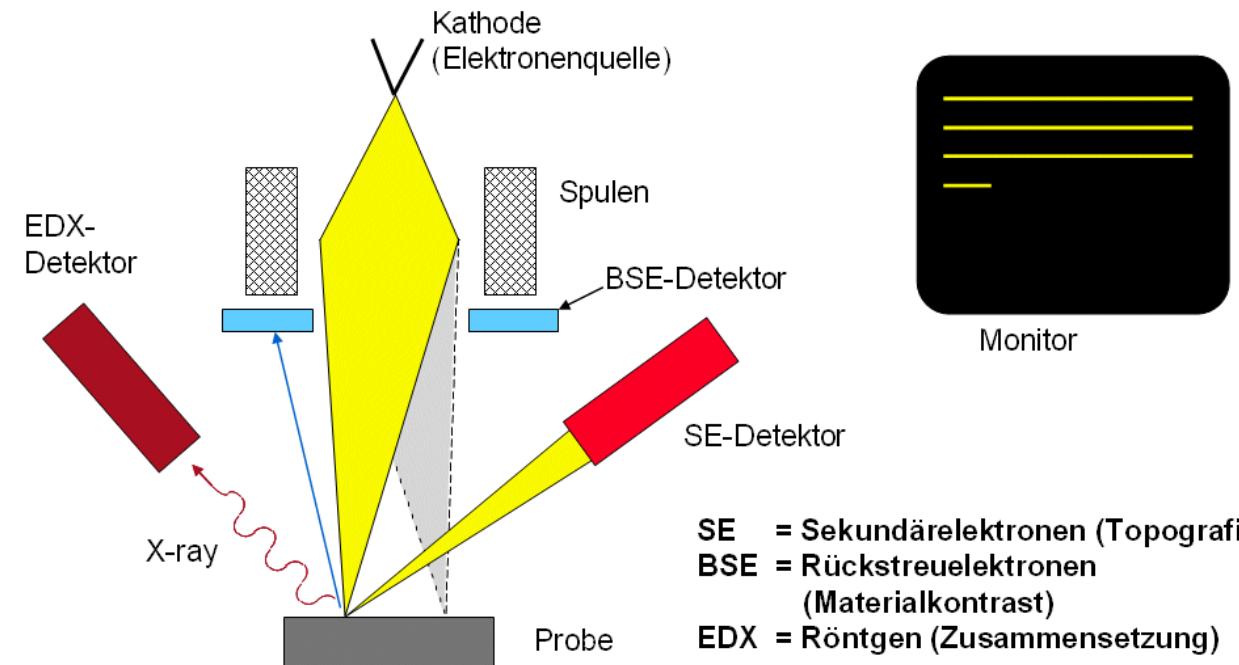
Lichtmikroskopie

- Korngrößenanalyse von Metallen und Legierungen
- Flächenzählverfahren
- Linienschnittverfahren
(Korngrenzengeschnitte mit durch den Prüfer in das Bild definierten Linienzug)



Elektronenrastermikroskop

- nutzt Elektronenstrahlen zum Abtasten
- Auflösung hierdurch deutlich erhöht $1\text{nm} \dots 2\text{nm}$
- ca. 500 mal bessere Vergrößerung als beim Lichmikroskop (2000:1) vs. (1000000)



Rastersondenmikroskopie

- Abstasten der Struktur mit einer Nadel
- Wechselwirkung ist nicht mechanisch und unterscheidet sich je nach Mikroskop
 - Tunnelstrom
 - Van der Waals Kräfte (korreliert mit Federsteifigkeit)
 - magnetische Kräfte

