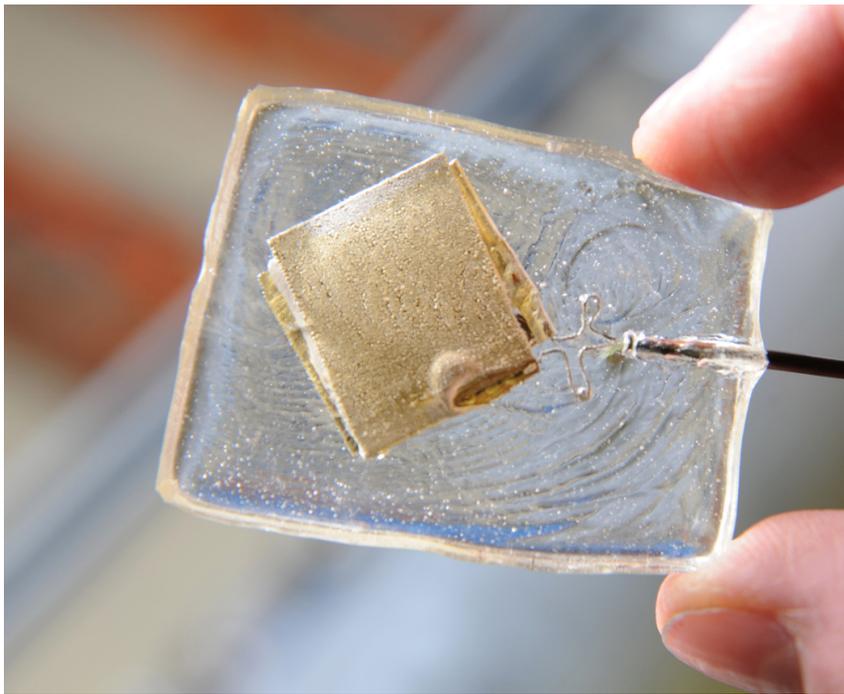


Hochtemperatur - Ultraschallwandler zur kontinuierlichen Strukturüberwachung an heißen Rohrleitungen

Dr. Bernhard Brunner, AK- Thermophysik, 17./18.3.2014,
ZAE-Bayern, Würzburg



Fraunhofer ISC – das Forschungsunternehmen

- 20,4 Mio € Budget:
 - 14,2 Mio € aus Auftragsforschung +
 - 6,2 Mio € aus institutioneller Förderung
- rd. 340 Mitarbeiter:
197 Festangestellte und zahlreiche Doktoranden, Diplomanden, Praktikanten, studentische Hilfskräfte
- ca. 390 Projekte erfolgreich umgesetzt (plus rd. 600 Kleinaufträge)
- 45 Patente offengelegt und erteilt
- mehr als 200 wissenschaftliche Kooperationen (inter-) national
- 4 Standorte:
Würzburg – Bronnbach – Bayreuth – Alzenau/Hanau



Fraunhofer ISC: Werkstoffwissen für die Herausforderungen von morgen

Kernkompetenzen

Chemische
Nanotechnologie

Prozesstechnik und
Charakterisierung

Glaschemie und
-technologien



Effizienz
Wandlung
Speicherung
neue Energieträger

Prozess- und
Ressourceneffizienz
Leichtbau
Monitoring

Regenerative Medizin
Dentalmaterialien
Diagnostik
Biophotonik

Definition „Structural Health Monitoring“ (SHM)

SHM ist die kontinuierliche und automatische Überwachung von Tragstrukturen, Anlagen und Bauwerken zur Erhaltung der Tragfähigkeit und Funktionsfähigkeit mit Hilfe permanent applizierter bzw. integrierter Sensorsysteme.

Die erkannten Veränderungen der Strukturantworten in Folge von äußeren Einwirkungen (z. B. Laständerungen, gezielte Anregung, Umweltrauschen) müssen im Bezug auf das Tragverhalten einer Struktur bewertet werden.

Häufig eingesetzte Technologien:

- **Modale Dynamik (Eigenfrequenzen, -formen, Dämpfung, Amplituden)**
- **Akusto - Ultraschall**
- **Akustische Signaturanalyse**

⇒ Ziel ist eine Wartung bzw. eine Reparatur bei Bedarf.

Sensorik zur Strukturüberwachung

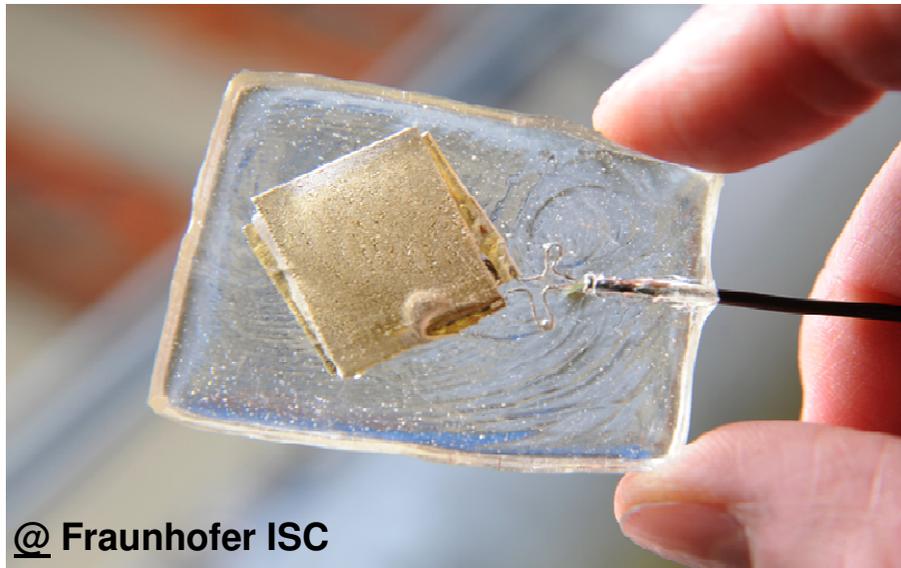
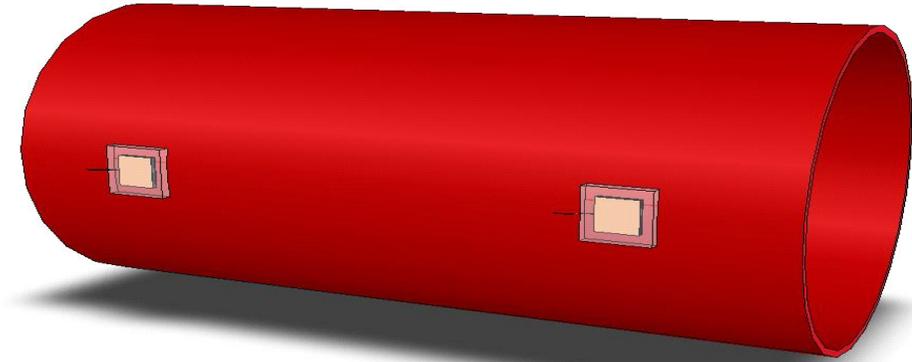
| <u>Vorteile</u> | | <u>Nachteile</u> |
|--|---|---|
| bekannte Technik, kostengünstig | Dehnmessstreifen | nur lokale Dehnungsmessung, keine Ortsauflösung |
| elektromagnetisch unempfindlich, keine Blitzschutzproblematik | (Faser) optische Sensoren | noch teuer, lokale nieder- frequente Dehnungsmessung |
| hohe Fehlerauflösung | Thermooptische Verfahren | lokale Methode, nur stationär und nicht online nutzbar, teuer |
| sehr hohe Fehlerauflösung, Nachweis von Rissen an Oberflächen und im Volumen | Ultraschall-, Röntgen-, Kernspinnverfahren | lokale Methode, sehr aufwän- dig und langsam bei größeren Flächen, nicht on-line fähig, nicht an heißen Bauteilen an- wendbar |

Anforderungen an Hochtemperatursensoren zur Strukturüberwachung an heißen Dampfleitungsrohren

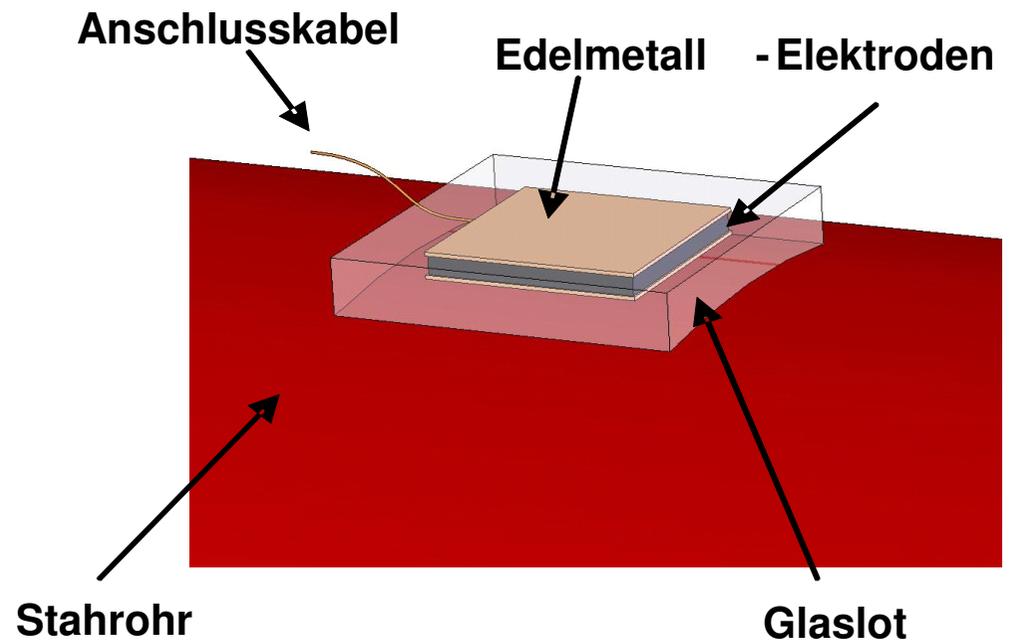
- **Kontinuierlicher Betrieb der Sensoren bei Temperaturen über 500 °C**
- **Hohe Lebensdauer der Sensoren mind. 5 Jahre, tendentiell 30 Jahre**
- **Wandler und Befestigung müssen häufiges An- und Abfahren der Anlage von 20 °C auf 500 °C und damit große Wärmedehnungen ertragen**
- **Verhinderung von Diffusionsvorgängen zwischen Stahlrohr und Applikationsmaterial auch über sehr lange Zeiten**
- **Applikationsprozess:**
 - **kurz, d.h. alle Wandler auf einmal, begrenzte räumliche und zeitliche Zugänglichkeit**
 - **Nutzung von Heizvorrichtungen im Kraftwerk**
 - **gekrümmte Oberflächen**
 - **Rohr darf sich thermisch oder mechanisch nicht verändern**

Aufbau von Hochtemperatur – Ultraschallwandlern

- Einsatz spezieller Hochtemperatur – Ultraschallmaterialien (z.B. Langasit – Einkristalle)
- Isolierung, Aufbau und Fixierung durch Glaslote
- Kontaktierung durch Edelmetalle
- Einkopplung des Ultraschalls direkt in den Prüfkörper durch Glas als Koppelmedium



@ Fraunhofer ISC



Applikation von Hochtemperatur – Ultraschallwandlern

- Applikation der Wandler mittels Klebeglas ($\alpha = 10,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) auf dem Stahlrohr ($\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) oder durch Keramik – Klebeverbindungen
- Mechanisches Polieren und Sandstrahlen der Stahlrohroberfläche
- Reduzierung der Eisendiffusion aus dem Stahlrohr in das Klebeglas durch Emaillierung
- Prozessierung im Laborofen und auf der Dampfrohrleitung gemäß vom TÜV freigegebenen thermischen Prozessen

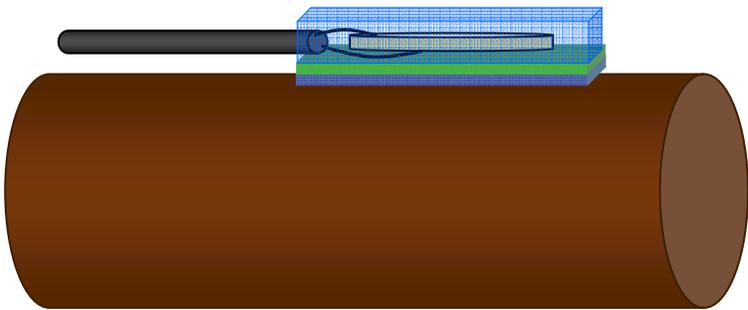


Systemkomponente Resonator: Langasit

| Werkstoff | Kristall-Struktur | Kopplungs-Faktor k | Piezo-Modul $d_{33} / pm/V$ | Curie-Temp. $\vartheta_c / ^\circ C$ |
|---|--------------------------|--|---|--|
| Quarz | Einkristall | 0,09 | 2...7 | 570 |
| Seignettesalz | Einkristall | 0,74 | 170 | 24 |
| Barium-Titanat | polykristallin | 0,21...0,50 | 80...190 | 120 |
| PZT-Keramiken | polykristallin | 0,15...0,72 | 50...765 | 180...400 |
| PVDF | teilkristallin | 0,12 | 20 | 135 |
| Lithiumniobat $LiNbO_3$ | Einkristall | 0,16 | 6 | 1150 |
| Galliumorthophosphat $GaPO_4$ | Einkristall | 0,16 | 9 | Phasenübergang @ 970°C |
| Langasit $La_3Ga_5SiO_{14}$ | Einkristall | 0,15 | 12 | Schmelzpunkt @ 1470°C |

Systemkomponente Glaslote: Eigenschaften

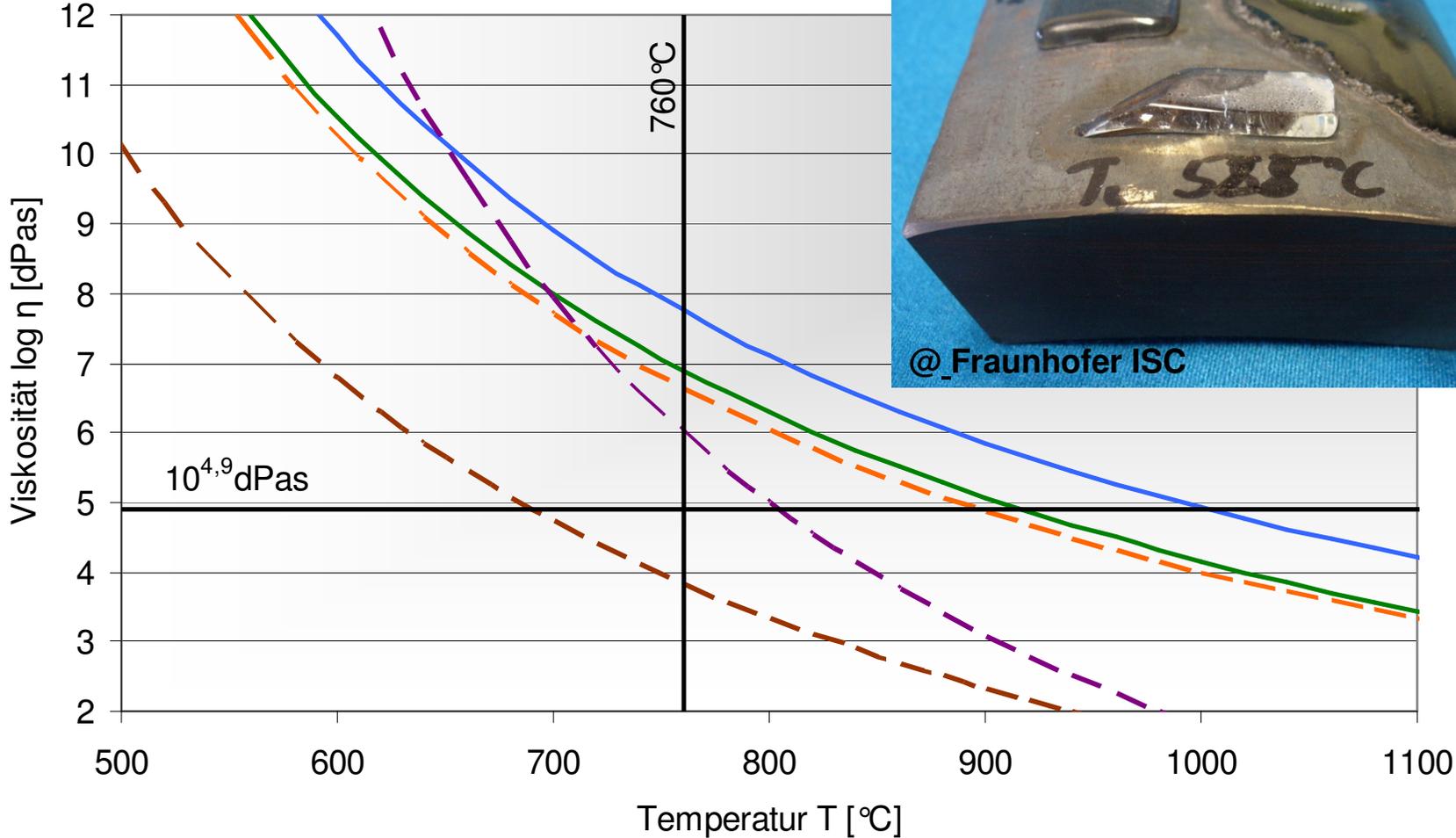
| Glasart | Mantelglas | Zwischenglas | Klebeglas |
|-----------------------------------|------------|--------------|-----------|
| $\alpha_{20-300} [10^{-6}K^{-1}]$ | 6,6 | 7,6 | 10,3 |
| $10^{4,9} dPas[^\circ C]$ (löten) | 1000 | 915 | 805 |
| $T_g [^\circ C]$ | 560 | 529 | 598 |
| $10^4 dPas[^\circ C]$ | 1133 | 1020 | 847 |
| $10^{7,6} dPas[^\circ C]$ | 769 | 720 | 709 |



- 10^4 : Verarbeitungstemperatur (z.B. Pressen, Ziehen), flüssig
- $10^{4,9}$: Fließpunkt, zäh flüssig
- $10^{7,6}$: Erweichungstemperatur, verfestigt
- 10^{13} : oberer Kühlpunkt, erstarrtes Glas
- $10^{13,2}$: Transformationstemperatur T_g zwischen spröd-elastischen Verhalten erstarrten Glases und dem zäh-plastischen Verhalten erweichten Glases

Systemkomponente Glaslote: Eigenschaften

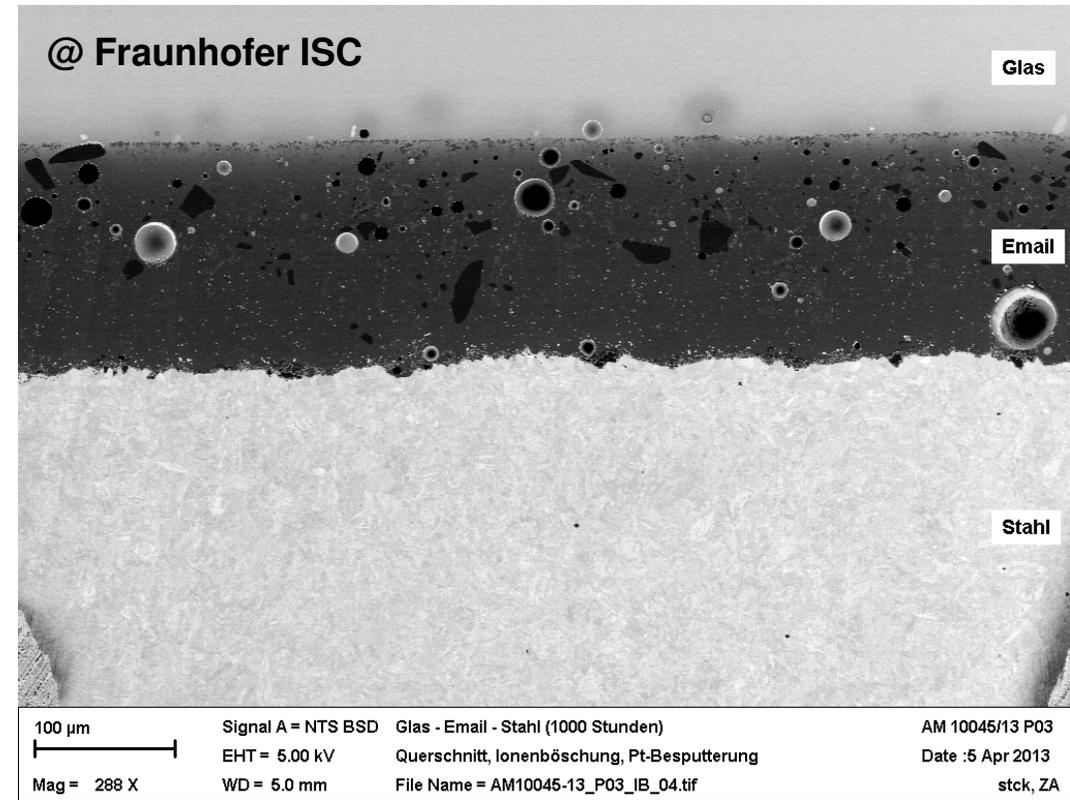
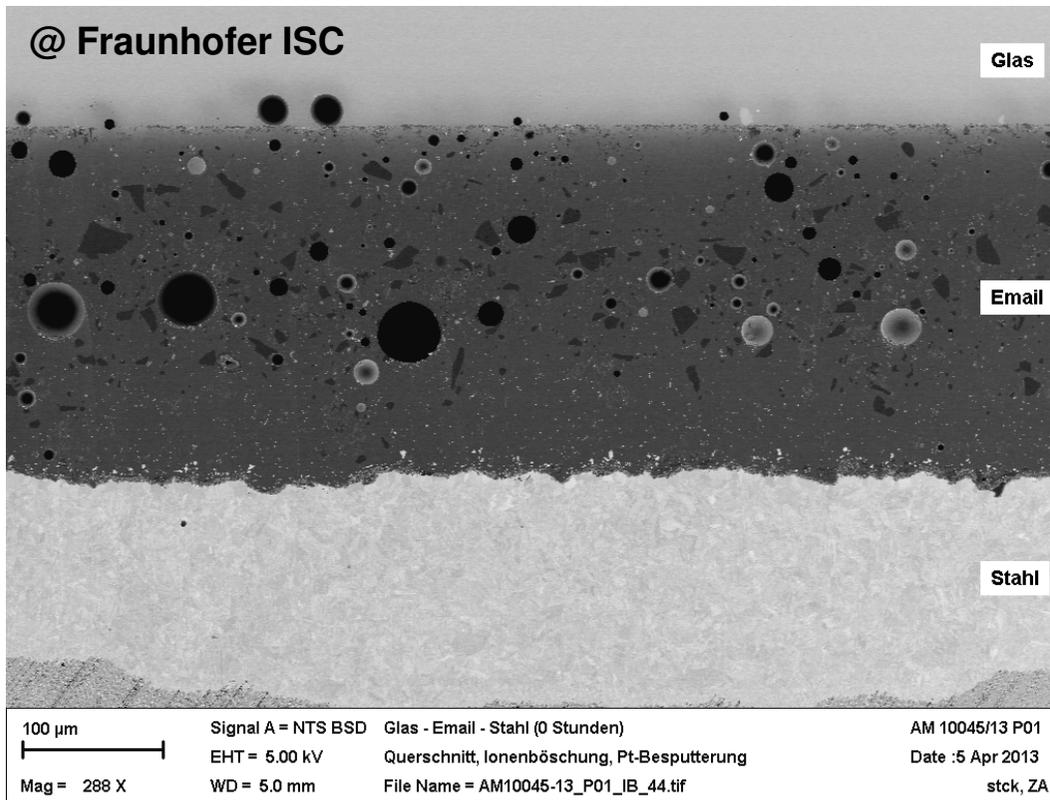
Viskositäts-
verlauf
verschiedener
Gläser



- Mantelglas
- Zwischenglas
- - - Klebeglas a
- - - Klebeglas b
- - - Klebeglas c

Systemkomponente Emaillierung: Diffusionssperre

Aufkleben der Wandler mit Klebeglas und Emaille als Eisendiffusionssperre
Auslagerungsversuche 0 - 1000h, 500°C: REM und EDX

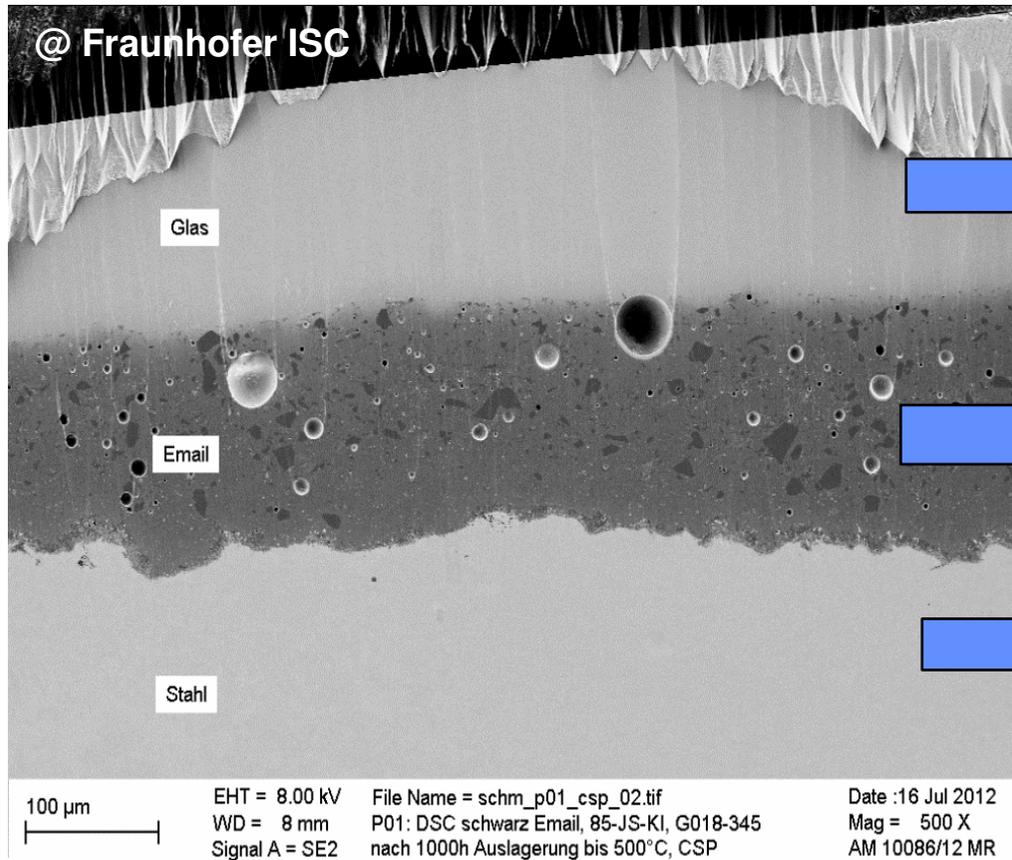


Direkt nach dem Aufschmelzen

Nach 1000 h 500 °C

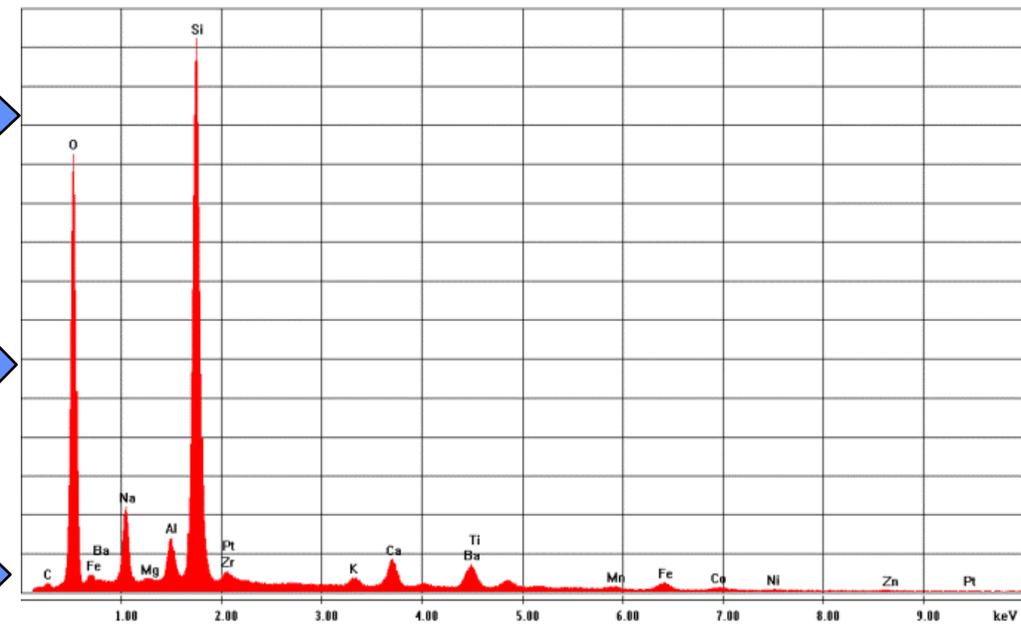
Systemkomponente Emaillierung: Diffusionssperre

REM und EDX an Emaille 1



S:\em\AM-Auftraege 2012\AM 10086_12 Schmitt - intern\REM_EDX\P01_DSC-schwarz-Email\schn_p01_csp_

Label A: REM-EDX-Spektrum Pos. 2 in schm_p01_csp_03.tif, U=15kV, MR



Emailliezusammensetzung: SiO_2 , Ca-, Ba-Oxide

Systemkomponente Emaillierung: Diffusionssperre

- keine Diffusionen Stahl / Emaille / Glaslot
- sehr gute Haftung des Verbundes Stahl - Emaille - Klebeglas
- keine Veränderung der Grenzfläche Stahl-Emaille und der Stahloberfläche nach 1000 h bei 500 °C, keine Stahlkorrosion
- Auswertung des Zeitstandsversuches nach 10.000 h erfolgt im Frühjahr 2014
- Einfache Emaillierung der Rohroberfläche durch Aufsprühen mit Airbrush – Pistole und anschließendem Einbrennen gemäß dem vorgegebenen thermischen Prozess



Applikation von Hochtemperatur – Ultraschallwandlern im Labor



**Sinterofen am ISC
(Innenraum Ø 900 mm, Länge 2500 mm)**



**Klebeglas und zusätzliches Glaslotpulver
auf dem emaillierten Stahlrohr**

Applikation von Hochtemperatur – Ultraschallwandlern am Bypass

Stahldosen als mechanischer Schutz der Wandler vor der Isolierung im Kraftwerk

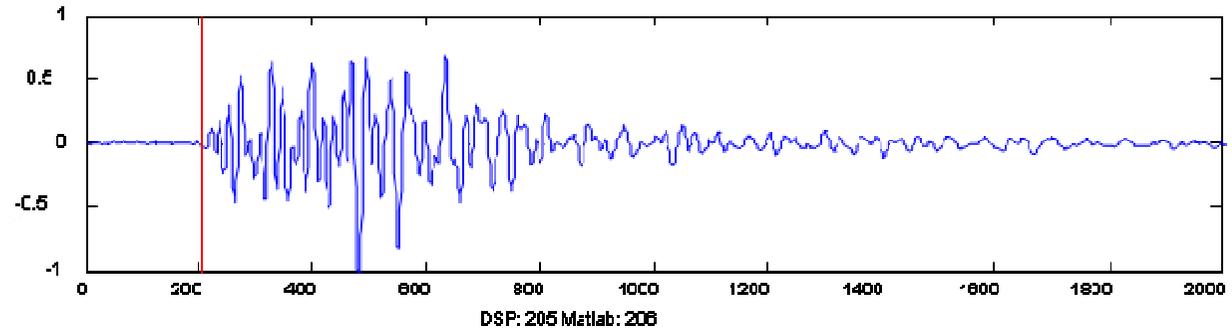
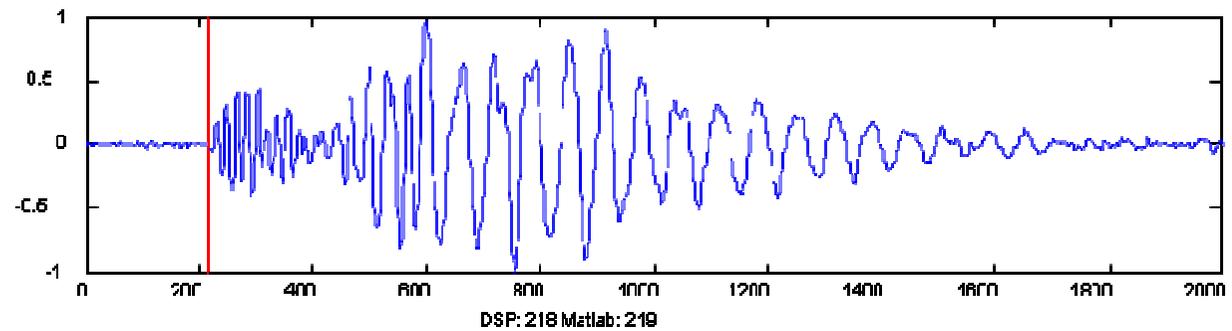
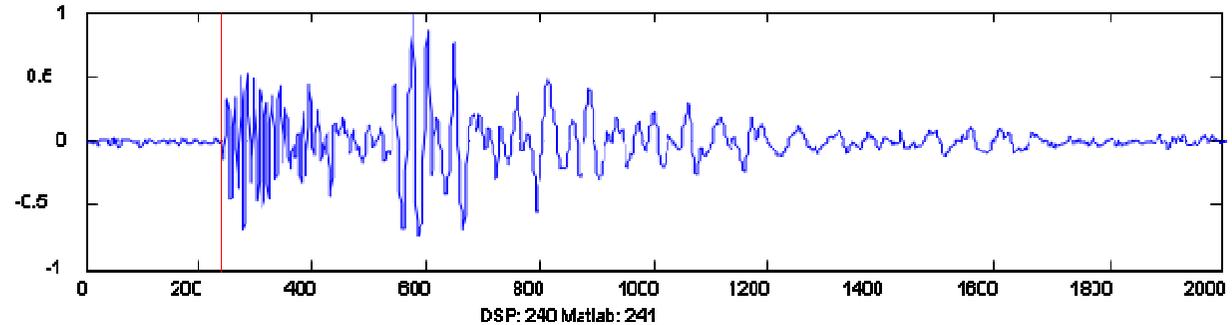
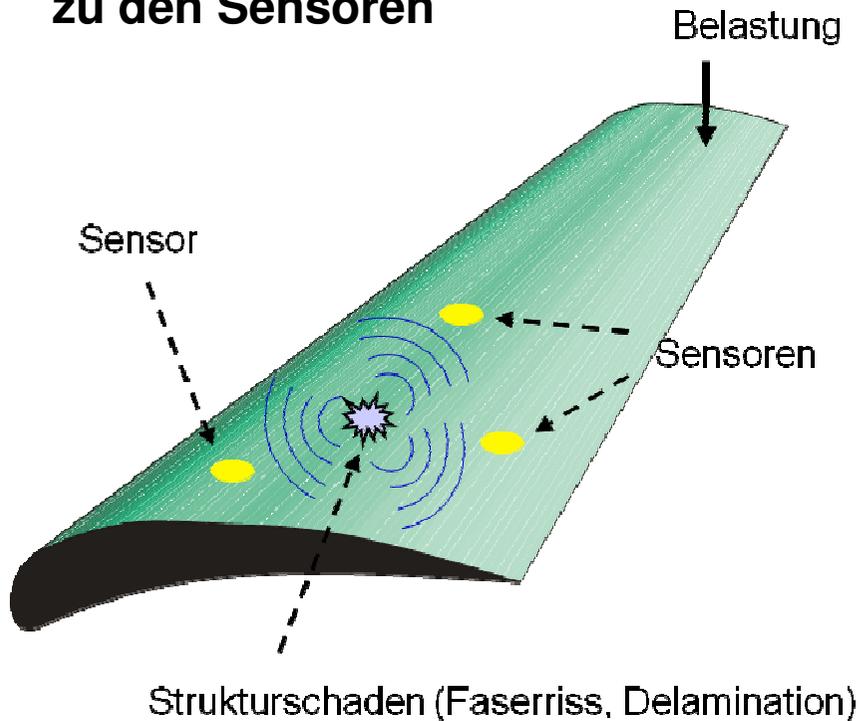


@ Fraunhofer ISC

Anwendung in der Strukturüberwachung

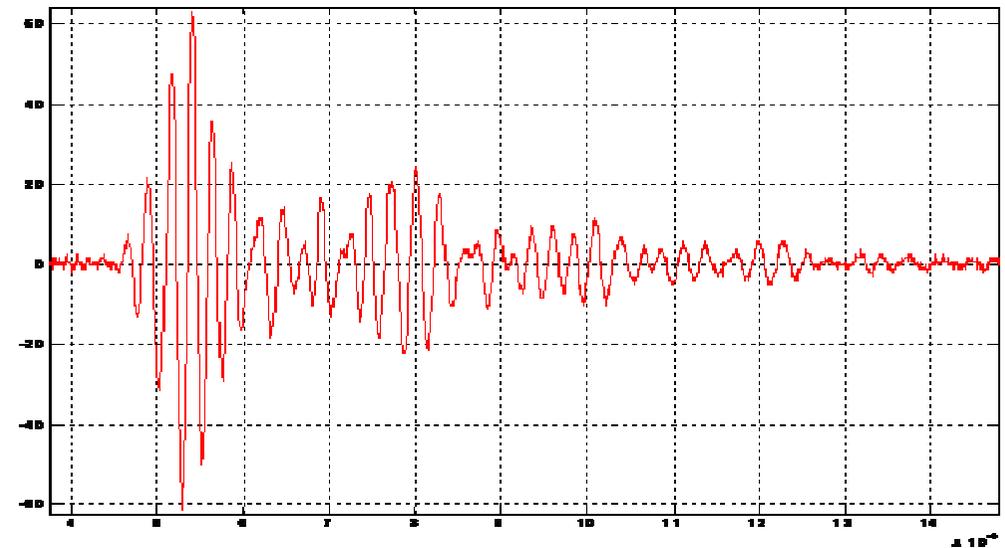
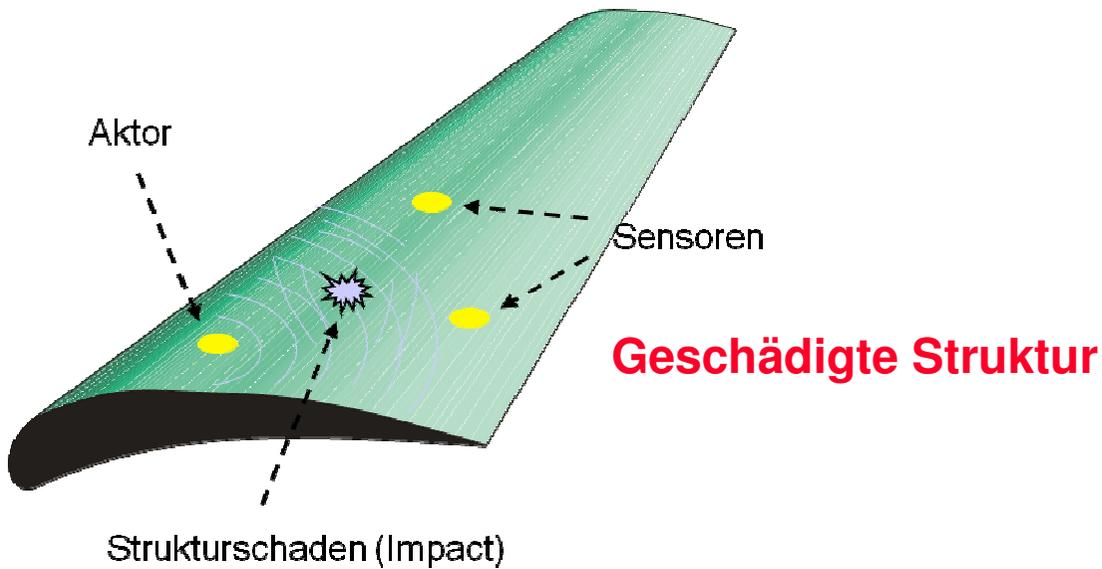
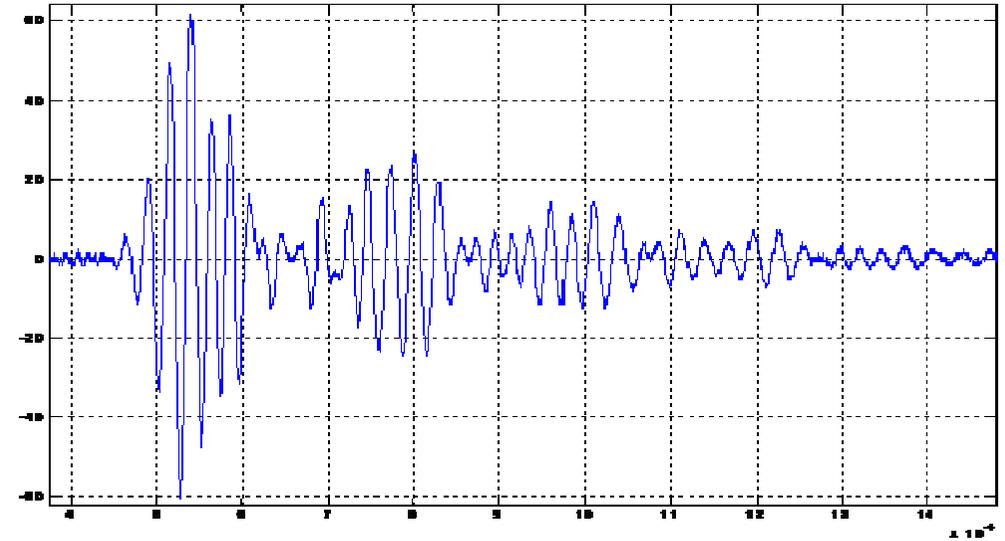
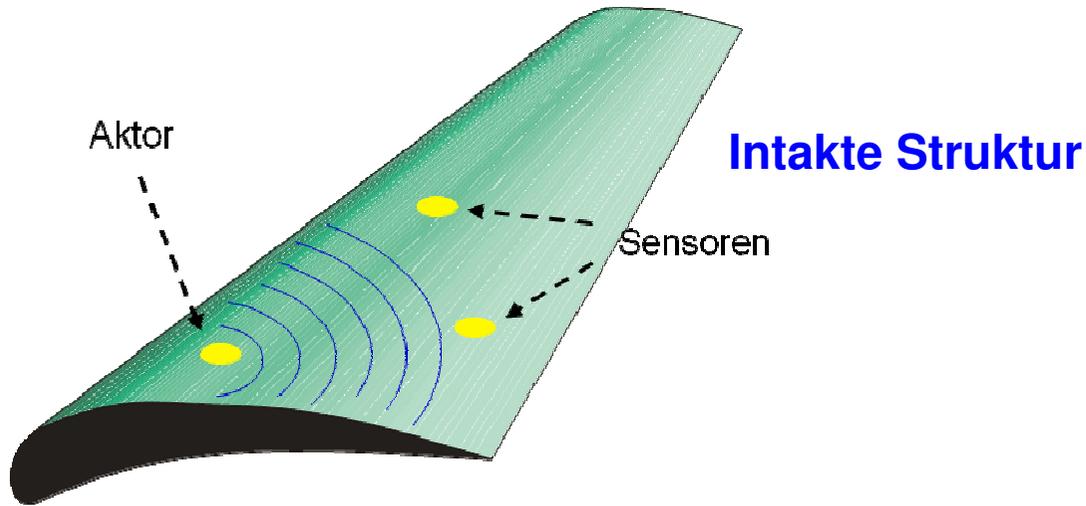
Schallemissionsanalyse mit Lambwellen und Akusto – Ultraschall

- Detektion von Schallereignissen bei Fehlerentstehung und Fehlerwachstum
- Ortung über Laufzeitdifferenzen zu den Sensoren



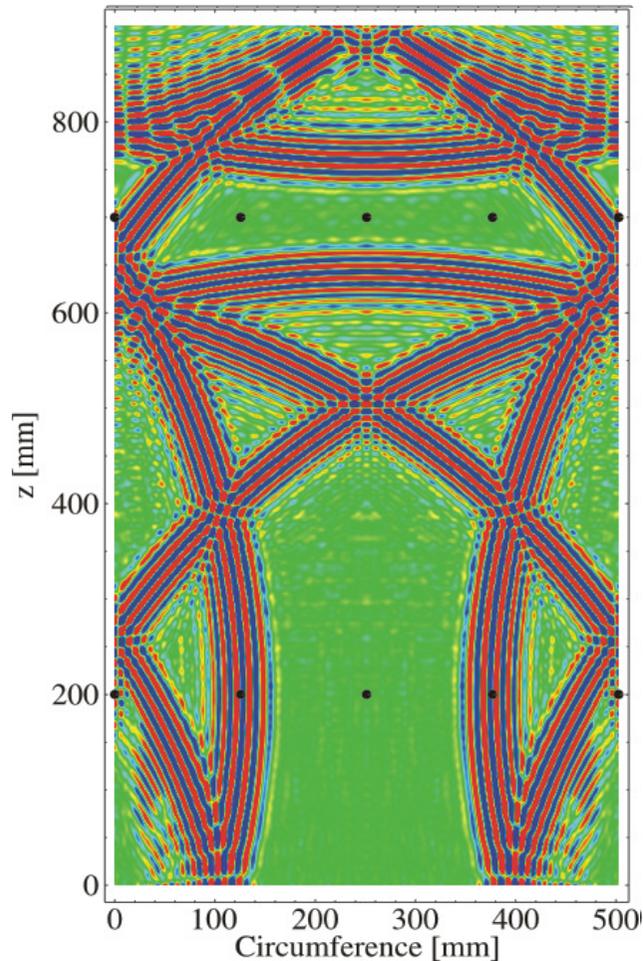
Anwendung in der Strukturüberwachung

Aktive akustische Signaturanalyse mit Lambwellen

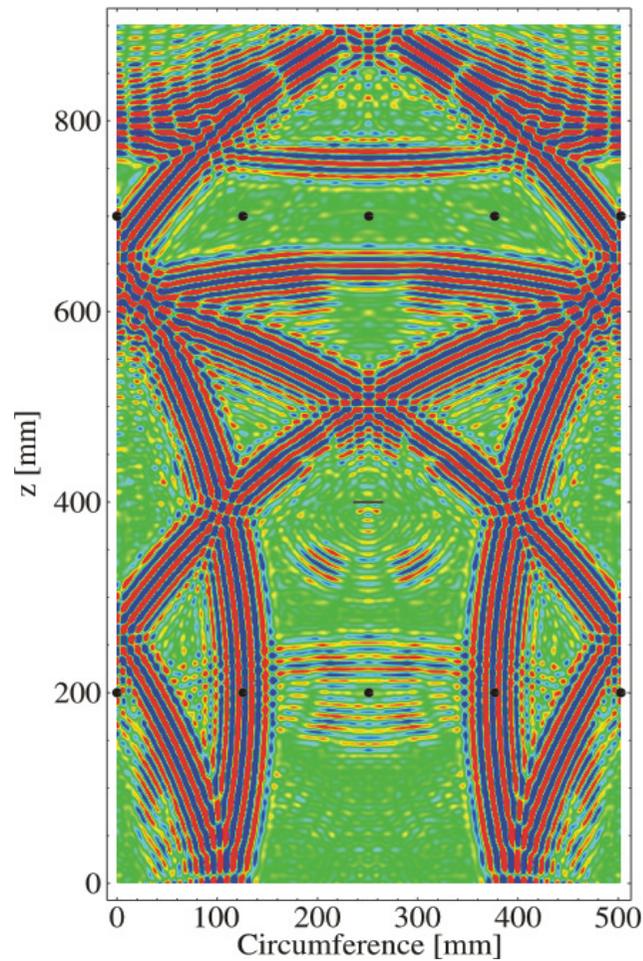


Anwendung in der Strukturüberwachung

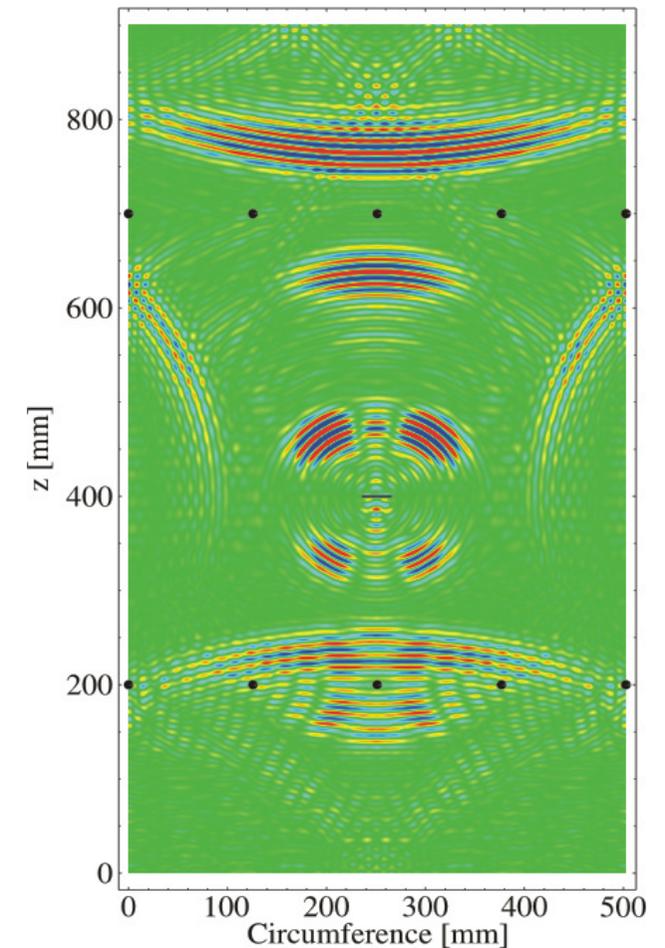
Simulation der Wellenausbreitung: Visualisierung durch Differenzbildung



Referenzzustand
ohne Schädigung



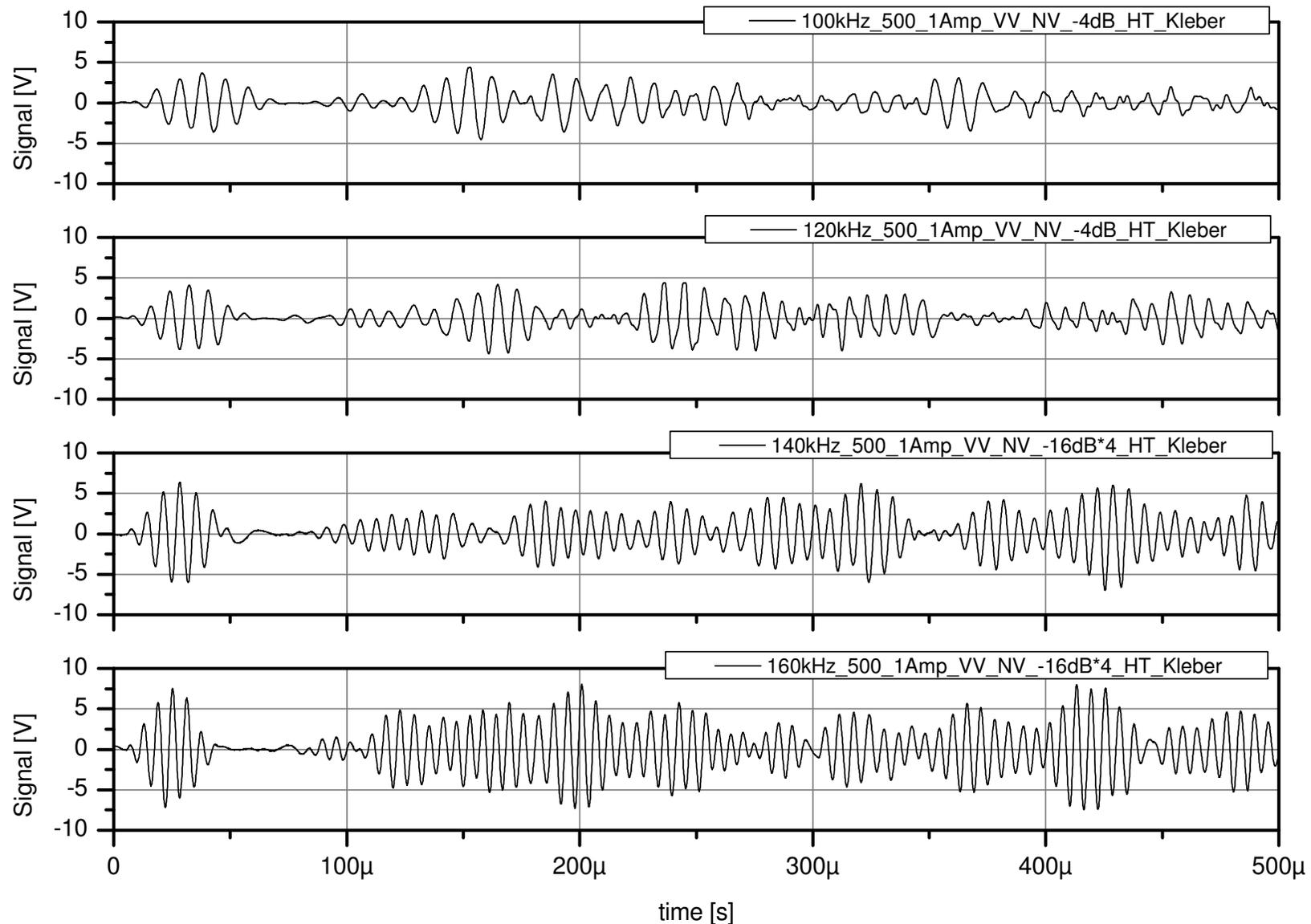
Geschädigter
Zustand



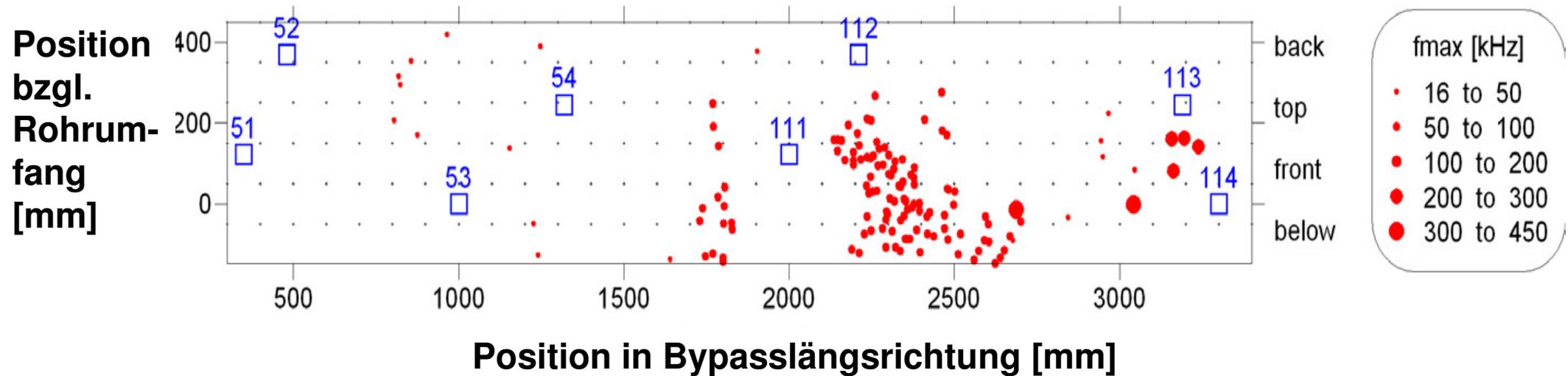
Differenz zwischen
Referenz und
geschädigtem Zustand

Schallübertragungseigenschaften der Wandler bei 500 °C

**Vergleichsmessung
der Schallübertragung
zwischen zwei
Langsitwandlern
auf einem Stahlrohr-
segment mit einem
Abstand von 300 mm
im Frequenzbereich
100 – 160 kHz bei
500 °C**



Schallemissionsmessungen an der Bypassleitung bei einer Dampfleitungstemperatur von 400°C



- Schallemission - Ortungsplot von ca. 140 Schallereignissen frequenz- und amplitudenabhängig entlang und in Umfangsrichtung des Rohres während einer Woche bei 400°C Oberflächentemperatur
- Detektion kleinster Mikrorisse durch die akustischen Emissionen charakteristischer Signale bei der Rissentstehung
- Lokalisierung aufgrund ihrer Schalllaufzeit zu den Wandlern bis auf wenige cm genau
- Zuweisung der charakteristischen Schallemissionskurven an die Fehlerursache steht noch aus

Zusammenfassung

- **Kontinuierlicher Betrieb der Sensoren bei Temperaturen über 500 °C**
- **Herstellung von thermisch und zeitlich stabilen Hochtemperatur – Ultraschallwandlern für den Dauereinsatz bis 500 °C auf Basis von Langasit – Einkristall Resonatoren**
- **Etablierung einer Aufbau – und Verbindungstechnik durch Nutzung von Glasloten und Edelmetallkontaktierung**
- **Nachweis von Diffusions- und Korrosionsschutz durch Emaillierung der Stahloberfläche**
- **Etablierung einer Applikationstechnik der Wandler unter Kraftwerksbedingungen**
- **Stabile Ultraschallübertragung über große Distanz und bei 500 °C**
- **Nutzung der Hochtemperaturwandler auch zur niederfrequenten Schwingungsmessung (0,1 – 1000 Hz)**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr. Bernhard Brunner

Fraunhofer Institut für Silicatforschung

Center Smart Materials

Friedrichstrasse 10a

D - 97082 Würzburg

Tel.: ++49 (0) 931 – 4100 416

Fax.: ++49 (0) 931 – 4100 498

email: bernhard.brunner@isc.fraunhofer.de

Internet: www.isc.fraunhofer.de

www.cesma.de