

# Faserverbundkunststoffe und geklebte Verbundstrukturen - Neue Herausforderungen für die ZfP an Schienenfahrzeugen

Bernd VALESKE<sup>1,2</sup>, Steffen BESSERT<sup>1</sup>, Holger NEUROHR<sup>1</sup>, Astrid WENDRICH<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

<sup>2</sup> Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw saar)

<sup>3</sup> DB Systemtechnik GmbH, Brandenburg-Kirchmöser

[bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de](mailto:bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de), +49 681 / 9302-3610

## Kurzfassung

Der moderne Schienenfahrzeugbau setzt im Zuge leichter und betriebsfester Karosseriekonzepte neben metallischen Strukturen zunehmend auf Polymerverbundwerkstoffe, z.B. im Bereich der Karosserie oder im Innenraum. Dabei kommen beispielsweise FVK-Strukturen oder Sandwichelemente sowie geklebte Mehrlagenaufbauten zum Einsatz.

Mit diesen neuen Materialklassen ergeben sich neue Herausforderungen u. Aufgaben für die Qualitätssicherung mit Hilfe der ZfP. Dies bezieht sich sowohl auf die produktionsbegleitende oder prozessintegrierte Prüfung bei der Herstellung u. Assemblierung von Komponenten (ZfP in der Neufertigung) als auch auf die ZfP im Rahmen der Wartung und für die sichere Reparatur / Instandhaltung. Neben den besonderen Prüfaufgaben für diese neue Klasse der FVK-Materialien kommen weitere Aspekte durch den Mischbau, d.h. infolge des Fügens unterschiedlichster Materialklassen, hinzu. Neue Fügeverfahren für den Misch- u. Leichtbau wie das strukturfeste Kleben erfordern besondere Prüfkonzepte und neue Lösungen der ZFP. Hier sind ein anderes Vorgehen und der Einsatz teilweise anderer Prüfverfahren notwendig wie bei der „klassischen ZFP“ für metallische Komponenten und für Schweißverbindungen. Die ZFP von Polymerverbunden u. Klebungen muss in großen Teilen mit einer erweiterten Methodik erfolgen. Hinsichtlich der Prüfkonzeption und Eingliederung in den Produktlebenszyklus muss ein gewisses Umdenken stattfinden.

Besondere Potentiale versprechen Methoden wie aktive Thermografie, Scherografie, trockene Ultraschallprüfung, akustische Resonanzverfahren oder elektrische und elektromagnetische ZFP-Varianten. Einerseits setzen die genannten Prüfansätze auf die Erfassung geometrischer Merkmale und der FVK-Struktur oder auf die Erkennung von Defekten. Um andererseits die zusätzlich notwendige Charakterisierung der festigkeitsbestimmenden polymeren Eigenschaften zu erreichen, sind darüber hinaus Prüfverfahren (weiter) zu entwickeln, welche die molekulare Dynamik und mikrostrukturellen Veränderungen im Polymer abbilden (z.B. NMR-Aufsatztechnik, Dielektrische Impedanzanalyse, Multispektrale Infrarot-Thermografie, Laser Bond Inspection usw.).

Der Vortrag gibt einen Überblick über aktuelle Forschungsergebnisse und ZFP-Konzepte in diesem neuen Anwendungsfeld.

---

# Faserverbundkunststoffe und geklebte Verbundstrukturen

## Neue Herausforderungen für die ZfP an Schienenfahrzeugen

---



**Prof. Dr.-Ing. Bernd Valeske**  
[bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de](mailto:bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de)  
European Adhesive Engineer © EWF  
(Stv. Institutsleiter Fraunhofer IZFP)

Dipl.-Ing. S. Bessert, Dr. H. Neurohr  
(Fraunhofer IZFP)

Dr. A. Wendrich (DB Systemtechnik)

---

bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen  
15.-17.03.2016



---

## INHALTSÜBERBLICK

---

- Zielsetzungen und Philosophie (ZfP Strategie)
- Klassische ZfP zur „Fehlerprüfung“
- Erweiterte ZfP-Methoden (E-NDT) zur Eigenschafts- und Funktions-Charakterisierung von Polymer-Verbindungen
- Zusammenfassung und Ausblick

---

bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen  
15.-17.03.2016

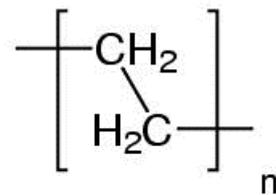
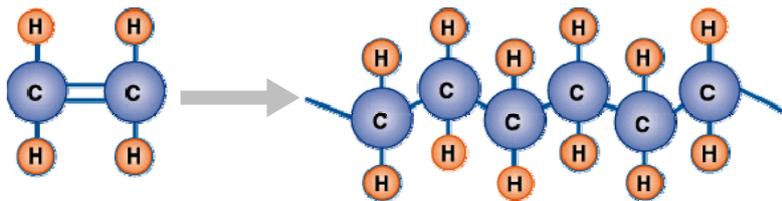
» 2 «



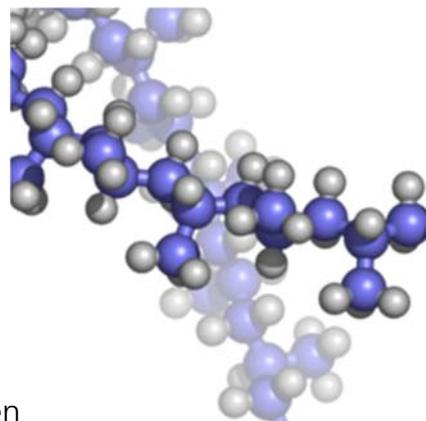
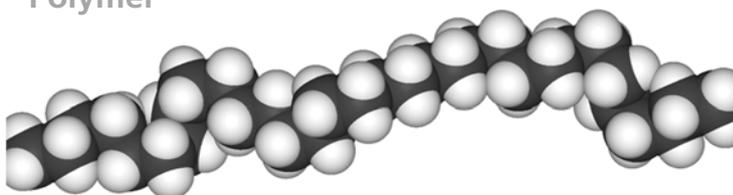
# INHALTSÜBERBLICK

- **Zielsetzungen und Philosophie (ZfP Strategie)**
- Klassische ZfP zur „Fehlerprüfung“
- Erweiterte ZfP-Methoden (E-NDT) zur Eigenschafts- und Funktions-Charakterisierung von Polymer-Verbindungen
- Zusammenfassung und Ausblick

## ? Polymere ? Ein einfaches Beispiel: Chem. Struktur von Polyethylen (PE)



Thermoplastisches  
Polymer



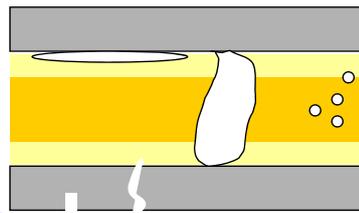
### Moleküldynamik

- Mobilität in der C-Rückgratkette
- Rotationen & Schwingungen von Molekül-Gruppen (lokal oder kooperativ → Glasübergang)

## Qualitätsmerkmale am Beispiel einer „Sandwich“-Klebung

### Kontaktfläche / Interphase

- Delaminationen
- „Weak Bonds“
- „Kissing Bonds“



### Klebfuge („Polymer-Bulk“)

- Dicke der Klebschicht
- Füllgrad
- Poren (Kanäle) & Porosität
- Aushärtung
- Feuchtigkeit
- Fremdoobjekte
- Risse im Bulk
- Aushärtung
- Erweichung

### Fügepartner

- Risse
- Korrosion
- Beschädigungen / Verformungen

einfachster Fall:  
„Sandwich-Klebung“

... spezifische Defekte  
bei komplexen Klebverbunden

→ Folge:

unzureichende Verbundfestigkeit, „Undichtigkeit“, Funktionalität ...

## ZFP zur Qualitätssicherung entlang der klebtechnischen Fertigungskette

### Pre-Process:

Integrität der  
Fügeteile,  
Eigenspannungen,  
Oberflächen-  
zustand, Klebstoff-  
viskosität / Lager-  
zustand

### In-Process:

**Rheologisches Verhalten**,  
Viskositätsveränderung,  
Klebstoff-**Applizierung**  
(Geometrie, Position,  
Blasen), Poren, Einschlüsse.

Mangelhafte Benetzung,  
**Aushärtung** (1K oder 2K)

### Post-Process:

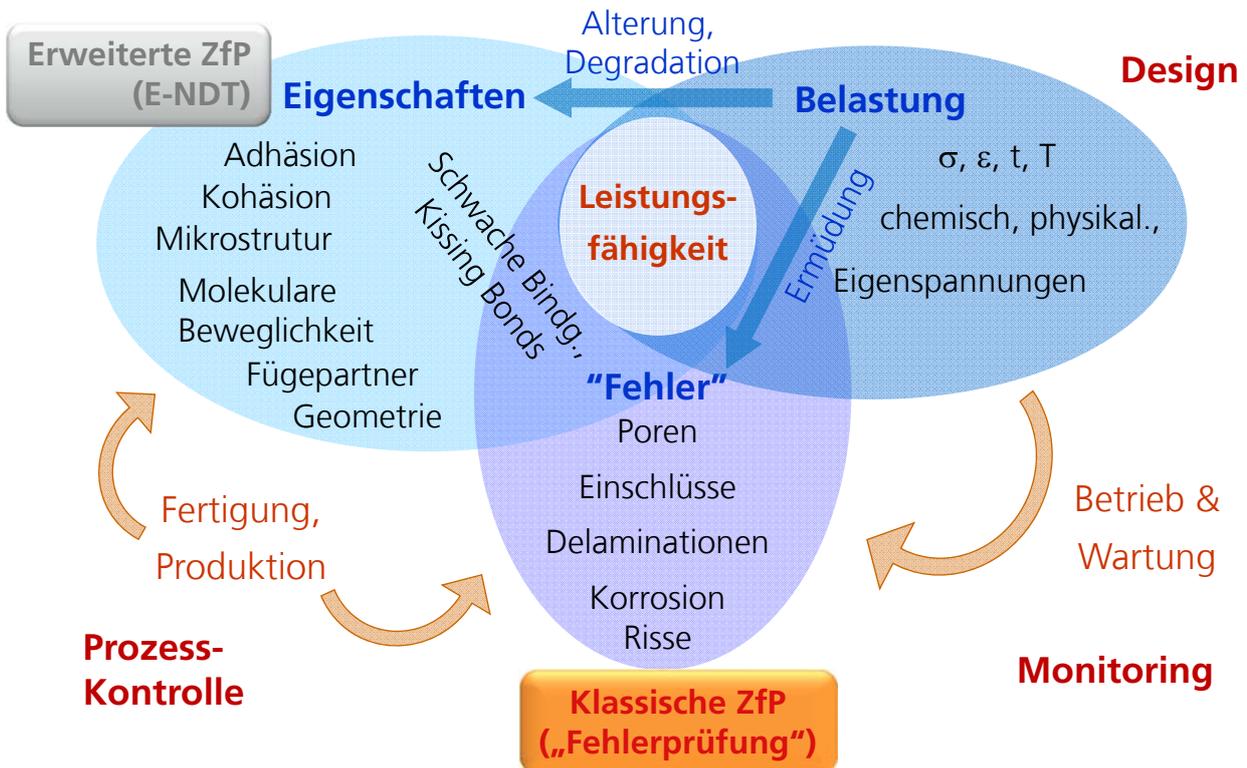
Kohäsives / **adhäsives**  
**Versagen**, „Fehler“  
(Delamination, Poren,  
„Kissing Bonds“)

**Dicke und Geometrie**  
der Klebfuge, **Füllgrad**  
(Unterwanderungs-)  
Korrosion



Kleben im Schienenfahrzeugbau  
(DIN 6701, DVS 1618, DVS 3310 etc.)

## Anknüpfungspunkte für die ZfP in polymeren Verbindungen



## Ganzheitlicher Qualitätsansatz: Anknüpfungspunkte für die ZfP im Produktlebenszyklus



ZfP → Physikalische WW (Absorption, Reflexion) von „Prüfsignalen“ mit Material-inhomogenitäten („Defekte, Grenzflächen“) und 2D- oder 3D- Auswertung / Darstellung.

elastische  
Schwingn. & Wellen

Ultraschall

Thermische Wellen

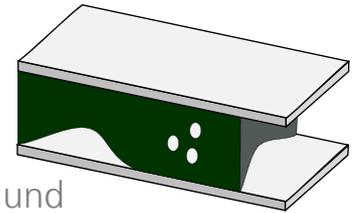
Thermographie

elektro-magnet.  
Felder und Wellen

Scherografie, Röntgen-CT  
THz, Videoskopie ...

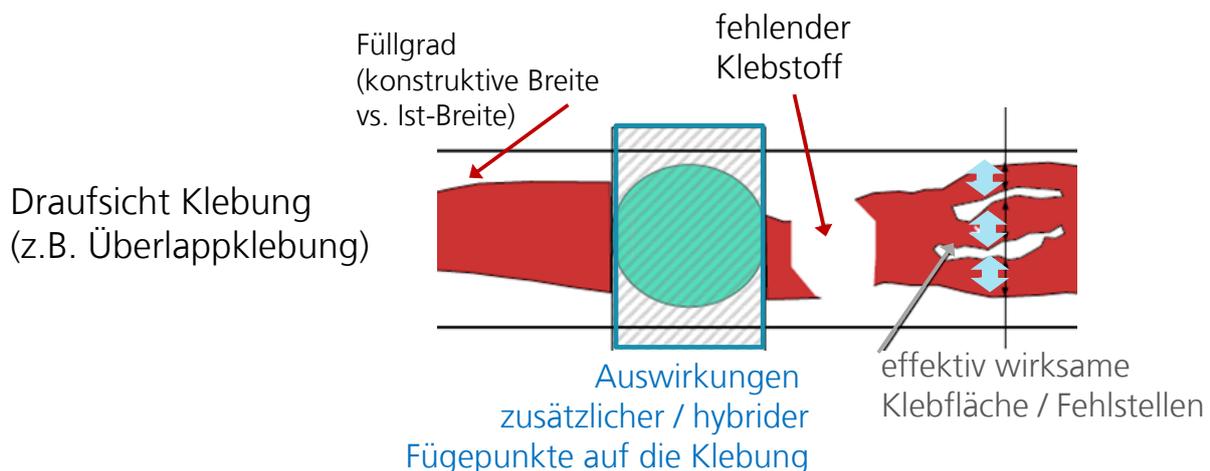
# INHALTSÜBERBLICK

- Zielsetzungen und Philosophie (ZfP Strategie)
- **Klassische ZfP zur „Fehlerprüfung“**
- Erweiterte ZfP-Methoden (E-NDT) zur Eigenschafts- und Funktions-Charakterisierung von Polymer-Verbindungen
- Zusammenfassung und Ausblick



**Klassische ZfP („Fehlerprüfung“)**

## Qualitätsmerkmale bei der „klassischen ZfP“ von Klebungen

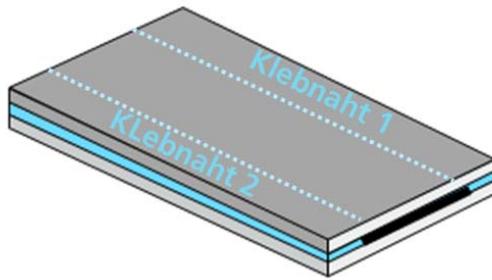


### Spezifische Anforderungen für die ZfP (Fehlerprüfung, Geometrie):

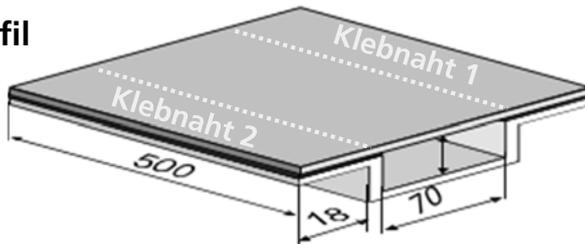
- (1) Zulässigkeitsgrenzen müssen bekannt / definiert sein (Prüfspezifikation!)
- (2) ZfP muss Werte liefern – sowohl laterale Ausdehnung als auch Tiefenlage
- (3) ZfP muss ausreichende Nachweisempfindlichkeit besitzen
- (4) ZfP muss für unterschiedlichste Materialkombinationen geeignet sein

# Qualifizierungsproben / Musterproben mit repräsentativen Referenzfehlern

**Sandwich-  
Probe**



**Hutprofil**



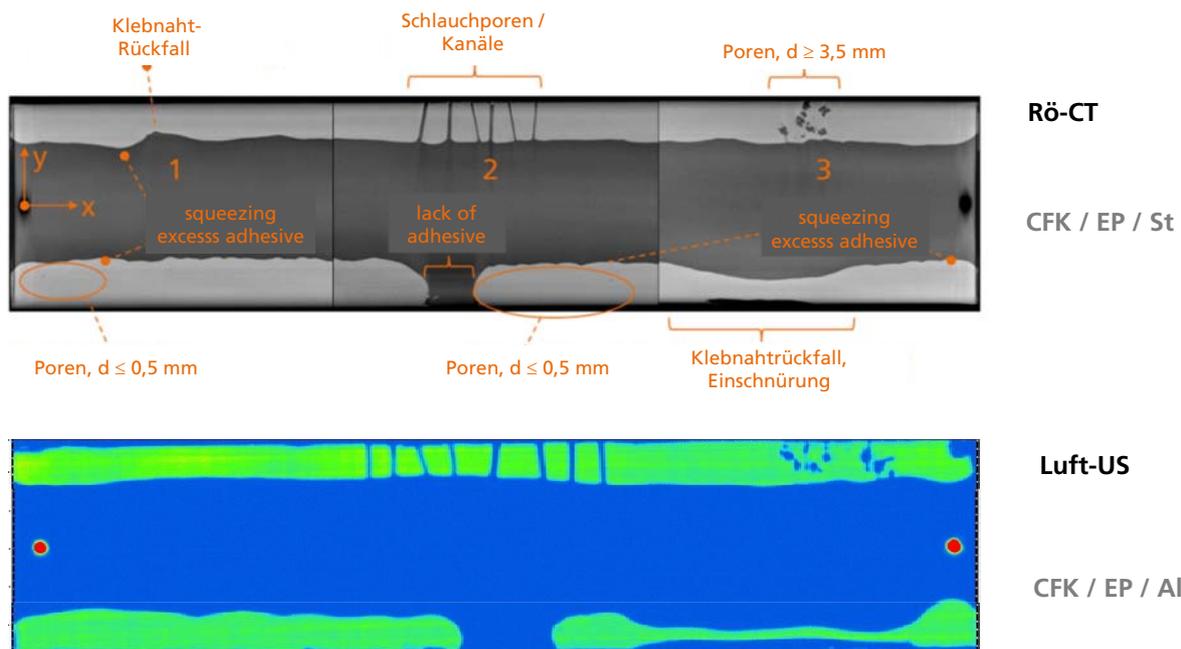
## Referenzfehler für Validierung:

- Füllgrade außerhalb Toleranz
- Klebgeometrie (Lage, Dicke...)
- Poren (Schlauch, Sphäroid)
- Enthftung
- fehlender Klebstoff

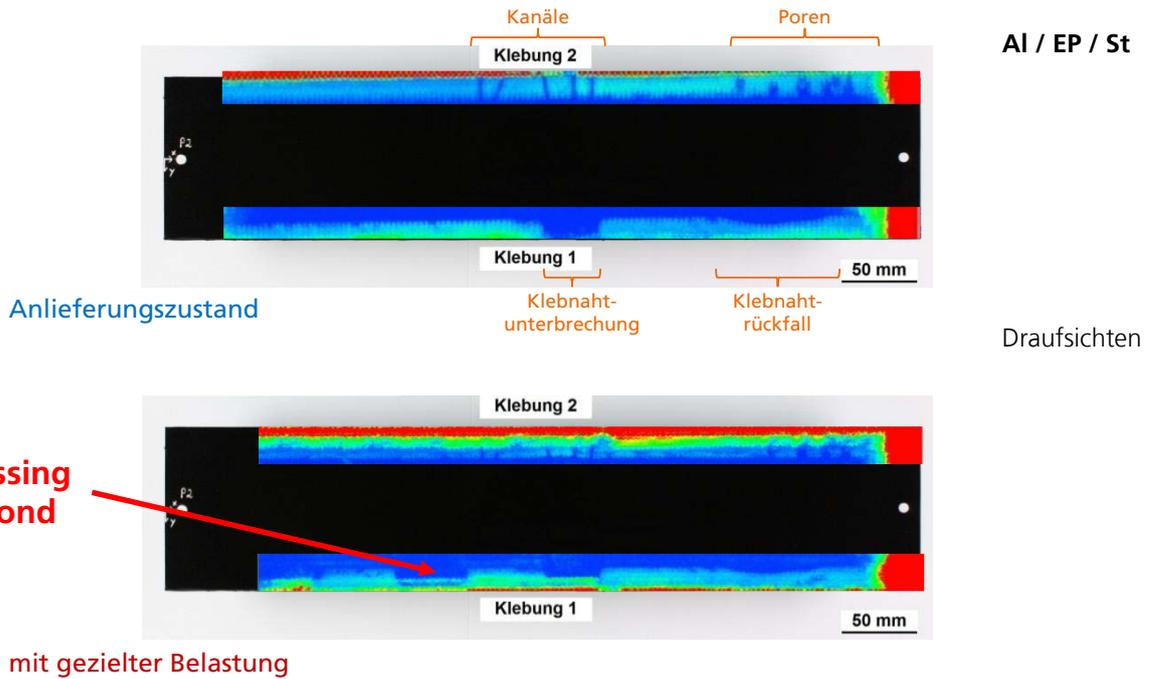
## Methoden klassische ZfP:

- Röntgen CT
- Thermographie
- Luft-Ultraschall
- Phased Array Ultraschall
- Scherographie
- ...

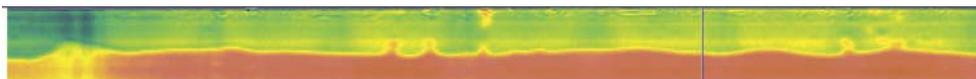
# Klassische ZfP – Beispielergebnisse der Validierungsuntersuchungen mit rund 30 Materialkombinationen



# Berührungsloser Luft-Ultraschall

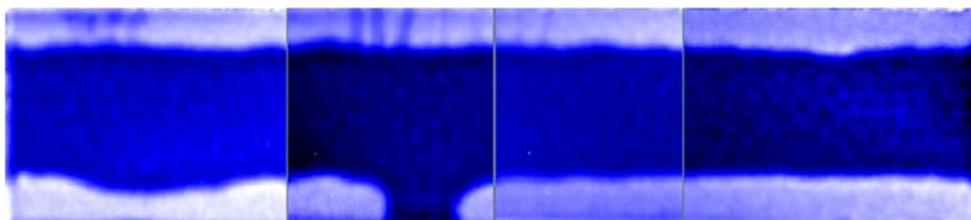


## Klassische ZfP – Beispielergebnisse der Validierungsuntersuchungen mit rund 30 Materialkombinationen



Phased Array  
Ultraschall

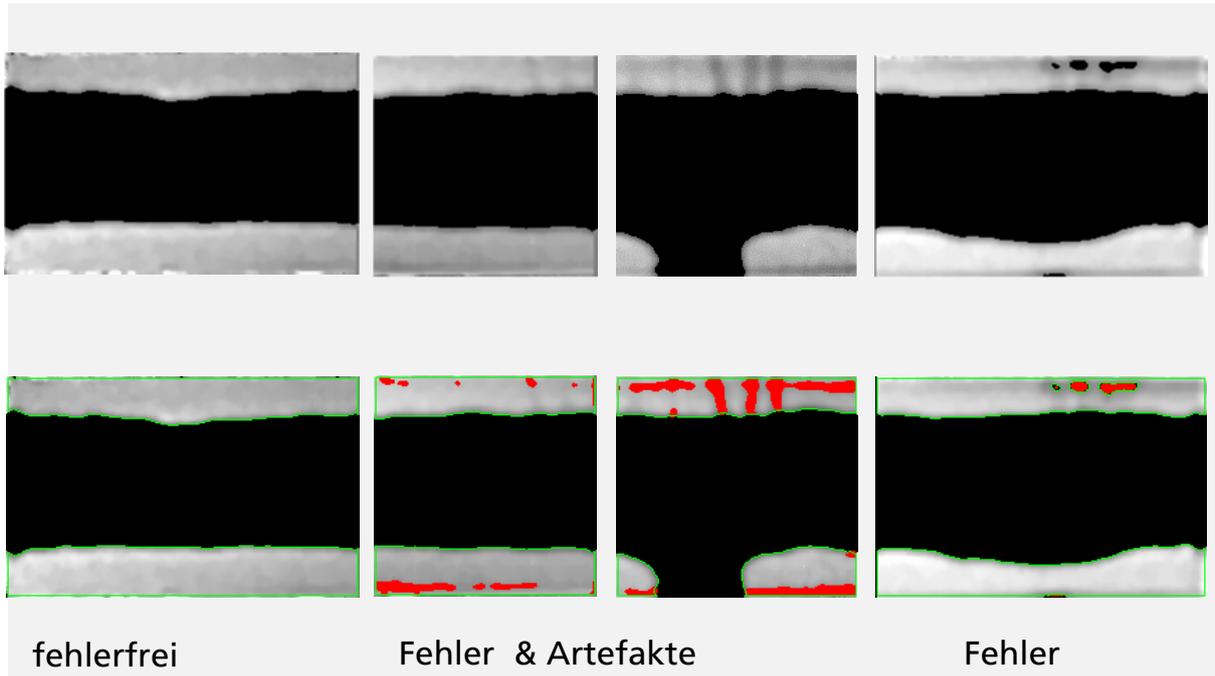
St / EP / CFK



Thermographie

St / EP / GFK

# Vollautomatische Analyse (maßgeschneiderte Signal- und Bildverarbeitung) → Erkennung der **Klebnaht** + **Fehler / Rol's**



bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

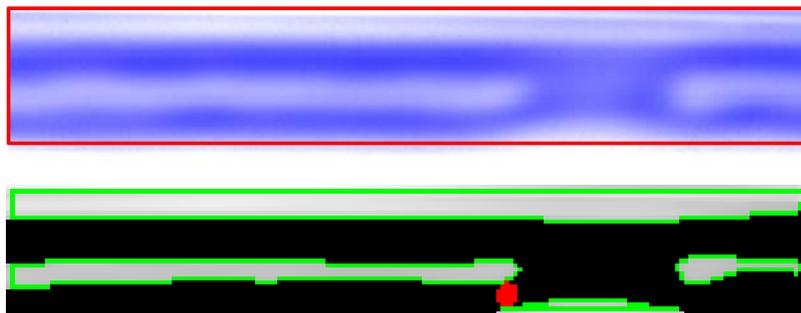
9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen » 15 «  
15.-17.03.2016



Fraunhofer  
IZFP

## Intelligente Algorithmik und Softwaremodule

zur automatisierten Auswertung und Quantifizierung / statist. Erfassung  
→ Spezielle Segmentierungs- und Fehlererkennungsverfahren



Hochspezialisierte  
Signal- u. Bildver-  
arbeitung

Merkmalsextraktion,  
Ergebnis-Datenblatt

class	CentroidPrim	CentroidSec	Area	Perimeter	Orientation	AspectRatio	ajorAxisLeng	inorAxisLeng	Eccentricity	xintensity	VanintensityVal	Moment00
1	167,153	4,13068	2334	791,941	89,8094	29,8462	11,9556	365,834	0,999466	245	176	1942
1	268,242	24,7577	3166	532,569	89,8641	14,8235	13,4791	444,821	0,999541	199	176	2907
1	35,2085	26,8811	681	146,527	87,6758	3,9375	13,9958	71,3198	0,980556	195	176	611,5
1	194,834	53,4283	3119	789,314	90,0787	38,8	8,26062	548,782	0,999887	238	176	2725

→ Merkmalsextraktion und Klassifizierung von Klebnaht- und Fehler-Parametern

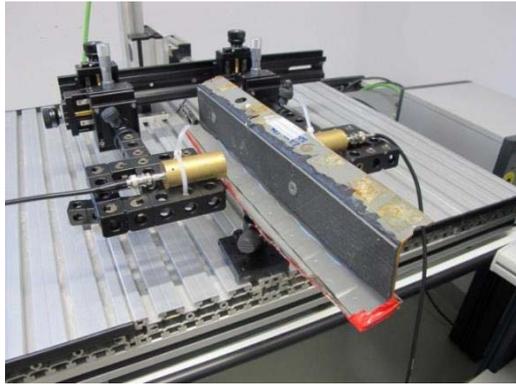
bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen » 16 «  
15.-17.03.2016

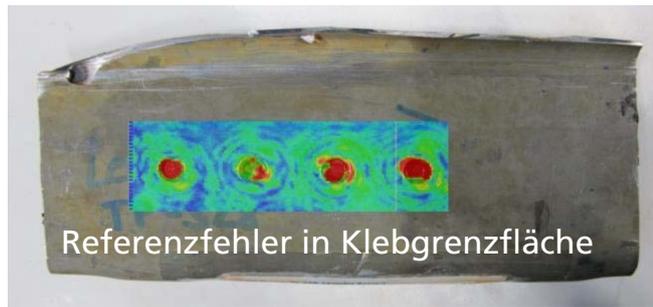


Fraunhofer  
IZFP

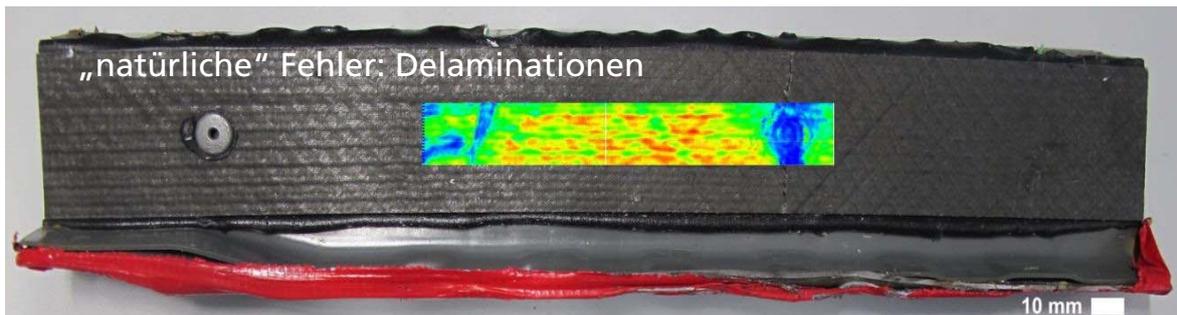
## Luft-Ultraschall: Hybrid-Werkstoff (CFK / Al) mit Delaminationen



Fraunhofer IZFP Patent:  
Fokus-Luftultraschallwandler



Referenzfehler in Klebgrenzfläche



„natürliche“ Fehler: Delaminationen

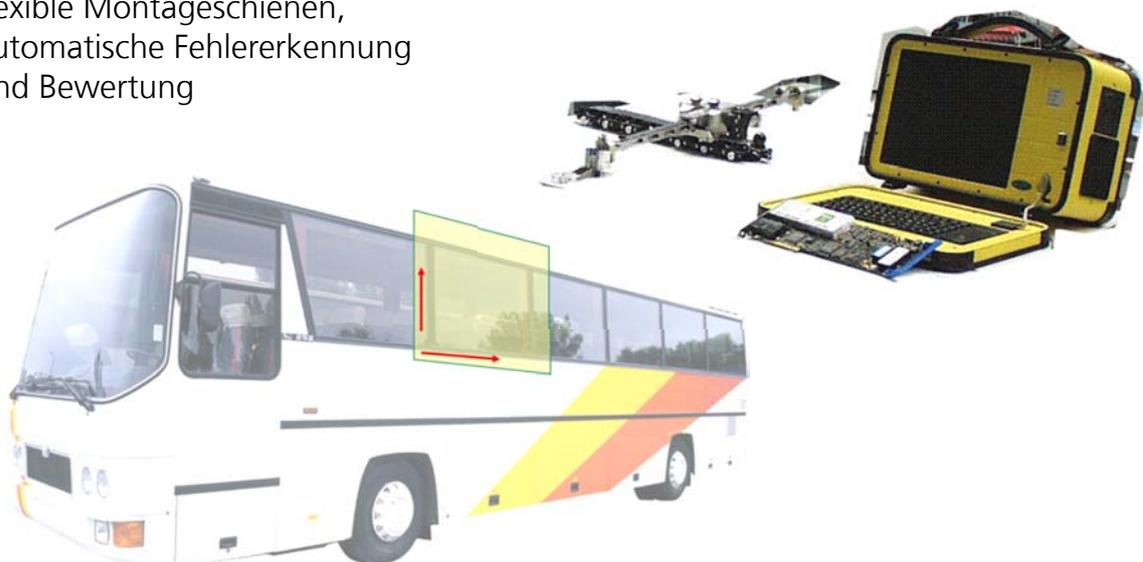
bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen » 17 «  
15.-17.03.2016



## Validiertes Prüfsystem: Ultraschall-Klebnahtscanner Omnibusse

Mobiles Ultraschall **xy-Scansystem**:  
flexible Montageschienen,  
automatische Fehlererkennung  
und Bewertung



bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen » 18 «  
15.-17.03.2016

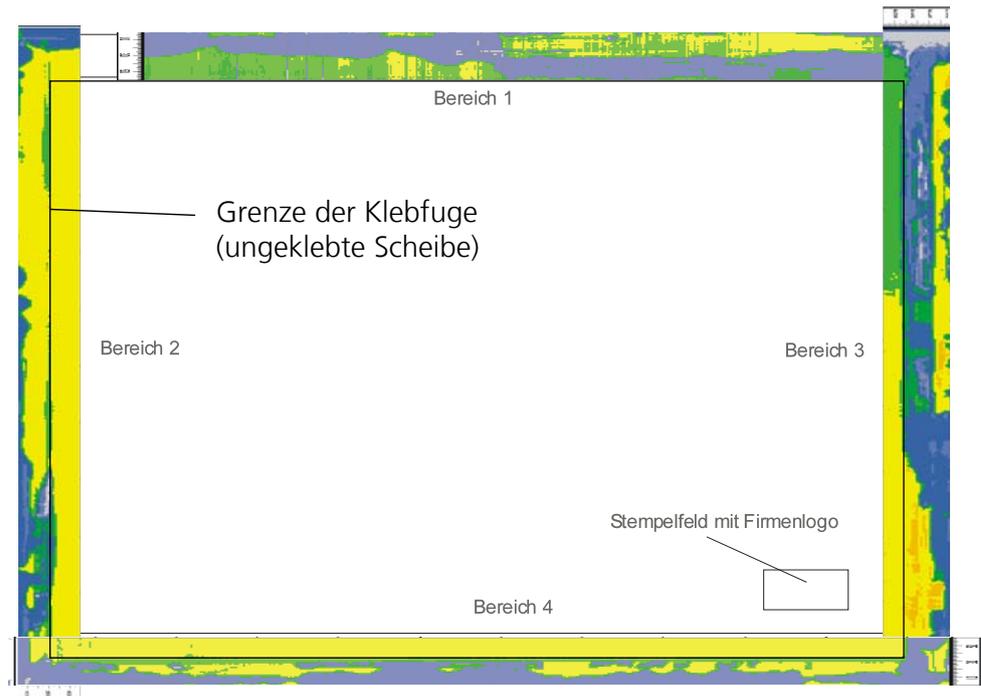


# Post-Process ZfP: Ultraschall-Scanner Einscheidungen Omnibus → 100% Bestätigung der ZfP an ausgescheibten Klebungen

Ultraschall C-Bilder bei der Prüfung auf Enthftung zw. Rahmen und Platte (Fügeteilunterseite)

gute Haftung

schlechte Haftung



bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen  
15.-17.03.2016

» 19 «



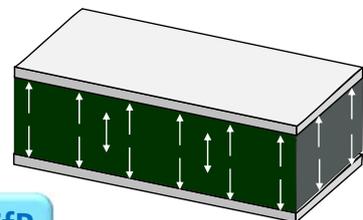
DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.



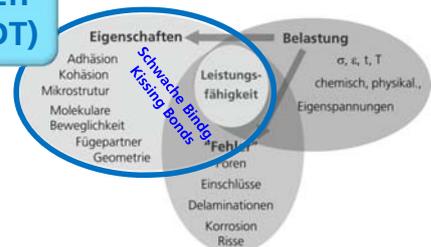
Fraunhofer  
IZFP

## INHALTSÜBERBLICK

- Zielsetzungen und Philosophie (ZfP Strategie)
- Klassische ZfP zur „Fehlerprüfung“
- **Erweiterte ZfP-Methoden (E-NDT) zur Eigenschafts- und Funktions-Charakterisierung**
- Zusammenfassung und Ausblick



Erweiterte ZfP  
(E-NDT)



bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen  
15.-17.03.2016

» 20 «



DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.



Fraunhofer  
IZFP

## “Kissing Bonds” bzw. Schwache Klebungen (“Weak Bonds”)

### “Weak Bonds”:

Kleberverbindungen mit unzureichender Verbundfestigkeit des Gesamt-Systems, z.B. infolge mangelhafter Kohäsion oder Adhäsion

Ursachen: Fehler im Klebprozess / Vernetzung, Alterung etc., unpassende Wechselwirkungen und Struktur im Bulk und in der Interphase

### (klassische) ZfP – Definition “Kissing Bonds”:

Klebung mit Stoffschluss (Phasenkontakt), aber mangelhafter Kraftübertragung

**Modell:** Ansammlung von Mikrodelaaminationen, nichtausgehärtete Adhäsionslage → Stoffschluss, schlechte / falsche Bindungen in der Interphase

**per Definition mit konventioneller ZFP nicht detektierbar → E-NDT**

100% Festigkeit

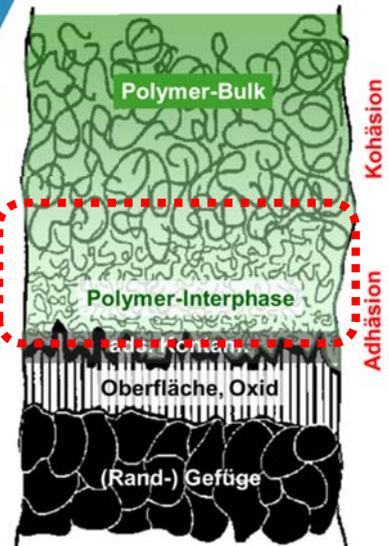
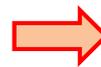
Perfekte Klebung

Weak Bonds

Kissing Bonds

Vollständige Delam.

0%



## Aufsatz-NMR-Technik (NMR Inspect©)

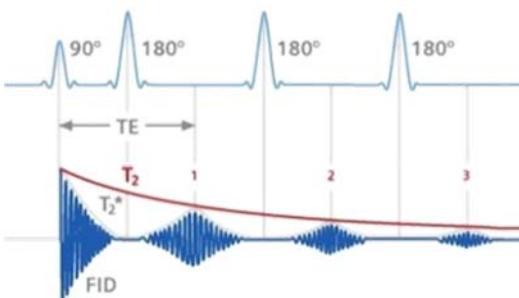
NMR Inspect ©



**NMR-Technik für die Materialprüfung und -charakterisierung → In-Process E-NDT**

*Resonanz-Anregung von  $H^1$ -Spins durch geeignete Puls-Sequenzen*

↪ **Informationen zum Relaxationsverhalten im Polymer (z.B.  $T_2$ -Relaxationszeiten)**



im flüssigen Zustand

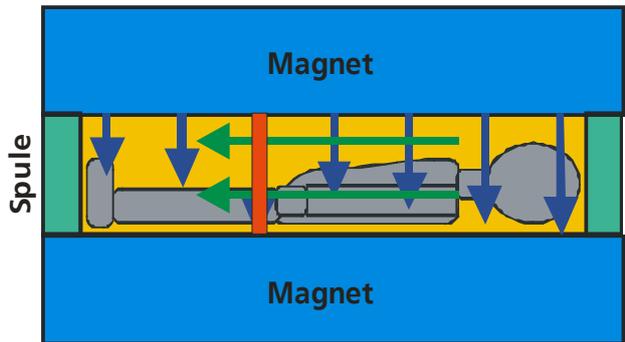
im visko-elastischen Zustand

im festen Zustand

↪ **Charakterisierung der molekularen Beweglichkeit und Dynamik im Polymer**

# Vergleich der bildgebenden MRI mit der NMR-Aufsatztechnik für die zfp

"klassische" MRI  
(Labor, Biomedizin)



Magnetfeld  $B_0$

HF Feld  $B_1$

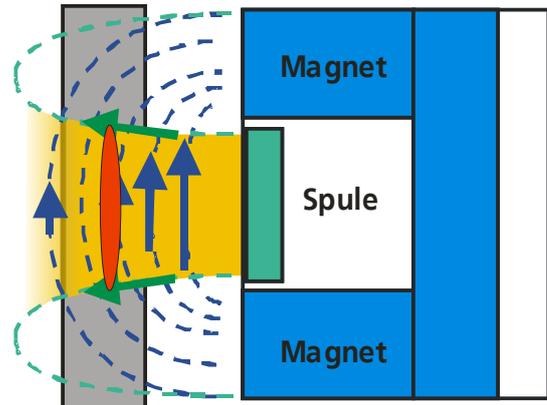
Sensitives Volumen (Schicht)

Messbereich

Prüf"objekt"



NMR-Aufsatztechnik  
für die Bauteilprüfung



Magnetfeld  $B_0$

HF Feld  $B_1$

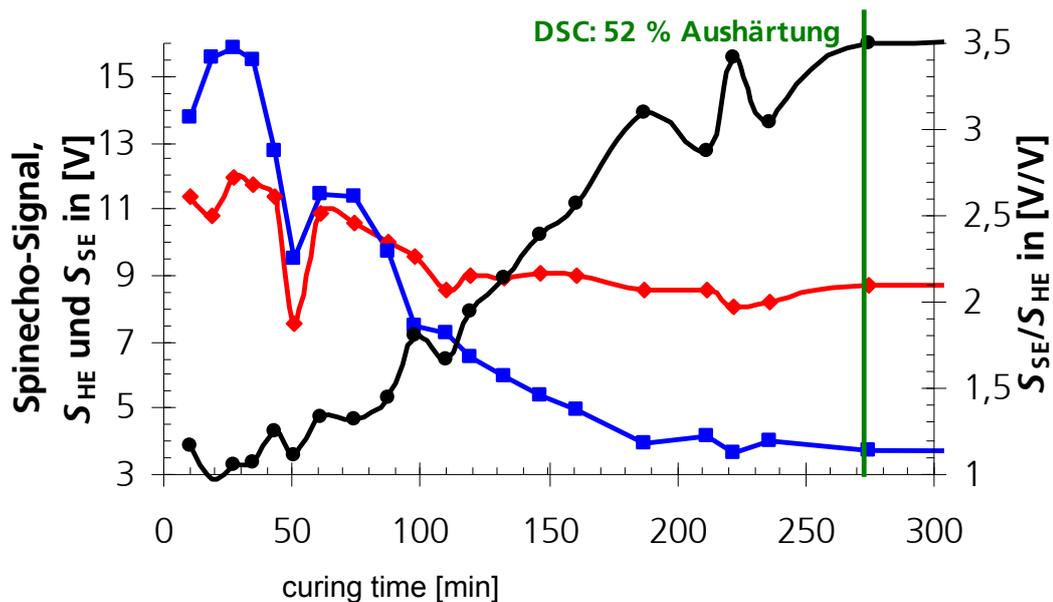
Sensitive Schicht

Messbereich

Prüfobjekt

## In-Process Kontrolle mit NMR-Aufsatztechnik (Aushärtungsprozess)

Beispiel: Aushärtung von Araldit 2014 (2K EP) → Prozesskontrolle



Signalverhältnis **Hahn-Echo** / **Solid-Echo** („flüssig / fest“ - Dynamik)

# Aufsatz-NMR Technik zur Aushärtungskontrolle

## VSG-Sicherheitsglas (PKW-Frontscheiben) 2K-PU Dickschichtklebung auf

Al-Blech

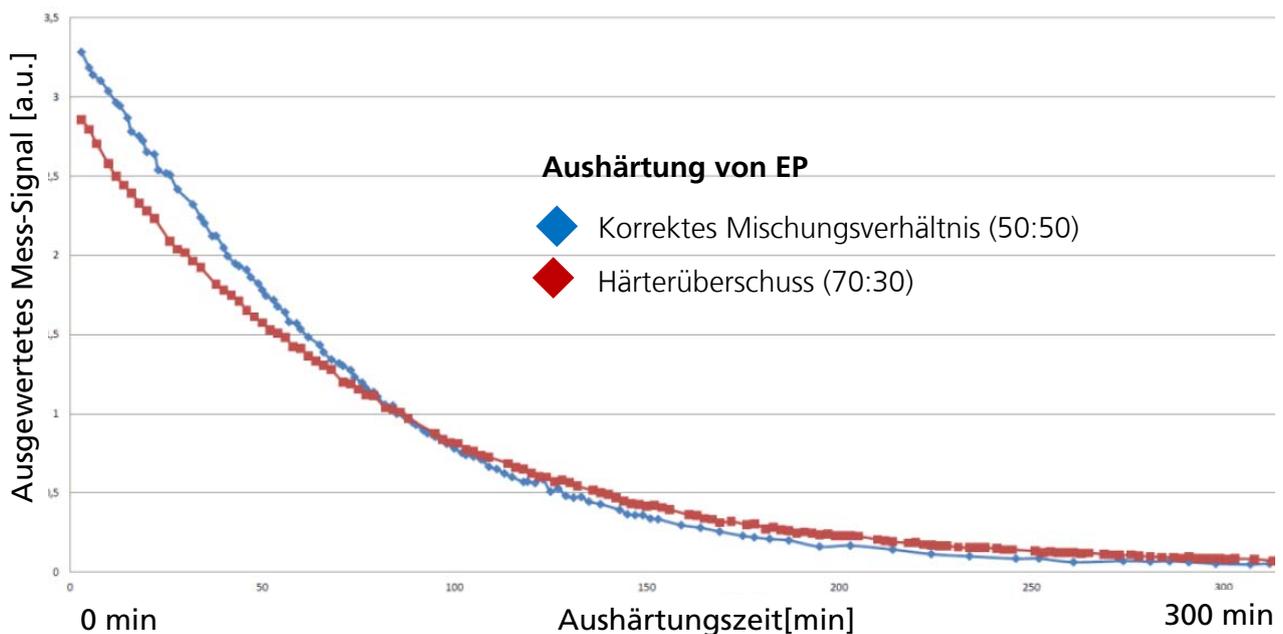
oder

Kunststoff

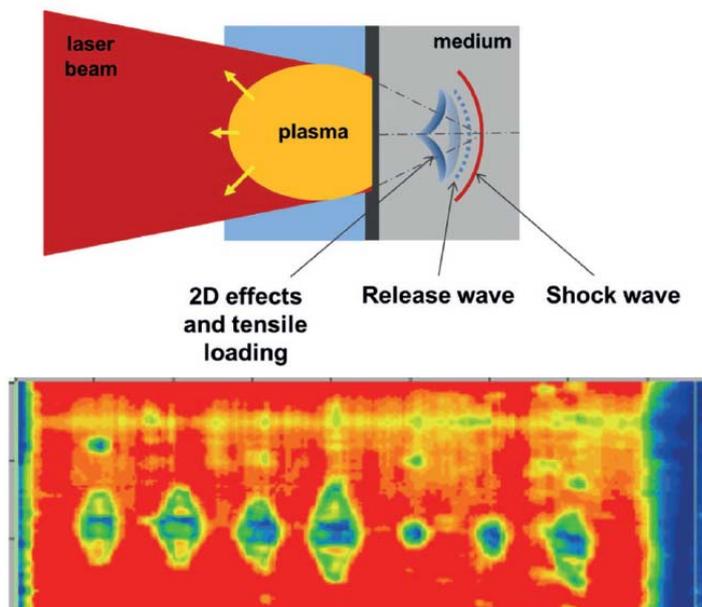


Probenabmessungen: ~ 10 cm x 10 cm, Klebdicke: ~ 3 mm

## Verfolgung des Aushärtungsverlauf mit NMR-Aufsatztechnik



# Neuer Ansatz zur Klebverbund-Festigkeitsprüfung: Laser Bond Inspection / Laser Proof Testing



## Laser Bond Inspection

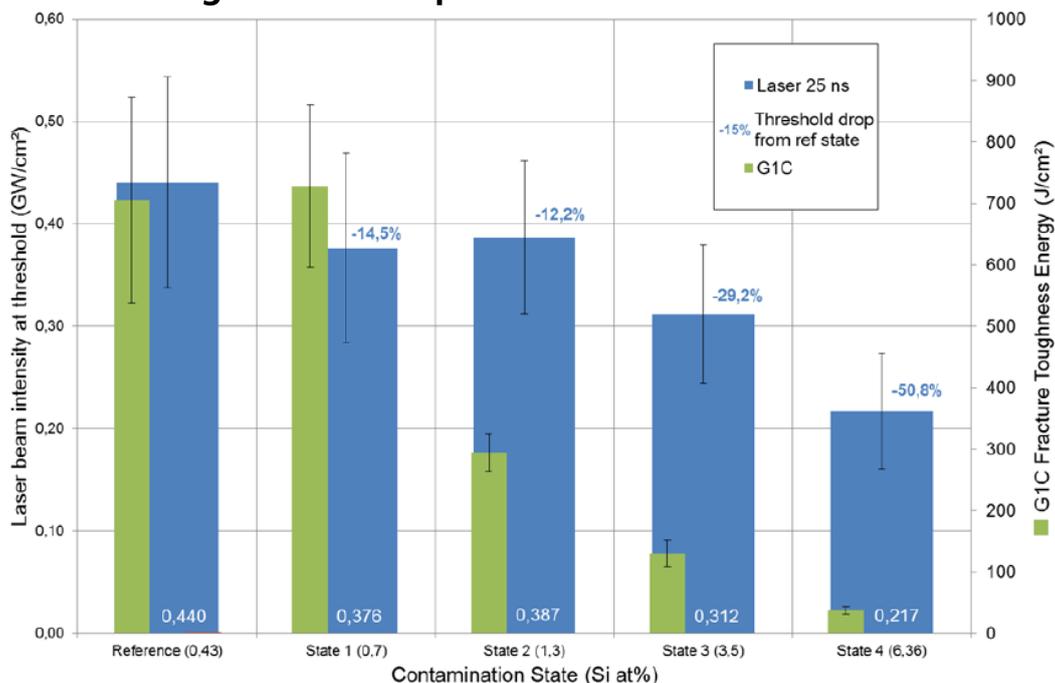
→ Ph.D. Bastien Ehrhart

(in Kooperation mit Fraunhofer IFAM und CNRS-ENSMA, Poitiers)

Prüfprinzip: Erzeugung von Mikrodelaminationen mit Hilfe von LASER Schockwellen zur sehr lokalen „unschädlichen“ Öffnung von „**Weak Bonds**“ (unterkritische Festigkeit)

→ neuer Ansatz zur **Klebfestigkeits-Klassifizierung**

## Systematische Korrelation der notwendigen Laserleistung zur Erzeugung geöffneter schwacher Bindungen im Vergleich zur $G_{1C}$ - Bruchzähigkeit im Keilspaltest



Beispiele zur Untersuchung an „Weak Bonds“ in CFK [Quelle: Ph.D. Bastien Ehrhart, 2015]

# INHALTSÜBERBLICK

- Zielsetzungen und Philosophie (ZfP Strategie)
- Klassische ZfP zur „Fehlerprüfung“
- Erweiterte ZfP-Methoden (E-NDT) zur Eigenschafts- und Funktions-Charakterisierung von Polymer-Verbindungen
- **Zusammenfassung und Ausblick**

## Zusammenfassung & Ausblick

- Qualitäts-Merkmale für die ZfP von Klebungen
  - Minimalforderung: Detektion von „Defekten“ → **klassische ZfP**
  - **Klebgüte**: Charakterisierung der Eigenschaften von Polymer (korrekte Aushärtung, Degradation...) und Klebung (**Festigkeit / „Adhäsion“**) → **E-NDT**
- Klassische ZfP ausreichend im Falle defektbehafteter Klebungen
  - **Automatisierte Signalverarbeitung und Fehlererkennung**
  - **Erfolgreiche Validierung** der heute bekannten ZfP-Verfahren
  - **Katalog der optimalen Prüfmethode für repräsentative Klebsysteme** (Klebstoff und Materialkombinationen)
- **Neue Ansätze für die vollständige Prüfung der Klebgüte → E-NDT**
  - **Erweiterte ZfP-Verfahren zur Eigenschaftscharakterisierung** (z.B. Aufsatz-NMR, Upscaling spektroskopischer Polymeranalytik)
  - **Prüfung der Verbundfestigkeit**, z.B. mit Schockwellen, weiterentwickelten Ultraschall-Varianten
- Nächste Schritte: **Qualifizierungsprojekt für komplexe Geometrien und schwer prüfbare Materialien (z.B. unterschiedlichste Einschiebungen)**,
  - prüfgerechte Klebgestaltung bereits in der Entwicklungsphase beim Hersteller

Fazit: kein "Universal-ZfP-Tool" und auch keine "eierlegende Wollmilchsau"



... Notwendigkeit für Kombination von komplementären ZfP-Methoden (Data-Fusion / Hybridverfahren)  
→ Maßschneiderung für den konkreten Anwendungsfall

... ZfP für die QS beim Kleben benötigt Spezialisten / Fachkenntnisse mit Qualifikation in der ZfP (EN 473 / ISO 9712, Level 1 ... Level 3) wie auch in der Klebtechnik (European Adhesive Specialist ... Engineer – DVS/EWF)

bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen  
15.-17.03.2016

» 31 «



DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.



Fraunhofer  
IZFP

Fazit: kein "Universal-ZfP-Tool" und auch keine "eierlegende Wollmilchsau"



... Notwendigkeit für Kombination von komplementären ZfP-Methoden (Data-Fusion / Hybridverfahren)  
→ Maßschneiderung für den konkreten Anwendungsfall

... ZfP für die QS beim Kleben benötigt Spezialisten / Fachkenntnisse mit Qualifikation in der ZfP (EN 473 / ISO 9712, Level 1 ... Level 3) wie auch in der Klebtechnik (European Adhesive Specialist ... Engineer – DVS/EWF)

**Einsatz der richtigen ZfP-Tools für relevante Prüfaussagen an der richtigen Stelle mit Verständnis der Klebtechnik und polymerer Eigenschaften → Effiziente Qualitätskontrolle**

bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen  
15.-17.03.2016

» 32 «



DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.



Fraunhofer  
IZFP

# Fraunhofer IZFP: Forschung und Entwicklung für sichere Produkte mit der ZfP der Zukunft

**Danke für  
Ihre Aufmerksamkeit!**

bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de  
© Fraunhofer

9. Fachtagung  
ZfP im Eisenbahnwesen  
15.-17.03.2016

» 33 «



DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.



**Fraunhofer**  
IZFP