

# Industrialisierung der bildgebenden Wirbelstrommethode zur Prüfung von kohlenstofffaserbasierten Werkstoffen

Matthias POOCH\*, Henning HEUER\*\*, Norbert MEYENDORF\*\*, Martin H.  
SCHULZE\*\*

\* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP Institutsteil Dresden (IZFP-D)

Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden, Germany

## Kurzfassung

Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit von Kohlstofffasern sind wirbelstrombasierte Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung von Kohlefaserkomposit (CFK) und CFK-Vorprodukten gut geeignet. Das bildgebende Hochfrequenz-Wirbelstromverfahren ist aufgrund der höheren Empfindlichkeit für schlecht leitfähige anisotrope Materialien grundsätzlich besser geeignet als Wirbelstromstandardverfahren. An hochauflösten C-Scans, welche die elektrischen und dielektrischen Eigenschaften von CFK und CFK-Vorprodukten visualisieren, kann z.B. eine Texturanalyse durchgeführt werden, bei der die Orientierung einzelner Lagen zueinander und Gassen bzw. Aufschiebungen analysiert werden können. Je nach Faservolumenanteil können Eindringtiefen von bis zu 5 übereinander liegenden Lagen erreicht werden. Um die abbildende Wirbelstromprüfung unter Industriebedingungen in die Serienanwendung zu überführen wurde ein mobiles Prüfsystem entwickelt, mit dem bis zu 30x30 cm große Bereiche auf beliebig großen Strukturen hochauflösend abgescannt werden können. Mit einem angepassten X-Y-Z Manipulator wird der Wirbelstromsensor an der zu untersuchenden Fläche, berührungslos oder auch mit leichtem Kontakt, ausgerichtet. Die Mechanik ist so konzipiert, dass der Aufsatzscanner bestmöglich an den Proben ausgerichtet werden kann und die Sensorführung leichten Unebenheiten nachgibt. Neben Parametrierung der Hochfrequenzwirbelstromelektronik EddyCus® MPECS und Konfiguration der Scanachsen über eine grafische Benutzeroberfläche mit vielfältigen Einstellmöglichkeiten erfolgt auch die Anzeige und Bildauswertung über diese Software. Das Gerät wurde zum Zweck der teilautomatisierten Prüfung von CFK-Bauteilen in der Produktion abgestimmt. Dazu wurde neben der Mobilität das wesentliche Augenmerk auf die zuverlässige Funktion in kohlenstoffstaubbelasteter Umgebung (Kurzschlussgefahr) und der sicheren Zuordnung von Messwerten zur jeweiligen Probe (Traceability und Protokollfunktionen) gelegt.



**Industrialisierung der bildgebenden Wirbelstrommethode zur Prüfung von kohlenstoffaserbasierten Werkstoffen**

**DGZfP-Jahrestagung**

**Matthias Pooch,**  
 Henning Heuer, Martin Schulze,  
 Dieter Joneit  
 Fraunhofer IZFP-D  
 matthias.pooch  
 @izfp-d.fraunhofer.de  
 www.izfp-d.fraunhofer.de

08.05.2013

**Eine Prüfmethode für Grundmaterial und Endprodukt**

**Fertigungsfehler (Gelege, RTM, CFRP)**

- Winkelabweichung; Ondulationen
- Folienrückstände; Gassenbildung
- Fehlerhafte Lagenpositionierung
- Fuzzy Balls; Filamentquerung
- Aufschiebungen
- Harzverarmung; Harzansammlungen



**Betriebsschädigungen (Laminat, Struktur)**

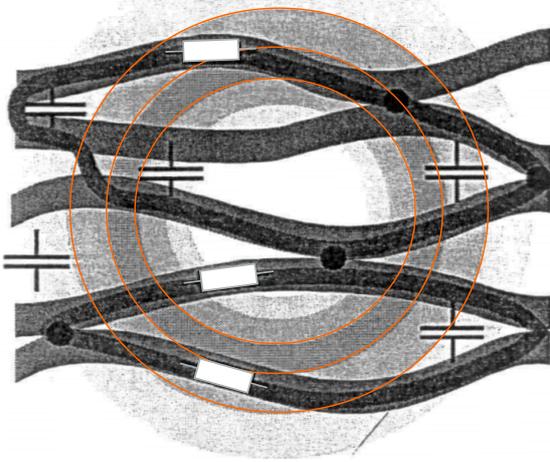
- Delaminationen (Oberfläche, Volumen)
- Bruch / Riss im Bauteil
- Debonding
- Dickenmaß abweichend bzw. schwankend



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.



## Elektrische Eigenschaften von CF-Materialien



### Elektrische Leitfähigkeit:

Graphit:  $\sigma = 3 \cdot 10^6 \text{ S/m}$   
 Aluminium:  $\sigma = 37 \cdot 10^6 \text{ S/m}$

Dielektrizitätszahl: 1,8 bis 2,9

- Die Mittlere Leitfähigkeit von CFK beträgt etwa 1/1000 von Aluminium
- Elektrische und Dielektrische Kopplung der Fasern

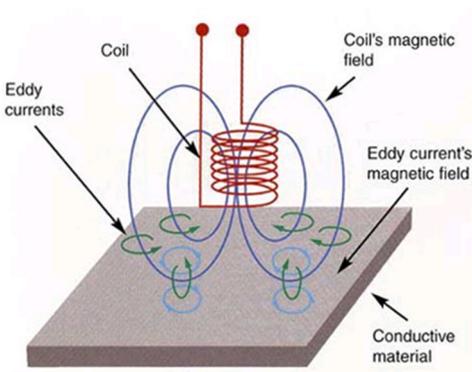
Ref.: Zur Wirbelstromprüfung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen, Dipl.-Ing. Rolf Lange, Magdeburg 1997



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.



## Hochfrequenz Wirbelstromprüfung



Eindringtiefe vs. Signalstärke:

Eindringtiefe  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$

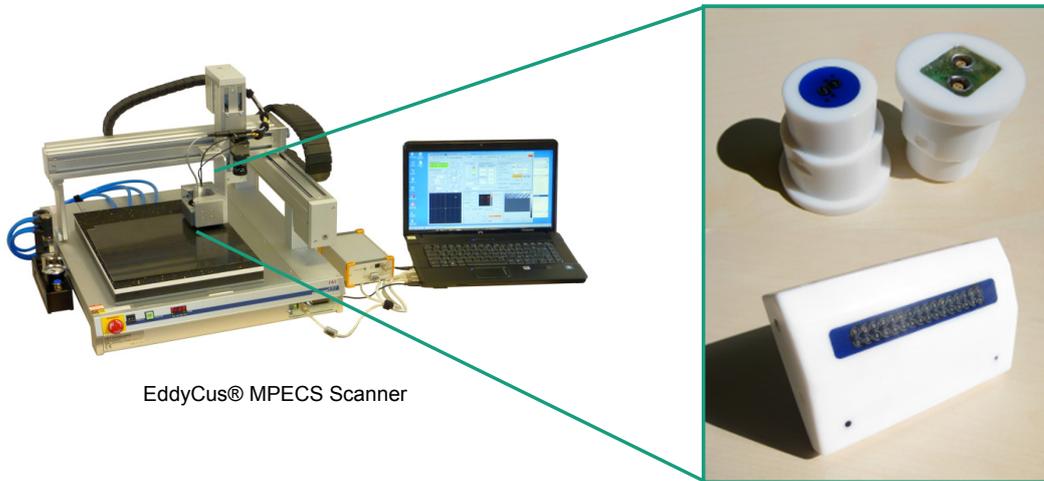
Signalstärke  $U_{Ind} = \frac{-d\phi}{dt}$



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.



## Laborsysteme zur abbildenden HF-WS Prüfung



EddyCus® MPECS Scanner

Single Sensors  
Sensor Arrays

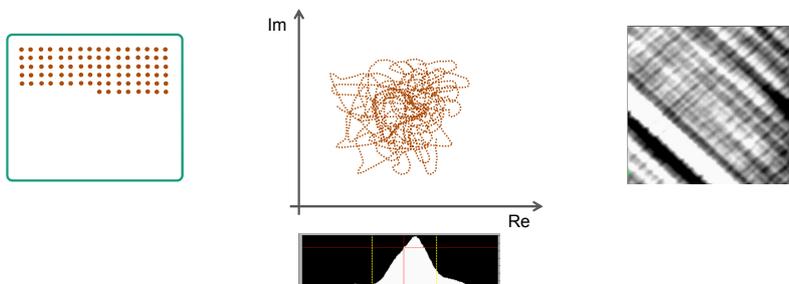


Angewandte Mikroelektronik und  
Nanotechnologie für zerstörungs-freie  
Prüfverfahren, Medizin-technik und  
Sicherheitstechnik.



## Wirbelstrom – Prinzip und Methode

- Messen einer Impedanz aus dem Wirkvolumen zwischen Material und Sensor an einem Ort
- gerasterte Aufnahme ergibt ein Impedanz-Mapping
- Projektion von Amplitudenwerten ergibt ein Grauwertbild (dazu kann die Phasenlage variiert werden)



Angewandte Mikroelektronik und  
Nanotechnologie für zerstörungs-freie  
Prüfverfahren, Medizin-technik und  
Sicherheitstechnik.



## Messergebnisse

### Fehler

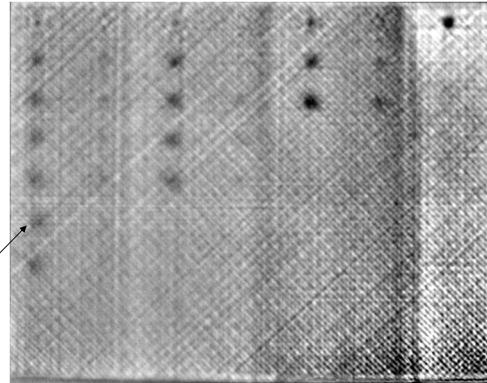
### ET-C-Scan

#### Delaminationen im CFRP

- Kreisscheibenreflektoren für US-Kalibrierung
- Testfehler PE-Folie (500µm) in Stufenkeil (8,6,4,2 mm) mit Abmessungen von 6x6 mm<sup>2</sup> und 2x2 mm<sup>2</sup>



+45° - Sensororientierung



- Detektion von dielektrischen Folien (6x6 mm<sup>2</sup>) mittels HF-Wirbelstrom sicher möglich
- Fehler können ansatzweise anhand ihrer Amplitude den verschiedenen Lagen zugeordnet werden
- → Mehrfrequenzalgorithmen...



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.

**Fraunhofer**  
IZFP

## Messergebnisse

### Fehler

### ET-C-Scan

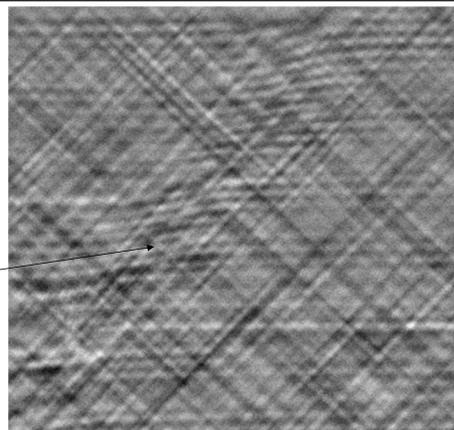
#### Ondulationen im CFRP

- Entstehen durch unsachgemäße Verarbeitung beim Legeprozess und/oder durch örtliche Druckunterschiede beim Drapieren



0° - Sensororientierung

Ondulation in der 3. Lage  
→ 5-lagiges Gelege



- Ondulationen im gesamten Volumen können sicher detektiert werden
- Die Bewertung der Tiefeninformation erweist sich noch als schwierig, jedoch kann aufgrund der Lagenverläufe auf die Fehlerlage zurückgeschlossen werden



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.

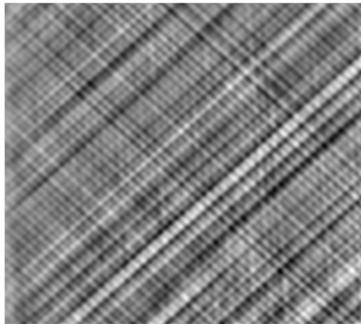
**Fraunhofer**  
IZFP

## Texturanalyse mit der 2D Fast Fourier Transformation

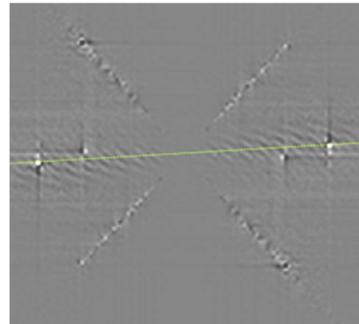
Foto



Wirbelstrombild



2D-FFT



Texturanalyse mittels 2D-FFT:

- Orientierungen
- Winkelabweichung
- Gelegeverteilung



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungs-freie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.



## Texturanalyse – IFFT

Maskierung und Rücktransformation

filtered frequency domain	inverse 2D-FFT	Threshold	Classification	Regions of interest with measured area values																												
				<table border="1"> <thead> <tr> <th>#</th> <th>Area</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>152</td></tr> <tr><td>2</td><td>8</td></tr> <tr><td>3</td><td>9</td></tr> <tr><td>4</td><td>14</td></tr> <tr><td>5</td><td>13</td></tr> <tr><td>6</td><td>1372</td></tr> <tr><td>7</td><td>11</td></tr> <tr><td>8</td><td>541</td></tr> <tr><td>9</td><td>1429</td></tr> <tr><td>10</td><td>5</td></tr> <tr><td>11</td><td>1272</td></tr> <tr><td>12</td><td>9</td></tr> <tr><td>13</td><td>17</td></tr> </tbody> </table>	#	Area	1	152	2	8	3	9	4	14	5	13	6	1372	7	11	8	541	9	1429	10	5	11	1272	12	9	13	17
#	Area																															
1	152																															
2	8																															
3	9																															
4	14																															
5	13																															
6	1372																															
7	11																															
8	541																															
9	1429																															
10	5																															
11	1272																															
12	9																															
13	17																															



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungs-freie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.



# Software zur teilautomatisierten Texturanalyse

ET-data view | monitoring streets | monitoring fuzzballs | ccl for streets (declination = -45°) | ccl for streets (declination = 0°) | ccl for streets (declination = 45°) | ccl for fuzzballs

restart calculation  
hide Fourier-transform

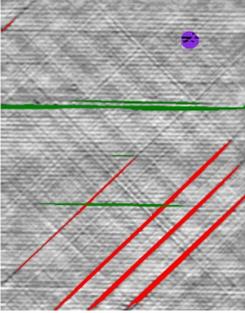


image info - (space domain)  
position x: 296  
position y: 95  
intensity: 158

check angle

angle (frequency domain) = -51,63°  
angle (space domain) = 46,69°

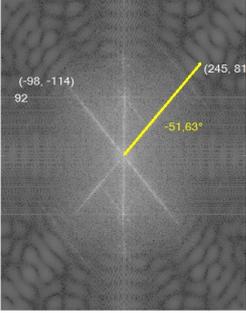


image info - (frequency domain)  
frequency u: -98  
frequency v: -114  
intensity (abs. value): 92

monitoring global angles (declination)

expected angles	estimated angle (frequency domain)	estimated angle (space domain)
-45°	53,03°	● -45,25°
0°	-89,25°	● 1°
45°	-51,27°	● 47,07°

legend:  
● green if angle deviation <= 1,5°   ● red if angle deviation > 1,5°

measured angles  
; 46,69°

monitoring defects

monitoring streets (Gassen)

- show streets for layer with declination: -45° ●
- show streets for layer with declination: 0° ●
- show streets for layer with declination: 45° ●

monitoring fuzzballs

- show fuzzballs ●

parameters

maximal deviation angle

delta angle: 1,5°

thresholds for streets

- > threshold = 65%
- > threshold = 65%
- > threshold = 65%

thresholds for fuzzballs

- high threshold for fuzzballs
- low threshold for fuzzballs
- threshold for fitting-line 65%



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.



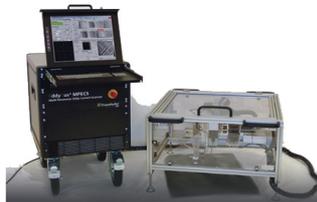
# Mechanik zur Bildaufnahme → EddyCus® Prüfsysteme

2D



EddyCus® MPECS Labor-Scanner

2,5D



EddyCus® MPECS Aufsatz-Scanner

3D



EddyCus® MPECS Roboter-Scanner

Ref.: Fa. Steinbichler, Roboter-messzelle

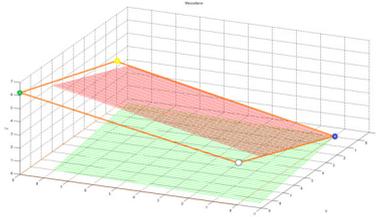


Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.



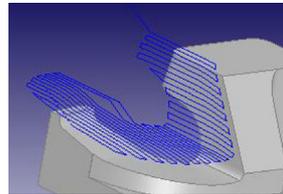
## Parametrierung der Scanbahnen

2,5D



Ref.: FH Dortmund

3D



Ref.: Fa. SKM

Draufsicht Versuch  
keine Faltenbildung



Ref.: Fa. Benteler SGL



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungs-freie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.

**Fraunhofer**  
IZFP

## Bilderzeugung und Auswertung – Fragen bei 3D

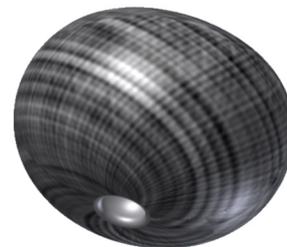
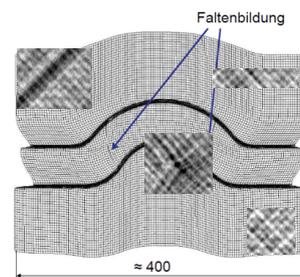
### Programmierung der Scanbahnen:

- Drapierverläufen folgend (z.B. aus Simulationen)
- Informationsgewinn aus räumlich zusammenhängenden Teilflächen

### Mustererkennung im Raum:

- Maß einer Lageabweichung
- Zusammenhänge aus Teilflächen

Draufsicht Simulation Ref.: Fa. Benteler SGL



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungs-freie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.

**Fraunhofer**  
IZFP

## Prüftechnologie für Multiaxial Gelegemaschinen

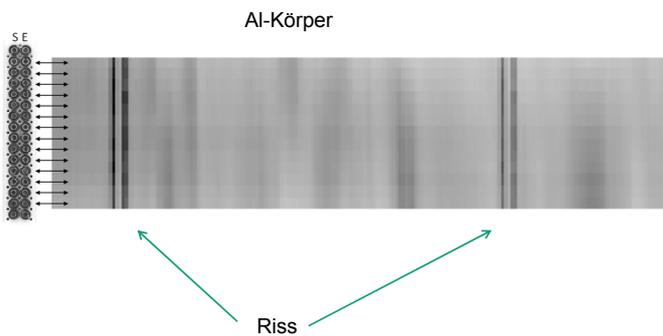
  
**KARL MAYER**



Angewandte Mikroelektronik und  
Nanotechnologie für zerstörungs-freie  
Prüfverfahren, Medizin-technik und  
Sicherheitstechnik.

 **Fraunhofer**  
IZFP

## Vorstudie - Sensorarray



Angewandte Mikroelektronik und  
Nanotechnologie für zerstörungs-freie  
Prüfverfahren, Medizin-technik und  
Sicherheitstechnik.

 **Fraunhofer**  
IZFP

## Versuchsstand - Multisensorline

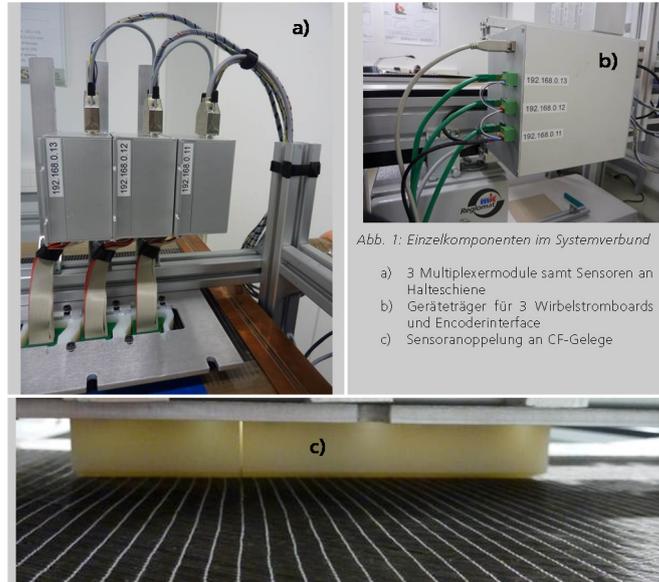


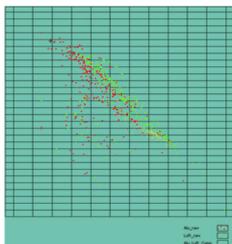
Abb. 1: Einzelkomponenten im Systemverbund



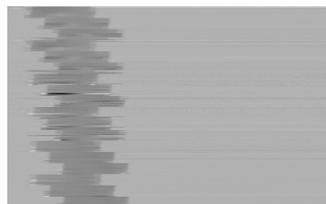
Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.



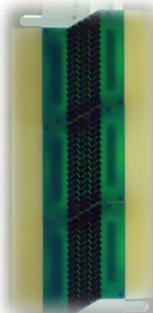
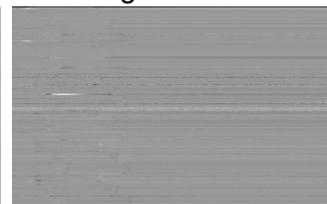
## C-Scan (mit Zeilenoffset und Sortierung nach Spurlage)



Realteilbild



Imaginärteilbild



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.



## Zusammenfassung

1. Wirbelstrombasierte Prüfmethode sind für die Anwendung an trockenen Kohlefaserhalbzeugen, Prepregs und konsolidierten Bauteilen sehr gut geeignet
2. Werkzeugumgeformte textile Halbzeuge benötigen räumliche Prüfmethode mit Materialvolumeninformationen => 3D-Scanner
3. Sensorarrays sind die Grundlage für zukünftige abbildende Inline Prüfverfahren

### Aktueller Stand der Technik

1. WS-Methode mit scannenden Einzelsensoren für CFK verfügbar
2. Hard- und Software Lösung zur Ansteuerung und Auswertung von modularen 800 µm Arrays liegt vor
3. Empfindlichkeit der Arrays ist für die CFK Prüfung zum Zeitpunkt noch nicht mit Einzelsensoren vergleichbar
4. 3D-Preformtest Mitte 2013 verfügbar



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.



## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Sie sind herzlich eingeladen, mit uns an innovativen Ideen in einer Stadt voller Historie und Kultur, einer hohen Lebensqualität und einer attraktiven Umgebung zu arbeiten.



Angewandte Mikroelektronik und Nanotechnologie für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Medizin-technik und Sicherheitstechnik.

