

P.J. Steinbild, P. Kostka, J. Condé-Wolter, A. Winkler, N. Modler  
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden

# Neuartige ortsauflösende Sensoren basierend auf der elektrischen Zeitbereichsreflektometrie

15. Tagung „Feinwerktechnische Konstruktion“  
Dresden, 13. Oktober 2022

# Inhalt

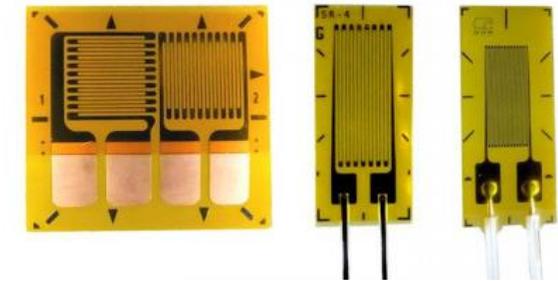
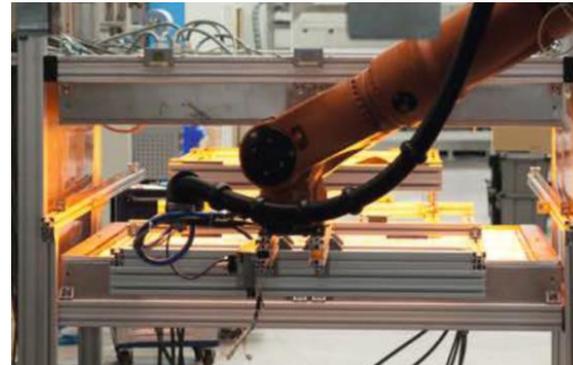
- **Motivation**
- **Elektrische Zeitbereichsreflektometrie**
  - Grundlagen
  - Messgeräte und resultierende Messsignale
- **Aktuelle Ergebnisse und Konzepte am ILK**
  - Klebstellensensor
  - Infiltrationssensor
  - Berührungsempfindlicher Sensor
  - Kohlenstofffaser-Dehnungssensor
- **Zusammenfassung**

# Motivation

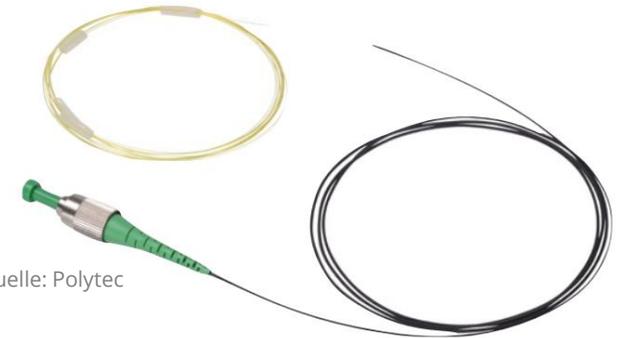
- Strukturüberwachung wird in vielen Anwendungsgebieten immer relevanter
  - Erhöhung der Sicherheit
  - Größerer Funktionsumfang
  - Verbesserung von Herstellungsprozessen
- Sensoren geben oft nur punktuell Aufschluss über verteilte Größen
- Ortsauflösende Kraft- und Dehnungsmesstechnik ist kostenintensiv und massereich



Quelle: Airbus



Quelle: ME-Meßsysteme



Quelle: Polytec



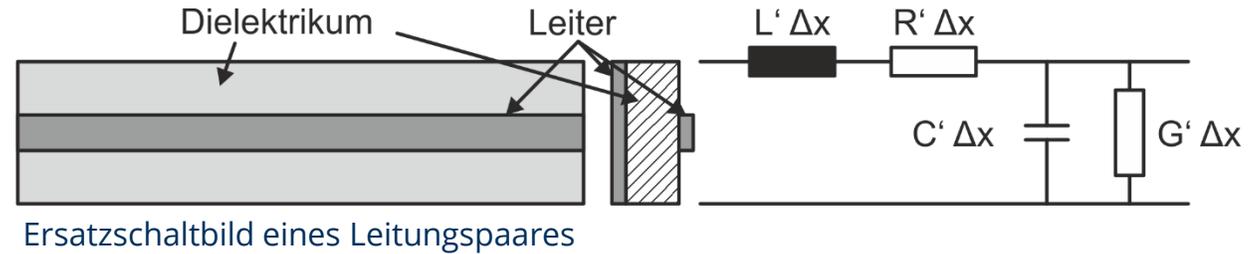
Quelle: Polytec

➤ Ortsauflösung ohne Nutzung kostenintensiver optischer Sensoren möglich?

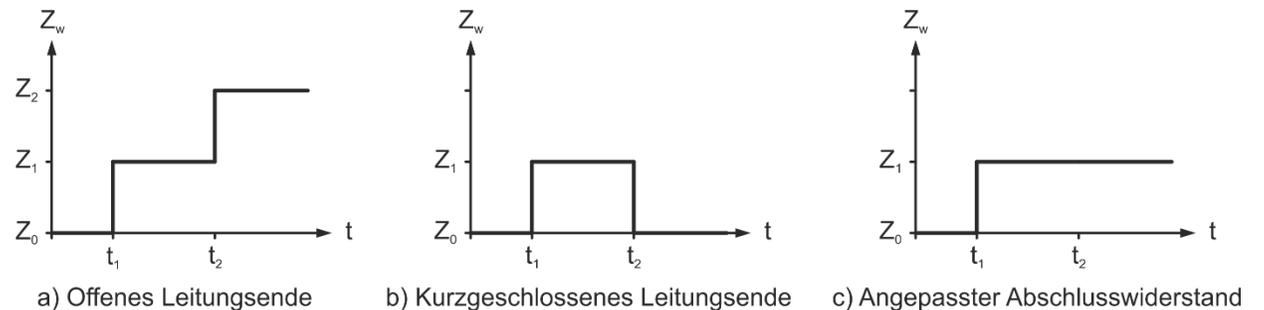
# Elektrische Zeitbereichsreflektometrie (EZBR)

## Grundlagen

- Auch electric time domain reflectometry (ETDR od. TDR)
- Ortsaufgelöste Messung des Wellenwiderstands (bzw. der Impedanz) entlang eines Leitungspaares
- Impulssignal wird in das Leitungspaar eingespeist und bei jeder Änderung des Wellenwiderstands teilweise reflektiert
- Reflexionen werden durch ein Oszilloskop aufgenommen und ausgewertet (Reflektogramm)
- Durch eine Laufzeitmessung kann örtlich aufgelöst werden



$$Z_w(t) = \sqrt{\frac{R'(t) + j\omega L'(t)}{G'(t) + j\omega C'(t)}}, t - \text{Signallaufzeit}$$

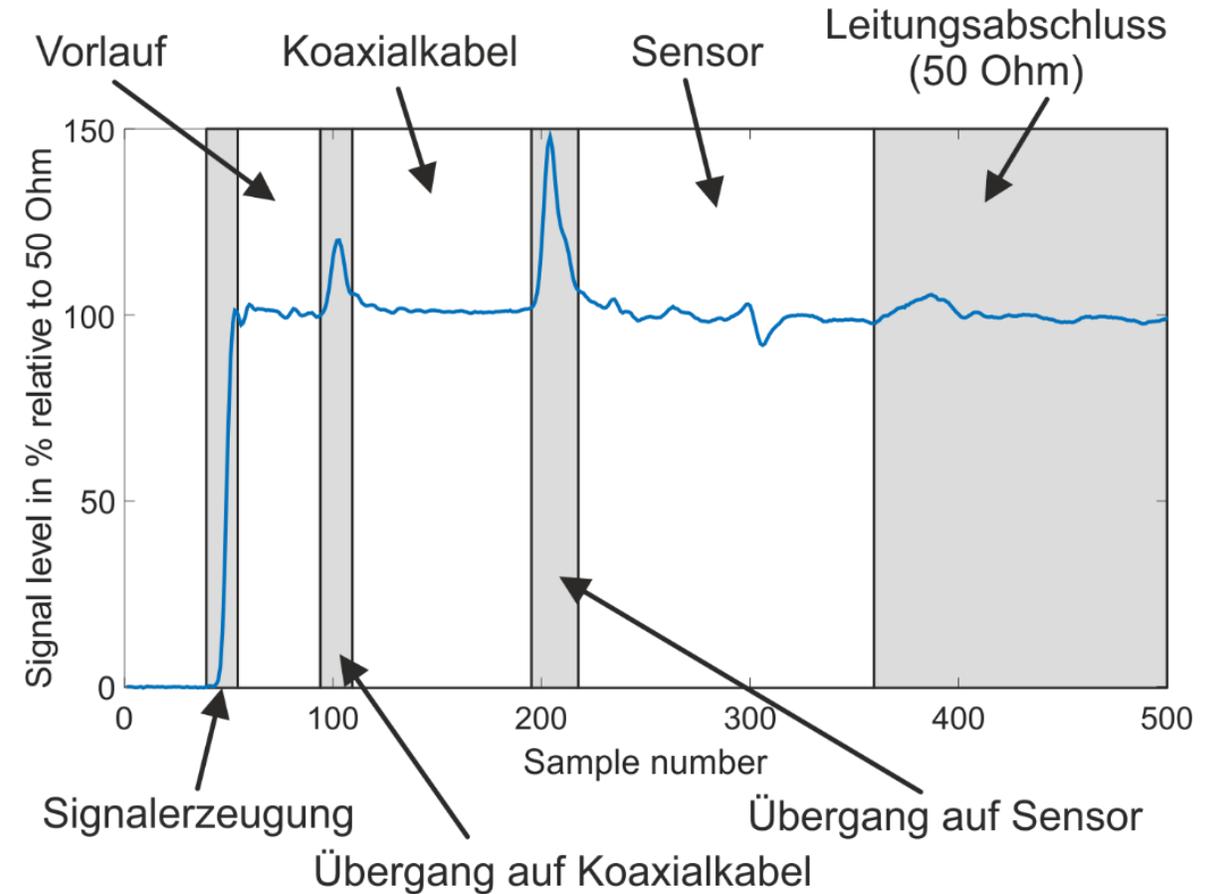
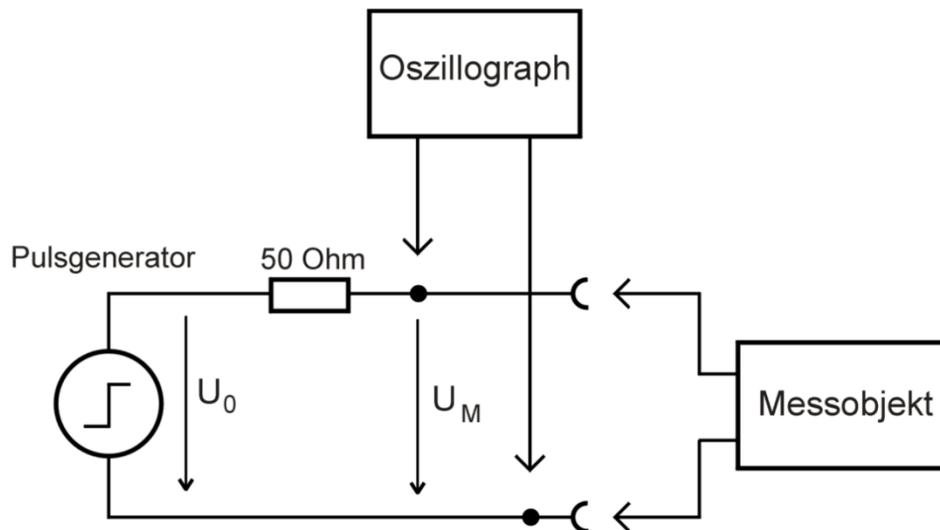


Wellenwiderstandskennlinie bzw. Reflektogramm verschiedener Leitungen und Leitungsabschlüsse

# Elektrische Zeitbereichsreflektometrie (EZBR)

## Messgeräte und resultierende Messsignale

- Messgerät: Kombination aus Oszillograph und Pulsgenerator (Signalanstiegszeit < 100 ps)
- Verfügbare Messgeräte
  - 2x ca. 40 Hz bei 500 Samples
  - 2x ca. 1000 Hz bei 500 Samples

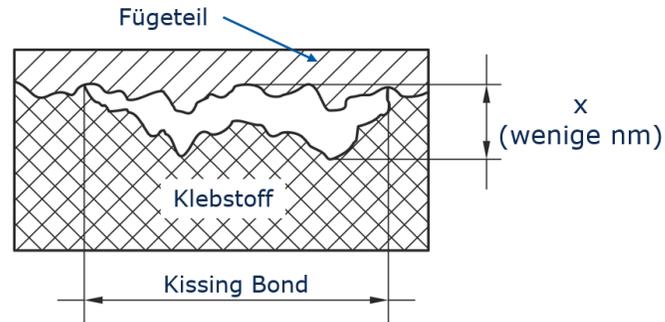


➤ Viele Einflussfaktoren auf Messsignal → Komplexe Signale über künstliche neuronale Netze auswerten

# Klebstellensensor

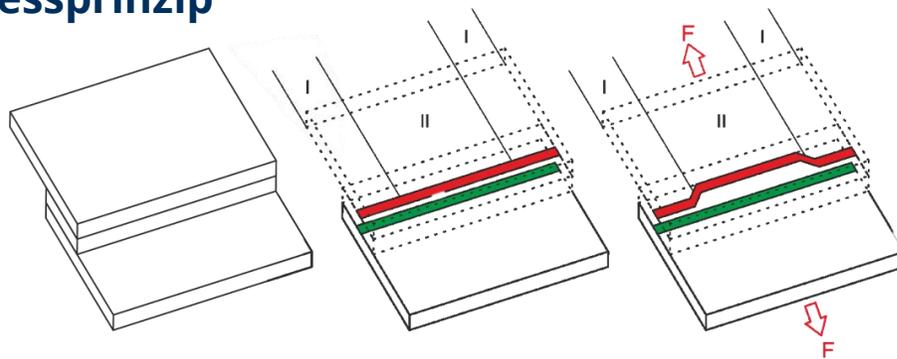
# Klebstellensensor

## Kissing Bonds



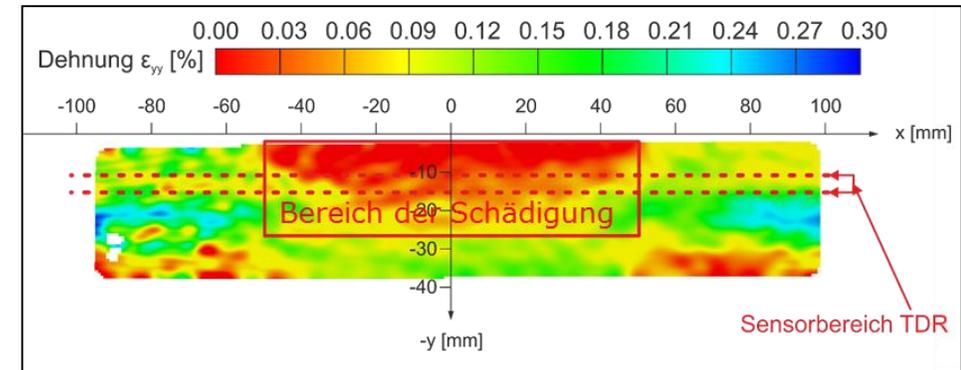
- Bereich nicht vorhandener Adhäsion
- Schlecht detektierbar durch konventionelle ZfP

## Messprinzip

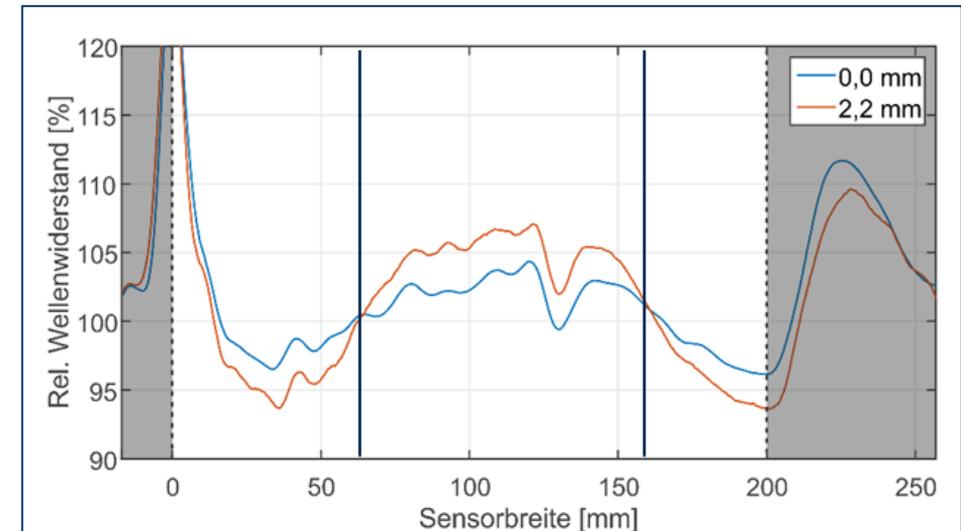


- Bereich I: Einwandfreie Klebverbindung
- Bereich II: Durch Kissing Bond geschwächte Klebverbindung
- Andere Verformung des oberen Fügeteils in Bereich II detektierbar durch EZBR

## Ergebnisse



Digitale Bildkorrelation auf Fügeteiloberfläche



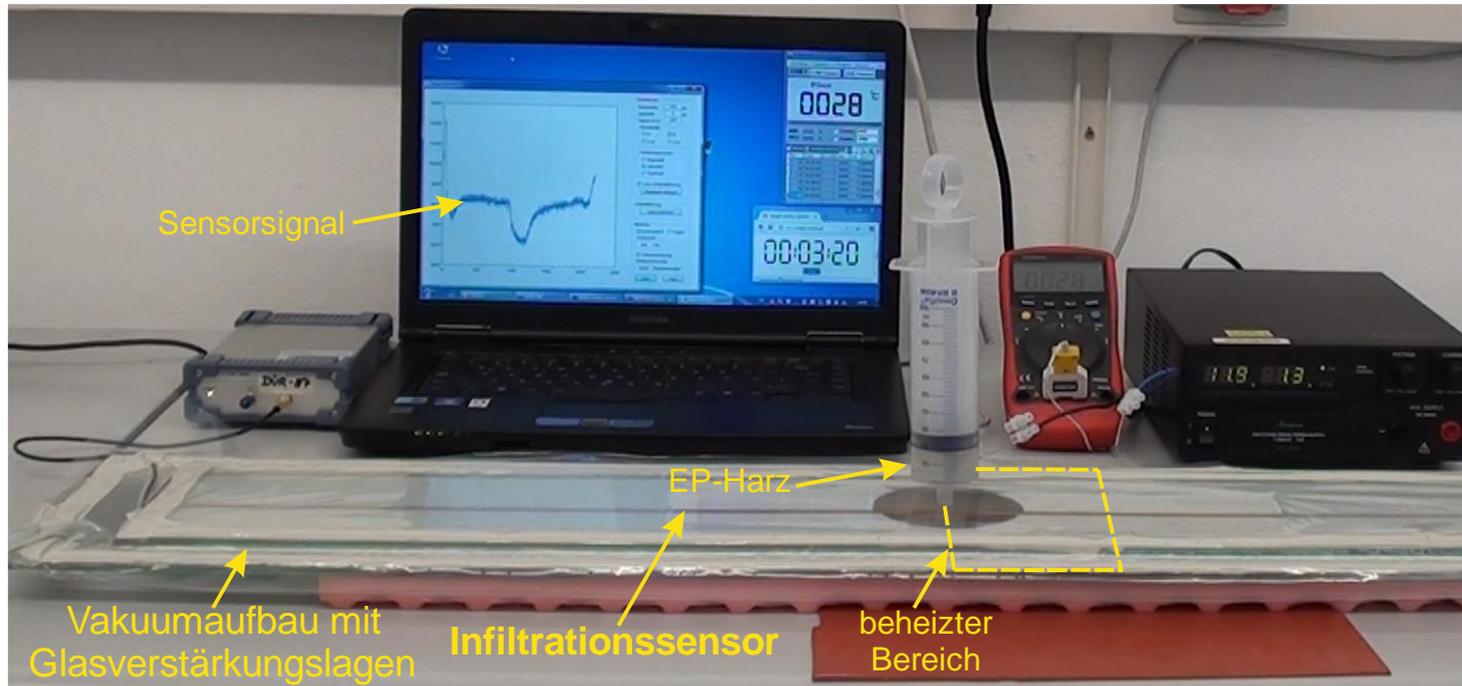
Wellenwiderstandskennlinien

# Infiltrationssensor

Bspw. bei der Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen

# Infiltrationssensor

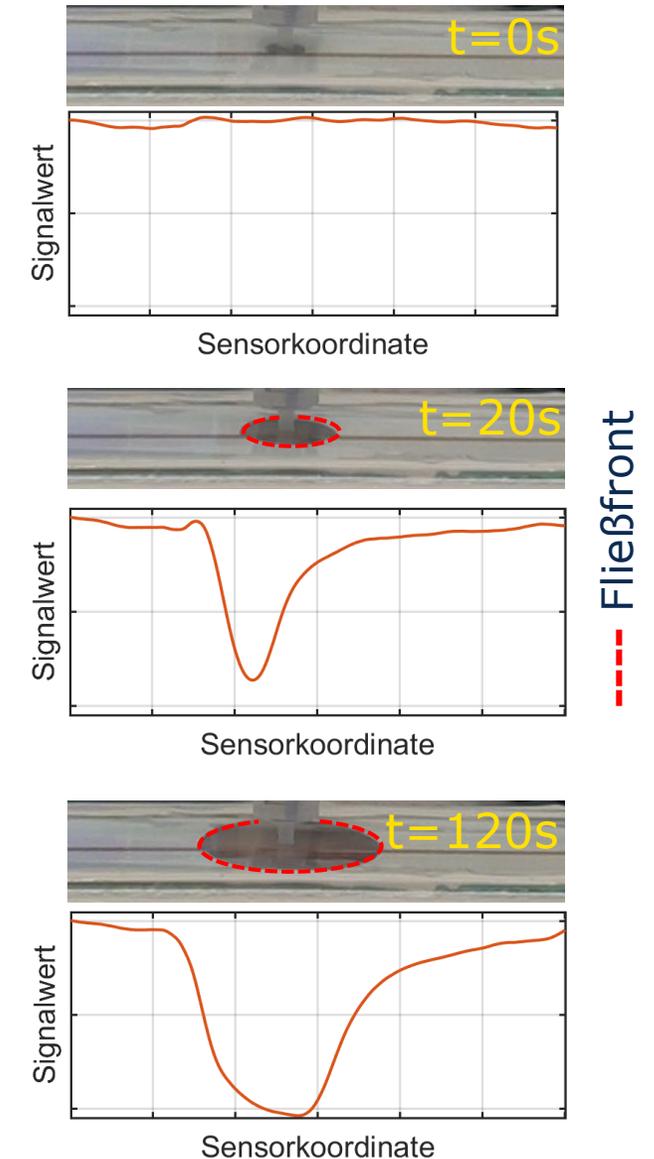
## Versuchsaufbau



- Änderung des Wellenwiderstands durch dielektrische Eigenschaften des EP-Harzes

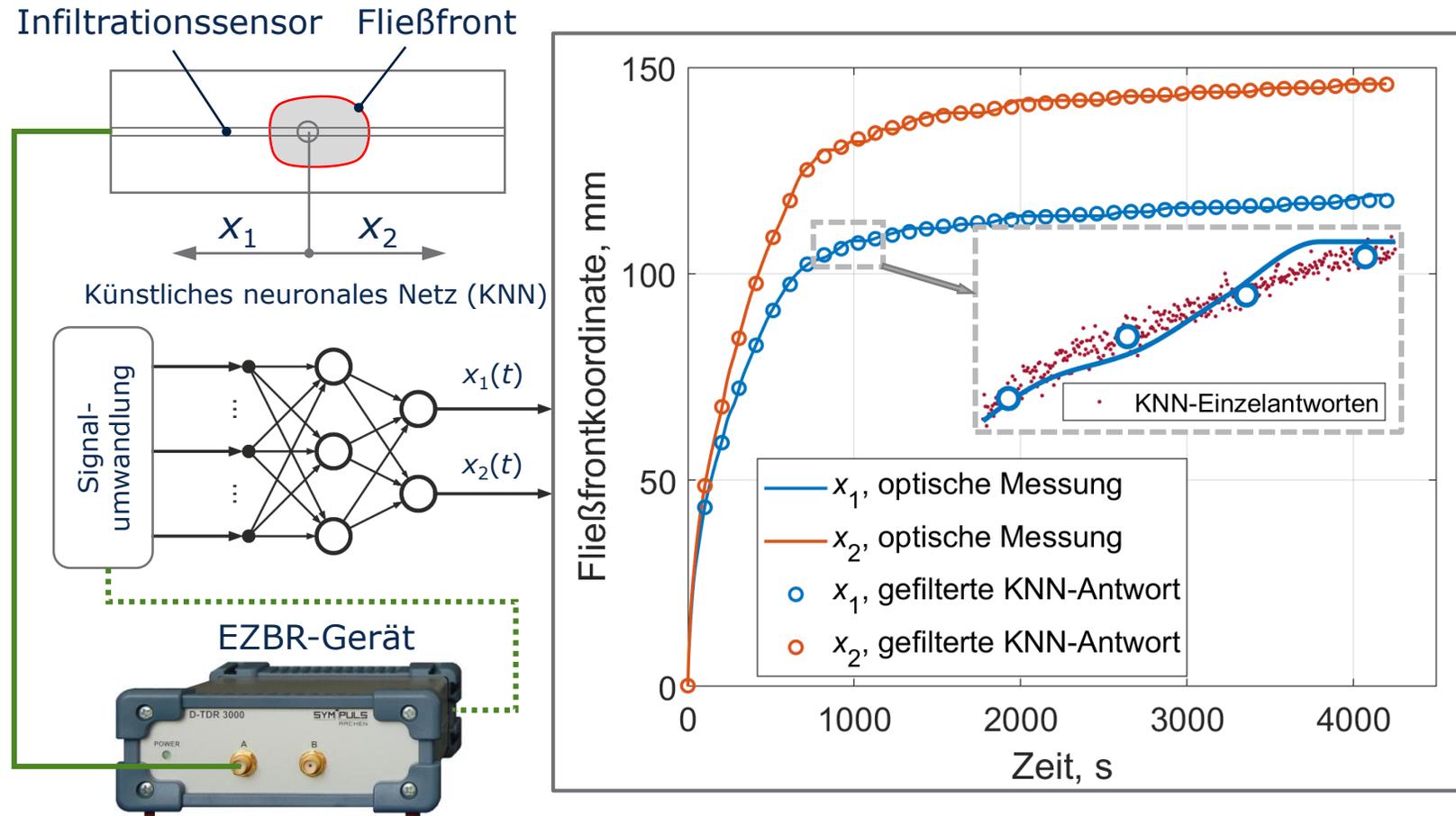
## Mögliche Einsatzbereiche

- Taktzeiten bei der Bauteilherstellung von FKV-Bauteilen verringern
- Qualitätskontrolle



# Infiltrationssensor

## KNN-Ansatz zur Verfolgung von Fließfronten



➤ KNN können mehrere Infiltrationsfronten anhand der EZBR-Sequenzen identifizieren

# Berührungsempfindlicher Sensor

Bspw. für Anwendungen in der Robotik

# Entwicklung eines berührungsempfindlichen Sensors

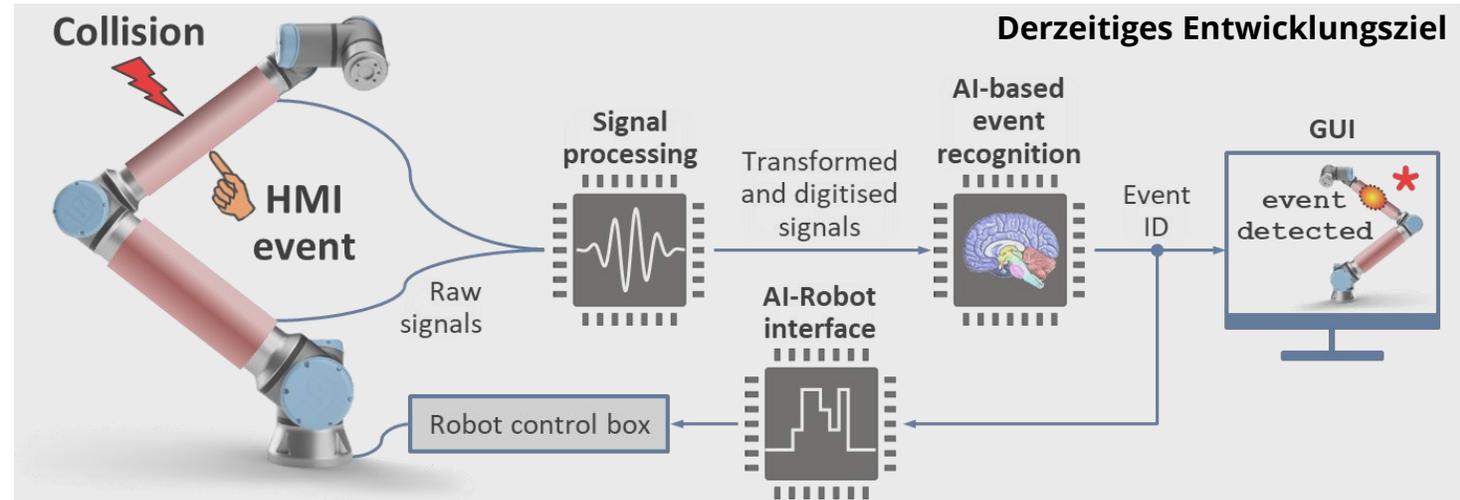
## Stand der Forschung

Entwicklung eines hochsensitiven „Touchsensors“ für den Einsatz in Industrierobotern zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion

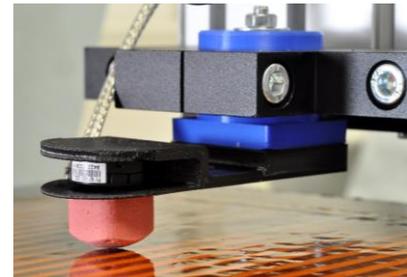
- Sensorprinzip: Nutzung der elektrischen Zeitbereichsreflektometrie und KNN, um Änderungen der Sensorgeometrie örtlich und hinsichtlich lastabhängiger Verformung zu beschreiben

## Derzeitige Eigenschaften des Sensors

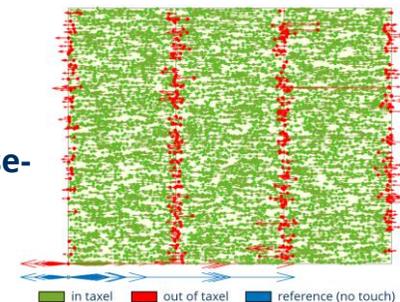
- gesamte Sensoroberfläche kann als sensitive Fläche eingesetzt werden
- Berührungseignisse können orts- und kraftaufgelöst erfasst werden
- Ebene oder einfach gekrümmte Ausführung des Sensors



Prüfaufbau zur Generierung von Trainings- und Validierungsdaten

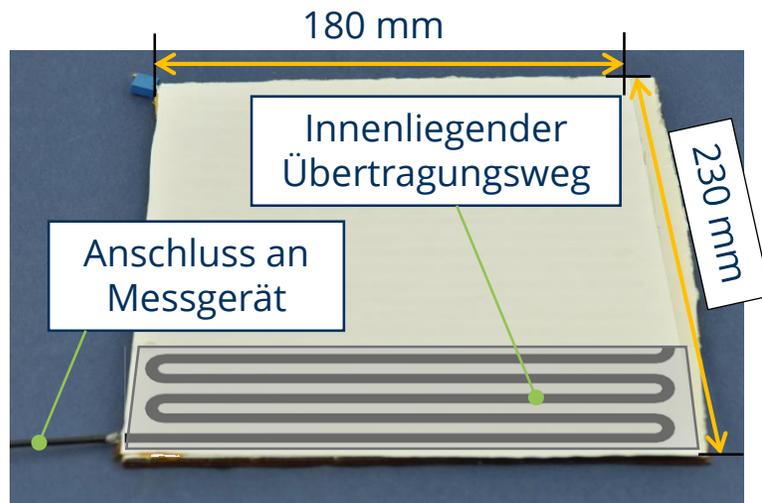


Klassifizierung und Zuordnung von Berührungseignissen

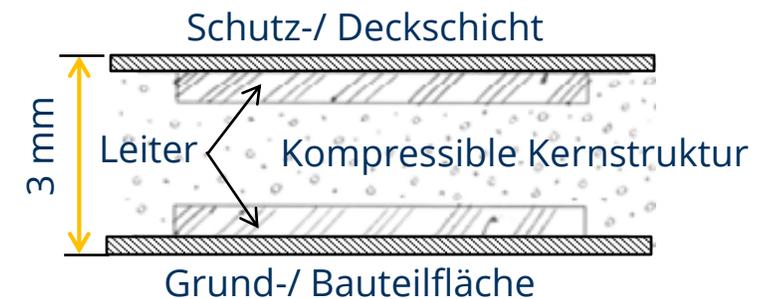


# Beispiel eines berührungsempfindlichen Sensors

- 3 schichtiger, flächiger Aufbau etwa in A4-Größe
- Elektr. Übertragungsweg zusammengesetzt aus Kupferleitern und Papierwabe als Kernstruktur
- Übertragungsweg als Mäanderstruktur ausgeführt
- Messmethode erfordert nur 1 Messkanal zur Überwachung der gesamten Fläche!



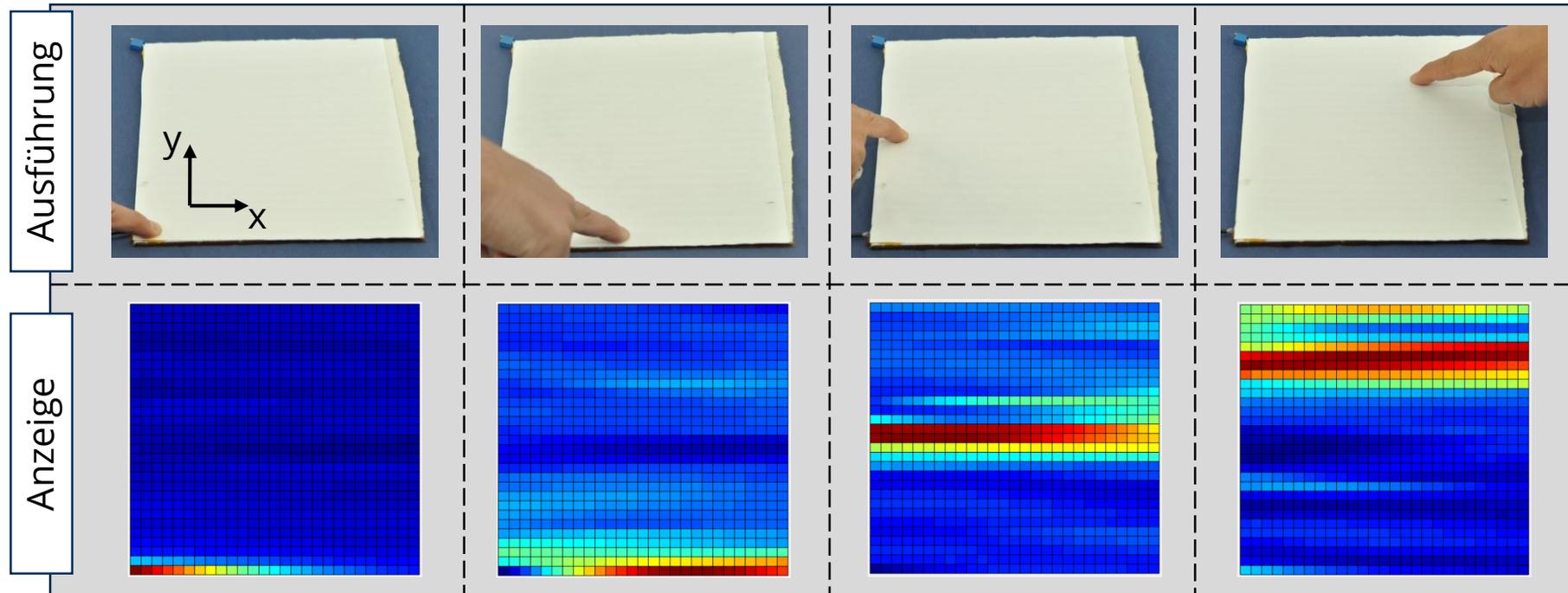
Aufsicht des Demonstrators



Querschnitt am Übertragungsweg

# Beispiel eines berührungsempfindlichen Sensors

- Lokale Kompression des Sensorpatches durch Fingerdruck
- Transformation des 1-Kanal-Signals in die Patchebene
- y-Auflösung: ~ 1 cm
- x-Auflösung: nimmt mit Entfernung von Signaleingang ab



# Aktueller Status des Projekts und Ausblick

Integration des berührungsempfindlichen Sensors in ein Getriebeglied eines Roboters

- a) Getriebeglied im Werkzustand
- b) Getriebeglied mit integriertem Sensor

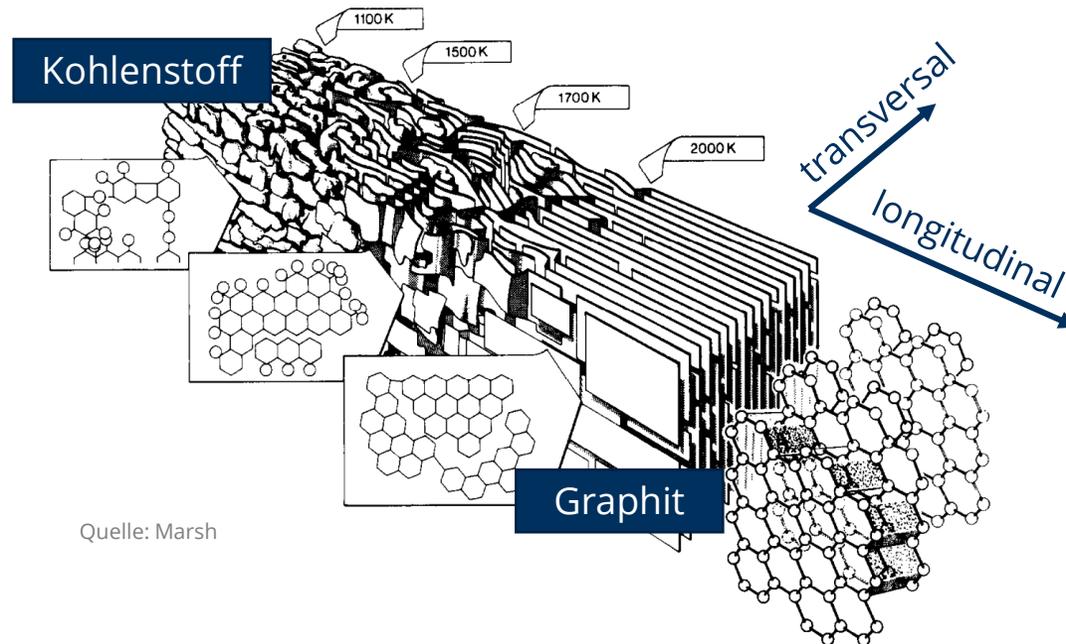


# Kohlenstofffaser-Dehnungssensor

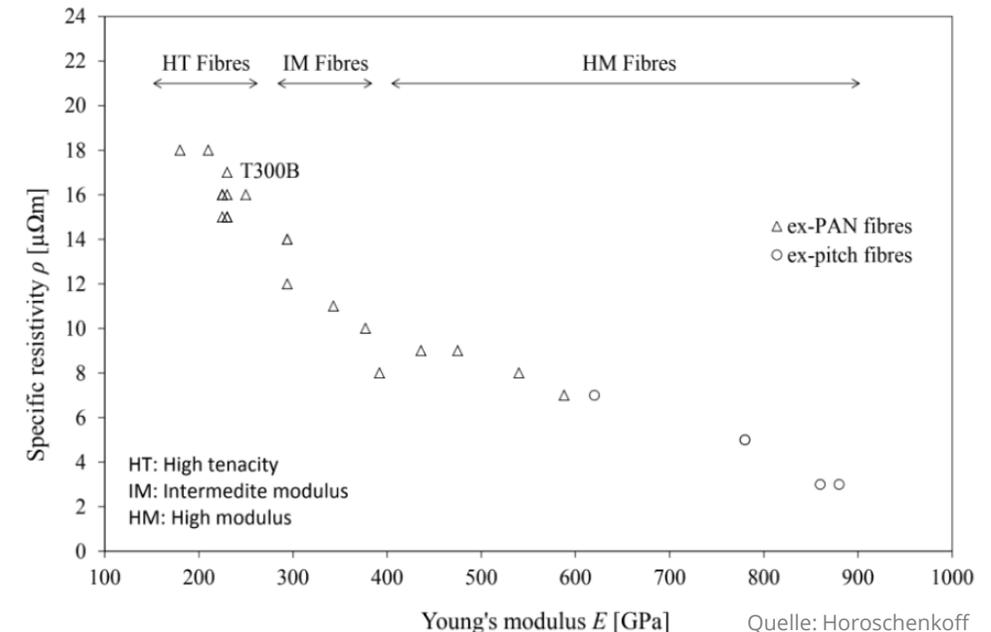
# Kohlenstofffaser-(CF)-Dehnungssensor

## Elektrische Eigenschaften von Kohlenstoff, Graphit und CF

- Graphit weist eine anisotrope elektrische Leitfähigkeit auf → hoch in Longitudinalrichtung (in-plane), niedrig in Transversalrichtung
- CF mit hohen E-Moduln (HM, UHM) weisen größere Graphitebenen und somit bessere Leitfähigkeit auf
- CF weisen einen piezo-resistiven Effekt auf → der elektrische Widerstand ändert sich durch Krafteinwirkung



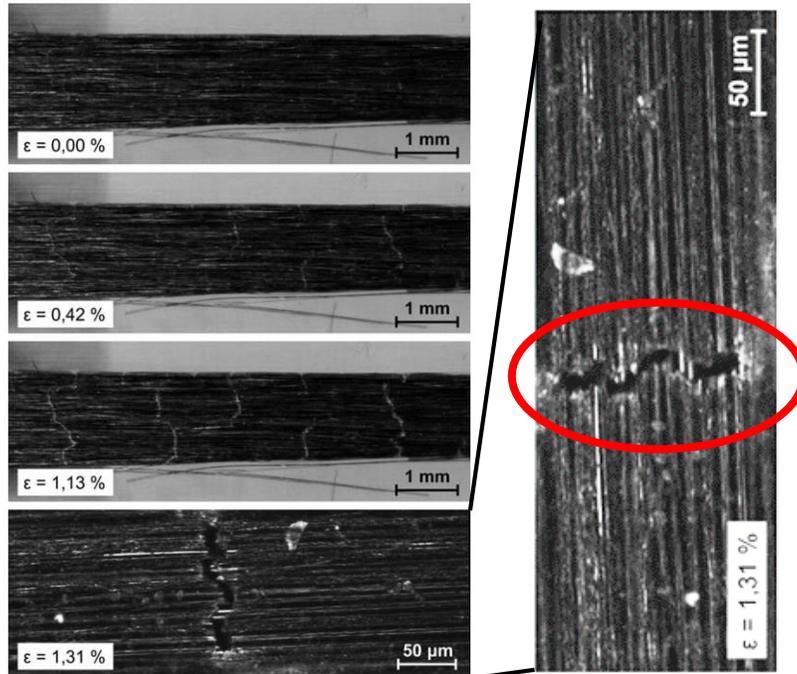
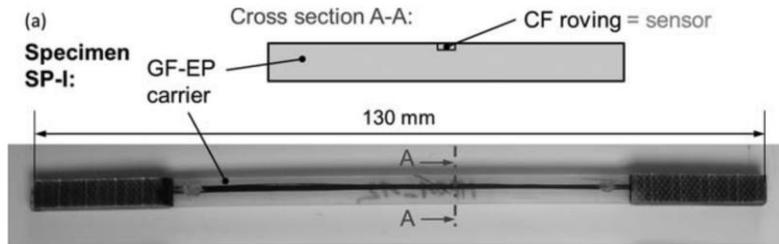
Materialstruktur von Kohlenstoff und Graphit bei verschiedenen Behandlungstemperaturen



E-Moduln verschiedener CF und Typen von CF

# Kohlenstofffaser-(CF)-Dehnungssensor

## Messprinzip



Source: Höhne

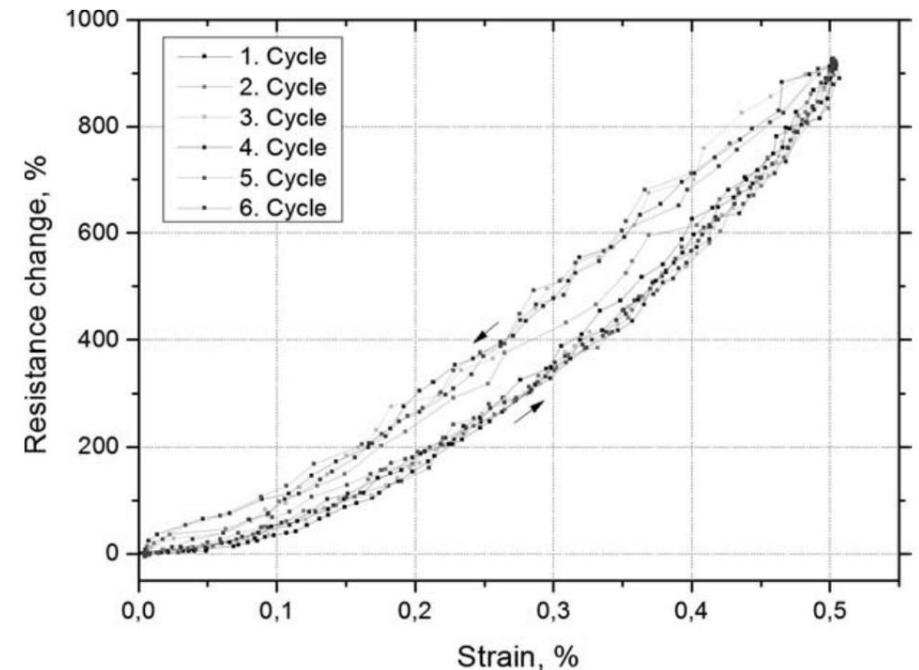
Faserbrüche bei unterschiedlichen Dehnungszuständen

## Phänomenologische Beobachtungen bei geschädigten CF

- UHM-Fasern wurden in einen GF-EP-Träger integriert
- Dehnung über Bruchdehnung der CF resultiert in äquidistante Faserbrüche  $\sim 1\text{ mm}$  („Funktionalisierung“)

## Ergebnisse

- Reproduzierbare Widerstandskennlinie
- Große Änderung des Widerstands bei kleinen Dehnungen  $\rightarrow$  hohe Sensitivität
- Dehnungsmessung über der Bruchdehnung möglich



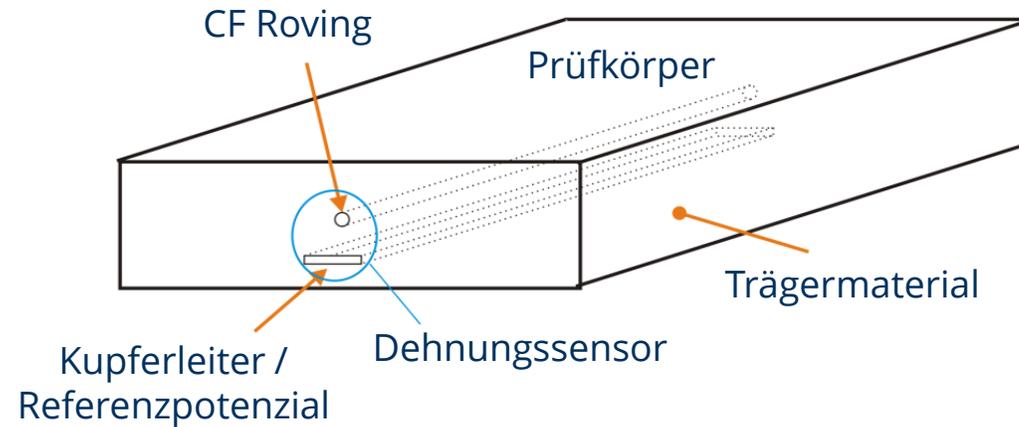
Source: Höhne

➤ Hohe Sensitivität ermöglicht Einsatz der EZBR

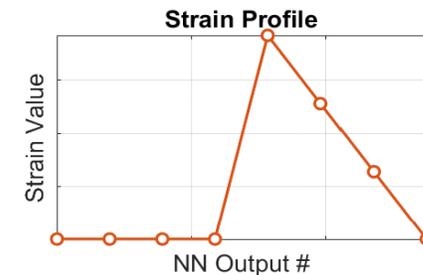
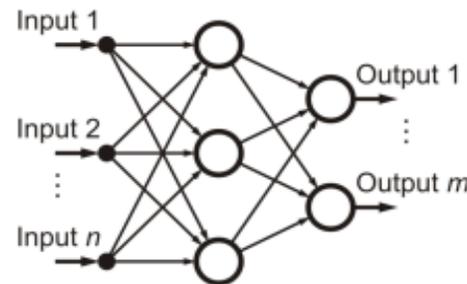
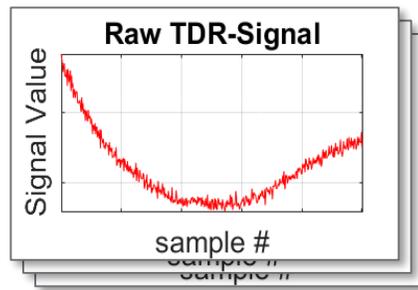
# Kohlenstofffaser-(CF)-Dehnungssensor

Ortsauflösung durch Kombination mit EZBR

## Geometrie des ortsauflösenden CF-Dehnungssensors



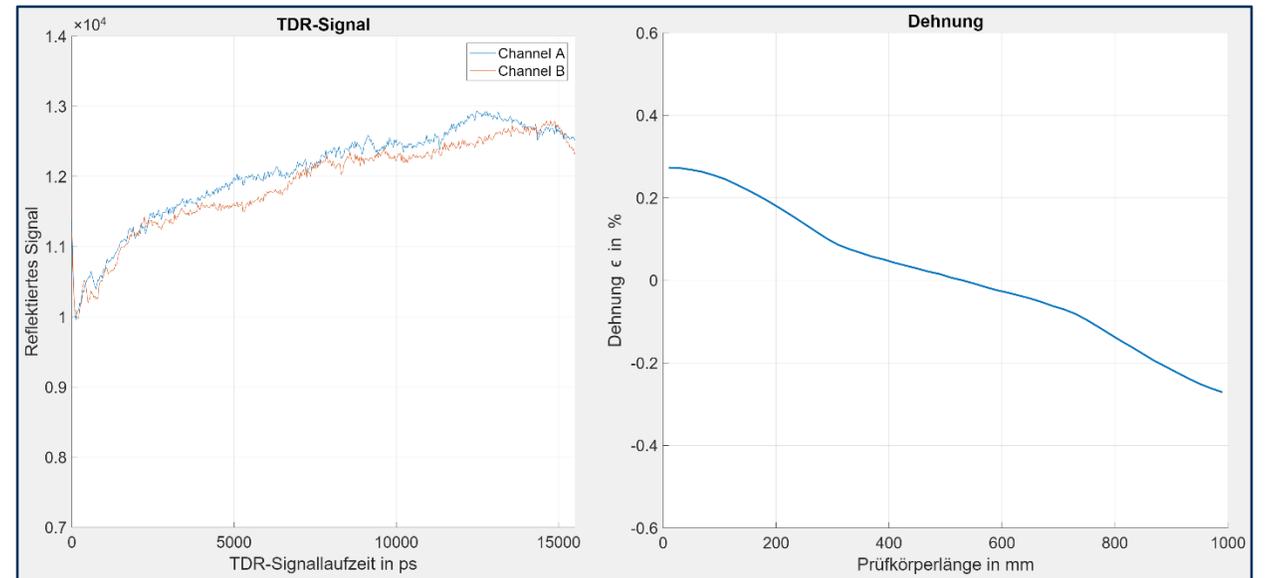
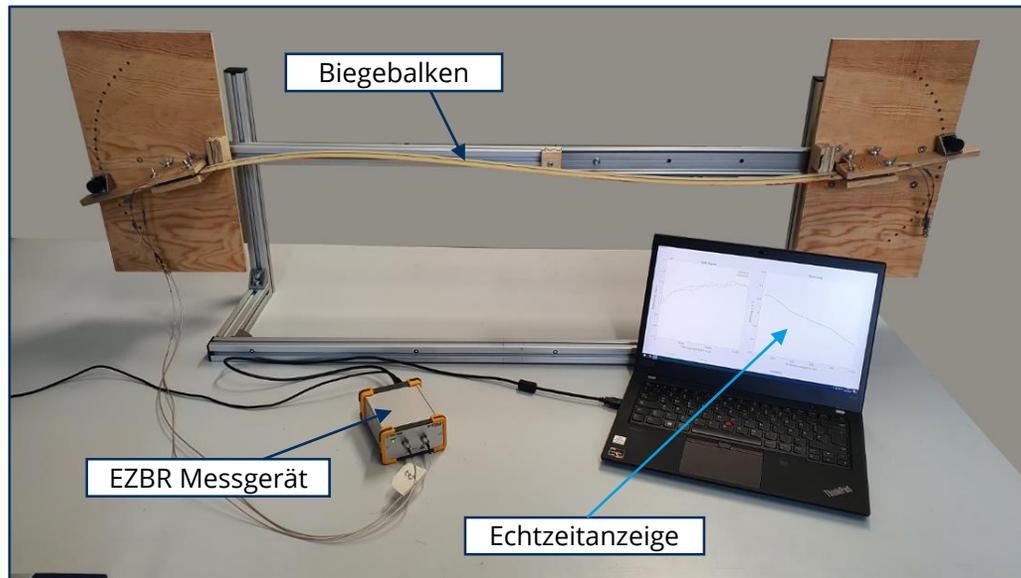
## Nutzung künstlicher neuronaler Netze zur Echtzeitauswertung



# Kohlenstofffaser-(CF)-Dehnungssensor

## 1-m-Demonstrator

- Messlänge 1 Meter, gemessen wird die Dehnung an der Oberseite des Biegebalkens (glasfaserverstärkter Kunststoff)
- Nutzung von zwei Sensoren (1x oben, 1x unten) ermöglicht Messung von Druck- und Zugdehnungen
- Auswertung des komplexen EZBR-Signals über ein künstliches neuronales Netz (KNN)
- Messgeschwindigkeit EZBR-Gerät 1000 Hz, nach Berechnung des KNN ca. 200 Hz, Echtzeitanzeige

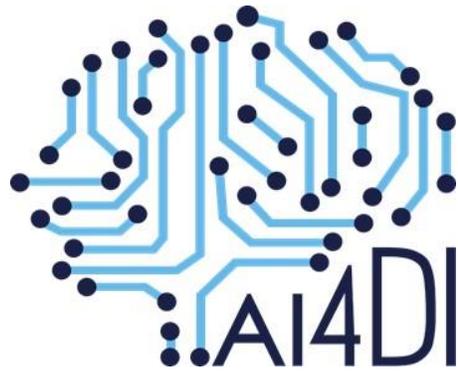


# Zusammenfassung

- Elektrische Zeitbereichsreflektometrie ermöglicht die Auswertung elektrischer Eigenschaften von Leitungspaaren in 1 D bzw. „1,5 D“ (flächig durch Mäanderform)
- Am ILK konnten bisher vier verschiedene Anwendungen gezeigt werden
  - Klebstellensensor
  - Infiltrationssensor
  - Berührungsempfindlicher Sensor (Haut- bzw. Touchsensor)
  - Kohlenstofffaser-Dehnungssensor
- Rohsignale der EZBR mitunter komplex, daher bietet sich zurzeit noch die Auswertung mittels künstlichen neuronalen Netzen an
- Intensivierung der Forschung auf diesem Feld geplant
  - Aktuelle und kommende Projekte im Bereich Dehnungssensor und Touchsensor
  - Neue Projekte im Bereich Aushärtungsüberwachung in Planung

# Förderhinweis und Partner

## Projekt AI4DI



## Projekt MonStrain

