

# Projektvorstellung – MeMo

---

Entwicklung eines fasersensorbasierten ganzheitlichen echtzeitfähigen Textil-Membran-Monitoring-Systems

---

Fördermittelgeber:	BMWK
Projektleiter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Chokri Cherif
Wiss. Projektbearbeiter:	Karl Kopelmann, Phuong Ngoc Ngo, Florian Schmidt, Tobias Lang, Anna Happel
Laufzeit:	12/2022 – 08/2025

# Projektdaten

---

Förderprogramm:	DLR IGF
Gesamte Laufzeit :	01.12.2022 – 31.08.2025
Fördersumme: insgesamt:	253.179,45 €
Projektleitung:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif
Wissenschaftliche Bearbeitung:	Karl Kopelmann, Phuong Ngoc Ngo, Florian Schmidt, Tobias Lang, Anna Happel
Studentische Hilfskräfte:	Anh Le Xuan

# Gliederung

---

1. Ausgangssituation / Problemstellung / Motivation
2. Zielsetzung des Projektes
3. Lösungsweg / Arbeitsschritte
4. Ergebnisse
5. Weitere Vorgehensweise
6. Diskussionsbedarf

# 1. Ausgangssituation – Problemstellung – Motivation

Bedarf nach Methoden zur Auslegung und Produktion von adaptiven FKV

- Bedarf nach Structural Health Monitoring in vielen Anwendungen für textile Membranen
- oft inhomogene komplexe Belastungsszenarien, z.B. durch Witterungseinflüsse
- Standzeiten oft nicht erreichbar aufgrund mangelnder Überprüfungen

Quelle: Land und Forst



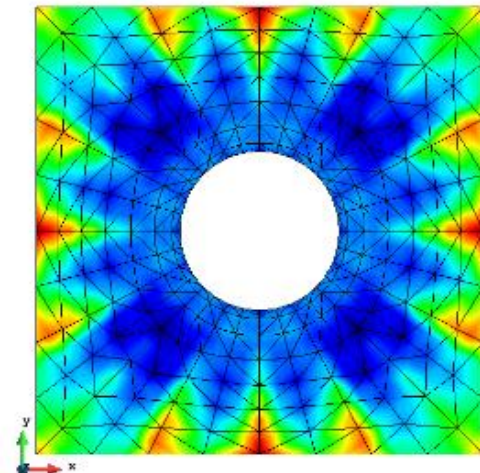
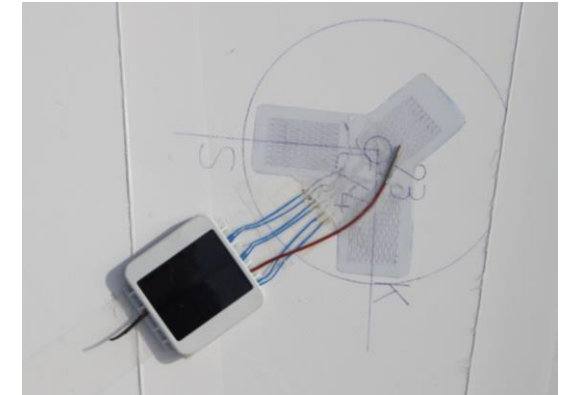
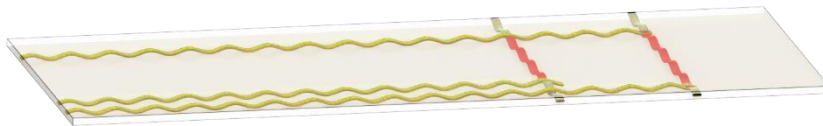
Quelle: Sächsische.de



## 2. Zielsetzung des Projekts

### Konzept und Lösungsweg

- Umfassende Analyse mehrachsiger Belastungszustände
- Anpassung textiler resistiver Dehnungssensoren
- Implementieren neuronaler Netze:
  - Übertragung von diskreten Messwertänderungen zu lokalen Dehnungskennwerten
  - Echtzeitübertragung der lokalen Dehnungskennwerte auf vollflächige Spannungskennwerte
- **Ausgabe des vollflächigen Spannungszustandes der Membran in Echtzeit**
- Erarbeiten von Konzepten für universelle Anwendbarkeit der Methodik (Zerlegung in geometrische Substrukturen)
- Funktionsnachweis anhand eines Demonstrators



# 3. Lösungsweg / Arbeitsschritte

## Übersicht Zeitplan

- Projektverlängerung um 9 Monate

Arbeitspakete		Q I			Q II			Q III			Q IV			Q V			Q VI			Q VII			Q VIII		
1	Präzisierung der Anforderungen																								
2	FEM-Analysen																								
3	Entwicklung fadenförmiger Sensoren																								
4	Entwicklung funktionalisierter Textilien																								
5	Verbindungstechnik und Beschichtung																								
6	Charakterisierung																								
7	Entwicklung echtzeitfähiger Algorithmen																								
8	Funktionsdemonstrator: Realisierung/Erprobung																								
9	Wirtschaftlichkeitsanalyse/Verfahrensanweisung																								
10	Berichtlegung																								

# 4. Ergebnisse

## Präzisierung der Anforderungen

---

### Fadenförmige Sensoren:

- Messbereich Dehnung: 0 – 10 %
- Material: besilbertes Polyamid, Isohm, pseudoelastische Formgedächtnislegierungen

### Membran:

- Ein- oder zweilagiges Gewebe aus PES
- Beschichtung mit PVC
- Maximale Dickenabweichung durch Sensor von 0,2 mm

### Sensorsystem:

- Ortsauflösungsvermögen: 100 Spannungswerte / m<sup>2</sup>
- Echtzeitfähigkeit: Informationsgenerierung jede Sekunde
- Genauigkeit: max. 5 % Abweichung zu Ergebnissen der Simulation

# 4. Ergebnisse

## Materialauswahl Sensor

### Materialauswahl Sensor:

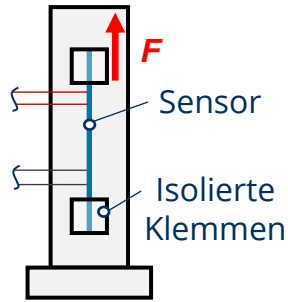
Bezeichnung / Abkürzung	Werkstoff	Bruchdehnung [%]	Elektrischer Widerstand [Ω/m]	Vorteil	Nachteil
Madeira® HC 40 / HC40	PA 6.6 + Ag	23	300	hohe Sensitivität, sehr gute textiltechnische Verarbeitung	Geringe elastische Dehnung, kein lineares Sensorverhalten
Shieldex® 117/17 2-Ply HC+B / Sh117	PA 6.6 + Ag	21	300	hohe Sensitivität, sehr gute textiltechnische Verarbeitung	Geringe elastische Dehnung, kein lineares Sensorverhalten
SilverTech+® 150 / ST150	PA 6.6 + Ag	35	300	hohe Sensitivität, geringe Hysterese, sehr gute textiltechnische Verarbeitung	Geringe elastische Dehnung, kein lineares Sensorverhalten
Shieldex® Wrapped Yarn – stretch / ShWY	Kern aus Roica 33/1 V550 SC / Elastan mit Umwicklung aus PA 6.0 + Ag	-	3.500	Hohe Dehnung aufgrund des Elastan-Kerns	Sensorverhalten verändert sich bei zyklischen Belastungen, kein lineares Sensorverhalten
Isaohm® / Isa	NiCr20AlSi	19	360	geringe Temperaturabhängigkeit des Widerstands, lineares Sensorverhalten	Geringe elastische Dehnung
FGL Fa. Ingpuls GmbH / FGL	NiTi	12	10,7	Hohe Dehnung und Sensitivität, lineares Sensorverhalten	Temperaturabhängigkeit des Widerstands



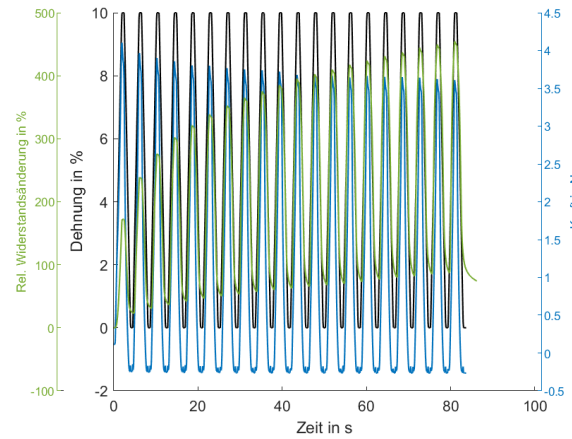
# 4. Ergebnisse

## Elektromechanische Charakterisierung

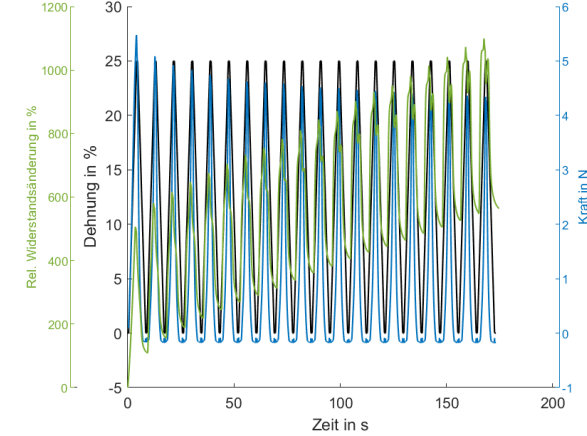
### Versuchsaufbau:



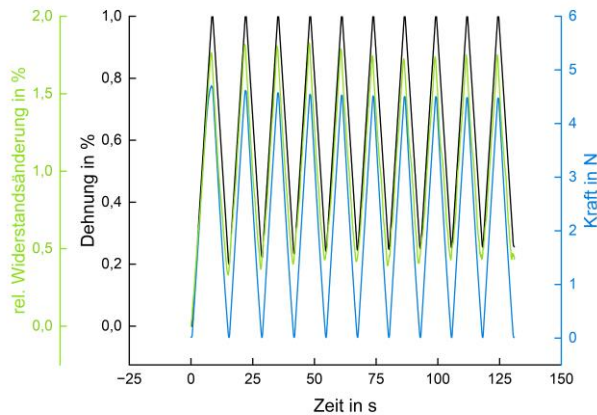
Shieldex® 117/17 2-Ply HC+B



SilverTech+® 150



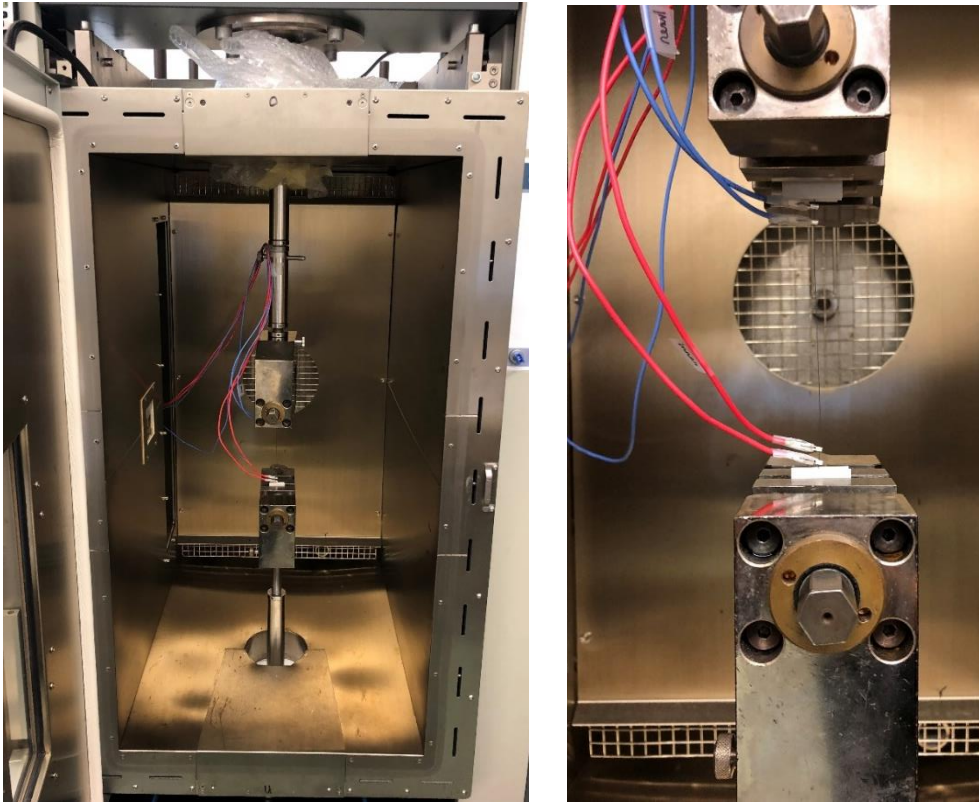
Isaohm®



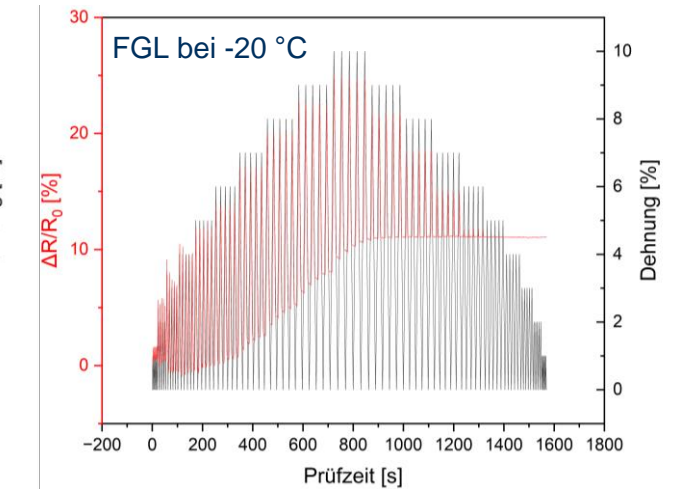
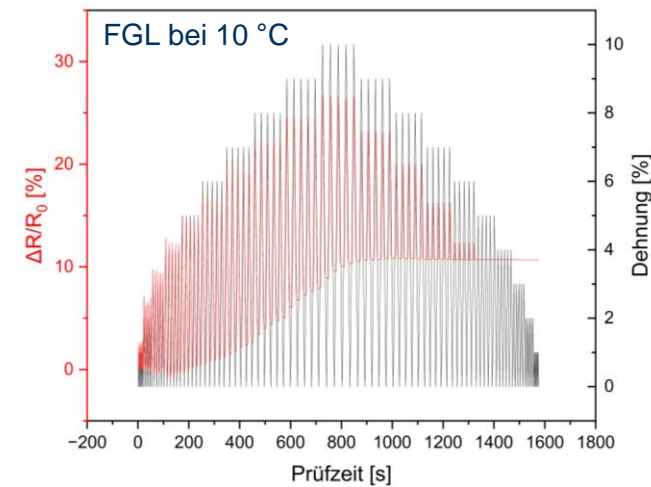
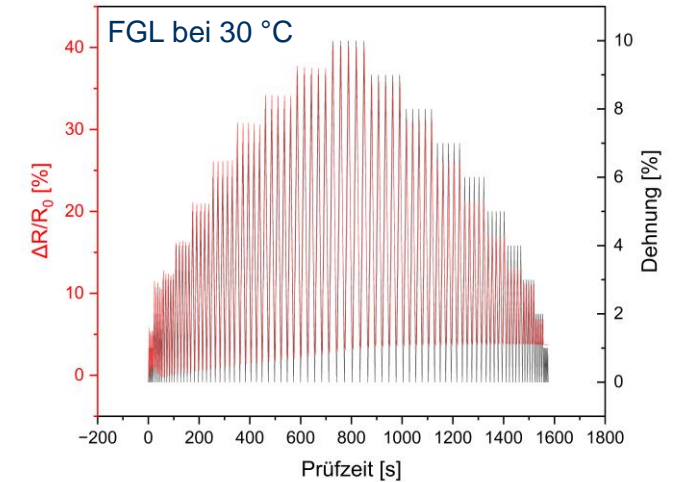
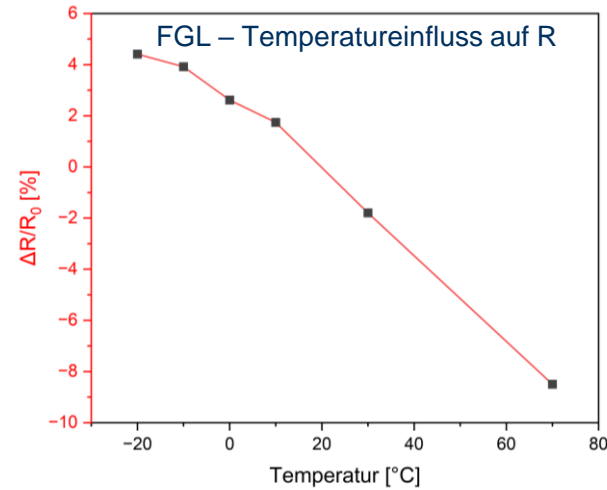
- besilberte Polyamid-Garne weisen untereinander ähnliche Sensoreigenschaften auf
- Isaohm® kein Baseline-Drift, elastische Dehnung bis 1 %  
→ textiltechnische Einbringung einer Strukturdehnung zur Erhöhung des Messbereichs

# 4. Ergebnisse

## Elektromechanische Charakterisierung



Zyklische Zugprüfung mit Widerstandsmessung und Temperierkammer

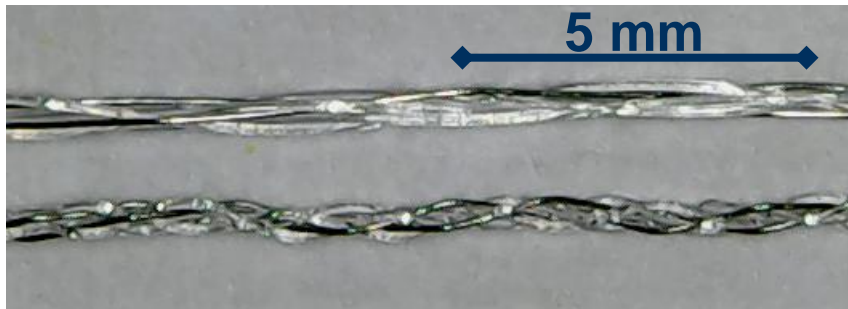


# 4. Ergebnisse

## Entwicklung fadenförmiger Sensoren

### Flechtkonstruktion:

- Sensorgarne: SilverTech+® 150 und Isaohm®
- Geflecht mit 6 (orange) und 12 Klöppeln (rosa), hiervon 2 Klöppel mit Sensormaterial, gegenläufig

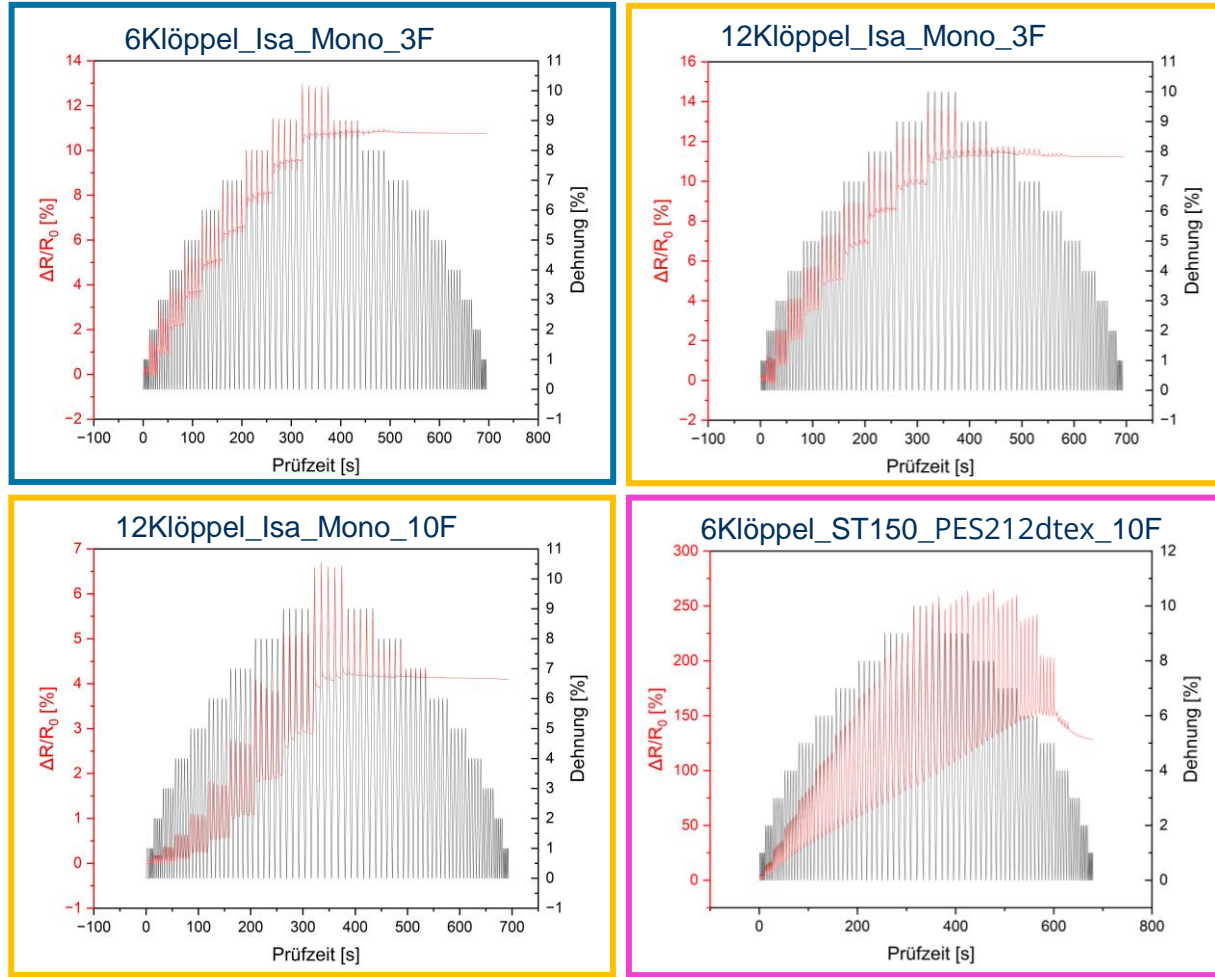


Flechtkonstruktionen aus Isaohm® und PES Monofilament, die obere Variante mit einer Flechtdichte (F) von 3 cm<sup>-1</sup> und die untere Variante mit 10 cm<sup>-1</sup>

Bezeichnung	Sensormaterial	Nicht elektrisch leitfähiges Material	Flechtdichte cm <sup>-1</sup>	Bearbeitungsstatus
Isa + Mono 3F	Isaohm®	PES Monofilament	3	Geprüft
Isa + Mono 6F	Isaohm®	PES Monofilament	6	Geprüft
Isa + Mono 10F	Isaohm®	PES Monofilament	10	Geprüft
Isa + PES212dtex 3F	Isaohm®	PES Multifilament 212dtex	3	Geprüft
Isa + PES212dtex 6F	Isaohm®	PES Multifilament 212dtex	6	Geprüft
Isa + PES212dtex 10F	Isaohm®	PES Multifilament 212dtex	10	Geprüft
ST150 + PES212dtex 6F	Silver-tech+® 150	PES Multifilament 212dtex	6	Geprüft
ST150 + PES212dtex 10F	Silver-tech+® 150	PES Multifilament 212dtex	10	Geprüft
ST150 + PES212dtex 20F	Silver-tech+® 150	PES Multifilament 212dtex	20	Geprüft

# 4. Ergebnisse

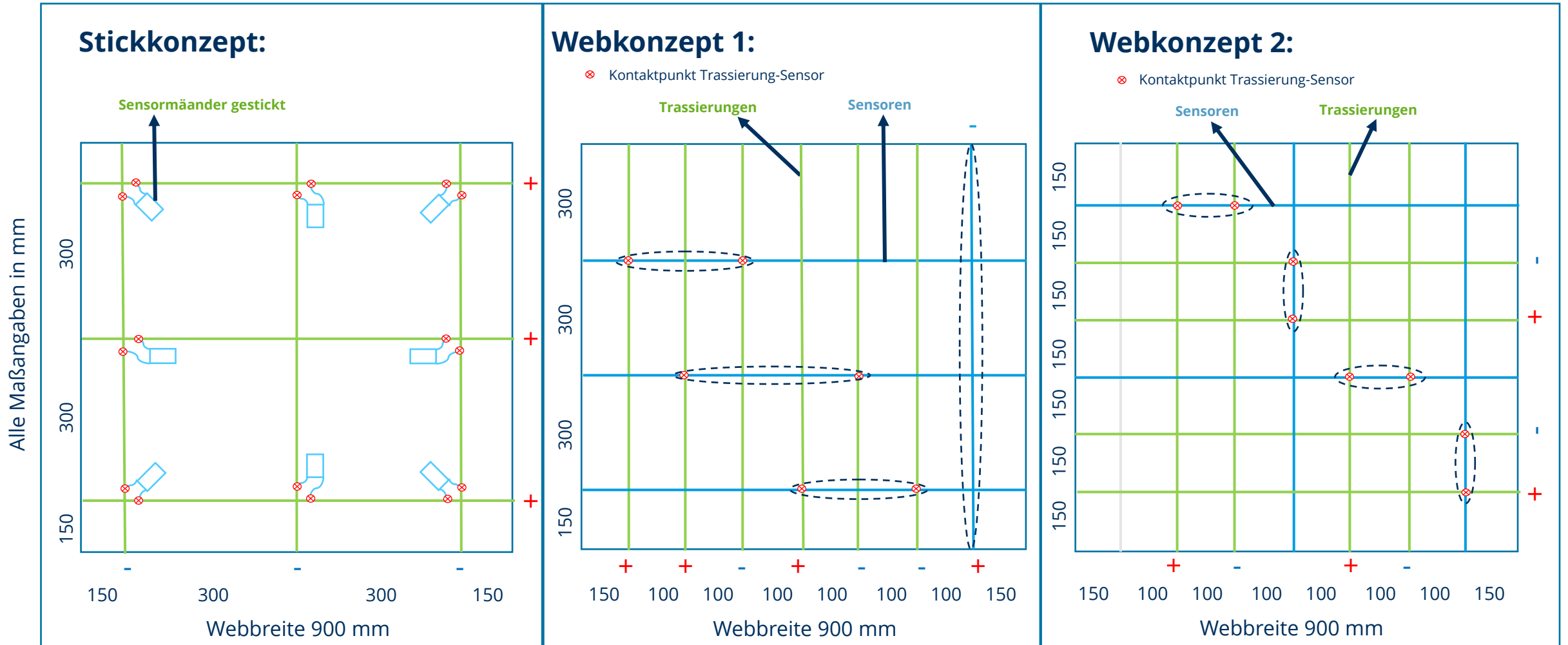
## Elektromechanische Charakterisierung geflochtener Sensoren



- Elektromechanische Charakterisierungen zeigen, dass keine Rückstellung der Geflechtstruktur vorliegt
- Geflechte nicht weiterverfolgt
- Vorzugslösung: Isaohm®

# 4. Ergebnisse

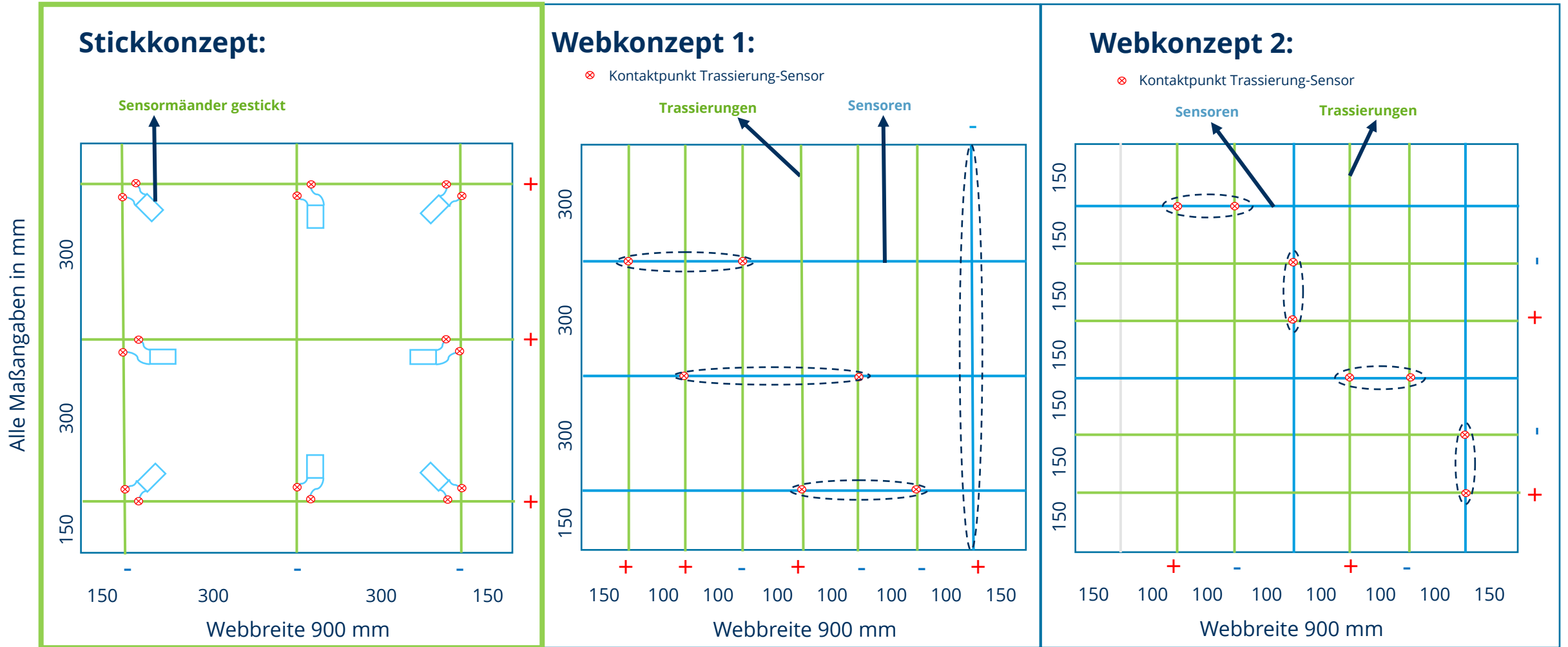
## Layout- und Bindungsentwicklung





# 4. Ergebnisse

## Layout- und Bindungsentwicklung

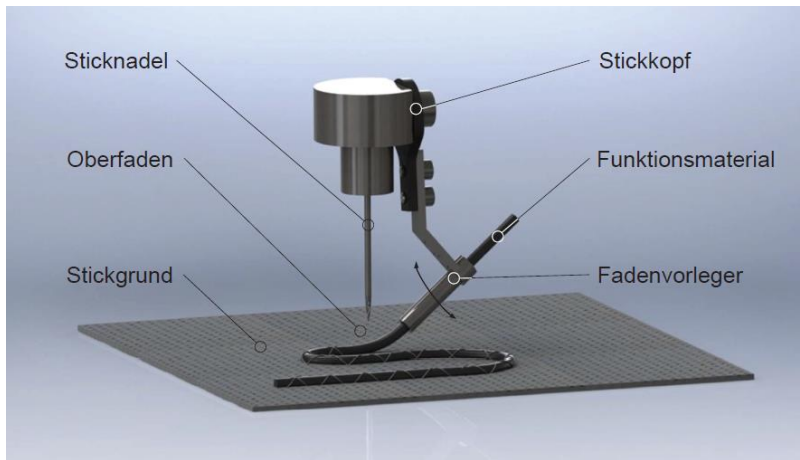


# 4. Ergebnisse

## Layout- und Bindungsentwicklung

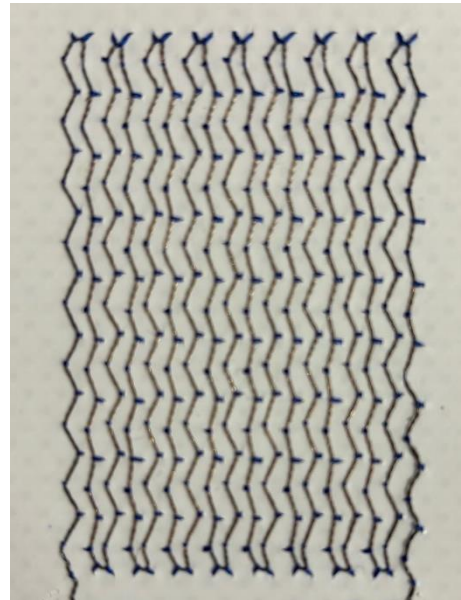
### Gestickte Sensormäander auf Membran:

- Membran: Tentorium 900 H5573-ECO der Fa. Heytex Bramsche GmbH
  - Kettelstich
  - Zick-Zack-Stich
  - TFP-Stickverfahren



Grundprinzip TFP

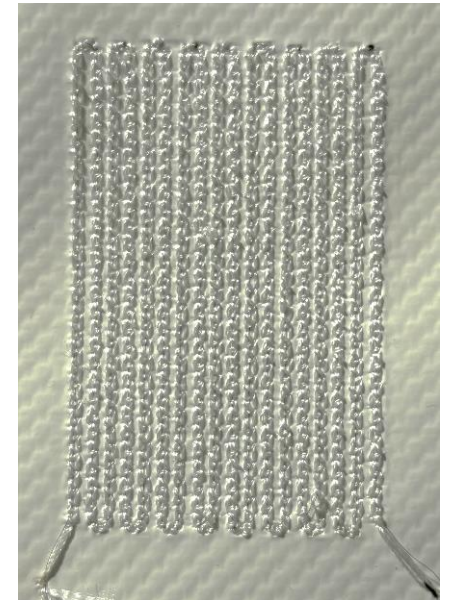
Zick-Zack-Stich



Kettelstich

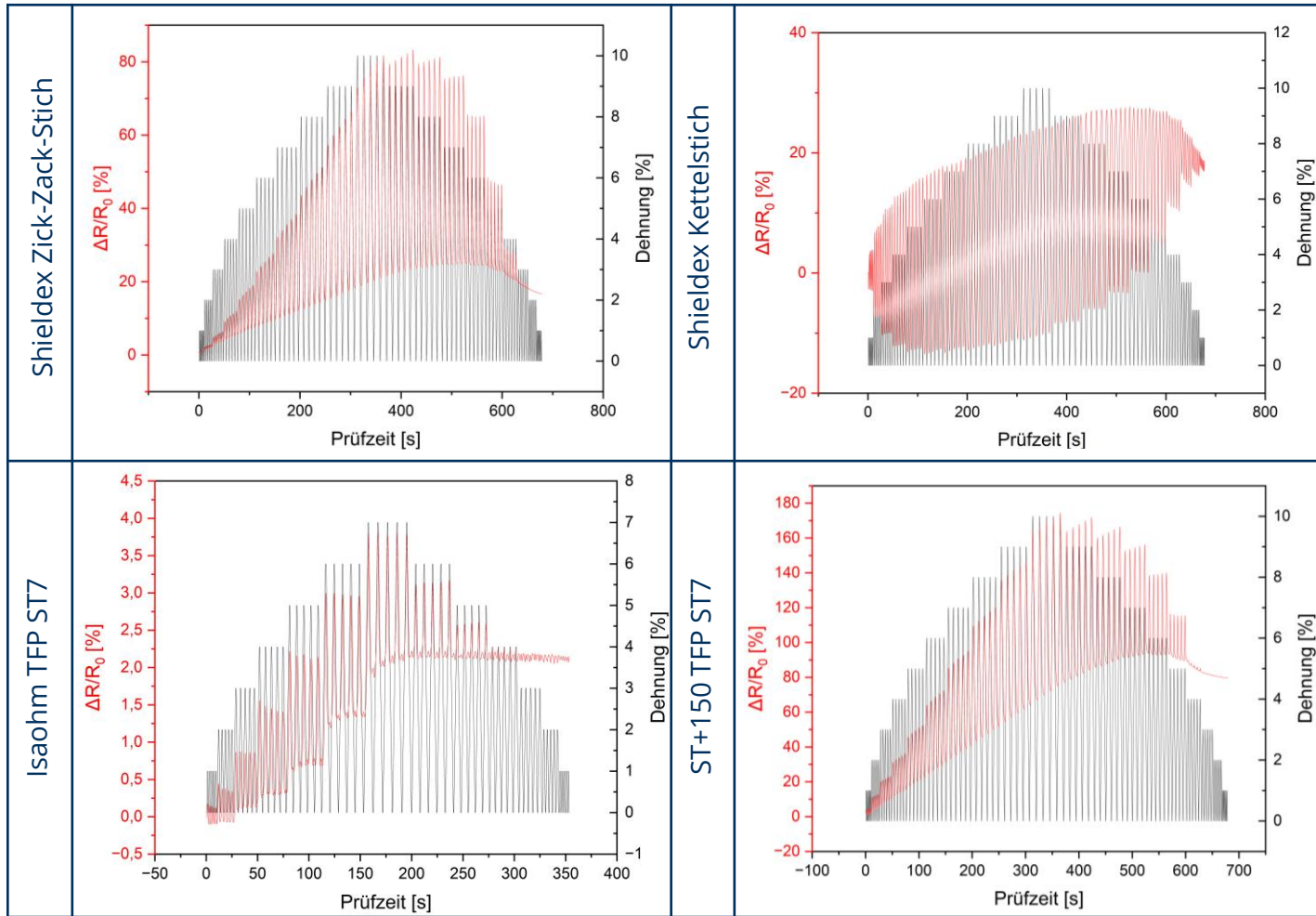


TFP



# 4. Ergebnisse

## Layout- und Bindungsentwicklung



### Elektrische Isolierung:

- Verschiedene Transferfolien
- PVC-Beschichtung

Transferfolie



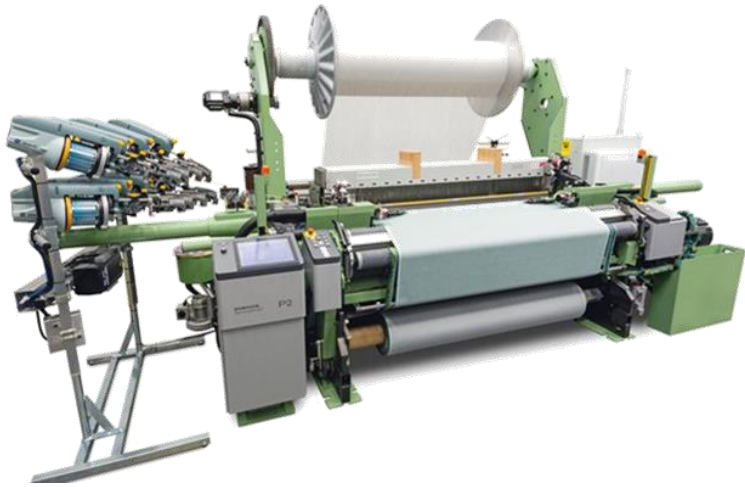
PVC-Beschichtung





# 4. Ergebnisse

## Webprozess



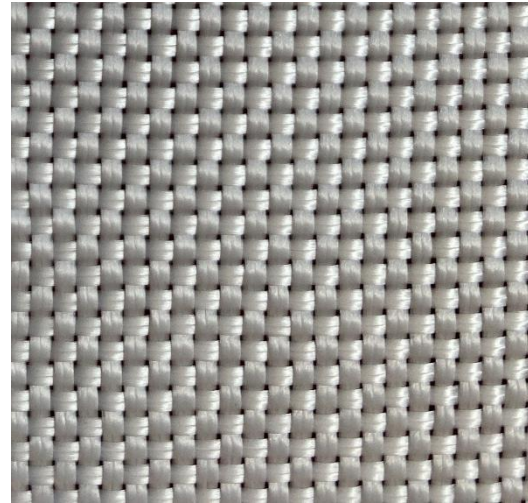
### Dornier P1 Greiferwebmaschine:

Schaftbelegung:

Schäfte 1-8: Grundkette PES

Schäfte 9-10: Fangleiste

Schäfte 11-14: Sensorik



### Gewebeparameter:

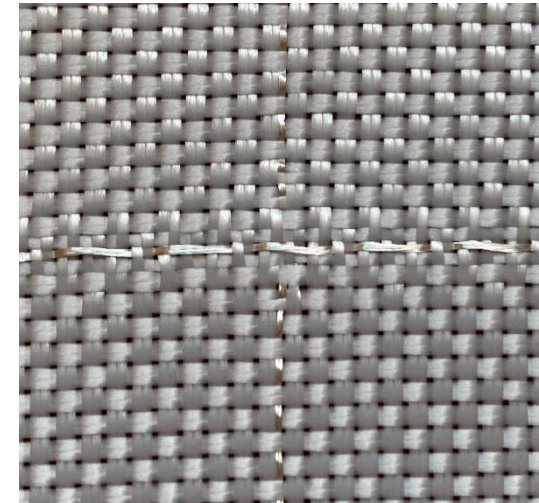
Gewebebreite: 900 mm

Material: PES 1100 dtex

Bindung: Panama

Kettdichte: 12 Fd / cm

Schussdichte: 12 Fd / cm



### Ziele:

- Präzise Einbindung der Sensorfäden / Trassierung
- Reproduzierbarkeit
- Leitende und nicht leitende Kreuzungspunkte

# 4. Ergebnisse

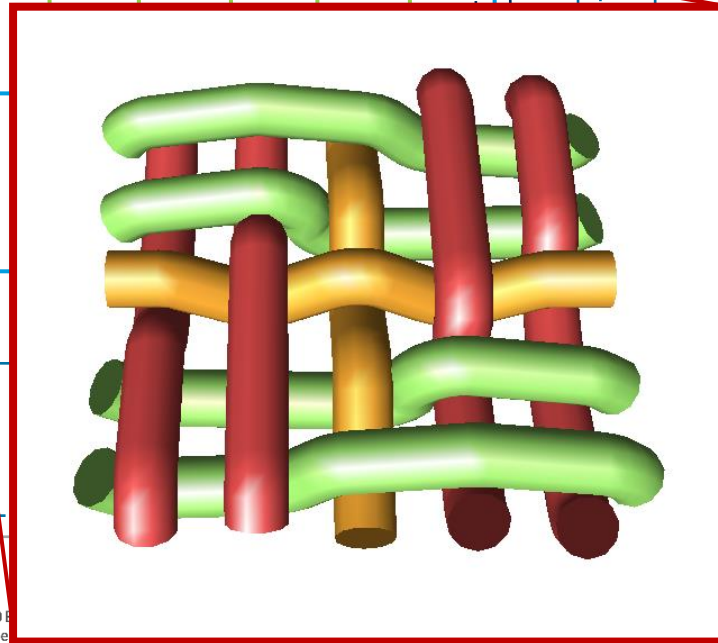
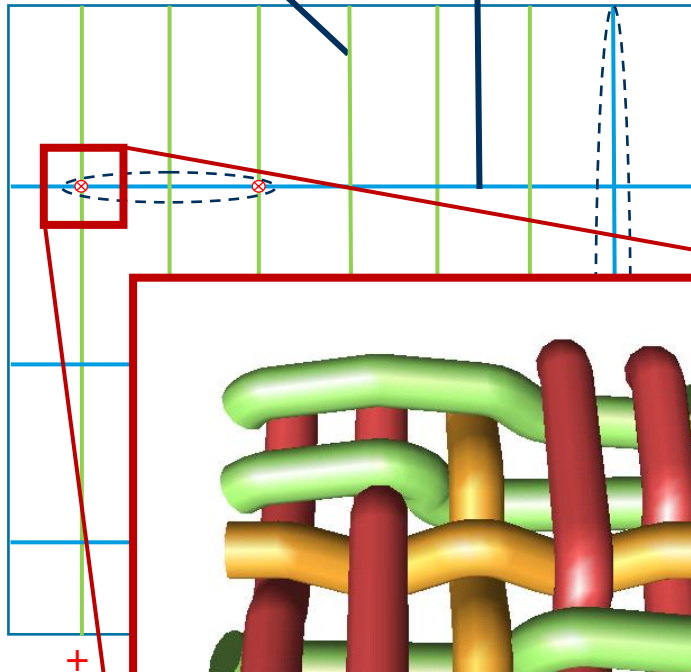
## Webprozess

### Webkonzept 1:

⊗ Kontaktpunkt Trassierung-Sensor

Trassierungen

Sensoren

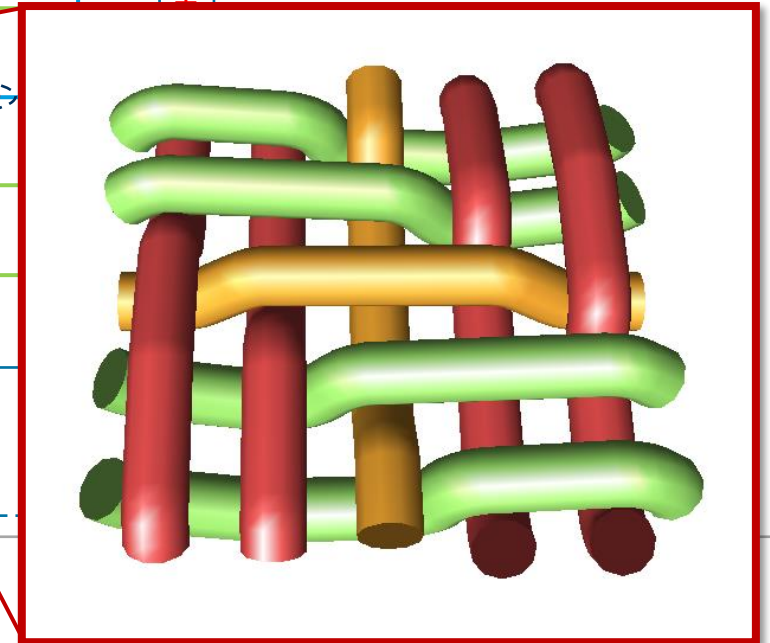
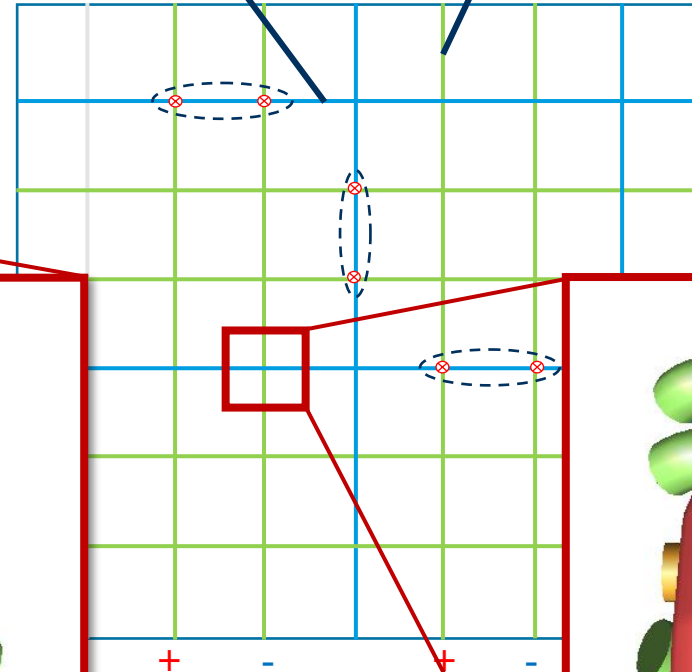


### Webkonzept 2:

⊗ Kontaktpunkt Trassierung-Sensor

Trassierungen

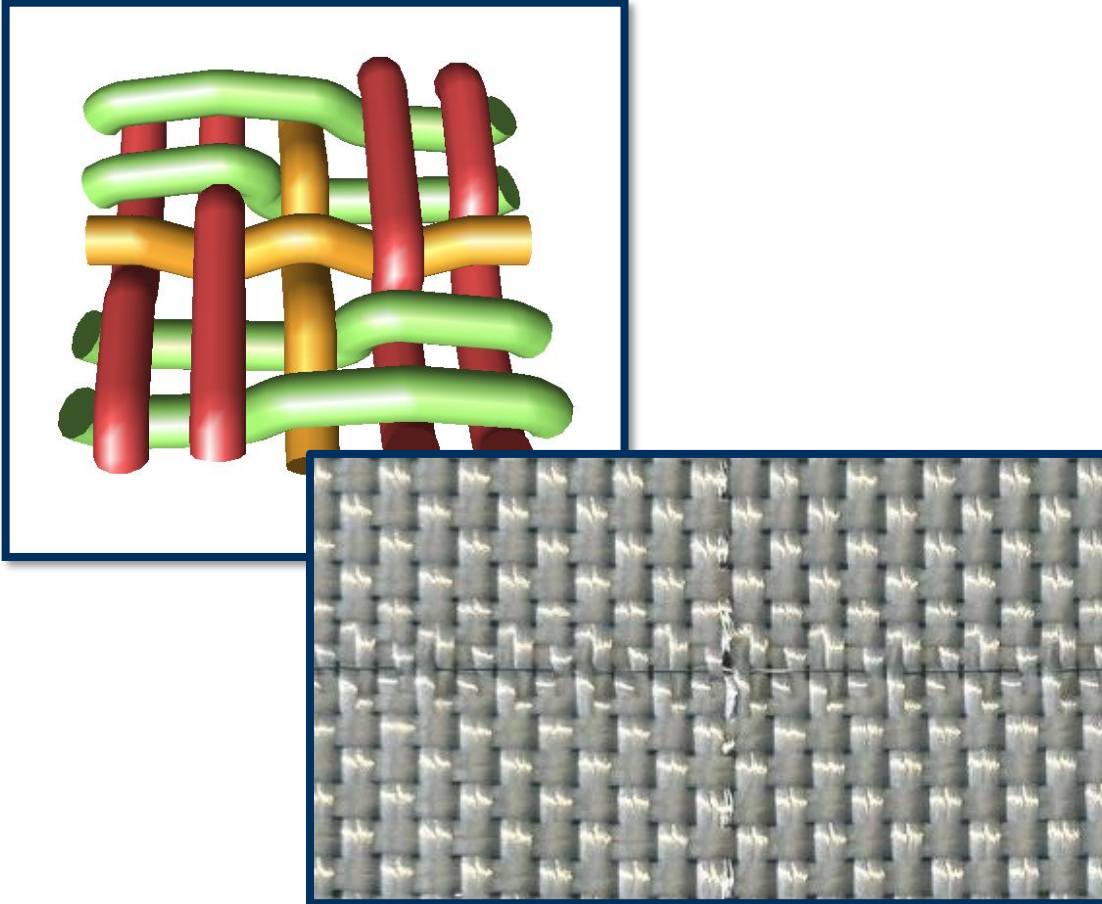
Sensoren



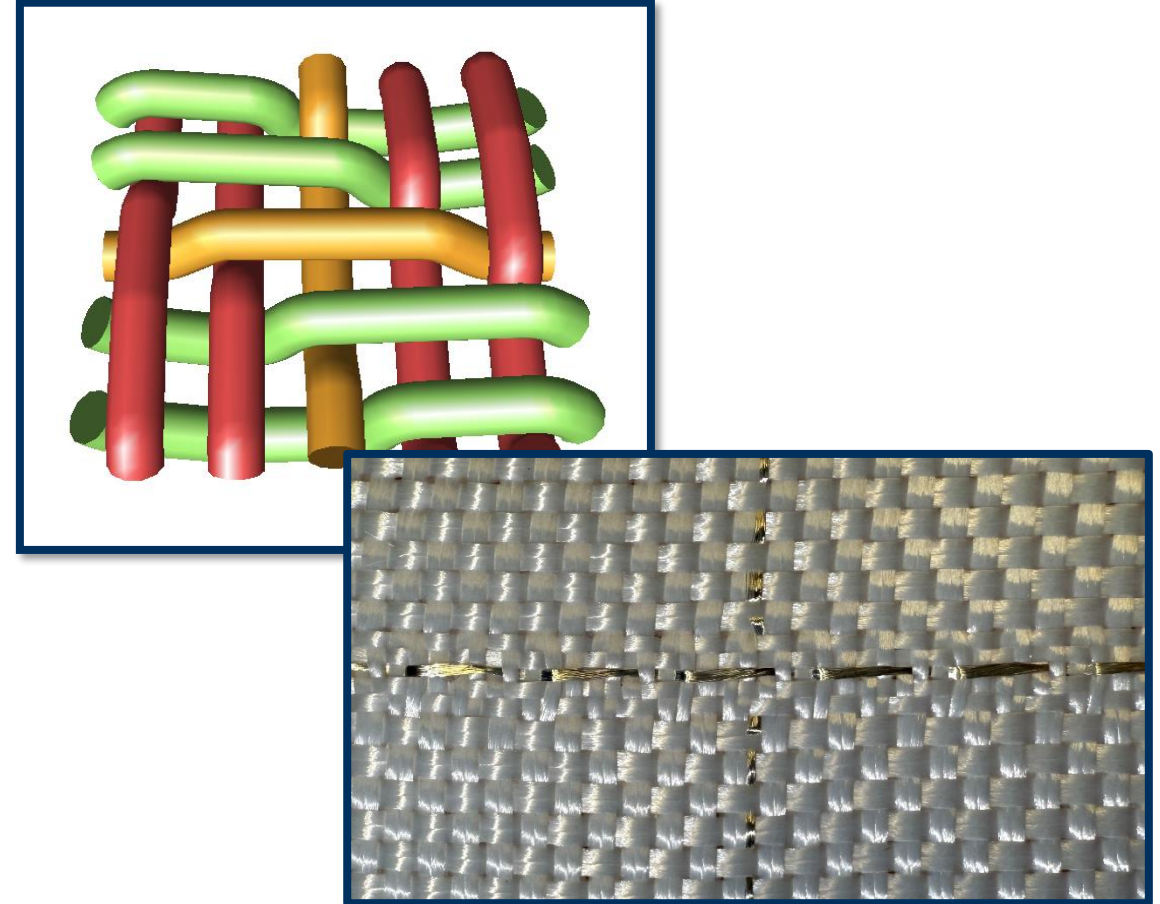
## 4. Ergebnisse

### Webprozess – Kontaktierung

Kontakt zwischen Sensor und Trassierung:



Kein Kontakt zwischen Sensor und Trassierung:

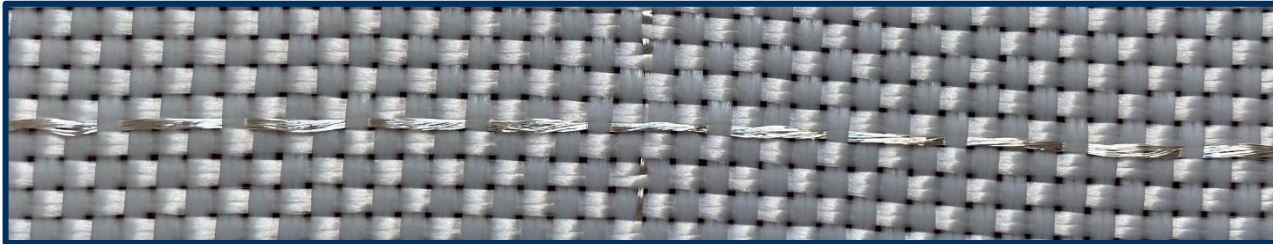




# 4. Ergebnisse

## Webprozess

Einbindung der Sensorfadens / der Trassierung in Schussrichtung:



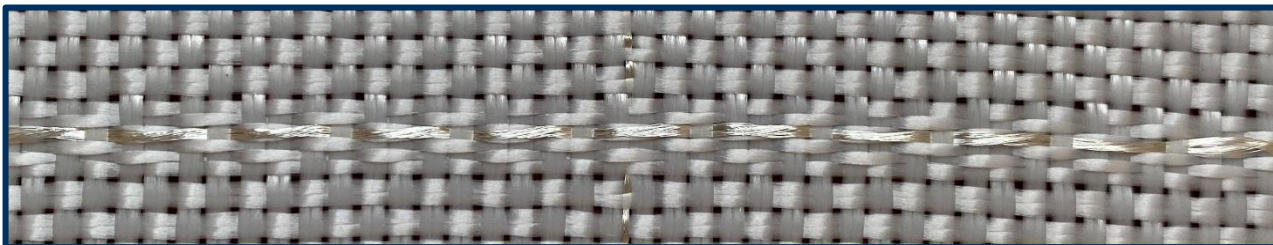
Variante 1

Panamabindung  
Bewertung: 0



Variante 2

Leinwandbindung  
Bewertung: +



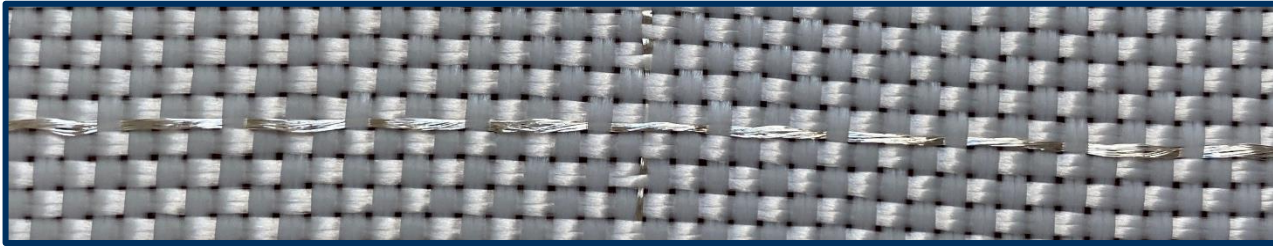
Variante 3

Längsripsbindung  
Bewertung: -

# 4. Ergebnisse

## Webprozess

Einbindung der Sensorfadens / der Trassierung in Schussrichtung:



Variante 1

Panamabindung  
Bewertung: 0



Variante 2

Leinwandbindung  
Bewertung: +



Variante 3

Längsripsbindung  
Bewertung: -



## 4. Ergebnisse

### Beschichtung



Aushärten des Epoxid-Silberleitklebers



Sensormäander mit Epoxid-Silberleitkleber



Linecoater am ITM



Linecoater am ITM, Aufwickelstrecke



Fehlerstellen beschichtetes Gewebe



# 4. Ergebnisse

## Kontaktierung

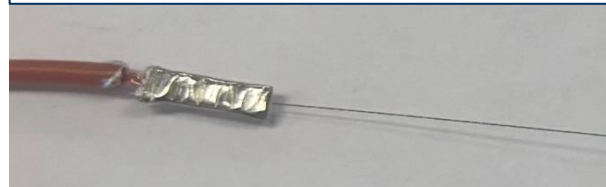
### Kontaktierungslösungen:

- Weichlöten → keine stoffschlüssige Verbindung für Isaohm®
- Leitkleber mit Rußfüllung → starke Widerstandsschwankungen über die Prüfzeit
- 2K-Epoxid-Silberleitkleber mit Aderendhülse → geringe Widerstandsschwankungen über Prüfdauer

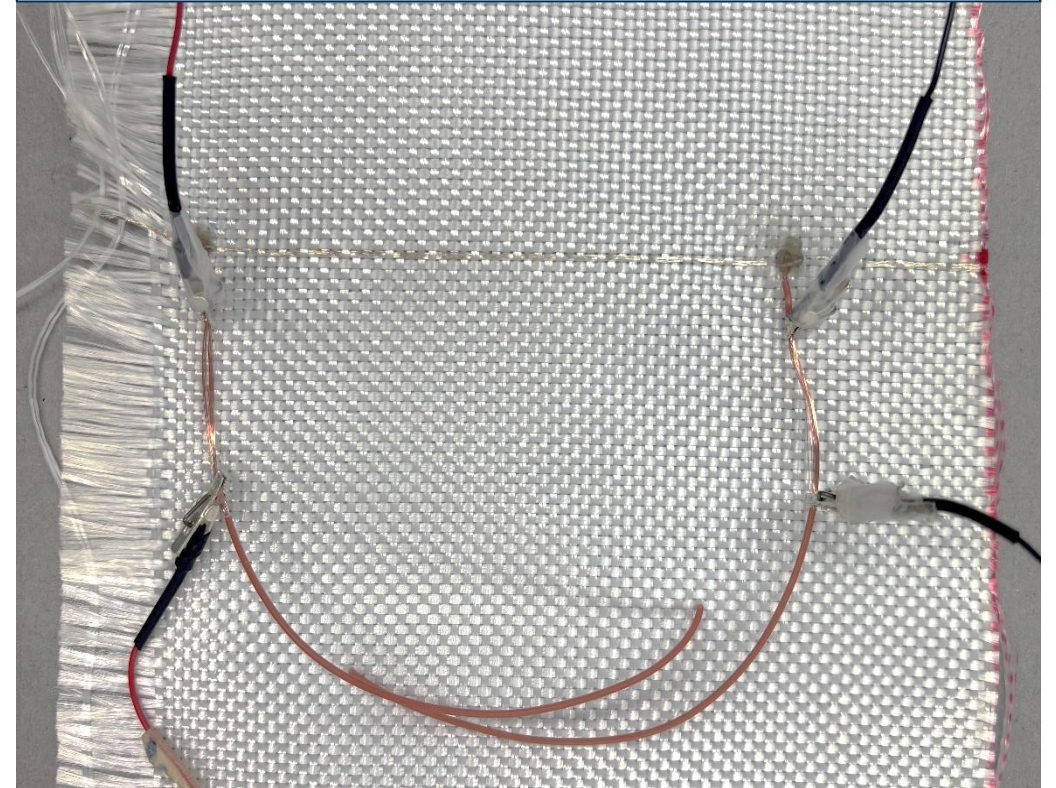
Litzwire+Silberleitkleber gecrimpt



Isaohm+Silberleitkleber gecrimpt



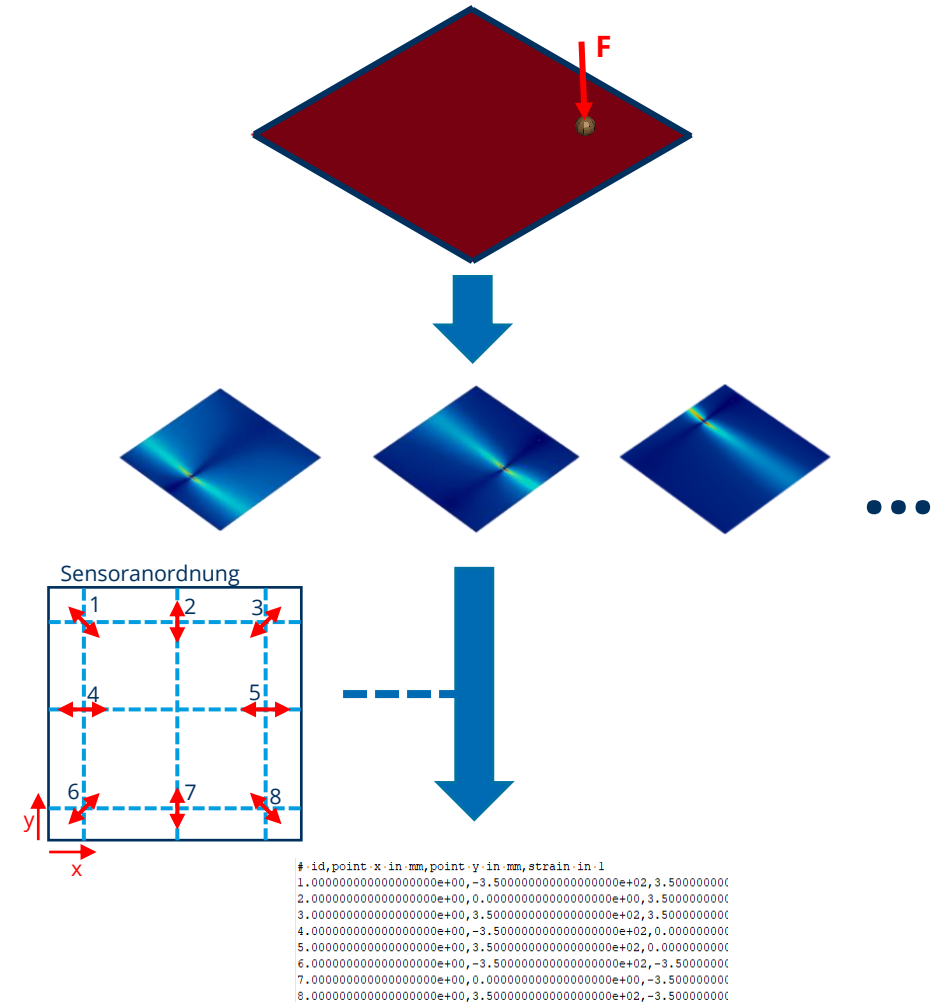
Litzwire eingewebt + UV-Leitkleber



# 4. Ergebnisse

## FEM-Basierte Analyse von Membranstrukturen

- Simulation von Spannungs- & Dehnungszuständen sensorintegrierter Membranstrukturen  
→ **Ziel: Generierung von Trainingsdaten für KI Modell**
- Kalibrierung des Materialmodells auf Grundlage von Herstellerdaten und Materialdatenbank  
→ **Validierung anhand Zug- und Biaxialzugversuche der hergestellten Membrane steht noch aus**
- Setup für Trainingsdatenerzeugung:
  - Abmessungen Membran: 800 x 800 mm<sup>2</sup>
  - Fixierung an Rändern
  - Senkrechte Belastung (50 N) mit Kugel (ø 15 mm)
- Durchführung von **1000 Simulationen** mit Gleichverteilung der Kugelposition auf Membran
- Auswertung der Dehnung an festgelegten Sensorpunkten in Sensorrichtung

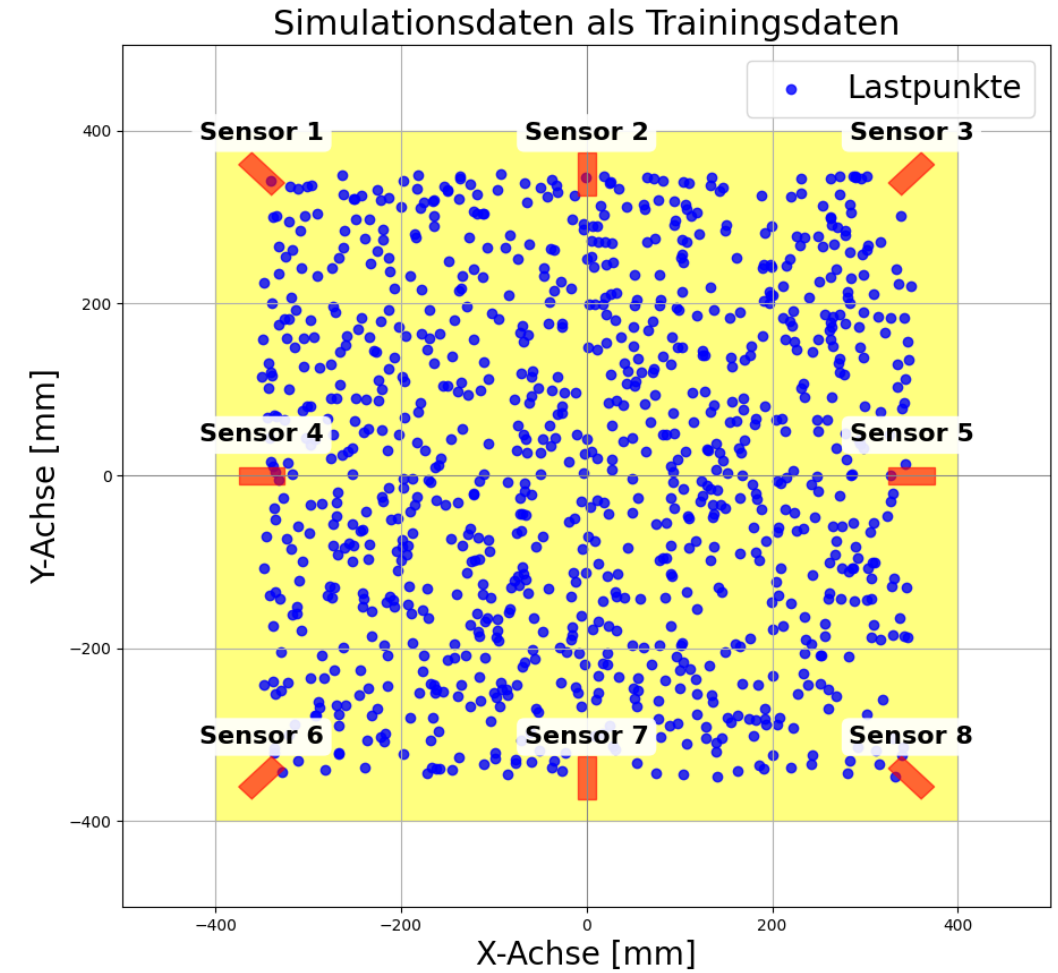
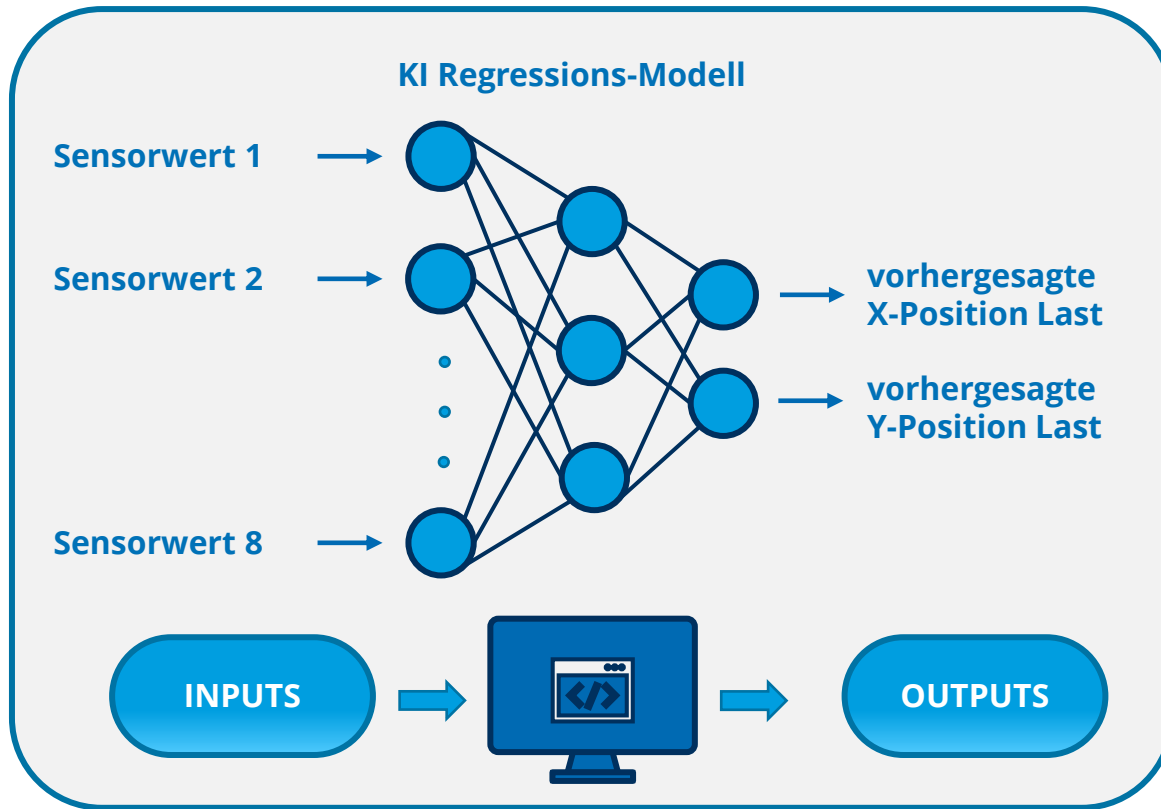




# 4. Ergebnisse

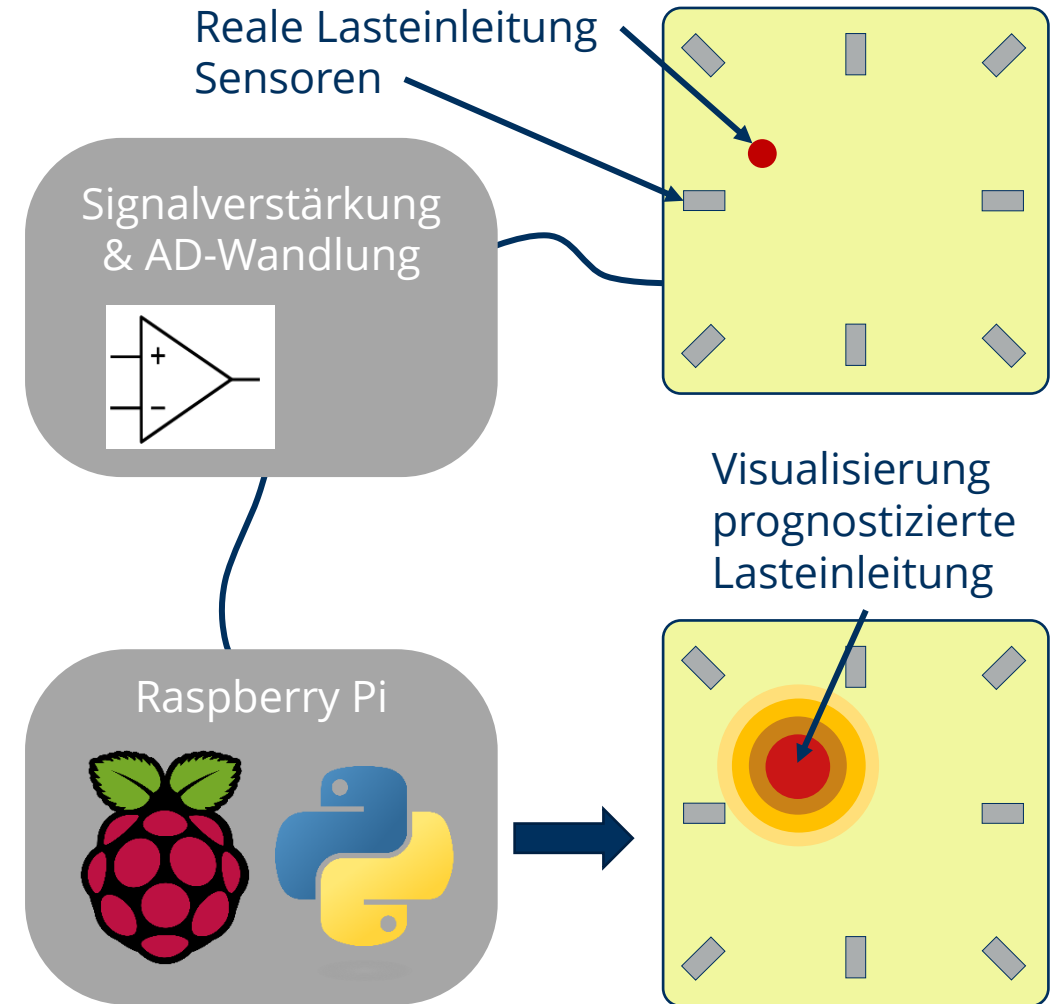
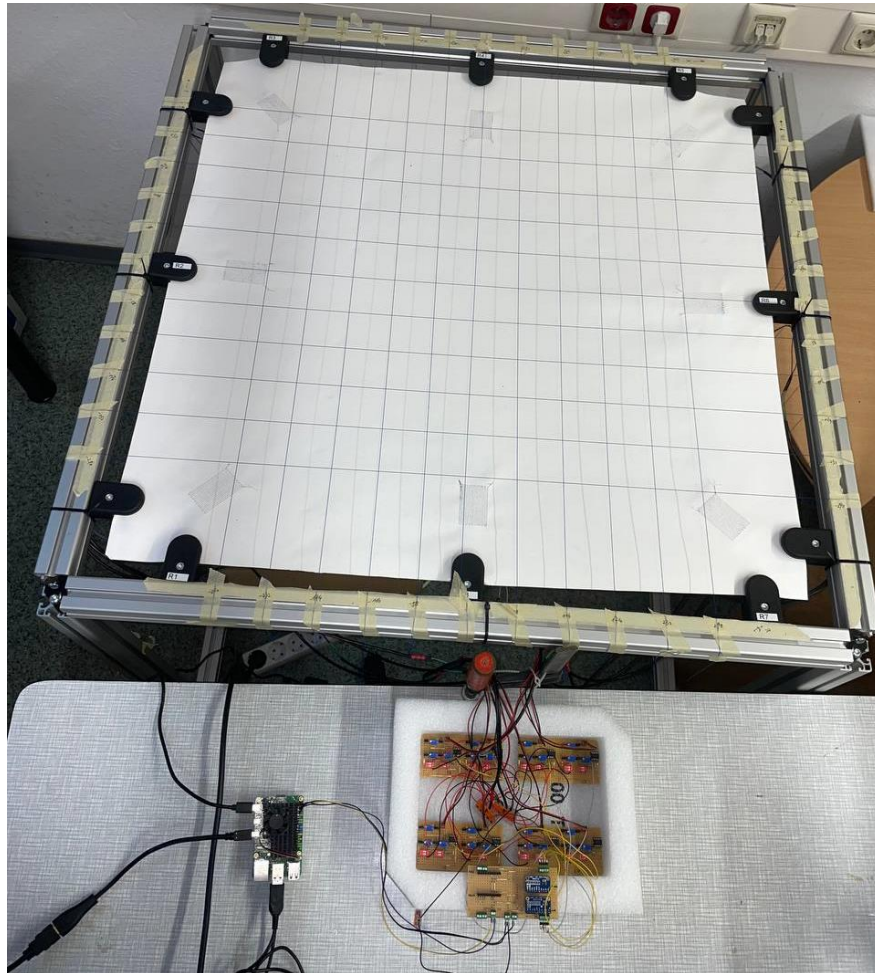
## Entwicklung echtzeitfähiger Algorithmen

- Ermittlung von Lasteinleitungspunkten über gesamter Membranfläche durch Input diskreter Anzahl an Sensorwerten
- Umsetzung über Regressives KI Modell



# 4. Ergebnisse

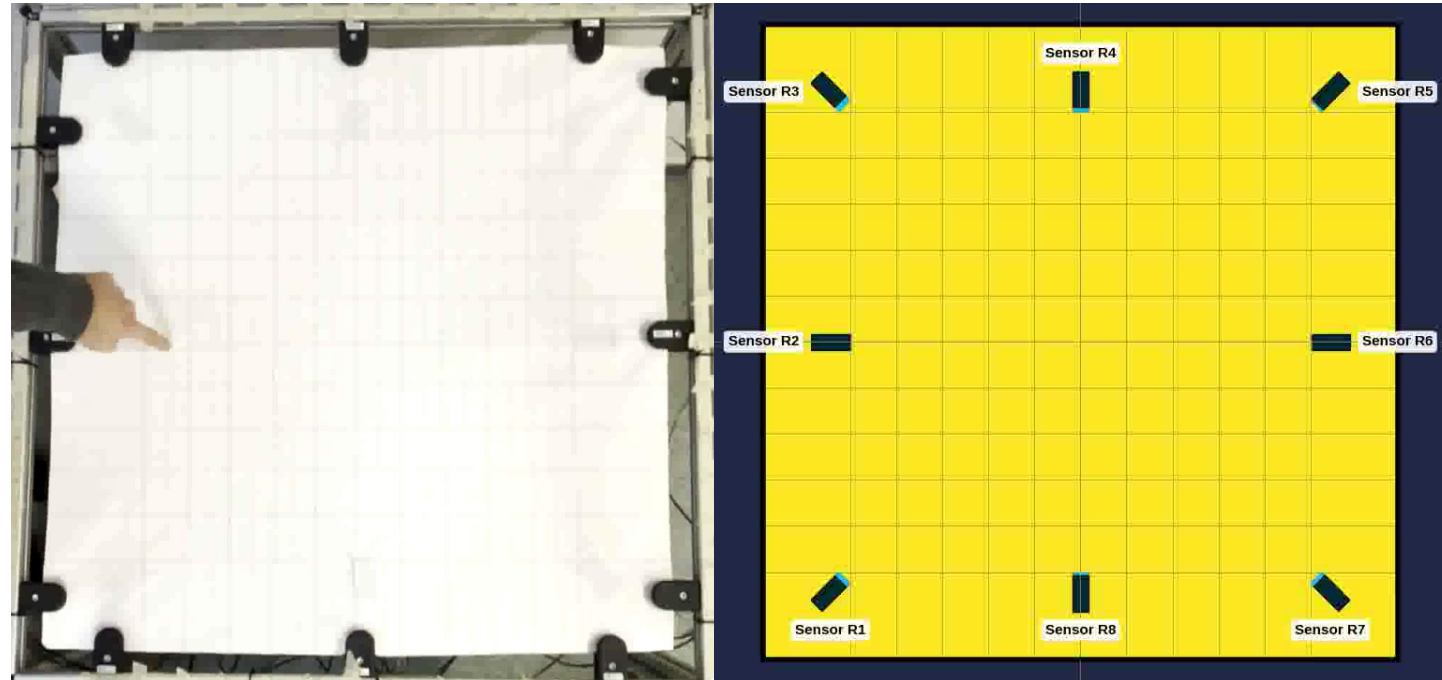
## Funktionsdemonstrator



## 4. Ergebnisse

### Stand Funktionsdemonstrator

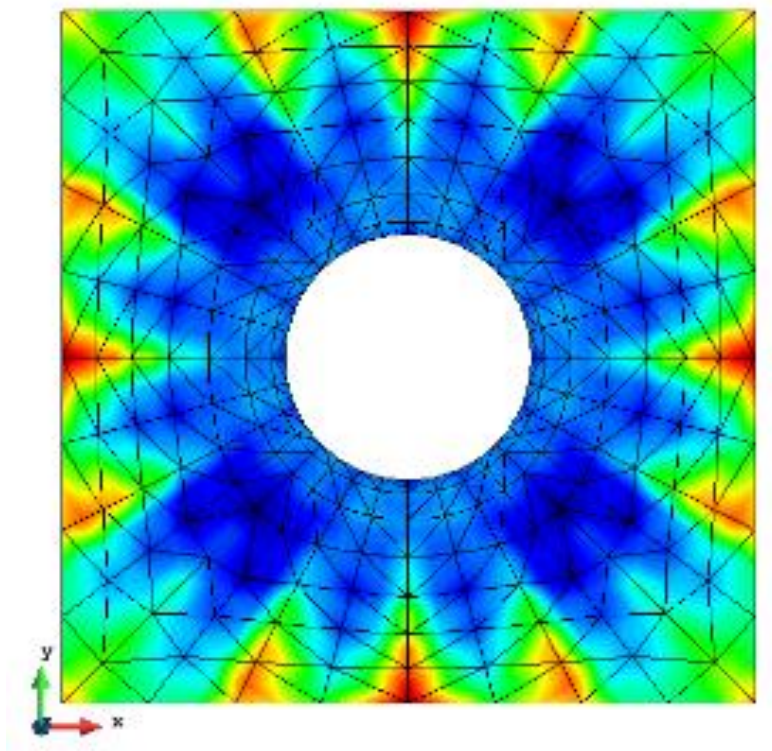
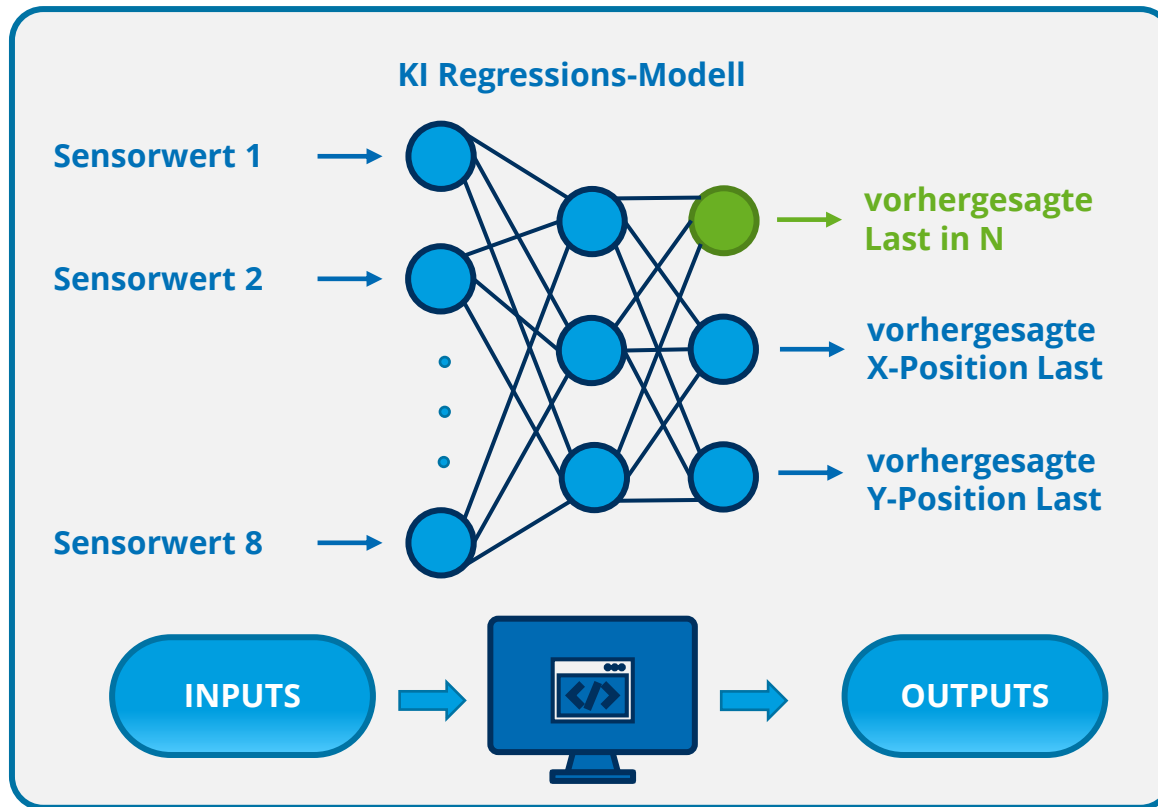
- **Trainingsdatenerfassung:**  
Aufnahme aller 8 Sensorwerte für jedes definierte Lastszenario zur Erstellung eines umfassenden Datensatzes
- **Messraster:**  
11x11-Gittereinteilung der Membran zur präzisen Definition der Lastpositionen
- **Modellgenauigkeit:**  
mittlere absolute Vorhersageabweichung:  
 $\Delta x = \pm 11.58 \text{ mm}$ ,  $\Delta y = \pm 17.02 \text{ mm}$



## 4. Ergebnisse

### Entwicklung echtzeitfähiger Algorithmen - Ausblick

- Implementierung Lasterkennung (nicht Position)
- Rückschluss auf vollflächigen Spannungszustand der Membran aus Position und Betrag der aufgetragenen Last



# 5. Weitere Vorgehensweise

---

## **Elektromechanische Kontaktierungslösungen:**

- Induktionslötversuche

## **Charakterisierung der Membran mit integrierten Sensornetzwerken:**

- Statische Widerstandsmessung Proben mit und ohne Epoxid-Silberleitkleber zur Bestimmung des Übergangswiderstands an den Kontaktpunkten
- Uniaxiale zyklische Zugversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 1421
- Mit eingebrachter Strukturschädigung in Anlehnung DIN EN 1875-3
- Biaxiale Zugversuche in Anlehnung an DIN EN 17117-1 für Membran mit und ohne Sensorik

## **Entwicklung echtzeitfähiger Algorithmen:**

- Erweiterung des KI-Modells zur Ermittlung des vollflächigen Spannungszustandes



## 6. Diskussionsbedarf

---

- Langzeitversuche bis  $10^4$  Zyklen sind am ITM schwer durchführbar; evtl. eine entsprechende Prüfmaschine bei Projektpartnern vorhanden, die genutzt werden kann?
- Abstimmung Funktionsdemonstrator
  - Welche Struktur?
  - Am ITM ist keine Herstellung großer Membranflächen möglich, insbesondere hinsichtlich einer homogenen Beschichtung  
→ Weben und Beschichten für Funktionsdemonstrator bei Projektpartnern?

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!