



Universität Stuttgart

# AK-Studie: Faserverstärkte Armierungen

## AK-Sitzung am 29.10.2024

Nikola Nežić, M.Sc.

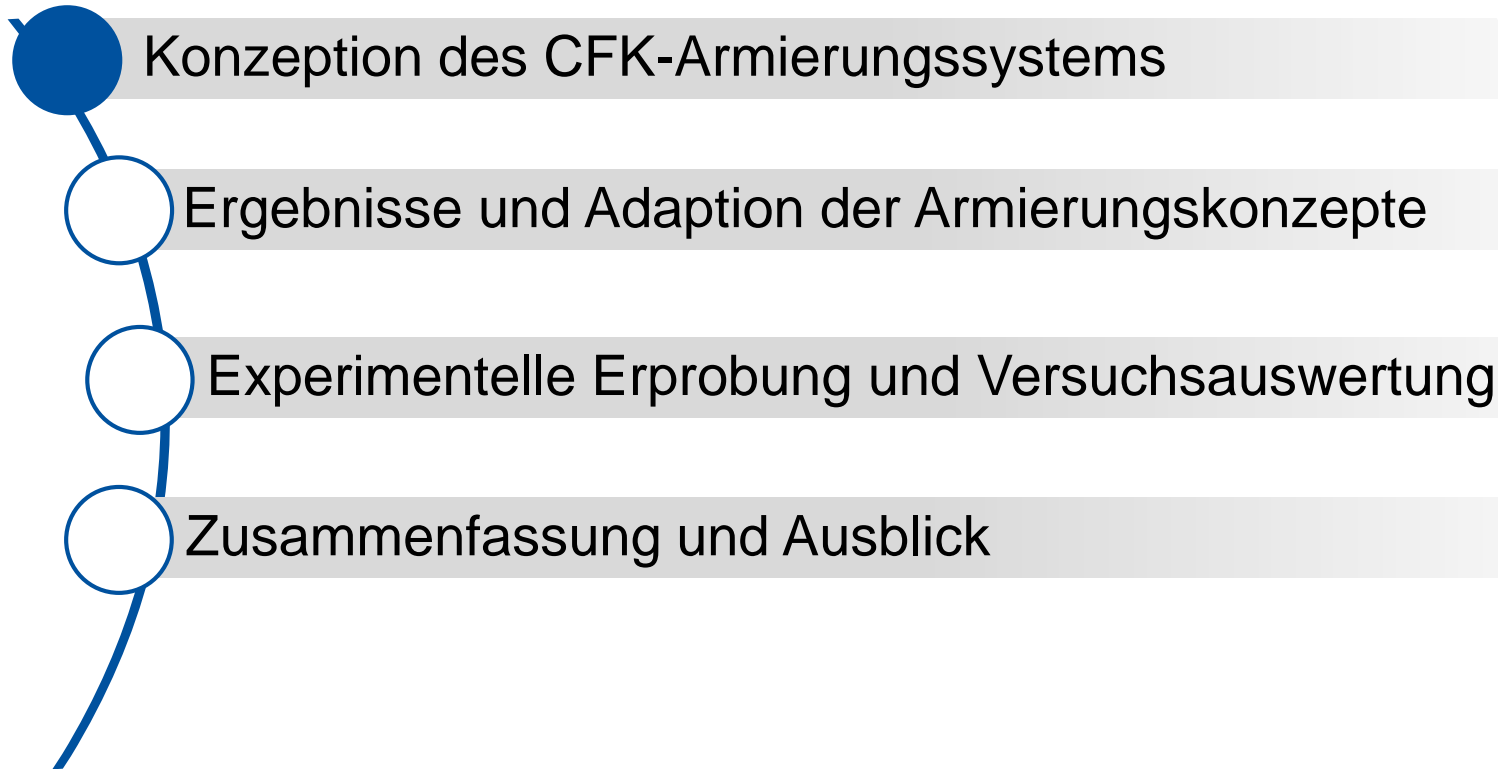


**Auslegung eines CFK-Armierungsringes**

Institut für Umformtechnik

**IFU**

# Agenda



# Konzeption des CFK-Armierungssystems

## Konzepte zur Aufbringung einer Vorspannung

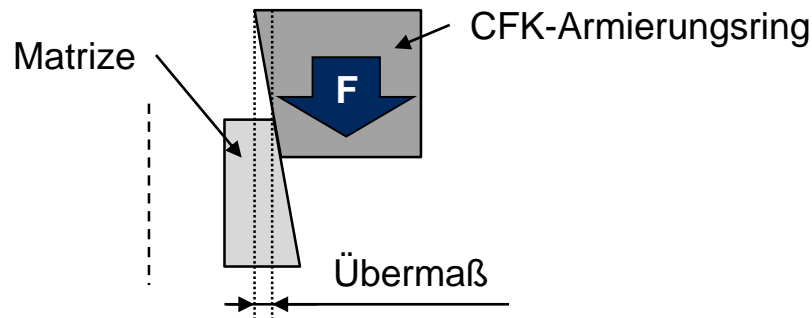
### Wickeln auf Dorn und anschließendes Fügen

- Vorspannung durch konstruktiv vorgesehenes Übermaß und anschließendes thermisches oder mechanisches Fügen



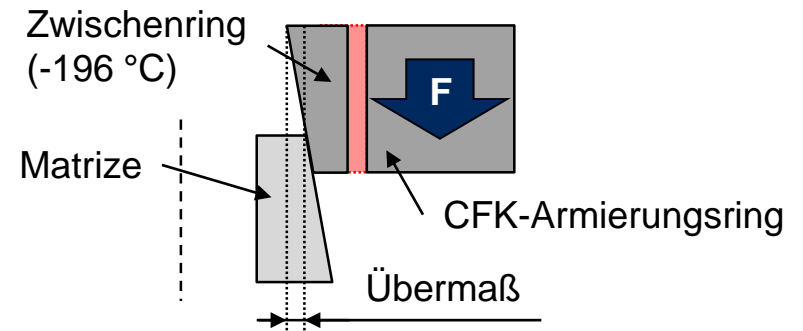
Quelle: Sieber

#### Mechanisches Fügen (Konzept 1)



- Kegelige Innenkontur des CFK-Rings  
→ Höhere Ansprüche an die Wickeltechnik
- Evtl. Schädigung der Fasern durch Einpressen

#### Thermisches Fügen (Konzept 2)

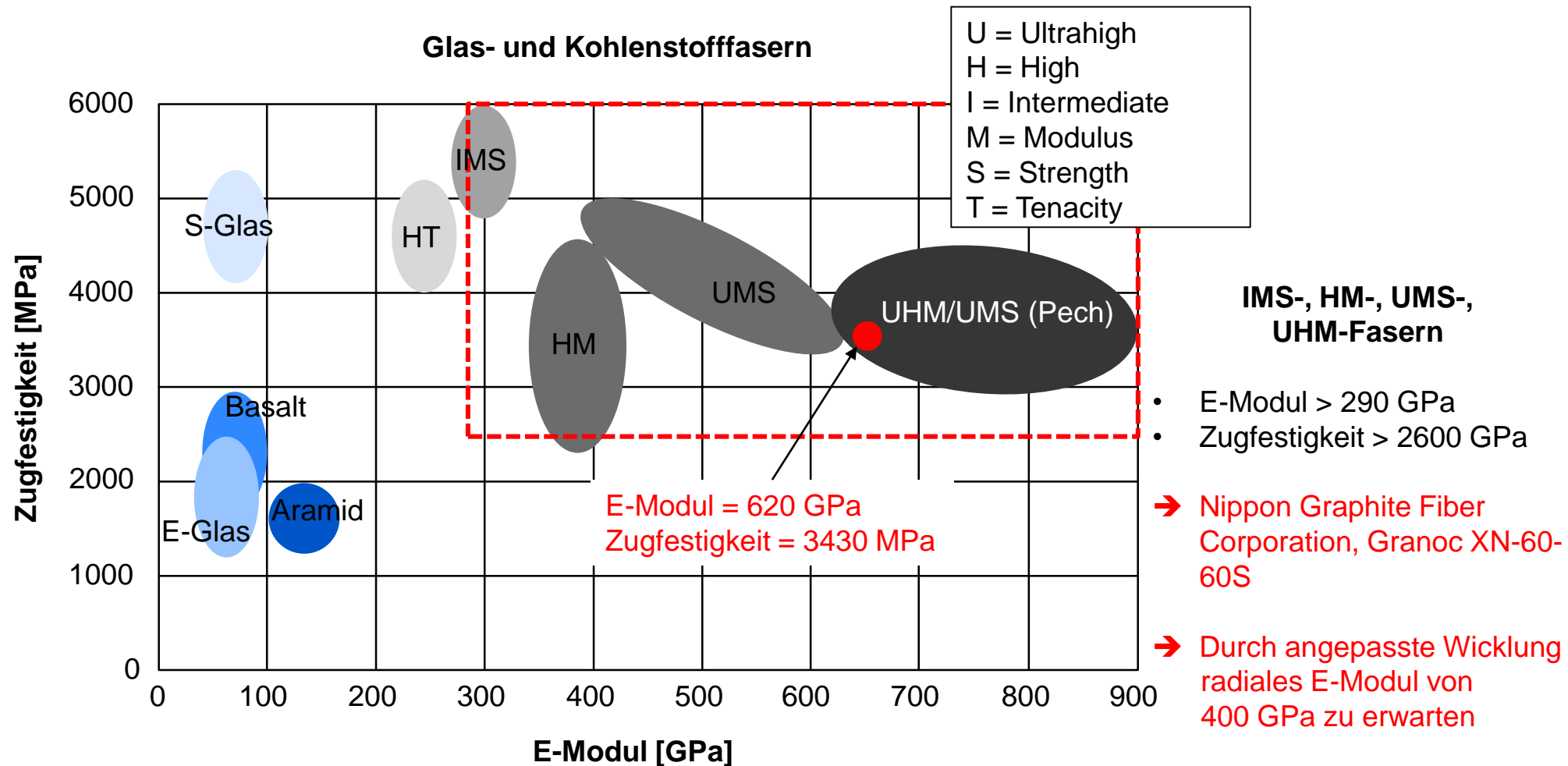


- Zwischenring notwendig  
→ Kostenintensive Herstellung
- Zylindrische Innenkontur des CFK-Rings

→ Beide Konzepte werden am IFU verfolgt

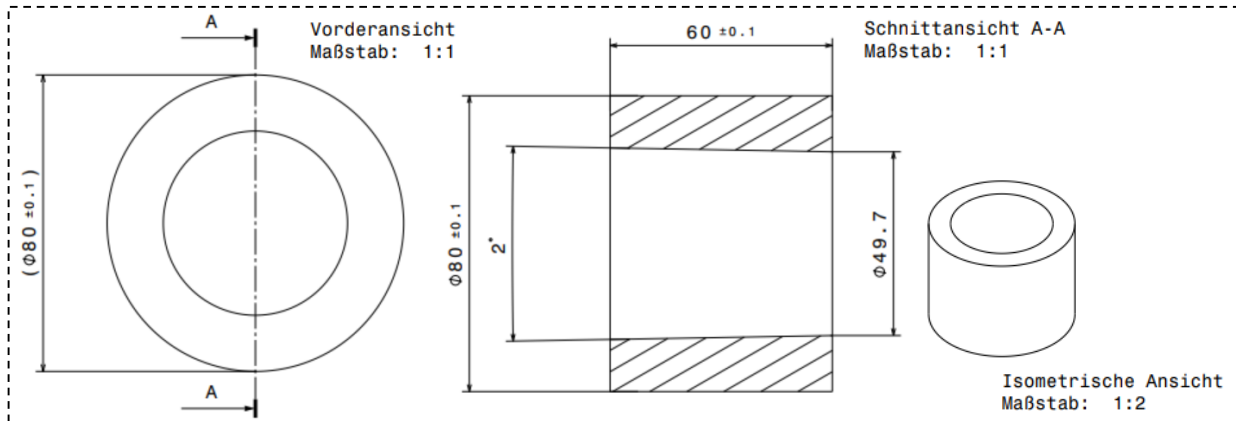
# Konzeption des CFK-Armierungssystems

## Wahl der zum Einsatz kommenden Armierungsfaser

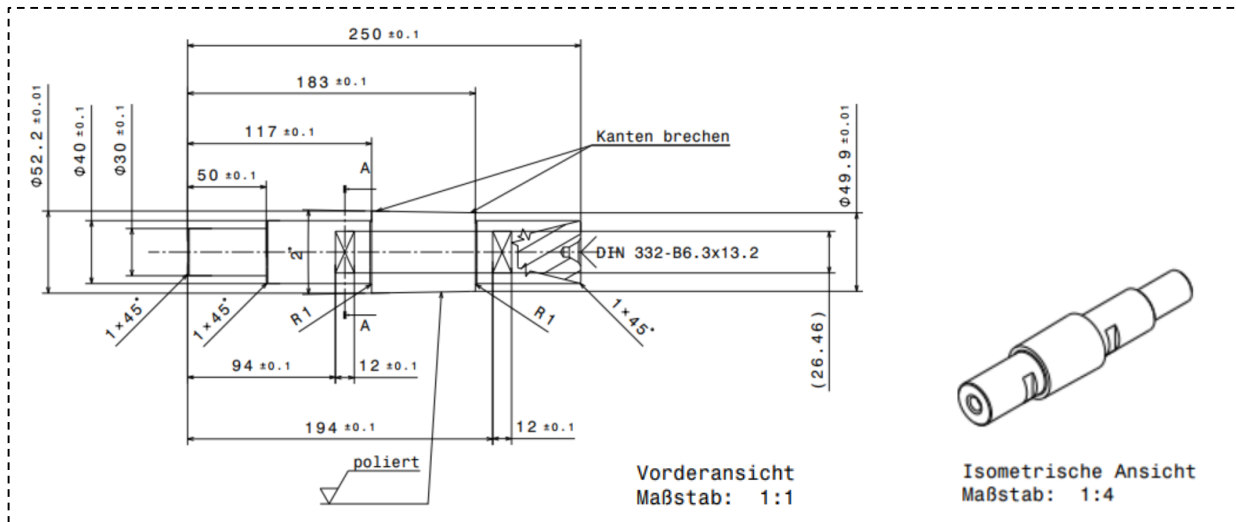


# Ergebnisse Konzept 1 (kegeliger Armierungsring)

## Technische Zeichnung des CFK-Armierungsrings

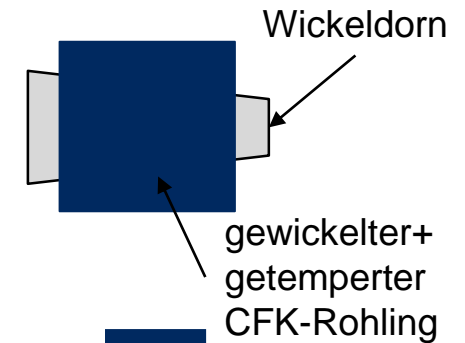


## Technische Zeichnung des kegeligen Wickeldorns



## Herstellung

- Herstellung des CFK-Armierungsrings durch das **Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart**



Ein Wickelvorgang auf Dorn ergibt einzelnen Armierungsring

### Anfallende Kosten:

- CFK-Armierungsring = ~250 €  
➔ Einsatz von imprägnierten Hochmodulfasern nach dem Verfahren der Universität Stuttgart (Innfa GmbH)



# Ergebnisse Konzept 1 (kegeliger Armierungsring)

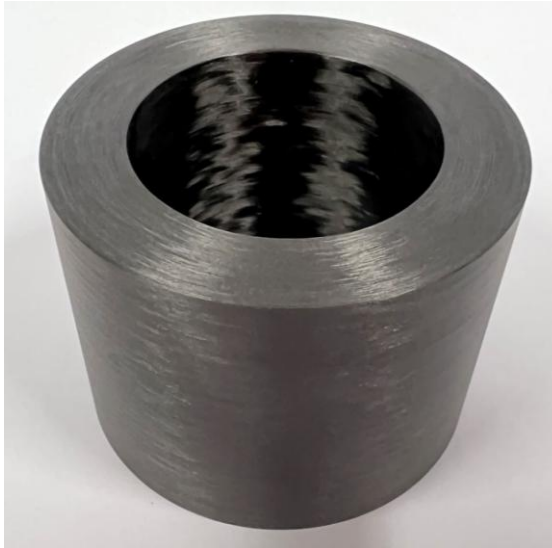
## Wickeln des CFK-Armierungsringes mit kegelförmiger Innenkontur

- Vorbereiten und Eintrennen des Wickelkerns und der Faserfixierung
- Wickeln der CFK-Armierung mit vorimprägnierten hochmoduligen Kohlefasern (Tenax) nach dem TPrep Verfahren
- Thermische Nachbehandlung (Härten bei 60 °C für 12 h und Tempern bei 110 °C für 12 h) sowie spanende Nachbearbeitung

## Wickeldorn mit Faserfixierung



## Gewickelter CFK-Armierungsring



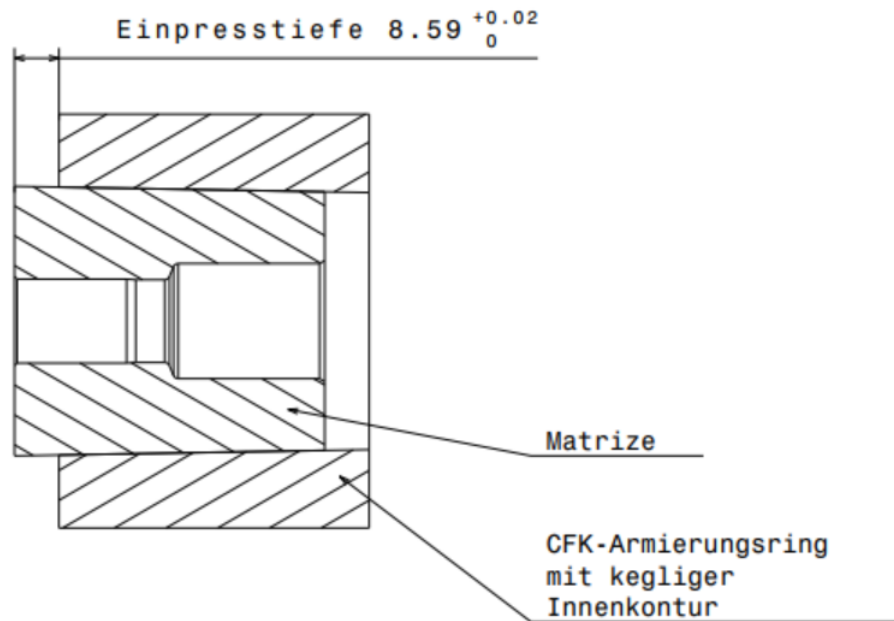
## Wickeln der Armierung



# Ergebnisse Konzept 1 (kegeliger Armierungsring)

## Mechanisches Fügen von Matrize und dem CFK-Verbund

- Konstruktiv vorgesehenes **Übermaß** der einzupressenden Matrize von **0,3 mm** (auf den Durchmesser bezogen)
- Resultierende **Einpresstiefe** von **8.59 mm**



→ Versagen des CFK-Armierungsrings durch Rissbildung über die gesamte Wanddicke

## Einpressen der Matrize

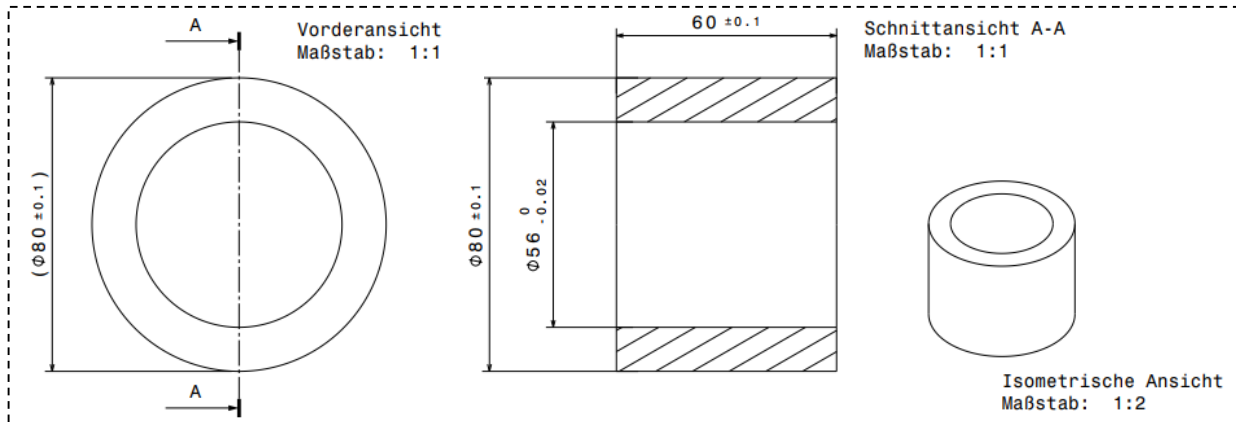


## CFK-Verbund nach Fügen

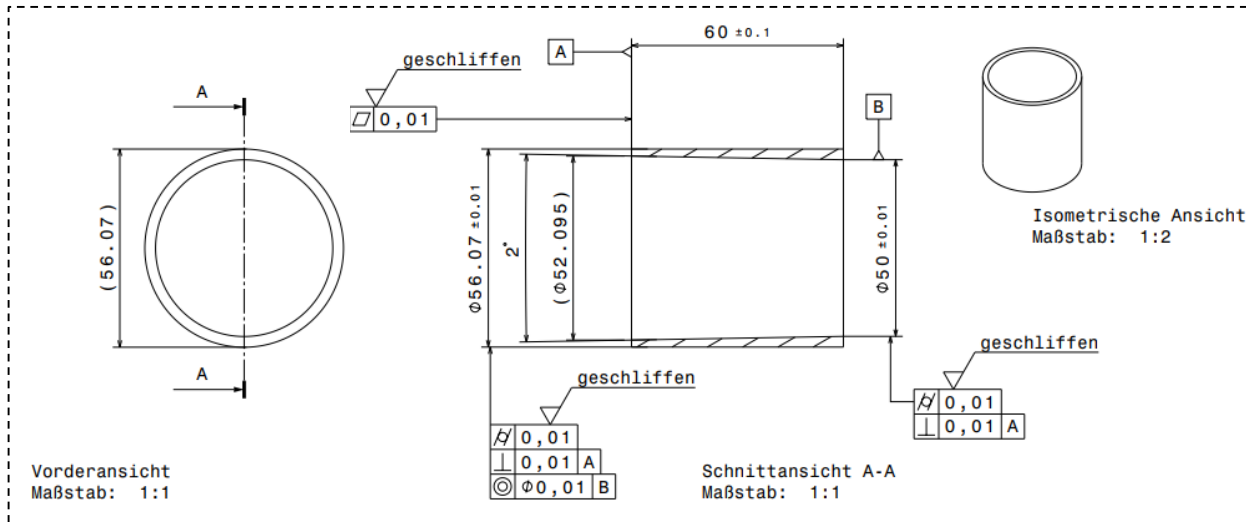


# Ergebnisse Konzept 2 (thermisch gefügter Armierungsring)

## Technische Zeichnung des CFK-Armierungsringes

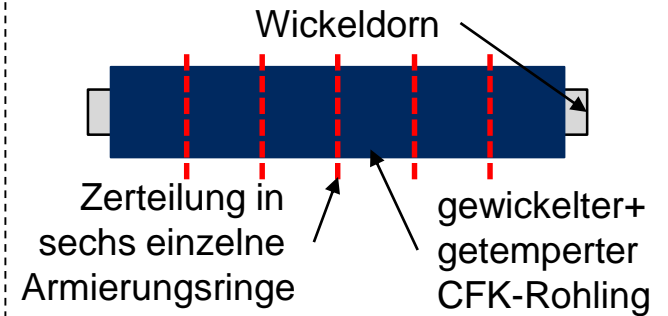


## Technische Zeichnung des Zwischenrings aus 1.2343



## Herstellung

- Herstellung des CFK-Armierungsringes durch die **Crosslink-Murtfeldt Composites GmbH & Co. KG**



Ein Wickelvorgang auf Dorn ergibt sechs Armierungsringe

### Anfallende Kosten:

- Wickeldorn = einmalig 483 €
  - CFK-Armierungsring = 96 €
- (Eine Charge = 6 Stk. entsprechen folglich 576 €)



# Ergebnisse Konzept 2 (thermisch gefügter Armierungsring)

## Einschrumpfen des Zwischenrings

- Konstruktiv vorgesehenes **Übermaß** des einzupressenden Zwischenrings von **0,07 mm**
- Abkühlen des Zwischenrings durch flüssigen Stickstoff (-196 °C)
- Anschließendes Fügen (unterstützt durch Handpresse)

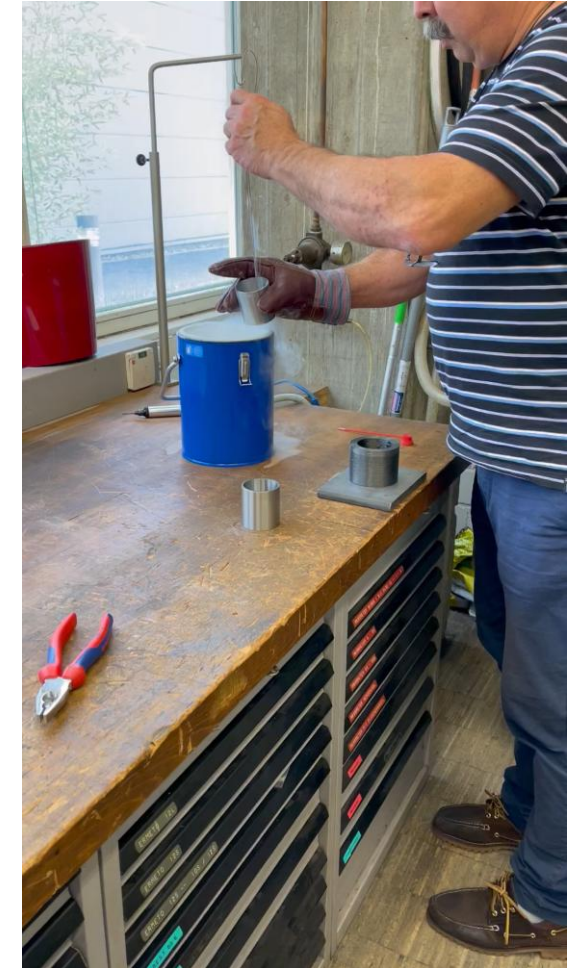
## Gewickelter CFK-Armierungsring



## Gefügter CFK-Verbund



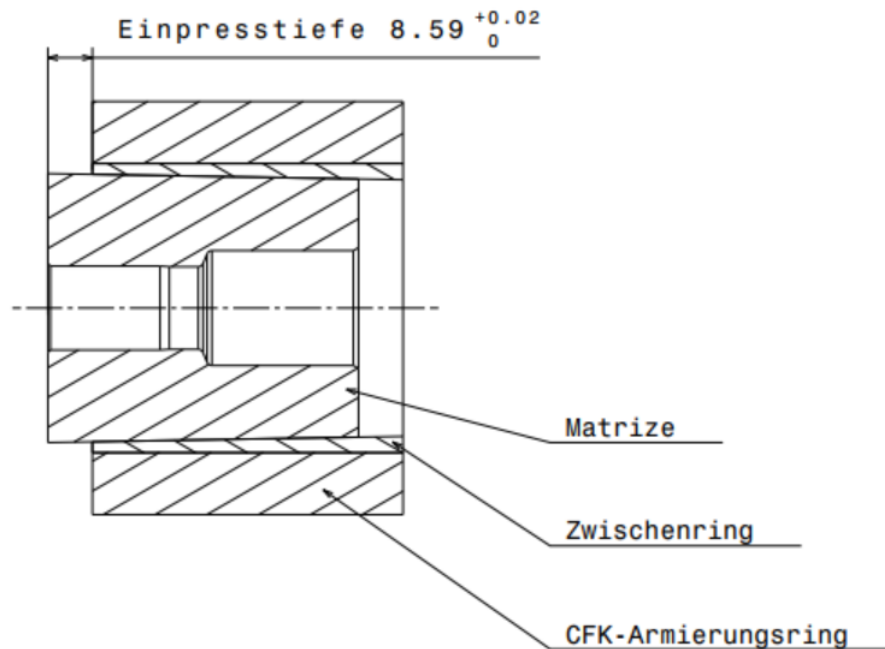
## Einschrumpfen



# Ergebnisse Konzept 2 (thermisch gefügter Armierungsring)

## Mechanisches Fügen von Matrize und dem CFK-Verbund

- Konstruktiv vorgesehenes **Übermaß** der einzupressenden Matrize von **0,3 mm** (auf den Durchmesser bezogen)
- Resultierende **Einpresstiefe** von **8.59 mm**



→ Versagen des CFK-Armierungsrings durch Rissbildung über die gesamte Wanddicke

## Einpressen der Matrize

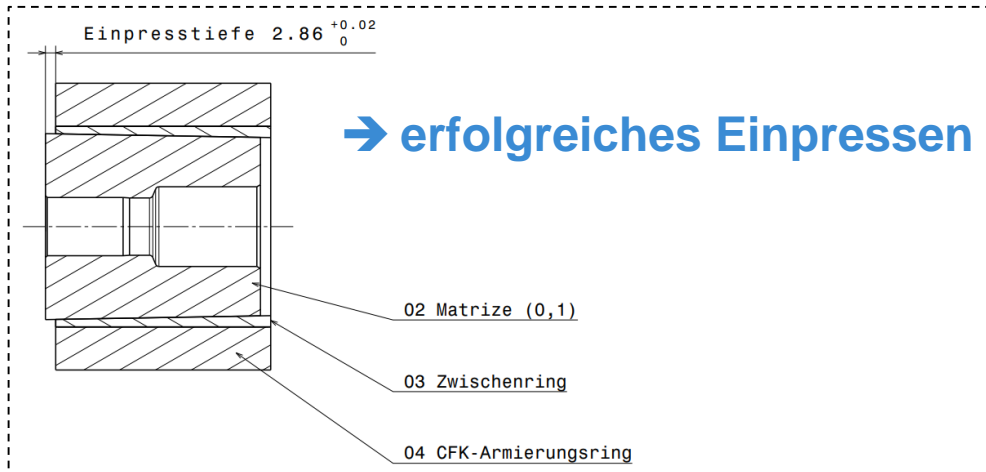


## CFK-Verbund nach Fügen

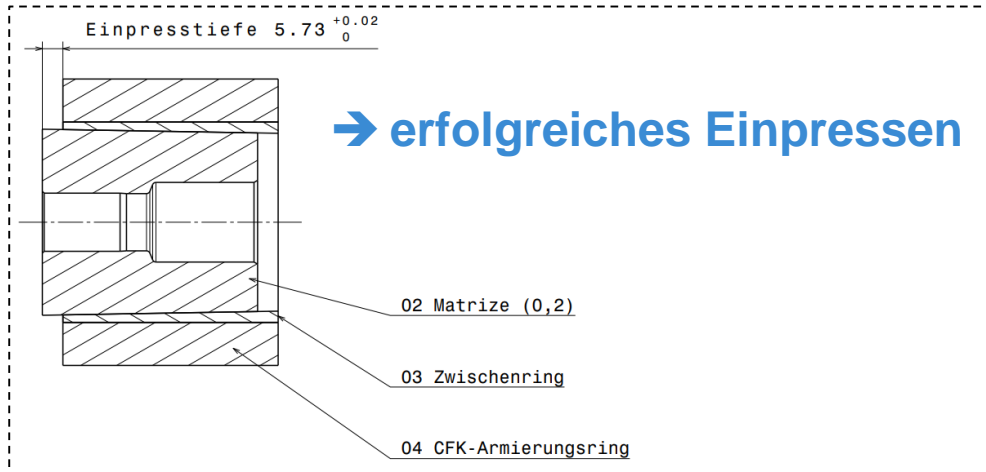


# Adaption des Armierungskonzepts 2

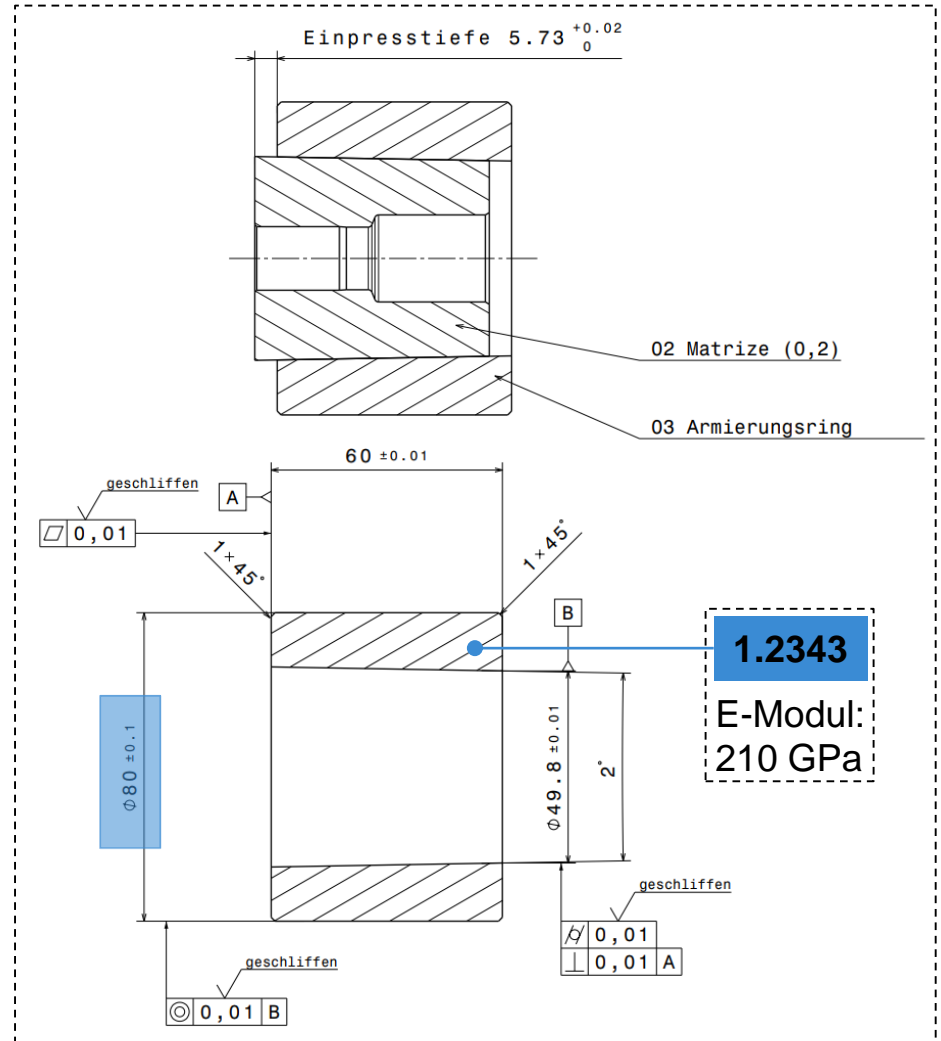
## Reduktion des Übermaß auf 0,1 mm



## Reduktion des Übermaß auf 0,2 mm



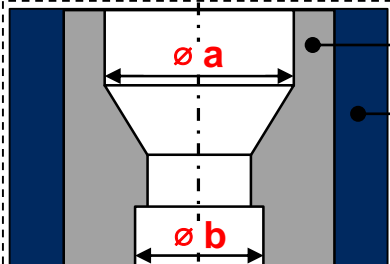
## konventionelle Stahlarmierung mit 0,2 mm Übermaß als Referenz



# Ergebnisse der experimentellen Erprobung

## Auswertung der durchgeführten Vermessung

### Vermessung der Matrize eingepresst

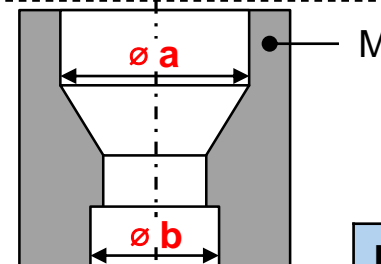


Matrize

Armierung

		Konv.-0,2	CFK-0,1	CFK-0,2
ø a [mm]	1.	22,238	22,243	22,248
	2.	22,232	22,241	22,246
	3.	22,233	22,243	22,245
ø b [mm]	1.	16,256	16,25	16,259
	2.	16,261	16,249	16,255
	3.	16,264	16,249	16,256

### Vermessung der Matrize auspresst



Matrize

		Konv.-0,2	CFK-0,1	CFK-0,2
ø a [mm]	1.	22,291	22,249	22,278
	2.	22,288	22,247	22,278
	3.	22,287	22,250	22,276
ø b [mm]	1.	16,293	16,254	16,272
	2.	16,297	16,254	16,276
	3.	16,299	16,254	16,276

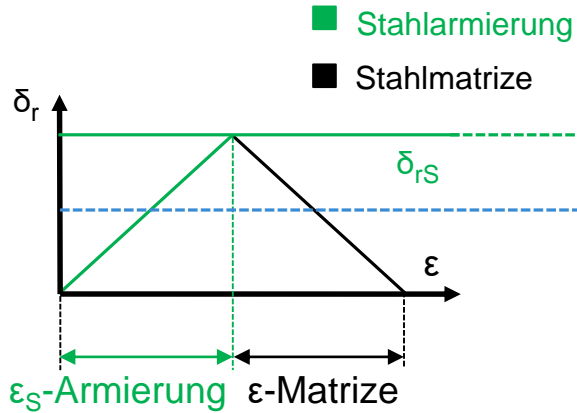
	Δa [mm]	Δb [mm]		Δa [mm]	Δb [mm]		Δa [mm]	Δb [mm]
Konv.-0,2	0,054	0,036	CFK-0,1	0,006	0,005	CFK-0,2	0,031	0,018

→ Signifikant geringere Vorspannung im Falle des faserverstärkten Armierungssystems

# Ergebnisse der experimentellen Erprobung

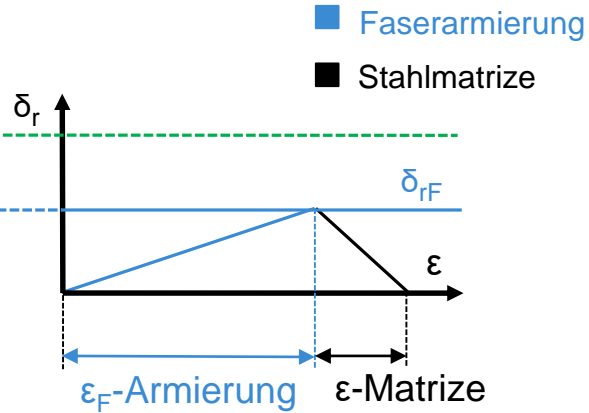
## Analyse der Leistungsfähigkeit der Armierungssysteme

Konventionell-0,2



experimentell	$\Delta a$ [mm]	$\Delta b$ [mm]
Konv.-0,2	0,054	0,036
rechnerisch	$\Delta a$ [mm]	$\Delta b$ [mm]
Konv.-0,2	0,059	0,034

CFK-0,1



	$\Delta a$ [mm]	$\Delta b$ [mm]
CFK-0,1	0,006	0,005

CFK-0,2

	$\Delta a$ [mm]	$\Delta b$ [mm]
CFK-0,2	0,031	0,018

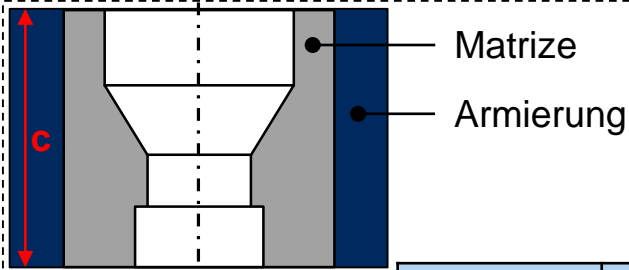
$$\frac{\delta_{rS}}{\epsilon_s\text{-Armierung}} = E_S > \frac{\delta_{rF}}{\epsilon_F\text{-Armierung}} = E_F =$$

Das resultierende E-Modul der Faserarmierung fällt geringer aus als das der konventionellen Stahlarmierung

# Ergebnisse der experimentellen Erprobung

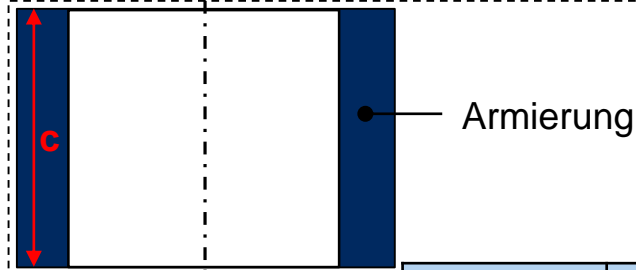
## Auswertung der durchgeführten Vermessung

### Vermessung der Armierung verpresst



		Konv.-0,2	CFK-0,1	CFK-0,2
$c$ [mm]	1.	60,51	60,47	60,52
	2.	60,51	60,46	60,52
	3.	60,5	60,46	60,53
	4.	60,51	60,47	60,52
	5.	60,5	60,44	60,52
	6.	60,51	60,44	60,51

### Vermessung der Armierung nicht verpresst



		Konv.-0,2	CFK-0,1	CFK-0,2
$c$ [mm]	1.	60,53	60,445	60,47
	2.	60,535	60,44	60,46
	3.	60,53	60,44	60,475
	4.	60,535	60,45	60,475
	5.	60,54	60,44	60,475
	6.	60,53	60,44	60,475

$\Delta c$ [mm]	
Konv.-0,2	-0,027

$\Delta c$ [mm]	
CFK-0,1	0,014

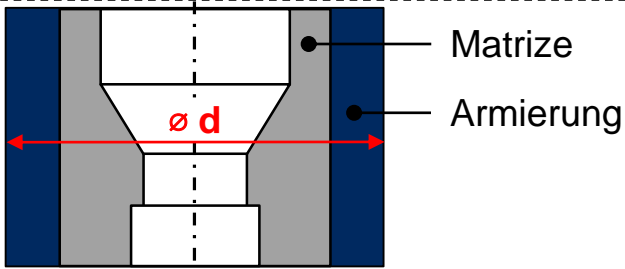
$\Delta c$ [mm]	
CFK-0,2	0,048



# Ergebnisse der experimentellen Erprobung

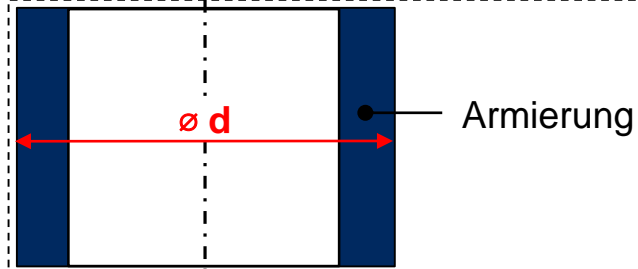
## Auswertung der durchgeführten Vermessung

### Vermessung der Armierung verpresst



		Konv.-0,2	CFK-0,1	CFK-0,2
ø d [mm]	1.	79,98	79,92	79,92
	2.	79,95	79,87	79,94
	3.	79,97	79,84	79,9
	4.	79,94	79,86	79,91
	5.	79,95	79,88	79,96

### Vermessung der Armierung nicht verpresst



		Konv.-0,2	CFK-0,1	CFK-0,2
ø d [mm]	1.	79,85	79,92	79,96
	2.	79,84	79,92	80,06
	3.	79,85	79,90	79,94
	4.	79,83	79,92	79,95
	5.	79,82	79,92	80,01

Δd [mm]	
Konv.-0,2	0,12

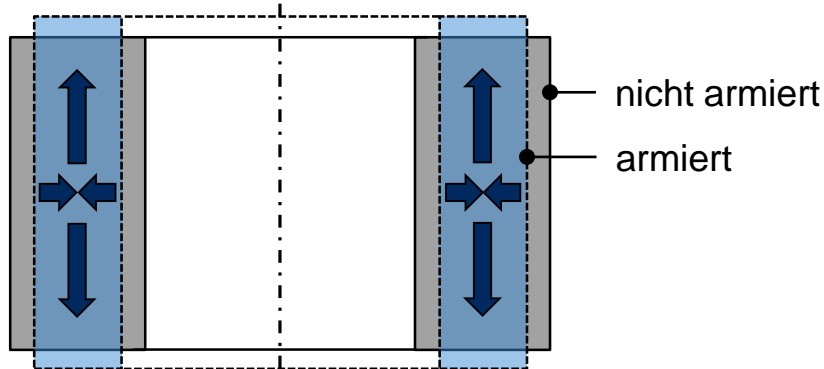
Δd [mm]	
CFK-0,1	-0,042

Δd [mm]	
CFK-0,2	-0,058

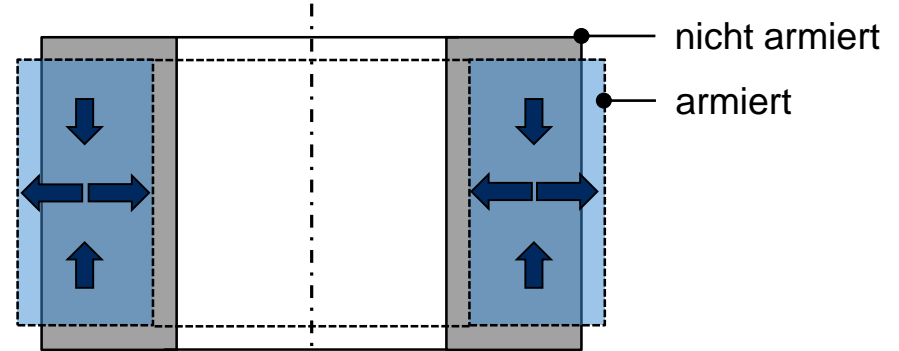
# Ergebnisse der experimentellen Erprobung

## Auswertung der durchgeführten Vermessung

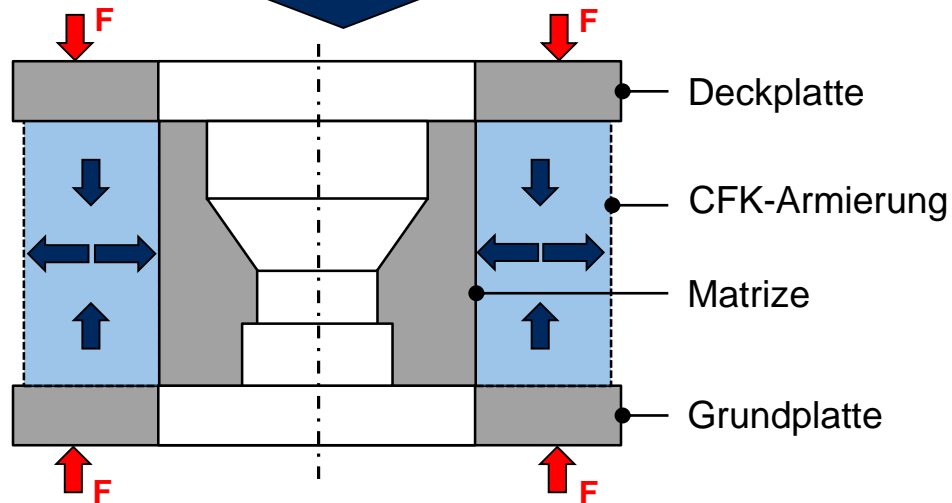
CFK - Armierungssystem



konventionelles Armierungssystem



Adaption

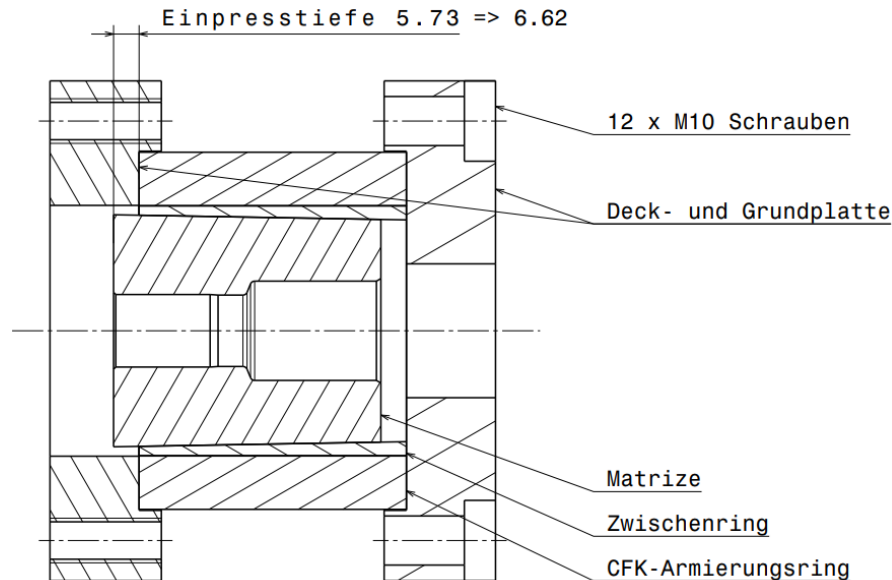


- Axiale Vorspannung des Systems vor dem Einpressen der Matrize
- Reduktion der axialen Dehnung des CFK-Armierungsringes zum Schutz des Verbundwerkstoffs
- Steigerung der radialen Steifigkeit des Gesamtsystems durch axiale Vorspannung

# Axiales Vorspannen der CFK-Armierung

## Mechanisches Fügen von Matrize und dem axial vorgespannten CFK-Armierungsring

- Konstruktiv vorgesehenes **Übermaß** der einzupressenden Matrize von **0,2 mm** (auf den Durchmesser bezogen)
- Konstruktiv bedingte **Einpresstiefe** von **5,73 mm**
- ➔ Durch **axiales Vorspannen** resultierende **Einpresstiefe** von **6,62 mm**
- **Vorspannkraft** von **200 kN** (entspricht **30 Nm** Anzugsmoment)
- **Flächenpressung** des **CFK-Rings** von **80 MPa** (Höhenreduktion von **0,5 mm**)



## Vorgespannter Armierungsring



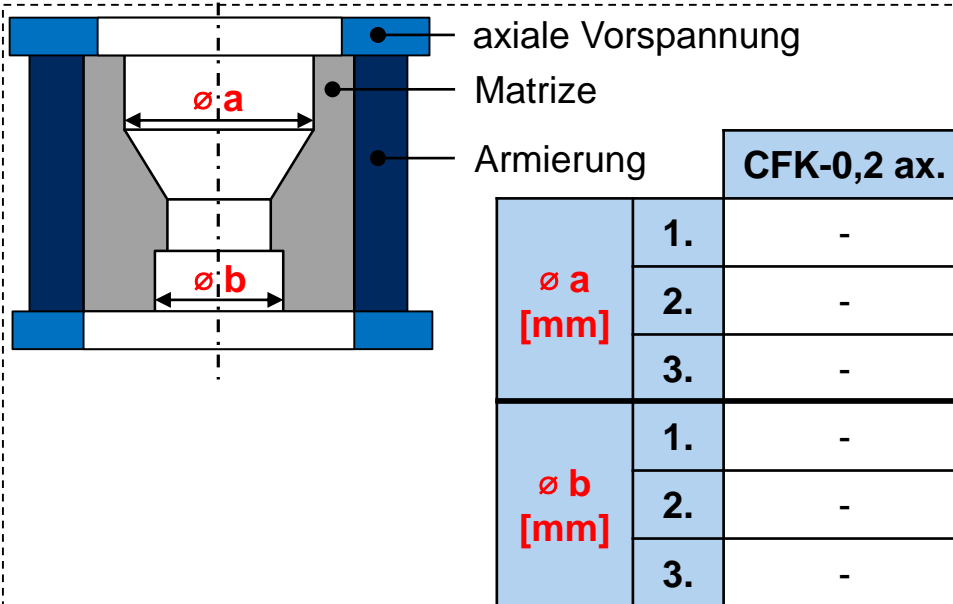
## Einpressen der Matrize



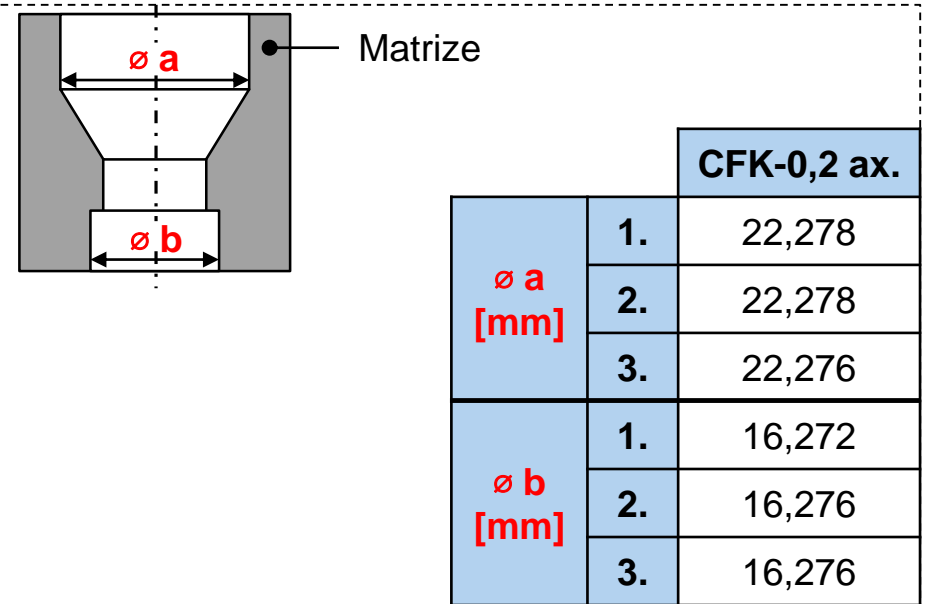
# Ergebnisse der experimentellen Erprobung

## Auswertung der durchgeführten Vermessung

### Vermessung der Matrize eingepresst



### Vermessung der Matrize auspresst



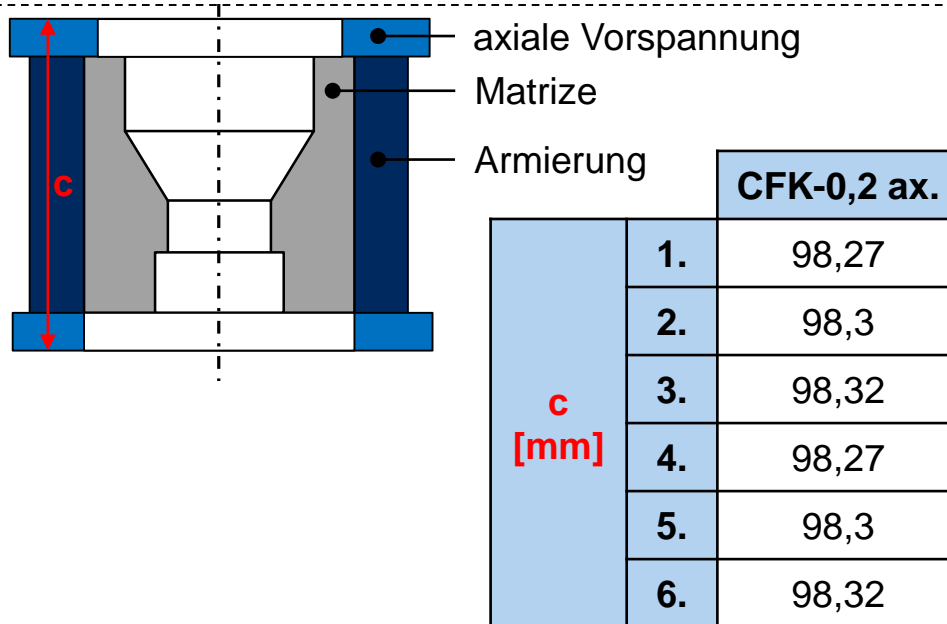
	$\Delta a$ [mm]	$\Delta b$ [mm]		$\Delta a$ [mm]	$\Delta b$ [mm]	Vorspannen →	$\Delta a$ [mm]	$\Delta b$ [mm]
Konv.-0,2	0,054	0,036	CFK-0,2	0,031	0,018	CFK-0,2 ax.	0,04	0,022

→ Höhere Vorspannung im Falle des axial vorgespannten Armierungssystems

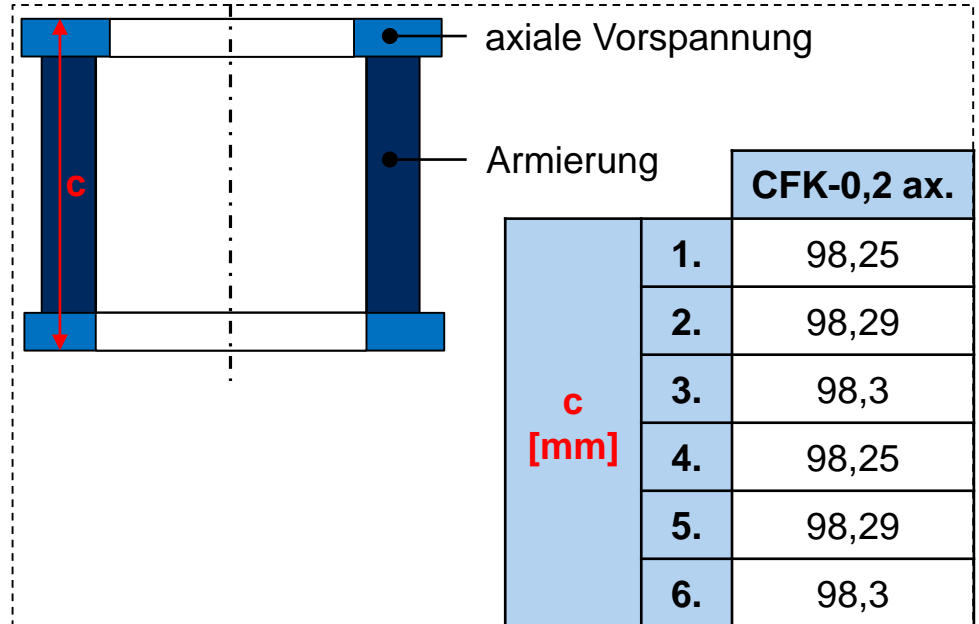
# Ergebnisse der experimentellen Erprobung

## Auswertung der durchgeführten Vermessung

### Vermessung der Armierung verpresst und axial vorgespannt



### Vermessung der Armierung nicht verpresst und axial vorgespannt



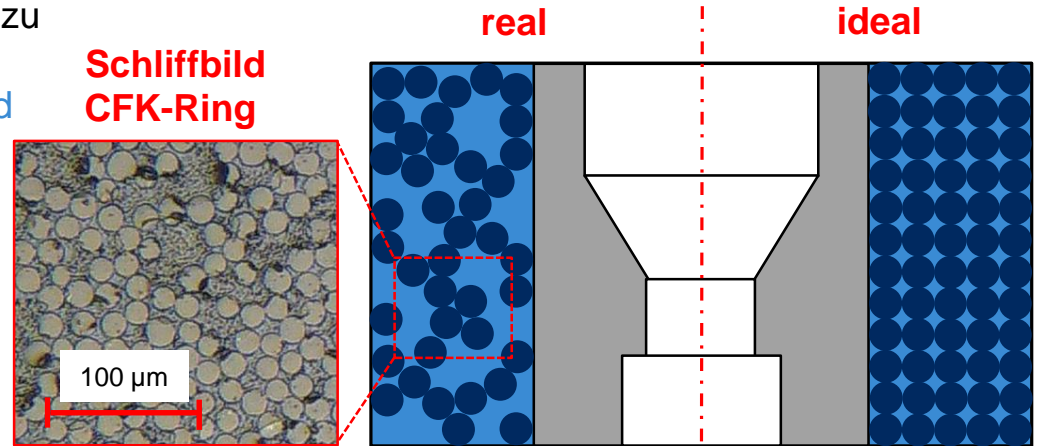
	$\Delta c$ [mm]		$\Delta c$ [mm]	Vorspannen →	$\Delta c$ [mm]
Konv.-0,2	-0,027	CFK-0,2	0,048	CFK-0,2 ax.	0,018

→ Geringere axiale Ausdehnung durch Vorspannen des Armierungssystems

# Zusammenfassung und Ausblick

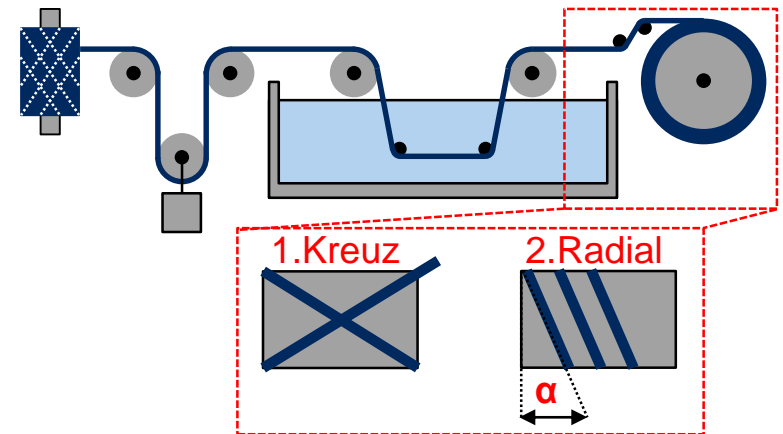
## Zusammenfassung

- Axiale Vorspannung des CFK-Armierungsrings führt zu höherer Vorspannung des Matrizenkerns
  - Kombination aus Vergrößerung der Einpresstiefe und Steigerung des axialen Rückhalts
- Werkstoffe mit stark anisotropen mechanischen Kennwerten sind nur bedingt für den Einsatz als Armierung geeignet
  - Auf den Anwendungsfall angepasste spezifische Modulation des Eigenschaftsprofils notwendig

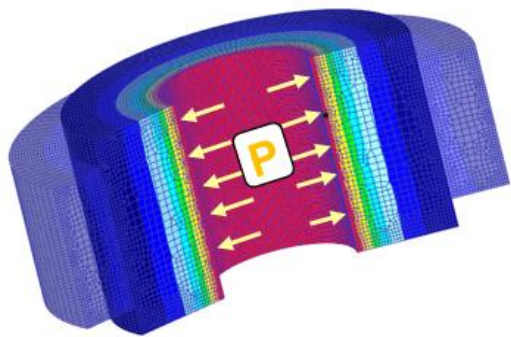


## Potentiale von CFK-Armierungssystemen

- Realisierung einer höheren Vorspannung des Matrizenkerns durch:
  - Anpassung des Wickelwinkels
  - Reduzierung und Adaption des Harzsystems
- Implementierung einer kegigen Innenkontur in Kombination mit angedachter Trägerschicht (metallische Folie)







**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

**Nikola Nezic**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Abteilung Formgebungsverfahren  
Institut für Umformtechnik

Tel.: +49 (0) 711 685-82310  
E-Mail: [nikola.nezic@ifu.uni-stuttgart.de](mailto:nikola.nezic@ifu.uni-stuttgart.de)



**Auslegung eines CFK-Armierungsringes**

**Nikola Nezic | 04.11.2024 | Folie 21**



Universität Stuttgart  
Produktionstechnisches Zentrum  
Stuttgart PZS

