



Vorgehensweise zur rechnergestützten Strukturoptimierung von faserverstärkten Hochdruckspeichern

F. Ruprechter, G. Kepplinger, F. Schmalhofer,
S. Mohorko

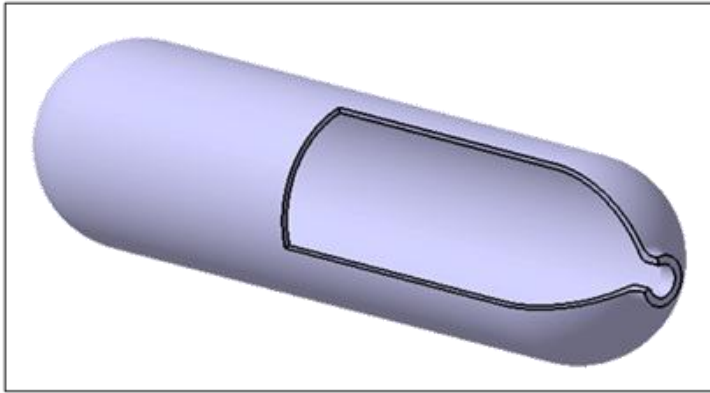
MAGNA STEYR Engineering AG & Co KG

franz.ruprechter@magnasteyr.com

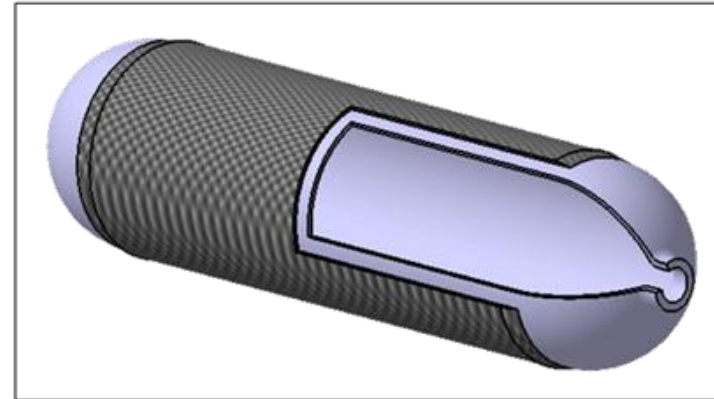
Tel.: +43 316 404 2005

- **Einleitung, Motivation**
- **Simulation, Auslegung**
- **Ablauf Strukturoptimierung**
- **Ergebnisgegenüberstellung, Zusammenfassung**

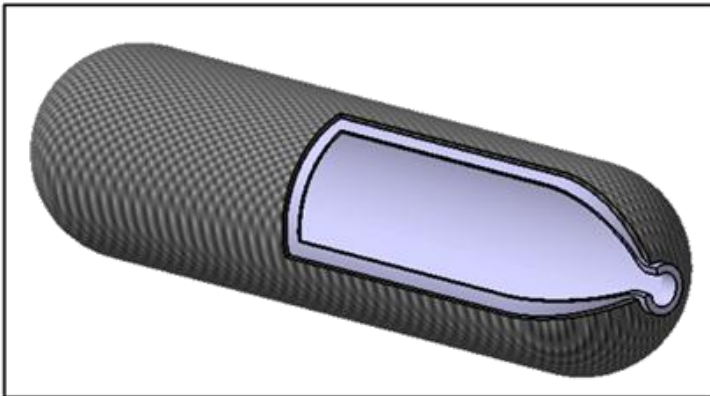
- **Gasförmige Kraftstoffe mit geringer Energiedichte
→ Hochdruckspeicherung**
- **Typisch**
 - **CGH2 (700 bar)**
 - **CNG (200 bar)**
- **Zielkonflikt**
 - **Nutzvolumen**
 - **Bauraum**
 - **Gewicht**
 - **Kosten**
- **Wesentliche Einsparungsmöglichkeit durch Bauteiloptimierung**
 - **Bestehend: Optimierungstools auf analytischer Basis (CLT)**
 - **Zielsetzung: Optimierung der Gesamtstruktur mit FEM**



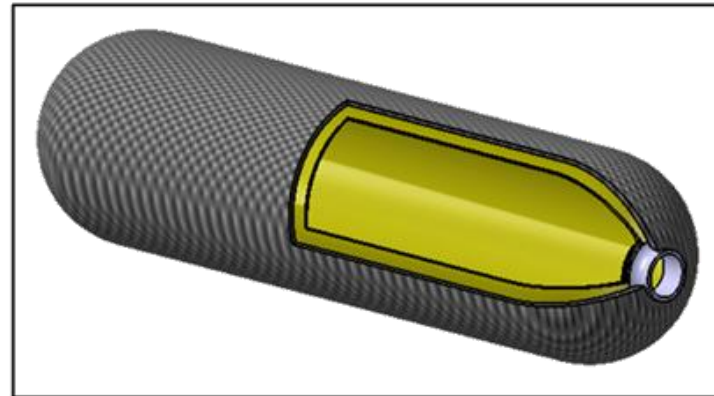
Typ I: monolithische Metallkonstruktion



Typ II: Metallliner – zylindrisch mit Composite umwickelt

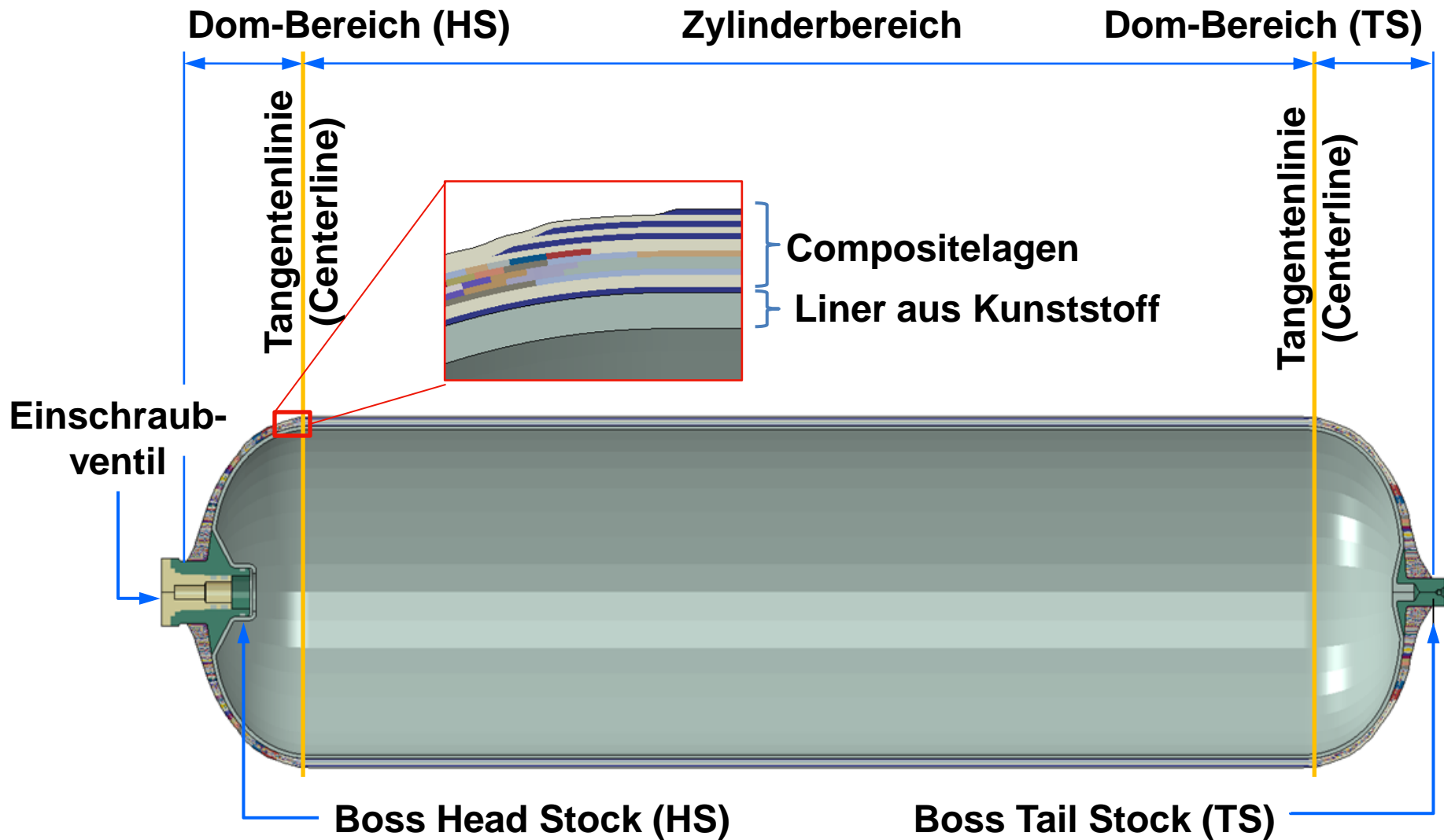


Typ III: Metallliner mit Composite vollumwickelt

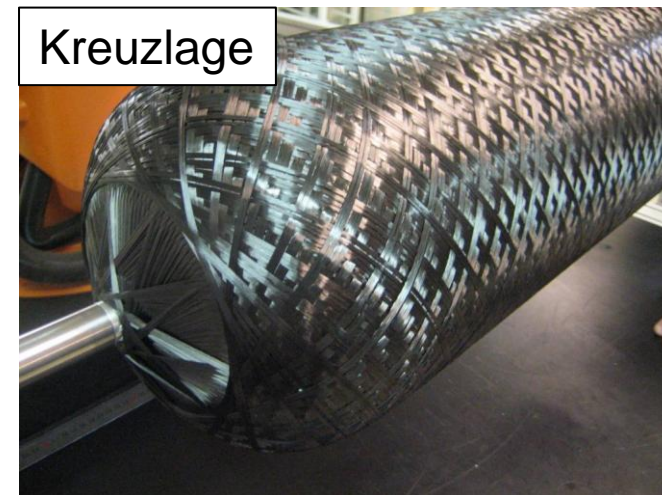
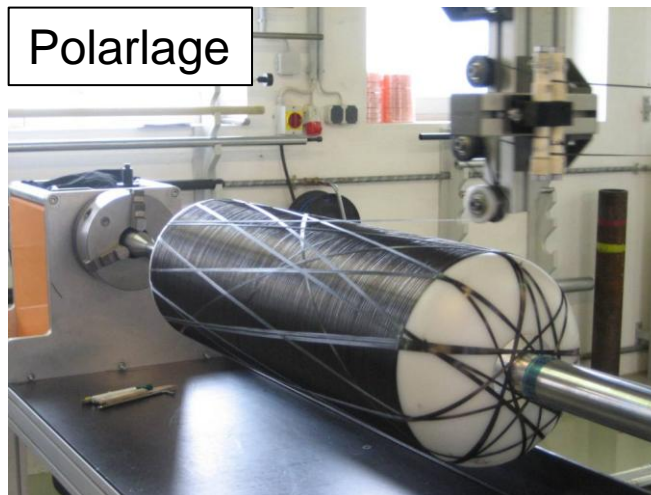


Typ IV: Kunststoffliner mit Composite vollumwickelt

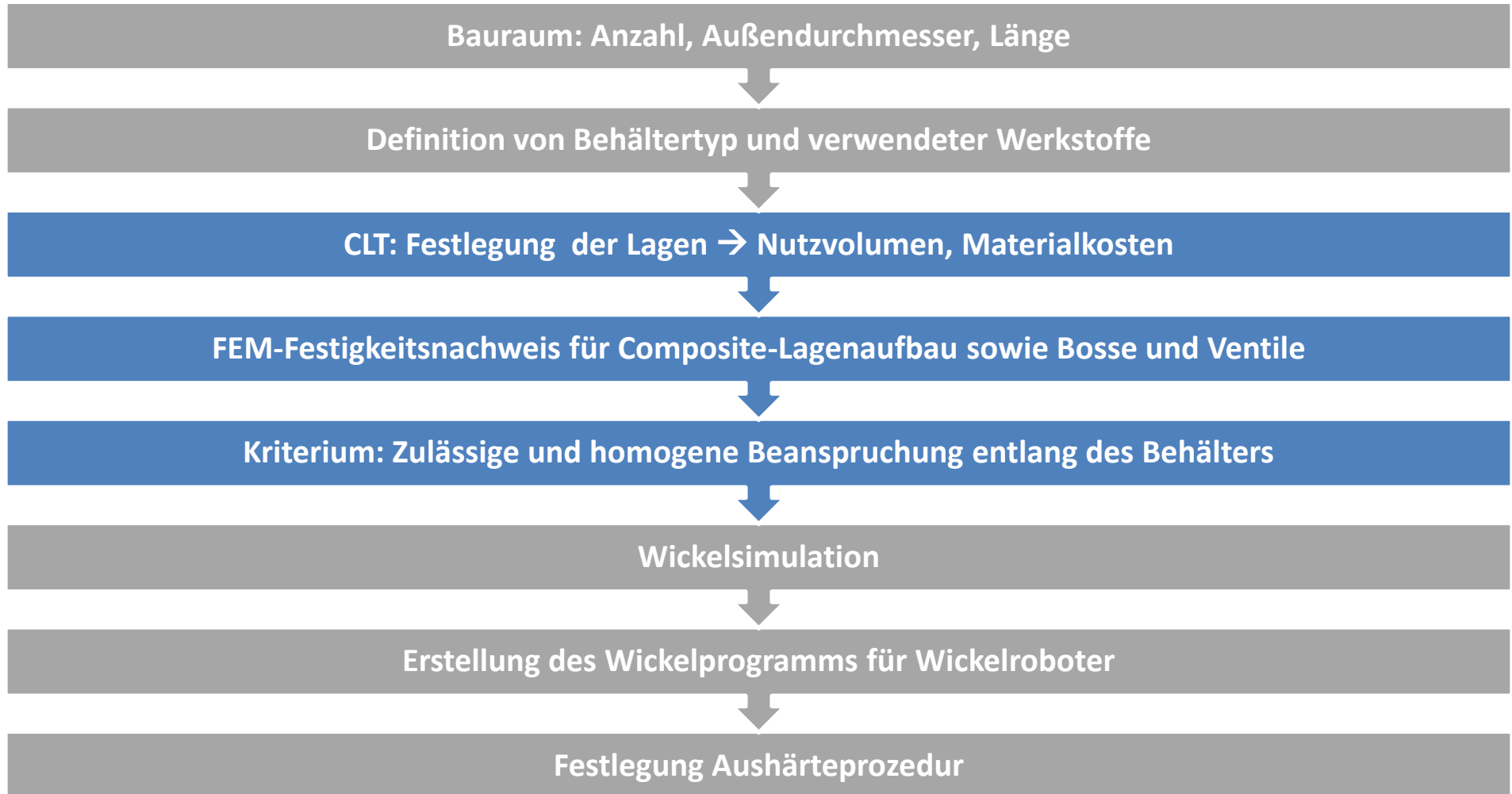
- **Typ1 - Behälter aus Stahl**
 - **Gewicht : Nutzvolumen = 0,8...1,1 kg/l**
 - **Kosten : Nutzvolumen = 5...7 €/l**
 - **Kostenvorteil bei hohen Stückzahlen und geringen Gewichtsanforderungen nutzbar**
- **Typ 3 - bzw. Typ 4 - Behälter**
 - **Gewicht : Nutzvolumen < 0,5 kg/l**
 - **hohe Gewichtsrestriktionen im Pkw-Bereich**
 - **Kosten müssen konkurrenzfähig bleiben**



- **Basiswickelwinkel (= Winkel zwischen Faser und Zylinderachse)**
 - Hooplage
 - Polarlage
 - Kreuzlage
- **Lagendicke**
- **Koordinate Lagenende am HS**
- **Koordinate Lagenende am TS**



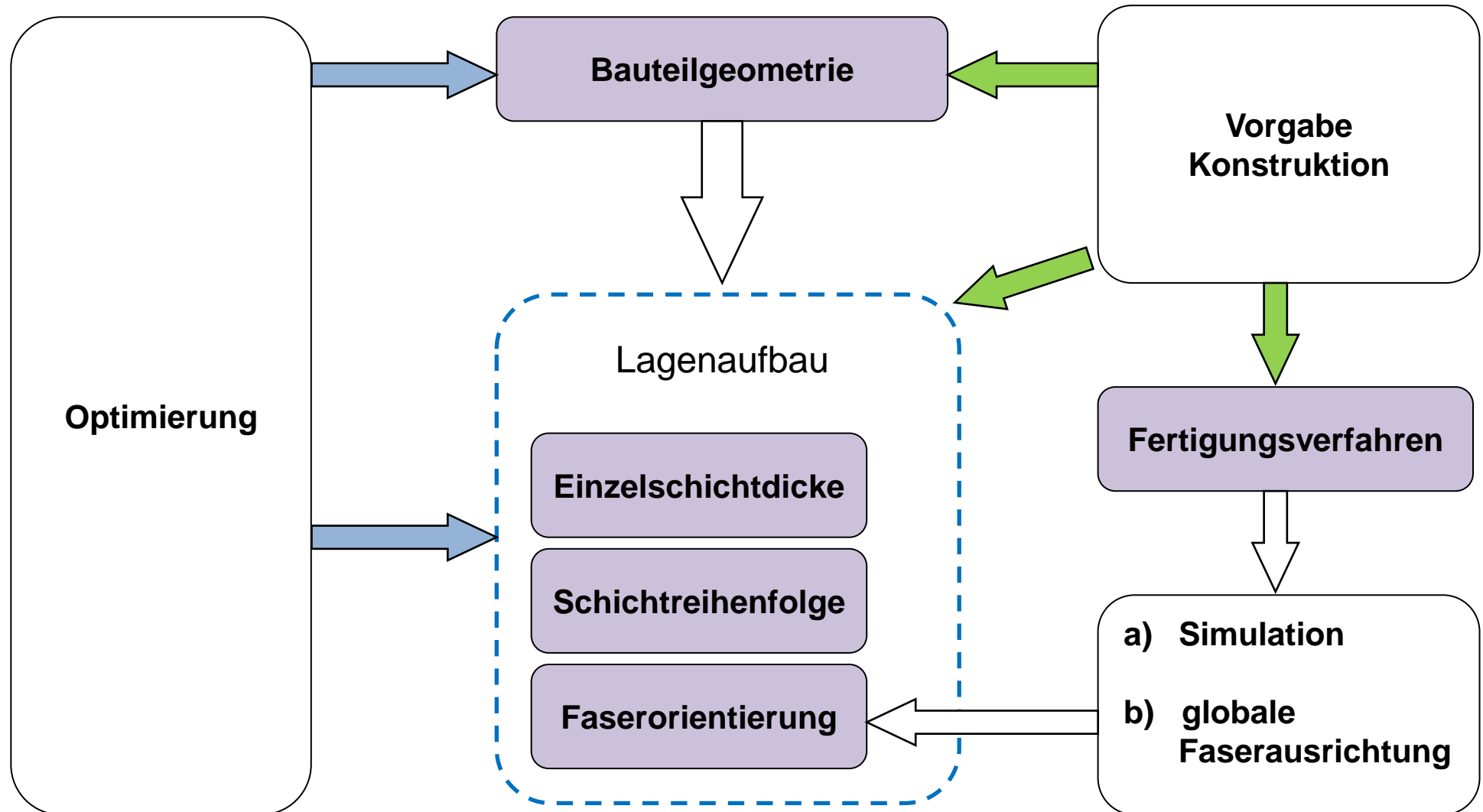
- Einleitung, Motivation
- **Simulation, Auslegung**
- Ablauf Strukturoptimierung
- Ergebnisgegenüberstellung, Zusammenfassung

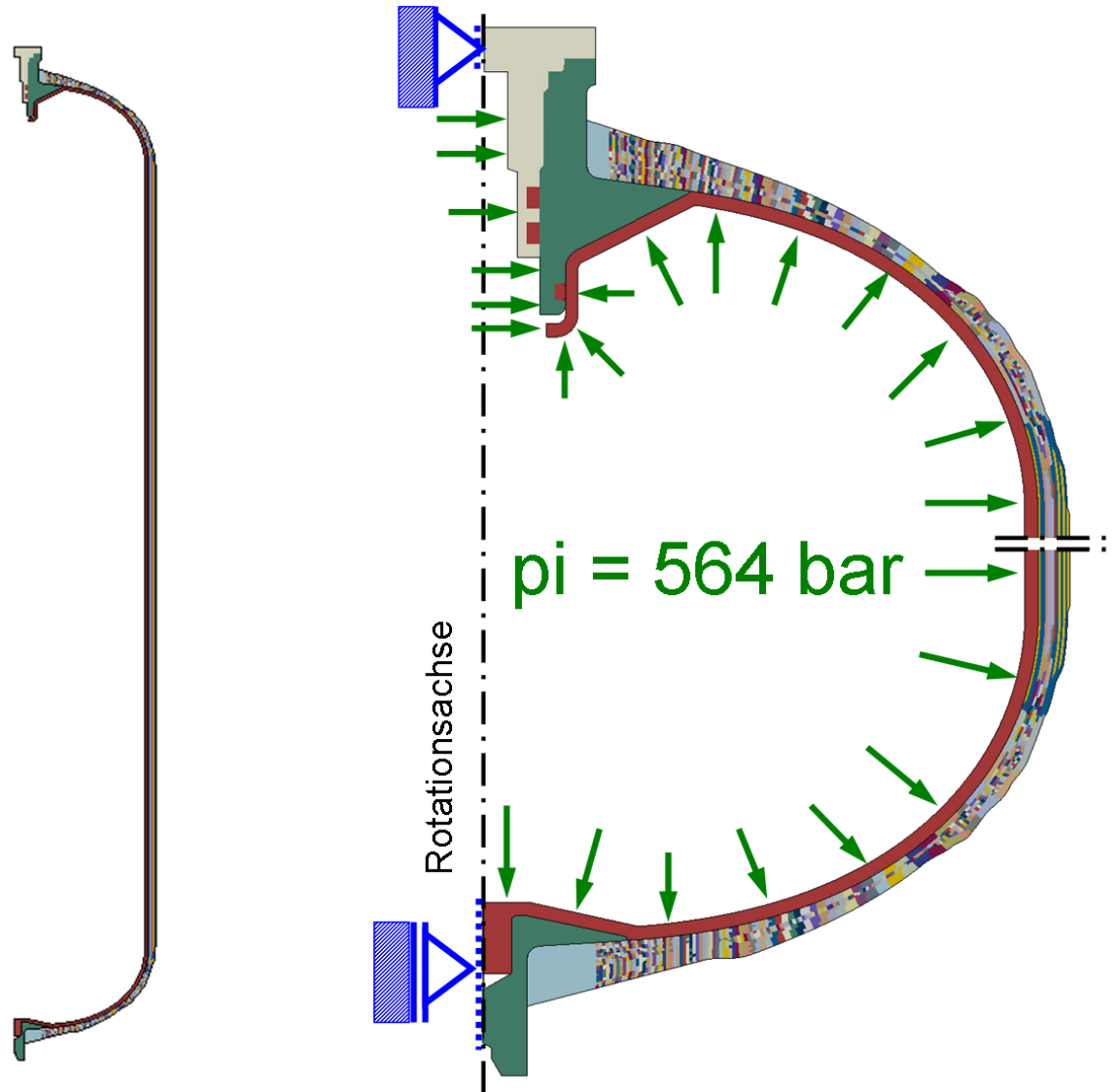


Betriebsdaten	Kenngroße
Betriebsdruck bei 15°C	200 bar
Maximaler Fülldruck	260 bar
Prüfdruck	300 bar
Mindestberstdruck, statisch	470 bar
Min. Lebensdauer	20 Jahre
Min. Lastwechsel	20 000
Min. Betriebstemperatur	-40°C
Max. Betriebstemperatur	+85°C*)

Berstfaktor:

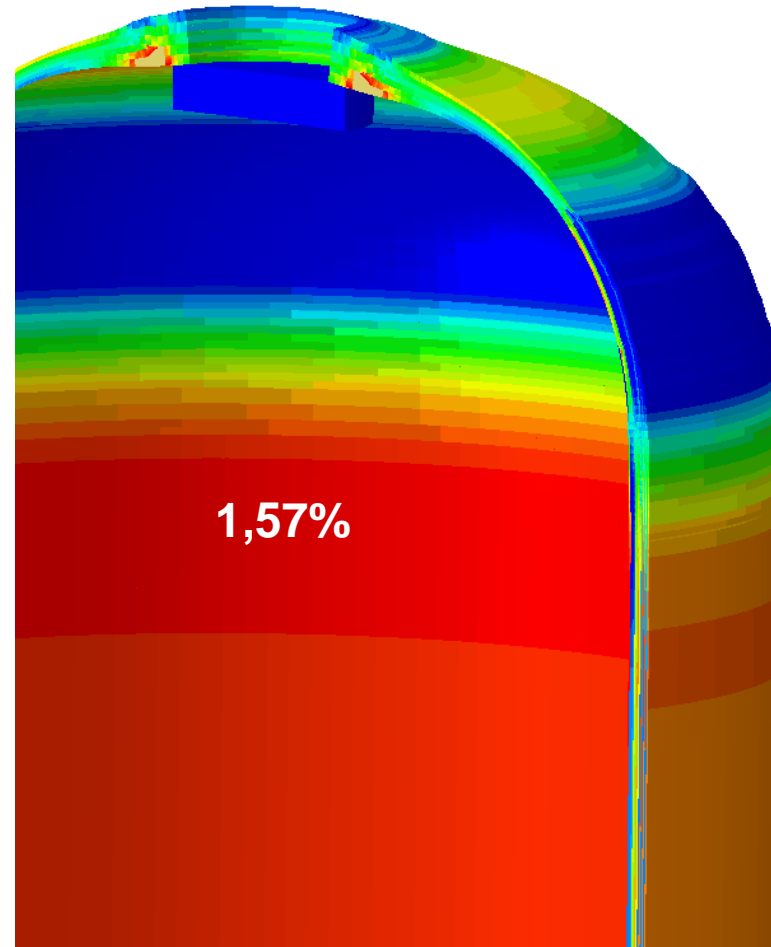
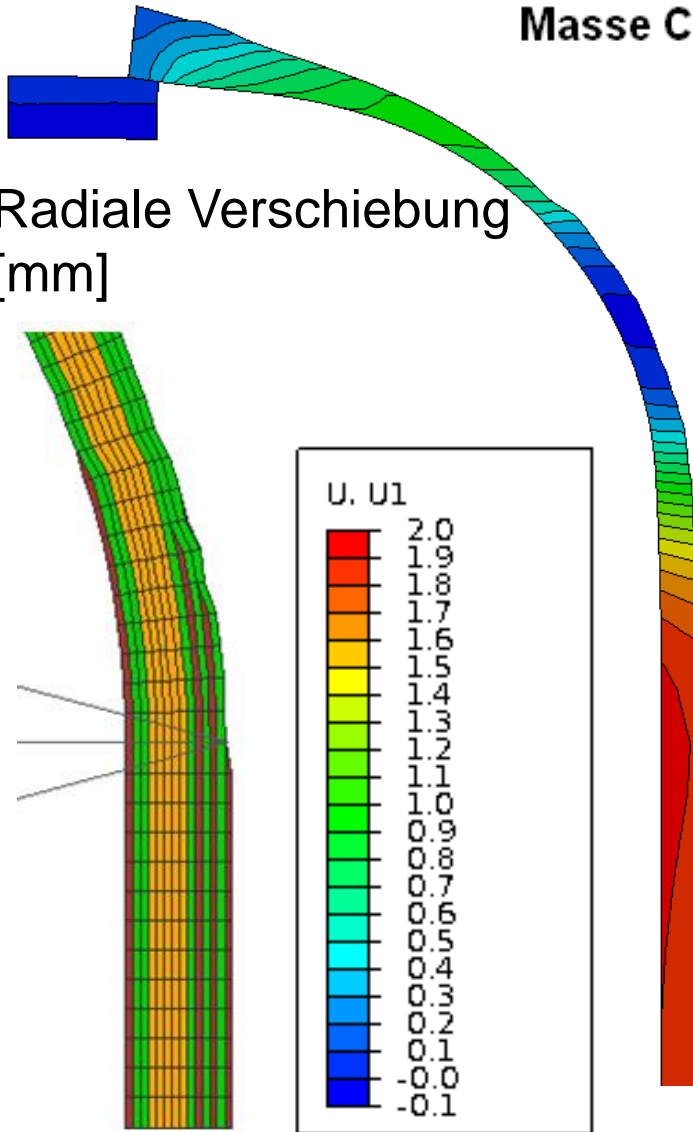
**Betriebssicherheit unter Langzeitbeanspruchung (Zeitstandfestigkeit) wird durch Skalierungsfaktor des Betriebsdrucks sichergestellt:
z.B. Kohlefaser: 2,35 → $2,35 * 200 \text{ bar} = 470 \text{ bar}$**



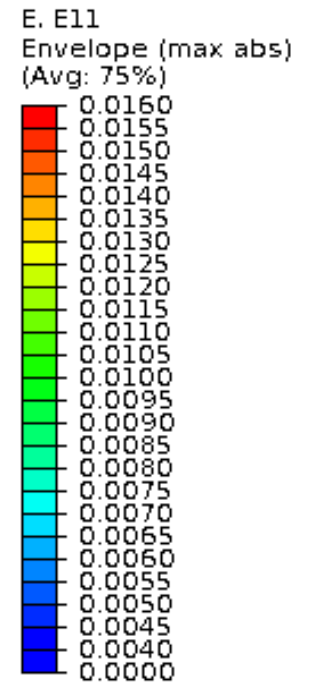


Masse Composite = **7,641kg**; Gesamtdicke am Zylinder = **6,877mm**

Radiale Verschiebung
[mm]

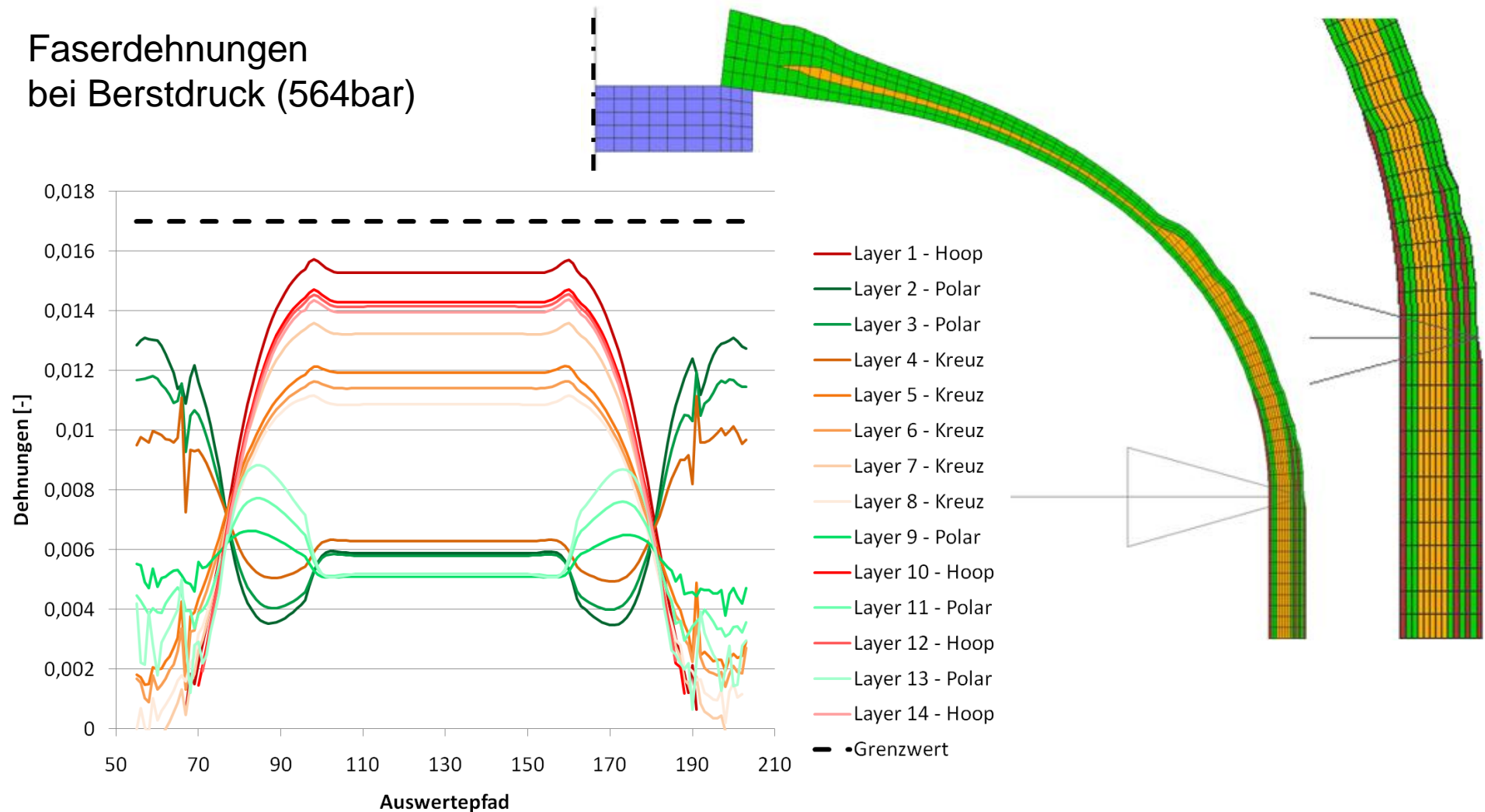


Faserdehnung [-]



Masse Composite = **7,641kg**; Gesamtdicke am Zylinder = **6,877mm**

Faserdehnungen bei Berstdruck (564bar)



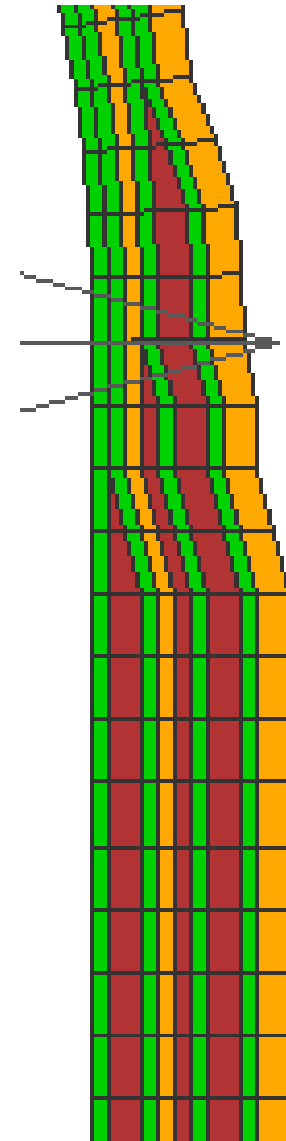
- Einleitung, Motivation
- Simulation, Auslegung
- **Ablauf Strukturoptimierung**
- Ergebnisgegenüberstellung, Zusammenfassung

- **Dombereich:**

- **Hooplagen:** maximal wickelbare Länge (Rutschgrenze) über Tangentenlinie
(je 2 Parameter, hier: 8 Parameter)
- **Polarlagen** reichen bis zu den Bossen
(0 Parameter)
- **Kreuzlagen:** reibungsfrei gewickelt – Lagenenden (Umkehrpunkte) ergeben sich aus reibungsfreier Wickelung
(0 Parameter)
- Abbildung der Lagenaufdickung
 $t = f(\varphi_{\text{zyl}}, r, t_{\text{zyl}})$
- Abbildung der Wickelwinkel
 $\varphi = f(\varphi_{\text{zyl}}, r_{\varphi=90^\circ})$

- **Zylinderbereich:**

- 12 Lagen zu 4 Lagengruppen a 3 Lagentypen
(Abwechselnd: **Umfangslage** - **Polarlage** – **Kreuzlage**)
→ je 2 Parameter: Lagendicke + Wickelwinkel = 24 Parameter



Definition des Optimierungsproblems

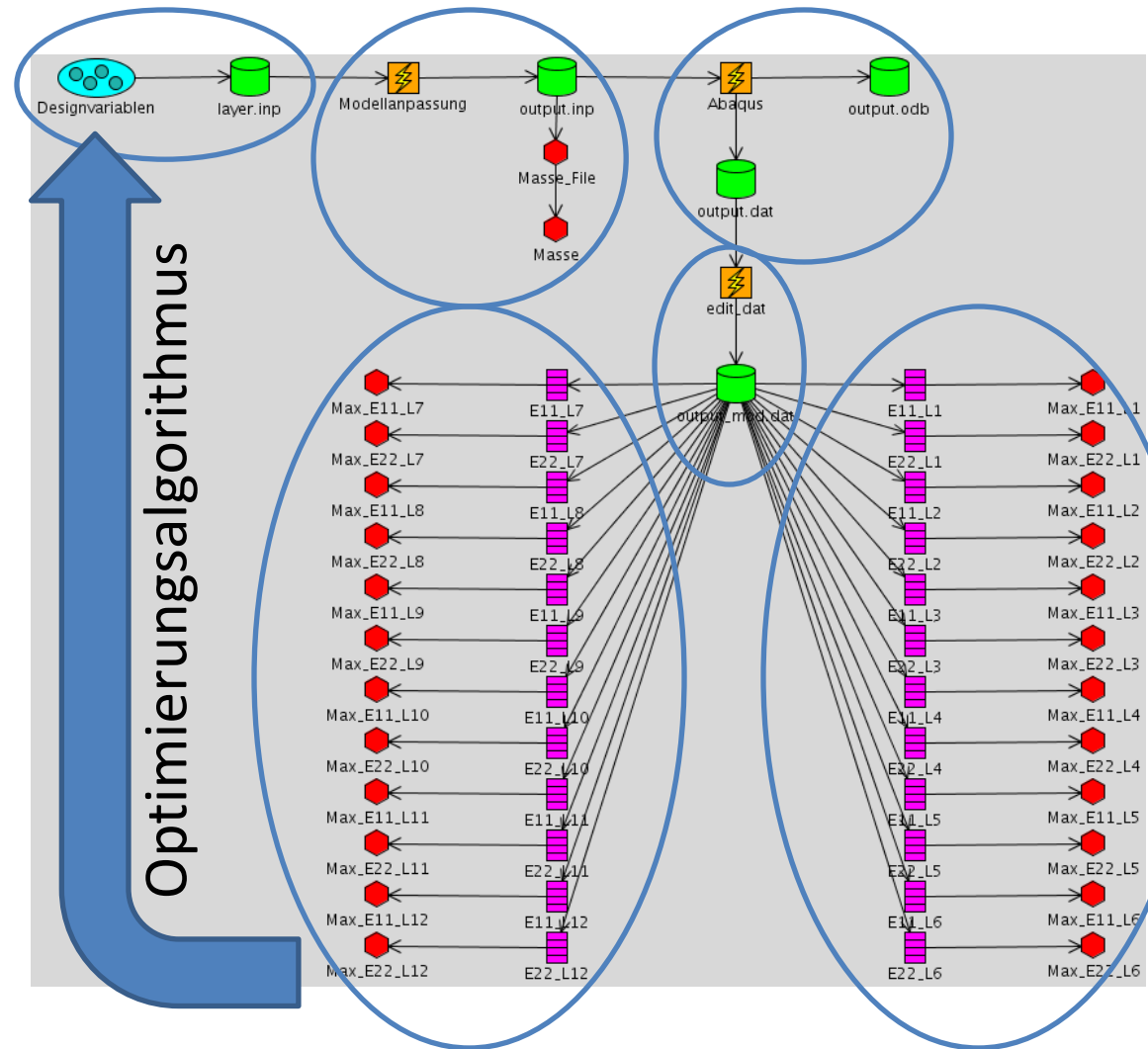
		ZIELFUNKTION		Minimierung der Compositemasse				
		DESIGNVARIABLEN						NEBEN-BEDINGUNGEN
	Typ	t Dicke	φ Basiswickel- winkel	z_hs Axialkoordinate Lagenende HS	z_ts Axialkoordinate Lagenende TS	r_hs Radialkoordinate Lagenende HS	r_ts Radialkoordinate Lagenende TS	E11 Dehnung parallel zur Faser
Lage 1	Hoop		88,0		= z_hs			$\leq 1,7 \%$
Lage 2	Polar		12,0			= Polöffnungsradius	= Polöffnungsradius	$\leq 1,7 \%$
Lage 3	Kreuz					= f(φ) ... reibungsfrei	= f(φ) ... reibungsfrei	$\leq 1,7 \%$
Lage 4	Hoop		88,0		= z_hs			$\leq 1,7 \%$
Lage 5	Polar		12,0			= Polöffnungsradius	= Polöffnungsradius	$\leq 1,7 \%$
Lage 6	Kreuz					= f(φ) ... reibungsfrei	= f(φ) ... reibungsfrei	$\leq 1,7 \%$
Lage 7	Hoop		88,0		= z_hs			$\leq 1,7 \%$
Lage 8	Polar		12,0			= Polöffnungsradius	= Polöffnungsradius	$\leq 1,7 \%$
Lage 9	Kreuz					= f(φ) ... reibungsfrei	= f(φ) ... reibungsfrei	$\leq 1,7 \%$
Lage 10	Hoop		88,0		= z_hs			$\leq 1,7 \%$
Lage 11	Polar		12,0			= Polöffnungsradius	= Polöffnungsradius	$\leq 1,7 \%$
Lage 12	Kreuz					= f(φ) ... reibungsfrei	= f(φ) ... reibungsfrei	$\leq 1,7 \%$

Anzahl DV	
variabel	20
fixiert / abhängig	28
nicht verfügbar	

Evolutionärer Algorithmus: „Self Adaptive Evolution Algorithm“

- **Globaler Algorithmus: Suche des Optimums auf Basis globaler Informationen**
- **Basis: Darwin'sche Evolutionslehre**
- **Prinzipien: Variation & Selektion**
- **Bewertung der Fitness der Individuen einer Population**
- **Genetische Operatoren: Rekombination & Mutation**
- **Heuristik steuert adaptiv die Operatoren zur Erlangung eines robusten und leistungsstarken Algorithmus**

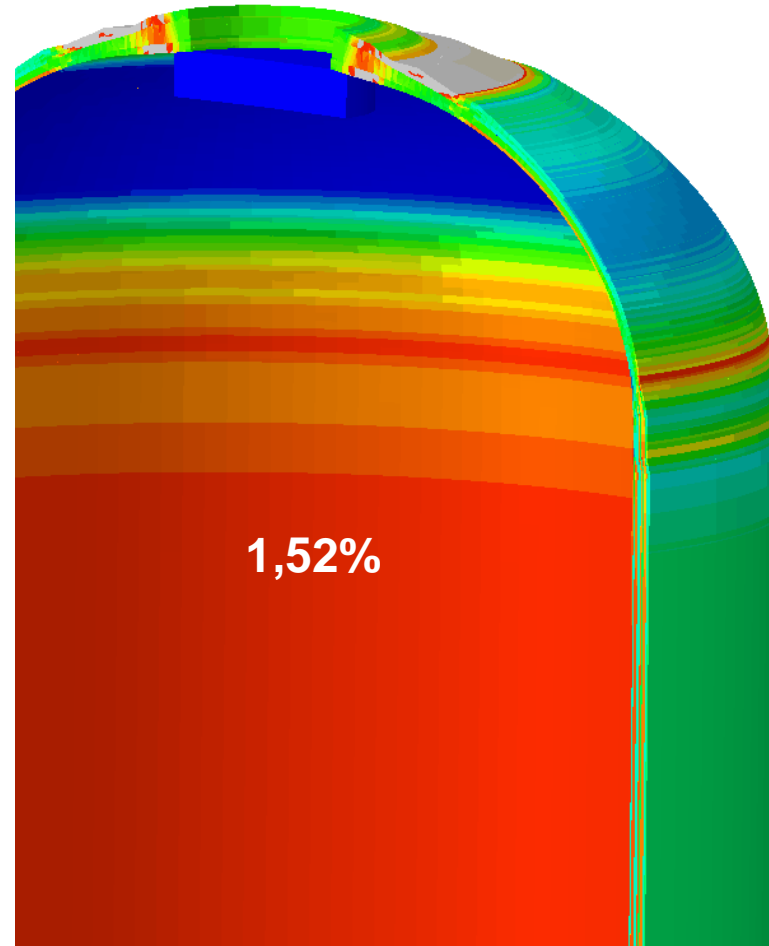
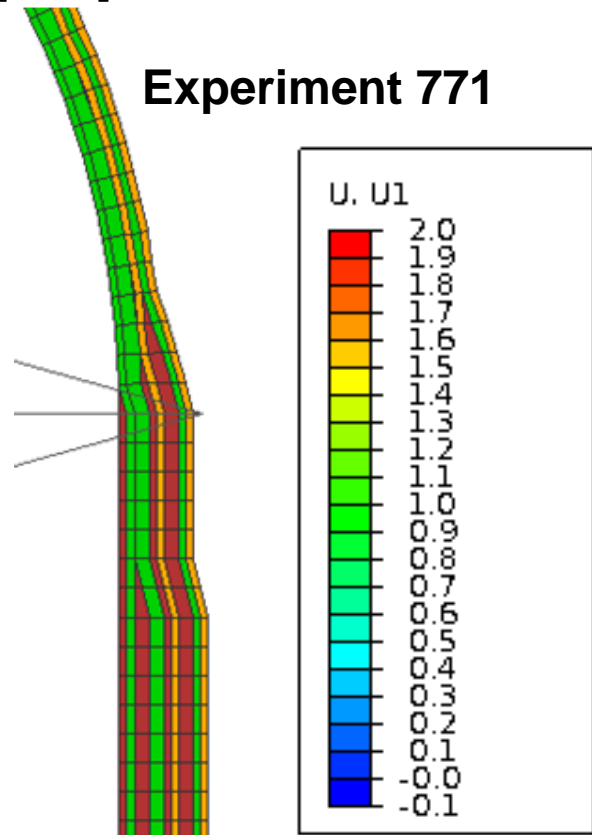
1. Definition der Designvariablen
→ Inputdatei mit allen Informationen über das aktuelle Design des Lagenaufbaus
2. Erstellung des aktuellen FE-Modelles (C-Programm) als Abaqus - Inputdeck
→ Response: Composite Masse
3. FE-Berechnung mit Abaqus
→ Output als odb (binär)
→ Output in dat (ASCII)
= Design-Responses
4. Programm zur Aufbereitung der Berechnungsergebnisse
→ Design-Responses nach Lagen sortiert
5. Design-Response-Variablen (Faserdehnungen parallel/quer) zur weiteren Verarbeitung



Masse Composite = 6,436kg; Gesamtdicke am Zylinder = 6,0mm

Radiale Verschiebung
[mm]

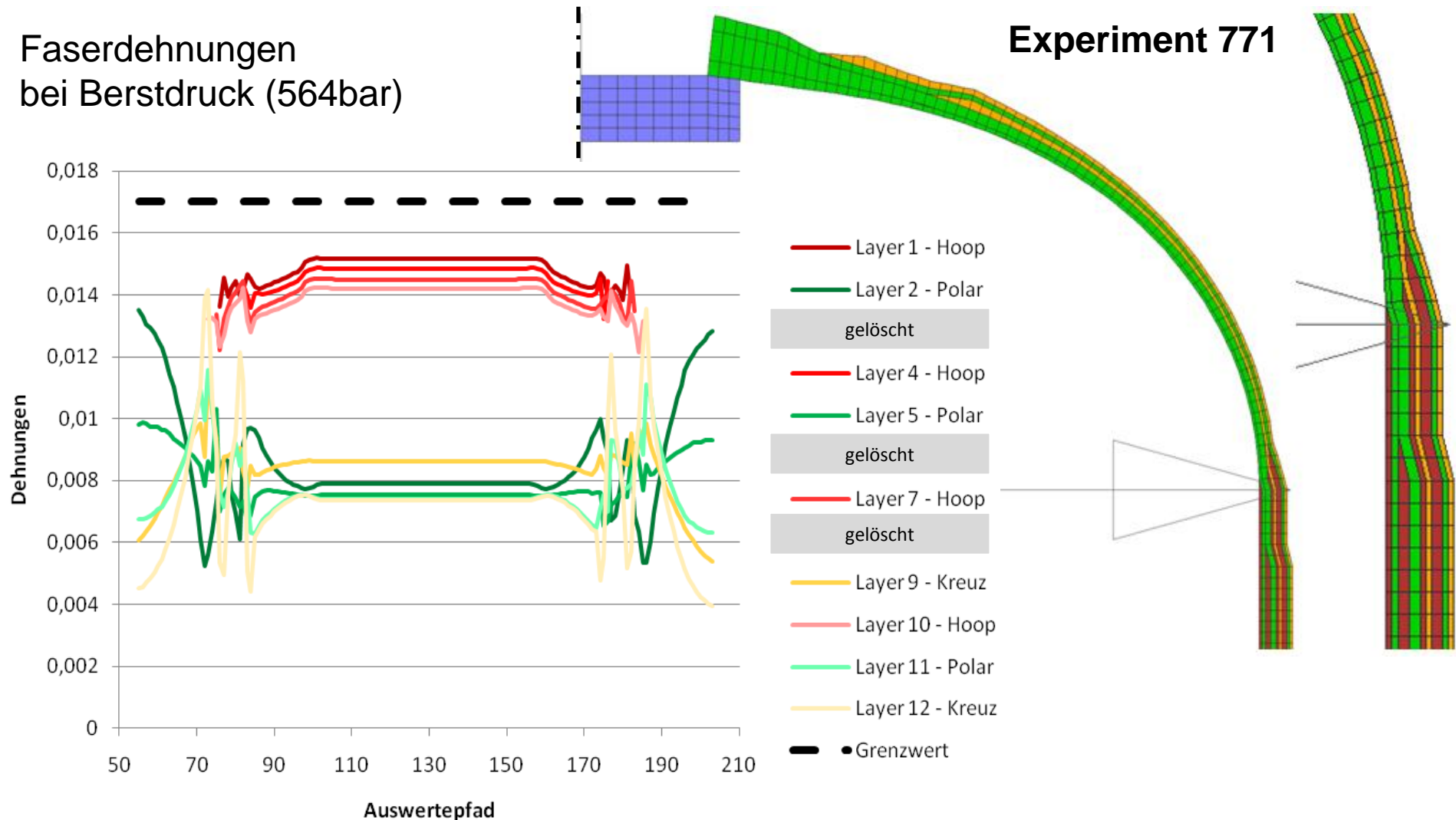
Experiment 771



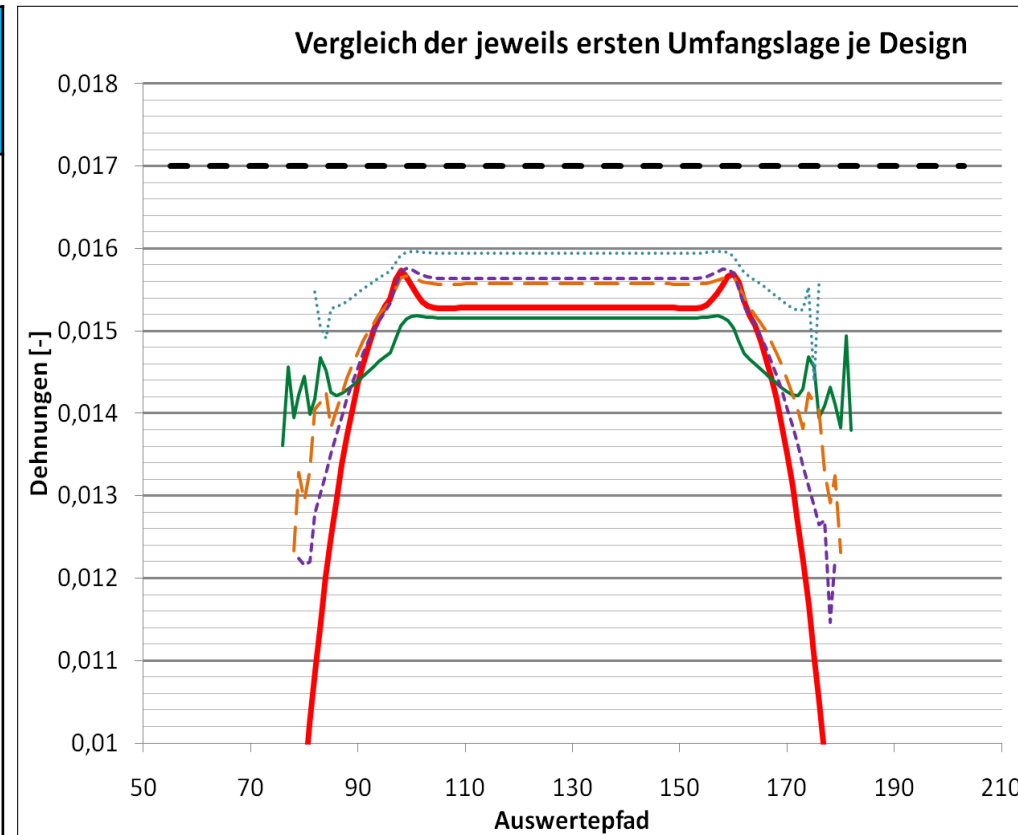
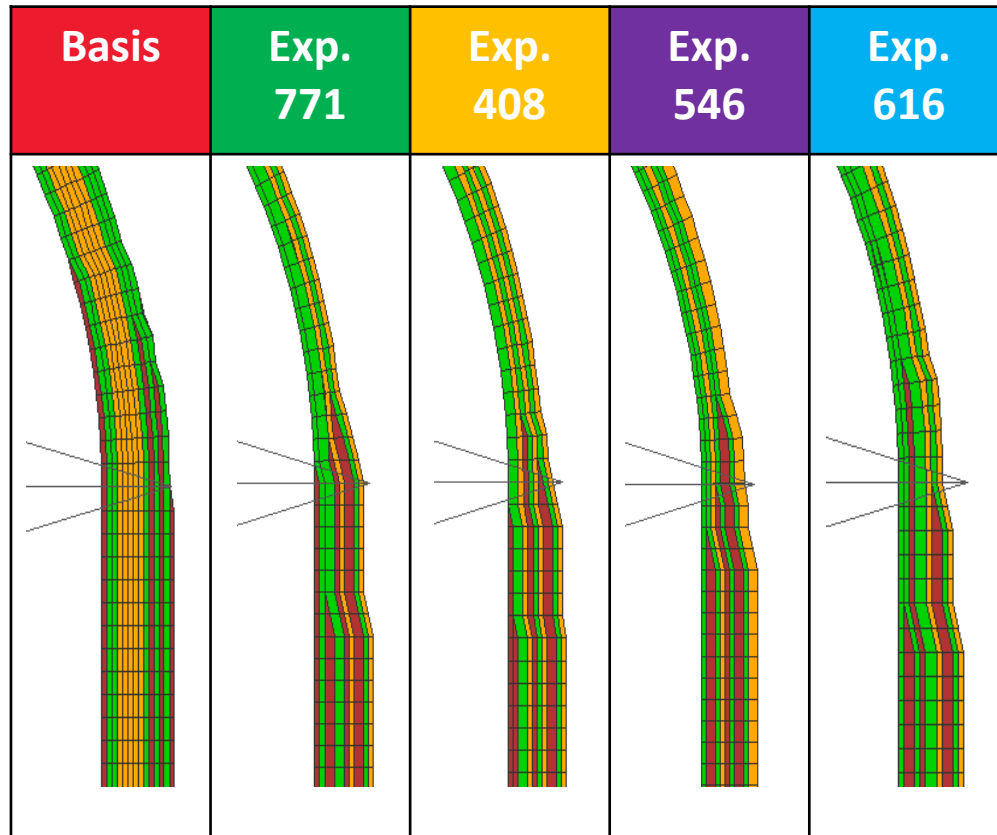
Faserdehnung [-]

Masse Composite = 6,436kg; Gesamtdicke am Zylinder = 6,0mm

Faserdehnungen
bei Berstdruck (564bar)



- Einleitung, Motivation
- Simulation, Auslegung
- Ablauf Strukturoptimierung
- **Ergebnisgegenüberstellung, Zusammenfassung**



maximale Dehnungen bei Berstdruck (564bar)

	Basis	Exp. 771	Exp. 408	Exp. 546	Exp. 616
Masse Faser [kg]	7,64	6,44	6,46	6,47	6,52
Anzahl Lagen gesamt	14	12	12	12	12
Anzahl Umfangslagen	4	6	5	5	5
Anzahl Kreuzlagen	5	2	3	3	2
Anzahl Polarlagen	5	4	4	4	5
Maximale Faserdehnung [%]	1,57	1,52	1,57	1,58	1,60
Muster der Enden der Umfangslagen [mm]	20/15/10/ 0/-/-	0/-10/-10/ 5/10/10	-5/-10/5/ 0/0/-	-5/-5/0/ 10/10/-	-10/-10/5/ 0/0/-
Mittlerer Berstdruck aus Versuch [bar]	588 (7 Tests)	617 (1 Test)	-	-	-

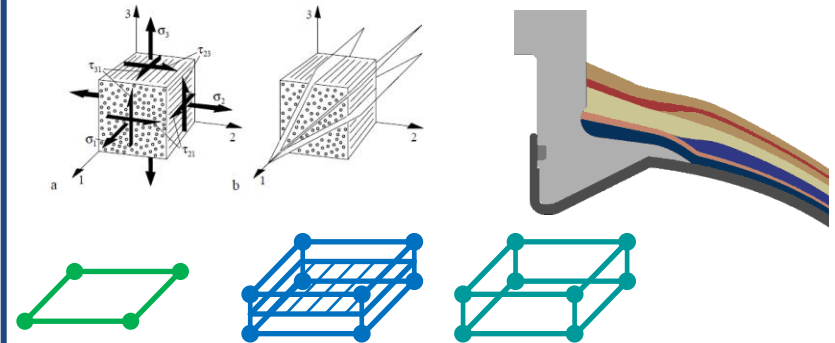
Berstversuch, erzielter Berstdruck: 617 bar



Bauteilbeschreibung



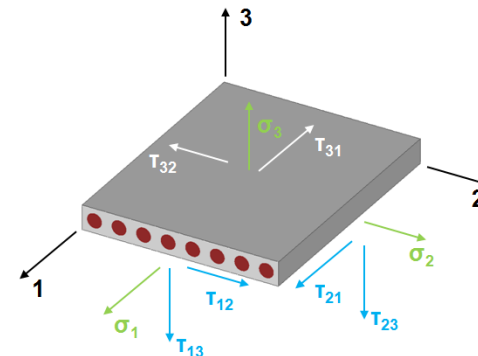
Modellaufbau



Versagensbewertung



Spannungs- und Bruchanalyse



- **Optimierung eines FVK-Behälters aus Endlosfaser praxistauglich**
 - **Input:**
 - Geometrie des Liners
 - Werkstoffdaten der UD-Schicht des Composites
 - Generierung des parametrisierten Modells
 - **Output:**
 - Optimierter Lagenaufbau (hinsichtlich Berstdruck)
 - Festigkeitsnachweis des optimierten Designs
- **Rechenzeit:**
 - **ca. 2 Minuten / Experiment in ABAQUS (Kontaktnichtlinearität)**
 - **gesamte Optimierung: 900 Experimente (ca. 30 Stunden)**
- **Ergebnis:**
 - **Gewichtsreduktion des Composite des Behälters um ca. 15%**

- **Erweiterung auf mehrere Lastfälle möglich**
- **Erweiterung auf Berücksichtigung von hybriden Faser (GFK + CFK)**
- **Änderung Zielfunktion: Behälterkosten statt Gewicht des Composites**
 - **Zusätzliche Nebenbedingungen:**
 - **Erreichung eines minimalen Nutzvolumens (bei vorgegebenem Bauraum)**
 - **Einhaltung eines maximalen Behältergewicht**

Teile der vorliegenden Arbeit stammen aus einem Projekt, das aus Mitteln des Klima- und Energiefonds des Bundes – managed by Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH gefördert und im Rahmen des österreichischen Forschungsprogramms „Neue Energien 2020“ durchgeführt wurde.



Vorgehensweise zur rechnergestützten Strukturoptimierung von faserverstärkten Hochdruckspeichern

F. Ruprechter, G. Kepplinger, F. Schmalhofer,
S. Mohorko

MAGNA STEYR Engineering AG & Co KG

franz.ruprechter@magnasteyr.com

Tel.: +43 316 404 2005