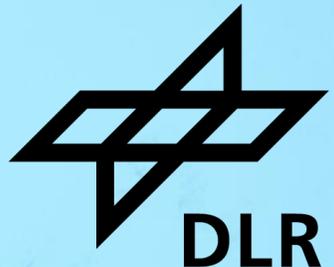


# ZUM UMGANG MIT FERTIGUNGSRESTRIKTIONEN IN DER FERTIGUNG VON WASSERSTOFFTANKS

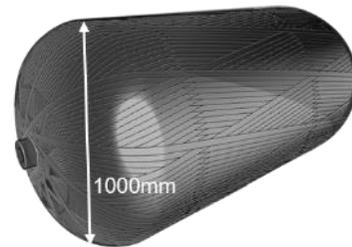
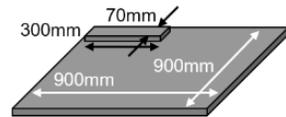
Dr.-Ing. Daniel Stefaniak M.Sc.



# Die Besonderheiten von FKV in zwei Leitsätzen

*Faserkunststoffverbunde werden während der Nutzung geschädigt und Metalle werden durch die Nutzung geschädigt.*

Zwischenfaserbrüche  
nun doch  
„dimensionierend“?



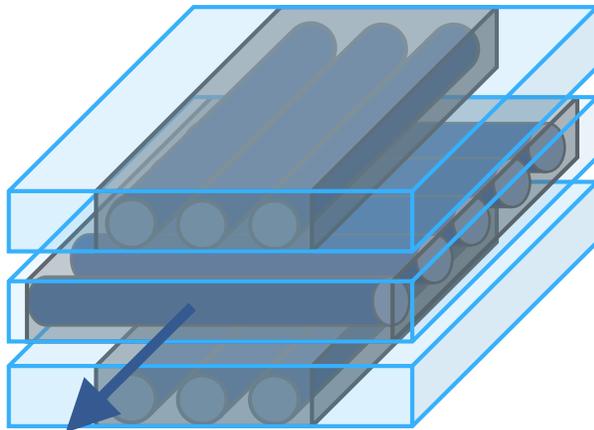
*Material und Bauteil entstehen bei Faserkunststoffverbunden gleichzeitig*

„**hergestelltes Material**“ mit Blick auf  
Schädigungsverhalten und Gaspermeation  
**bauteilunabhängig?**

# Grundprinzip Zwischenfaserbrüche Querzug und Spannungsüberhöhung

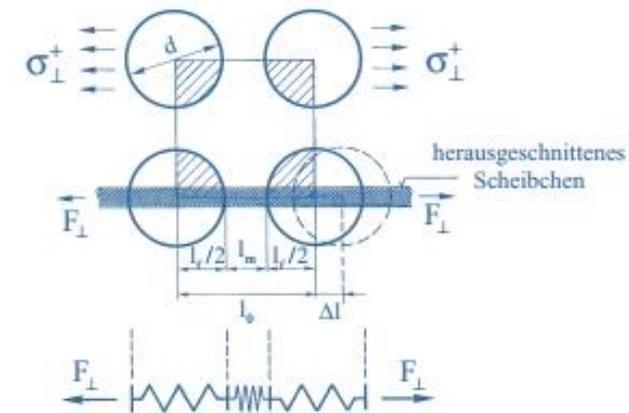
Hohe Querzugspannungen durch:

- Thermale Eigenspannungen durch hohes  $\Delta\alpha$  und  $\Delta T$
- Querkontraktionsbehinderung unter Last

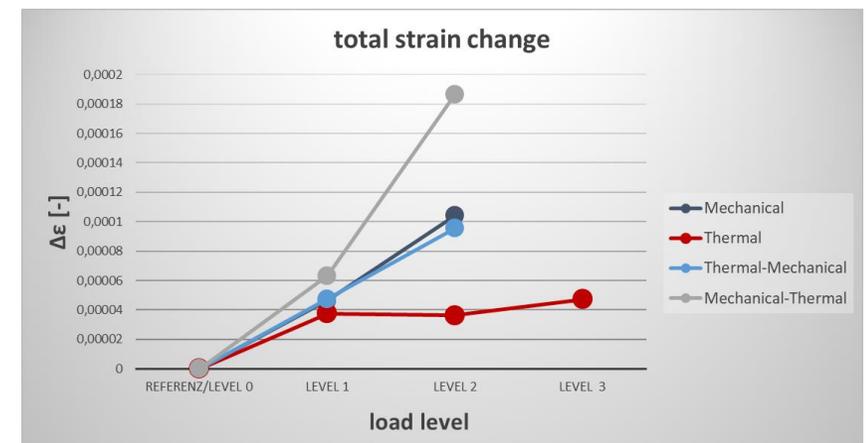
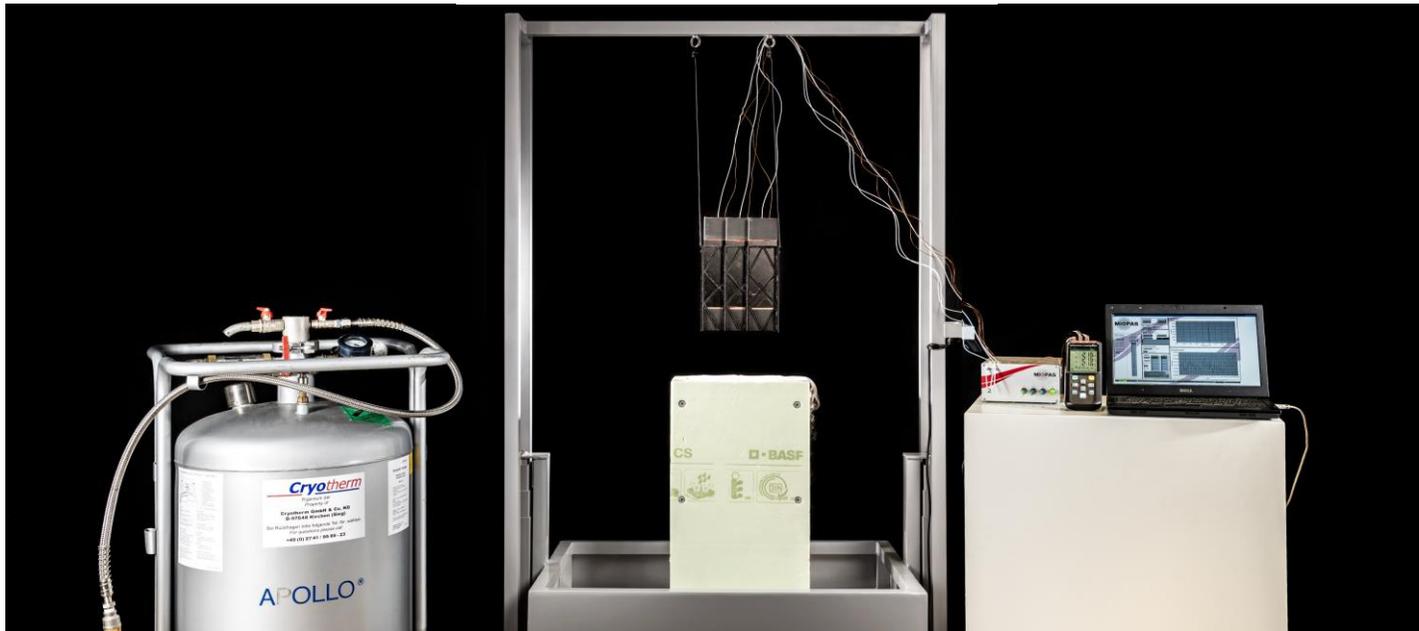
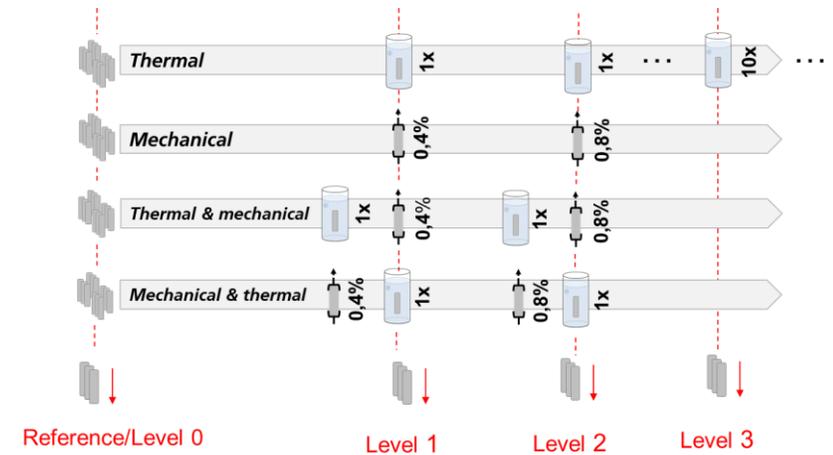
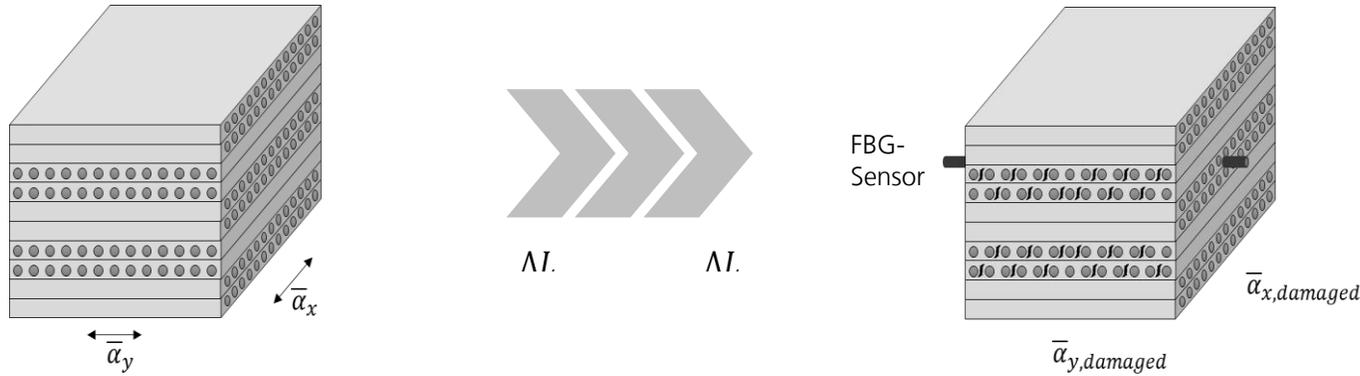


Überhöhung der Querzugdehnungen:

- Gesamtdehnung wird durch Reihenschaltung von Faser und Matrix aufgenommen
- Weniger steife Matrix muss lokal deutlich höhere Dehnungen ertragen



# Grundprinzip Zwischenfaserbrüche: SE2A ICA B - JRP Stefaniak | Permeability assessment for cryogenic applications by means of Fiber-Bragg-Grating sensors



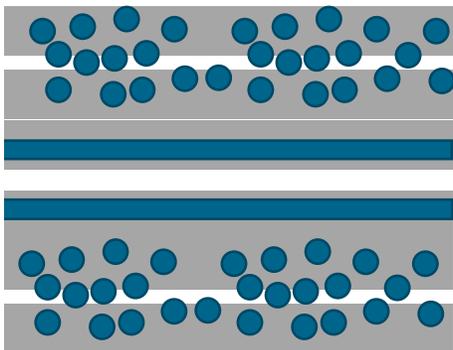
# Wie entsteht das „gefertigte Material“ in der Ebene?

- vakuum-kompaktiert

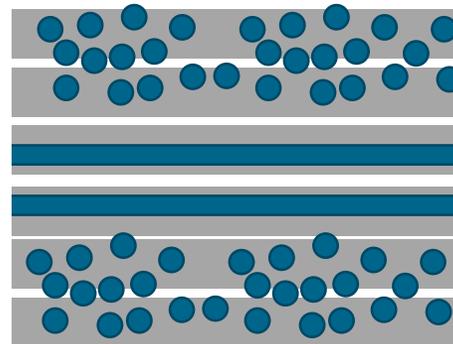
- voll imprägniert
- ausgehärtet
- chemische Reaktions-schwindung in Dickenrichtung ausgeprägt

- Wärmedehnung in Dickenrichtung ausgeprägt

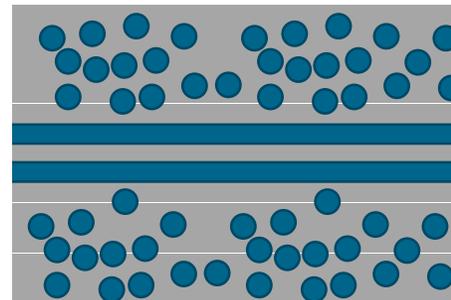
„geliefertes Material“  
abgelegt



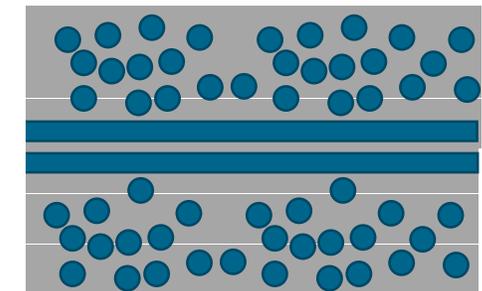
„geliefertes Material“  
kompaktiert



„gefertigtes Material“  
warm



„gefertigtes Material“  
Raumtemperatur



# Wie entsteht das „gefertigte Material“ bspw. im zylindrischen Bereich eines Tanks?

Wärmeausdehnungskoeffizient Werkzeug

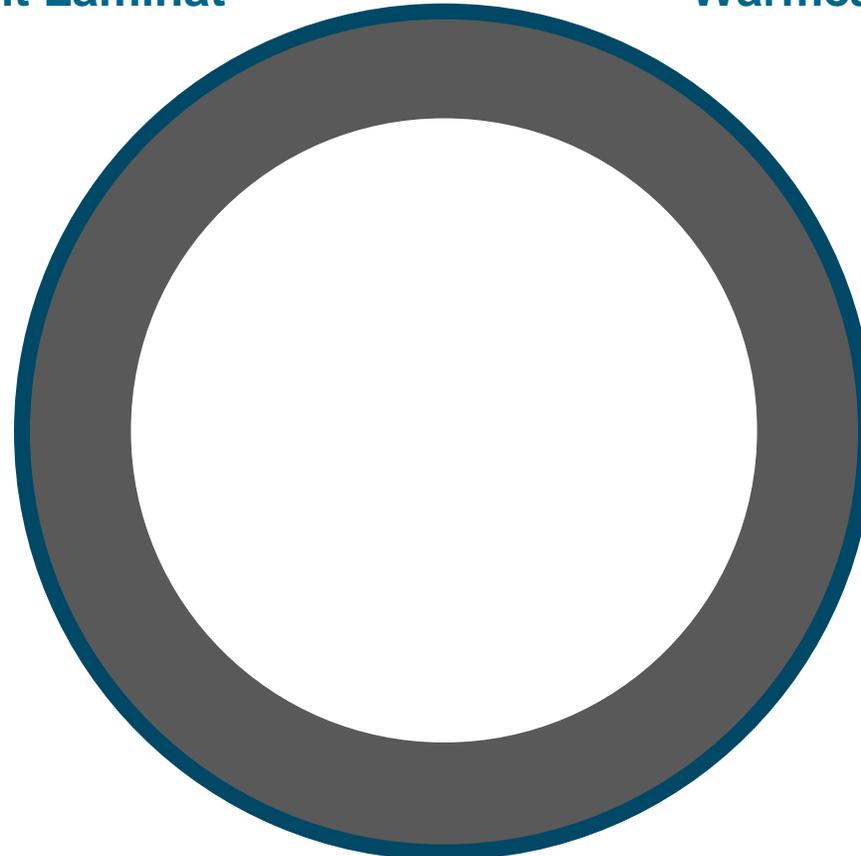
>

Wärmeausdehnungskoeffizient Laminat  
(Umfangsrichtung)

Wärmeausdehnungskoeffizient Werkzeug

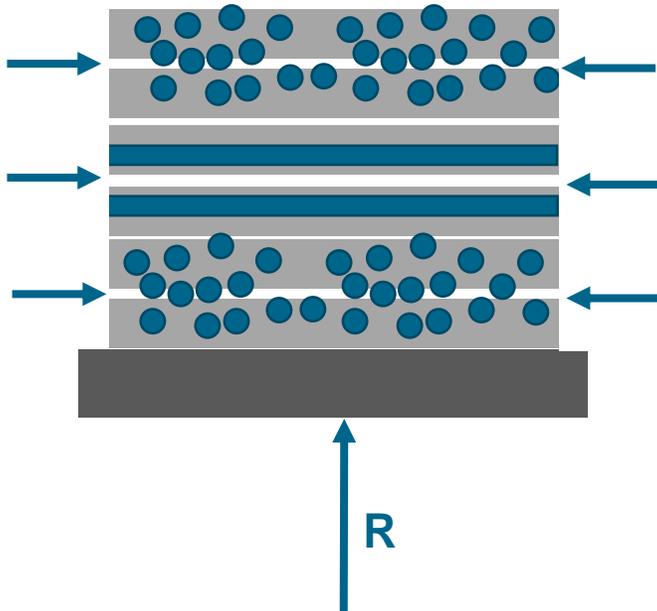
=

Wärmeausdehnungskoeffizient Laminat  
(Umfangsrichtung)

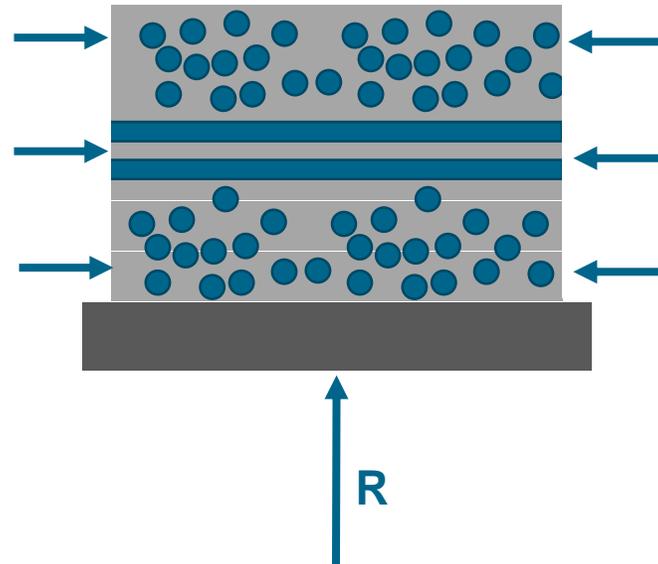


# Wie entsteht das „gefertigte Material“ bspw. im zylindrischen Bereich eines Tanks?

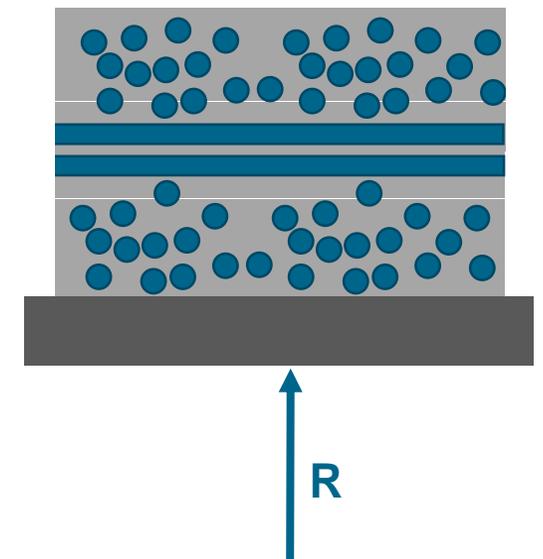
„geliefertes Material“  
kompaktiert



„gefertigtes Material“  
warm



„gefertigtes Material“  
Raumtemperatur



# Offensichtliche Materialunterschiede im Zylinder (im Vergleich zur ebenen Probe)



Mögliche Einflussfaktoren auf wesentliche mechanische Charakteristika (Steifigkeit, Festigkeit):

- Faservolumengehalt weicht evtl. ab
- Ondulationen reduzieren Steifigkeit und Festigkeit
- Fertigungseigenstressungen auf anderem Niveau als in der Ebene

Mögliche Einflussfaktoren auf die Ausbildung von Zwischenfaserbrüchen:

- Veränderte Querspannung durch Fertigungseigenstressungen
- Inhomogene Faserverteilung durch Ondulationen → Einfluss Dehnungsüberhöhung

# Die Besonderheiten von FKV in zwei Leitsätzen



**Besseres  
Verständnis der  
resultierenden  
Laminatarchitektur  
benötigt!**

*Faserkunststoffverbunde werden während  
der Nutzung geschädigt und Metalle werden  
durch die Nutzung geschädigt.*

Zwischenfaserbrüche  
nun doch  
„dimensionierend“?

*Material und Bauteil entstehen bei  
Faserkunststoffverbunden gleichzeitig*

„**hergestelltes Material**“ mit Blick auf  
Schädigungsverhalten und Gaspermeation  
**bauteilunabhängig?**

# Beispielhafte Einflussparameter (Material Coupon $\neq$ Material Zylinder)

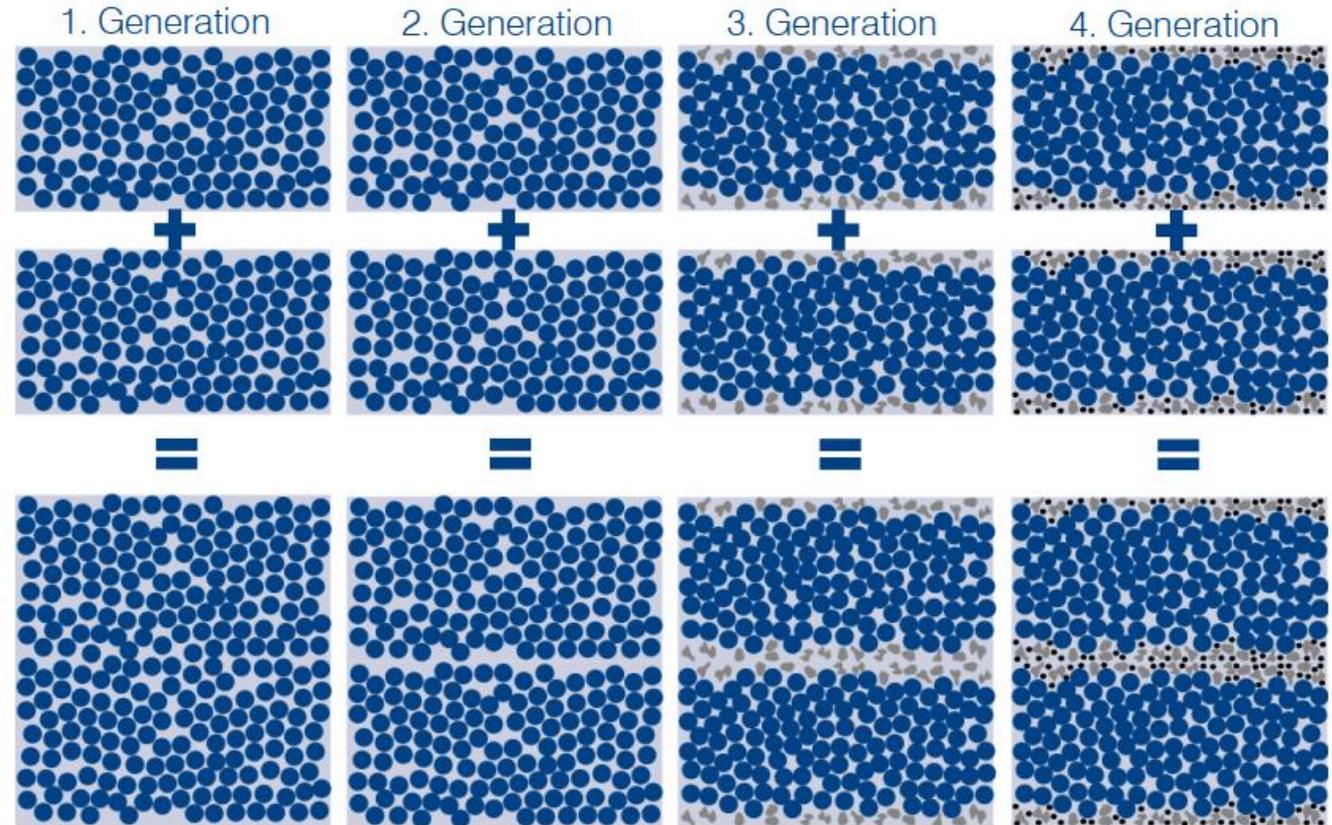


Einflussparameter, die in diesem Betrachtungsfall dazu führen, dass die Materialeigenschaften einer ebenen Platte und eines Zylinder nicht identisch sind, werden im Folgenden gegliedert nach:

- Material („Lieferzustand Prepreg“)
- Ablage
- Aushärtung

# Beispielhafte Einflussparameter beim Material (Material Coupon $\neq$ Material Zylinder)

Material nicht wie vorher  
gezeigt ohne „Interleafed  
Toughening“ sondern  
vermutlich 3. oder 4.  
Generation.



Matrix



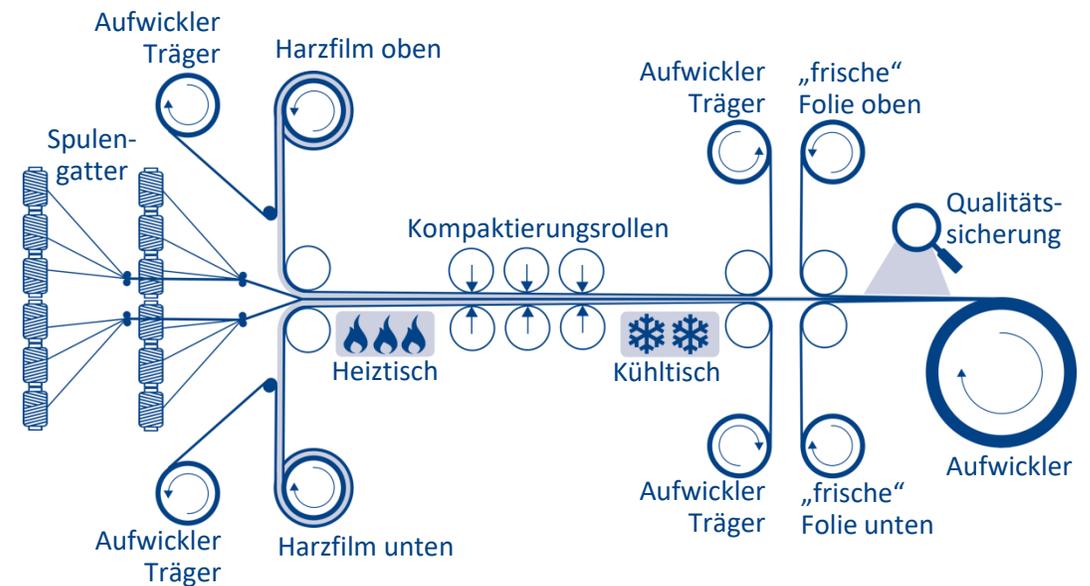
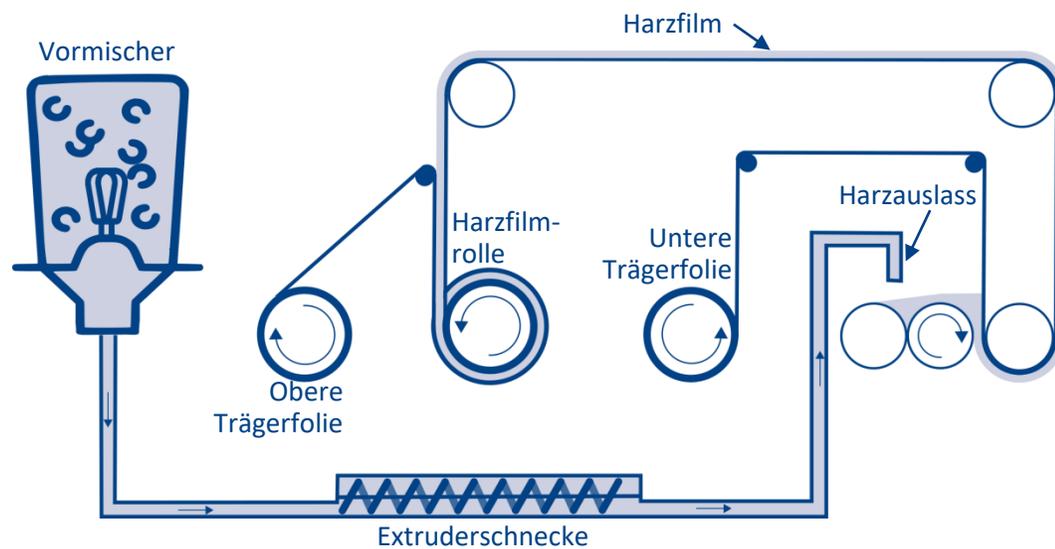
Faserquerschnitt

• Thermoplastischer Partikel

• Elektrisch leitfähiger Füllstoff

# Beispielhafte Einflussparameter beim Material (Material Coupon $\neq$ Material Zylinder)

Modernes UD-Prepreg aus  
Hot-Melt Verfahren hat  
Imprägnierungsgrad  $< 1$ .

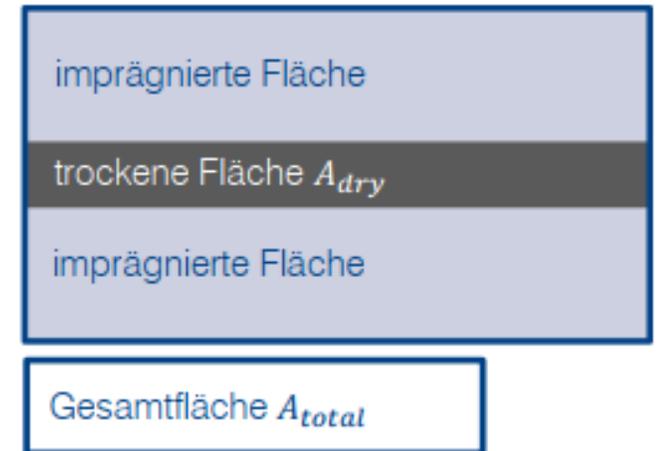
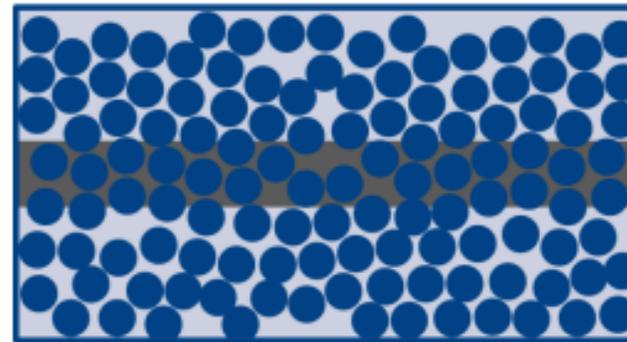


# Beispielhafte Einflussparameter beim Material (Material Coupon $\neq$ Material Zylinder)

Modernes UD-Prepreg aus Hot-Melt Verfahren hat Imprägnierungsgrad  $< 1$ .

Geringer Imprägnierungsgrad geht mit einem hohem Kompaktierungsfaktor („bulk ratio“) einher. Der Kompaktierungsfaktor  $\beta$  beschreibt das Verhältnis der Dicke der ausgehärtete Lage  $t_c$  und der initialen Dicke  $t_i$ .

$$\beta = \frac{t_i}{t_c}$$



$$DOI = 1 - \frac{A_{dry}}{A_{total}}$$

# Beispielhafte Einflussparameter beim Material (Material Coupon $\neq$ Material Zylinder)



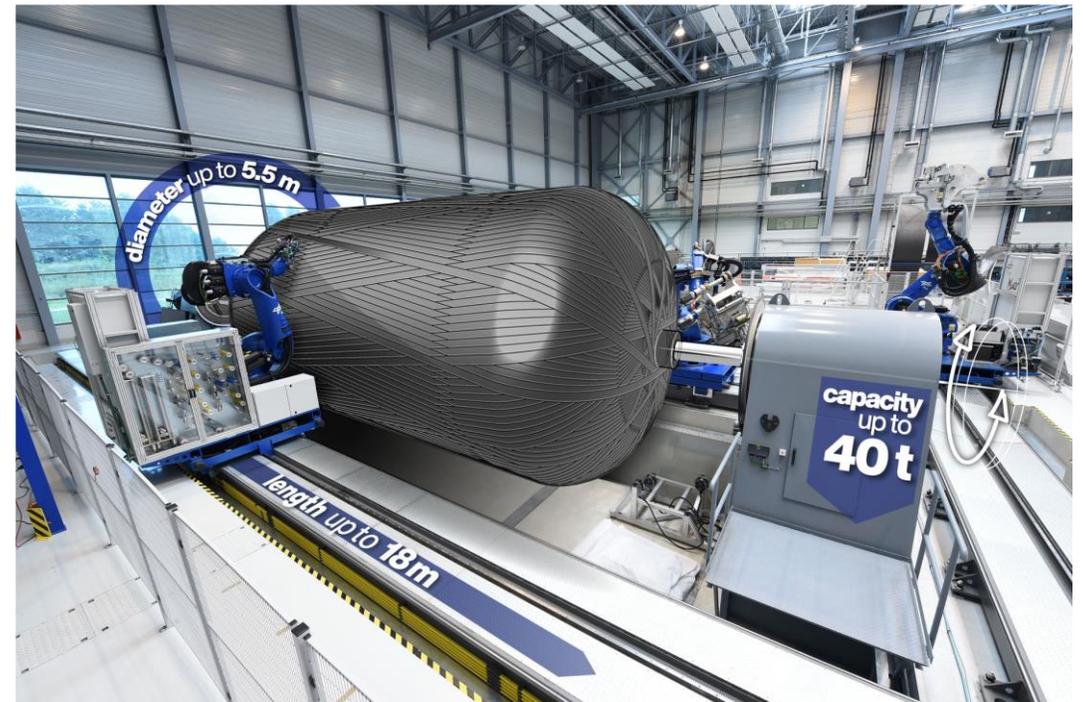
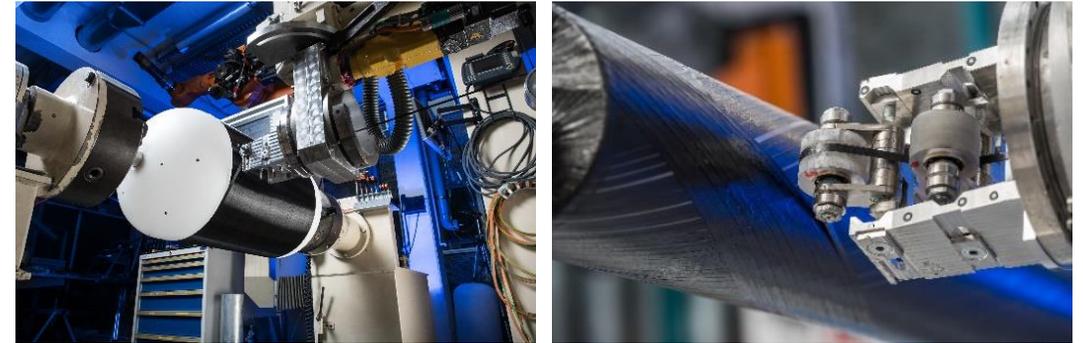
- Kompaktierungsverhalten / Kompaktierungsgrad
  - Imprägnierungsgrad (auch Viskositätsverlauf über Zeit)
  - Reaktionsschwindung (auch Schwindungsverlauf über Zeit)
- Filamentdurchmesser
- Filamentverteilung und Ausrichtung
  - Einzellagendicke
  - Eigenschaften „Interleafed Toughening“
  - Faserarchitektur

**Laminatarchitektur**  
**„geliefertes Material“**

- Wärmeausdehnungskoeffizienten Einzellagen (eben und Dickenrichtung)
- Entgasungsverhalten (insbesondere aufgrund des verlängerten Transportweges in der Ebene)
- Tack und die daraus resultierende maximal realisierbare Vorspannung bei der Ablage kürzerer Abschnitte
- Kleinster Steering-Radius

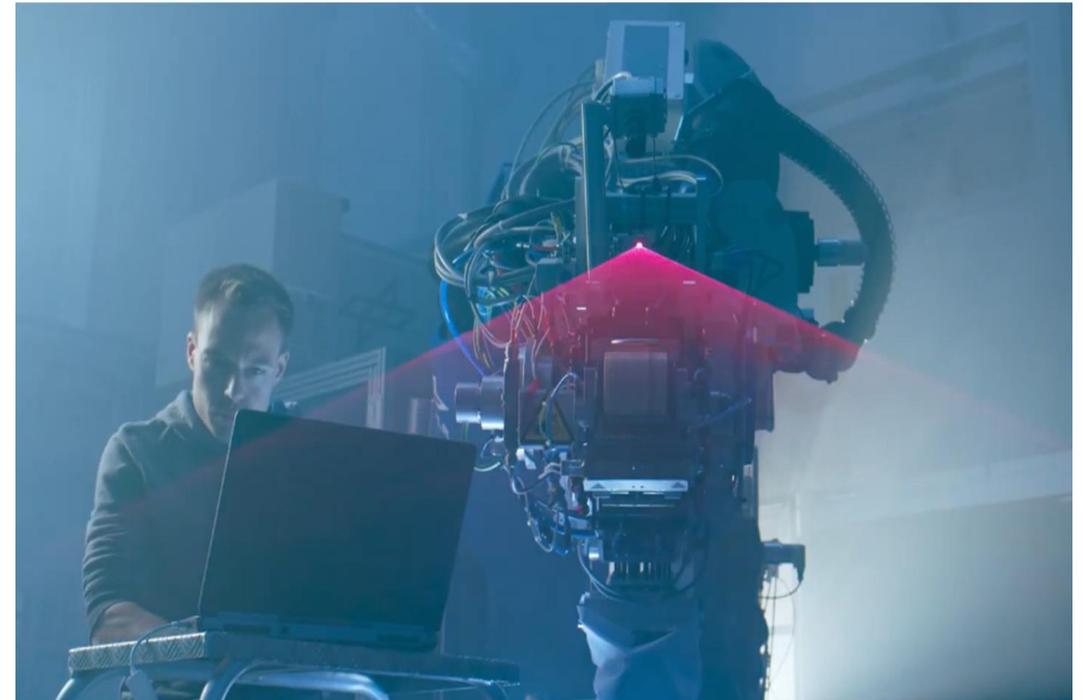
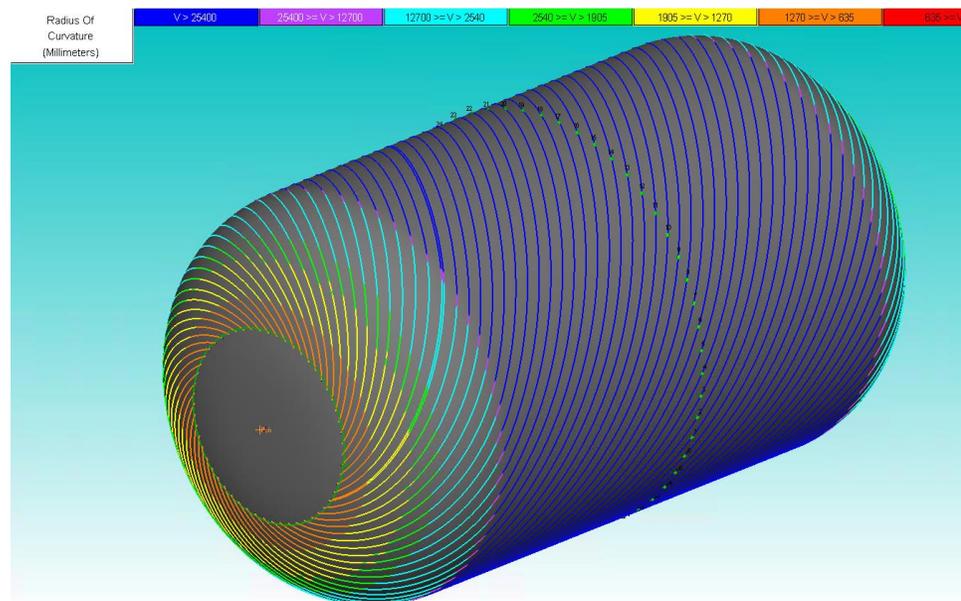
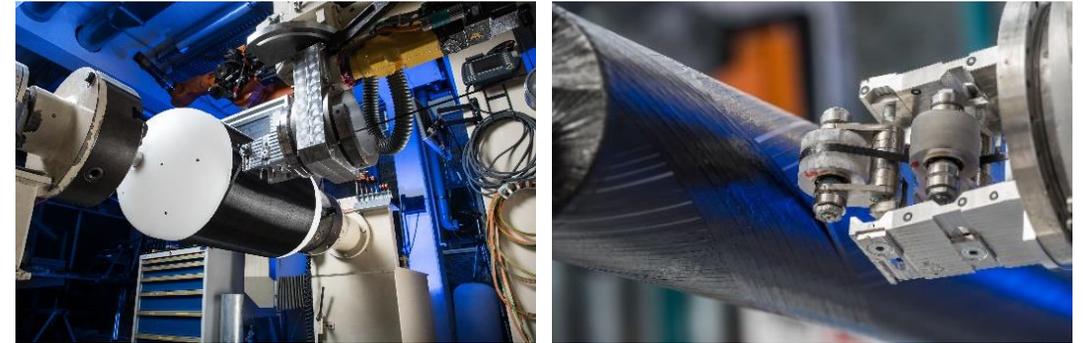
# Beispielhafte Einflussparameter bei der Ablage (Material Coupon $\neq$ Material Zylinder)

- Anpressdruck und Vorspannung (Wickeln vs. Ablage)
- Online-Prozessüberwachung (zunächst zur Sicherstellung der Nachverfolgbarkeit)
- Sensitivitätsanalysen zu Belegungsstrategien und Gestaltung



# Beispielhafte Einflussparameter bei der Ablage (Material Coupon $\neq$ Material Zylinder)

- Anpressdruck und Vorspannung (Wickeln vs. Ablage)
- Online-Prozessüberwachung (zunächst zur Sicherstellung der Nachverfolgbarkeit)
- Sensitivitätsanalysen zu Belegungsstrategien und Gestaltung



# Beispielhafte Einflussparameter bei der Ablage (Material Coupon $\neq$ Material Zylinder)



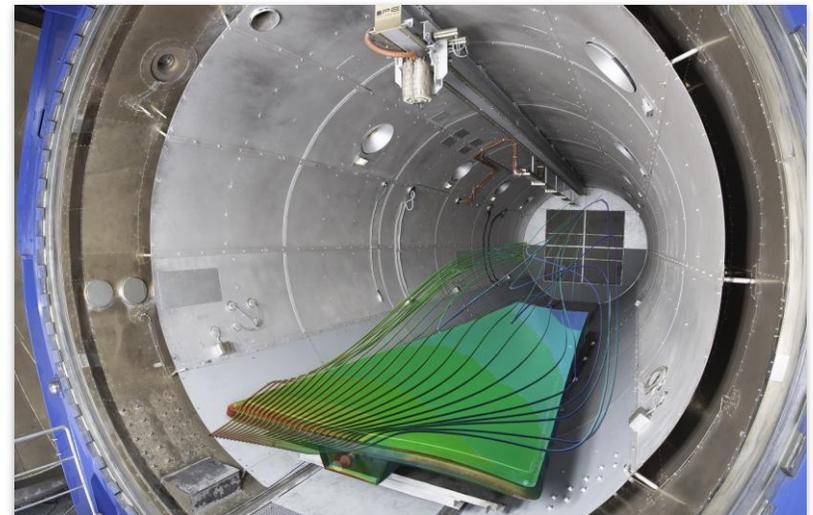
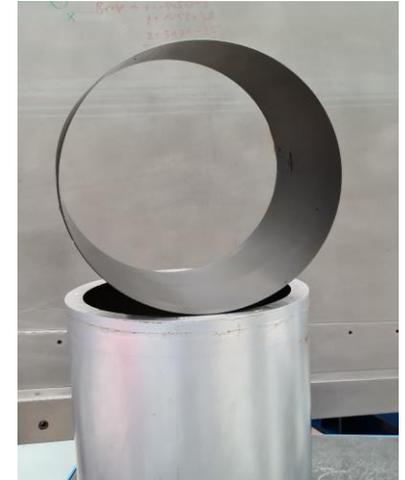
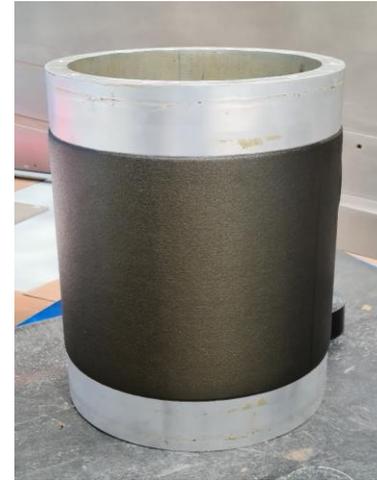
- Anpressdruck und Vorspannung
- Kompaktierungsstrategie
  - Häufigkeit und Dauer der Vakuumkompaktierung
- Belegungsstrategien (die sich mit Rundachse anwenden lassen)
- Tape-Breite
- zulässige maximale Gap-Breite vs. durchschnittliche Gap-Breite
- Gestaltung Übergangsbereich Dom-Zylinder
- zulässige Faserwinkelabweichung
- Wärmeeintrag
- andere Fertigungsdefekte
- (Domkappenausschnitt)

**Laminatarchitektur**  
**„abgelegtes Material“**

# Beispielhafte Einflussparameter bei der Aushärtung (Material Coupon $\neq$ Material Zylinder)

- Wärmeausdehnungskoeffizient und Steifigkeit Formwerkzeug
- Druck- und Temperaturzyklus
  - Smart-Cure-Cycles
  - Überwachung Aushärtegrad
- Modifikation der Eigenspannungen durch konstruktive Maßnahmen bei Formwerkzeug und Hilfsstoffen
- Temperaturverteilung im Bauteil

Laminat-  
architektur  
„gefertigtes Material“



# Parameter in unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien

## Beispiel Bulge-Test

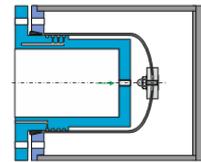
Sub/Full-scale

Durchmesser bis zu 5 m



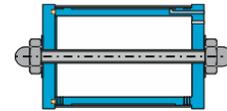
Sub-Scale II (doppelt gekrümmte Prüfkörper)

Durchmesser ~400 mm

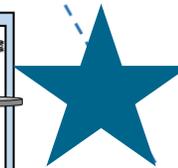
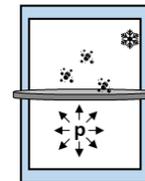
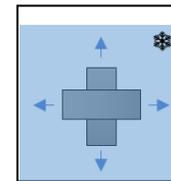
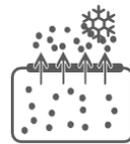


Sub-Scale I (einfach gekrümmte Prüfkörper)

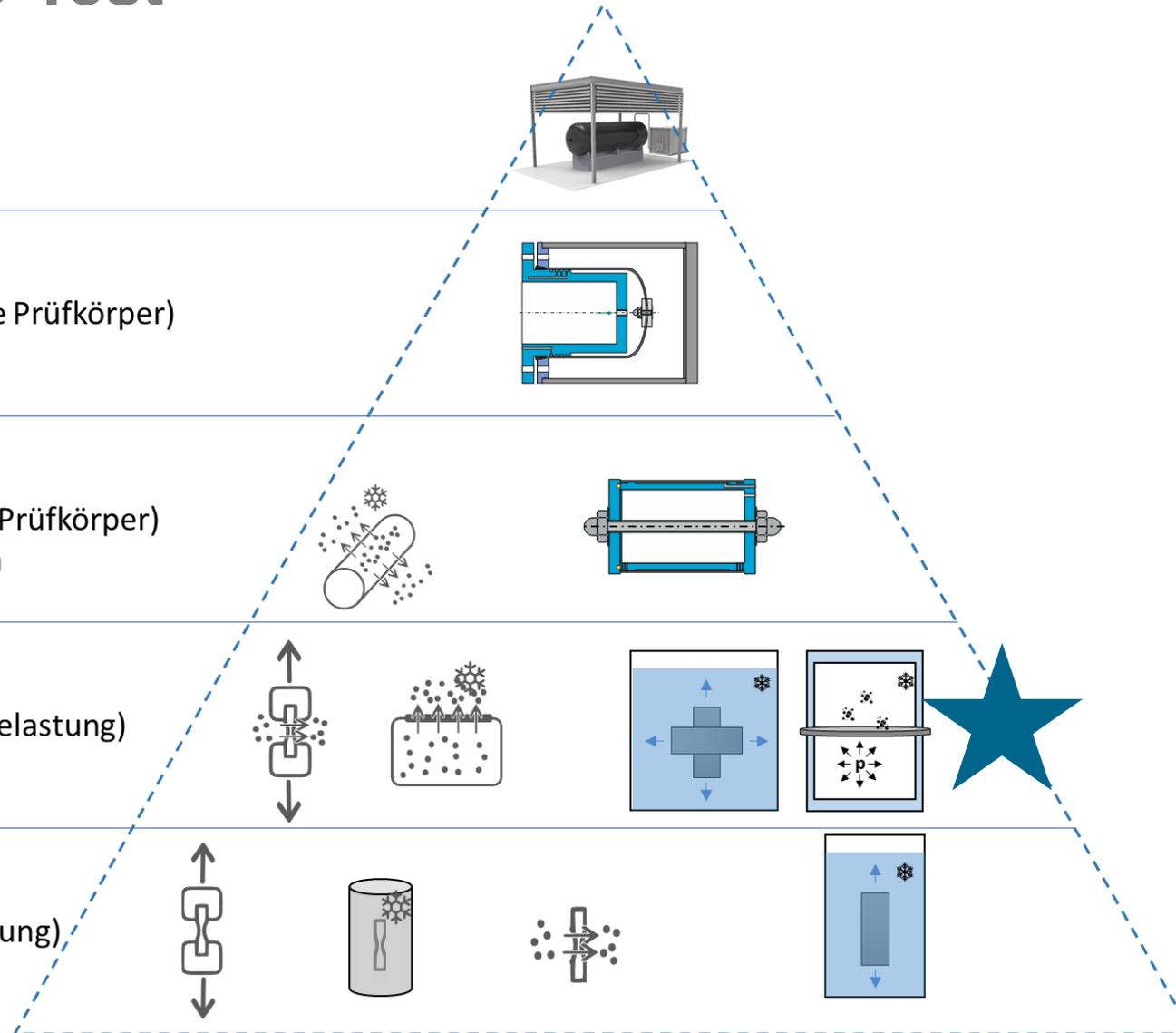
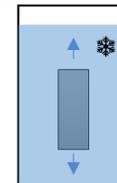
Durchmesser 150 mm – 400 mm



Coupon-Ebene II (kombinierte Belastung)

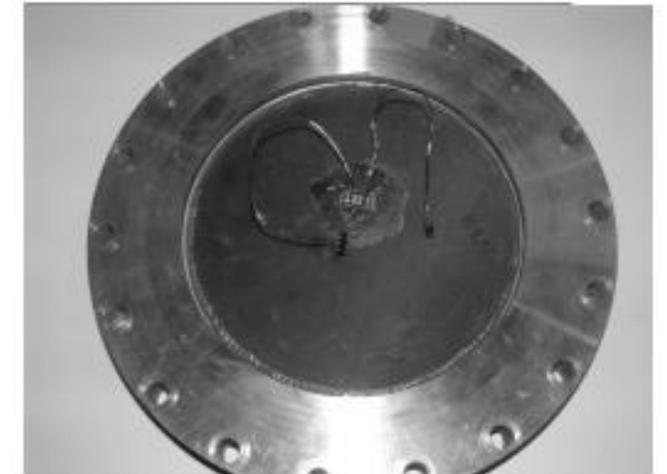
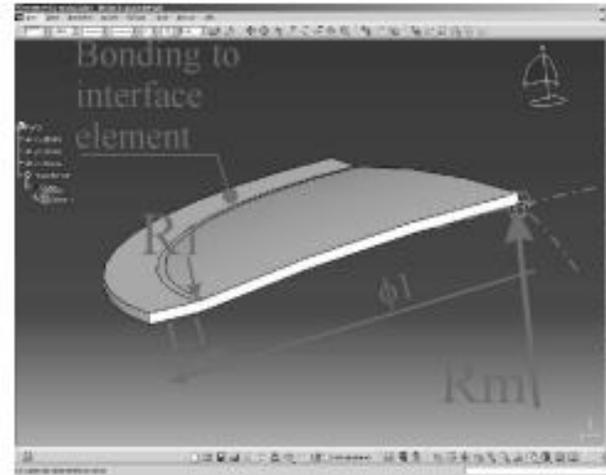
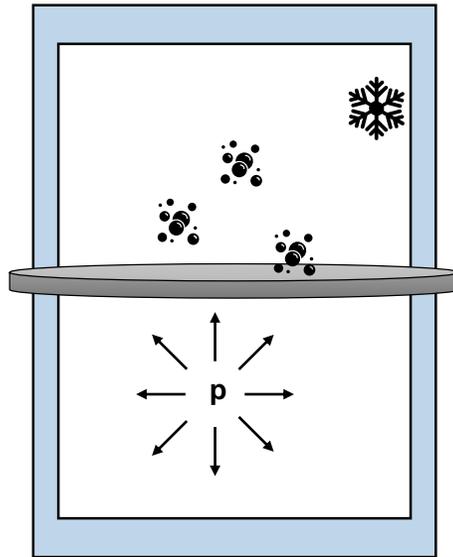


Coupon-Ebene I (isolierte Belastung)



# Parameter in unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien

## Beispiel Bulge-Test

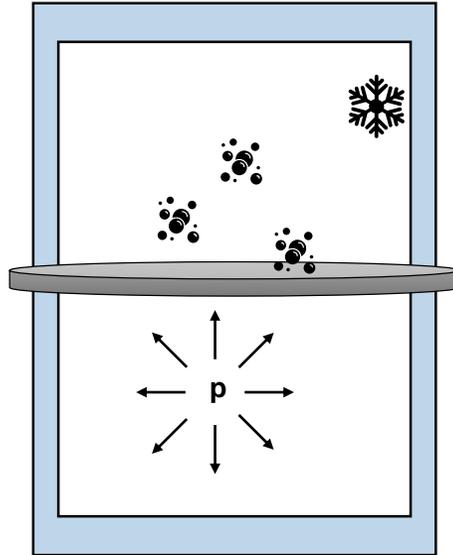


Raffaelli 2006

- Geometrie: repräsentativ für Dombereich
  - Temperatur:  $LN_2$  statt  $LH_2$
  - Permeat:  $He_4$  statt  $H_2$
  - Spannungszustand:
  - Druckdifferenz Permeat:
- } bedingen sich gegenseitig (hohe Spannungen an kleinem Ausschnitt bedingen hohe Drücke)

# Parameter in unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien

## Beispiel Bulge-Test



- Geometrie: repräsentativ für Dombereich
  - Temperatur:  $\text{LN}_2$  statt  $\text{LH}_2$
  - Permeat:  $\text{He}_4$  statt  $\text{H}_2$
  - Spannungszustand:
  - Druckdifferenz Permeat:
- } bedingen sich gegenseitig (hohe Spannungen an kleinem Ausschnitt bedingen hohe Drücke)

- Material: keine Restriktionen
- Belegungsstrategie: weitestgehend abbildbar
- Vorspannung: nur bedingt abbildbar
- Kompaktierungsverhalten: aufgrund fehlender geometrischer Restriktionen nicht repräsentativ
- Entgasungsverhalten: aufgrund offener Kanten nicht repräsentativ
- Eigenspannungen: Interaktion mit Formwerkzeug nicht repräsentativ



**Wie repräsentativ  
ist Dein  
Prüfkörper??**

# Projekte, die auch die Fertigungsrestriktionen beinhalten



- NiFö HyStor



- LuFo6.2 ZEIT



- LuFo6.3 TACOMA



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
Verbundprozesstechnologien  
Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP®)  
Ottenbecker Damm 12  
21684 Stade

Dr.-Ing. Daniel Stefaniak M.Sc.  
Abteilungsleiter | Leiter ZLP® Stade  
Telefon 0531 295-3700  
[daniel.stefaniak@dlr.de](mailto:daniel.stefaniak@dlr.de)  
[www.DLR.de](http://www.DLR.de)

**Vielen Dank für das Interesse und die Unterstützung!**