

CFK-PROZESSSIMULATION.

KOPPLUNG VON DRAPIER- UND VERZUGSSIMULATION ZUR VERBESSERUNG DER GEOMETRIEPROGNOSE VON CFK-BAUTEILEN.



Christoph Amann | 13.03.2017

**BMW
GROUP**

THE NEXT
100 YEARS



GLIEDERUNG.

- Einleitung.
- Prozesssimulation Nasspressen.
 - Drapierung.
 - Verzug.
 - Mapping.
- Einfluss der Faserumorientierung am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Einfluss der Faserspannungen am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Zusammenfassung und Ausblick.

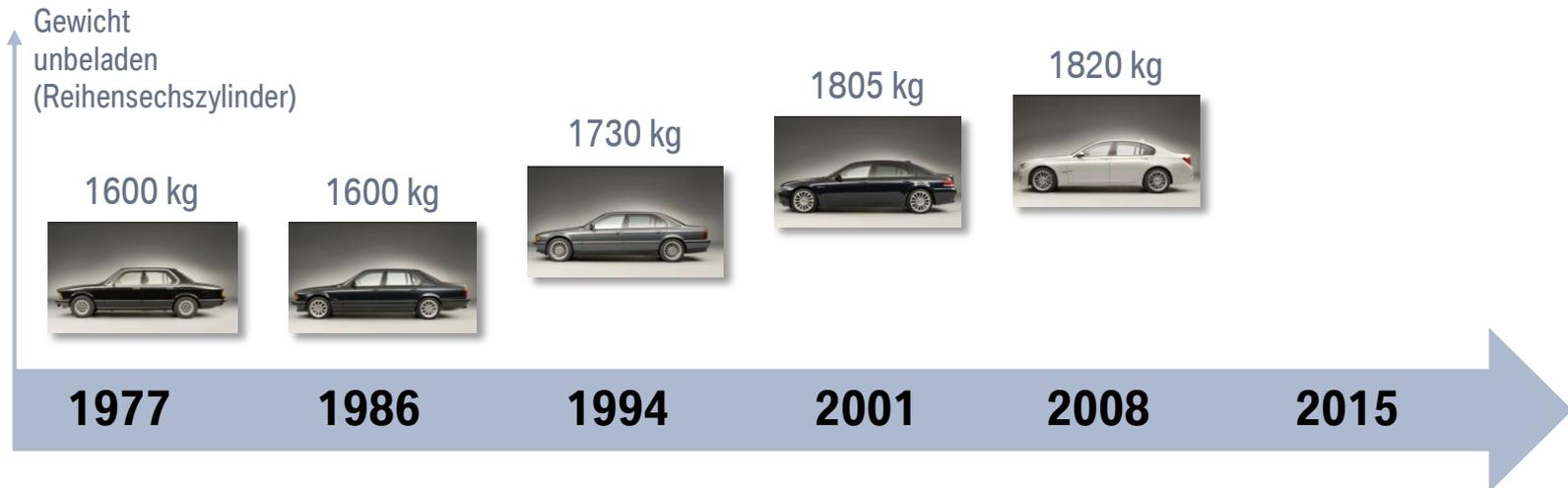
GLIEDERUNG.

- **Einleitung.**
- Prozesssimulation Nasspressen.
 - Drapierung.
 - Verzug.
 - Mapping.
- Einfluss der Faserumorientierung am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Einfluss der Faserspannungen am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Zusammenfassung und Ausblick.

EINLEITUNG. ENTWICKLUNG FAHRZEUGGEWICHT.

Zeitliche Entwicklung Fahrzeuggewicht am Beispiel der BMW 7er Reihe:

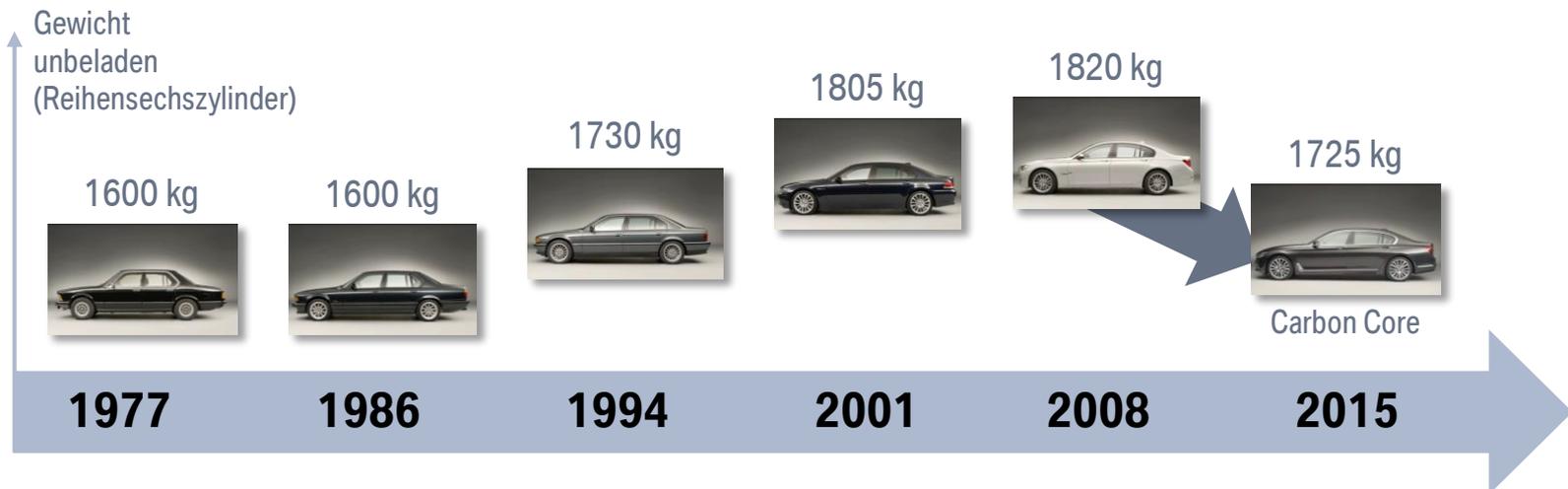
- Gewichtszuwachs durch erhöhte Anforderungen an aktive und passive Sicherheit sowie Komfort.



EINLEITUNG. ENTWICKLUNG FAHRZEUGGEWICHT.

Zeitliche Entwicklung Fahrzeuggewicht am Beispiel der BMW 7er Reihe:

- Gewichtszuwachs durch erhöhte Anforderungen an aktive und passive Sicherheit sowie Komfort.



- Leichtbau als Kompensation für Gewichtszunahme im Automobilbau.
- Ziele: Verringerung der Schadstoff-Emissionen, Verbesserung der Fahrdynamik, etc.
- Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) mit vorteilhaften Eigenschaften wie z.B. hoher spezifischer Festigkeit R_m / ρ .

EINLEITUNG. NASSPRESSVERFAHREN.

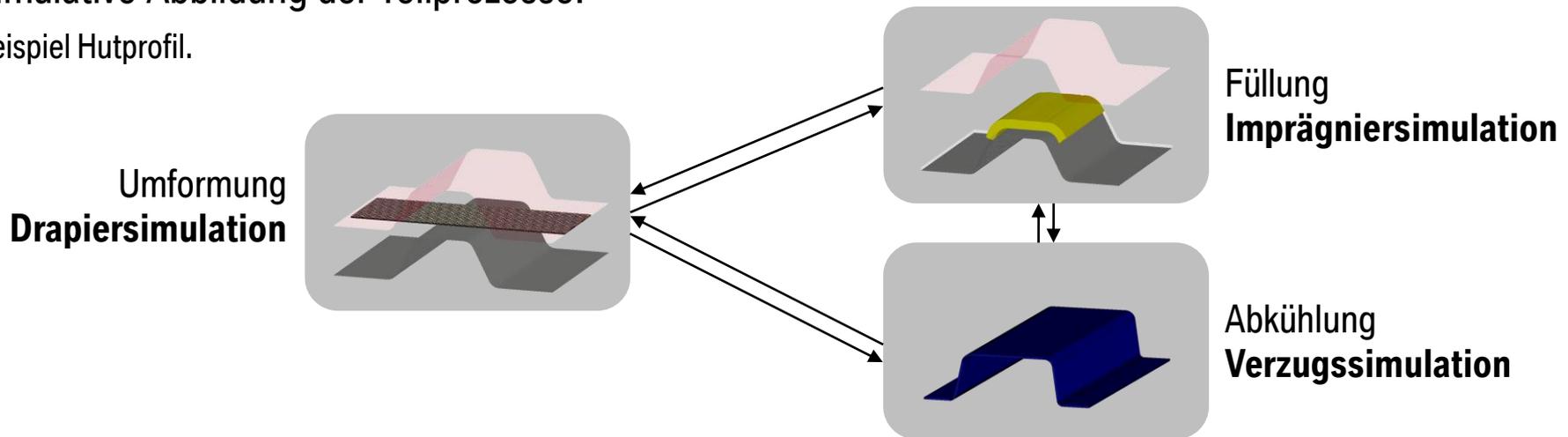


EINLEITUNG. NASSPRESSVERFAHREN – PROZESSSIMULATION.



Simulative Abbildung der Teilprozesse:

Beispiel Hutprofil.



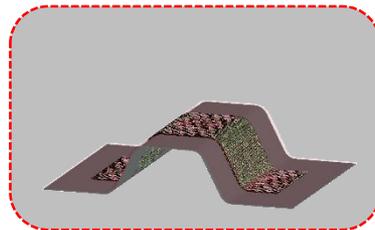
EINLEITUNG. NASSPRESSVERFAHREN – PROZESSSIMULATION.



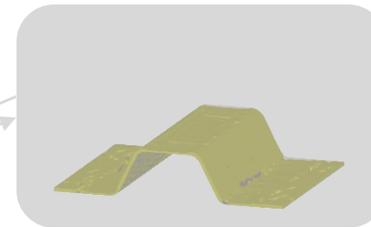
Simulative Abbildung der Teilprozesse:

Beispiel Hutprofil.

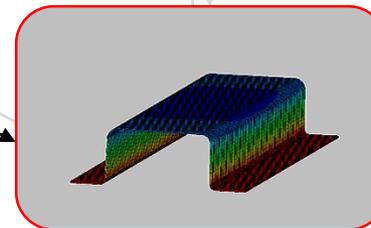
Umformung
Drapiersimulation



Faserumorientierung,
Faserspannungen



Füllung
Imprägniersimulation



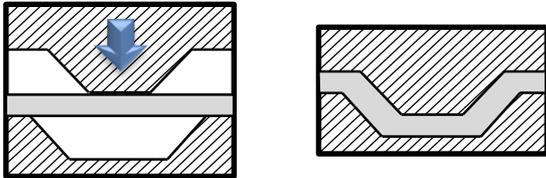
Abkühlung
Verzugssimulation

GLIEDERUNG.

- Einleitung.
- **Prozesssimulation Nasspressen.**
 - **Drapierung.**
 - Verzug.
 - Mapping.
- Einfluss der Faserumorientierung am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Einfluss der Faserspannungen am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Zusammenfassung und Ausblick.

PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIMULATION – MOTIVATION.

Formgebende Operation „trockenes“ Halbzeug



Herausforderung:

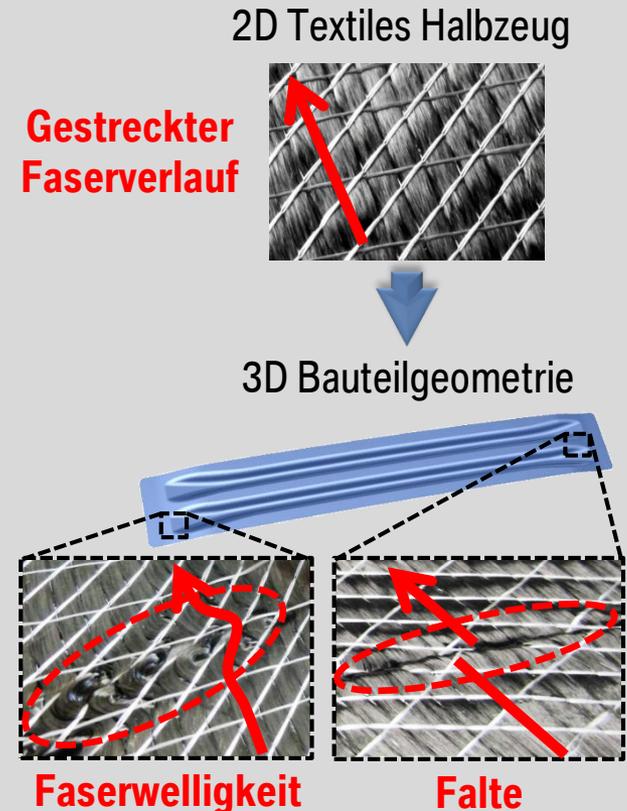
Formänderung kann zur Abweichung vom gestreckten Faserverlauf führen.

→ **Nichterfüllung funktionaler Bauteilanforderungen.**

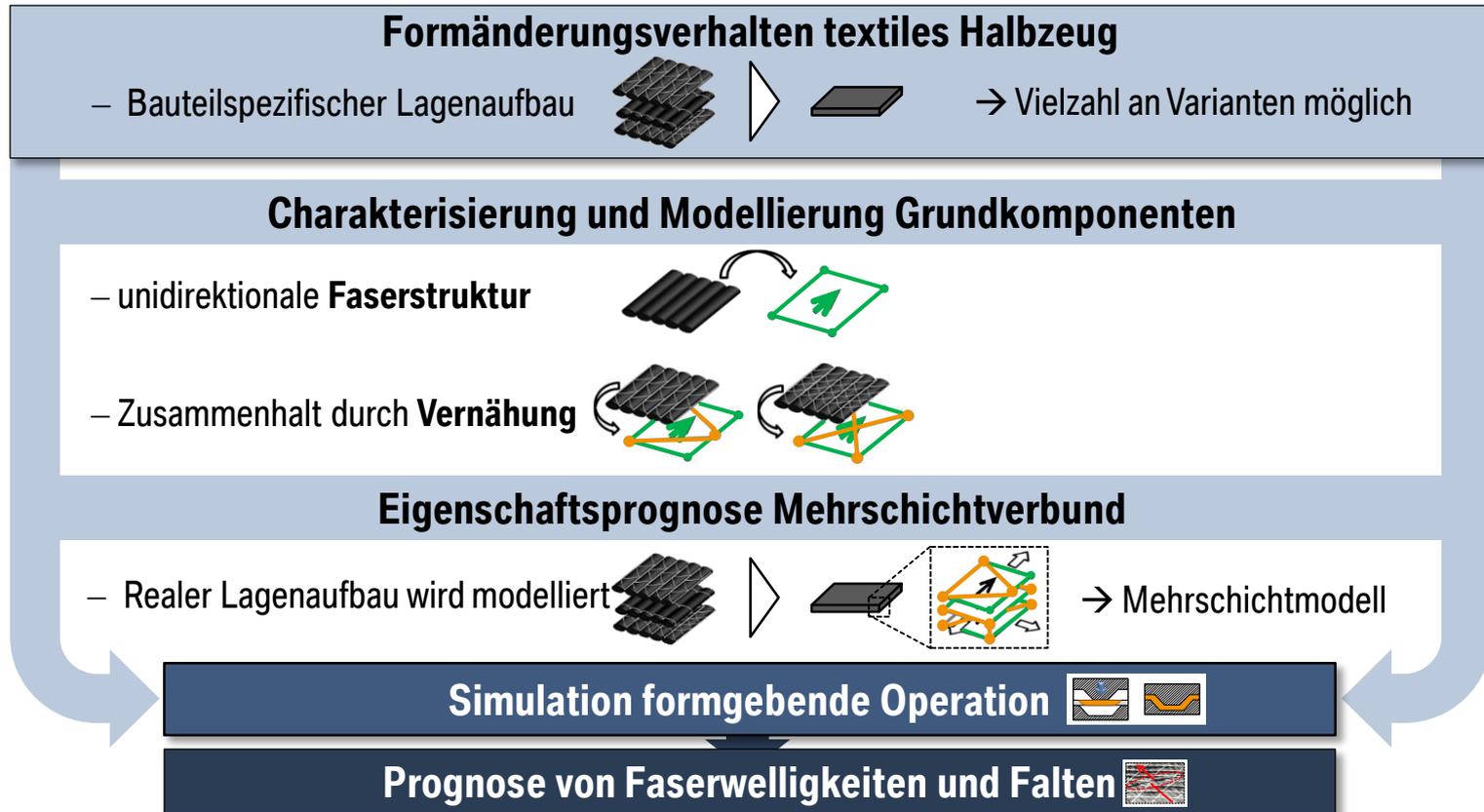
Motivation:

Prognose von Faserwelligkeiten und Falten.

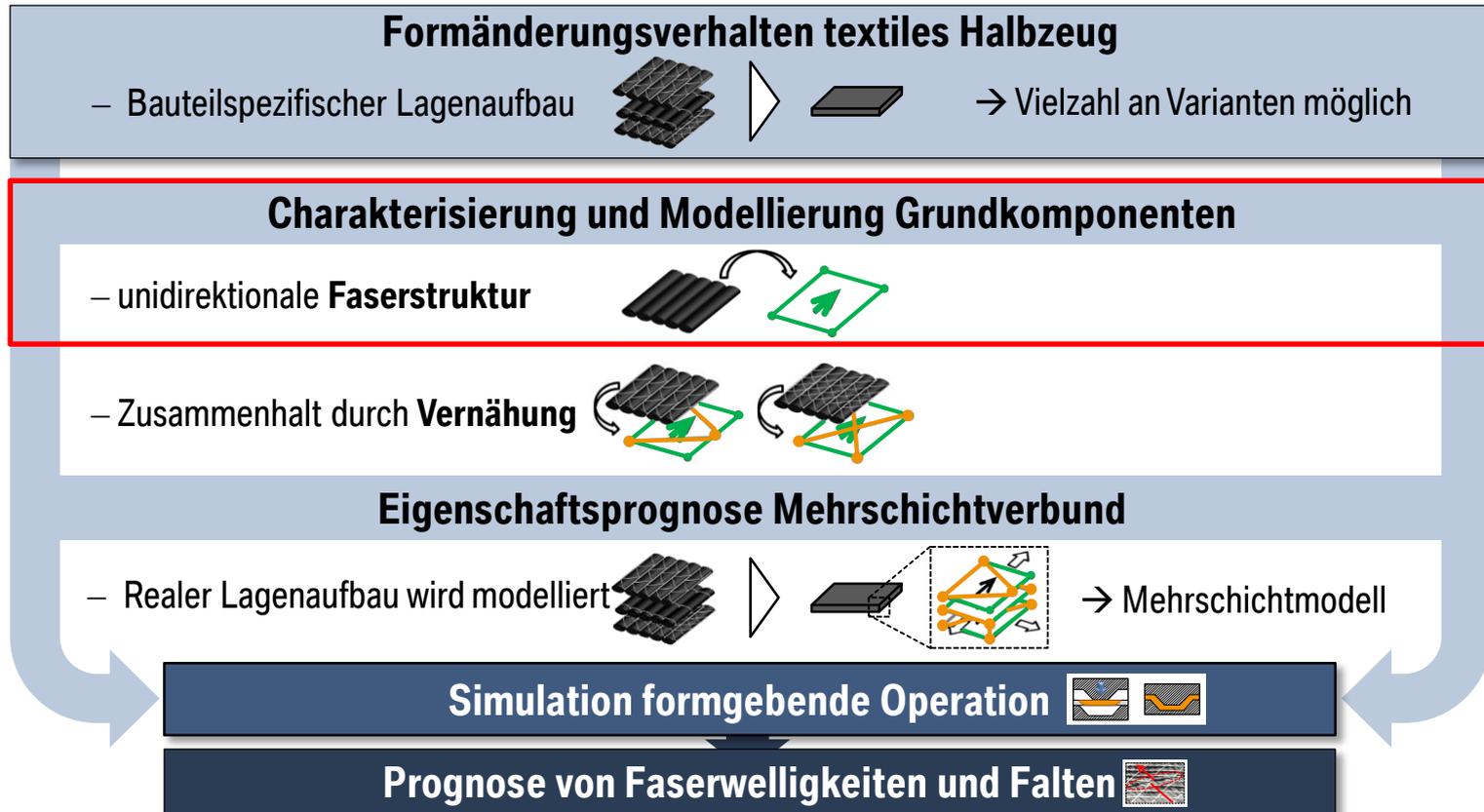
→ **Virtuelle Absicherung der formgebenden Operation.**



PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIMULATION – VORGEHENSWEISE.



PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIMULATION – VORGEHENSWEISE.

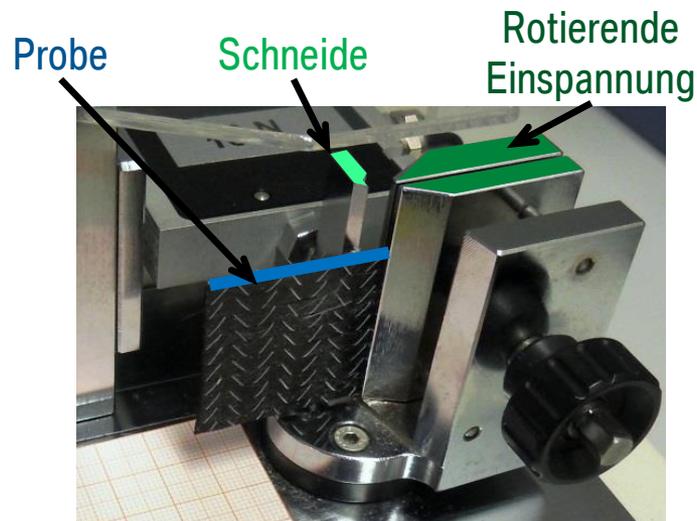


PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIM. – MODELLIERUNG DER FASERSTRUKTUR.

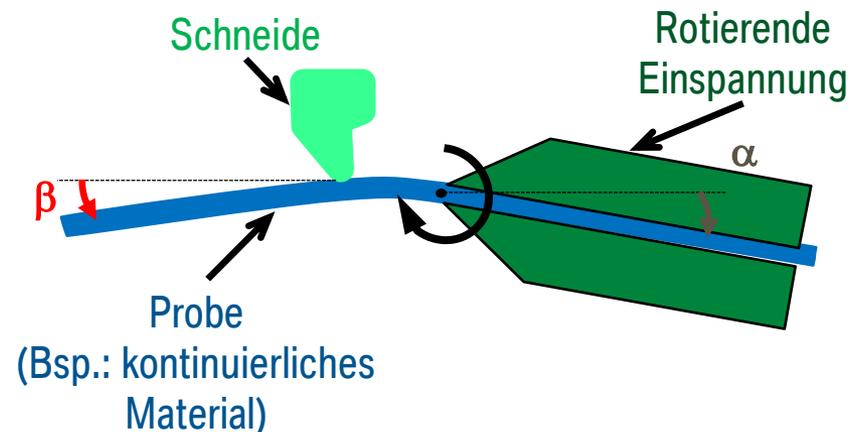
Biegeverhalten bildet wichtige Einflussgröße auf die Faltenprognose [1].

Untersuchung anhand eines Zwei-Punkt-Biegeversuches:

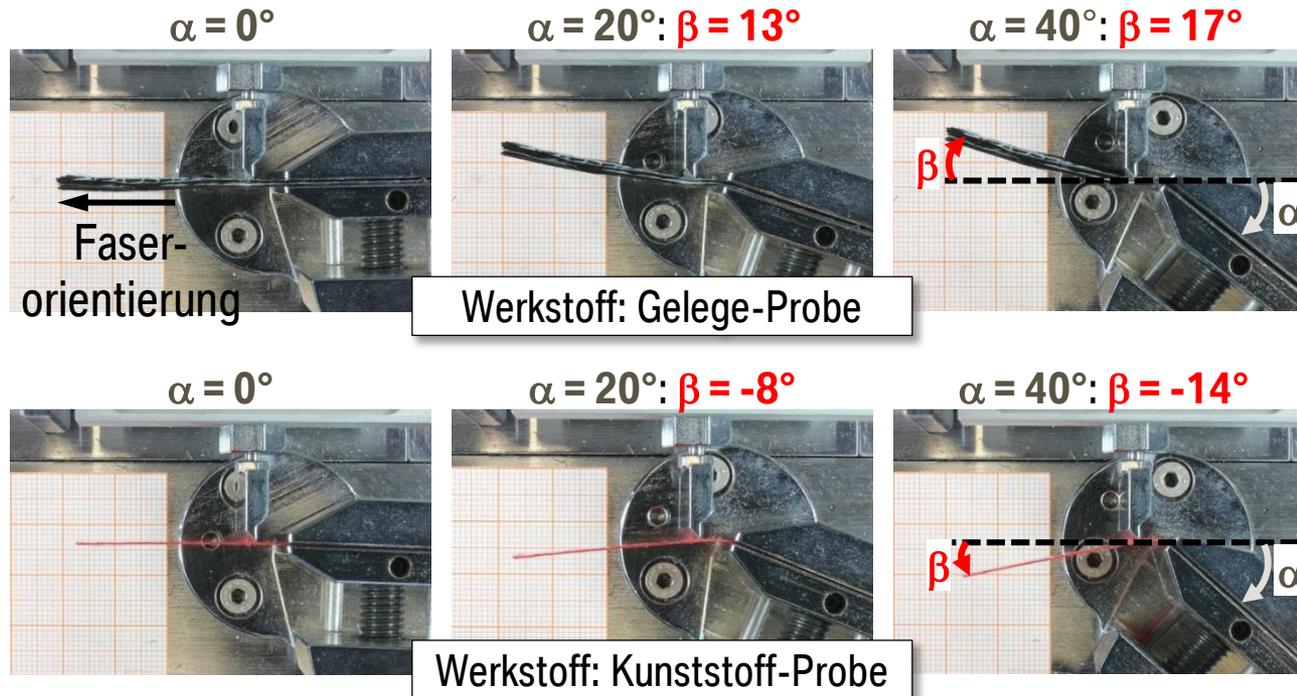
Versuchsaufbau:



Schematische Darstellung verformter Zustand (Draufsicht):



PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIMULATION – MODELL DER FASERSTRUKTUR.



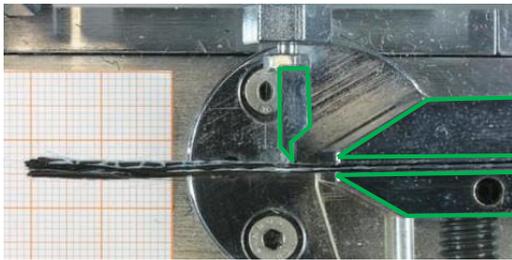
α : Rotationswinkel der Einspannung
 β : Auslenkungswinkel der Probe

→ **Beobachtung:** Gelege-Probe (diskontinuierlicher Werkstoff) weist gänzlich anderes Biegeverhalten als Kunststoff-Probe (kontinuierlicher Werkstoff) auf.

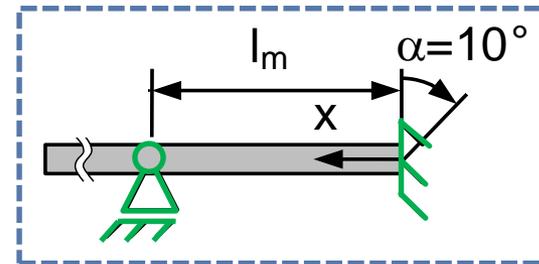
PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIM. – MODELLIERUNG DER FASERSTRUKTUR.

→ **Fragestellung:** Welche Ursachen liegen dem Biegeverhalten zugrunde und wie können diese durch ein Materialmodell abgebildet werden?

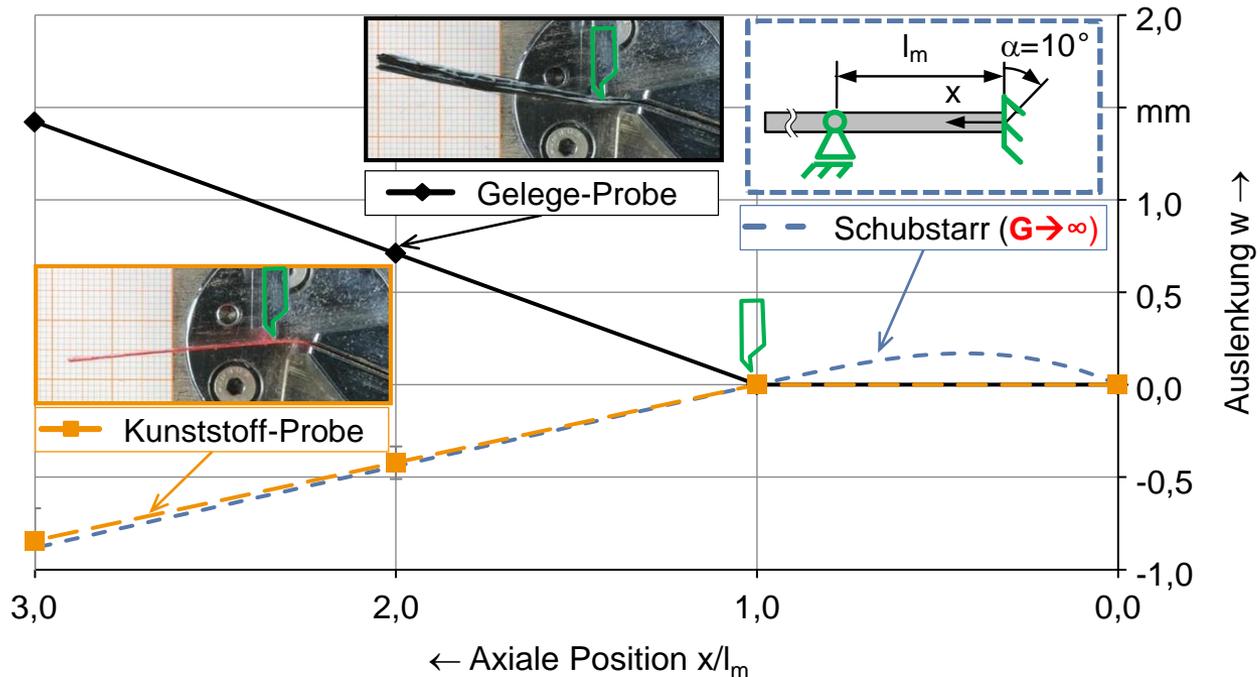
– **Ansatz:** Abstraktion Biegeversuch zu analytischem Balkenmodell:



Abstraktion



PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIM. – MODELLIERUNG DER FASERSTRUKTUR.



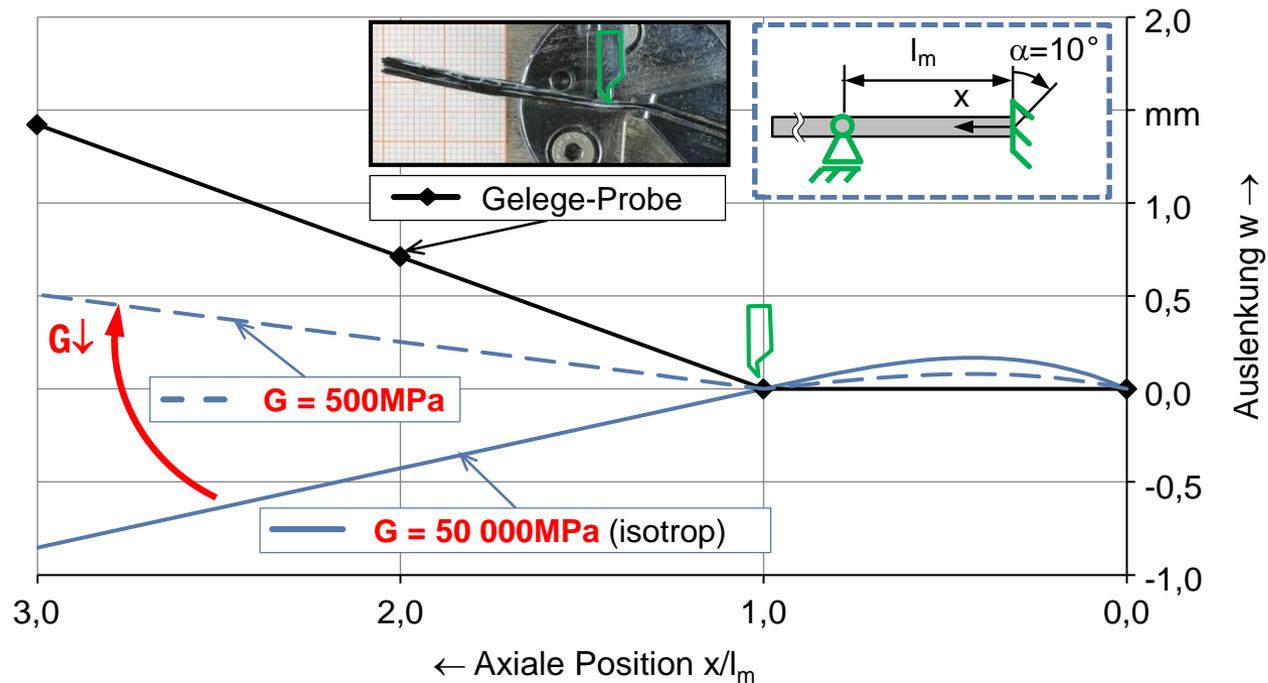
→ **Erkenntnis bzgl. Annahme schubstarre Biegeformulierung:**

Biegeverformung des Geleges durch schubstarre Formulierung ($G \rightarrow \infty$) wie in [2,3] nicht abbildbar.

→ **Ursache:**

Auslenkung des Balkenmodells ist für $G \rightarrow \infty$ nicht abhängig von den Materialparametern, sondern nur eine Funktion geometrischer Größen, die gegeben sind.

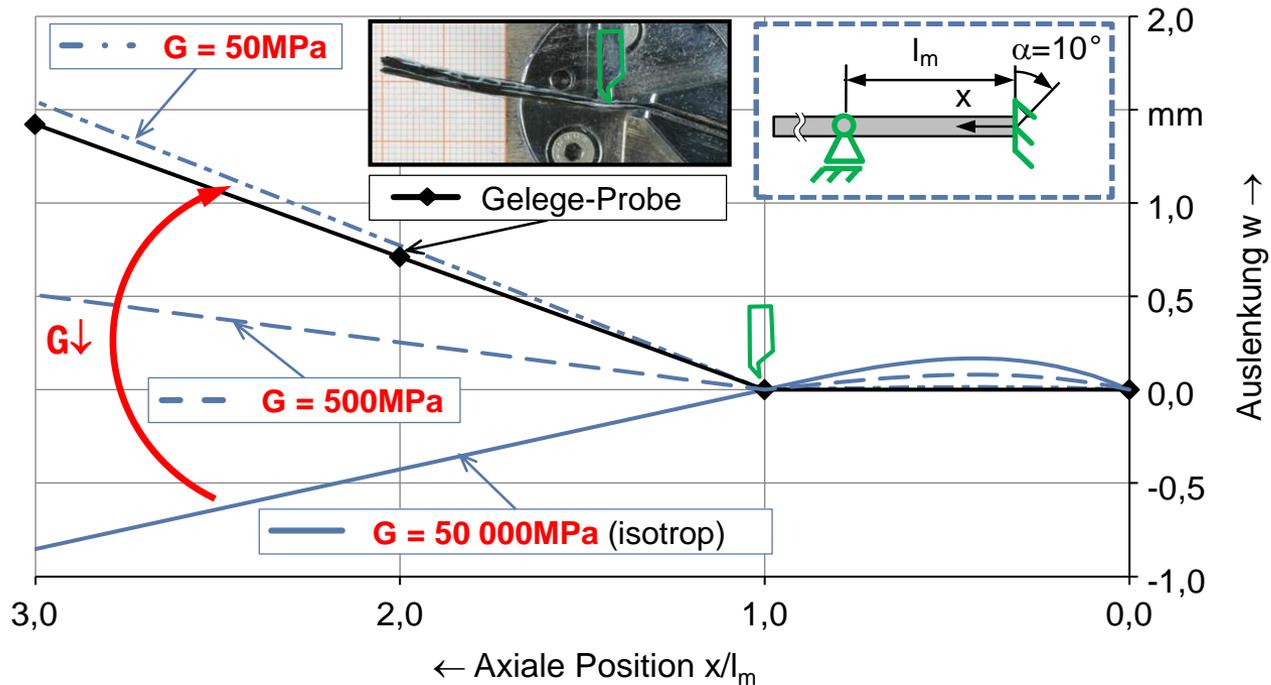
PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIM. – MODELLIERUNG DER FASERSTRUKTUR.



→ Erkenntnis bzgl. Biegeverhalten:

Für abnehmende Schubsteifigkeit $G \downarrow$ approximiert das Balkenmodell die Auslenkung des Geleges.

PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIM. – MODELLIERUNG DER FASERSTRUKTUR.



→ Erkenntnis bzgl. Biegeverhalten:

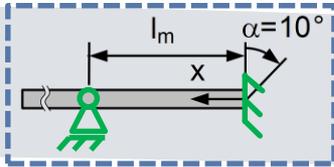
Für abnehmende Schubsteifigkeit $G \downarrow$ approximiert das Balkenmodell die Auslenkung des Geleges. (Approximation für $G = 80 \text{ MPa}$).

→ Ursache:

$G \downarrow$ begünstigt transversalen Schub (Abgleiten der Fasern über der Dicke).

PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIM. – MODELLIERUNG DER FASERSTRUKTUR.

Berechnung Materialparameter

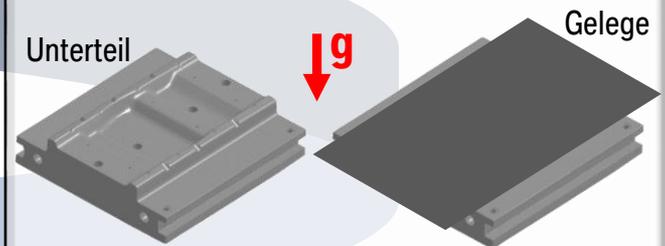


Transfer in Materialmodell [4] und
Implementierung in FE-Code

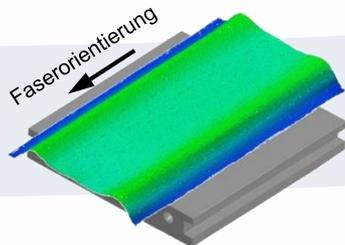
Materialmodell
 $\sigma = f(G, E_{||}, E_{\perp}, \nu, \epsilon)$



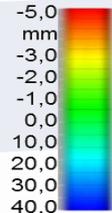
Untersuchung Prognosefähigkeit



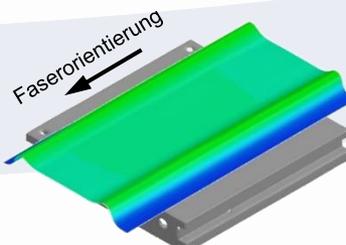
Experiment



Verschiebung

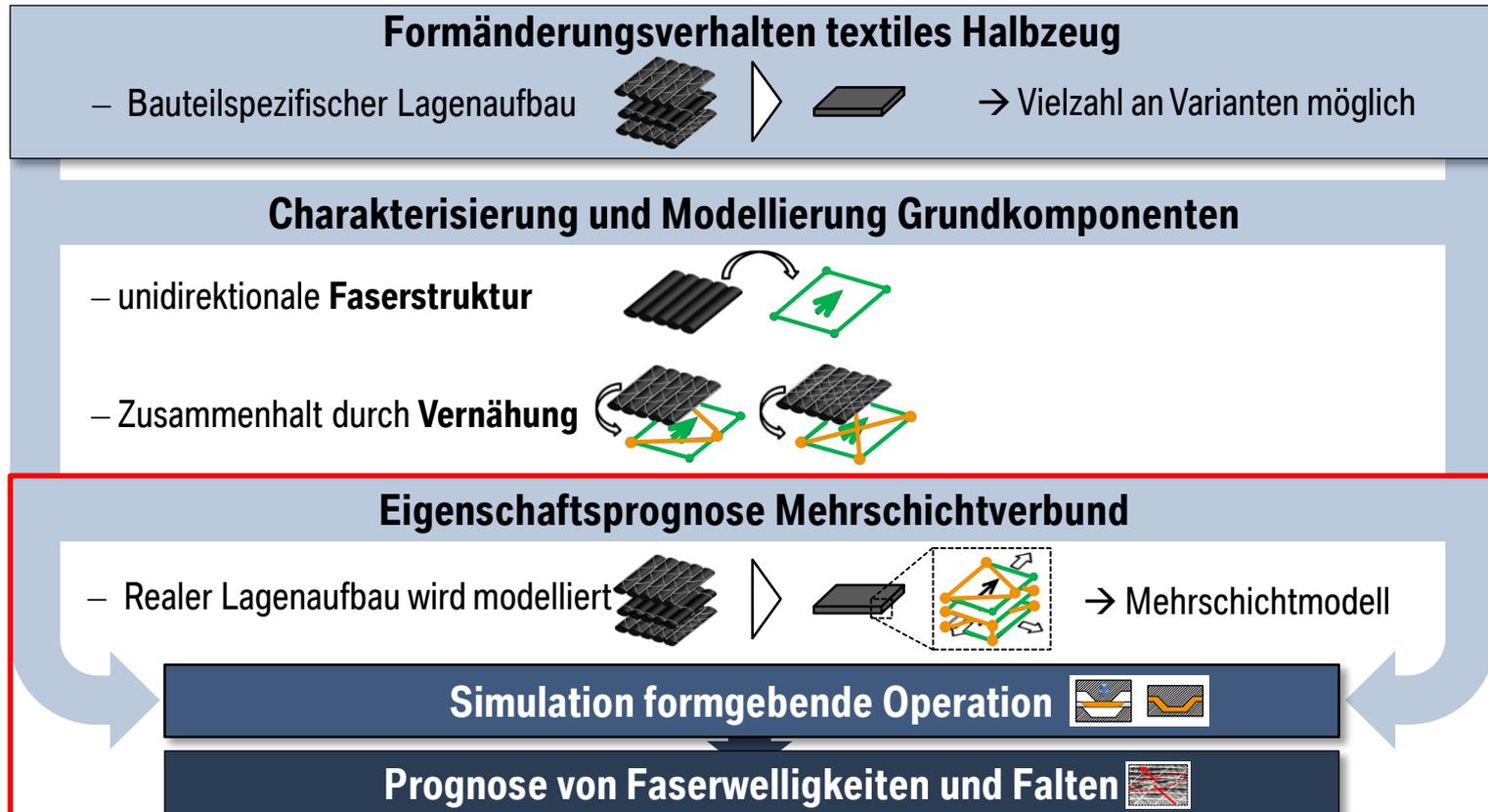


Simulation



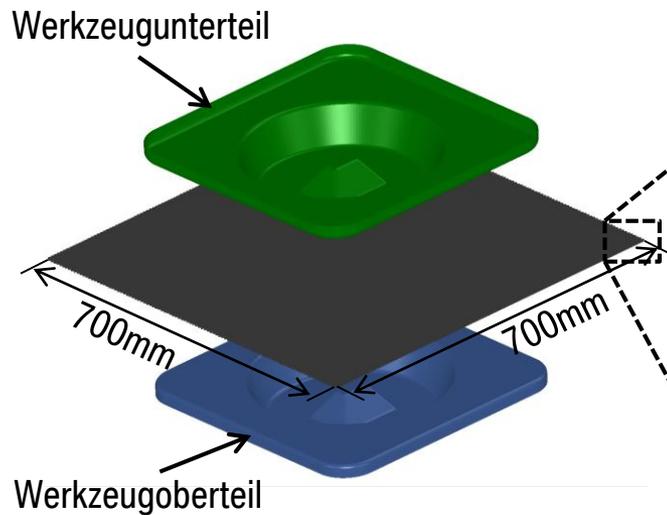
→ **Ergebnis:** Das mittels Balkenmodell kalibrierte Materialmodell prognostiziert das Biegeverhalten.

PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIMULATION – VORGEHENSWEISE.



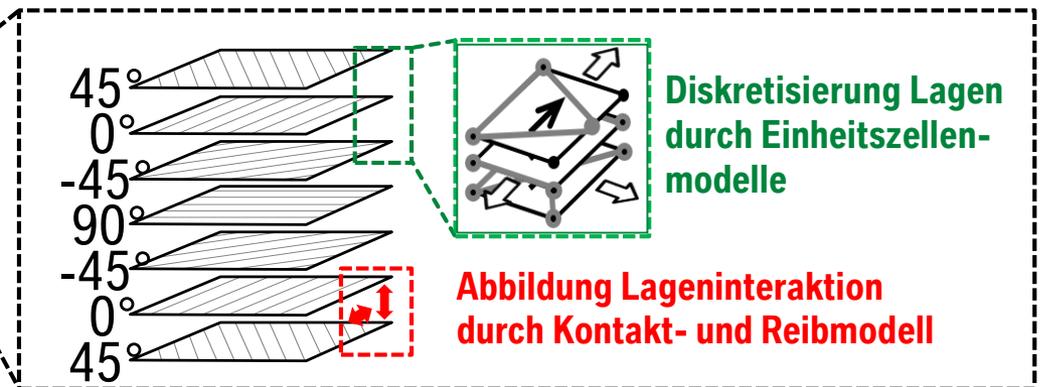
PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIMULATION – MEHRSCICHTVERBUND.

Formgebende Operation:



Modell des Mehrschichtverbundes:

7-lagiger Gelege-Mehrschichtverbund (Dicke: 2,1 mm), bestehend aus vier unterschiedlichen UD-Gelege-Varianten und Faserorientierungen



→ **Fragestellung:** Wie ist die Prognosegüte bzgl. Faserwelligkeiten und Falten?

PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIM. – SIMULATION FORMGEBENDE OPERATION.



Simulation
(dargestellt ohne Werkzeugoberteil)

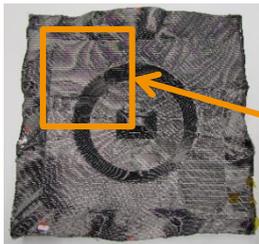
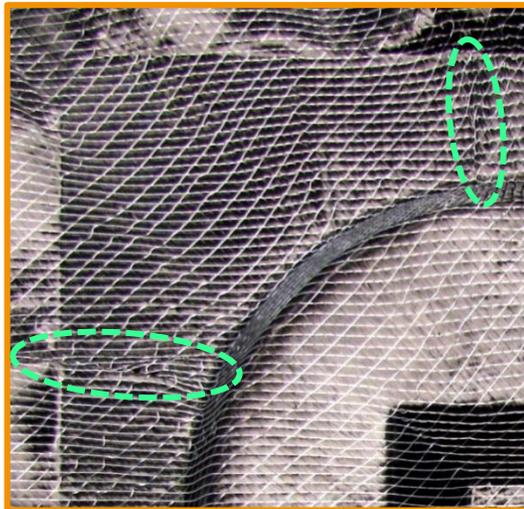


Experiment
(nach Entnahme aus Werkzeug)

PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIM. – GEGENÜBERSTELLUNG STAND DER TECHNIK.

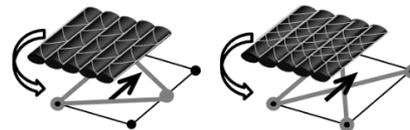
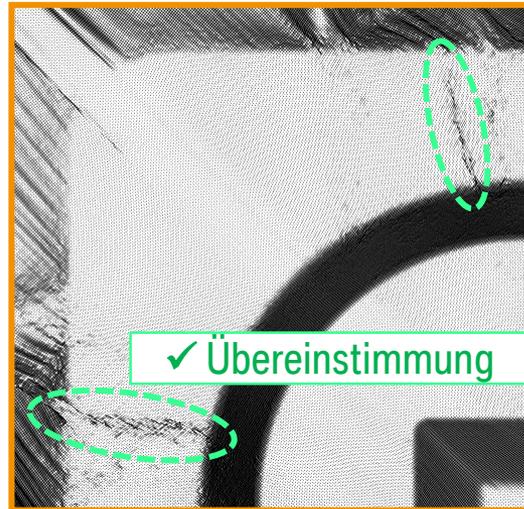
→ **Fragestellung:** Wie ist die Prognosegüte im Vergleich zum Stand der Technik?

Versuchsbauteil

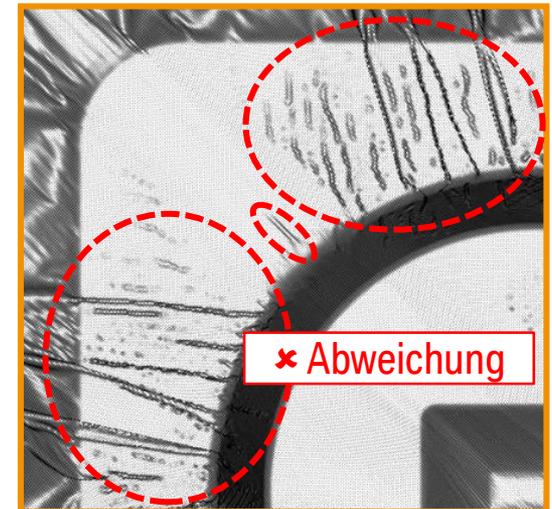


Exemplarisch
untersuchter
Bereich

Simulation:
entwickelte Modellierung



Simulation:
schubstarre Formulierung [2,3]



Ursache Abweichung:
Keine Relativbewegung von Fasern
über der Dicke

→ **Ergebnis:** Deutliche Verbesserung der Prognosegüte wurde erzielt.

PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. DRAPIERSIMULATION – ZUSAMMENFASSUNG.

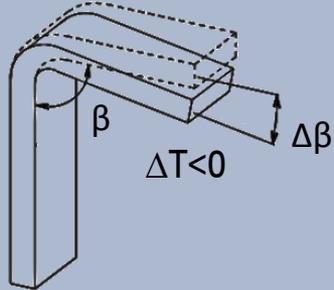
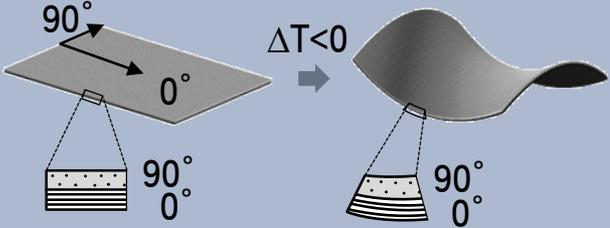
- Im Rahmen der Arbeit von Senner [4] wurde eine Methodik zur **Prognose von Faserwelligkeiten und Falten** erarbeitet.
- Methodik befindet sich im industriellen Einsatz, um den Herstellungsprozess virtuell abzusichern.
- Prognose wurde in [4] anhand unterschiedlicher Gelege-Mehrschichtverbunde und Bauteilgeometrien **validiert**.
- Entwickelte **Modellierung des Biegeverhaltens** (und der Vernähung) verbessert die Prognosegüte gegenüber dem Stand der Technik signifikant.
- Erkenntnisse in Entwicklung von **MAT_249_UD_FIBER** eingegangen.

GLIEDERUNG.

- Einleitung.
- **Prozesssimulation Nasspressen.**
 - Drapierung.
 - **Verzug.**
 - Mapping.
- Einfluss der Faserumorientierung am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Einfluss der Faserspannungen am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Zusammenfassung und Ausblick.

PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. VERZUGSSIMULATION – MOTIVATION.

Bekannte Deformationsmechanismen bei CFK-Bauteilen:

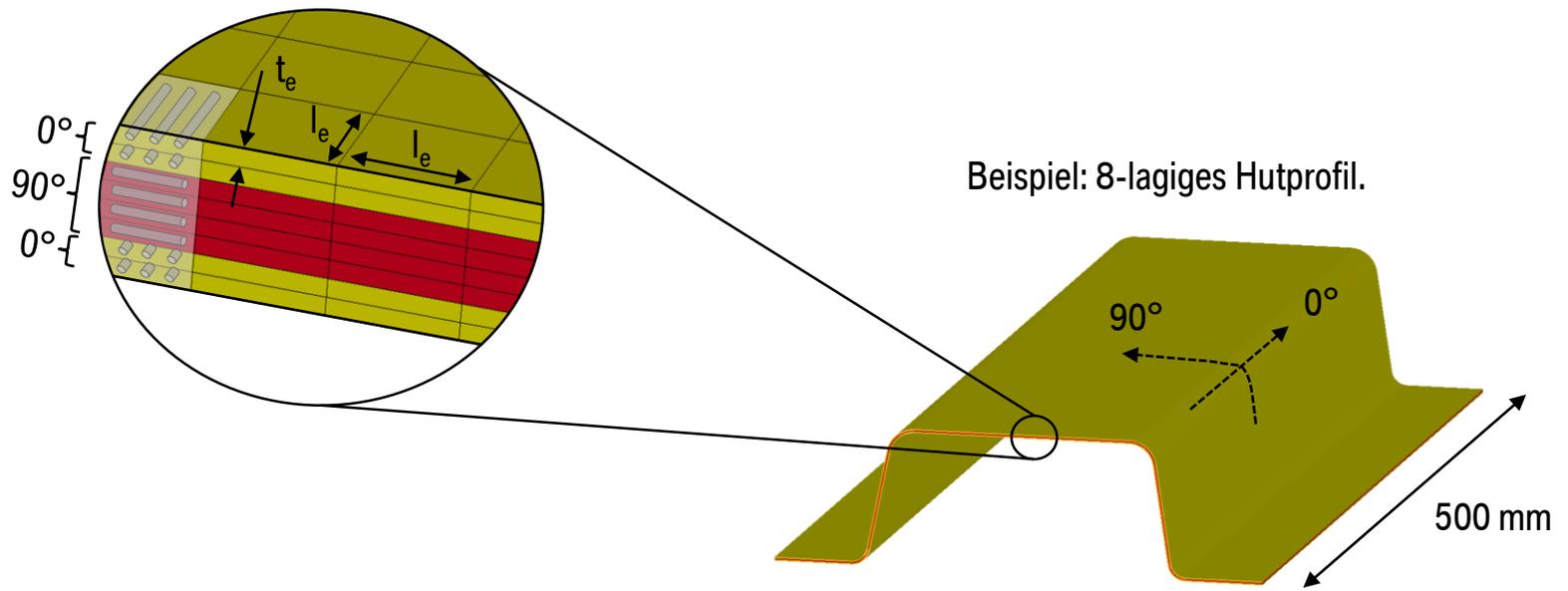
Spring-In	Warpage
<p>Winkeländerung $\Delta\beta$ eines gekrümmten Bauteils orthotropen Materials unter Einfluss einer Temperaturdifferenz ΔT.</p>	<p>Verwölbung eines ebenen Bauteils orthotropen Materials, z.B. bei asymmetrischem Lagenaufbau (hier: $0^\circ/90^\circ$) unter Einfluss einer Temperaturdifferenz ΔT.</p>
	
<p>Ursache: Unterschiedlich große Wärmeausdehnungen in Dickenrichtung und in der Ebene.</p>	<p>Ursache: Unterschiedlich große Wärmeausdehnungen in axialer (Faser-) und transversaler Richtung.</p>

- Maß- und Formänderungen während des Herstellungsprozesses können die Verbaubarkeit nassgepresster Bauteile im Karosseriebau erschweren.
- **Ziel:** Simulative Prognose der Bauteilendgeometrie.
- **Ausblick:** Geometrische Kompensationsmaßnahmen auf Basis der Simulationsergebnisse.

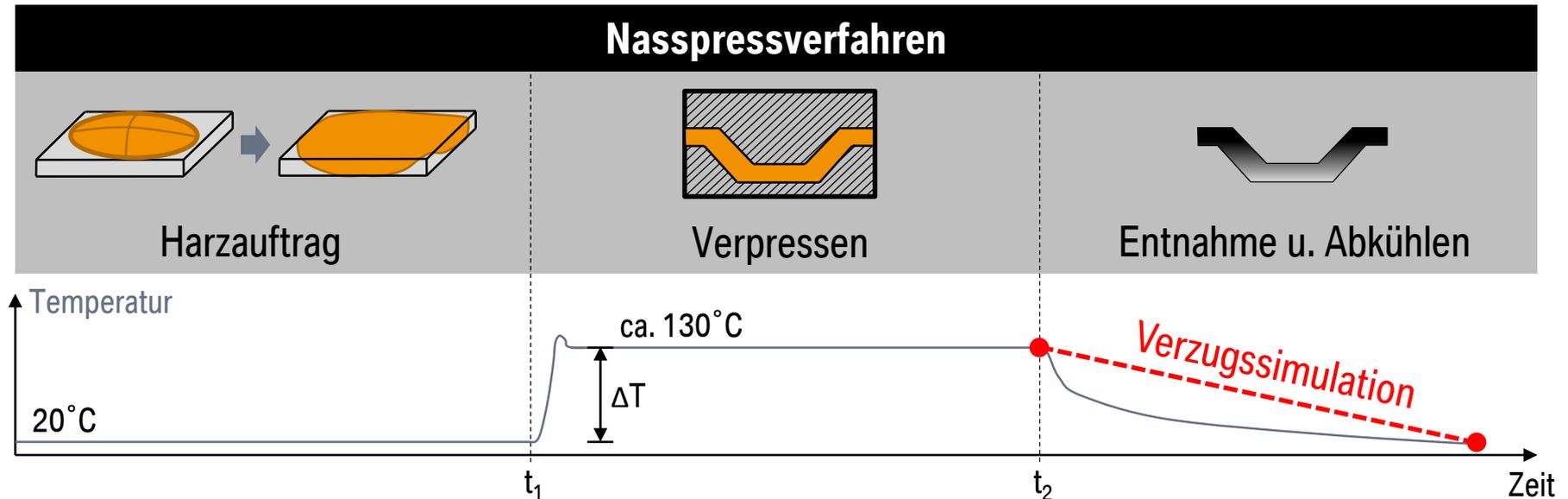
PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. VERZUGSSIMULATION – DISKRETISIERUNG.

Diskretisierungsstrategie [5] bei der Verzugssimulation:

- Elementtyp: **Solid** (Typ -2).
 - Elementaspektverhältnis $l_e/t_e < 6$.
 - Anzahl Elemente über Radius in Umfangsrichtung > 7 .
 - Eine Elementlage pro CFK-Schicht.
- } Elementkantenlänge $l_e < 2,5$ mm (bei dieser Geometrie).



PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. VERZUGSSIMULATION – ANNAHMEN.



Annahmen für die Verzugssimulation:

- Startpunkt der Simulation = Zeitpunkt t_2 der Entnahme aus dem beheizten Werkzeug.
- Abkühlung ΔT von Werkzeug- auf Raumtemperatur auf jeden Knoten des Modells aufgeprägt.
- Linear elastisches und transversal-isotropes Materialverhalten (Harz vollständig ausgehärtet).
- Chemischen Schrumpf über modifizierten Wärmeausdehnungskoeffizienten berücksichtigt.

GLIEDERUNG.

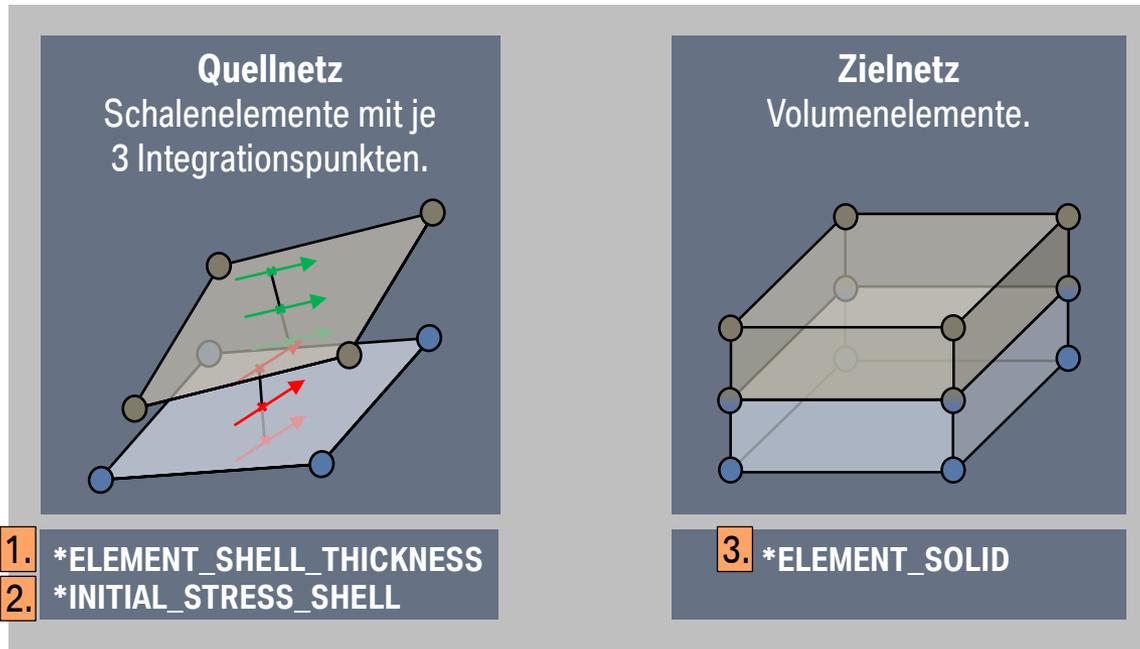
- Einleitung.
- **Prozesssimulation Nasspressen.**
 - Drapierung.
 - Verzug.
 - **Mapping.**
- Einfluss der Faserumorientierung am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Einfluss der Faserspannungen am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Zusammenfassung und Ausblick.

PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. MAPPING.

3 Input-Dateien für Envyo®:

1. Datei mit **Quellnetz**.
2. Datei mit History-Variablen des Quellnetzes (enthält Faserorientierungen und Faserspannungen).
3. Datei mit **Zielnetz**.

Bedingung: Quell- und Zielnetz ausgerichtet (notfalls Best-Fit vor dem Mapping).

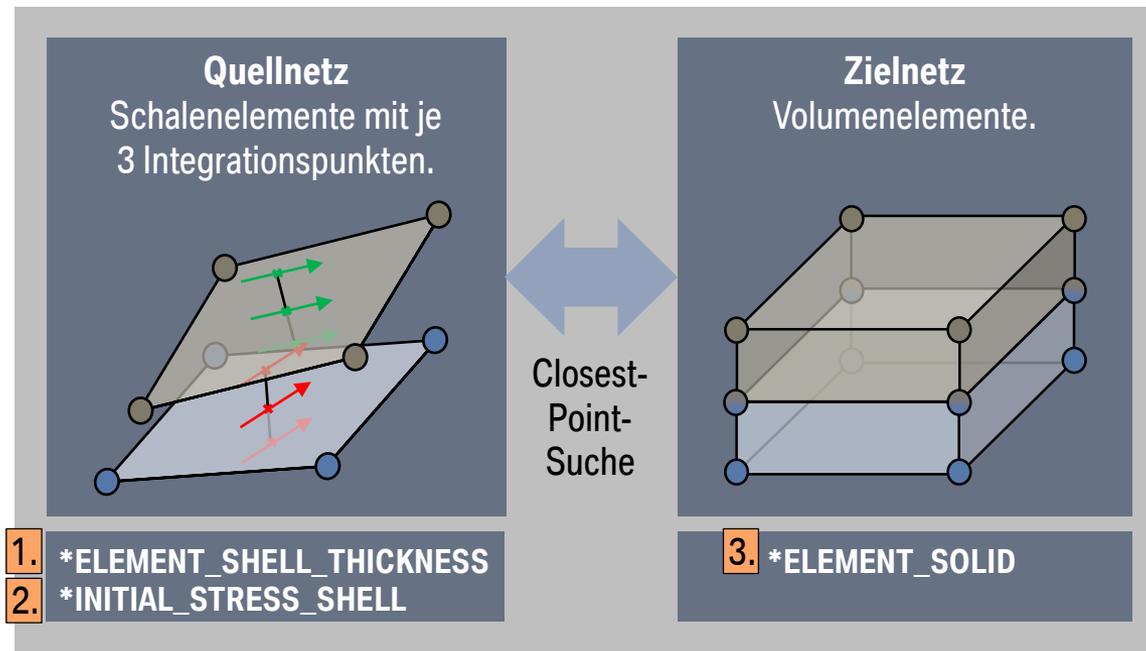


PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. MAPPING.

3 Input-Dateien für Envyo®:

1. Datei mit **Quellnetz**.
2. Datei mit History-Variablen des Quellnetzes (enthält Faserorientierungen und Faserspannungen).
3. Datei mit **Zielnetz**.

Bedingung: Quell- und Zielnetz ausgerichtet (notfalls Best-Fit vor dem Mapping).

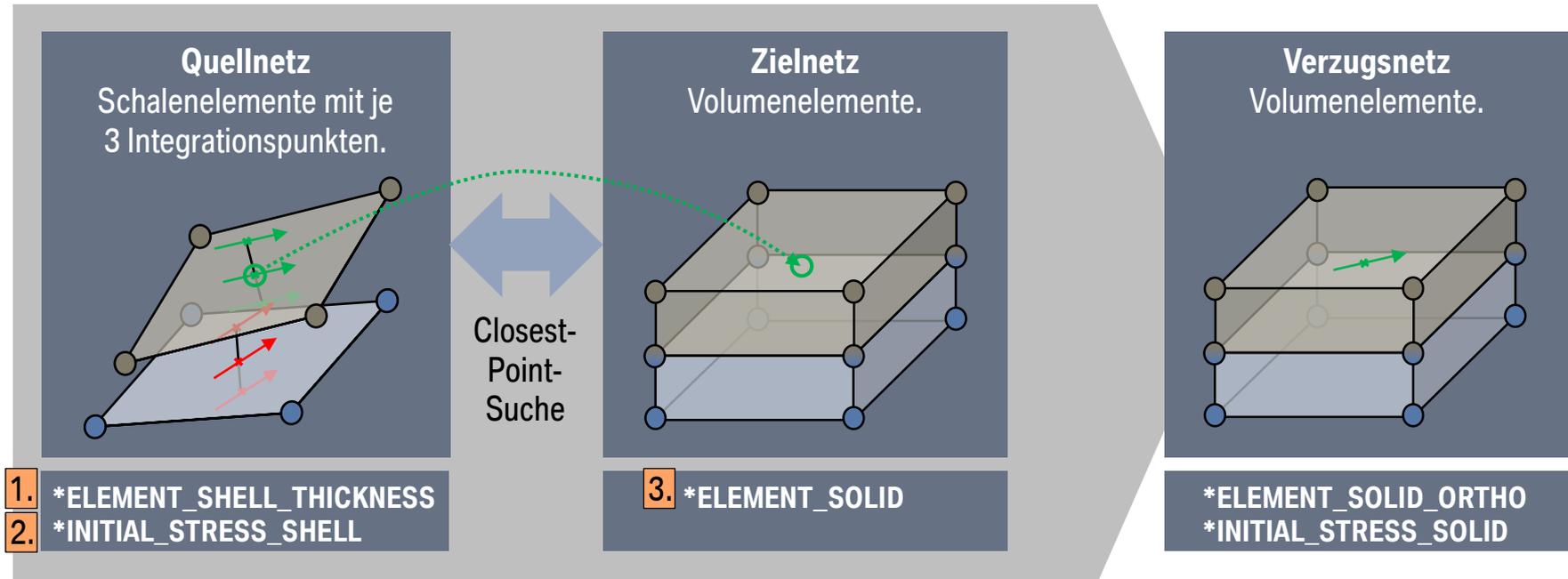


PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. MAPPING.

3 Input-Dateien für Envyo®:

1. Datei mit **Quellnetz**.
2. Datei mit History-Variablen des Quellnetzes (enthält Faserorientierungen und Faserspannungen).
3. Datei mit **Zielnetz**.

Bedingung: Quell- und Zielnetz ausgerichtet (notfalls Best-Fit vor dem Mapping).

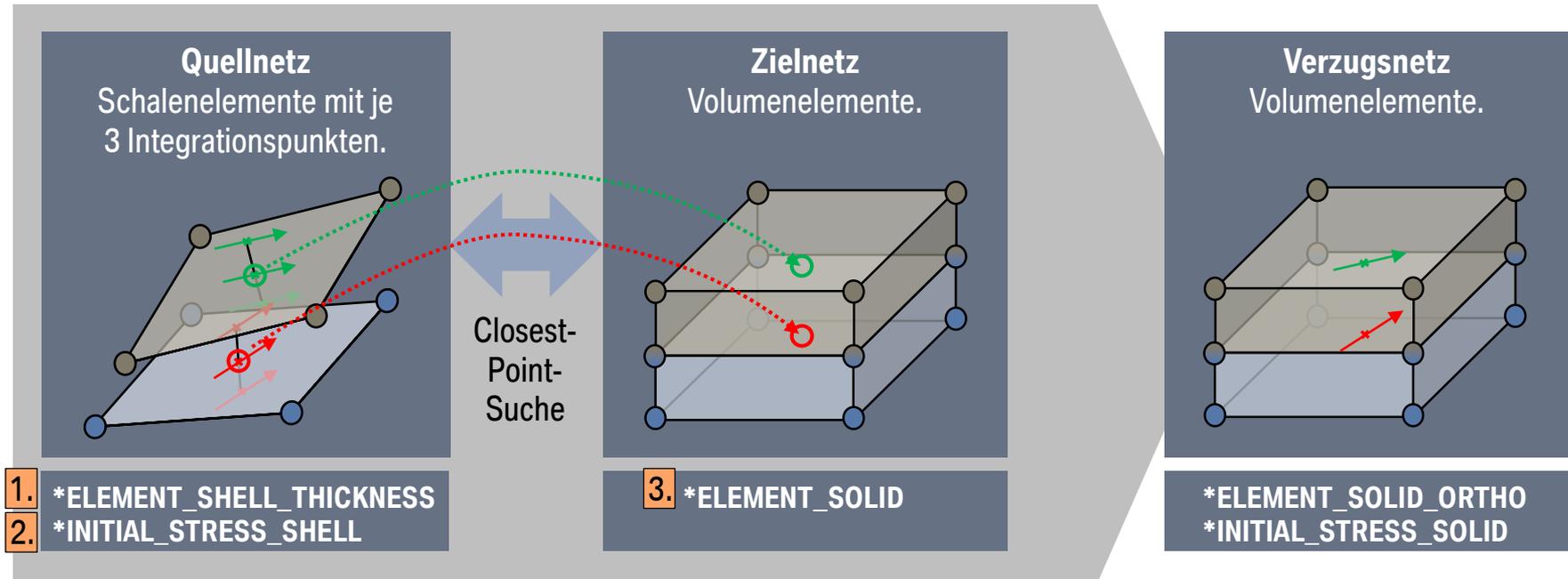


PROZESSSIMULATION NASSPRESSEN. MAPPING.

3 Input-Dateien für Envyo®:

1. Datei mit **Quellnetz**.
2. Datei mit History-Variablen des Quellnetzes (enthält Faserorientierungen und Faserspannungen).
3. Datei mit **Zielnetz**.

Bedingung: Quell- und Zielnetz ausgerichtet (notfalls Best-Fit vor dem Mapping).



GLIEDERUNG.

- Einleitung.
- **Prozesssimulation Nasspressen.**
 - Drapierung.
 - Verzug.
 - Mapping.
- **Einfluss der Faserumorientierung am Beispiel eines Versuchsbauteils.**
- Einfluss der Faserspannungen am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Zusammenfassung und Ausblick.

EINFLUSS DER FASERUMORIENTIERUNG AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Einsatz des Mappers erleichtert die Definition der Faserorientierung im Preprocessing,
Voraussetzung: Existenz einer Drapiersimulation.

Method A: konventionell.

- Information der Faserorientierung muss für jede CFK-Schicht definiert werden (BETA).
- AOPT = 2.0 oder 3.0
→ zusätzliche Definition eines oder mehrerer Hilfsvektoren notwendig.
- Für geometrisch anspruchsvolle Bauteile evtl. Partitionierung erforderlich.
→ hoher zeitlicher Aufwand.

➔ **Eingabe von 5-8 Parametern pro CFK-Schicht.**

*MAT_ORTHOTROPIC_THERMAL_{OPTION}

This is Material Type 21. A linearly elastic, orthotropic material with orthotropic thermal expansion.

Materialkarte MAT_21.

Card 1	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable	MID	R0	EA	EB	EC	PRBA	PRCA	PRCB
Type	A8	F	F	F	F	F	F	F

Card 2	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable	GAB	GBC	GCA	AA	AB	AC	AOPT	MACF
Type	F	F	F	F	F	F	F	I

Card 3	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable	XP	YP	ZP	A1	A2	A3		
Type	F	F	F	F	F	F		

Card 4	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable	V1	V2	V3	D1	D2	D3	BETA	REF
Type	F	F	F	F	F	F	F	

Method B: mit Envyo®.

- Information der Faserorientierung in Element gespeichert.
- AOPT = 0.0
→ Materialkoordinatensystem an Elementkante ausgerichtet.

➔ **Eingabe von 1 Parameter.**



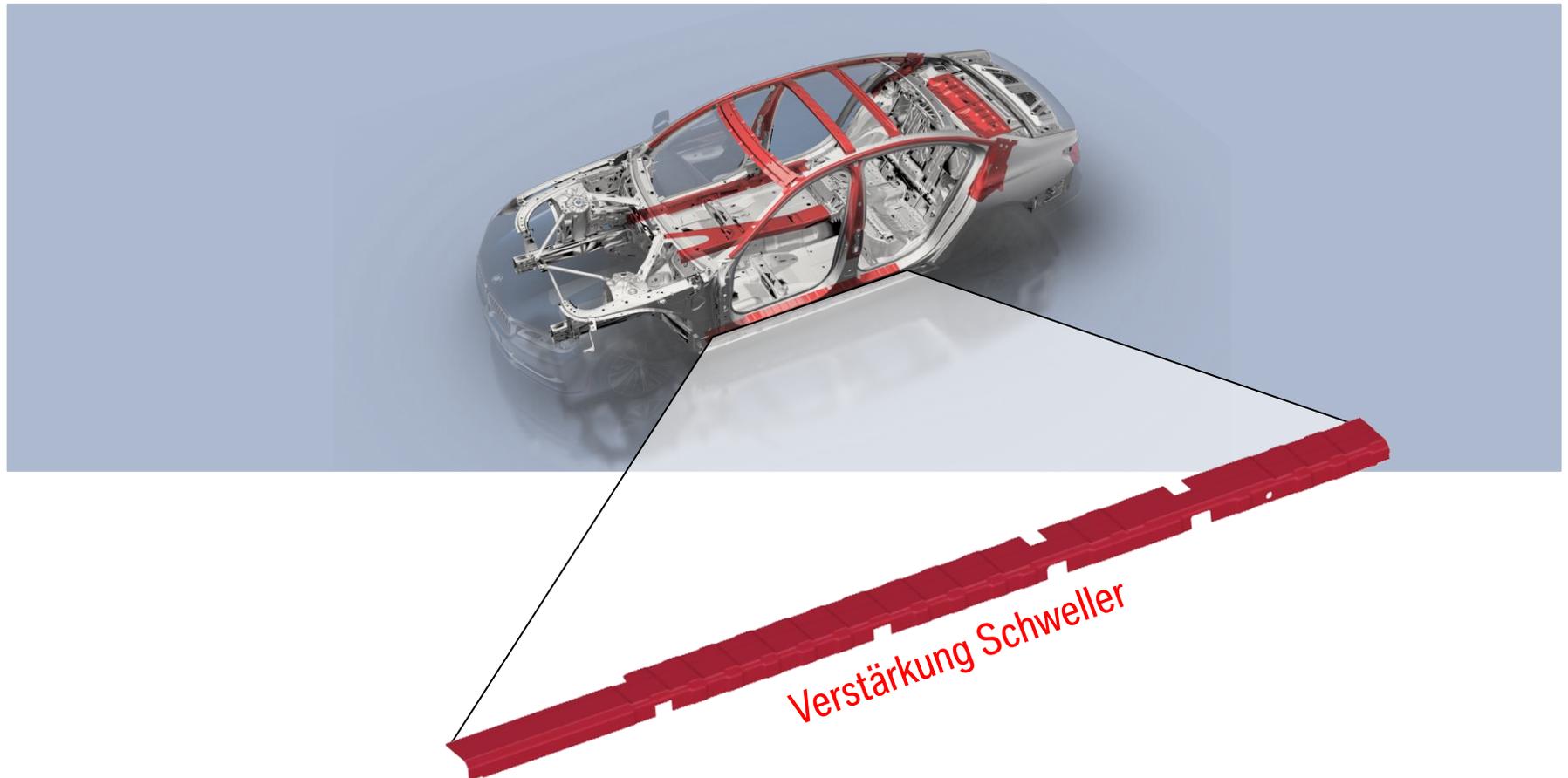
EINFLUSS DER FASERUMORIENTIERUNG AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Aktueller BMW 7er:



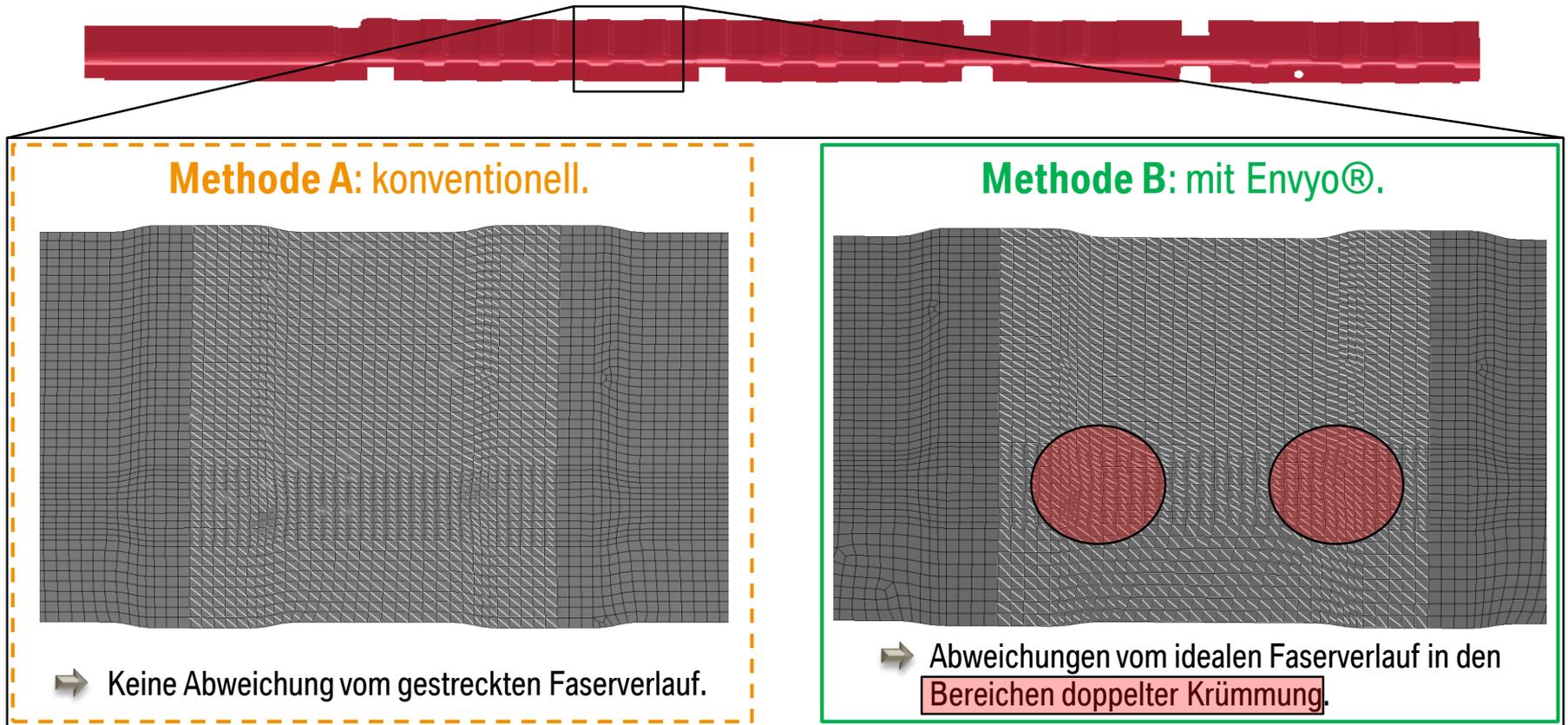
EINFLUSS DER FASERUMORIENTIERUNG AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Aktueller BMW 7er: CFK-Bauteile („Carbon Core“).



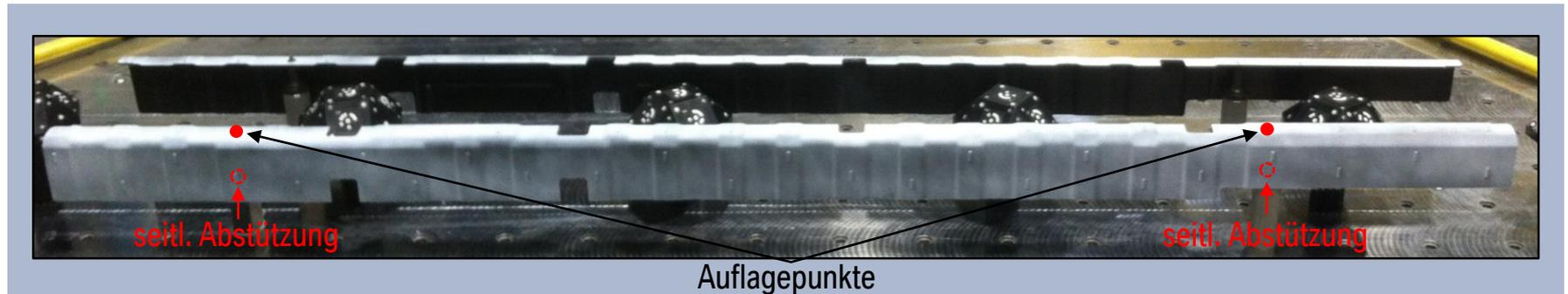
EINFLUSS DER FASERUMORIENTIERUNG AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Faserorientierung (Visualisierung des Materialkoordinatensystems) bei Verwendung der konventionellen Projektionsmethoden und bei Verwendung von Envyo am Bspl. einer -45° -Lage.

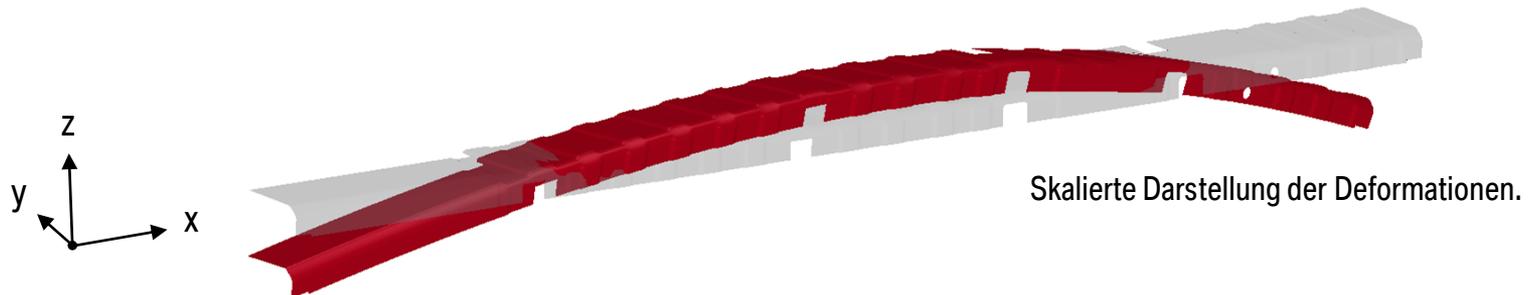


EINFLUSS DER FASERUMORIENTIERUNG AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

- Konzept der optischem Bauteilvermessung (GOM-Messung) nach erfolgter Versuchsabpressung der Verstärkung Schweller.
 - **Lagerung:** 2-Punkt-Auflage und seitliche Abstützung.
 - **Lagerbedingungen:** Ungespannter Zustand unter Einfluss der Schwerkraft.



- Dominanter Verzugmechanismus bei der Verstärkung Schweller:

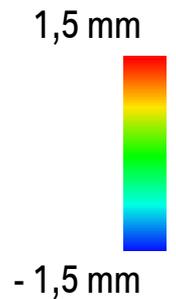
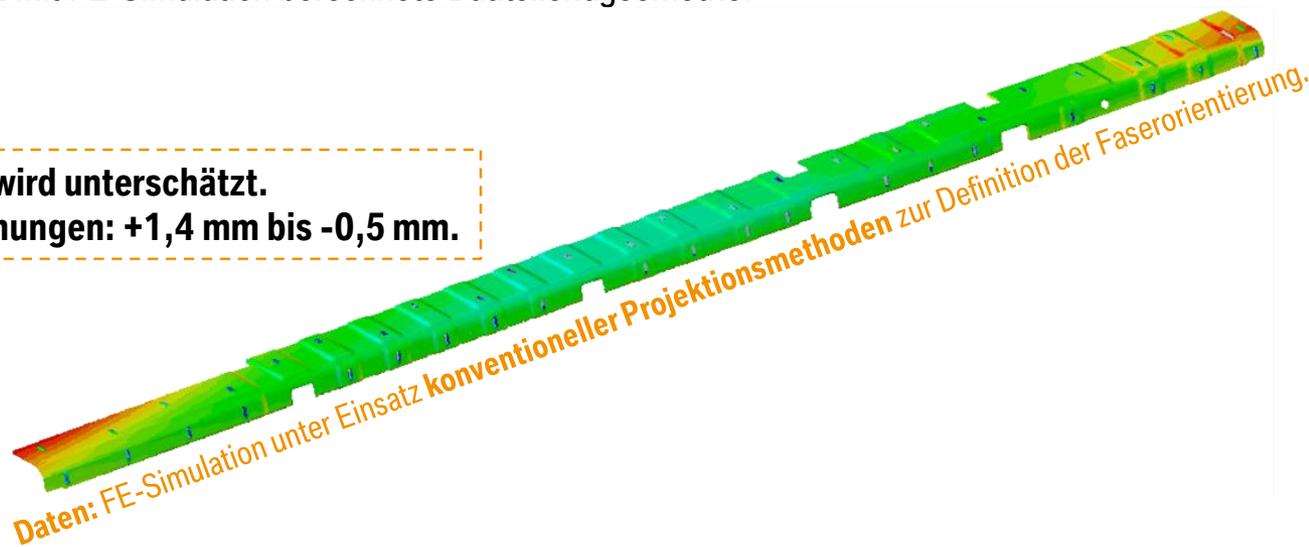


EINFLUSS DER FASERUMORIENTIERUNG AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Abgleich optischer Messdaten zu simulativ ermittelter Bauteilendgeometrie.

- **Referenz:** optisch vermessenes Versuchsbauteil einer Verstärkung Schweller.
- **Daten:** mit FE-Simulation berechnete Bauteilendgeometrie.

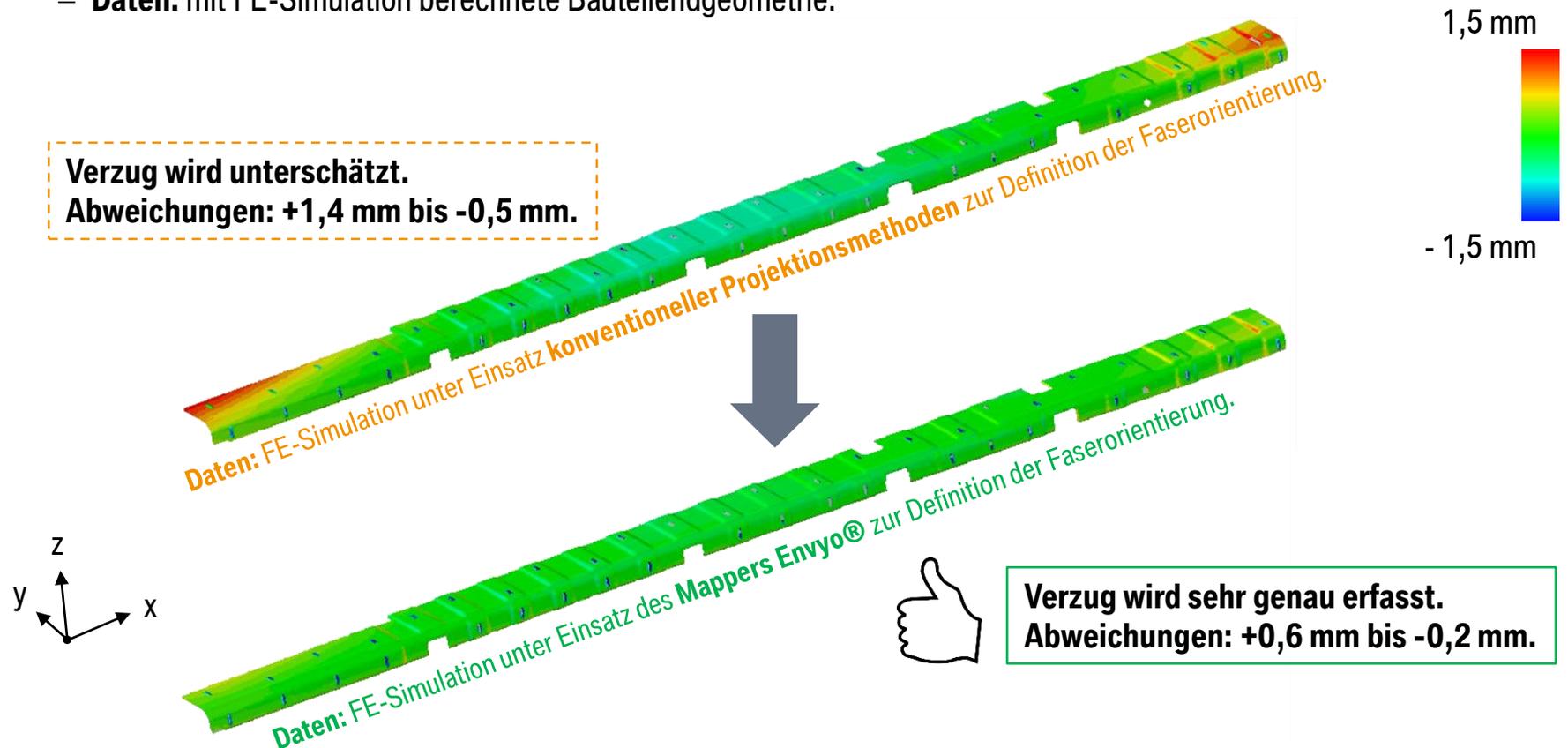
Verzug wird unterschätzt.
Abweichungen: +1,4 mm bis -0,5 mm.



EINFLUSS DER FASERUMORIENTIERUNG AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Abgleich optischer Messdaten zu simulativ ermittelter Bauteilendgeometrie.

- **Referenz:** optisch vermessenes Versuchsbauteil einer Verstärkung Schweller.
- **Daten:** mit FE-Simulation berechnete Bauteilendgeometrie.



GLIEDERUNG.

- Einleitung.
- **Prozesssimulation Nasspressen.**
 - Drapierung.
 - Verzug.
 - Mapping.
- Einfluss der Faserumorientierung am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- **Einfluss der Faserspannungen am Beispiel eines Versuchsbauteils.**
- Zusammenfassung und Ausblick.

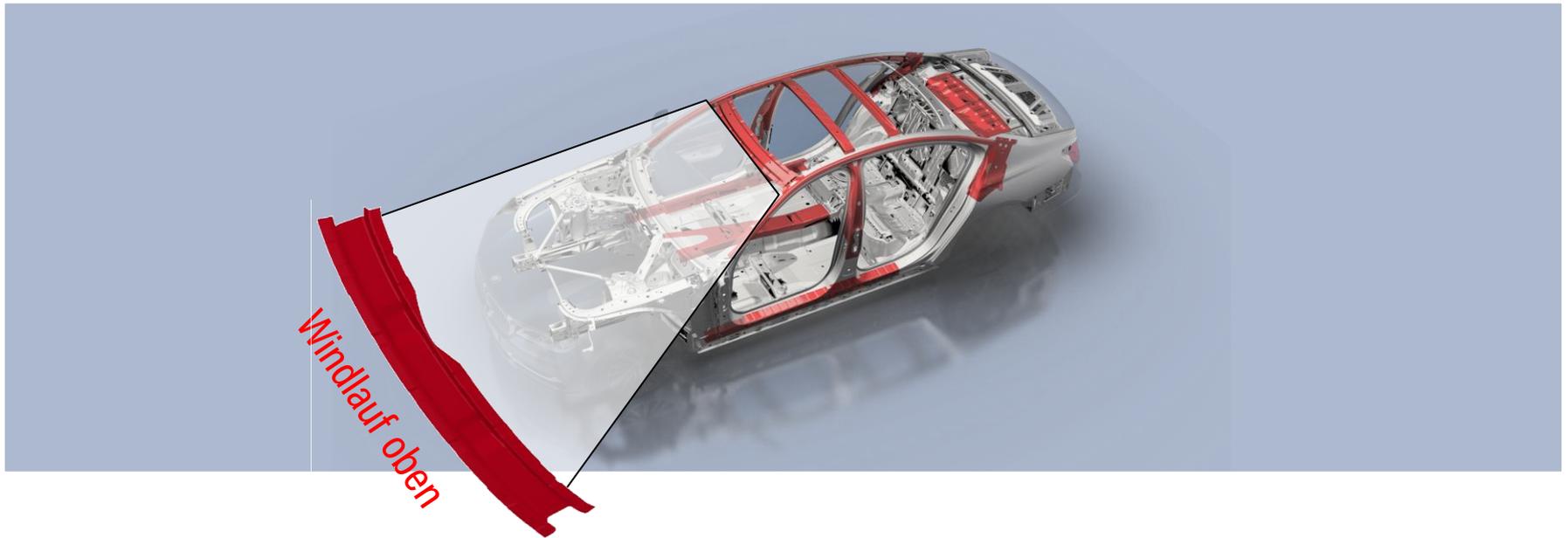
EINFLUSS DER FASERSPANNUNGEN AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Aktueller BMW 7er:



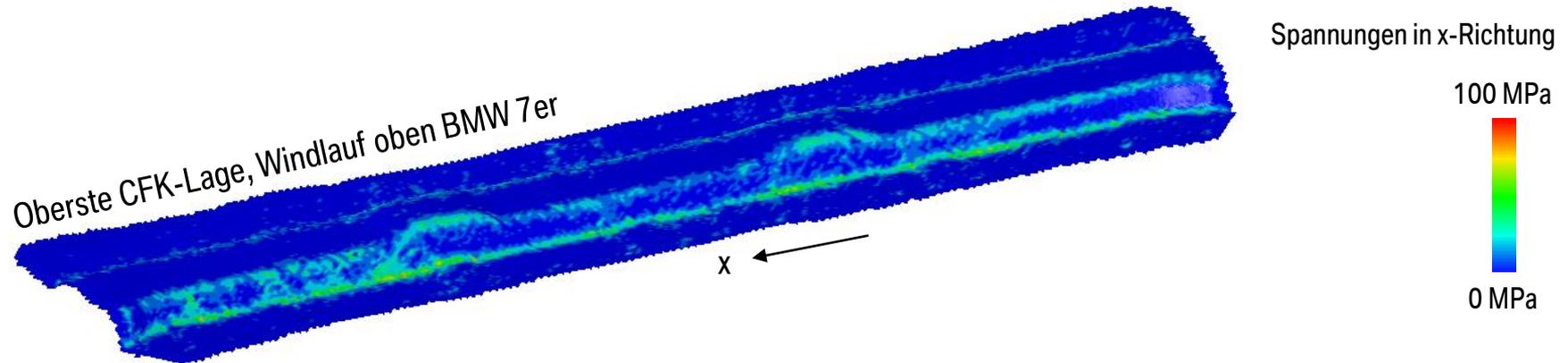
EINFLUSS DER FASERSPANNUNGEN AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Aktueller BMW 7er: CFK-Bauteile („Carbon Core“).



EINFLUSS DER FASERSPANNUNGEN AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Spannungszustand des Halbzeugs nach dem Drapiervorgang:



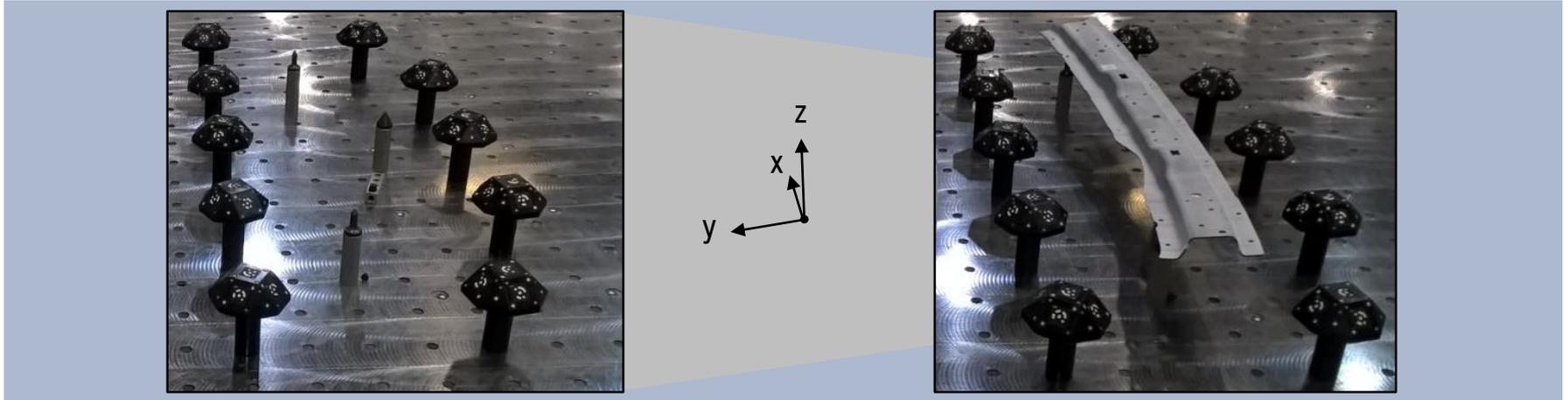
Bisherige Nichtberücksichtigung von Faserspannungen, weil...

- ... bei aktuellem Materialmodell ***MAT_23** kein initialer Spannungszustand berücksichtigt wird.
→ Verwendung von ***MAT_22** (dann keine Abbildung des Phasenübergangs mehr möglich).
- ... Übertragung von Spannungswerten aus Drapiersimulation bisher nicht in Mapping-Prozess implementiert war.

→ **Modifikation von *MAT_23 (hypo- statt hyperelast. Formulierung) sowie Erweiterung des Mapping-Prozesses.**

EINFLUSS DER FASERSPANNUNGEN AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

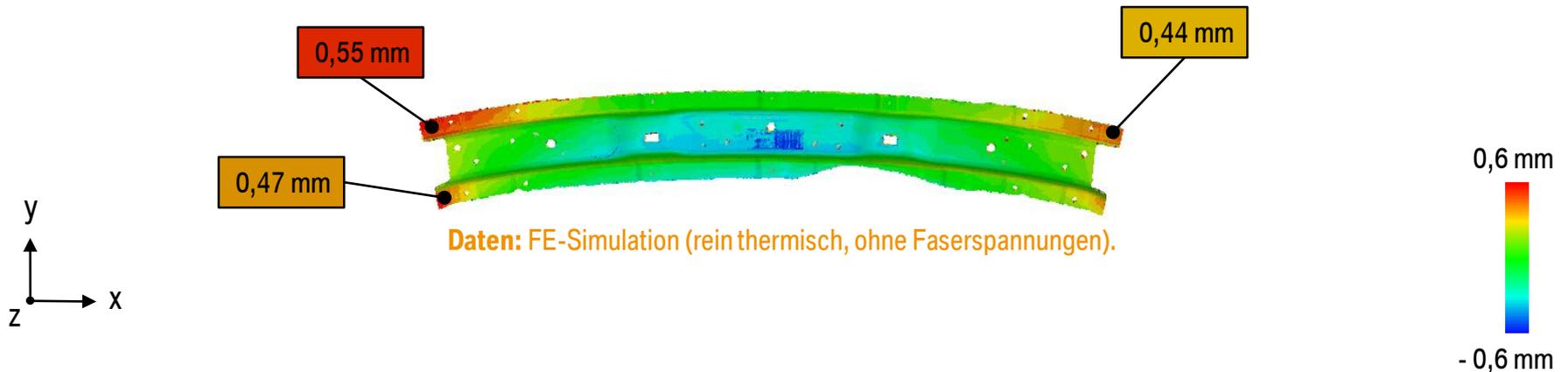
- Konzept der optischem Bauteilvermessung (GOM-Messung) nach erfolgter Versuchsabpressung des Windlaufs oben.
 - **Lagerung:** 3-Punkt-Auflage.
 - **Lagerbedingungen:** Ungespannter Zustand unter Einfluss der Schwerkraft.



EINFLUSS DER FASERSPANNUNGEN AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Abgleich optischer Messdaten zu simulativ ermittelter Bauteilendgeometrie.

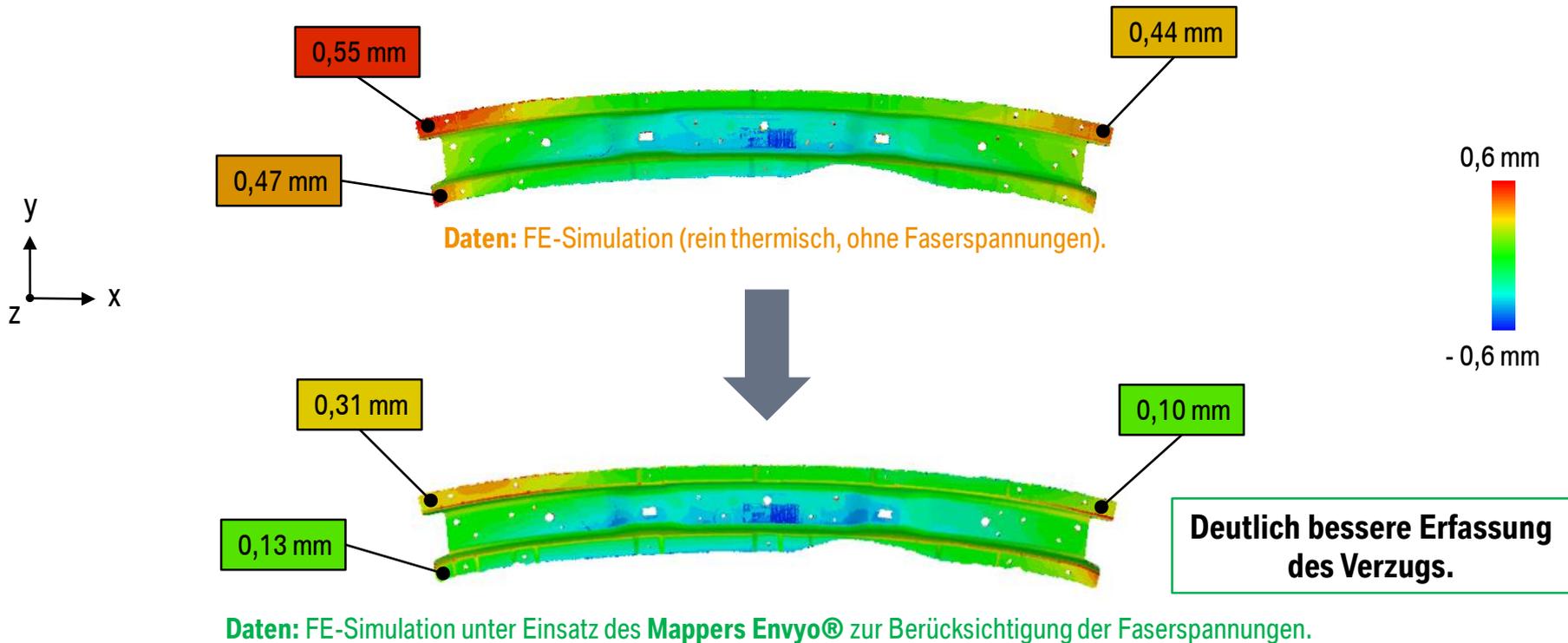
- **Referenz:** optisch vermessenes Versuchsbauteil eines Windlaufs oben.
- **Daten:** mit FE-Simulation berechnete Bauteilendgeometrie.



EINFLUSS DER FASERSPANNUNGEN AM BEISPIEL EINES VERSUCHSBAUTEILS.

Abgleich optischer Messdaten zu simulativ ermittelter Bauteilendgeometrie.

- **Referenz:** optisch vermessenes Versuchsbauteil eines Windlaufs oben.
- **Daten:** mit FE-Simulation berechnete Bauteilendgeometrie.



GLIEDERUNG.

- Einleitung.
- **Prozesssimulation Nasspressen.**
 - Drapierung.
 - Verzug.
 - Mapping.
- Einfluss der Faserumorientierung am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- Einfluss der Faserspannungen am Beispiel eines Versuchsbauteils.
- **Zusammenfassung und Ausblick.**

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.

- Zusammenfassung:
 - Validierte **Drapiersimulation** → MAT_249_UD_FIBER.
 - Simulative Geometrieprognose mit linear-elastischer FE-Verzugssimulation.
 - Einsatz des Mappers Envyo® erleichtert die **Definition der Faserorientierung** für die Verzugssimulation.
 - Mit der Informationen zur **Faserumorientierung** und zu den **Faserspannungen** aus der Drapiersimulation kann Prognosegüte der Verzugssimulation verbessert werden:
Demonstration an den zwei Versuchsbauteilen Verstärkung Schweller und Windlauf oben.
- Ausblick:
 - Untersuchung weiterer Bauteile.
 - Untersuchung von Einflussfaktoren seitens des Mapping-Prozesses (Interpolation, Suchradius, etc.)

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT.



LITERATURQUELLEN.

- [1] Boisse, P.; Hamila, N.; Vidal-Sallé, E.; Dumont, F.: Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses. *Composites Science and Technology*, 71 (2011), S. 683–692.
- [2] Haanappel, S. P.: Forming of UD fibre reinforced thermoplastics: a critical evaluation of intra-ply shear. Dissertation, Universiteit Twente, Niederlande, 2013.
- [3] Hamila, N.; Boisse, P.; Sabourin, F.; Brunet, M.: A semi-discrete shell finite element for textile composite reinforcement forming simulation. *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, 79 (2009), S. 1443–1466.
- [4] Senner, T.: Virtuelle Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016.
- [5] Amann, C.; Kreissl, S.; Grass, H.; Meinhardt, J.; Merklein, M.: Industrial Distortion Simulation of Fibre Reinforced Plastics – A Study on Finite Element Discretisation. In: *Advanced Materials Research 1140 (WGP Congress 2016)*, S. 272-279.