

Simulative Abbildung von Umformprozessen bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen

Thomas Senner¹, Sebastian Kreissl¹, Marion Merklein², Arnulf Lipp¹ und Josef Meinhardt¹

¹BMW Group, 80788 München, Deutschland

²Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen, Deutschland

Zunehmende Ressourcenknappheit fossiler Energieträger, politische Restriktionen hinsichtlich der CO₂-Emissionen sowie eine ansteigende Urbanisierung beeinflussen die zukünftigen Mobilitätsanforderungen [1]. Eine Möglichkeit, um diesen Anforderungen entgegenzutreten, stellt das Konzept der E-Mobilität dar, dessen effiziente Umsetzung grundlegend andere Herausforderungen an die zukünftige Fahrzeugarchitektur stellt [2]. Einen wesentlichen Einflussfaktor ist durch die deutlich geringere Energiedichte elektrischer Energiespeicher gegenüber fossilen Energieträgern gegeben, wodurch sich bei vergleichbarer Energiemenge eine erhebliche Gewichtszunahme einstellt. Die Kompensation dieser Gewichtszunahme bildet daher im Vergleich zu konventionellen Antriebssystemen eine kritischere Anforderung an den automobilen Leichtbau.

Ein großes Leichtbaupotential bieten kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK). Diese Werkstoffklasse zeichnet sich durch hohe spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten in Faserrichtung aus, die hochfeste Stähle übertreffen. Zudem charakterisiert CFK eine geringe Dichte, welche um ca. 80% gegenüber Stahl, bzw. um ca. 50% gegenüber Aluminium reduziert ist [3].

Der Großserieneinsatz von CFK in der Automobilindustrie stellt aufgrund der hohen Stückzahlen im Vergleich zur bisherigen Klein- und Mittelserie des Motorsports oder der Luftfahrtindustrie besondere Anforderungen an die Herstellungsprozesse. Die hieraus resultierende Forderung nach reproduzierbarer Bauteilqualität sowie die Sicherstellung der Herstellbarkeit verlangen nach geeigneten experimentellen und simulativen Methoden. Einen wichtigen Beitrag zur simulativen Prozessabsicherung kann hierfür die Finite-Elemente-Methode (FEM) leisten, welche im Bereich der Umformsimulation von metallischen Werkstoffen schon seit Langem Stand der Technik ist [4].

Zielsetzung der vorliegenden Studie ist es einen Überblick über die Herausforderungen der simulativen Abbildung von Umformprozessen bei der Herstellung von CFK-Schalenbauteilen zu geben. Hierfür wird der Teilprozess der Umformung detaillierter betrachtet und die damit verbundenen Anforderungen an die simulative Abbildung abgeleitet. Diese Anforderungen wurden durch die Implementierung eines benutzerdefinierten Materialmodells („User Material“) in LS-Dyna umgesetzt.



Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der Prozesskette zur Herstellung von CFK-Schalenbauteilen.

Abbildung 1 zeigt die Unterteilung eines Verarbeitungsverfahrens in die Teilprozesse Umformung, Imprägnierung und Solidifikation [5]. Diese Teilprozesse finden in Abhängigkeit des Verarbeitungsverfahrens, wie z.B. dem Resin-Transfer-Moulding Verfahren oder dem Thermoformen von Organoblechen, jeweils sequentiell, parallel oder in veränderter Reihenfolge statt. Der Teilprozess Umformung beschreibt die Umorientierung der Fasern und die Verdrängung von Luft, bzw. Matrix aus der Faserstruktur. Dem Teilprozess Imprägnierung wird die Benetzung der Faserstruktur mit Matrix zugeordnet. Die Änderung der Matriceigenschaften während der Erwärmungs- und Abkühlphase, sowohl für duroplastische wie auch für thermoplastische Matrixwerkstoffe werden unter dem Teilprozess Solidifikation zusammengefasst.

Ein zentrales Unterscheidungskriterium von CFK bzw. von Faserstrukturen gegenüber metallischen Werkstoffen ist die deutlich stärker ausgeprägte Anisotropie, die aus der Orientierung der Fasern resultiert [6]. Diese Besonderheit macht die Faserorientierung zum einen für die virtuelle Absicherung des Herstellungsprozesses zu einer wichtigen Berechnungsgröße, da sich die Faserorientierung signifikant auf die Umformeigenschaften der Faserstruktur sowie auf nachfolgende bzw. überlagerte Teilprozesse wie z.B. der Imprägnierung auswirkt. Hinzukommt, dass durch große Umorientierungen der Fasern die Entstehung von Defektstellen wie beispielsweise Faltenbildung begünstigt werden. Zum anderen wird durch die Faserorientierung die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften des fertigen Bauteils bestimmt. Da der Teilprozess Umformung einen entscheidenden Einfluss auf die Faserorientierung hat, wird dieser Teilprozess als zentrales Element in der Prozesskette betrachtet. Bedingt durch die Eigenschaft von Faserstrukturen große Formänderung zuzulassen, resultieren in Verbindung mit der ausgeprägten Anisotropie besondere Herausforderungen bei der Anwendung der FEM [6]. Aufgrund dessen sind Standard-Materialmodelle nur begrenzt anwendbar. Die Arbeiten von ten Thije [7] und Huétink [8] zeigen geeignete Maßnahmen auf, um diesen Herausforderungen zu begegnen. Diese Erkenntnisse wurden bei der Implementierung des Materialmodells herangezogen mit der Zielsetzung einer möglichst exakten Berechnung der Faserorientierung. Einen weiteren Schwerpunkt des implementierten Materialmodells bildet die Abbildung der spezifischen Umformeigenschaften von vernähten Gelegen, sogenannten Non-Crimp-Fabrics (NCF). Diese grenzen sich gegenüber in LS-Dyna existierenden Gewebemodellen beispielsweise durch ein asymmetrisches Schubverhalten und ein plastisches Materialverhalten der Vernähtung ab. Als erste Bewertungskriterien werden unter anderem elementare Verformungszustände an unidirektionalen Einheitszellen analysiert [6] sowie eine qualitative Abbildung des Verformungsmechanismus des Bias-Extension-Tests untersucht. Die Ergebnisse bestätigen die Eignung des implementierten Materialmodells zur Abbildung einer möglichst exakten Faserorientierung in Verbindung mit großen Deformationen.

Durch die Implementierung des Materialmodells wurden damit Voraussetzungen geschaffen, Umformprozesse von NCF simulativ abzubilden, und eine Ergänzung zu existierenden Materialmodellen in LS-Dyna generiert. Des Weiteren wird durch die hohe Genauigkeit in der Berechnung der Faserorientierung ein entscheidender Einflussparameter für die Simulation einer nachfolgend stattfindenden Imprägnierung bereitgestellt, da diese signifikant von der faserorientierungsabhängigen Permeabilität beeinflusst wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Barthel, K.; Böhler-Baedeker, S.; Bormann, R.; Dispan, J.; Fink, P.; Koska, T.; Meißner, H.; Pronold, F.: Zukunft der deutschen Automobilindustrie: Herausforderungen und Perspektiven für den Strukturwandel im Automobilsektor, Diskussionspapier der Arbeitskreise Innovative Verkehrspolitik und Nachhaltige Strukturpolitik der Friedrich-Ebert-Stiftung, 2010, S. 9-28
- [2] Friedrich, H.; Treffinger, P.; Kopp, G.; Knäber, H.: Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen neue Fahrzeugkonzepte, In: Schindler, V.; Sievers, I.: Forschung für das Auto von Morgen, Springer, 2008, S.333-334
- [3] Jäger, H.; Hauke, T.: Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe: Herstellungsprozesse, Anwendungen und Marktentwicklungen, Süddeutscher Verlag onpact, 2010, S.46-47
- [4] Fleischer, M.: Absicherung der virtuellen Prozesskette für Folgeoperationen in der Umformtechnik, Dissertation, Technische Universität München, 2009
- [5] Neitzel, M.; Mitschang, P.: „Handbuch Verbundwerkstoffe“, Hanser Verlag, 2004, S.155-161
- [6] Badel, P.; Gauthier, S.; Vidal-Sallé, E.; Boisse, P.: Rate constitutive equations for computational analyses of textile composite reinforcement mechanical behaviour during forming, In: Composites Part A Volume 40 Issue 8, 2008, S. 997-1007
- [7] ten Thije, R.H.W: Finite element simulations of laminated composite forming processes, Ph.D. Thesis, Universiteit Twente, 2007
- [8] Huétink, J.: On Anisotropy, Objectivity and Invariancy in finite thermo–mechanical deformations, In: 9th ESAFORM Conference On Material Forming Glasgow, UK, April 26-28, 2006, S.355-358



11. LS-DYNA Forum 2012
09.-10. Oktober 2012

UMFORMSIMULATION VON CFK- SCHALENBAUTEILEN.

AUTOREN: T. SENNER, DR. S. KREISSL, PROF. DR. M. MERKLEIN, A. LIPP

**BMW
GROUP**



EINLEITUNG. AUSWIRKUNGEN DER E-MOBILITÄT AUF DIE FAHRZEUGARCHITEKTUR.

E-Mobilität

Zusatzgewicht durch geringere
Energiedichte der Batterie

Li-Ionen Batterie :



~90...140Wh/kg [1]



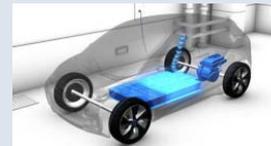
Benzin / Diesel:



~12.000Wh/kg

Reorganisation des Antriebsstranges
und des Energiespeichers

E-Fahrzeug



Konventionelles
Fahrzeug



Konsequenter Leichtbau durch den Einsatz von CFK und alternativen Konzepten



HERSTELLUNG VON CFK-SCHALENBAUTEILEN. HERAUSFORDERUNG AUTOMOBILE GROßSERIE.

Stückzahl

Motorsport
„Manufaktur“



[Quelle: dpa]

Luftfahrt
„Kleinserie“



[Quelle: EADS]

Automotive
„Großserie“



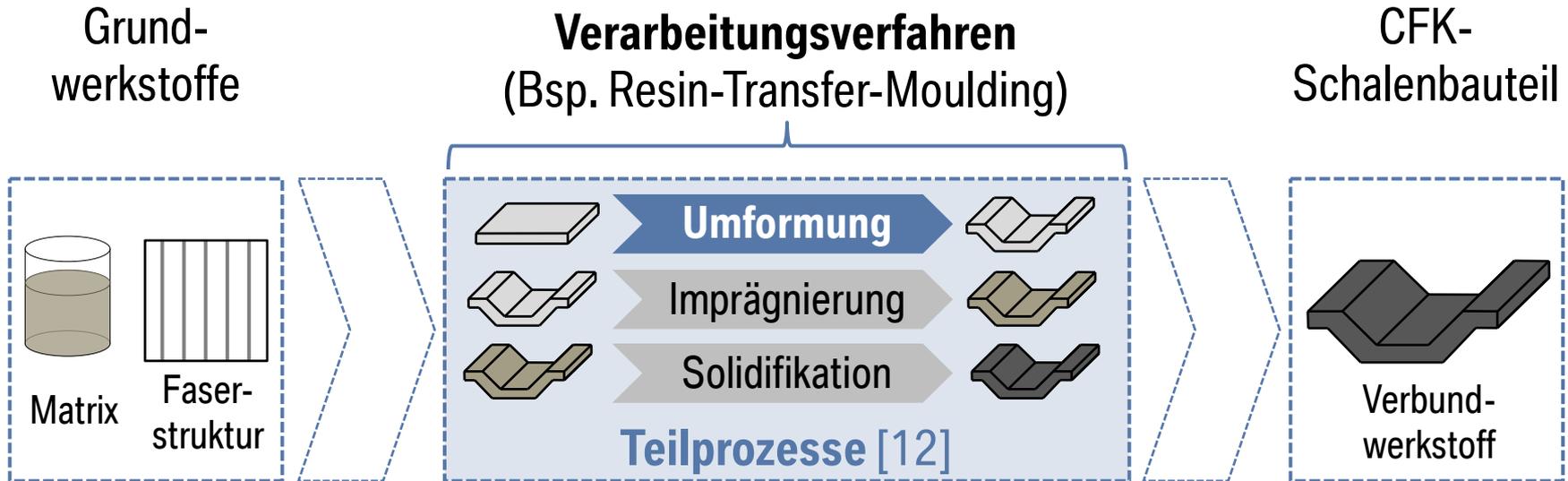
[Quelle: BMW]

Große Stückzahlen stellen hohe Anforderungen an die Prozessoptimierung:

- Sicherstellung der Bauteilqualität.
- Absicherung der Herstellbarkeit.

→ Unterstützung durch simulative Methoden mittels FEM.

HERSTELLUNG VON CFK-SCHALENBAUTEILEN. EINORDNUNG VON UMFORMPROZESSEN.



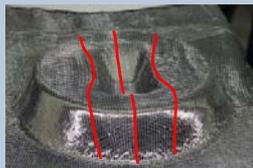
SIMULATION VON UMFORMPROZESSEN. FASERORIENTIERUNG – ZENTRALE EINFLUSSGRÖßE.

- **Anisotrope** Eigenschaften von CFK bzw. von Faserstrukturen werden dominiert durch die **Fasern** und deren **Orientierung**.
- Faserumorientierung bildet eine **zentrale Berechnungsgröße** für:

Virtuelle Herstellungsprozessabsicherung

Virtuelle Bauteilauslegung

Umform- eigenschaften



Quelle: [4]

→ Steifigkeit

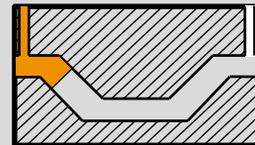
Vorhersage von Defektstellen



Quelle: [1]

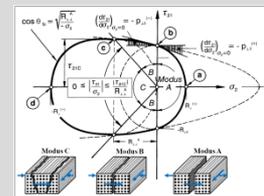
→ Faltenbildung

Nachfolgende Teilprozesse



→ Permeabilität

Festigkeitsanalyse



Quelle: [5]

→ Festigkeit

- Faserumorientierung wird durch den Teilprozess **Umformung** bestimmt.

SIMULATION VON UMFORMPROZESSEN. MEHRSKALENMATERIALVERHALTEN VON CFK.

Modellierung auf mehreren Skalierungsebenen.

Detailierungsgrad / Berechnungsaufwand

Mikro-Ebene [μm]



Quelle: [6]



Quelle: [7]

Meso-Ebene [mm]



Quelle: [6]

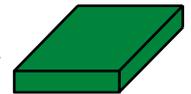


Quelle: [6]

Makro-Ebene [cm]



Quelle: [6]



Zielsetzung der Modellentwicklung:

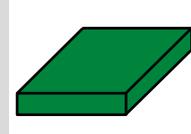
- Simulation komplexer Bauteile mit mehreren Lagen.
- Simulation komplexer Umformprozesse mit Ausblick weiterer Teilprozesse.

→ Industrielle Simulation aktuell nur auf Makro-Ebene zielführend.

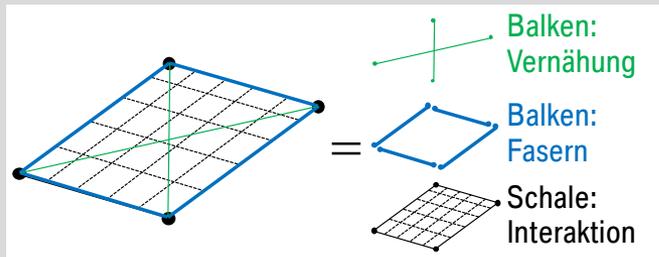
SIMULATION VON UMFORMPROZESSEN. MODELLE DER MAKRO-EBENE.



Makro-Ebene



Diskrete Modelle [10,11,12]



Prinzip:

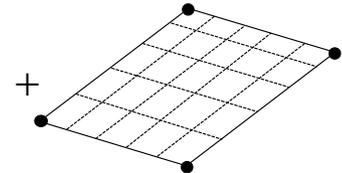
Jede Elementklasse übernimmt spezifische Aufgaben – Baukastensystem.

Eigenschaften:

- ➔ **Hohe Elementanzahl** erforderlich.
- ➔ **Aufwändige Modellierung.**

Kontinuums Modelle [13,14]

$$\hat{c}(\varepsilon, \gamma) = \begin{bmatrix} \hat{c}_{11} & \hat{c}_{12} & \hat{c}_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \hat{c}_{21} & \hat{c}_{22} & \hat{c}_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \hat{c}_{31} & \hat{c}_{32} & \hat{c}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{c}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{c}_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{c}_{66} \end{bmatrix}$$



Prinzip:

komplexes Materialmodell + Strukturelement.
Bsp.: MAT_34/234/235

Eigenschaften:

- ➔ **Hohe Effizienz** – Eignung für komplexe Bauteile und Prozesse.

NUMERISCHEN ANFORDERUNGEN DES USER-MATERIAL-MODELLS.

Numerische Anforderung:

- Berechnung einer möglichst **exakten Faserumorientierung**.
- **Hohe Effizienz**.

Aktueller Stand:

- **Unzureichende Abbildungsgenauigkeit** der Faserumorientierung mit aktuell verfügbaren Kontinuums Modellen in LS-DYNA.

Lösungsansatz:

- Entwickelte Modelle von **ten Thije**¹ [13] und **Huétink** [15] beschreiben geeignete Maßnahmen, welche die numerischen Anforderungen erfüllen.
→ Umsetzung in eigenem User-Material-Modell.

¹: Modell von **ten Thije** ist in kommerzieller Software **AniForm** [16] umgesetzt.

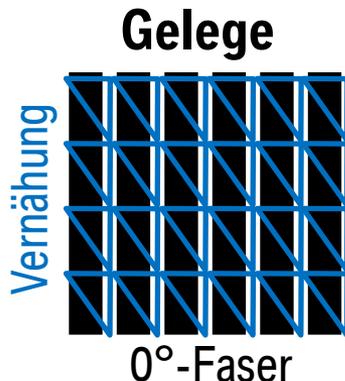
WERKSTOFFSPEZIFISCHE ANFORDERUNGEN DES USER-MATERIAL-MODELLS.

Zunehmende Einsatz von Gelege aufgrund:

- Guter Umformbarkeit.
- Sehr guten mechanischen Eigenschaften des fertigen Bauteils.

Aktueller Stand:

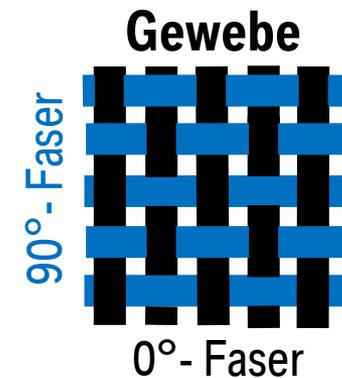
- Kein Materialmodell in LS-DYNA für Gelege verfügbar.



Unterschiede Gelege zu Gewebe:



- Asymmetrisches Schubverhalten.
- Plastisches Verhalten Vernähung.
- Keine Faserondulation.



ZIELSETZUNG DER IMPLEMENTIERUNG DES USER-MATERIAL-MODELLS.

Zusammenfassung der Anforderungen:

- Berechnung einer möglichst exakten Faserumorientierung.
- Hohe Effizienz durch Umsetzung als Kontinuums Modell.
- Abbildung der spezifischen Umformeigenschaften von Gelegen.

ERSTE ERGEBNISSE DES USER-MATERIAL-MODELLS. ELEMENTARE VERFORMUNGSZUSTÄNDE VGL. [9,14].

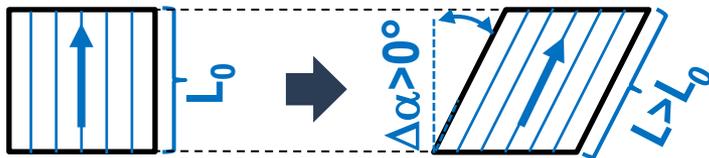
Verformungsmechanismus Unidirektionaler Faserstrukturen:

- Einheitszelle mit vertikaler Faserrichtung.



- Untersuchte Verformungszustände:

Horizontaler Schub



Vertikaler Schub



- Sollzustand resultierend aus Kinematik:

- Faserumorientierung $\Delta\alpha_{\text{soll}} = 45^\circ$.
- Faserdehnung $\Delta\varepsilon_{\text{soll}} = \sqrt{2}$.

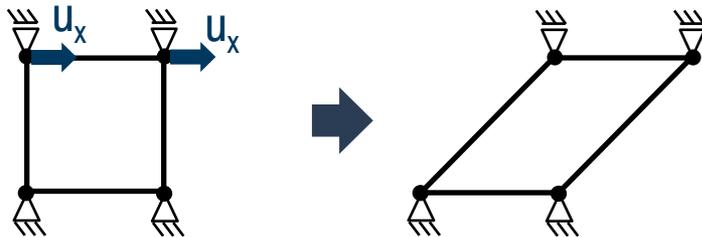
- Faserumorientierung $\Delta\alpha_{\text{soll}} = 0^\circ$.
- Faserdehnung $\Delta\varepsilon_{\text{soll}} = 0$.

ERSTE ERGEBNISSE DES USER-MATERIAL-MODELLS. ELEMENTARE VERFORMUNGSZUSTÄNDE VGL. [9,14].

Simulation mit implementiertem User-Material-Modell:

- Modelldaten:
 - Ein-Element (Belytschko-Tsay).
- Ergebnisse des User-Material-Modell:

Horizontaler Schub



$$\Delta\alpha_{\text{soll}} = \Delta\alpha_{\text{ist}} = 45^\circ. \quad \checkmark$$
$$\varepsilon_{\text{soll}} = \varepsilon_{\text{ist}} = \sqrt{2}. \quad \checkmark$$

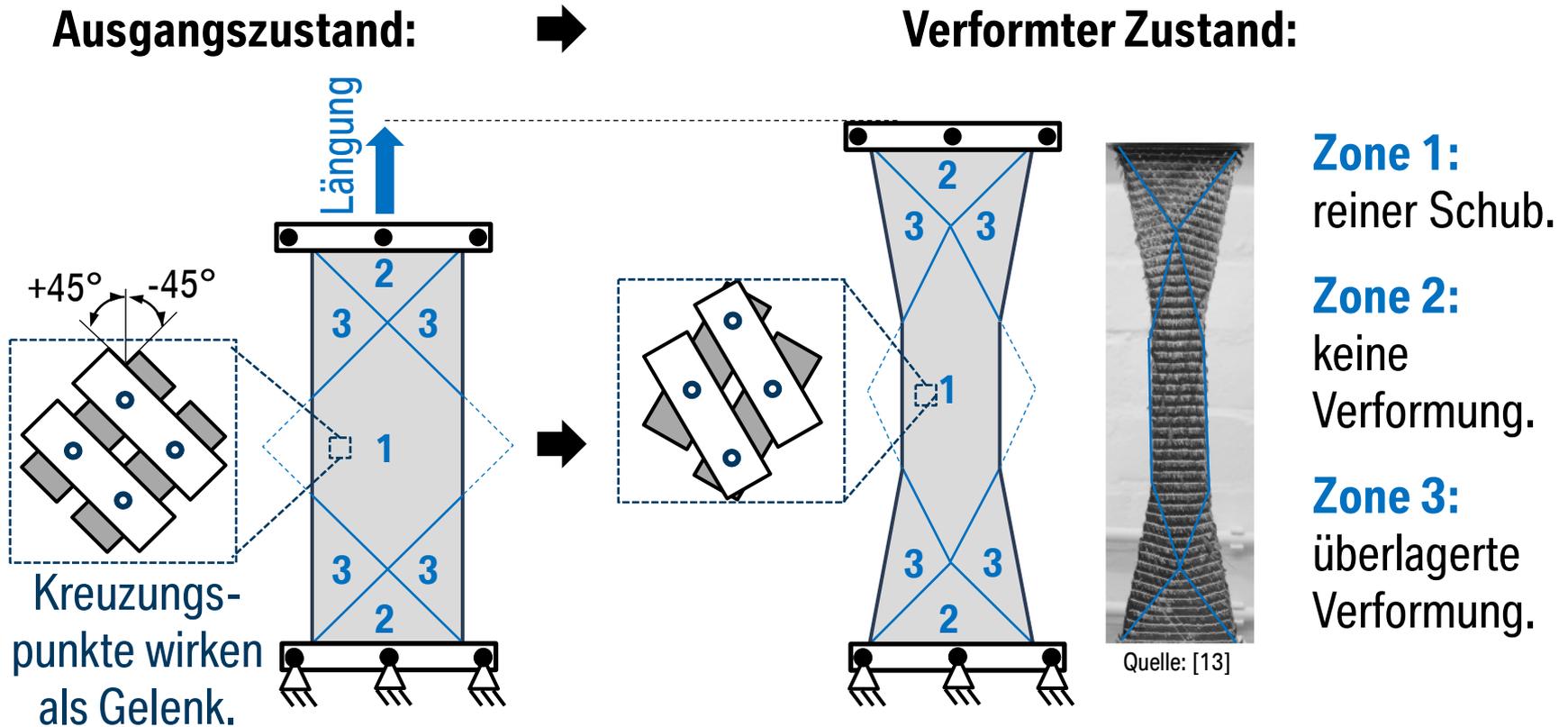
Vertikaler Schub



$$\Delta\alpha_{\text{soll}} = \Delta\alpha_{\text{ist}} = 0^\circ. \quad \checkmark$$
$$\varepsilon_{\text{soll}} = \varepsilon_{\text{ist}} = 0. \quad \checkmark$$

➔ Faserumorientierung und –dehnung werden korrekt berechnet.

ERSTE ERGEBNISSE DES USER-MATERIAL-MODELLS. BIAS-EXTENSION-TEST – BESCHREIBUNG [17].

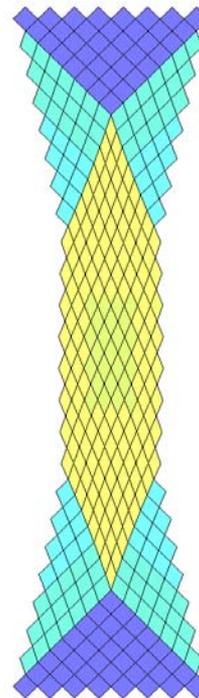


ERSTE ERGEBNISSE DES USER-MATERIAL-MODELLS. BIAS-EXTENSION-TEST – SIMULATION.

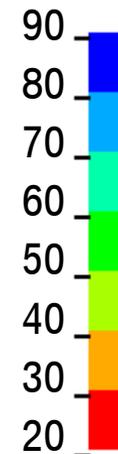
Modelldaten:

- Belytschko-Tsay Schalenelement.
- Faserorientierung $\pm 45^\circ$.
- Nur Steifigkeit in Faserrichtung.
- Kompaktierung Fasern in der Ebene nicht abgebildet.

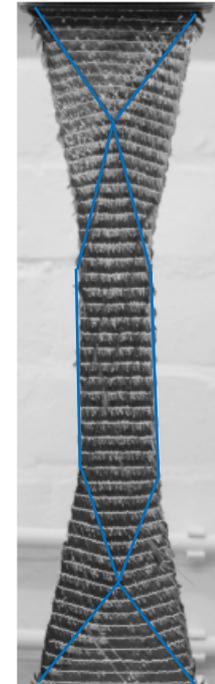
Simulation:



Winkel
zwischen.
Fasern in $^\circ$



Versuch [17]:



➔ Materialmodell bildet die Verformungszonen für große Verformungen zuverlässig ab.

ERSTE ERGEBNISSE DES USER-MATERIAL-MODELLS. BIAS-EXTENSION-TEST – SIMULATION.

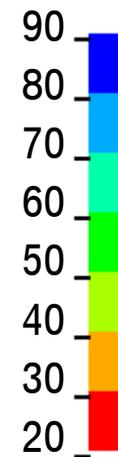
Modelldaten:

- Belytschko-Tsay Schalenelement.
- Faserorientierung $\pm 45^\circ$.
- Nur Steifigkeit in Faserrichtung.
- Kompaktierung Fasern in der Ebene nicht abgebildet.

Simulation:



Winkel
zwischen.
Fasern in $^\circ$



Versuch [17]:

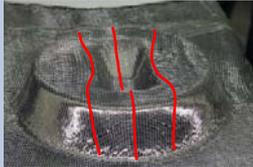
Keine weitere
**schädigungs-
freie**
Verformung
möglich.

➔ Materialmodell bildet die Verformungszonen für große Verformungen zuverlässig ab.

ZUSAMMENFASSUNG.

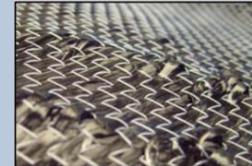
- Implementiertes User-Material-Modell erfüllt essentielle Anforderungen um Umformprozesse von Gelegen abzubilden.

Umformeigenschaften



Quelle: [4]

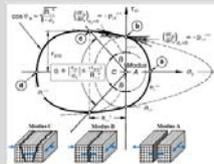
Vorhersage Defektstellen



Quelle: [1]

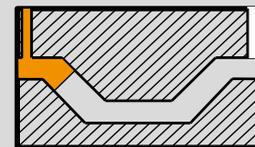
- Hohe Genauigkeit der Berechnung der Faserumorientierung bildet die Basis für:
 - Steifigkeits-/Festigkeitsbezogene Bauteilauslegung.
 - Simulation nachfolgende Teilprozesse (z.B. Imprägnierung).

Festigkeitsanalyse



Quelle: [5]

Nachfolgende Teilprozesse



AUSBLICK.

- Abbildung von **Biegesteifigkeit** und MembranstEIFigkeit in einem Schalenelement:
 - Motivation:
Wichtig zur Vorhersage der Faltenausbildung.
 - Herausforderung:
Biegesteifigkeit von Faserstrukturen in Schalenelementen überschätzt.



Gleiche Dicke und vergleichbare MembranstEIFigkeit
→ jedoch sehr unterschiedliche Biegesteifigkeit

- Abbildung von Umformprozessen mit **mehreren Lagen**.
- Abbildung und Kopplung **weiterer Teilprozesse**.

QUELLEN.

- [1] Blesl, M.; Bruchof, D.; Hartmann, N.; Özdemir, D.; Fahl, U.; Eltrop, L.; Voß, A.: Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2009
- [2] Neitzel, M.; Mitschang, P.: Handbuch Verbundwerkstoffe, Hanser Verlag, 2004
- [3] Drechsler, K.; Lehrstuhl für Carbon Composites, TU München
- [4] Kraus, J.-M.; Vogel Business Media GmbH & Co. KG, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de>
- [5] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer, 2005
- [6] Boisse, P.: Simulations of Composite Reinforcement Forming, Woven Fabric Engineering, Polona Dobnik Dubrovski (Ed.); 2010, ISBN: 978-953-307-194-7
- [7] Ramgulam R. B. ,Potluri P.,Chilo M.: Multiscale Modelling: Yarn Deformation to Draping Simulation of Woven Preforms, 2009
- [8] Boisse, P.; Borr, M.; Cherouat, A.: Finite element simulations of textile composite forming including the biaxial fabric behaviour, In: Composites Part B, 1997, 453-464
- [9] 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, 2009, 1443-1466
- [10] Sharma, S.; Sutcliffe M.: A simplified finite element model for draping of woven material, In: Composites. Part A, 2004, 637-643
- [11] Skordos, A.; Monroy Aceves, C.; Sutcliffe, M.: A simplified rate dependent model of forming and wrinkling of pre-impregnated woven composites, In: Composites. Part A, 2007, 1318-1330
- [12] Duhovic, M.; Mitschang, Peter; Bhattacharyya, D.: Modelling approach for the prediction of stitch influence during woven fabric draping, In: Composites. Part A, 2011, 968-978
- [13] Thije, R.H.W ten: Finite element simulations of laminated composite forming processes, Ph.D. Thesis, Universiteit Twente, 2007
- [14] Badel, P.; Gauthier, S.; Vidal-Sallé, E.; Boisse, P.: Rate constitutive equations for computational analyses of textile composite reinforcement mechanical behaviour during forming, In: Composites. Part A, 2008, 997-1007
- [15] Huétink, J.: On Anisotropy, Objectivity and Invariancy in finite thermo-mechanical deformations, In: 9th ESAFORM Conference, 2006, 355-358
- [16] Aniform – Virtual Forming; <http://www.aniform.com>
- [17] Creech, G.: Mesoscopic Finite Element modelling of Non-Crimp Fabrics for drape and failure analyses, Ph.D. Thesis, Cranfield University, 2006

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT.

