

Framework zur Berücksichtigung von Abweichungen bei FKV-Produkten

TEXT: S. Freitag, S. Goetz, S. Wartzack

INHALT Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) ermöglichen die Fertigung extrem leichter und steifer Produkte. Die Herstellung ist allerdings komplex und zudem anfällig für Abweichungen, die zu großen Verformungen führen können. Dieser Artikel stellt daher ein Framework vor, das die Simulation der FKV-Fertigung vom Einzelteil bis zur Baugruppe ermöglicht und dabei Abweichungen und deren Einflüsse auf die Produktqualität (zum Beispiel Formtoleranzen oder maximale Spannungen) berücksichtigt.

1 Einleitung

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) bieten dank ihrer hohen Festigkeit und Steifigkeit ein hohes Leichtbaupotenzial, was sie zu wichtigen Werkstoffen in Luft- und Raumfahrt, Automobilbau und der nachhaltigen Produktentwicklung macht. Ein FKV besteht aus mehreren Lagen von Verstärkungsfasern, zum Beispiel Kohle- oder Naturfasern, die in eine Kunststoffmatrix eingebettet sind. Somit können Hauptlasten gezielt durch die Fasern aufgenommen werden, während die Matrix für den Verbund der Fasern sorgt. [1] Die breite Einführung von FKV in der Industrie wird jedoch nach wie vor durch die herausfordernde Auslegung und Fertigung sowie die damit verbundenen hohen Kosten gehemmt.

Die Herstellung von FKV-Bauteilen umfasst mehrere Teilprozesse, die jeweils inhärent abweichungsbehaftet sind und so zum Beispiel zu einer Fehlansrichtung der Fasern führen. Diese akkumulierten Bauteil-Abweichungen können sich auf nachfolgende Montageschritte auswirken und die strukturelle Integrität und Qualität des Endprodukts beeinträchtigen [2]. Die Simulation des Fertigungs- und Montageprozesses von Verbundwerkstoffen, einschließlich der Auswirkungen von Abweichungen, ermöglicht die Analyse und Vorhersage ihrer Auswirkungen.

Bereits vorhandene Methoden [2; 3] basieren meist auf der zeiteffizienten Method of Influence Coefficients (MIC), bei der davon ausgegangen wird, dass, bedingt durch Abweichungen, nur lineare Verformungen auftreten und die Steifigkeit der Komponenten konstant ist. Allerdings existieren bereits erste Ansätze, die ohne diese vereinfachenden Annahmen auskommen, sich jedoch auf Einzelteile fokussieren [4]. In diesem Artikel wird ein Framework vorgestellt, mit dem Abweichungen und mögliche nichtlineare Effekte vom Einzelteil bis zur Baugruppe durchgängig berücksichtigt werden können. Anschließend wird Einblick in die Validierung der Simulationen gegeben und abschließend diskutiert, in welcher Form ein solches Vorgehen in der Industrie angewendet werden kann und welche Vorteile und Herausforderungen bestehen.

Framework for considering variations in composite products

ABSTRACT Fiber-reinforced plastics (FRP) enable the manufacturing of extremely lightweight yet stiff products. However, their production processes are complex and prone to variations that can lead to significant deformations. This paper therefore presents a framework that enables the simulation of FRP manufacturing from single part to assembly while considering variations and their influence on product quality (e.g. form tolerances or max. stresses).

2 Design und Fertigung von FKV-Baugruppen

Obwohl faserverstärkte Kunststoffe viele Vorteile hinsichtlich der Gewichtsreduzierung bieten, sind Design und Fertigung solcher Teile aufgrund des anisotropen Materialverhaltens und des lagenweisen Aufbaus sehr komplex. In der jüngeren Vergangenheit wurden mehrere Ansätze entwickelt, die insbesondere im Design- und Auslegungsprozess von FKV-Bauteilen unterstützen können. Sie umfassen unter anderem die anisotrope Topologieoptimierung [5], die Faserausrichtungsoptimierung [6] oder eine Kombination aus beiden [7; 8]. Das Endergebnis der Auslegung ist ein optimiertes Design, einschließlich des Laminatlayouts mit einer definierten Anzahl, Größe, Ausrichtung und Reihenfolge verschiedener Lagen. Der nächste Schritt ist die Herstellung des Teils gemäß dem erstellten Design.

Es existiert eine Reihe gängiger Verfahren zur Herstellung von Verbundwerkstoffteilen, darunter Handlaminieren, Resin Transfer Molding (RTM) oder die Anwendung von Prepregs. Prepregs sind ebene, flächige Halbzeuge bestehend aus vorimprägnierten (engl. pre-impregnated) Fasern. Genutzt wird dafür meist ein duroplastisches Harzsystem, in der Regel Epoxidharz [9]. Prepregs sind aufgrund der hervorragenden mechanischen Eigenschaften sowie der vergleichsweise einfachen Verarbeitung weit verbreitet und werden daher exemplarisch für das in diesem Artikel vorgestellte Vorgehen genutzt. Die grundlegende Vorgehensweise ist auch auf weitere Verfahren anwendbar, wenn die Prozessparameter dementsprechend angepasst werden.

Für die Einzelteilfertigung werden mehrere Prepreg-Lagen übereinander in die Form gelegt (drapiert) und anschließend unter Druck ausgehärtet. Die Aushärtetemperatur und Dauer sind vom Hersteller der Prepregs vorgegeben und sollten genau eingehalten werden [1]. Während der Aushärtung bauen sich Spannungen auf, die zu Verformungen nach dem Entformen führen, wobei insbesondere Spring-In (Einfedern von Winkeln) und Warpage (Wölbung von Flächen) zu beobachten sind [10].

Vor allem asymmetrische Laminare, bei denen der Lagenaufbau nicht spiegelsymmetrisch zur Mittelfläche ist und dadurch ei-

Bild 1 Montage von FKV-Bauteilen mittels PCFR-Prinzip [14]. Grafik: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk

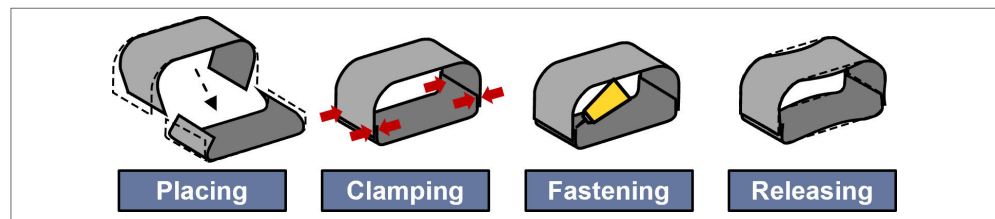
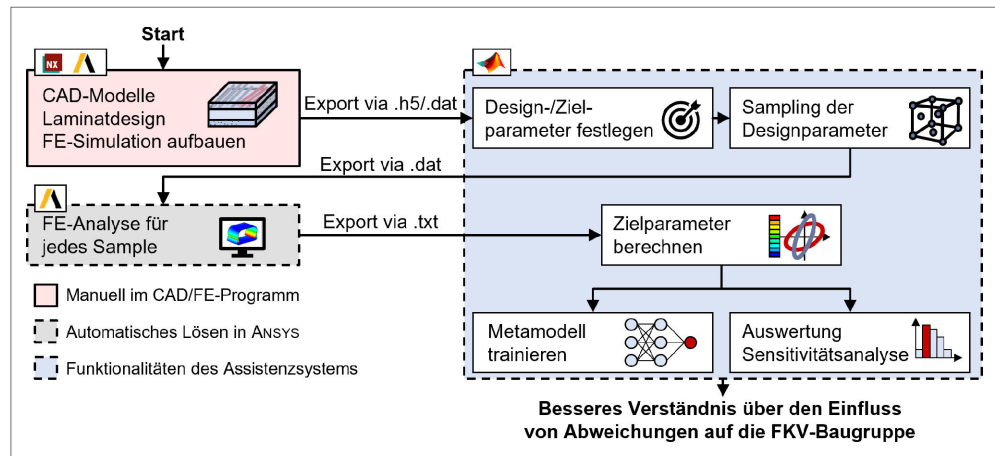


Bild 2 Framework zur virtuellen Abbildung der FKV-Fertigung unter Berücksichtigung von Abweichungen. Grafik: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk



ne Biege-Dehn-Kopplung entsteht, neigen zu großen Verformungen und sollten möglichst vermieden werden [11]. Bereits kleine Abweichungen der Lagenorientierungen, Lagendicken und Prozessparameter können zu solcher Asymmetrie führen, lassen sich aber nicht vollständig vermeiden. Daher ist eine Berücksichtigung dieser Abweichungen unerlässlich.

Der Montageprozess (**Bild 1**) lässt sich in vier Schritte unterteilen: placing, clamping, fastening and releasing (PCFR) [12]. Placing bedeutet, die Teile so zu platzieren, dass die Verbindungsflächen der Teile in der richtigen Position sind. Die Verbindungsflächen werden dann durch Befestigungselemente in ihre Nennform gebracht (clamping), zum Beispiel durch Klemmen, wodurch die nach dem Aushärten aufgetretenen Verformungen temporär eliminiert werden. Dabei ist die hohe Steifigkeit von FKV-Bauteilen zu berücksichtigen, die den zulässigen Verformungsgrad vor Schädigungseintritt limitiert. Die tatsächliche Verformung, die aus Abweichungen und Aushärtung resultiert, muss hier also bereits beachtet werden. Um dennoch eine sichere Verbindung zwischen Bauteilen sicherzustellen, können verbleibende Spalte beispielsweise auch mit Unterlegscheiben verschiedener Materialien gefüllt werden, was die Restspannungen reduzieren kann, aber auch zu erhöhten Kosten, Gewicht und Produktionszeiten führt. [13] Dann wird eine feste Verbindung zwischen den beiden Teilen hergestellt (fastening), zum Beispiel durch Schrauben, Nieten oder Verkleben. Nachdem die Befestigungselemente entfernt wurden, verformt sich die Baugruppe aufgrund der verbleibenden Eigenspannungen und erreicht ihren finalen Zustand (releasing).

Da die Teile nun miteinander verbunden sind, können nicht alle Spannungen, die während des Klemmens in das Teil eingebracht wurden, abgebaut werden. Das bedeutet, dass die Baugruppe unter einer bestimmten Vorspannung bleibt, deren Einfluss auf das Verhalten im Betrieb berücksichtigt werden muss.

3 Framework zur virtuellen Abbildung der FKV-Fertigung

Um die Fertigung von FKV-Bauteilen und Baugruppen unter der Berücksichtigung von Abweichungen virtuell abbilden zu können, wurde das folgende Framework entwickelt (**Bild 2**). In Kap. 3.1 wird zunächst allgemein der Aufbau der Fertigungs- und Montagesimulation beschrieben. Anschließend wird in Kap. 3.2 gezeigt, wie dabei Abweichungen berücksichtigt werden können.

3.1 Simulation der Baugruppenfertigung

Die Simulation der Baugruppenfertigung wird analog zur Realität in mehreren Teilschritten durchgeführt. Zunächst erfolgt die Simulation der Einzelteilerfertigung, danach die Montagesimulation der Einzelteile zur Baugruppe und anschließend können Betriebslastfälle untersucht werden [14]. Um den Rechenaufwand zu minimieren, werden folgende Vereinfachungen getroffen. Die Simulation von FKV-Bauteilen erfolgt meist auf Basis von Flächenmodellen unter Anwendung der klassischen Laminattheorie [1]. Des Weiteren wird vorerst keine Kontaktbedingung zwischen den Bauteilen modelliert, sondern die Durchdringung durch die Aufbringung von geeigneten Randbedingungen verhindert.

Für die Fertigungssimulation werden zunächst der nominale Laminataufbau sowie Materialeigenschaften und Prozessparameter festgelegt. Das Drapieren der einzelnen Lagen auf die Form kann erhebliche Abweichungen der Faserorientierungen verursachen und muss daher berücksichtigt werden. Insbesondere wenn ein Laminat mit abweichungsbehafteten lokalen Verstärkungslagen vorliegt, sind die Drapierungseffekte signifikant [15]. Im hier vorgestellten Framework ist eine kinematische Drapierungssimulation direkt in die Finite Elemente (FE)-Analyse in ANSYS integriert. Kinematische Drapierungssimulationen behandeln das Material wie ein Netz aus senkrecht zueinanderstehenden, nicht dehnbaren Fasern. Die Verformung überwiegt dabei gegenüber

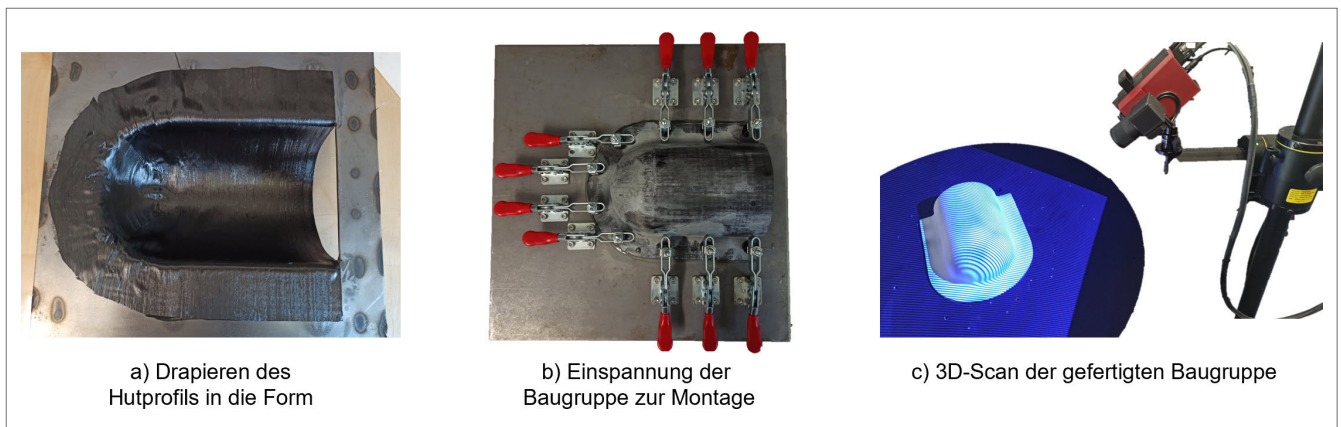


Bild 3 Fertigung und 3-D-Scan der Demonstrator-Baugruppe. Fotos: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk

anderen Effekten wie Scherung oder Faserdehnung [16]. Anschließend werden die Aushärtung der Bauteile und die dabei entstehenden Verformungen simuliert. Dafür werden die Teile jeweils mittels einer 3-2-1-Lagerung so im Raum fixiert, dass keine Starrkörperbewegung erfolgen kann, die Verformung aber gleichzeitig nicht eingeschränkt wird [17]. Im ersten Lastschritt wird eine Temperatur aufgebracht, die die Aushärtung abbildet. Bei dünnen Laminaten kann der Temperaturgradient in Dickenrichtung des Laminats vernachlässigt werden. Das Ergebnis des ersten Lastschrittes sind die verformten Einzelteile, die anschließend verklebt werden sollen.

Die Montagesimulation erfolgt gemäß der PCFR-Methode (Bild 1). Dazu werden im zweiten Lastschritt Verschiebungsrandbedingungen so aufgebracht, dass die Verformungen an den Klemmflächen entfernt werden. Dadurch wird das Aufbringen einer Klemmkraft, beispielsweise durch Schnellspanner, abgebildet. Die Reihenfolge der Kraftaufbringung hat entscheidenden Einfluss auf die Spannungen und Verformungen der Baugruppe und muss daher in der Simulation realitätsgetreu abgebildet werden [18; 19]. Für jede Einspannung wird dazu ein neuer Lastschritt hinzugefügt, in dem die Kräfte in der definierten Reihenfolge nacheinander aktiviert werden. Dieser Schritt kann zu erheblichen Spannungen in den Bauteilen führen, insbesondere wenn asymmetrische Laminats verwendet werden oder sich die Verformungen der beiden Bauteile in entgegengesetzte Richtungen entwickeln. Im finalen Lastschritt wird ein Verbundkontakt (bspw. MPC oder Pure Penalty) auf den Fügeflächen aktiviert und gleichzeitig werden die Einspannungen entfernt. Der Kontakt bildet dabei die Verklebung ab und wird daher so definiert, dass die Knoten im verformten Zustand fest verbunden werden. Die Baugruppe wird wieder durch eine 3-2-1-Lagerung fixiert und verformt sich aufgrund der internen Spannungen, die aus Abweichungen und Aushärtung resultieren.

3.2 Berücksichtigung von Abweichungen in der Simulation

Der Einfluss von Abweichungen der Designparameter auf resultierende Verformungen oder Spannungen kann untersucht werden, indem eine sampling-basierte Abweichungsanalyse durchgeführt wird. Grundlage bildet dafür die FE-Analyse (Kap. 3.1), die einmalig mit nominalen Parametern aufgebaut wird. Mittels eines Latin Hypercube Samplings (LHS) werden die Werte der Designparameter entsprechend einer Wahrscheinlich-

keitsverteilung, die die real zu erwartenden Streuungen der Parameter (wie zum Beispiel der Faserwinkel) abbildet, bewusst variiert. Für jede so generierte Kombination aus abweichungsbehafteten Parametern werden dann die FE-Analyse durchgeführt, die Ergebnisdateien eingelesen und die Zielparameter berechnet, siehe Bild 2. Hierzu wurde ein Assistenzsystem entwickelt, das den direkten Austausch von Modellinformationen, Abweichungsdaten, Solverdateien und Ergebnissen zwischen ANSYS und MATLAB erlaubt, ohne manuell eingreifen zu müssen. Somit wird es ermöglicht, den Einfluss von Abweichungen auf die finale Baugruppe sowie an allen Zwischenschritten automatisiert zu untersuchen. Im Rahmen einer abschließenden Auswertung lassen sich bspw. die zu erwartenden Streuungen bzw. Häufigkeitsverteilungen der Produktqualität bestimmenden Eigenschaften (zum Beispiel Formtoleranzen oder maximale Spannungen) analysieren oder Worst-Case-Betrachtungen durchführen. Darüber hinaus ermöglichen Sensitivitätsanalysen die Identifikation relevanter Beitragsleister und schaffen damit die Grundlage für eine gezielte Definition von Maßnahmen in Design und Fertigung zur Reduktion der abweichungsbedingten Effekte. Bspw. können Toleranzen für Design- und Prozess definiert werden, um die Einhaltung der Qualitätsbedingungen sicherzustellen [4].

Nachdem der vorgestellte statistische Ansatz mit langen Rechenzeiten in der FE-Simulation einhergeht, bietet sich der Einsatz von Metamodellen an (etwa künstliche neuronale Netze oder Gaußprozessregression). Als Trainingsdaten dienen dann die zu Grunde liegenden Abweichungsinformationen (Input) und die daraus resultierenden Ergebnisse (Output). Damit lassen sich Ergebnisse schnell und ohne weitere FE-Analyse zuverlässig vorher-sagen [14], was beispielsweise die Möglichkeit zur mathematischen Optimierung von Parametertoleranzen eröffnet [4; 20].

4 Vergleich von Simulation und Experiment

Die Validierung der Fertigungssimulation stellt auf Grund der mangelnden Verfügbarkeit von Materialdaten und der komplexen Materialcharakterisierung derzeit eine Herausforderung dar. Darüber hinaus lassen sich die unvermeidbaren Abweichungen in den einzelnen Fertigungsschritten häufig nicht durchgängig messtechnisch erfassen, wodurch eine exakte Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation nicht gewährleistet werden kann.

Dennoch wurden zur initialen Validierung und zur Identifizierung von notwendigem Weiterentwicklungsbedarf mehrere De-

Tabelle 1 Für die Simulation verwendete Materialparameter.

Parameter	Wert längs	Wert quer
E-Modul [MPa]	135 000	6565,1
Schubmodul [MPa]	3567,5	2374,2
Querkontraktionszahl	0,276	0,546
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [1/K]	-5e-7	3e-5
Laminatdichte [kg/m ³]		1570
Faservolumenanteil [%]		55
Lagendicke [mm]		0,15

monstrator-Baugruppen gefertigt, um die real auftretenden Verformungen mit den Simulationsergebnissen abzugleichen. Die Baugruppe besteht aus einem Hutprofil und einer ebenen Platte als Grundfläche, siehe **Bilder 3** und **4**. Das Hutprofil wurde mit zwei verschiedenen Laminataufbauten gefertigt, symmetrisch ($[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$) sowie asymmetrisch ($[90^\circ_4/0^\circ_4]$), während für die Platte nur der symmetrische Aufbau genutzt wurde. Als Halbzeug wird das unidirektionale Prepreg „UNIPREG 150 g/m²“ verwendet [21]. Die Lagen wurden händisch geschnitten und auf die Form drapiert (Bild 3a). Die Teile wurden gemäß den Herstellervorgaben bei 5 °C/min auf 120 °C erhitzt und für 90 min [21] mittels des Vakuumsackverfahrens ausgehärtet [1]. Die Verklebung erfolgte dann nach dem Abkühlen, Ausformen und Fräsen der Außenkontur in einer Spannvorrichtung (Bild 3b).

Die Simulation wurde gemäß der vorgestellten Vorgehensweise durchgeführt (Kap. 3.1). Die **Tabelle** zeigt die verwendeten Materialparameter. Dabei muss beachtet werden, dass fehlende Materialparameter gemäß des Modells von Chamis [22] berechnet wurden und für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten typische Werte von Kohlefaserprepregs genutzt wurden [9].

Bild 4 zeigt die wesentlichen Schritte der Simulation: Im ersten Lastschritt (a) wurde die Verformung durch die Aushärtung simuliert, in den Lastschritten 2 bis 6 (b) wurden die Klemmkraften nacheinander aktiviert und im letzten Lastschritt (c) wurde der Kontakt hergestellt sowie die Klemmkraften wieder gelöst. Die Verklebung erfolgte an den Flanschflächen des Hutprofils. Der Kontakt wurde auf alle Flächen, die innerhalb von 1 mm zur Grundplatte liegen, angewendet, was die aufgebrachte Klebschicht repräsentiert.

Die gefertigten Teile wurden jeweils vor und nach der Verklebung mit dem 3-D-Scansystem „GOM ATOS 12M“ digitalisiert,

um die geometrischen Verformungen untersuchen zu können (Bild 3c). **Bild 5** zeigt Falschfarbenvergleiche zwischen den geschnittenen Geometrien und den Simulationsergebnissen.

5 Diskussion

Mit dem vorgestellten Framework können Abweichungen im Herstellungsprozess von FKV-Produkten simulativ abgebildet werden und für statistische Verfahren genutzt werden. Je nach Komplexität des Modells ergeben sich dabei allerdings noch Hürden im Bezug auf Rechenzeit und Übertragbarkeit auf die Realität. Insbesondere die Aushärtung stellt einen komplexen Prozess dar, der durch reine Temperaturrandbedingungen nur vereinfacht abgebildet wird, da hierbei die chemische Umwandlung des Materials unberücksichtigt bleibt. Eine detailliertere Beschreibung, etwa durch transiente thermo-chemische Simulationen unter Berücksichtigung der Aushärtekinetik, ist grundsätzlich möglich, führt jedoch zu deutlich erhöhten Rechenzeiten und ist daher im Kontext statistischer Analysen bisher nicht zielführend. In diesen Fällen müssen verbesserte Ersatzmodelle für die Aushärtung erforscht sowie die Recheneffizienz erhöht werden. Eine sinnvolle und realistische Vereinfachung ist die Verwendung von Flächenmodellen bei dünnen Laminaten. Für Volumen- und Flächenmodelle konnten in den durchgeführten Simulationen übereinstimmende Verformungen beobachtet werden. Eine nichtlineare mechanische FE-Analyse ist jedoch erforderlich, da sowohl große geometrische Verformungen auftreten können als auch wechselnde Kontaktzustände an den Fügeflächen zwischen offenem und geschlossenem Zustand berücksichtigt werden müssen. Zur Vereinfachung wurde ebenfalls kein Kontakt zwischen den Einzelteilen während des Klemmvorgangs verwendet, da dadurch sehr kleine Zeitschritte notwendig wären, was die Simulationsdauer stark erhöhen würde. Hier muss je nach Modell abgewogen werden, wie diese Vereinfachung mithilfe geeigneter Randbedingungen kompensiert werden kann. Trotz dieser Vereinfachungen ist es zum aktuellen Zeitpunkt ab einer gewissen Modellkomplexität sinnvoller, keine vollständige statistische Abdeckung aller möglichen Abweichungen zu betrachten, sondern sich auf eine Worst-Case-Betrachtung zu beschränken.

Des Weiteren ist die Validierung wichtig, um die Anwendbarkeit derartiger Simulationsansätze zu erhöhen. Der Vergleich von Simulation mit den realen Verformungsdaten (Bild 5) zeigt grundsätzlich eine gute Übereinstimmung, insbesondere die Art der Verformungen wird korrekt simuliert. Die Flansche an den Seiten des Hutprofils federn aufgrund des Spring-Ins ein. Die Einfederung ist dabei bei dem asymmetrischen Laminat wesent-

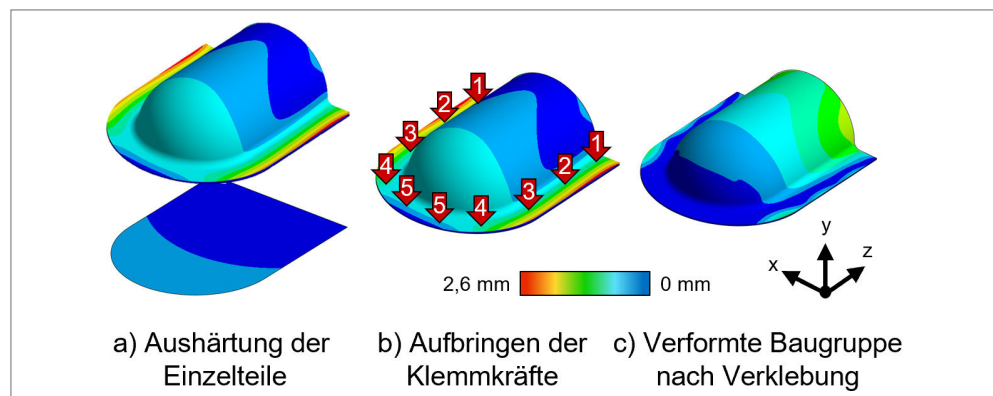


Bild 4 Maximale Verformungen an den einzelnen Schritten des Simulationsablaufs der Demonstrator-Baugruppe. Grafiken: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk

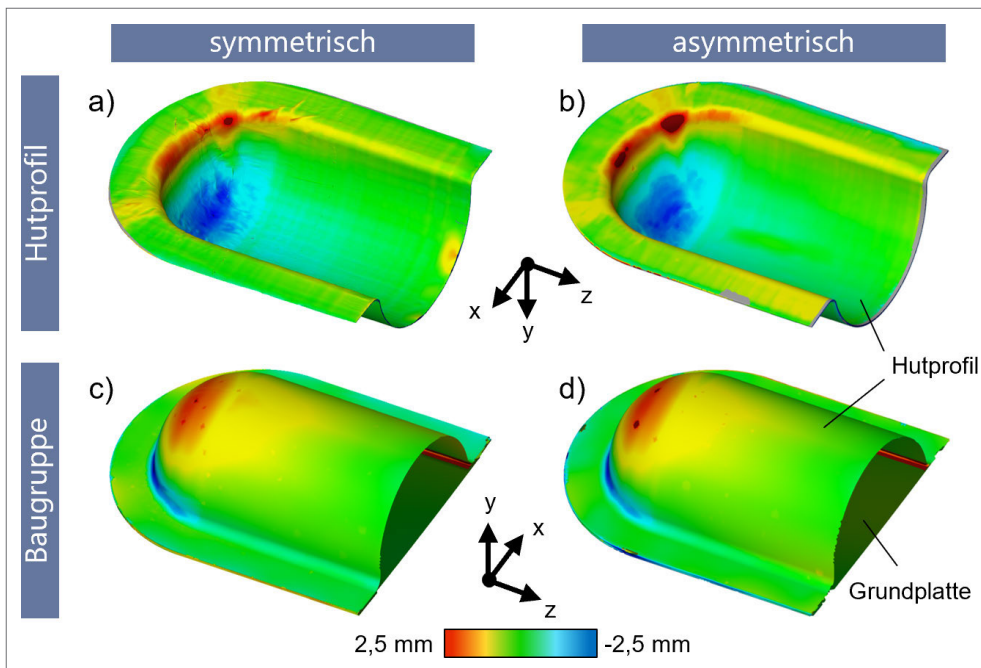


Bild 5 Geometrieabweichungen der Simulationsergebnisse gegenüber den realen Scandaten. Grafiken: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk

lich größer (5°) als beim symmetrischen Laminat ($1-1,5^\circ$). In der Simulation ist eine gute Übereinstimmung beim asymmetrischen Laminat zu beobachten, während die Verformungen des symmetrischen Laminats durchgehend zu gering sind. Im vorderen Bereich des Hutprofils hat die Asymmetrie einen noch größeren Einfluss, da hier im Gegensatz zum symmetrischen Laminat kein Spring-In stattfindet, sondern eine Aufweitung des Winkels. Dies ist auch in der Simulation zu beobachten, wobei die Winkel dabei deutlich größer sind als in der Realität. Dies könnte zum Beispiel an den deutlichen Unterschieden in der Rundung des Hutprofils liegen. Diese großen Abweichungen weisen auf eine Differenz zwischen CAD-Modell und Realmodell hin, die bereits bei der Werkzeugform vorliegt und bspw. eine Folge thermischen Verzugs sein könnte. In einem Wiederholversuch sollte hierbei die Werkzeugform gescannt werden und daraus das Simulationsmodell abgeleitet werden, um zu verifizieren, dass dies die Winkelunterschiede entscheidend beeinflusst.

Ebenso wie bei den Einzelteilen sind auch die Verformungsarten der Baugruppe übereinstimmend mit den experimentellen Ergebnissen. Im Vergleich zum Experiment fallen diese allerdings durchgehend zu gering aus, was auf eine zu steife Abbildung des Klebekontakts hinweist. Hier müssen weitere Untersuchungen angestellt werden, um die Verbindung realitätsnäher abzubilden, ohne den Simulationsaufwand signifikant zu erhöhen.

Der vorgestellte Ansatz zeigt bereits, dass die grundsätzliche Vorgehensweise geeignet ist, die Auswirkungen von Abweichungen im Fertigungs- und Montageprozess abzubilden und qualitativ zu bewerten. Art und Richtung der Verformungen konnten durchgehend qualitativ korrekt abgebildet werden. Die quantitative Ausprägung der Ergebnisse bedarf jedoch einer weiteren Anpassung der Simulation, die in der industriellen Praxis möglich ist, sofern detaillierte Kenntnisse über die verwendeten Materialien und den jeweiligen Herstellungsprozess vorliegen. Insgesamt ermöglicht der Ansatz erstmals eine durchgängige Betrachtung von Abweichungen vom Einzelteil bis zur Baugruppe, zeigt in der akademischen Validierung bereits vielversprechende Ergebnisse und verdeutlicht zugleich die Notwendigkeit einer anwendungs-

spezifischen Anpassung der Parameter. Je genauer die eingesetzten Anlagen, Prozesse und Materialien bekannt sind, desto zuverlässiger können Verformungen und Qualitätseinflüsse simulativ vorhergesagt und geeignete Gegenmaßnahmen frühzeitig abgeleitet werden. Dadurch kann die Qualität in der FKV-Fertigung erhöht, Kosten reduziert und ein Beitrag zu einer nachhaltigeren Produktion geleistet werden.

6 Fazit und Ausblick

In diesem Artikel wurde ein Framework vorgestellt, der es erstmals ermöglicht, durchgängig Abweichungen im Fertigungs- und Montageprozess von FKV-Produkten zu berücksichtigen und deren Einflüsse auf Verformungen und Qualität zu untersuchen. Dies ist notwendig, da FKV-Bauteile stark auf Schwankungen der Designparameter reagieren und Abweichungen im komplexen Herstellungsprozess nicht verhindert werden können. Baugruppen, die aus mehr als zwei Einzelteilen bestehen, wurden bisher nicht betrachtet, sind aber prinzipiell mit dem Framework abbildbar.

Es wurde gezeigt, dass die Verformungen auch mit den getroffenen Vereinfachungen qualitativ korrekt simuliert werden können. Dies bildet die Grundlage für die Anwendung der Simulation im vorgestellten Framework zur Berücksichtigung der Abweichungen. Aufgrund oft unbekannter Materialparameter steht eine vollständige Validierung der Fertigungssimulation allerdings noch nicht zur Verfügung. Insbesondere thermische Materialparameter wie Ausdehnungskoeffizient und Wärmeleitfähigkeit sowie Parameter zur Beschreibung der Aushärtekinetik, wie Reaktionsenergie und experimentell ermittelte Anpassungsparameter, stellen eine Herausforderung dar, weil die Erfassung zeit- und kostenintensiv ist und kaum Werte in der Literatur zu finden sind.

Um die unter Umständen hohen Rechenzeiten zu reduzieren, werden Aushärtung sowie Einspannung und Verklebung bisher vereinfacht abgebildet. Zur praktischen Anwendung des Frameworks ist weitere Forschung mit dem Ziel reduzierter Rechenzei-

ten sinnvoll. Ferner muss eine individuelle Anpassung der Parameter an den tatsächlichen Prozess erfolgen, um die realen Bedingungen in der Simulation quantitativ besser abbilden zu können. ■

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Forschungsvorhabens – Projekt-nummer 389616685.

Literatur

- [1] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2. bearb. und erw. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg, 2007.
- [2] Polini, W.; Corrado, A.: Digital twin of composite assembly manufacturing process. *Int. J. Prod. Res.* 58 (2020), pp. 5 238-5 252, <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1714091>.
- [3] Jareteg, C.; Wärmefjord, K.; Cromvik, C.; Söderberg, R.; Lindkvist, L.; Carlson, J.; Larsson, S.; Edelvik, F.: Geometry Assurance Integrating Process Variation With Simulation of Spring-In for Composite Parts and Assemblies. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 16 (2016) 031003, <https://doi.org/10.1115/1.4033726>.
- [4] Franz, M.; Freitag, S.; Wartzack, S.: Tolerance optimization for composite structures. In: Wartzack, S. (Hrsg.), *Research in Tolerancing*, Springer Nature Switzerland, Cham, 2024, S. 237-265, https://doi.org/10.1007/978-3-031-64225-8_10.
- [5] Nomura, T.; Dede, E. M.; Lee, J.; Yamasaki, S.; Matsumori, T.; Kawamoto, A.; Kikuchi, N.: General topology optimization method with continuous and discrete orientation design using isoparametric projection. *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 101 (2015), pp. 571-605, <https://doi.org/10.1002/nme.4799>.
- [6] Mattheck, C.: *Design in Nature*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58747-4>.
- [7] Voelkl, H.; Kießkalt, A.; Wartzack, S.: Design for Composites: Derivation of Manufacturable Geometries for Unidirectional Tape Laying. *Proc. Int. Conf. Eng. Des.* 1 (2019), pp. 2 687-2 696, <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.275>.
- [8] Klein, D.; Malezki, W.; Wartzack, S.: Introduction of a Computational Approach for the Design of Composite Structures at the Early Embodiment Design Stage. In: *Proc. ICED15*, Milan, Italy, 2015, S. 105-114.
- [9] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U. (Hrsg.): *Handbuch Verbundwerkstoffe*, 2. Aufl., Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2014, <https://doi.org/10.3139/9783446436978.005>.
- [10] Albert, C.; Fernlund, G.: Spring-in and warpage of angled composite laminates. *Compos. Sci. Technol.* 62 (2002), pp. 1 895-1 912, [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00105-7).
- [11] Twigg, G.; Poursartip, A.; Fernlund, G.: Tool-part interaction in composites processing – Part I: experimental investigation and analytical model. *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* 35 (2004), pp. 121-133, [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00131-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00131-3).
- [12] Chang, M.; Gossard, D. C.: Modeling the assembly of compliant, non-ideal parts. *Computer-Aided Design* 29 (1997), pp. 701-708, [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(97\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(97)00017-1).
- [13] Söderberg, R.; Wärmefjord, K.; Lindkvist, L.: Variation simulation of stress during assembly of composite parts. *CIRP Annals* 64 (2015), pp. 17-20, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.048>.
- [14] Freitag, S.; Goetz, S.; Wartzack, S.: A framework for the continuous simulation of the manufacturing and assembly process of composites considering fiber angle variations. *Proc. Des. Soc.* 5 (2025), pp. 81-90, <https://doi.org/10.1017/pds.2025.10022>.
- [15] Freitag, S.; Goetz, S.; Wartzack, S.: Influence of Laminate Parameter and Draping Variations on Locally Reinforced Composite Parts. *Proc. CIRP* 129 (2024), pp. 187-192. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.033>.
- [16] Van Der Weeën, F.: Algorithms for draping fabrics on doubly-curved surfaces. *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 31 (1991), pp. 1 415-1 426, <https://doi.org/10.1002/nme.1620310712>.
- [17] Shirinzadeh, B.: Flexible fixturing for workpiece positioning and constraining. *AA* 22 (2002), pp. 112-120, <https://doi.org/10.1108/01445150210423143>.
- [18] Wärmefjord, K.; Söderberg, R.; Lindkvist, L.: Strategies for Optimization of Spot Welding Sequence With Respect to Geometrical Variation in Sheet Metal Assemblies. In: *Proc. ASME 2010, ASMEDC*, Vancouver, 2010, S. 569-577, <https://doi.org/10.1115/IMECE2010-38471>.
- [19] Wang, H.; Zhang, S.; Yu, J.: Computer Aided Tolerancing of Composite Elevator Assembly Involving Clamping Forces Coordination. *Proc. CIRP* 75 (2018), pp. 256-260, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.057>.
- [20] Wartzack, S.; Goetz, S.; Freitag, S.: Lightweight design optimization of an electrified Cross Skate. *Proc. Des. Soc.* 5 (2025), pp. 2 261-2 270, <https://doi.org/10.1017/pds.2025.10240>.
- [21] Unipreg, Carbon non-crimp fabric 150 g/m² Technical Data, (2025).
- [22] Chamis, C. C.; Sendekyj, G.; Wang, S.; Steven Johnson, W.; Stinchcomb, W.: *Mechanics of Composite Materials: Past, Present, and Future*. *J. Compos. Technol. Res.* 11 (1989) 3, <https://doi.org/10.1520/CTR10143J>.

M.Sc.

Stephan Freitag

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

freitag@mfk.fau.de

<https://orcid.org/0000-0002-5155-7939>

Dr.-Ing.

Stefan Goetz

Oberingenieur am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

goetz@mfk.fau.de

<https://orcid.org/0000-0002-0326-9158>

Prof. Dr.-Ing.

Sandro Wartzack

Lehrstuhlinhaber am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

wartzack@mfk.fau.de

<https://orcid.org/0000-0002-0244-5033>

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)



Das Ziel von Cosime ist es, Bauprozesse mithilfe von Echtzeitdaten, KI-gestützter Prozesssteuerung, AR-Assistenzsystemen und digitalen Zwillingen effizienter, nachhaltiger und transparenter zu gestalten. Bild: Cosime

DIGITALE WERKZEUGE FÜR DEN STRASSENBAU DER ZUKUNFT

Deutschlands Wirtschaft und Gesellschaft braucht ein leistungsfähiges Straßennetz, den Straßen tragen etwa 72 % des Güter- und 81 % des Personenverkehrs. Das Straßennetz ist jedoch in einem desolaten Zustand. Nach einer Studie des Informationsdienstes des Instituts der deutschen Wirtschaft werden bereits 80 % der befragten Unternehmen durch Infrastrukturmängel beeinträchtigt. Einem effizienten und qualitätsgesicherten Straßenbau kommt daher eine große Bedeutung zu. Etwa 95 % der deutschen Straßen bestehen aus Asphalt. Ab dem 01.01.2027 wird Asphalt nur noch temperaturabgesenkt hergestellt und verarbeitet. Dies hat enorme Vorteile für den Gesundheitsschutz und die Nachhaltigkeit von Asphaltbauweisen. Gleichzeitig erhöhen sich jedoch die Herausforderungen bei der Produktion und dem Einbau von temperaturabgesenktem Asphalt. Um den Herausforderungen zu begegnen, entwickelt Cosime (Eigenschreibweise: CoSiMe) den Angaben zufolge ein interaktives Metaverse für den Straßenbau. Ein wesentlicher Baustein ist die KI-basierte Echtzeit-Prozesssteuerung. Baumaschinen tauschen permanent Daten aus. Störungs- und Verzögerungszeiten werden aufgrund selbstlernender Algorithmen minimiert. Gleichzeitig entstehen AR-basierte Assistenzsysteme für das Baustellenpersonal: Per 3D-Visualisierung über Head-up-Displays kann das Maschinenpersonal in Echtzeit eventuelle Probleme erkennen und aktiv gegensteuern. Für Qualitätssicherung und Transparenz sorgt schließlich eine sichere Blockchain-gestützte Dokumentation: Sämtliche Messdaten zu Materialeigenschaften, Verdichtungsdruck, Temperaturprofil oder CO₂-Emissionen werden fälschungssicher protokolliert und stehen in Echtzeit zur Verfügung. Nach Projektabschluss – voraussichtlich Februar 2028 – soll das System prozessbegleitend in der Baupraxis getestet werden. Die Partner erwarten, dass sich durch den Technologieeinsatz die Effizienz und Nachhaltigkeit von Straßenbaumaßnahmen deutlich erhöhen lassen.

Das Konsortium umfasst neben dem Construction-Technology-Unternehmen Smart Site Solutions GmbH die Acameo GbR (für immersive 3D-Anwendungen), das Virtual Dimension Center als Netzwerk für virtuelles Engineering, das Bauunternehmen Storz Verkehrswegebau GmbH & Co. KG und die Smart-Factory-KL als Industrie-Forschungsplattform. Unterstützt wird das Vorhaben von zahlreichen assoziierten Partnern aus Bauwirtschaft und IT. Aufgrund der engen Kooperation von Industrie und Wissenschaft in das Projekt fließen praxisnahes Anwenderwissen und Spitzenforschung zusammen. So kann die Branche etwa aus der Smart-Factory-Plattform erprobte VR-/XR-Tools adaptieren, während Storz als erfahrener Bauausführer Feldtests auf echten Baustellen ermöglicht. Auch das Acameo-Team bringt Expertise aus der Nutzfahrzeug- und Maschinenindustrie ein, um 3D-Visualisierungen intuitiv zu gestalten. Das VDC-Netzwerk wiederum sichert ab, dass neue Lösungen auch regulatorische und datenschutzrechtliche Anforderungen erfüllen. <https://cosime.de/>

Wettbewerbsfähige Batterie-zellenproduktion

Die Batteriezellenproduktion wächst rasant – und produziert enorme Mengen Ausschuss. Wie das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA ausführt, wurden 2025 weltweit Batterien für Elektrofahrzeuge mit einer Gesamtenergiemenge von 1187 GWh hergestellt. Ein Ausschuss von etwa 5 % gelte in der Zellenfertigung bisher noch als unvermeidbar. Drastisch formuliert: Allein im vergangenen Jahr haben alle Batteriehersteller zusammen etwa 300 000 t Ausschuss produziert. Dieser Ausschuss könnte deutlich reduziert werden, wenn die Batteriezellenfertigung konsequent digitalisiert und von Künstlicher Intelligenz (KI) überwacht würde. Welche Potenziale Digitalisierung und KI erschließen, zeigen nun Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler IPA in einem neu erschienenen Whitepaper. Darin fassen sie die wichtigsten Forschungsergebnisse zusammen, die sie selbst seit 2018 im Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenproduktion (ZDB) erzielt haben. Ihre Botschaft ist klar: Digitalisierung und Künstliche Intelligenz sind kein optionaler Zusatz, sondern vielmehr der entscheidende Hebel, mit dem die deutsche und europäische Batteriezellenfertigung weltweit wettbewerbsfähig wird. Denn sie helfen, Ausschuss zu reduzieren, Prozesse zu stabilisieren und Produktionskosten zu senken. Berechnungen zeigen, wie groß dieser Effekt sein kann: In einer Gigafactory mit einer jährlichen Produktionskapazität von 40 GWh lassen sich laut IPA die Produktionskosten mit ausgewählten digitalen Anwendungen pro Jahr um bis zu 30 Mio. US-Dollar senken. Die Anwendungsfälle, die die Forscherinnen und Forscher in ihrem Whitepaper beschreiben, decken die gesamte Produktion ab. Sie zeigen, wie sich Produktions- und Maschinendaten so verknüpfen lassen, dass Abläufe transparent und damit besser steuerbar werden. Das Whitepaper „Digitalization and AI Applications in Battery Cell Manufacturing – From Concept to Added Value“ steht kostenlos zum Download zur Verfügung: www.ipa.fraunhofer.de