

# Methode zur gekoppelten Topologieoptimierung für spritzgegossene KFT-Metall-Hybridverbunde

Sven Lenhardt, Albert Albers

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe

## 1 Zusammenfassung

Um das Leichtbaupotential von Hybridverbunden, die aus den beiden Komponenten Metalleinleger und spritzgegossenem kurzfaserverstärktem Thermoplast (KFT) bestehen, bestmöglich ausschöpfen zu können, wird aktuell eine Methode zur Topologieoptimierung (TO) dieser Hybridverbunde erforscht. Da bei der Verwendung einer Standard-TO zur Gewichtsreduktion der metallischen Komponente des Hybridverbunds Hohlräume zwischen Metall und KFT entstehen, die nicht mit KFT aufgefüllt werden, ist diese grundsätzlich nicht dafür geeignet, lastgerechte Designs für solche Hybridbauteile zu erhalten. Außerdem werden herstellungsbedingte anisotrope Materialeigenschaften und vorliegende Eigenspannungen im KFT innerhalb einer Standard-TO nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund findet in der sich in Erforschung befindenden Methode eine Kopplung der Spritzgussimulation mit der TO statt. Die Vorgehensweise besteht darin, die TO in jeder Iteration nach dem Ausführen des Optimierungsmoduls zu pausieren, eine geglättete Geometrie des Zwischenergebnisses zu erzeugen und auf Basis dessen eine Formfüllsimulation durchzuführen. Als Ergebnis der Formfüllsimulation liegen die Materialeigenschaften des KFT sowie deren Eigenspannungen vor. Da sich die Vernetzung des Modells der Formfüllsimulation und der TO unterscheiden, müssen diese durch Mapping auf die Elemente der TO übertragen werden. Die an der Kontaktzone entstehenden Hohlräume im Metalleinleger werden mit KFT aufgefüllt und die Kontaktelemente zwischen Metalleinleger und KFT neu definiert. Die Methode baut darauf auf, dass das der TO zugrundeliegende FE-Modell iterativ mit den beschriebenen Modelländerungen angepasst werden kann, wodurch optimierte Designs für KFT-Metall-Hybridverbunde erwartet werden. Da die Methode noch Teil der Forschung ist, wird in diesem Beitrag ein Ansatz präsentiert, an dem aktuell geforscht wird.

## 2 Motivation

Im Rahmen der Produktentwicklung gewinnt der Leichtbau zunehmend an Bedeutung, da sowohl Ressourcen eingespart als auch CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden können. Eine Möglichkeit, Leichtbau zu betreiben, ist der Einsatz von kurzfaserverstärktem Thermoplast (KFT)-Metall-Hybridverbunden. Diese können im Spritzgussprozess hergestellt werden, indem ein Metalleinleger in die Kavität einer Spritzgussmaschine eingelegt und anschließend mit KFT umspritzt wird. Auf diese Weise können Leichtbaustrukturen erzeugt werden, die die Vorteile beider Komponenten des Hybridverbunds kombinieren. Einerseits kann die hohe gewichtsspezifische Steifigkeit und Festigkeit in Faserrichtung des KFT zur Gewichtsreduzierung genutzt werden. Andererseits können an Stellen im Hybridverbund, welche isotrope Materialeigenschaften, eine hohe Bruchdehnung oder Temperaturbeständigkeit erfordern, metallische Werkstoffe eingesetzt werden. [1] Mit einer TO kann das hohe Leichtbaupotential von KFT-Metall-Hybridverbunden genutzt werden, um ein lastgerechtes Design mit einem möglichst geringen Gewicht für einen vordefinierten Lastfall zu erhalten. Aus diesem Grund wird aktuell eine TO-Methode erforscht, die eine Kopplung des Spritzgussprozesses mit der TO eines KFT-Metall-Hybridverbunds beinhaltet. Diese soll den Produktentwickler durch initiale Designvorschläge in frühen Phasen der Produktentstehung unterstützen.

## 3 Stand der Forschung

### 3.1 KFT-Metall-Hybridverbunde

Hybridverbunde zeichnen sich dadurch aus, dass sie aus mindestens zwei verschiedenen Werkstoffen bestehen. Durch diese Werkstoffkombination können Eigenschaften erhalten werden, die mit nur einem Werkstoff nicht möglich sind. Außerdem können Funktionen integriert sowie Gewicht und Kosten eingespart werden [2]. Der Spritzgussprozess stellt eine Möglichkeit zur Herstellung von KFT-Metall-Hybridverbunden dar. Durch das Umspritzen eines metallischen Werkstoffs mit KFT erfolgt die Herstellung intrinsisch, wodurch keine zusätzlichen Kosten für das Verbinden der Werkstoffe miteinander anfallen [3]. Dabei kann zwischen der Insert-, Outsert- und Hybridtechnik unterschieden werden. Die Inserttechnik ermöglicht die Integration von metallischen Funktionselementen in eine

tragende Kunststoffstruktur. Analog dazu dient bei der Outserttechnik der metallische Werkstoff als tragende Struktur und Kunststoffelemente zur Funktionsintegration. Bei der Hybridtechnik dagegen werden vorgeformte Blechprofile umspritzt, sodass sowohl der KFT als auch das Metall tragend sind. Dadurch können beispielsweise an hochbelasteten Stellen Rippen aus KFT erzeugt werden, die ein Ausknicken von dünnwandigen Blechprofilen verhindern. [2] Im Vergleich zu einer Vollwerkstofflösung aus Metall, wird mit der Hybridtechnik ein Gewichtsersparnis von 30 bis 40 % ermöglicht, weshalb sich der Einsatz von KTF-Metall-Hybridverbunden unter anderem im Automobilbau bei der Produktion von Frontends etabliert hat [3].

Für die Auslegung von KFT-Metall-Hybridverbunden ist die Verbindung beider Werkstoffe entscheidend. Im Allgemeinen können die Verbindungsmechanismen in Form-, Kraft- und Stoffschluss unterteilt werden, welche durch die Herstellung im Spritzgussprozess alle gleichzeitig im KFT-Metall-Hybridverbund vorliegen können. Formschluss tritt vor allem infolge von Durchbrüchen im Metalleinleger auf, die anschließend mit KFT gefüllt werden. Kraftschluss wird durch vorliegende Eigenspannungen erzeugt, die sich infolge thermisch induzierter Schwindung sowie einer lokal variierenden Faserorientierung, die eng mit der Fließfront während der Formfüllung zusammenhängt, ausbilden. Stoffschluss liegt vor, da der KFT durch die intrinsische Herstellung auch als Klebstoff dient. Dabei wird zwischen mechanischer und spezifischer Adhäsion unterschieden. Für eine bessere Haftung zwischen FVK und Metall findet vor dem Spritzgussprozess zumeist eine Oberflächenbehandlung des Metalls statt. Eine gängige Oberflächenbehandlung ist das Strahlen mit Korund, welches vor allem zum Entfernen von adhäsionshemmenden Substanzen wie Rost oder Trennmitteln eingesetzt wird. [2]

Zur numerischen Modellierung des Kontaktbereichs von KFT und Metall kann die Kohäsivzonenkontaktformulierung eingesetzt werden [4, 5]. Die Kontaktzone muss keine endliche Dicke aufweisen, da sie nicht durch Elemente modelliert wird. Außerdem ist eine zusätzliche Betrachtung von Reibeigenschaften möglich. Es hat sich gezeigt, dass die Modellierung vereinfacht wird, jedoch nur eine geringe numerische Stabilität gewährleistet wird. [5]

### **3.2 Strukturoptimierung**

Die Strukturoptimierung kann zur Designsynthese in frühen Phasen der Produktentwicklung eingesetzt werden, um initiale Designvorschläge zu erhalten. Neben der Form- und Parameteroptimierung zählt die TO zu den Methoden der Strukturoptimierung. Diese hat das größte Leichtbaupotential. Dafür wird zunächst ein Finite-Elemente (FE)-Modell benötigt, das außer der Geometrie die Beanspruchung, Randbedingungen sowie den für die dichteoptimierte TO verfügbaren Designraum enthält. Um für den definierten Lastfall ein optimiertes Design zu erhalten, wird eine Zielfunktion aufgestellt. Diese wird durch das Anpassen der Dichteverteilung im Designraum durch den Optimierungsalgorithmus maximiert/ minimiert, bis ein Abbruchkriterium erreicht und schließlich ein Designvorschlag vorliegt. [6] Bei vorgegebener Verschiebung kann beispielweise durch das Maximieren der Reaktionskraft im Fall eines Hybridverbunds eine Maximierung der übertragenen Kraft die Zielfunktion sein. Restriktionen zum Erreichen des Optimierungsziels sind typischerweise eine Volumenreduktion sowie Fertigungsrestriktionen. Dabei können zwei verschiedene Optimierungsansätze verwendet werden. Der optimalitätskriterienbasierte Ansatz verfolgt ein Optimalitätskriterium, wohingegen der sensitivitätsbasierte Ansatz auf der Auswertung von Sensitivitäten basiert. Der sensitivitätsbasierte Ansatz hat gegenüber dem optimalitätskriterienbasierten Ansatz den Vorteil, dass zusätzliche Restriktionen wie Festigkeiten oder Entformungsrichtungen berücksichtigt werden können. [7]

Im Hinblick auf die KFT-Komponente aus KFT-Metall-Hybridverbunden gibt es bereits Ansätze zur Berücksichtigung von prozessinduzierten Materialeigenschaften innerhalb einer TO [8, 9]. Anhand von langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) wurde die Spritzgussimulation mit der TO gekoppelt, sodass iterativ die Materialeigenschaften des LFT im zugrundeliegenden FE-Modell angepasst und somit berücksichtigt werden können [10]. Für Hybridverbunde konnten Formoptimierungen der Grenzfläche mit der Restriktion, dass keine Materiallücken im Metalleinleger entstehen, durchgeführt werden [11].

#### 4 Problemstellung und Zielsetzung

Zurzeit gibt es keine Methode zur TO von KFT-Metall-Hybridverbunden, die iterativ die entstehenden Hohlräume zwischen Metalleinleger und KFT mit KFT auffüllt, die Kontaktzone neu definiert sowie die sich infolge des Spritzgussprozess einstellenden Materialeigenschaften und Eigenspannungen berücksichtigt. Aus diesem Grund wird an einer TO-Methode geforscht, die iterativ folgende Schritte durchführt:

1. Materialbereiche im Designraum dem richtigen Material zuordnen.
2. Kontaktzone zwischen Metall und KFT neu definieren.
3. Materialeigenschaften und Eigenspannungen des KFT aus der Spritzgussimulation berücksichtigen.

In Abbildung 1 (b) ist das angestrebte Ziel der Methode dargestellt. Die entstehenden Hohlräume im Designraum würden bei der Verwendung einer Standard-TO nicht mit Material aufgefüllt werden und infolgedessen würde auch keine Anpassung der Kontaktzone zwischen Metall und KFT erfolgen.

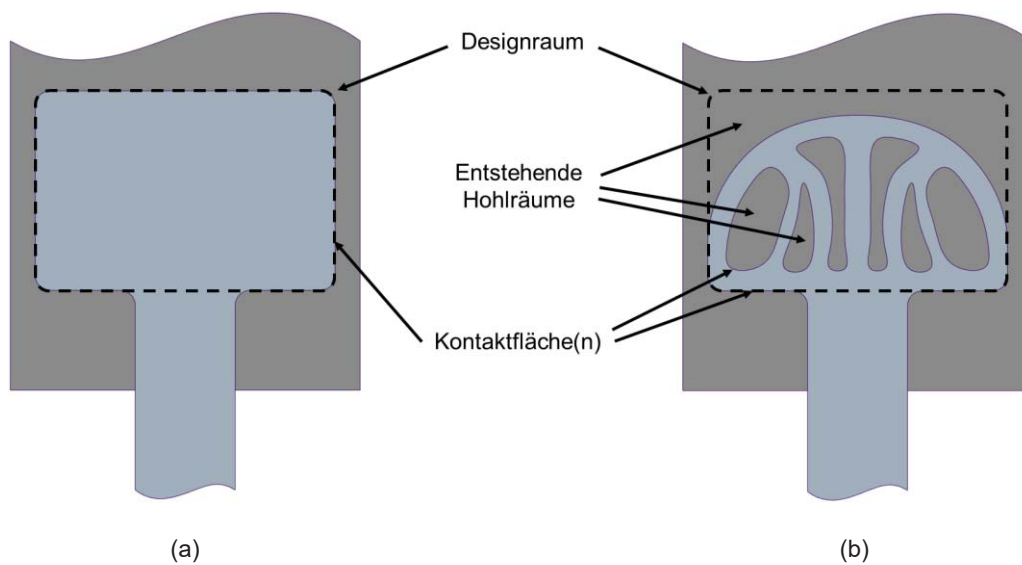


Abbildung 1: Ausgangsgeometrie des Metalleinlegers mit umgebendem KFT (a) und angepasster KFT an veränderte Topologie des Metalleinlegers (b)

## 5 Topologieoptimierungsmethode

In Abbildung 2 ist der Ablauf der sich in Erforschung befindlichen TO-Methode dargestellt.

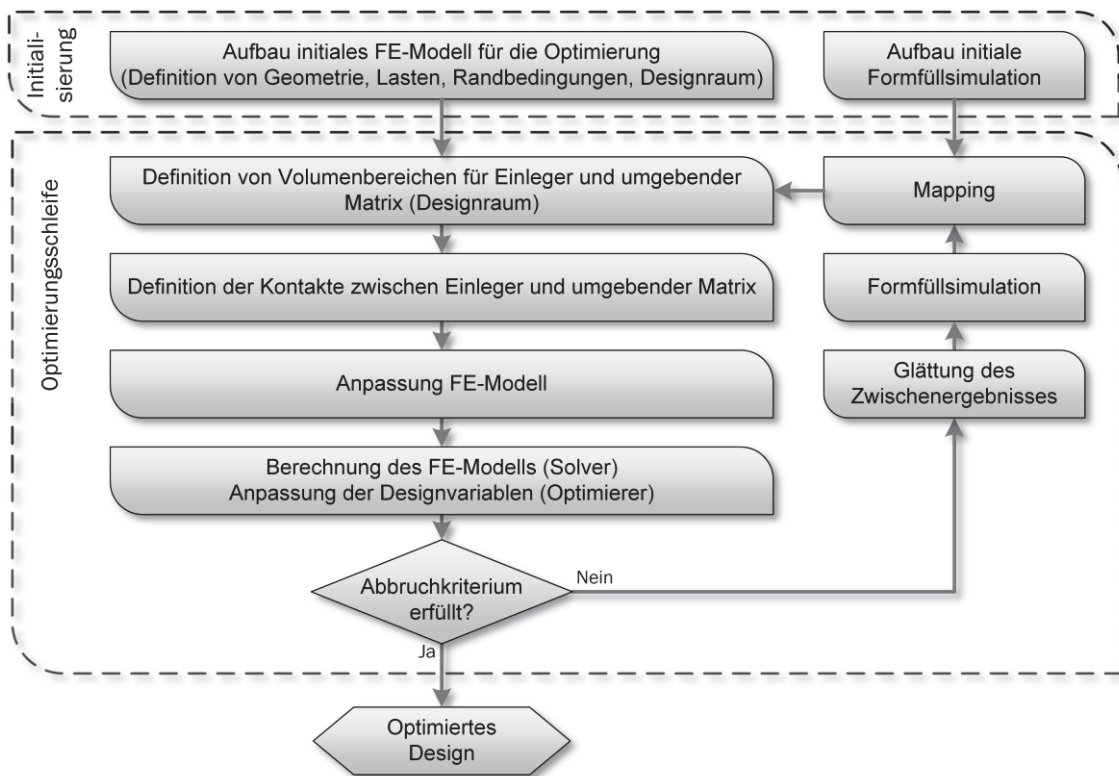


Abbildung 2: Ablauf der TO-Methode

Im ersten Schritt der TO-Methode erfolgt die Initialisierung beispielsweise in der Software Abaqus (vgl. Abbildung 2). Die Initialisierung beinhaltet den Aufbau eines initialen FE-Modells für die Optimierung, welche die Geometrie, Lasten und Randbedingungen sowie den Designraum enthält. Als Lastfall wird ein Auszugsversuch eines KFT-Metall-Hybridverbunds definiert, wobei die KFT-Matrix fest eingespannt und eine Verschiebung am Metalleinleger vorgegeben wird (siehe Abbildung 3 (a)). Der Designraum ist in Abbildung 1 (a) dargestellt. Als Zielfunktion für die sensitivitätsbasierte TO wird die Maximierung der Reaktionskraft festgelegt, um eine möglichst hohe Kraftübertragung des Metalleinleger auf die KFT-Matrix zu gewährleisten.

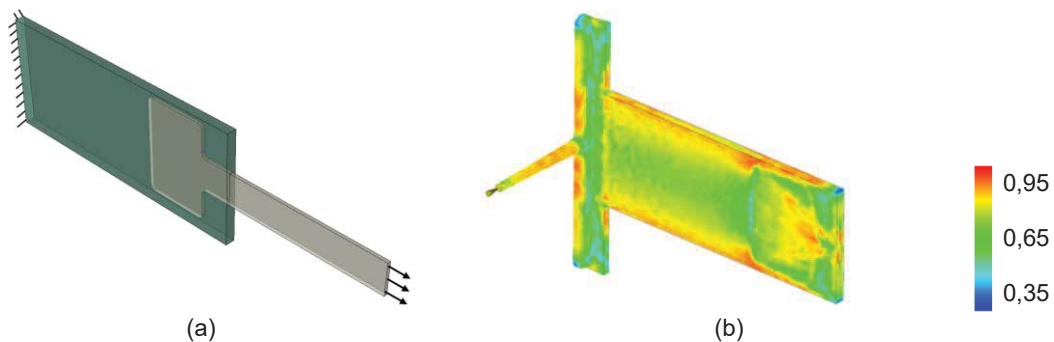


Abbildung 3: FE-Modell der TO-Methode (a) und Formfüllsimulation mit Faserausrichtungstensor aus Autodesk Moldflow (b)

Zur Berücksichtigung von anisotropen Materialeigenschaften sowie von Eigenspannungen wird eine initiale Formfüllsimulation beispielsweise in Autodesk Moldflow durchgeführt (siehe Abbildung 3 (b)). Da sich die Geometrie und folglich auch die Vernetzungen der FE-Modelle der TO und der Kavität aus Autodesk Moldflow von der der KFT-Matrix des Abaqus-Modells unterscheiden, ist für die Übertragung der Materialeigenschaften und der Eigenspannungen des KFT ein Mapping notwendig.

Um die Kontakteigenschaften, welche zwischen Metall und KFT vorliegen, herauszufinden und im initialen FE-Modell zu hinterlegen, wird an dieser Stelle der Contact and Channel Ansatz (C&C<sup>2</sup>-A) angewandt. Dabei ist zu beachten, dass der C&C<sup>2</sup>-A nicht Teil der Methode ist, sondern hier zum Verständnis der auftretenden Kontaktkräfte aufgeführt ist. Der C&C<sup>2</sup>-A ermöglicht es, Zusammenhänge zwischen Gestalt und Funktion zu ermitteln. Dazu wird das vorgegebene technische System in die drei Kernelemente Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS) und Connector (C) eingeteilt. [12] Für den Auszugsversuch wird die feste Einspannung KFT-seitig sowie die vorgegebene Verschiebung am Metalleinleger als C beschrieben. Die Auszugskraft wird durch die beiden LSS des Metalleinlegers und KFT-Matrix sowie der dazwischen liegenden Kontaktzone von C1 auf C2 übertragen. Diese Kontaktzone wird zunächst in WFP unterteilt, wobei die Radien zur Vereinfachung nicht berücksichtigt werden (siehe Abbildung 4 (a)).

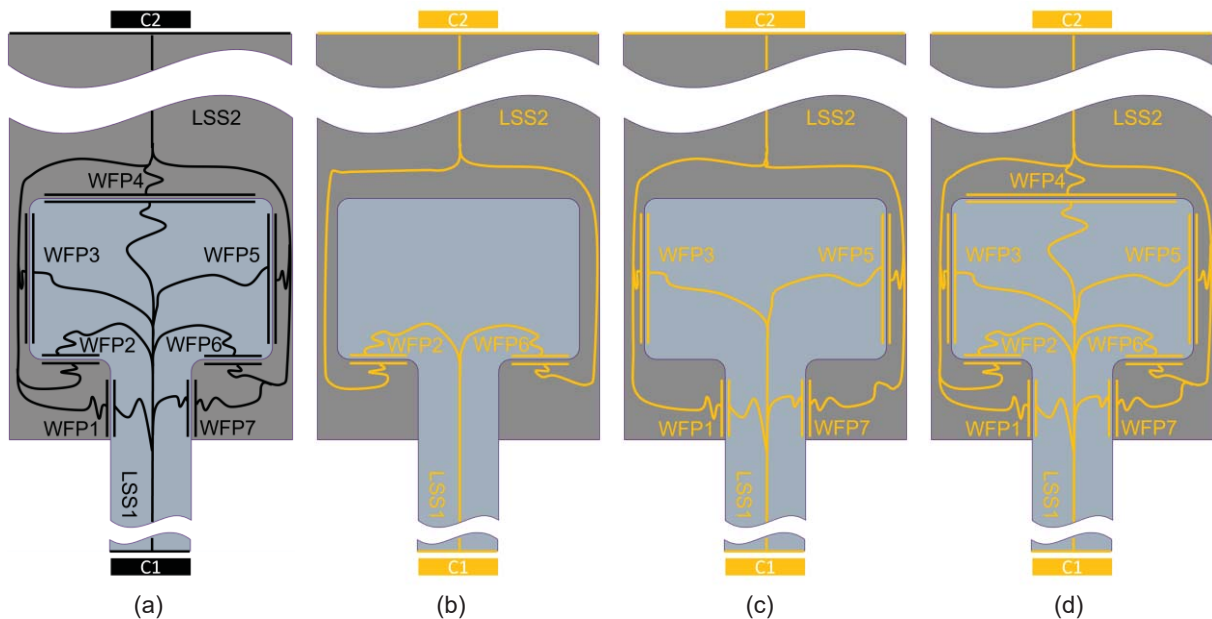


Abbildung 4: Unterteilung des Hybridverbunds in WFP, LSS und C (a); in WFP wirkende Normalkraft (b), Tangentialkraft (c) und

Je nachdem, wie die WFP in Abhängigkeit von der Auszugsrichtung angeordnet sind, wirken an diesen Normal-, Tangential- und Adhäsionskräfte. Um bei komplexeren Geometrien, die während einer TO entstehen können, eine eindeutige Zuordnung der Kontaktflächen zu gewährleisten, kann im FE-Modell in Abaqus die Kontaktsuche General Contact definiert werden.

Nach der Initialisierung beginnt die Optimierungsschleife (vgl. Abbildung 2). Die Volumenbereiche im Designraum sowie die Elemente der Kontaktzone des initialen Modells sind bekannt, sodass im FE-Modell nur die durch Mapping übertragenen Materialeigenschaften sowie die Eigenspannungen des KFT angepasst werden müssen. Zur Berücksichtigung der Eigenspannungen wird im ersten Teil der Berechnung des FE-Modells aufgrund dieser eine Verzugsanalyse durchgeführt. Darauf erfolgt die Berechnung des Auszugsversuch und die Anpassung der Designvariablen durch den Optimierer.

Anschließend wird das Abbruchkriterium abgefragt, z. B. das Erreichen von Konvergenz. Ist das Abbruchkriterium nicht erfüllt, beginnt die nächste Iteration der Optimierungsschleife. Zunächst wird eine geglättete Geometrie aus der Dichteverteilung des Zwischenergebnisses üblicherweise mit dem Iso-Wert 0,3 erzeugt. Das bedeutet, dass Elemente mit einer geringeren relativen Dichte als 0,3 als leer angesehen werden. Anschließend wird die Negativ-Geometrie der geglätteten Geometrie des Zwischenergebnisses und der Geometrie der Kavität in Autodesk Moldflow importiert und eine Formfüllsimulation durchgeführt. Als Ergebnis werden Faserausrichtungstensoren und Ingenieurskonstanten, welche die anisotropen Materialeigenschaften darstellen, sowie die Eigenspannungen für die KFT-Matrix erhalten, die anschließend auf das FE-Netz der TO gemappt werden. Im nächsten Schritt wird überprüft, ob die Elemente im Designraum noch dem richtigen Material zugeordnet sind. Sind Hohlräume im Metalleinleger entstanden, müssen diese mit KFT aufgefüllt werden, d. h. Elemente, die zuvor dem Metalleinleger zugeordnet waren, gehören nun zum KFT. Als Kriterium, ob ein Element zu Metall oder KFT zuzuordnen ist, kann die Dichte herangezogen und mit dem Iso-Wert verglichen werden. Alternativ kann untersucht werden, auf welcher Seite der Oberfläche der geglätteten Geometrie sich ein Element befindet. Die Elemente der Kontaktfläche können dadurch

bestimmt werden, dass sie die geglättete Oberfläche schneiden. Gegebenenfalls können die Elemente durch die geglättete Oberfläche geschnitten werden, um einen Stufenübergang zwischen Metall und KFT zu vermeiden. Die gewonnenen Erkenntnisse der Formfüllsimulation, der Volumenbereiche sowie der Kontaktzone im Designraum werden anschließend im der TO zugrundeliegenden FE-Modell angepasst. Diese Anpassungen sollen direkt vor der Ausführung des FE-Solver durchgeführt werden, sodass sie für die Berechnung der Sensitivitäten verwendet werden, jedoch die Dichtewerte, die dem Optimierer zugrunde liegen, nicht verändert werden. Die Optimierungsschleife wird so lange iterativ durchlaufen, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist.

Mithilfe der beschriebenen Methode zur TO sollen künftig initiale Designvorschläge für KFT-Metall-Hybridverbunde gefunden werden. Außerdem wird ein Prüfstand zur Durchführung von Auszugsversuchen mit Hybridproben aufgebaut, um die Parameter der Kohäsivzone zwischen KFT und Metalleinleger experimentell zu bestimmen und das initiale Strukturmodell zu validieren.

## 6 Literatur

- [1] Fleischer J., Coutandin S., Nieschlag J.: "Einführung in intrinsische Hybridverbunde", In: Fleischer, J. (Hrsg.): "Intrinsische Hybridverbunde für Leichtbautragstrukturen: Grundlagen der Fertigung, Charakterisierung und Auslegung", Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 1–9, 2021
- [2] Zhao G.: "Spritzgegossene, tragende Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen: Konstruktion, Prozessanalyse und Charakterisierung", Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2001, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Erlangen, 2002
- [3] Henning F., Weidenmann K., Bader B.: "Hybride Werkstoffverbunde", In: Henning, F., Moeller, E. (Hrsgg.): "Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung", Hanser, München, Wien, S. 415–428, 2011
- [4] Shin D. K., Kim H. C., Lee J. J.: "Numerical analysis of the damage behavior of an aluminum/CFRP hybrid beam under three point bending", Composites Part B: Engineering, Vol. 56, S. 397–407, 2014
- [5] Paul H.: "Bewertung von langfaserverstärkten Kunststoff-Metall-Hybridverbunden auf der Basis des Verformungs- und Versagensverhaltens", Karlsruhe, 2013
- [6] Bendsoe M. P., Sigmund O.: "Topology Optimization: Theory, Methods and Applications", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003
- [7] Dassault Systèmes: "SIMULIA User Assistance", [https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/DSSIMULIA\\_Established.htm](https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/DSSIMULIA_Established.htm), Zuletzt geprüft am: 20.08.2022
- [8] Albers A., Reichert S., Serf M., Thorén S., Bursac N.: "Kopplung von CAE-Methoden zur Unterstützung des Produktentwicklers", Konstruktion, Vol. 69, No. 9, S. 76–82, 2017
- [9] Albers A., Spadinger M., Serf M., Reichert S., Heldmaier S., Schulz M., Bursac N.: "Coupling of Computer-aided Methods: Supporting Product Developer during Embodiment Synthesis", In: "12th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. WCSMO 2017", Braunschweig, S. 536–548, 2017
- [10] Spadinger M., Albers A.: "Iterative Kopplung von Fließsimulation und Topologieoptimierung für langfaserverstärkte Polymere", In: "Tagungsband 3. NAFMES DACH Regionalkonferenz, Berechnung und Simulation: Anwendungen – Entwicklungen – Trends", NAFEMS GmbH, 2016
- [11] Albers A., Majic N., Spadinger M., Paul H.: "Optimierung von Krafteinleitungselementen in Kunststoff-Metall-Hybridverbunden", In: "NAFEMS deutschsprachige Konferenz 2012. Berechnung und Simulation – Anwendungen, Entwicklungen, Trends", 2012
- [12] Matthiesen S., Grauberger P., Hölz K., Nelius T., Bremer F., Wettstein A., Gessinger A., Pflegler B., Nowoseltschenko K., Voß K.: "Modellbildung mit dem C&C<sup>2</sup>-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese", Karlsruhe, 2018