

HiAD

Hochleistungsthermoplaste im Additiven Prozess und unter Dynamischer Beanspruchung

Simulationsmethoden für Hochleistungsthermoplaste unter Dynamischer Beanspruchung

Sachbericht Teil I & II: Kurzbericht und Eingehende Darstellung

Zuwendungsempfänger:

SimpaTec Simulation & Technology Consulting GmbH
Wurmbenden 15, 52070 Aachen

Ausführende Stelle

SimpaTec Simulation & Technology Consulting GmbH

Dokumentversion:	Final – V1.0
Datum	30.03.2024
Disseminationslevel	Öffentlich
Projektakronym	HiAD
Förderkenzeichen	20W1914C

Projektpartner

Composite Technology Center GmbH (CTC)
Faserinstitut Bremen e.V. (FIBRE)

Projektkoordinator

Composite Technology Center GmbH (CTC)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

betreut durch



Projektträger
Luftfahrtforschung

HiAD

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 20W1914C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Ergebnisse des Projektes und die Darstellungen im Bericht basieren auf der Mitarbeit aller Projektbeteiligten. Ihnen allen sei hier herzlich für die konstruktive Mitarbeit gedankt.

Zweck dieses Dokumentes

Dieses Dokument fasst die Teile I (Kurzbericht) und II (Eingehende Darstellung) des Sachberichts der SimpaTec Simulation & Technology Consulting GmbH zu den Projektergebnissen des Verbundprojektes HiAD - Hochleistungsthermoplaste im Additiven Prozess und unter Dynamischer Beanspruchung. In dem Gesamtvorhaben ist SimpaTec nur an dem Teilprojekt HAP2 HiDyn (Simulationsmethoden für Hochleistungsthermoplaste unter Dynamischer Beanspruchung) – diesem Grund beschränkt sich der Inhalt dieses Dokuments auf dieses Teilprojekt. Das Dokument erläutert zunächst in kurzer Form die ursprüngliche Aufgabenstellung sowie den wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde und den Ablauf des Vorhabens sowie dessen wesentliche Ergebnisse. Danach werden die Projektergebnisse näher erläutert. Das Dokument beschreibt dazu die durchgeführten Arbeiten, gibt einen Überblick zur finanztechnischen und inhaltlichen Projektumsetzung, macht Aussagen zur Notwendigkeit, Angemessenheit und zum Nutzen der Projektarbeiten, zeigt Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen auf und gibt einen Überblick zu Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts. Das Projekt wurde unter dem Förderkennzeichen 20W1914C vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert und durch den Projektträger DLR betreut. Es wurde vom 01.10.2020 – 31.12.2023 durchgeführt. Ziel des Vorhabens war die Charakterisierung von Overmolding Interfaces zwischen kurzfaserverstärkten Hochleistungspolymeren und Endlosfaser verstärkten Thermoplast Laminaten und statischen und zyklischen Belastungen.

Autoren:

- _ Michael Klaus (R&D Engineer) verantw. für die technische Aufgaben
- _ Carlos Ribeiro Simoes (CTO) verantw. für die administrativen Aufgaben und Projektleitung

Inhaltsverzeichnis

ZWECK DIESES DOKUMENTES	3
INHALTSVERZEICHNIS	4
AUFGABENSTELLUNG	5
ABLAUF DES TEILVORHABENS	5
WESENTLICHE ERGEBNISSE	6
DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN	7
AP2.1.1 ANWENDUNGS-AUSWAHL UND ANFORDERUNGSDEFINITION	7
AP 2.1.2 MATERIALCHARAKTERISIERUNG FÜR DIE PROZESSSIMULATION	9
AP 2.1.3 PROZESSSIMULATION OVERMOLDING	17
SIMULATIONEN DEMONSTRATOR	30
AP 2.1.3 ABLEITUNG VON DESIGN-ALLOWABLES UND RICHTLINIEN FÜR DYNAMISCH BEANSPRUCHTE OVERMOLDING STRUKTUREN	32
PROJEKTEVALUATION	33
VERWENDUNG DER ZUWENDUNG	33
ZAHLENMÄßIGER NACHWEIS	33
NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN PROJEKTARBEITEN	33
NUTZEN DER GELEISTETEN PROJEKTARBEITEN	34
FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN	35
VERÖFFENTLICHUNGEN	35

Aufgabenstellung

Im Luftfahrzeugbau steigt für Strukturanwendungen das Interesse am Einsatz von Werkstoffen aus der Gruppe der thermoplastischen Hochleistungskunststoffe durch neue, effiziente Fertigungsmöglichkeiten stetig. Weiterentwicklungen von etablierten Herstellmethoden, wie Spritzguss, erlaubt es heute hochwertige und meist auch kostenintensive Werkstoffe, wie beispielsweise PEEK, wirtschaftlich konkurrenzfähig zu Bauteilen zu verarbeiten. Von besonderem Interesse für die Luftfahrzeughersteller sind im Zusammenhang mit Hochleistungsthermoplasten das Herstellverfahren Overmolding (dt. „Überspritzen“). Insbesondere das Overmolding von Endlosfaserlaminaten (Organoblechen) mit einer kompatiblen thermoplastischen Matrix ist vom hohen Interesse, da es dabei, im Idealfall, zu einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen den Komponenten kommt. Das Teilvorhaben HAP2 HiDyn zielt darauf ab Wissenslücken über die dynamische Beanspruchung von überspritzten Bauteilen zu schließen. Da es bisher kaum Daten oder Untersuchungen zu dynamischer (zyklischer) Beanspruchung im Overmolding gibt, ist das Ziel in dem Teilprojekt einerseits Grundlagen zu erarbeiten sowie auch Erkenntnisse in die Anwendung zu transferieren. In diesem Teilprojekt wurde daher der Prozesseinfluss auf die dynamischen Eigenschaften von Overmolding-Strukturen explizit untersucht.

SimpaTec hatte die Aufgabe sowohl den Spritzgussprozess zu simulieren, wie auch nachgeschaltete Struktursimulationen durchzuführen. Der Schwerpunkt lag dabei darauf die reell durchgeführten Versuche möglichst genau zu reproduzieren mit dem Ziel die Versuchsergebnisse besser interpretieren zu können.

Ablauf des Teilvorhabens

Im Rahmen dieses Teilprojekts wurden diverse numerische Untersuchungen durchgeführt als Vorbereitung, sowie Reproduktion des Herstellungsprozesses und der Versuche. Das umfasst also die Erzeugung von Materialkarten für rheologische und strukturmekanische Untersuchungen für das im Projekt verwendete kurzfaserverstärkte PEEK-Material 90HMF40 von Victrex und die Validierung dieser Karten. Die strukturmekanischen Materialdaten wurden mit einem Modul der Software Digimat [Hexagon] reverse-engineered. Für die Validierung, sowohl der rheologischen wie auch der strukturmekanischen Materialkarten wurden die Softwarepakete Moldex3D [CoreTech], Digimat [Hexagon] und Marc/Mentat [Hexagon] verwendet.

Diverse Spritzgussimulationen wurden durchgeführt, sowohl für die Herstellung der Testcoupons wie auch für die Demonstrator-Konfigurationen. Diese Simulationen wurden mit der Software Moldex3D durchgeführt. Die Prozesssimulationen der Testcoupons verfolgten zwei Ziele. Einerseits die Ermittlung von prozessbedingten Eigenschaften (insbesondere die Faserorientierungen) für die weitere Verwendung in Struktursimulationen. Andererseits die genaue Untersuchung der Zustände (wie Druck und Temperatur) im Overmolding-Interface mit dem Ziel die Ergebnisse von Versuchen zu Festigkeit der Overmoldingstrukturen unter statischen und zyklischen Lasten besser interpretieren zu können. Bei den Prozesssimulationen des Demonstrators ging es primär darum verschiedene Designs im Vorfeld zu untersuchen auf ihre Herstellbarkeit. Außerdem, wie bei den Testcoupons, wurden die Simulationen genutzt um Faserorientierungen für die weitere Verwendung in Struktursimulationen zu extrahieren.

HiAD

Zusätzlich zu den Spritzgussimulationen wurden Struktursimulationen durchgeführt, um die Zugversuche zur Charakterisierung der Overmolding-Interfaces zu reproduzieren. Hier lag der Schwerpunkt darauf, die lokale Lastverteilung im Interface besser zu verstehen, um die Versuchsergebnisse besser interpretieren zu können. Die Struktursimulationen wurden mit dem FEM-Solver Marc von Hexagon in Verbindung mit Digimat [Hexagon] durchgeführt. Zusätzlich wurden die Software-Pakete Mentat von Hexagon und Apex von Hexagon verwendet für Pre- und Post-Processing.

Wesentliche Ergebnisse

In Bezug auf den Einfluss der Parameter des Spritzgussprozesses auf die Overmolding-Interface-Festigkeit konnten durch Vergleich zwischen den Versuchen und Simulationen signifikante Zusammenhänge hergestellt werden. Den größten Einfluss auf die Festigkeit hat die Zeit, währenddessen das Interface unter Druck steht. Bereiche, die nur kurz mit Druck versorgt werden (angussfern), weisen tendenziell eine geringere Festigkeit als Bereiche mit längerer Nachdruckversorgung (angussnah). Die Druckversorgung scheint die Vermischung zwischen der Schmelze und der wiederaufgeschmolzenen thermoplastischen Matrix des Laminats zu verbessern und die Poren im Interface zu reduzieren. Außerdem führt der längere Nachdruck zu geringerer volumetrischer Schwindung in der Spritzgusskomponente, was sich positiv auf die eingefrorenen thermischen Spannungen in der Interface-Nähe auswirkt.

Eine zweite wichtige Erkenntnis ist die Einschätzung der Festigkeitswerte des Overmolding-Interfaces aus den Versuchen. Die in den Versuchen ermittelten Versagensspannungen basieren auf den durch den Versuchsaufbau aufgebrachten Kräften und der belasteten Interfacefläche. Damit lassen sich lediglich durchschnittliche kritische Spannungen ermitteln. Begleitende Simulationen haben gezeigt, dass das Spannungsbild im Interface deutlich komplizierter ist. Lokal werden die Normalspannungen um mehr als den Faktor 2 gegenüber dem durchschnittlichen Normalspannungsniveau überschritten. Zusätzlich entstehen an den gleichen Stellen hohe Schubspannungen in der Größenordnung des Normalspannungsniveaus. Die genauen Werte sind nicht nur von der Geometrie der Overmoldingstruktur abhängig, sondern auch von dem Laminataufbau in den überspitzten Laminaten.

All das muss berücksichtigt werden bei der Ermittlung von Allowables, beziehungsweise für die Übertragung von in Versuchen ermittelten Festigkeiten auf andere Overmoldingstrukturen.

Durchgeführte Arbeiten

Die SimpaTec war an folgenden Arbeitspaketen im HiAD Teilprojekt HAP2 HiDyn (Simulationsmethoden für Hochleistungsthermoplaste unter Dynamischer Beanspruchung) beteiligt:

AP 2.1 Virtuelles Prozessdesign und Bauteiloptimierung

- AP 2.1.1 Anwendungsauswahl und Anforderungsdefinition
- AP 2.1.2 Materialcharakterisierung für die Prozesssimulation
- AP 2.1.3 Prozesssimulation Overmolding
- AP 2.1.5 Ableitung von Design-Allowables und Richtlinien für dynamisch beanspruchte Overmolding Strukturen

AP2.1.1 Anwendungsauswahl und Anforderungsdefinition

In dieser initialen Vorbereitungsphase ging es um Festlegung auf das Design der Overmolding-Bauteile. Dieser Arbeitspaket wurde gemeinsam mit den anderen Projektpartnern (CTC und FIBRE) durchgeführt. Spezifisch handelte es sich hier zuerst um das Design der Test-Coupons mit denen Hilfe sich die Verbindung der gespitzten Bauteile und der überspritzter Einleger (das Overmolding-Interface) gut untersuchen lässt. Mehrere Designvorschläge wurden von dem Projektpartner FIBRE vorgeschlagen und zu Diskussion gestellt.

Das Ergebnisse der Diskussionen sind zwei Coupon Konfigurationen um verschiedene Aspekte der Overmolding-Verbindung experimentell untersuchen zu können. Abbildung 1 zeigt CAD Modelle [FIBRE] der beiden Coupons. Bei den ersten Coupon-Typ (links in Abbildung 1) handelt es sich um eine Zug-Scherprobe. Der symmetrische Aufbau (Laminatplatte ist am freien Ende überspritzt von beiden Seiten) erlaubt eine saubere und symmetrische Schubbelastung in den Verbindungsflächen. Der zweite Coupon-Typ (rechts in Abbildung 1) ist aufgebaut aus zwei Rippen auf einer Laminatplatte, die sich genau gegenüberliegen. Ein aus dem Coupon geschnittener Prüfling (Schnittebenen angedeutet in rot in Abbildung 1), das perpendicular zu dem Lamineinleger in einen Zugversuch belastet ist, sollte nahezu konstante Normalspannung in den übergespritzten Kontaktflächen erfahren. Eine der Rippen (Halterippe) hat eine etwas höhere Wandstärke, so dass man Versagen immer auf der Prüfrippenseite erwarten kann, da die geringere Overmoldingkontaktfläche auf der Prüfrippenseite (gegenüber der Halterippenseite) zwangsläufig ein höheres Spannungsniveau bedeutet. Gleichartige Prüflinge können auch verwendet werden um anstatt von Normalspannungen eine Schubbelastung zu testen (Lasten entlang der Rippen parallel zum Einleger) oder um einen gemischten Normal-/Schublastzustand in den Overmoldingflächen einzustellen (Lasten unter einem Winkel zu Einlegerebene). Eine Besonderheit bei dem Doppelrippen-Coupon ist die schrittweise Herstellung – die Halterippe soll zuerst gegossen werden und die Prüfriippe in einem zweiten Schritt.

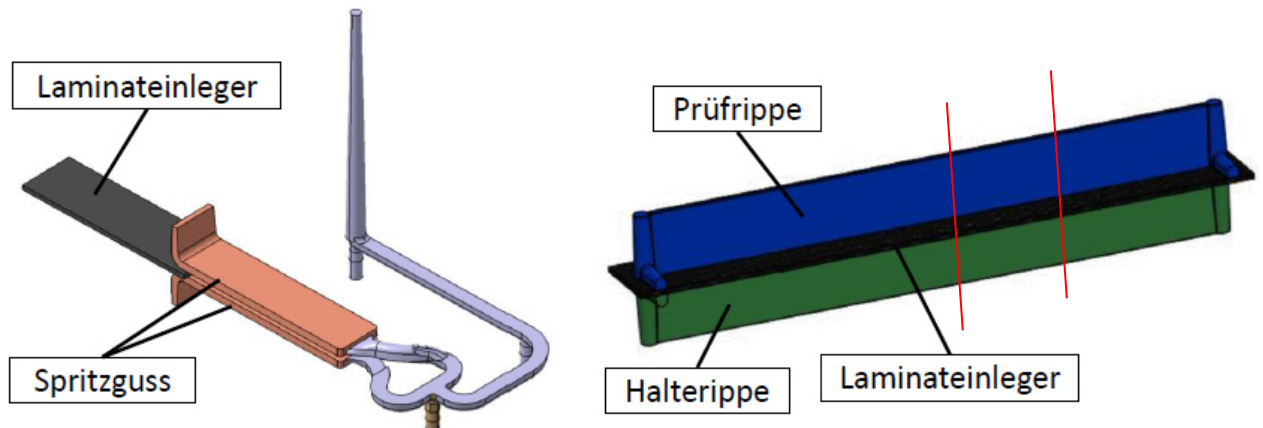


Abbildung 1: Initiales Design der Test-Coupons. Links: Zug-Scher-Probe, rechts: Doppel-Rippen-Coupon [FIBRE]

An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass im Laufe des Projekts hat man sich ausschließlich auf das zweite Konzept konzentriert. Also hat der genaue Aufbau der Coupons eine Evolution erfahren aus diversen herstellungsbedingten Gründen – dazu mehr im Kapitel zu AP 2.1.3.

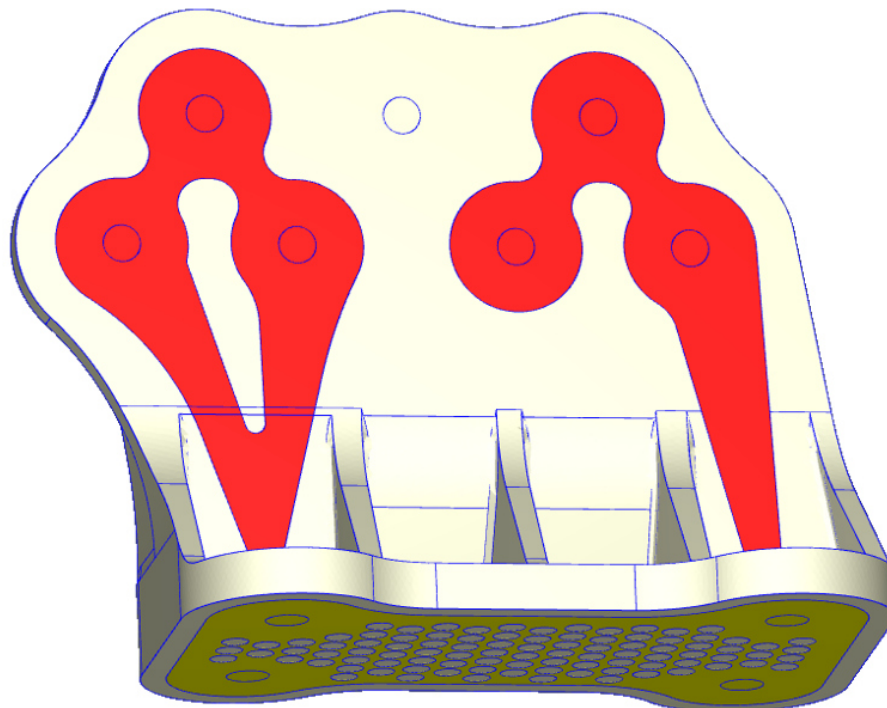


Abbildung 2: Demonstrator (Beispiel)

Auch die Auswahl der grundlegenden Geometrie des Demonstrators kann diesem Arbeitspaket zugeordnet werden. Abbildung 2 zeigt beispielweise eine mögliche Demonstratorgeometrie. Die genaue Geometrie der überspritzten Lamineinleger in dem Demonstrator wurde im Laufe des Projekts untersucht und festgelegt – auch der Verweis auf Kapitel zu AP 2.1.3.

AP 2.1.2 Materialcharakterisierung für die Prozesssimulation

Bei der Materialauswahl zum Projektbeginn wurde zwischen den Projektpartnern die Entscheidung getroffen 90HMF40 von Victrex für die Spritzgussmasse zu verwenden. Dabei handelt es sich um PEEK gefüllt mit 40% Kohlenstoff-Kurzfasern. Dieses Material wurde sowohl für die Test-Coupons, wie auch für der Demonstrator verwendet.

Eine rheologische Materialkarte für Moldex3D wurde erstellt basierend auf verschiedenen Testkompanien zu Ermittlung rheologische Materialparameter von 90HMF40. Diese Materialkarte wurde anschließend für aller Spritzgussimulationen in dem Projekt benutzt.

Zusätzlich zu der rheologischen Materialkarte für 90HMF40 wurde zu Beginn des Projekts eine bereits vorhandene mikromechanische Materialkarte für Digimat [Hexagon] im Projekt benutzt für gekoppelte Struktursimulationen.

Zusätzlich zu Plausibilitätschecks wurden Untersuchungen gestartet zu Validierung der Materialkarten. Diese Untersuchungen basieren auf Probekörpern, die von dem Materialhersteller Victrex hergestellt und den Projektpartnern zu Verfügung gestellt wurden.

Die Probekörpern handelt es sich um nach ISO 527-2 hergestellte Zugproben in „Dogbone“-Form (siehe Abbildung 3). Für diese Proben wurden sowohl der Herstellungsprozess mit Hilfe von Spritzgussimulationen wie auch die am FIBRE durchgeführten Zugversuche bis zum Versagen mit gekoppelten Struktursimulationen reproduziert.

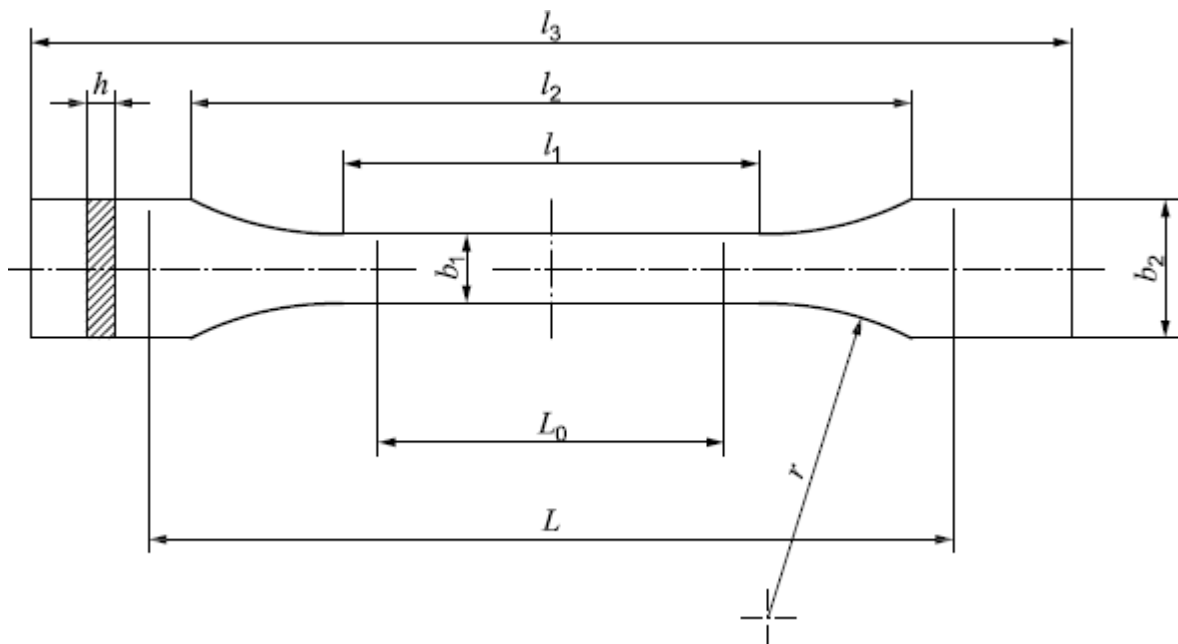


Abbildung 3: ISO 527-2 Zugprobe, (Standardization, 2012)

Spritzgusssimulationen Zugproben

Die Herstellung der Zugproben werden in einem Zwei-Kavitäten-Werkzeug mit einem gemeinsamen Kaltkanal durchgeführt. Entsprechend wurde auch das Spritzgusssimulationsmodell aufgebaut. Abbildung 4 zeigt das benutzte Moldex3D Modell für diese Simulationen. Die Temperierung des Werkzeugs (ausgeblendet in Abbildung 4) würde Hilfe von Heizstäben durchgeführt analog zu dem realen Prozess. Um die Abbildung der Faserorientierungen zu verbessern wurden für die Zugstab-Coupons eine Hexaederelement-dominante Vernetzung gewählt (siehe Abbildung 5).

HiAD

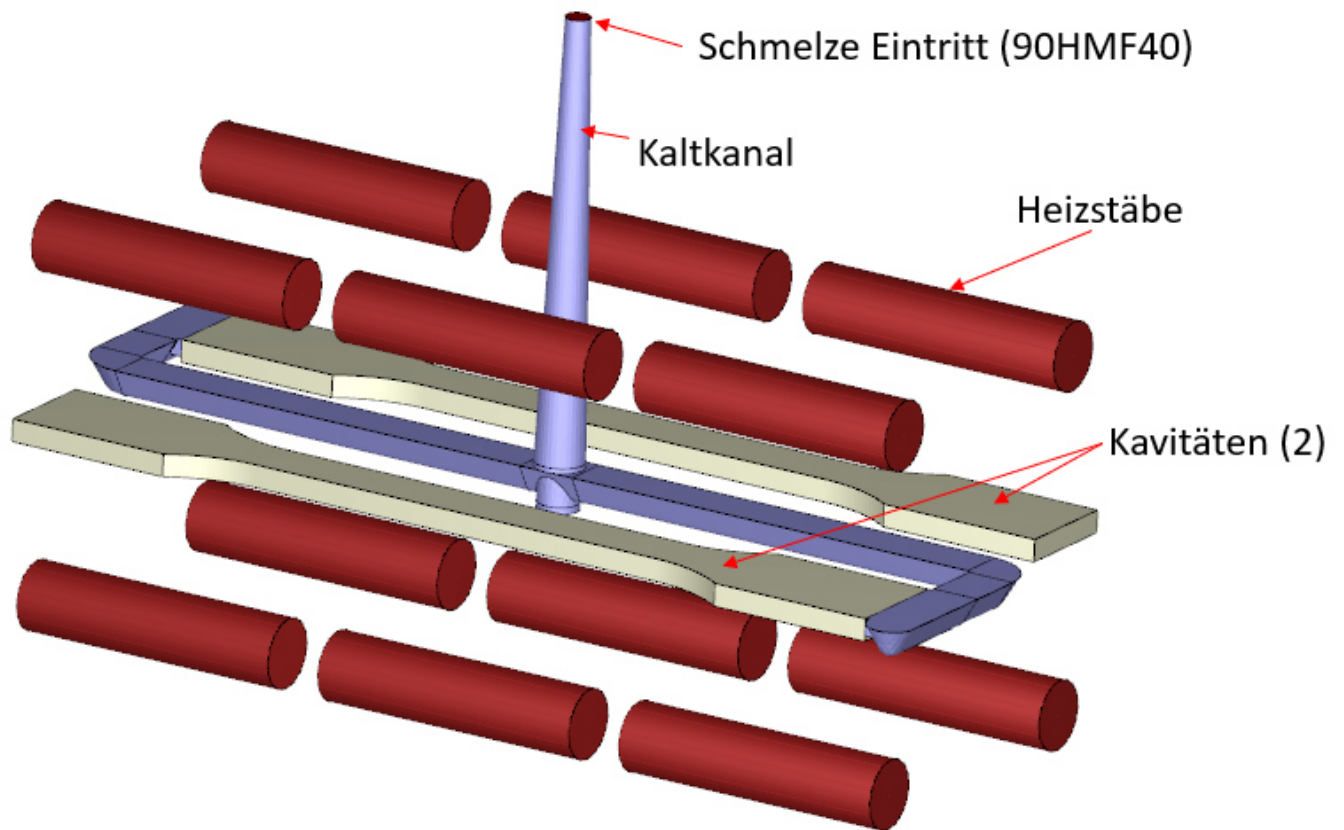


Abbildung 4: Moldex3D Modell für die Herstellung der ISO 527-2 Zugstabproben

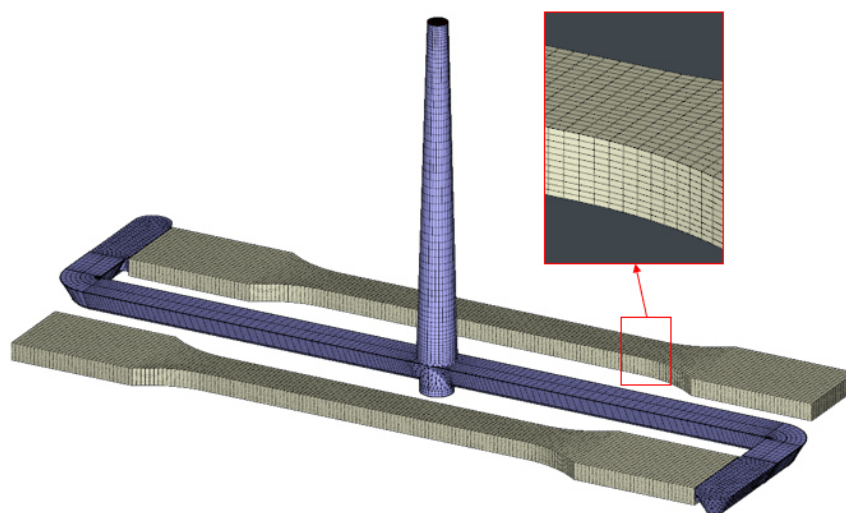


Abbildung 5: Moldex3D Modell für Zugstabproben - Hexaederelement-dominante Vernetzung

HiAD

Die beiden simultan gespritzte Zugstäbe werden zusammen mit dem Kaltkanal entformt. Da dieser entformte Verbund ein ausgeprägtes Verzugsverhalten zeigt, wurde die Verformung als erste Validierung für die Simulation bzw. für die rheologische Materialkarte benutzt. Abbildung 6 zeigt den direkten qualitativen Verformungsvergleich zwischen Realität und Simulation. Wie man erkennt ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung.

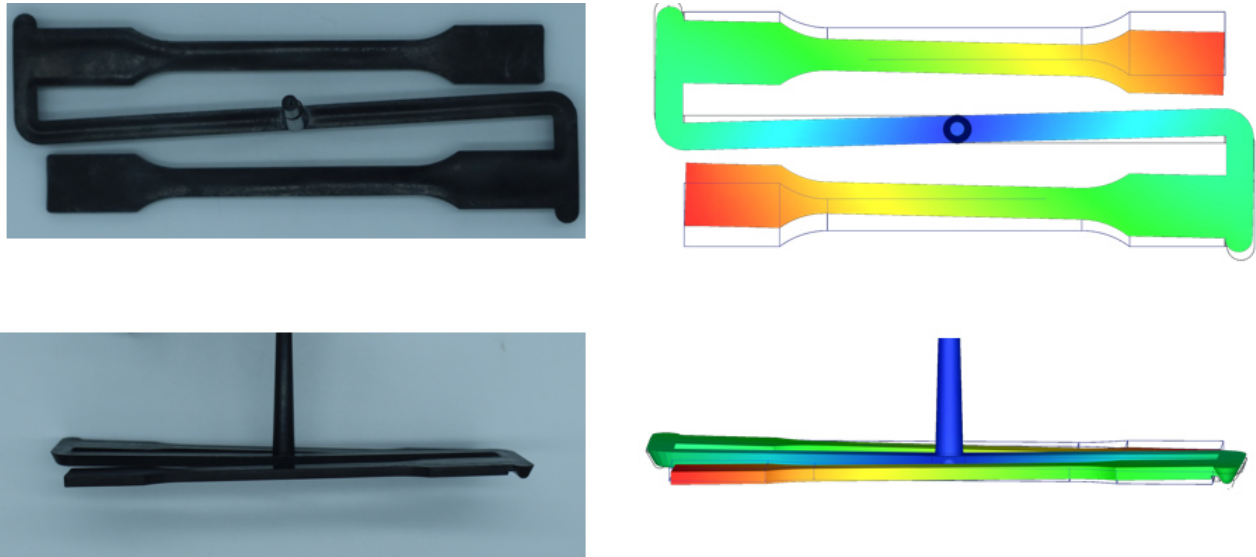


Abbildung 6: Verformung der entformten Zugproben (Dogbones) mit dem Kaltkanal – recht: Realität, links: Simulation

Die Proben wurden bei 9 verschiedenen Prozessparameterkombinationen hergestellt – es wurden Werkzeugtemperatur, Schmelzetemperatur und die Einspritzgeschwindigkeit variiert (siehe Abbildung 7 für die Kombinationen – Run 1 bis Run 9).

	Barrel Temperature (°C)	Mould Temperature (°C)	Injection Speed (mm/s)	Pattern
1	370	160	10	---
2	370	180	50	-00
3	370	210	100	--+
4	390	160	50	0-0
5	390	180	100	00+
6	390	210	10	0+-
7	410	160	100	+++
8	410	180	10	+0-
9	410	210	50	++0

Abbildung 7: Verwendete Prozessparameter für die Zugproben Herstellung

HiAD

Diese Prozessparameter wurden entsprechend in den Prozesssimulationen nachempfunden. Da die Ergebnisse dieser Simulation primär dazu benutzt werden um Input für gekoppelte Struktursimulationen zu generieren ist insbesondere die Faserorientierung in Abhängigkeit von den Prozessparametern interessant. Die lokalen Steifigkeiten und Festigkeiten in eine bestimmte Richtung sind stark abhängig von dem Grad der Faserorientierung in diese Richtung. Abbildung 8 zeigt die berechneten Faserorientierungen jeweils für die Prozessparameterkombination wie in Abbildung 7 definiert. Abbildung 8 zeigt spezifisch den Grad der Faserorientierung entlang der Längsachse der Zugproben. Der Grad ist definiert als ein Wert zwischen 1 (alle Fasern sind perfekt in die betrachtete Richtung orientiert) und 0 (alle Fasern sind perfekt perpendicular zu der betrachteten Richtung orientiert).

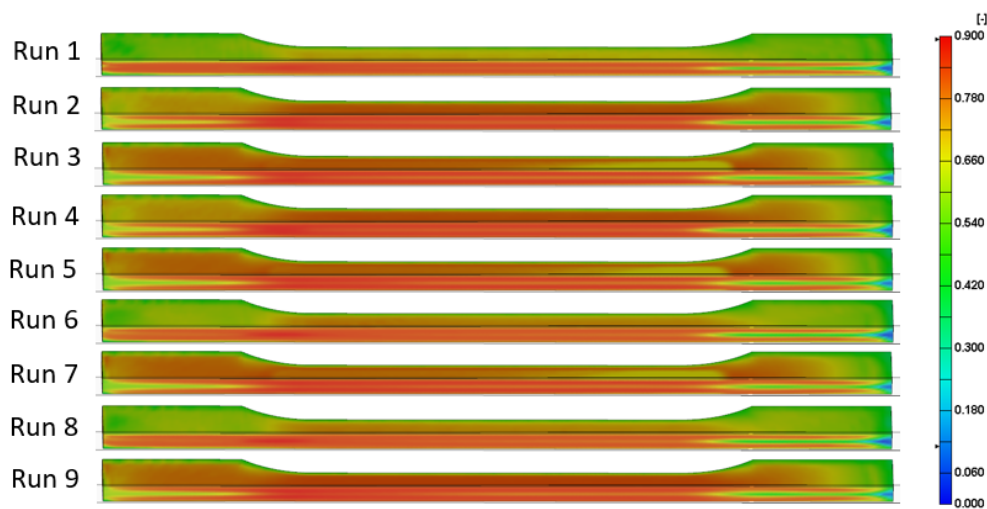


Abbildung 8: Faserorientierung in Fließrichtung in den gespritzten Zugproben

Am FIBRE wurden für einige der hergestellten Zugproben mikro-CT Scans gemacht mit dem Ziel die reale Faserorientierung zu erfassen. Die Ergebnisse aus der Simulation und Scans können somit miteinander verglichen werden um die rheologische Materialkarte weiter zu validieren. Abbildung 9 zeigt beispielhaft einen solchen Vergleich an einem Ende des schmalen Testbereichs des Zugstabs (roter Strich in der Abbildung).

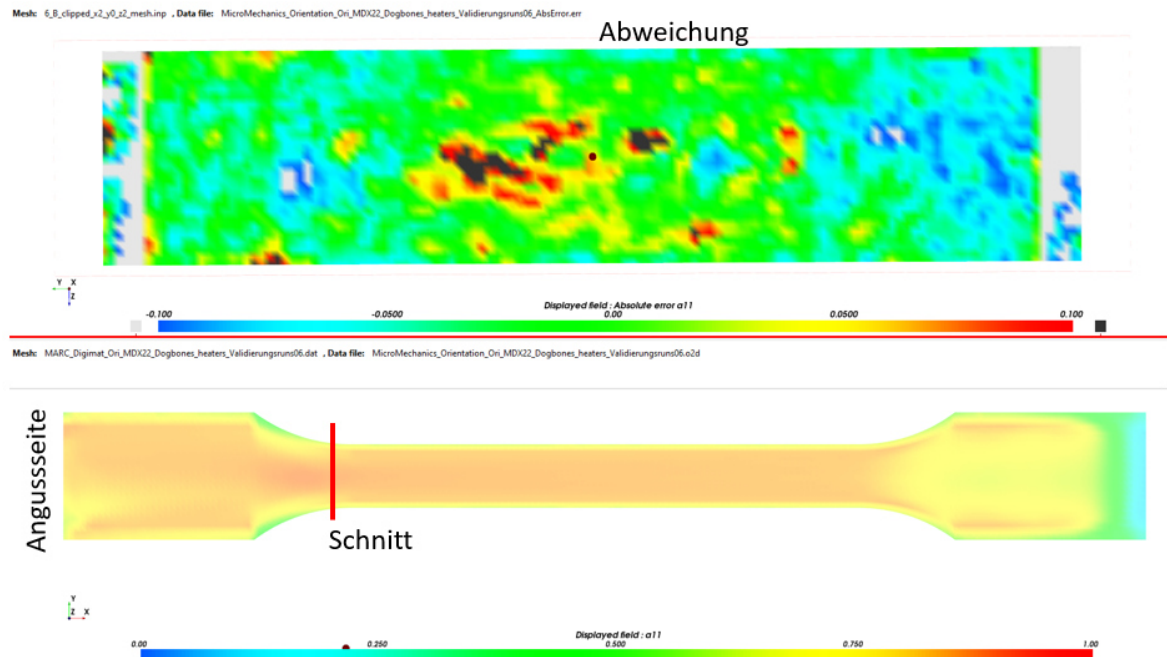


Abbildung 9: Faserorientierung in Fließrichtung – oben: Vergleich zwischen Mikro-CT Auswertung und Simulation (Übereinstimmungen in Grün) / unten: Schnittposition für den Vergleich

Struktursimulationen Zugproben

Zu Reproduktion der Zugversuche, mit dem Ziel das mikromechanische Materialmodell zu verifizieren, wurden nichtlineare gekoppelte Struktursimulation durchgeführt. Als Simulationssoftware wurde MSC Marc [Hexagon] benutzt. Die nichtlinearen Struktursimulationen sind gekoppelt einerseits mit den Ergebnissen der Spritzgusssimulationen (Faserorientierung) und andererseits mit einem nichtlinearen mikromechanischen-Materialmodell – siehe Abbildung 10. Die Kopplung wird durchgeführt mit Hilfe von Digimat [Hexagon] Modul Digimat-RP.

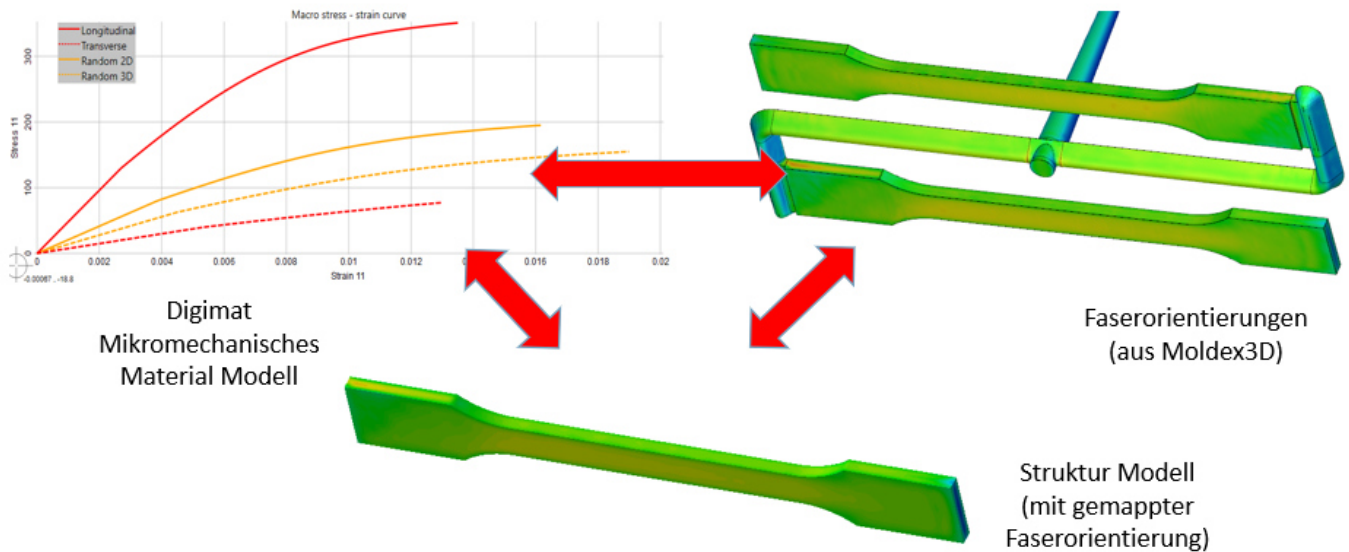


Abbildung 10: Gekoppelte Strukturanalyse - Zugstab

Im Einzelnen wird bei der Kopplung die Faserorientierungsverteilung in dem Spritzguss-Modell auf das FEM Modell für die eigentliche Struktursimulation gemappt. Das passiert während des Aufsetzens der Kopplung in Digimat. Daraufhin berechnet Digimat für jedes Element mit gemappten Faserorientierungen eine lastabhängige nicht-lineare anisotrope Steifigkeit und steuert die eigentliche Simulation in dem Struktursolver. Außerdem werden die üblichen FEM-Ergebnisse mit zusätzlichen Digimat-spezifischen auf dem mikromechanischen Materialmodell basierenden Ergebnissen angereichert. Eins dieser Ergebnisse ist die Versagensvorhersage. Abbildung 11 zeigt beispielhaft Ergebnisse einer Zugversuchssimulation mit Versagensvorhersage für verschiedene Laststufen in Vergleich zur Versagensbild in realen Zugversuchen. Bei den Farben in den Konturplots in Abbildung 11 bedeutet grau einen Wert über 1, bzw. eine Überschreitung des Versagenskriteriums. Das hier verwendete Versagenskriterium ist das dehnungsbasierte, transversal isotropes 3D Tsai-Hill (TH3DTI) Kriterium:

$$F_A(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_{11}^2}{X^2} - \frac{\varepsilon_{11}(\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})}{X^2} + \frac{\varepsilon_{22}^2 + \varepsilon_{33}^2}{Y^2} + \left(\frac{1}{X^2} - \frac{2}{Y^2}\right)\varepsilon_{22}\varepsilon_{33} + \frac{(2\varepsilon_{12})^2 + (2\varepsilon_{13})^2}{S^2} + \left(\frac{1}{Y^2} - \frac{2}{4X^2}\right)(2\varepsilon_{23})^2$$

Wobei:

$F_A(\varepsilon)$	Versagenskriterium mit Bruch für Werte ≥ 1
ε_{ij}	Komponenten des Dehnungstensors
X, Y, S	Festigkeiten in Faserrichtung, quer zu Faserrichtung und in Schub

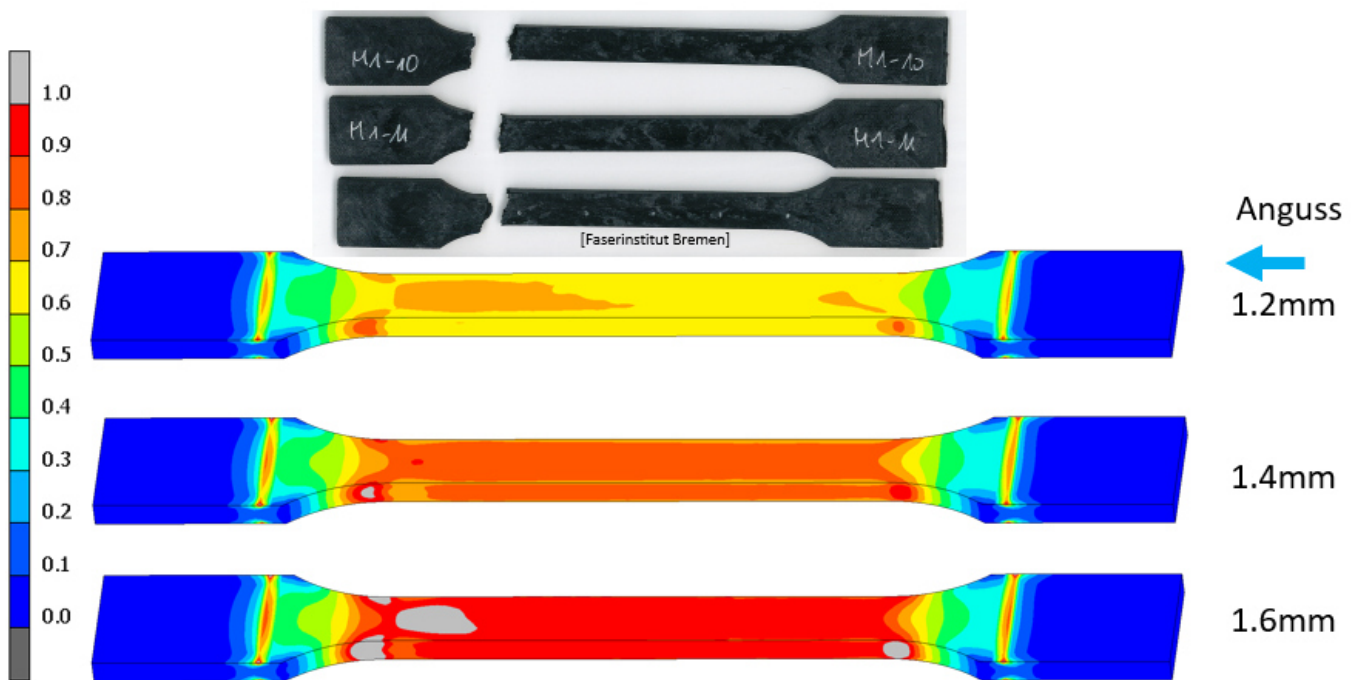


Abbildung 11: Zugversuch Zugproben – Makroskopisches Versagenskriterium

Erste Simulationen mit der zu Beginn des Projekts vorhandenen mikromechanischen Digimat-Materialkarte wurden parallel zu den am Faserinstitut erfolgten Zugversuchen durchgeführt. Sowohl die Versuche wie auch die Simulationen zeigten, dass höhere Herstellungstemperaturen (Werkzeug und Schmelze) und höhere Einspritzgeschwindigkeit zu höheren Steifigkeiten der Zugproben führen. Konsequenterweise haben Proben aus Run 1 die niedrigsten und Run 9 (siehe Abbildung 7) die höchsten Steifigkeiten. Allerdings zeigten die genauen Vergleiche der Simulationsergebnisse und der Versuche eine deutliche systematische Abweichung in den Steifigkeiten. Abbildung 7 zeigt den Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven für Run 1 (schwächster) und Run 9 (stärkster).

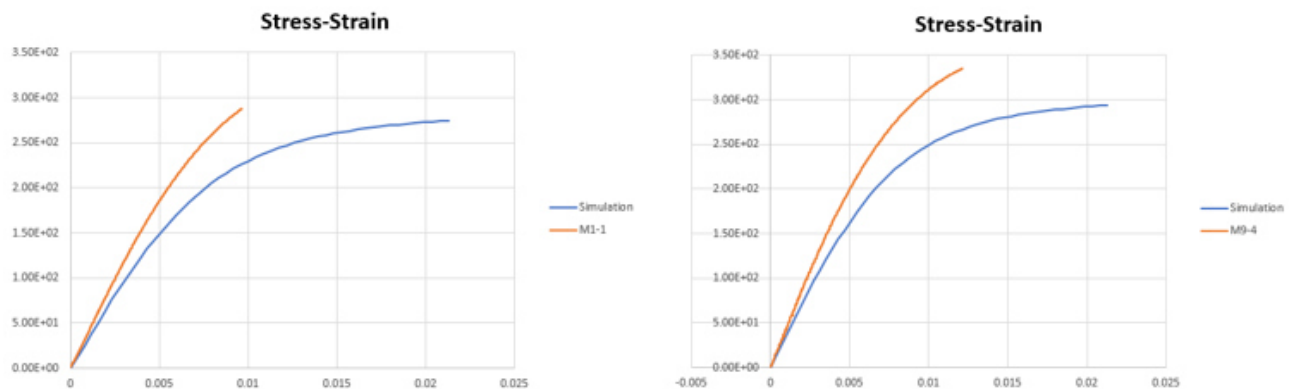


Abbildung 12: Zugversuch Zugstab – Vergleich initiale Simulation (blau) vs. Realität (orange) – links: Run 1 / rechts: Run 9

Die systematische Abweichung für Proben wies auf Probleme entweder mit der rheologischen Materialmodell in Moldex3D oder mit dem mikromechanischen Modell in Digimat. Vergleich mit Mikro-CT Auswertungen der Faserorientierungen (durchgeführt am Faserinstitut) mit den in Moldex3D berechneten Faserorientierungen zeigen zwar lokale Detailabweichungen, diese können aber die Abweichungen in der Steifigkeit bei weiten nicht erklären (siehe Abbildung 9).

Eine Neuerstellung der mikromechanischen Materialkarte, basierend auf den verfügbaren Zugversuchen erschien deswegen der vielversprechendere Ansatz. Die Materialkarte wurde erstellt mit einem Reverse-Engineering Prozess aus den Versuchsergebnissen in dem Digimat Modul Digimat-MX. Simulationen der Zugversuche wurden wiederholt mit der so neuerstellten Materialkarte und wiederum verglichen mit den realen Versuchsergebnissen. Abbildung 13 zeigt den gleichen Vergleich, wie in Abbildung 7, der Spannungs-Dehnungs-Kurven für Run 1 (schwächster) und Run 9 (stärkster). Die roten Pfeile in Abbildung 13 zeigen den Punkt in den Simulationen lokal Versagen vorhergesagt wird. Die Steifigkeiten werden mit der verbesserten Materialkarte sehr gut vorhergesagt. Versagen ist nicht in allen Fällen exakt passend (z.B. Run 9), was aber auf Grund des komplexen Schadensinitiierungs- und Schadensausbreitungsverhaltens nicht überraschen ist. Die verbesserte Materialkarte wurde für alle folgenden in diesem Dokument beschriebenen Struktursimulationen verwendet.

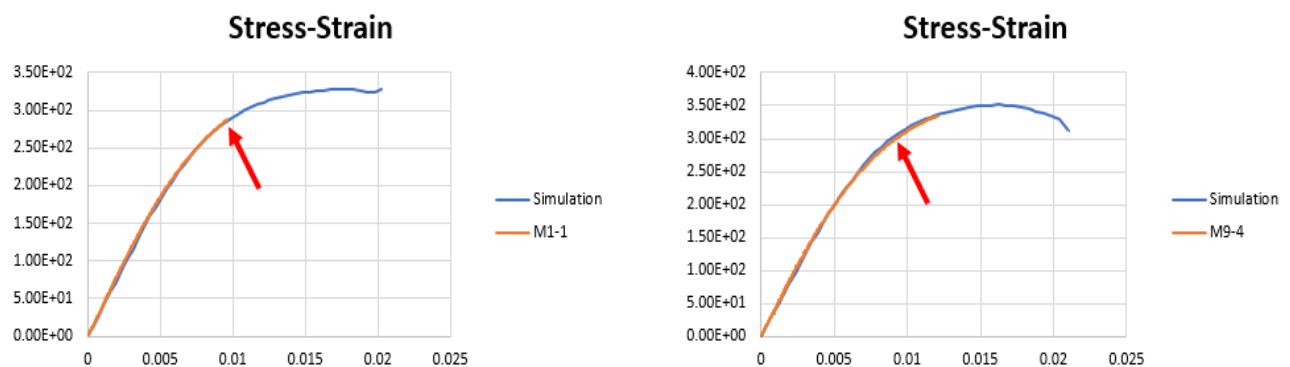


Abbildung 13: Zugversuch Zugproben – Vergleich upgedatete Simulation (blau) vs. Realität (orange) – links: Run 1 / rechts: Run 9

AP 2.1.3 Prozesssimulation Overmolding

In diesen Abschnitt sind die Berechnungen mit den Rippen-Coupons und dem Demostartor beschrieben. Die Rippen-Coupons sind dazu gedacht die Festigkeiten des Overmolding-Interfaces an einer einfachen Geometrie zu untersuchen. Der Demonstrator dient zur Validierung an einem anwendungsnahen Bauteil.

Spritzgussimulationen Rippen-Coupons

Der ursprüngliche Ansatz für die Herstellung der Rippen-Coupons (siehe Abbildung 1, rechts) war zuerst die Halterippe über die Composite-Plate zu spritzen und anschließend auf die so entstandene T-förmige Struktur die Testrippe zu spritzen. Für beide Herstellungsschritte wurde eine andere Kavität in demselben 2-Kavitäten-Werkzeug verwendet (siehe Abbildung 14). Voruntersuchungen haben ergeben, dass dieser Ansatz nicht zielführend war. Um eine möglichst gute Verbindung zwischen dem Laminat und der gespritzten Komponente zu erreichen wird das Laminat in einem Ofen vorgeheizt. Das hat zu Folge das in dem 2. Schritt der Couponherstellung (Spritzen der Testrippe) die T-förmige Struktur aus Laminat und Halterippe zusammen aufgeheizt werden. Die hohen Temperaturen führen zu niedrigen Steifigkeiten der Materialien – das führt wiederum dazu das der hohe Einspritzdruck bei der Herstellung der Testrippe das Laminat stark verformt, weil es auf der Gegenüberliegenden Seite lediglich von der „weichen“ Halterippe gestützt wird. Für den angepassten Coupon-Design wurde deswegen nur die Testrippenseite verwendet – der Werkzeugeinsatz, der vorher die Halterippe aufnehmen sollte, wurde ausgetauscht, so dass der Lamineinleger auf der testrippenabgewandten Seite komplett auf dem Stahl des Werkzeugeinsatzes aufliegt.

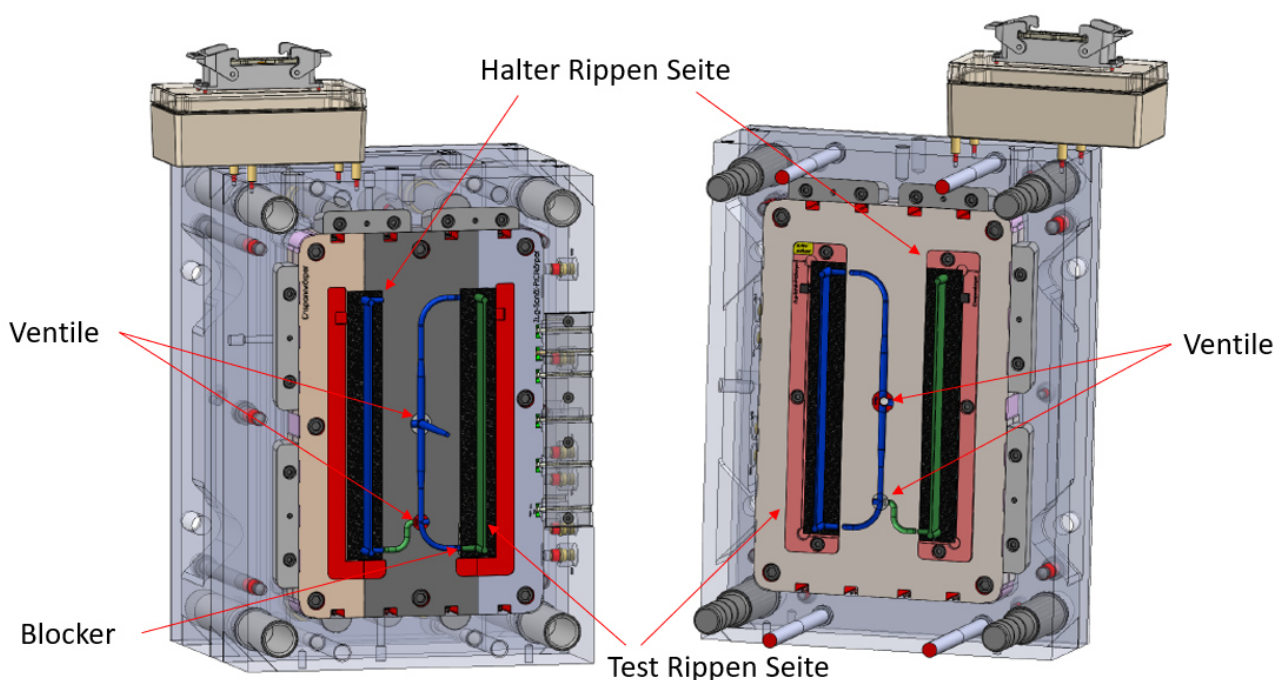


Abbildung 14: Werkzeug für die Doppelrippen-Herstellung

Wie im ursprünglichen Design kann die Testrippe je nach Ventilstellung auf zwei verschiedene Weisen aufgespritzt werden – von beiden Seiten, so dass eine Binde-naht in der Mitte entsteht, oder so dass die Rippenkavität von einer Seite gefüllt wird. Entsprechend ergeben sich zwei Basismodelle als Grundlage für die Simulationen – für das Spritzen der Testrippe von einer Seite und das Spritzen der Testrippe von zwei Seiten. Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die entsprechenden Modelle, wie sie in der Prozesssimulations-Software Moldex3D [CoreTech] aufgebaut sind.

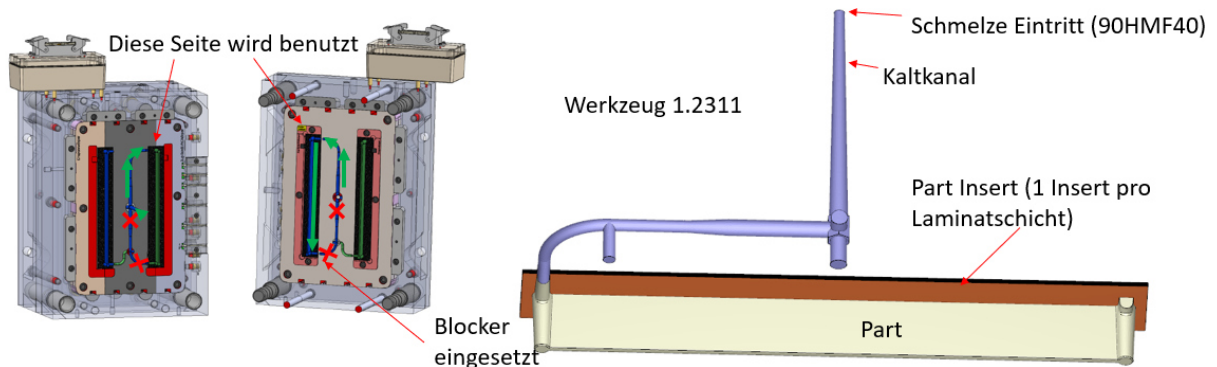


Abbildung 15: Herstellung der Testrippe von einer Seite – Links: Ventilstellung im Werkzeug, Rechts: Simulationsmodell

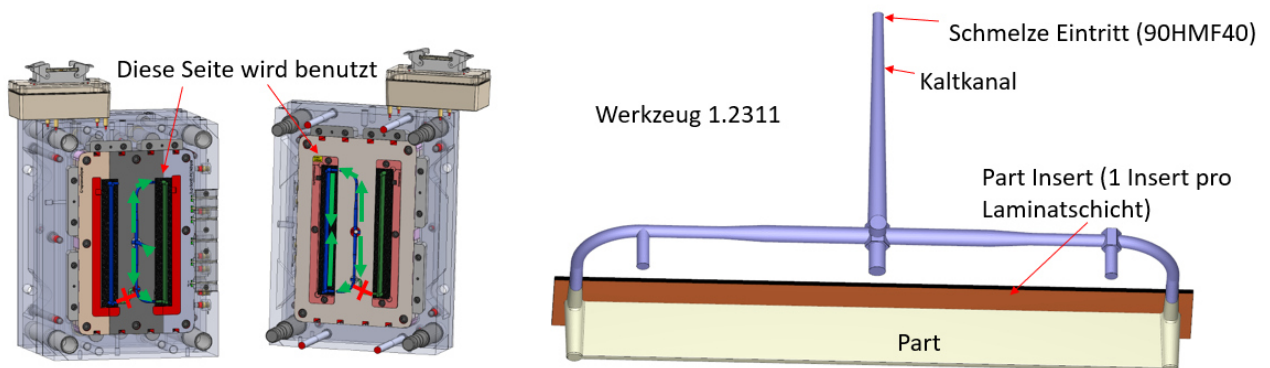


Abbildung 16: Herstellung der Testrippe von zwei Seiten – Links: Ventilstellung im Werkzeug, Rechts: Simulationsmodell

Sowohl der ursprüngliche Doppelrippen Ansatz wie der angepasste Ansatz wurden simuliert. Im Weiteren konzentriert sich die Beschreibung auf dem angepassten Design, weil es auch das schließlich Umgesetzte ist.

Da das benutzte PEEK Material unter sehr hohen Temperaturen verarbeitet wird ($\sim 410^\circ\text{C}$), wurde viel Wert darauf gelegt das Temperaturfeld um die Kavität besonders genau zu berechnen. Um das zu erreichen wurde die Situation bei der realen Herstellung möglichst genau reproduziert. Das Werkzeug wurde als „Mold Plates“ (Modellattribut in Moldex3D welches ein geometrisch beliebig komplex Werkzeugmodellierung erlaubt inklusive Trennebene) modelliert um die Geometrie besser abzubilden. Die 16 Heizstabelemente im Werkzeug wurden entsprechend

HiAD

deren Position modelliert inklusive Sensorpositionen zu deren Regelung. Jedes Heizelement wird individuell geregelt mit individuellen Steuer- bzw. Zieltemperatur. Ausgewählte Werkzeugaußenflächen sind isoliert (wie im realen Werkzeugaufbau) und die Initial-Temperatur des Einlegers ist entsprechen Temperaturmessungen bei den Versuchen vorgegeben. Abbildung 17 zeigt das Werkzeug mit den Heizelementen und Steuersensoren, sowie beispielhaft die Temperaturverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt im Prozess.

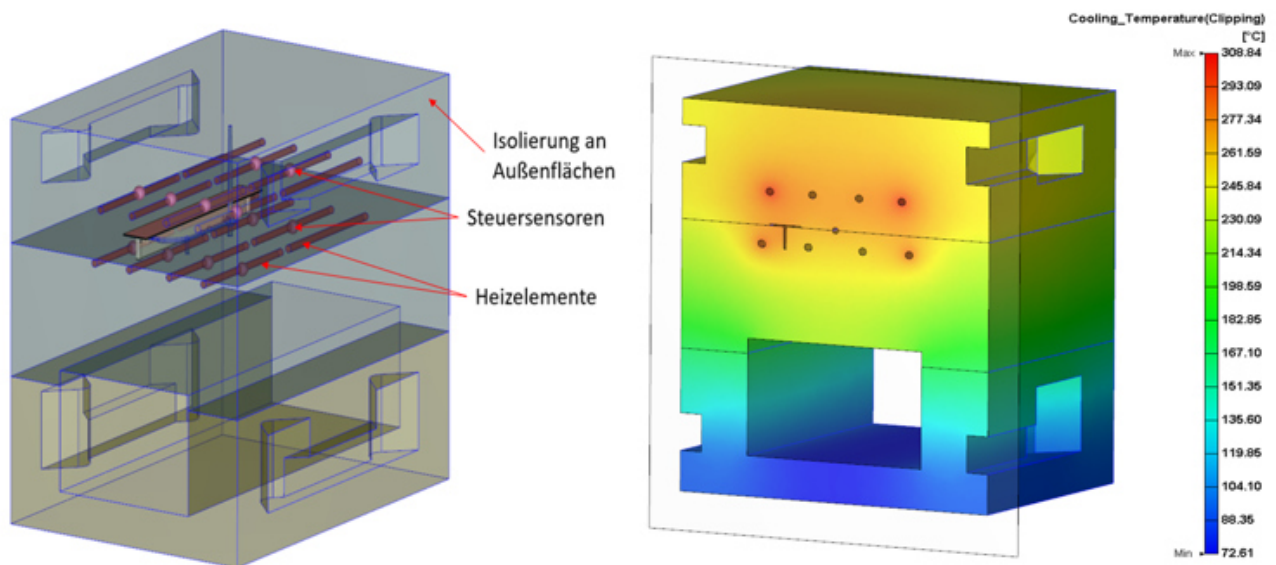


Abbildung 17: Links: Modellierung des Werkzeugs und Heizelement, Rechts: Temperaturverteilung in Werkzeug

Außerdem wurde die Vernetzung, wie bei den Zugstäben, mit einem Hexaeder-dominierten Netzen für genauere Faserorientierungsverteilung durchgeführt.

Die zuvor beschriebenen Maßnahmen zielten darauf eine möglichst genaue Faserorientierung in der Testrippe zu berechnen um Input für die Struktursimulationen zu generieren. Darüber hinaus dienen die Ergebnisse der Spritzgussimulation um Probleme im Spritzgussprozess zu erkennen. Zum Beispiel zeigt die Abbildung 18 eine ungleichmäßige Temperaturverteilung zwischen den beiden Seitenflächen der Testrippen am Ende des Prozesses. Die Ursache ist die seitliche Position der Kavität in Werkzeug (Position gekennzeichnet mit „Test Rippen Seite“ in Abbildung 14), was dazu führt, dass die der Werkzeugaußenseite zugewandte Rippenfläche deutlich besser gekühlt wird.

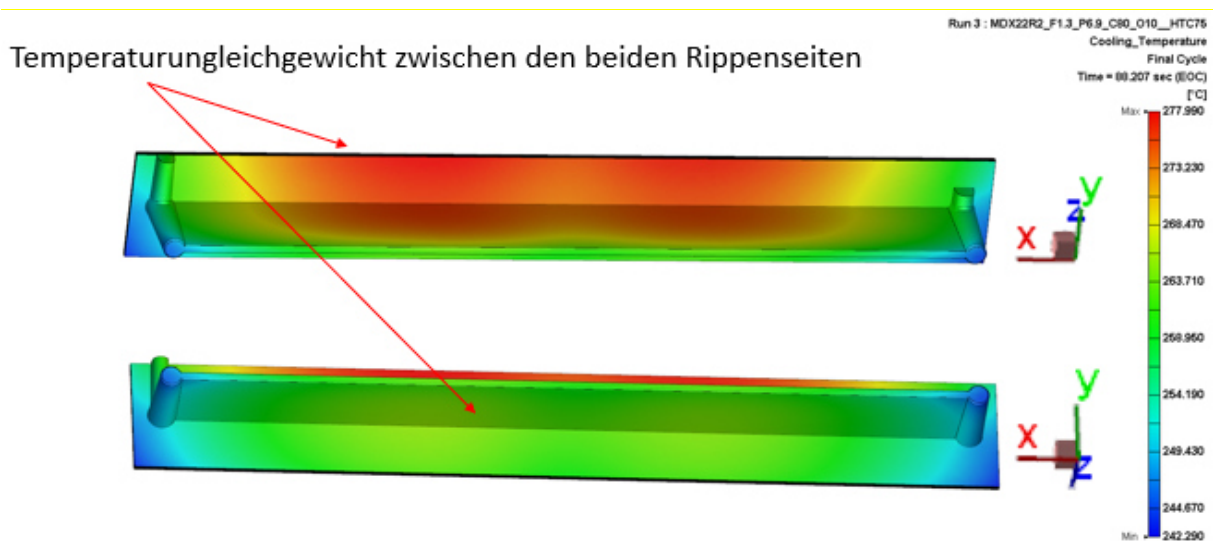


Abbildung 18: Temperaturunterschied zwischen den beiden Rippenseiten – Oben: Rippenseite zu Mitte des Werkzeugs, Unten: Rippenseite zu Außenseite des Werkzeugs

Später im Projekt, nachdem Versuchsergebnisse zu der Festigkeit der Overmolding-Interfaces verfügbar waren (zu genauerer Beschreibung dieser Versuche siehe nächsten Abschnitt), wurden diese Prozesssimulation auch benutzt um den Einfluss des Herstellungsprozesses auf die ermittelte Festigkeit zu untersuchen.

Die Versuche haben gezeigt, dass die Interface-Festigkeit tendenziell abnimmt je weiter die betrachtete Stelle von der Angussposition entfernt ist. Abbildung 19 zeigt die statische Interface-Festigkeit für ein von einer Seite gespritztes Rippe-Coupon (wie in Abbildung 15). Die Farben auf unter der x-Achse zeigen die Position auf der Rippe von Anguss (rot, A) zu angussabgewandten Seite (grau, J) – vergleiche Abbildung 21 im nächsten Abschnitt. Vier Laminatsetups wurden betrachtet – zwei davon mit Laminatausrichtung entlang der Rippenlänge, so dass auch die Fasern in der rippennächsten Laminatschicht parallel zu der Rippe ausgerichtet sind (rote Kurven in Abbildung 19), und zwei mit der Laminatausrichtung um 90° gedreht (blaue Kurven in Abbildung 19). Außerdem sind zwei der Konfiguration mit einer zusätzlichen faserlosen PAEK Folie zwischen der Rippeseite versehen (gestrichelte Kurven in Abbildung 19). Alle 4 Laminatkonfigurationen zeigen die zuvor beschriebene Tendenz.

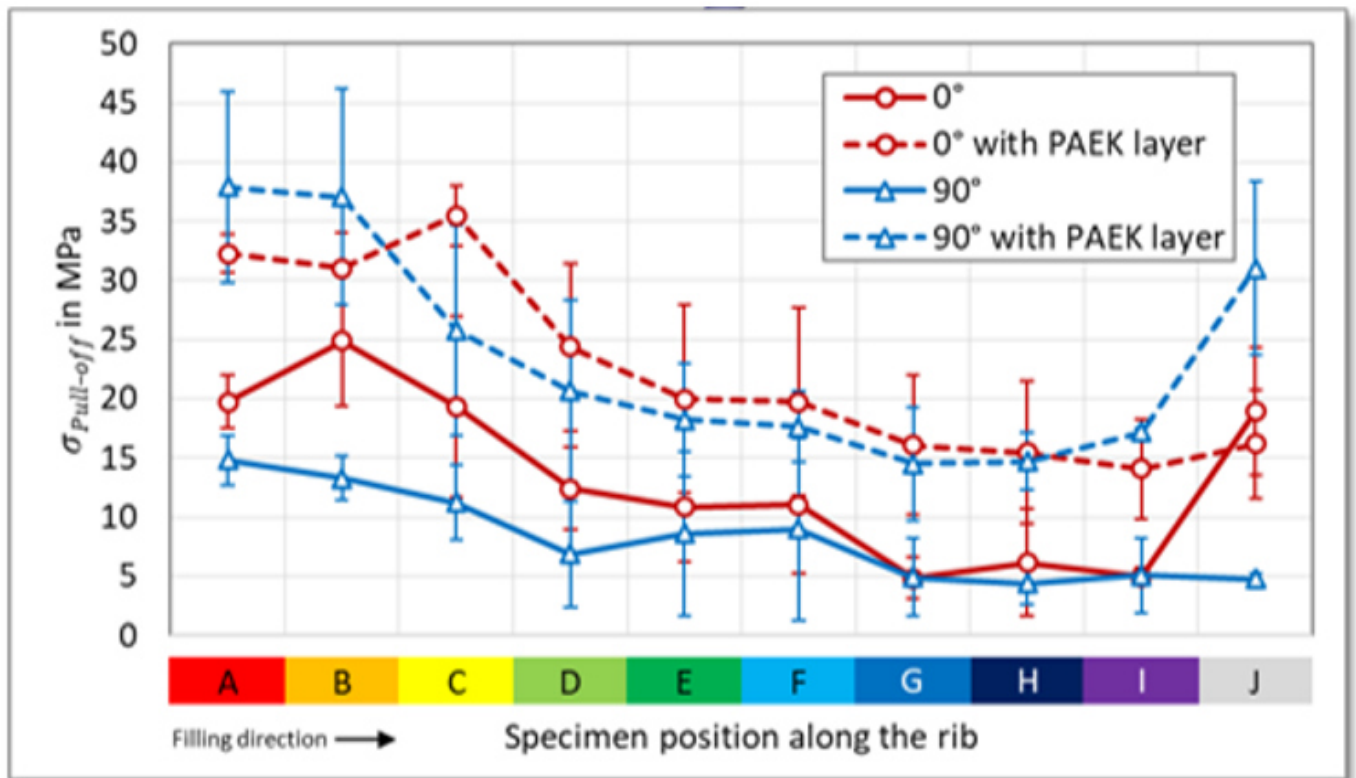


Abbildung 19: Statische Festigkeit des Overmolding-Interfaces [FIBRE]

Mehrere Parameter wurden untersucht als mögliche Einflussfaktoren um den Zusammenhang zwischen Entfernung von Anguss und Festigkeit zu erklären. Die Schmelzefronttemperatur konnte als signifikanter Einfluss ausgeschlossen werden, da keine relevante Veränderung dieser Temperatur entlang des Interfaces festgestellt werden konnte. Auch der Einfluss der Variationen in der Faserorientierung in der Rippe wurden mit Hilfe von Struktursimulationen untersucht. Auch hier hat sich der Einfluss als gering gezeigt. Eine gute Korrelation zu der Festigkeit zeigte dagegen die Dauer des aufgetragenen Drucks auf das Interface. Je näher eine Position am Anguss ist, desto länger kann der Druck während der Nachdruckphase dort gehalten werden. Das scheint ein positiver Einfluss auf die Güte der Verbindung zwischen der Rippe und Laminat zu haben. Abbildung 20 zeigt links den Druckprofil an verschiedenen Positionen am Overmolding-Interface. Die Farben der Kurven entsprechen den Markierungen oben rechts im Bild und der Position der Festigkeitsmessung (unten rechts, bzw. in Abbildung 19). Die schwarze Kurve zeigt als Referenz den im Prozess eingestellten Spritzdruck am Schmelze Eintritt (für genaue Position siehe Abbildung 15).

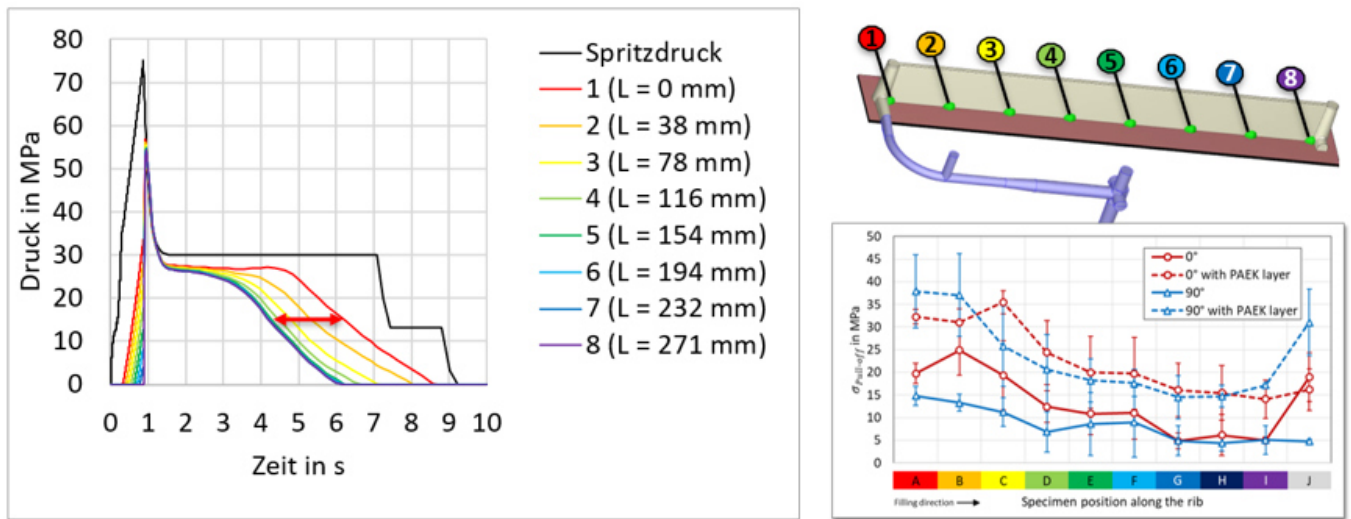


Abbildung 20: Zusammendruck zwischen Druck am Overmolding-Interface und Festigkeit des Interfaces

Struktursimulationen Rippen-Coupons

Die in dem Overmoldingprozess entstandenen Rippen-Coupons werden, für die Zugversuche zu Overmolding-Interface-Charakterisierung, in 10 ca. 25mm breite Abschnitte geschnitten. Durch den Trennungsprozess geht Material verloren, so das die finale Probenbreite ~24 mm ist. Abbildung 21 zeigt ein Rippen-Coupon vor der Zerlegung in Einzelabschnitte – jede Farbe in dem an der Rippenwurzel platzierten Markierungsband markiert die einzelnen Abschnitte (A, B, C, ... , J).



Abbildung 21: Rippen-Coupon mit Markierungen für die Zerlegung in einzelne Zugversuchsproben [FIBRE]

HiAD

Wie schon im vorhergegangenen Abschnitt beschrieben, hatte das ursprüngliche Design zwei Thermoplastrippen (eine Testrippe und eine gegenüberliegende Halterippe) – siehe rechte Seite in Abbildung 1. Entsprechend sahen auch die Zugversuchsproben aus – beide Rippen werden in die Zug/Druckmaschine gespannt und auf Zug belastet (statisch oder zyklisch), so dass die Lasten in den beiden Overmolding-Interface senkrecht zu Interfacefläche wirken – siehe Abbildung 22 links (gekennzeichnet mit „Ursprüngliches Design“). Die Testrippe (oben links in Abbildung 22) hatte dabei eine kleinere Interfacefläche, so dass dort höhere Lasten und somit früheres Versagen zu erwarten sind als am Interface zwischen Halterippe und Laminat (unten links in Abbildung 22).

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben musste dieses Design aufgegeben werden zu Gunsten einer Konfiguration mit einer Rippe (siehe Abbildung 15 bzw. Abbildung 16).

Zuerst wurde geplant die aus den hergestellten Coupons geschnittene T-förmige Prüflinge mit einem ebenfalls T-förmigen Aluminiumprofil zu verkleben, welches die Funktion der nun nicht mehr vorhandenen Halterippe ersetzt – siehe Abbildung 22 Mitte (gekennzeichnet mit „Angepasstes Design“). Allerdings konnten verschiedene Klebeansätze mit verschiedenen Klebern, Klebverfahren und verschiedene Aufbereitungen der Kleboberflächen am FIBRE und CTC keine Verklebung produzieren die zuverlässig eine höhere Festigkeit als das Overmolding-Interface zwischen Thermoplastrippe und Laminat erreichten. Da deswegen nicht sichergestellt werden konnte, dass das Versagen bei den Versuchen immer am Overmolding-Interface stattfindet, musste auch dieser Ansatz aufgegeben werden.

Da der Verklebungsansatz sich als zu unzuverlässig herausgestellt hat, wurde entschieden die die aus den Ein-Rippen-Coupons geschnittene Proben direkt zu testen. Um die Verformung des Laminats (und damit die Inhomogenität in dem Spannungsbild) zu minimieren wurde das Laminat zwischen zwei starre Platten gespannt, so dass nur ein schmaler Bereich unter der Rippe sich frei verformen kann – siehe Abbildung 22 rechts (gekennzeichnet mit „Finales Design“).

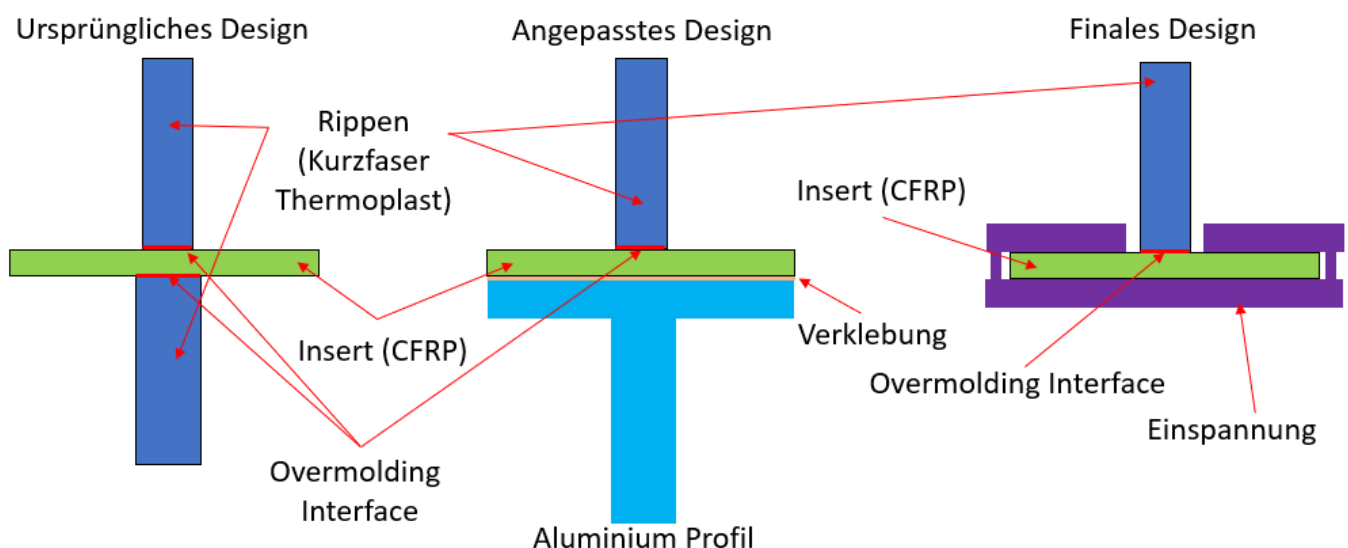


Abbildung 22: Evolution des Designs der Zugversuchsproben

HiAD

Entsprechend der Evolution des Designs der Zugversuchsproben im Laufe des Projekts, wurden begleitend FEM Modelle generiert und Struktursimulationen durchgeführt -siehe Abbildung 23.

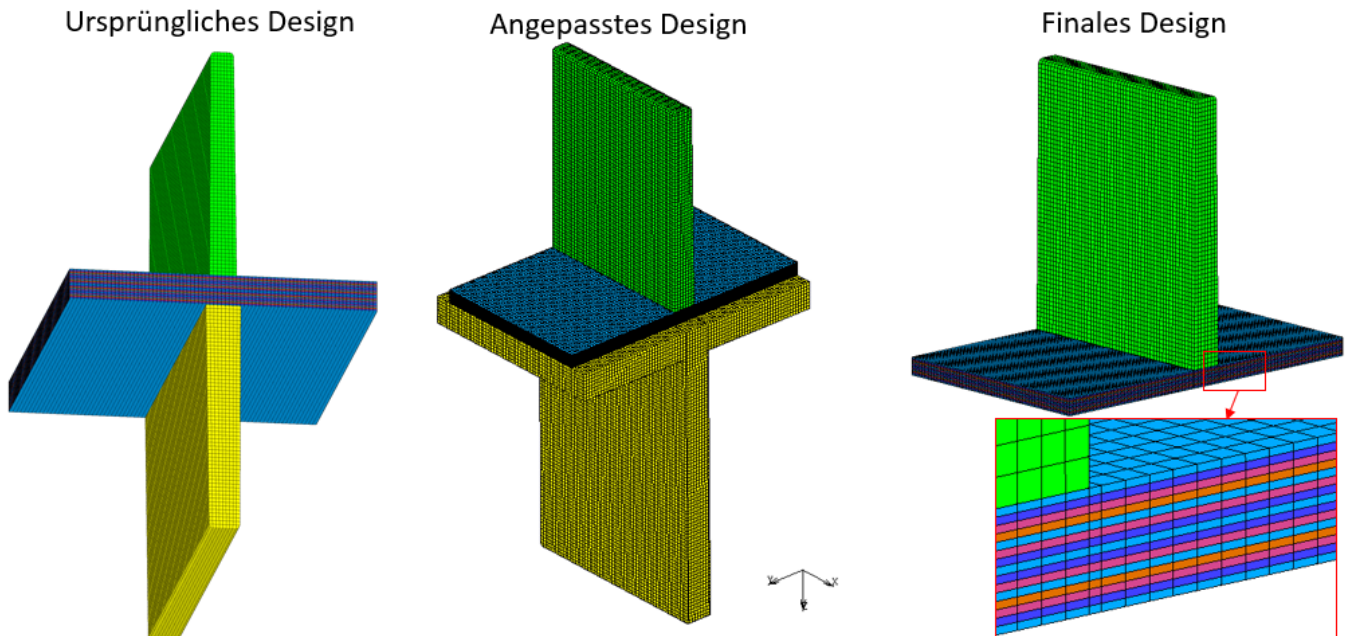


Abbildung 23: Evolution des FEM Modelle der Zugversuchsproben

Analog zu den Simulationen mit den Zugstäben für die Materialmodellvalidierungen wurden auch hier gekoppelte Simulationen durchgeführt. Als der eigentliche FEM Solver wurde Marc [Hexagon] benutzt. Die nichtlinearen Struktursimulationen sind gekoppelt einerseits mit den Ergebnissen der Spritzgusssimulationen (Faserorientierung in der Kunststoff-Rippe und wenn vorhanden die Position von Bindenähten) und andererseits mit einem mikromechanischen Materialmodell. Die Kopplung wird durchgeführt mit Hilfe von Digimat [Hexagon]. Abbildung 24 zeigt das Mapping der Faserorientierung zwischen den Ergebnissen der Prozesssimulation in Moldex3D [CoreTech] und dem strukturelle Mechanischen Modell in dem Digimat Modul Digimat-MAP.

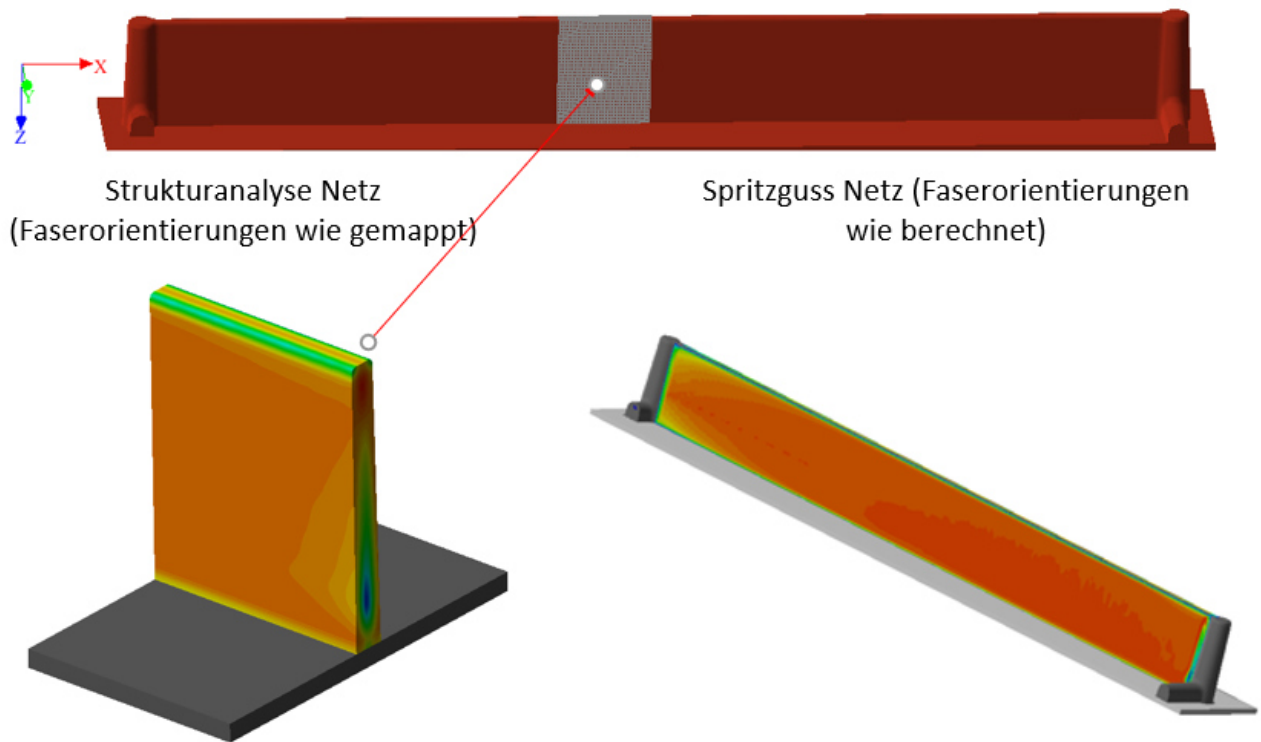


Abbildung 24: Mappen der Faserorientierung von den Spritzgussmodellen (rechts unten) auf das Struktursimulations-Modell (links unten) aus der Mitte des Rippen-Coupons

Danach wird die eigentliche Struktursimulation durchgeführt. Dabei steuert das Digimat-Modul Digimat-RP die Marc-Rechnung, so dass in jedem Iterationsschritt für jedes Rippen-Element die Materialformulierung, entsprechend der Faserorientierung und Lastzustand, basierend auf dem mikromechanischen Materialmodell, angepasst wird (siehe Abbildung 25).

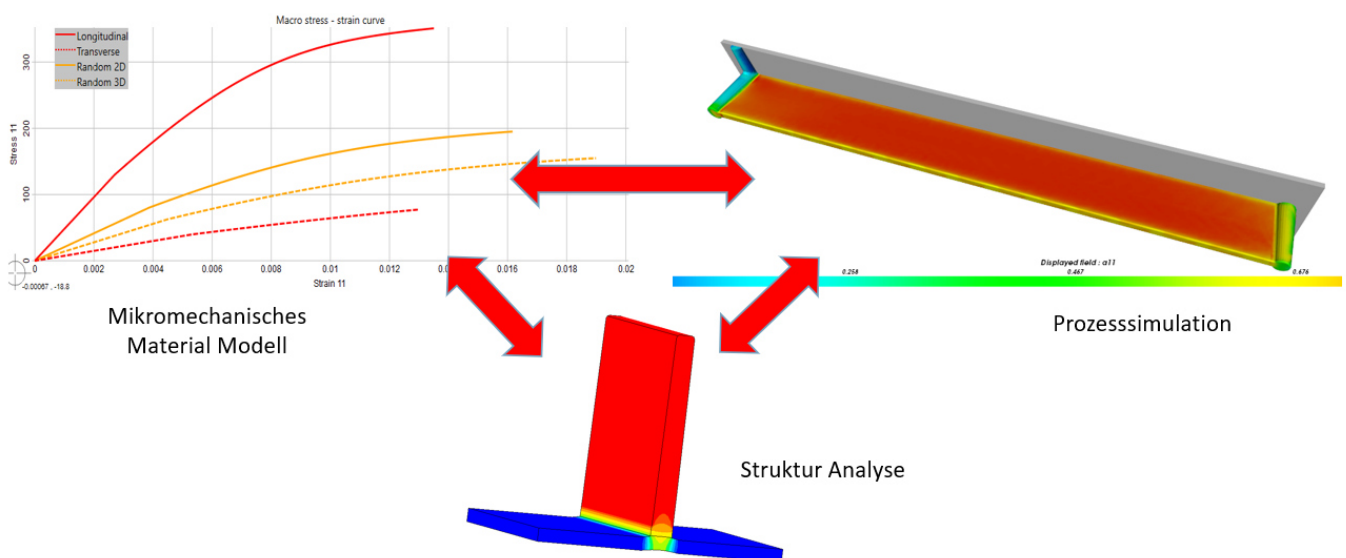


Abbildung 25: Gekoppelte Strukturanalyse - Rippen-Coupons

HiAD

Auch für diese Simulationen wird zusätzlich eine Versagensvorhersage in der Thermoplastrippe nach dem im Zugstab-Abschnitt beschrieben das dehnungsbasierte, transversal isotropen 3D Tsai-Hill (TH3DTI) Kriterium generiert. Abbildung 26 zeigt dieses Versagenskriterium für verschiedene Lastniveaus während der Zugversuche (Lastniveau ist angegeben als durchschnittliche Normalspannung im Overmolding-Interface = Zugkraft geteilt durch die Interfacefläche). Wenn das Kriterium den Wert 1 überschreitet (hell grau in Abbildung 26) ist mit Versagen im Rippenmaterial zu rechnen.

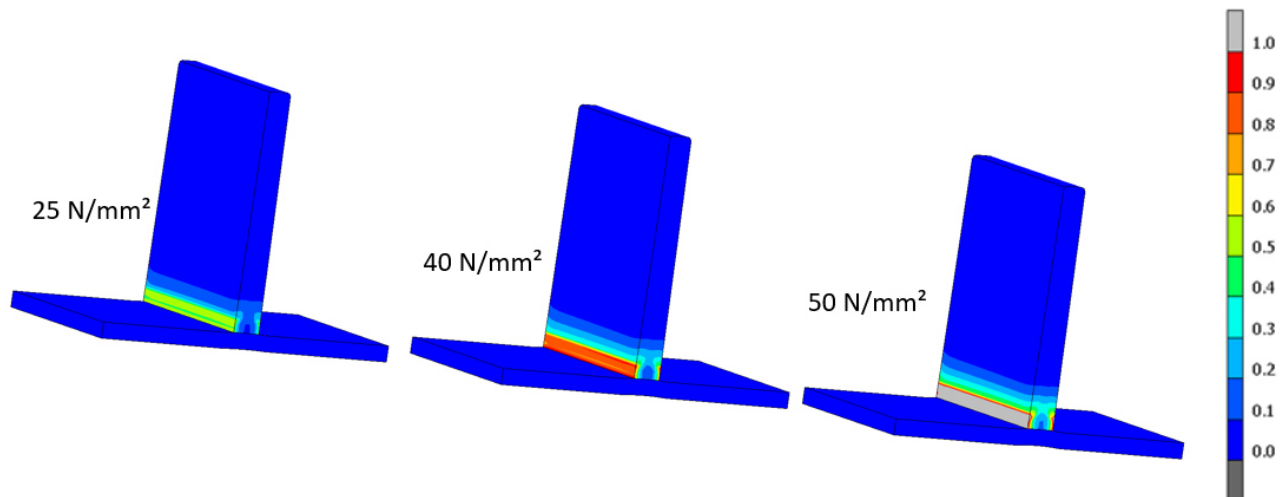


Abbildung 26: Zugversuchsergebnisse (Rippen-Coupon) bei verschiedenen Lastniveaus – Makroskopisches Versagenskriterium

Die Versuche zu Ermittlung der Festigkeit des Overmolding-Interfaces haben sehr komplexes Verhalten aufgezeigt. Wie schon in vorherigen Abschnitt beschrieben (siehe auch Abbildung 19 und Abbildung 20) hängt die Festigkeit von verschiedenen Parametern ab – z. B. Aufbau des Laminats und Entfernung von dem Anguss. Das Interface ist auch geometrisch komplex auf Grund von Zusammenspiel von Druck, Schwindung und Verzug bei der Herstellung. Die Verbindung zwischen den Kunststoffen der Rippe und des Laminats ist nicht homogen, sondern beinhaltet Poren. Abbildung 27 zeigt diese Effekte an verschiedenen Beispielen – z.B. die Unebenheit des Laminats oben und Poren unten. Außerdem sind verschiedene Versagensmodi zu erkennen – oben links Versagen in der obersten Laminatschicht mit anschließender Interply-Delamination, oben rechts Versagen im Interface selbst, unten Versagen in dem Rippenmaterial („Spritzgussrest“). All diese Versagensmodi sind sehr lokal und können von einer Position zu nächsten unterschiedlich sein. Referenz [„Experimental Joint Strength Assessment Of Overmoulded Carbon Fibre-Reinforced PEEL/LMPAEK Composites Under Quasi-Static Rib Pull-Off And Peel Loading“, R. Enderle, SAMPE 2023] von FIBRE beschreibt ausführlich die beobachteten Phänomene.

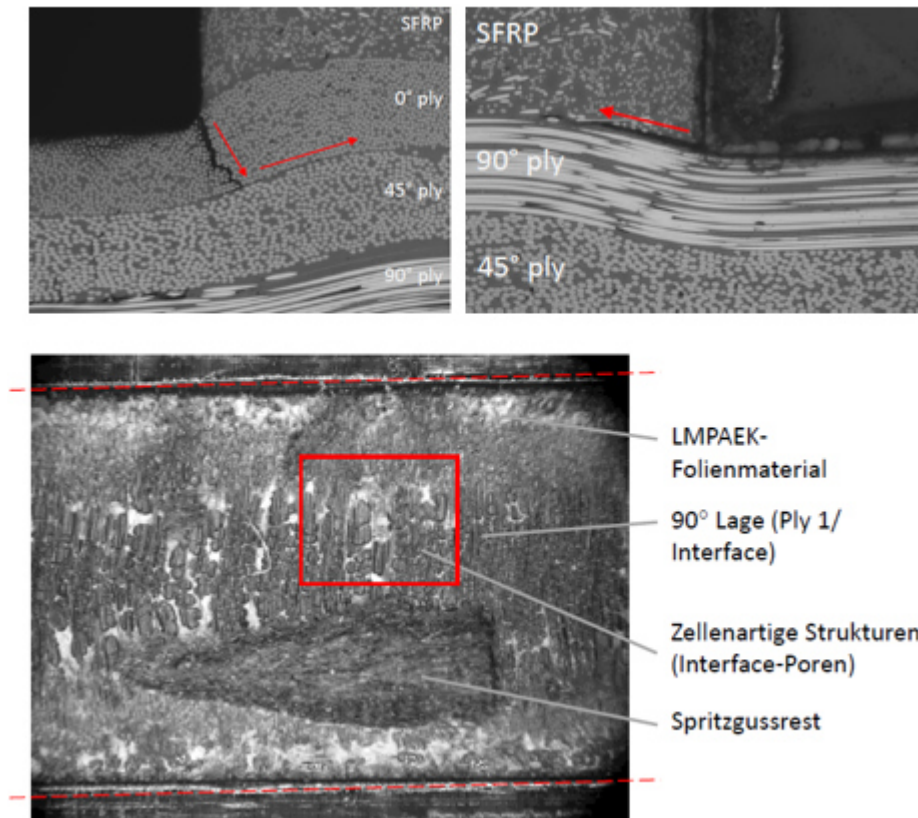
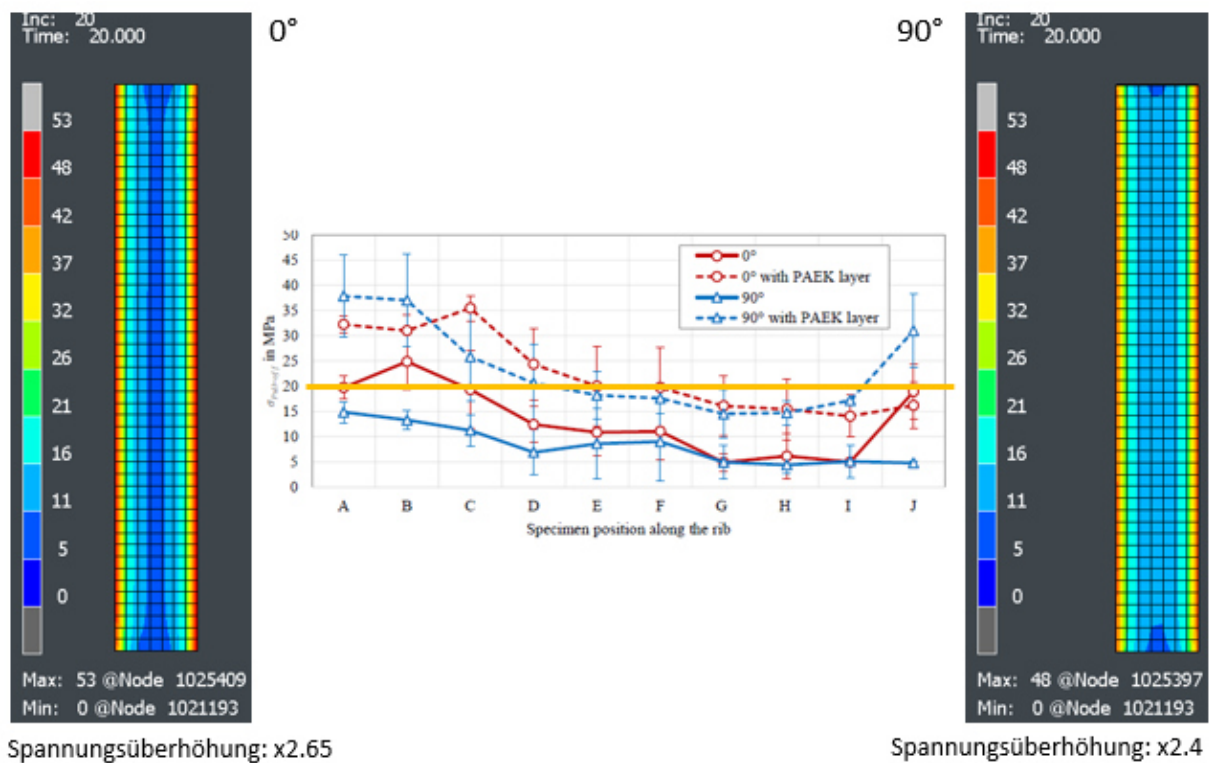
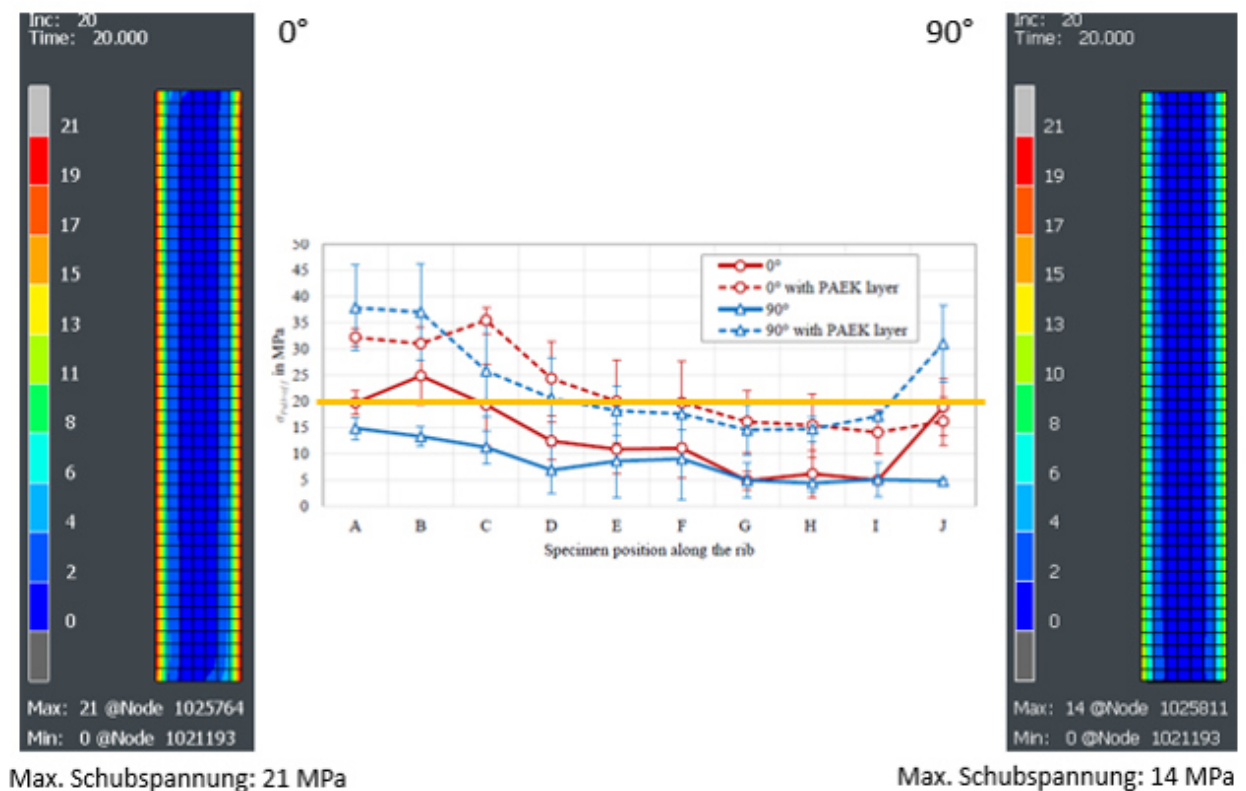


Abbildung 27: Beispiele von Versagensarten bei statischen Zugversuchen (Rippen-Coupon) – Oben: Schnitte von der Seite an der Verbindung von Rippe („SFRP“) und Laminat („ply“) / Unten: Blick auf die Laminatseite des Interfaces nach dem vollständigen Bruch

Insgesamt gesehen ist es nicht möglich mit der gewählten Idealisierung der Struktursimulationsmodelle und den verfügbaren Daten eine direkte numerisch Vorhersage des Interface-Versagens zu tätigen. Trotzdem sind die Struktursimulationen von kritischer Bedeutung bei der Beurteilung der in dem Versuchen ermittelten Festigkeitswerte. Bei den Versuchen wird die aufgebrachte Abzugskraft gemessen, so dass die ermittelte Interface-Festigkeit (so wie in Abbildung 19 gezeigt) sich aus der Kraft geteilt durch die Interfacefläche ergibt. Das impliziert das die Kontakt-Spannung konstant im ganzen interface ist. In Realität gibt das Laminat nach, so das an den Außenkanten des Interfaces deutlich höhere Normal-Spannung als der Durchschnittswert ergeben. An den gleichen Positionen stellen sich auch Scherspannungen in der Größenordnung der durchschnittlichen Normalspannungen ein (siehe Abbildung 28). Beide zusammen führen dazu das die gemessene Interface-Festigkeit deutlich unterschätzt wird (siehe Abbildung 29). In beiden Abbildungen ist links die Simulation mit 0° Laminatausrichtung (parallel zu der Rippe) und rechts mit 90° Ausrichtung.

Abbildung 28: Normalspannung im Overmolding-Interface bei 20 N/mm² durchschnittlicher NormalspannungAbbildung 29: Schubspannungen im Overmolding-Interface bei 20 N/mm² durchschnittlicher Normalspannung

HiAD

Ab einer gewissen kritischen durchschnittlichen Normalspannung (bei ca. 30 N/mm² in der untersuchten Konfiguration) im Interface reduziert sich der Überhöhungsfaktor auf Grund von nichtlinearen Steifigkeiten des Rippenmaterials. Abbildung 30 zeigt die Spannungsüberhöhungen für die beiden untersuchten Laminatausrichtungen (0° und 90°) für verschiedene Lastniveaus.

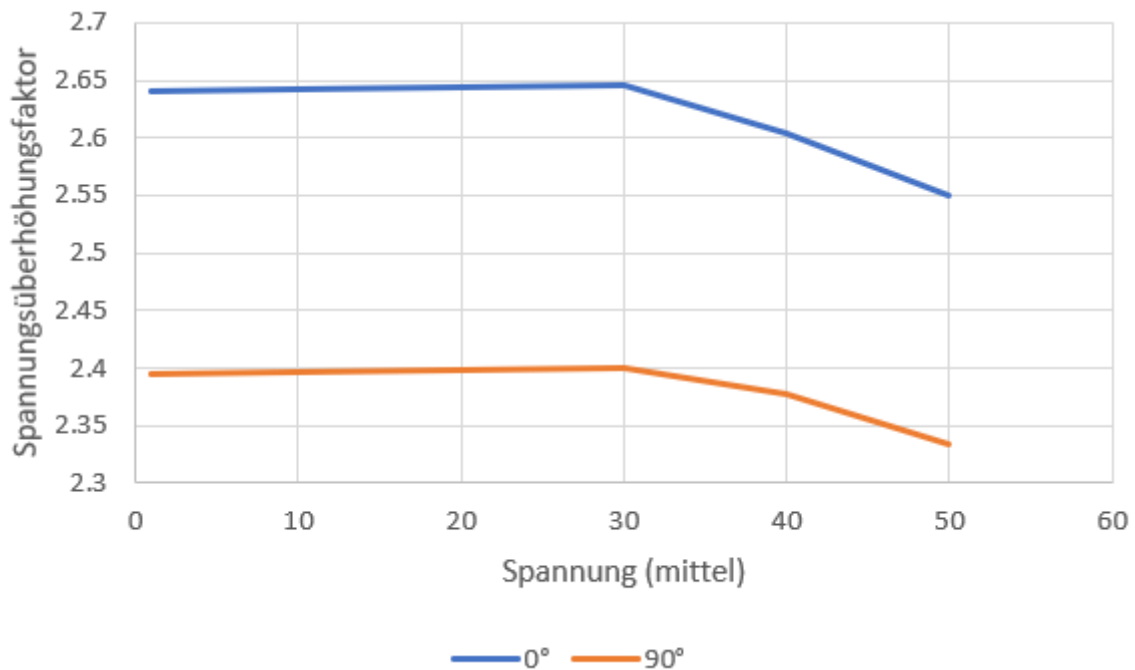


Abbildung 30: Überhöhung der Normalspannung im Overmolding-Interface bei verschiedenen durchschnittlichen Normalspannungen

Diese Erkenntnisse zu dem realen kritischen Spannungsniveau sind notwendig um die in den Versuchen ermittelten Festigkeiten auf andere Bauteile zu übertragen zu können. Das gilt sowohl für Festigkeiten unter statischen wie auch dynamischen Lasten.

Simulationen Demonstrator

Zum Abschluss des Forschungsvorhabens sollten die Erkenntnisse der Coupon-Tests an einem realitätsnahen Bauteil validiert werden. Als ein solcher Demonstrator wurde ein Design ausgewählt, das einem bereits in Benutzung befindlichen sogenannten Corner-Fitting aus Aluminium im Flugzeug-Türumgebung entspricht. Dieses Corner-Fitting verbindet zwei Strukturkomponenten und die Anschlussstellen (in Fußbereich (gelb in Abbildung 31) und im Stegbereich (rot in Abbildung 31) sind durch gefräste Endlos-Laminat-Platten verstärkt. Verschiedene Variationen (in Geometrie und Dicken) für diese Laminat-Einleger wurden in Betracht gezogen (für eine Auswahl siehe Abbildung 31).

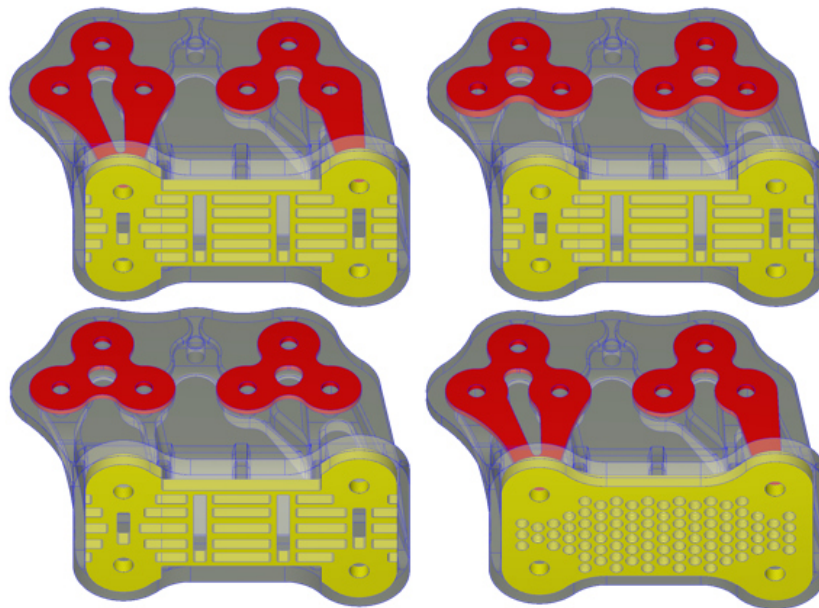


Abbildung 31: Verschiedene Kombinationen von Lamineinlegern - Auswahl

Um die Herstellbarkeit von verschiedenen Kombinationen zu überprüfen wurden für verschiedene Einleger-Kombinationen Prozesssimulationen in Moldex3D [CoreTech] durchgeführt (siehe Abbildung 32 für eines der Modelle). Abbildung 33 zeigt beispielhaft eines auf diese Weise in Vorfeld entdeckte Probleme – die zu dicken Einleger im Steg (in rot) verzögern die Schmelzeausbreitung, so dass es Bildung von kritischen Bindenähten kommt (rote Pfeile).

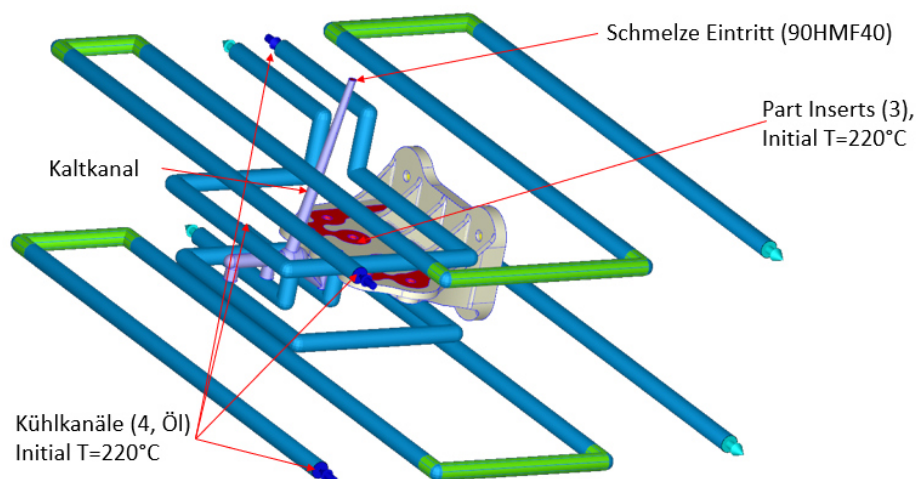


Abbildung 32: Moldex3D Modell für eine der Demonstrator-Simulationen

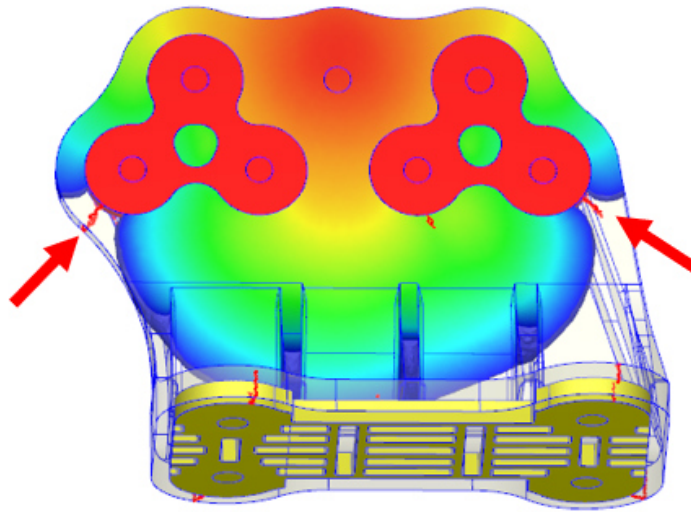


Abbildung 33: Demonstrator – Beispiel: Schmelze-Position zu einem Zwischenschritt – Bildung von Bindenähren

Die Simulationen wurden benutzt um die finale Auswahl an Kombinationen für die Herstellung festzulegen.

Diese Simulationen werden auch genutzt um die Faserorientierungen für Struktursimulationen zu exportieren. Diese Struktursimulationen wurden am Composite Technology Center (CTC) durchgeführt.

AP 2.1.3 Ableitung von Design-Allowables und Richtlinien für dynamisch beanspruchte Overmolding Strukturen

In der letzten Phase des Projekts ist in Zusammenarbeit mit den Projektpartner unter der Leitung von CTC ein Dokument entstanden zu Design-Allowables und Richtlinien für dynamische beanspruchte Overmolding Strukturen. Der Beitrag der SimpaTec zu diesem Dokument ist bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben. Insbesondere sind da die Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen Nachdruckdauer und Festigkeit, sowie die Rückschlüsse der Struktursimulationen auf den tatsächlichen Spannungszustand im Interface in Vergleich zur in Versuchen gemessenen durchschnittlichen Spannungen eingeflossen. Außerdem wird die Überprüfung der Herstellbarkeit mit Spritzgusssimulationen thematisiert, sowie die Ermittlung der Faserorientierungen für Struktursimulationen.

Projektevaluation

Verwendung der Zuwendung

Die Kostenplanung für das Projekt ist im geplanten Rahmen eingehalten worden. Wegen der Einflüsse der COVID-19-Pandemie kam es zu Verschiebungen innerhalb von Arbeitspaketen. Durch die gute Zusammenarbeit des Konsortiums, klare Anforderungen und das Auftreten von einige geplante Risiken führte es innerhalb der Arbeitspaketen zu wenige einkalkulierten Schleifen und somit weniger Aufwand.

Durch eine Neuausrichtung der SimpaTec wurde eine Schwesterfirma die SimpaTec Engineering GmbH gegründet, die ihren Fokus auf Forschungsprojekten und Dienstleistungen setzt. Durch Umstrukturierung der Mitarbeiter innerhalb der SimpaTec Gruppe musste eine Umwidmung von Personalkosten auf FE-Fremdleistungen für den letzten Quartal in 2023 beantragt werden.

Insgesamt sind bei Position 837 „Personalkosten“ 132.434,40 € und bei Position 823 „FE-Fremdleistungen“ 7508,80 anstatt von den geplanten 160.000,00 € entstanden. Dies hat an der guten Zusammenarbeit innerhalb des Konsortiums und den klaren festgelegten Anforderungen am Anfang des Projektes. Somit konnten einige geplanten Schleifen und Aufwand reduziert werden. Des Weiteren hatten, die von der Regierung aufgelegten Maßnahmen während der Pandemie, dazu geführt, dass deutlich wenige Reisekosten abgerufen worden sind. Es sind lediglich bei Position 838 „Reisekosten“ 1.190,65 € von den geplanten 4.000,00 € entstanden. Die benötigten Mietlizenzen für die Software Moldex3D und MSC Marc/Mentat unter Position 850 „sonstige unmittelbaren Vorhabenkosten“ waren mit dem Betrag 195.000,00 € geplant, konnten auf 166.641,15 reduziert werden. Die Position 860 „Verwaltungskosten“ mit dem Betrag von 3.600,00 € sind entsprechend den geplanten Kosten eingehalten worden.

Das eingesetzte Mittel sind zur Zielerreichung notwendig gewesen und sind (z. B. durch den koordinierten Einsatz verschiedener Kompetenzen, die Nutzung von Synergien und eine geeignete zeitliche Abstimmung) wirtschaftlich und sparsam eingesetzt. Weitere Deckungsmitteln wurden nicht benötigt.

Zahlenmäßiger Nachweis

Das Projekt erreichte seine Ziele vollständig und wurde seitens der SimpaTec erfolgreich abgeschlossen. Bedingt durch die COVID-19-Pandemie entstanden einige Herausforderungen im Projekt. Dieses konnten durch entsprechende Ressourcenplanung gelöst werden. Den Einsatz der entsprechenden Kompetenzen konnten somit flexibel der entsprechenden Herausforderung gezielt und effizient genutzt werden.

Eine budgetneutrale Projektzeitverlängerung unterstützte entstandenen Verzögerungen und von Partner abhängige Aufgaben konnten dann erfolgreich zu Ende umgesetzt werden.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Das Projekt war für die Verbundpartner mit erheblichen wirtschaftlichen Risiken verbunden. Während der Umsetzung verließen die Projektpartner den Stand der Technik und mussten erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit leisten. Die hierbei auftretenden

interdisziplinären Fragestellungen konnten von den Partnern nur gemeinsam gelöst werden. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit, die nur in Verbundforschungsprojekten ermöglicht wurde, konnte das Risiko entsprechend gesenkt werden.

Die geleistete Arbeit der SimpaTec entspricht der im Projektantrag aufgestellten Aufgabenstellung bzw. den Inhalten der einzelnen Arbeitspakete und war somit notwendig. Um die formulierten Projektziele erreichen zu können, war am Anfang des Forschungsprojekt ein erhöhter Personalaufwand notwendig. Der erzielte Erkenntnisgewinn folgt dabei den formulierten Erwartungen. Insgesamt waren der Arbeitsaufwand und die damit verbundenen Ausgaben angemessen.

Im Teilprojekt hatte die SimpaTec die Aufgaben den Spritzgussprozess zu simulieren, wie auch nachgeschaltete Struktursimulationen durchzuführen. Der Schwerpunkt lag dabei darauf die reell durchgeführten Versuche möglichst genau zu reproduzieren mit dem Ziel die Versuchsergebnisse besser interpretieren zu können. Schlussendlich in Bezug auf den Einfluss der Parameter des Spritzgussprozesses auf die Overmolding-Interface Festigkeit konnten durch Vergleich zwischen den Versuchen und Simulationen signifikante Zusammenhänge hergestellt werden. Eine weitere wichtige Erkenntnis, ist die Einschätzung der Festigkeitswerte des Overmolding-Interfaces aus den Versuchen. Es ist Notwendig bei der Ermittlung von Allowables, beziehungsweise für die Übertragung von in Versuchen ermittelten Festigkeiten auf andere Overmoldingstrukturen diese Einflüsse zu berücksichtigen.

Ohne die Projektförderung durch das BMKW, die Betreuung durch den Projektträger und die hervorragende Projektkoordination von CTC GmbH, wären die im Projekt geleisteten Arbeiten und Ergebnisse aufgrund des erheblichen wirtschaftlichen Risikos für die Verbundpartner nicht geleistet worden.

Nutzen der geleisteten Projektarbeiten

Der Hauptschwerpunkt zum jetzigen Zeitpunkt der SimpaTec ist der Automobilsektor. Ziel war mit Hilfe der HiAd-Referenz sich breiter aufzustellen, um auf diesem Wege eine stärkere Unabhängigkeit von einzelnen Industriezweigen zu erhalten. Ein weiterer und wichtiger Schritt konnte durch die Veröffentlichungen innerhalb unseren sozialen Medienpräsenz und unseren öffentlichen Newsletterblogs während dem Projekt durchgeführt werden. Die SimpaTec konnte bereits erste Dienstleistungen in dem Bereich der Luftfahrt durch die Referenz gewinnen.

Ferner ist ebenfalls das simulative Abbilden von neuen Prozessen ab Konzeptphase gewesen, da dies sonst in der Regel anschließend passiert und somit wertvolle Zeit verloren geht. Durch den Aufbau von Simulationsmethoden zur und dem anschließenden Umspritzen von Faserverbundstrukturen konnte Angebotspalette von Simulationsdienstleistungen wie geplant erweitert werden. Durch die Integration der Simulation vom Projektstart an konnte die SimpaTec Engineering-Kompetenz nicht nur erweitert werden, sondern das Angebot der Software erweitert werden. Der bereits im Antrag erwähnten dritten Standbein der SimpaTec ist die Aus- und Weiterbildung von Mitarbeiter. Die im Projekt gewonnen Erkenntnisse, konnte erfolgreich umgesetzt werden. Wir konnten mit den erzeugten Projektreferenz den Umsatz mit teilweise bestehenden und neuen Kunden vergrößern und eine langfristige Kundenbindung aufstellen. Nichts destotrotz muss weiter daran gearbeitet werden Kunden in dem Bereich der Luft- und

Raumfahrt zu gewinnen. Dazu spielen das neugebildete Netzwerk innerhalb des Konsortiums und die vorhandene Referenz eine wichtige Rolle.

Des Weiteren wurde die SimpaTec als TOP-Innovator 2023 von 100 KMU Firmen (TOP100) ausgezeichnet. Dazu haben die laufenden Forschungsprojekten wie z.B. HiAD dazu beigetragen.

Das Nutzen der Resultate im Rahmen von Seminaren innerhalb der SimpaTec aber auch im Rahmen von Vorträgen auf externen Veranstaltungen bleibt generell ein elementares Anliegen. Auf der einen Seite wird geplant die gewonnenen Erkenntnisse zu publizieren und in weitere Vorhaben diese ggf. durch externen Austausch abzuleiten. Die geplante Art der Veröffentlichungen erstreckt sich von klassischen Artikeln oder Präsentation im Rahmen von Seminaren bzw. auf den SimpaTec Events, sei es klassisch oder online (z.B. zwei wöchentliche Webinare, monatlichen SpotOn, ...). Es wird geplant dies sowohl national wie auch international durchzuführen.

Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Projekts sind dem Konsortium keine Fortschritte von elementarer Bedeutung auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

Veröffentlichungen

Informationen des Projektes wurde jährlich in unseren Newsletter an unseren bestehenden Kunden verteilt. Diese können ebenfalls öffentlich auf unseren News-Seite der Homepage entnommen werden. Des Weiteren wurde HiAD mit Vorträgen und Postern auf unseren Events (ISIT 2021, jährlichen Usermeeting, Messeständen) an interessierte und potenziellen Kunden verteilt. Außerdem gab es eine Veröffentlichung zu den durchgeführten Arbeiten auf dem 10. Fachkongress Composite Simulation in Februar 2024.