

Gemeinsamer Abschlussbericht

ARRK | P+Z Engineering
Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft
Eckerle GmbH
Technische Universität München

für das BMBF-Förderprojekt

MAI multiskelett

**Multiaxial beanspruchtes Integralbauteil im Kunststoffspritzguss
mit lastpfadgerechten pultrudierten endlosfaserverstärkten
Carbonfaserbündeln in Skelettbauweise.**

Projektlaufzeit: 01.09.2015 bis 30.06.2017



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Autoren:

Roland Blank
Thomas Hogger
Dr. Joachim Starke
Tobias Wehrkamp-Richter
Paul Winkler

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

<p>Konsortialpartner: Bayerische Motoren Werke AG ARRK Product Development Group Ltd. P+Z Engineering Eckerle GmbH Technische Universität München</p>	<p>Förderkennzeichen: 03MAI37A 03MAI37B 03MAI37C 03MAI37D</p>
<p>Vorhabenbezeichnung: Multiaxial beanspruchtes Integralbauteil im Kunststoffspritzguss mit lastpfadgerechten pultrudierten endlosfaserverstärkten Carbonfaserbündeln in Skelettbauweise.</p>	
<p>Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 bis 30.06.2017</p>	

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
I. Kurze Darstellung	4
1. Aufgabenstellung.....	4
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	5
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	9
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	16
II. Eingehende Darstellung.....	17
1. Durchführung und Ergebnisse im Einzelnen	17
Arbeitspaket 0: Projektkoordination (BMW)	17
Arbeitspaket 1: Produktgestaltung.....	18
Arbeitspaket 2: Untersuchung Wirkprinzipien	24
Arbeitspaket 3: Gestaltung Krafteinleitungsstellen.....	33
Arbeitspaket 4: Parameterstudie Biegeträger Crashverhalten	37
Arbeitspaket 5: Produktberechnung / Berechnungs- und Optimierungsmethoden	43
Arbeitspaket 6: Prozessberechnung.....	48
Arbeitspaket 7: Entwicklung Herstellverfahren Spritzgießknoten	55
Arbeitspaket 8: Entwicklung Fügeverbindung Kreuzungsstelle Faserbündel	60
Arbeitspaket 9: Versuchsteileherstellung Stabumformung.....	62
Arbeitspaket 10: Versuchsteileherstellung Spritzgießen	65
Arbeitspaket 11/12: Prüfung Komponenten und Abgleich Berechnung – Versuch.....	68
Arbeitspaket 12: Abgleich Berechnung – Versuch.....	74
Arbeitspaket 13: Wirtschaftlich-technologische Betrachtung.....	81
2. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	85
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	85
4. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens anderer Stellen	86
5. Veröffentlichungen der Ergebnisse	87
III. Anhang 88	
Knotenverbindungen	88
Abbildungsverzeichnis.....	91
Tabellenverzeichnis.....	93

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Das Projekt MAI multiskelett verfolgte das Ziel, die Skelettbauweise für Integralbauteile aus thermoplastischem carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit multiaxialer Beanspruchung zu entwickeln, die dafür notwendigen Produktionsprozesse zu realisieren und damit letztlich die Funktionsfähigkeit der multiaxialen Skelettbauweise nachzuweisen. Bei der Skelettbauweise werden endlosfaserverstärkte Stränge lastpfadgerecht räumlich in dem Bauteil angeordnet und mit Kunststoff im Spritzgießprozess umspritzt.

Im Vorgängerprojekt MAI skelett wurde diese Bauweise für einen Dachspiegel mit parallel angeordneten carbonfaserverstärkten Pultrusionsprofilen als Einlegeteile in einem Spritzgießbauteil entwickelt und eingesetzt. Dabei wurde die Geometriefreiheit des Spritzgießprozesses in Form von stabilisierenden Rippen als Fachwerk zwischen den Profilen genutzt. Die Ergebnisse des Projektes MAI skelett sind sehr positiv, wobei die Pultrusion der Profile und ihre Umformung zu Einlegeteilen gut funktionieren und sich auch die Spritzgießumfänge wie geplant realisieren lassen.

Auf der Basis der Ergebnisse aus MAI skelett sollte das Projekt MAI multiskelett aufbauen und dabei erkannte Schwächen aufgreifen, Schwachstelle beseitigen und die Bauweise von einem einfachen Träger auf ein Integralbauteil weiterentwickeln. Das im Projekt zu realisierende Demonstratorbauteil sollte mehrere Krafteinleitungspunkte mit kreuzenden Lastpfaden besitzen. Für die Lasteinleitungspunkte waren lokale Verstärkungskonzepte zu entwickeln. Die Herausforderungen von MAI multiskelett bestand insbesondere darin, eine fertigungs- und funktionsgerechte Knotengestaltung zu erforschen. Zudem war die Funktionsauslegung -das heißt die Anordnung der Lastpfade bzw. unidirektionalen Stränge- in einem komplexen Bauteil insbesondere im Hinblick auf das Crashverhalten zu untersuchen.

MAI multiskelett orientierte sich dabei an den realen Bauteilanforderungen der Bayerischen Motorenwerke (BMW). Im Rahmen des Projektes war allerdings aufgrund der Projektlaufzeit und des zur Verfügung stehenden Budgets nur eine prinzipielle Untersuchung und die Darstellung eines Demonstratorbauteils möglich. An diesem Bauteil sollten prozesstechnische Lösungen sowie die Anforderungen bezüglich der Kreuzung von Trägern oder Profilen sowie der Krafteinleitungsbereiche abgeleitet und evaluiert werden.

Mit MAI multiskelett sollte die Skelettbauweise auch für komplexe Bauteile umgesetzt werden. Dazu waren die Zusammenhänge bezüglich der Geometrie und der Wechselwirkung unterschiedlicher Materialien zu erforschen, um einen hinreichend genauen Abgleich zwischen Simulation und Praxis herstellen zu können.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Ziel von MAI multiskelett war vorrangig, die Gesamtziele des Spitzenclusters MAI Carbon zu unterstützen. Diese umfassen unter anderem die

- Reduktion der Zykluszeit für begrenzende Prozessschritte auf unter 90 Sekunden zur Herstellung von Bauteilen aus Hochleistungsverbundwerkstoffen in hoher Stückzahl,
- Prozesskosten Reduzierung um bis zu 90% und
- Reduzierung der CFK-Bauteilkosten auf unter 18 €/kg.

Mit MAI multiskelett sollte der Nachweis erbracht werden, dass diese Anforderungen auch für komplexe Bauteile mit sich kreuzenden Lastpfaden erreicht werden können. Dabei stand im Vordergrund, einen kostengünstigen Herstellprozess für Fertigung von lastpfadgerechten, multiaxial belasteten Integralbauteilen als Leichtbauteil zu entwickeln. Zudem sollte für die Integralbauteile eine virtuelle Produktauslegungsmethodik inklusive einer Optimierung der Produktsimulation erarbeitet werden. Die hergestellten Bauteile sollten aus geeigneten Materialien bestehen, wobei die Kosten gegenüber dem Leichtbaugrad abzuwägen waren.

Um die Projektziele zu erreichen, sollte die im vorangegangenen Projekt MAI skelett erforschte Skelettbauweise (hier am Beispiel eines Dachspriegels mit relativ einfachen Belastungsfällen) für multiaxial beanspruchte Bauteile weiterentwickelt werden. Bei der Skelettbauweise werden endlosfaserverstärkte Stränge lastpfadgerecht räumlich im Bauteil angeordnet und im Spritzgießverfahren mit einem thermoplastischen Polymer umspritzt. Dabei werden umgeformte, parallel angeordnete Pultrusionsprofile als Einlegeteile in ein Spritzgießwerkzeug eingebracht und anschließend mit kurzfaserverstärktem Thermoplast mit Sekundärcarbonfasern umspritzt. Die Geometriefreiheit des Spritzgießprozesses kann bei diesem Herstellprozess in Form von stabilisierenden Rippen zwischen den Profilen genutzt werden. Die bis dahin erzielten Ergebnisse waren sehr positiv. Sowohl die Pultrusion als auch die Umformung der Profile mit niedrigen Kräften ließen sich funktional realisieren. Auch die Spritzgießumfänge mit dem mit recycelten Carbonfasern verstärkten Thermoplast konnten wie geplant hergestellt werden.

Im Gegensatz zum Dachspriegel aus dem Projekt MAI skelett sollte in MAI multiskelett ein komplexes Integralbauteil entstehen, bei dem sich mehrere Lastpfade kreuzen und das mehrere Lasteinleitungspunkte hat. Dadurch sollte die Skelettbauweise auch für multiaxial beanspruchte Bauteile umgesetzt und das entstehende Leichtbaupotenzial zur Reduzierung der Gesamtmasse genutzt werden.

Die Herausforderungen bestanden vor allem in der fertigungs- und funktionsgerechten Knotengestaltung und der Funktionsauslegung, d. h. in der Frage, wie in einem komplexen Bauteil die Lastpfade bzw. unidirektionalen Stränge angeordnet werden müssen, um alle angreifenden Kräfte aufnehmen und bei dynamischer und hochdynamischer Beanspruchung aushalten zu können. Dazu sollten zunächst die grundlegenden Wirkprinzipien untersucht werden, anhand derer die Krafteinleitungsstellen bestimmt und gestaltet werden können. Anhand der Untersuchungsergebnisse sollte ein Demonstratorbauteil entwickelt werden, an dem die Knotengestaltung und die Funktionsfähigkeit der Skelettbauweise für komplexe Bauteile angewendet

und getestet werden kann. Zeitgleich waren auch die Herstellverfahren für die Integralbauteile zu entwickeln und zu qualifizieren. Die größten Herausforderungen wurden dabei in der Fertigung

- der Fügeverbindungen an den Kreuzungsstellen von Faserbündeln, bzw. Verstärkungsprofilen und
- der anschließenden Umspritzung zu einem hybriden Spritzgießknoten erwartet.



Abbildung 1: Konzeptuntersuchung zur Veranschaulichung der Skelettbauweise.

Wie Abbildung 1 zeigt, geht das Konstruktionsprinzip von wenigen unidirektionalen, aber starken Strängen aus, die durch eine Rippenstruktur aus carbonfaserverstärktem Thermoplast verbunden sind. Die Verstärkungen bestehen aus stabilen Profilen, die im Pultrusionsverfahren aus unidirektionalen Carbonfasern und einer Matrix aus thermoplastischem Kunststoff gefertigt werden. Um mit der Skelettbauweise ein Integralbauteil darstellen zu können, müssen die Verstärkungen an den Kreuzungspunkten miteinander verbunden, bzw. gefügt werden. Dabei ist eine Kraftübertragung zwischen den einzelnen Trägern zu gewährleisten, um die Skelettbauweise auch für komplexe und multi-axiale Belastungsfälle nutzbar zu machen.

Für die Verstärkung der Rippenstruktur kommen kurz- oder auch langfaserverstärkte thermoplastische Spritzgieß- bzw. Compoundiermassen, insbesondere aus Carbonfasern zum Einsatz. Im Spritzgießverfahren werden die Verstärkungen umspritzt. Dadurch wird der nächste Entwicklungsschritt – nun auch für multi-axial beanspruchte Bauteile - für einen kostengünstigen Leichtbau an einem konkreten Anwendungsbeispiel realisiert, nämlich über die lastpfad-

gerechte Anwendung endlosfaserverstärkter Carbonfasern und die Ausnutzung der Geometriefreiheit des Spritzgießprozesses in Kombination mit guten Materialeigenschaften (Steifigkeit, Festigkeit).

Entscheidende Faktoren für die prognostizierte gute Wirtschaftlichkeit sind die Reduzierung der Prozesse vom Endlos-Pultrudat bzw. kurz-/langfaserverstärktem Compound bis zum fertigen CFK-Bauteil und die Minimierung des Verschnitts. Ferner ermöglicht die bei der Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen übliche Trennung von Aufschmelzen des Materials vor und Abkühlen nach der Formgebung im Werkzeug eine erhebliche Reduzierung der Zykluszeit. Die Kombination aus stranggezogenen (pultrudierten) Stäben für die Verstärkung und dem Umspritzen dieser Bauteile mit einem faserverstärkten thermoplastischen Kunststoff macht es möglich, Leichtbauteile mit entsprechender Festigkeit und Steifigkeit in kosten- und materialeffizienten Herstellprozessen zu fertigen. Diese stark verbesserte Wirtschaftlichkeit ist ein wichtiger Schritt in Hinblick auf die Gesamtziele des Spitzenclusters MAI Carbon.

Da für die lastpfadgerechte Gestaltung der Bauteile eine neue Konstruktionsmethode zum Einsatz kommt, muss die Simulation für Vorhersagen hinsichtlich des Bauteilverhaltens (Steifigkeit, Crashverhalten, etc.) angepasst werden. Auch der Einsatz von Optimierungsverfahren muss durch eine Weiterentwicklung der bestehenden Methoden für die komplexen Belastungsfälle qualifiziert werden.

Durch den iterativen Abgleich zwischen Simulation und Versuch waren die vorhandenen Simulationsmethoden weiter zu entwickeln und zu verbessern, was zu einer Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit für die Bauteilbeanspruchung führen sollte.

Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von BMW und den Partnern waren die erforderlichen Kompetenzen und Ressourcen sichergestellt. BMW übernahm dabei die Gesamtkoordination des Projektes. Die wissenschaftliche Begleitung erfolgte durch den Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC) der Technischen Universität München.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in Kooperation der BMW AG mit den Firmen Eckerle GmbH und P+Z Engineering GMBH (ARRK Product Development Group Ltd.¹) sowie dem Lehrstuhl für Carbon Composites der Technischen Universität München (LCC) beantragt und über den Projektträger Jülich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) eingereicht.

Entsprechend üblicher Vorgehensweisen wurden in einem Startworkshop die Projektstruktur, der Arbeits- und Terminplan (Abbildung 2) abgestimmt und die Forschungsumfänge auf die Arbeitspakete verteilt.

Arbeitspakete MAI multiskelett		Partner				09.15	10.15	11.15	12.15	01.16	02.16	03.16	04.16	05.16	06.16	07.16	08.16	09.16	10.16	11.16	12.16	01.17	02.17	03.17	04.17	05.17	06.17
Nr.	Beschreibung	BMW	Eckerle	LCC	P+Z																						
AP 0	Projektkoordination	V																									
AP 1	Produktgestaltung	V	M	M	M									M1	A1												
AP 2	Untersuchung Wirkprinzipien	M	M	V	M																						
AP 3	Gestaltung Kräfteinleitungsstellen	M		V	M																	A3					
AP 4	Parameterstudie Biegeträger Crashverhalten	V	M		M																						
AP 5	Produktberechnung / Berechnungs-/ Optimierungsmethoden	M		M	V																						
AP 6	Prozessberechnung	M	V		M																	A2					
AP 7	Entwicklung Herstellverfahren Spritzgießknoten	M	V																								
AP 8	Entwicklung Fügeverbindung Kreuzungsstelle Faserbündel	V	M												M2												
AP 9	Versuchsteileherstellung Stabumformung	V	M																								
AP 10	Versuchsteileherstellung Spritzgießen	M	V																								
AP 11	Prüfung Komponenten	V		M																							
AP 12	Abgleich Berechnung – Versuch	M		M	V																						
AP 13	Wirtschaftlich-technologische Betrachtung	V	M																								M3

Abbildung 2: Terminplan

Der Projektfortschritt wurde im Kompetenznetzwerk CFK innerhalb der BMW Group gemonitort. Zur Fortschrittkontrolle wurden darüber hinaus Meilensteine vereinbart (Tabelle 1) und in den Terminplan eingearbeitet.

¹ 2014 nahm die P+Z Engineering GmbH, die bereits zehn Jahren Teil der ARRK Gruppe war, den Namen der Muttergesellschaft in ihr Logo auf: ARRK | P+Z Engineering

Zeitpunkt	Meilenstein Abbruchkriterium	Beschreibung
Ende Nebenbearbeitung AP 1	Meilenstein 1 (M1)	Produktgestaltung erfolgreich abgeschlossen: In die Produktgestaltung fließen die Ergebnisse aus den Voruntersuchungen der AP 3, AP 7 und AP 8 ein
Ende AP 1	Abbruchkriterium 1 (A1)	Keine Freigaben von Produktdaten für das Demonstratorwerkzeug
Ende AP 6	Abbruchkriterium 2 (A2)	Bauteil kann nicht gefertigt werden; Werkzeug kann nicht vollständig gefüllt werden.
Ende AP 3	Abbruchkriterium 3 (A3)	Alternative Krafteinleitungsprinzipien können nicht gefunden werden.
Ende Nebenbearbeitung AP 8	Meilenstein 2 (M2)	Passende Fügeprinzip / -kriterium gefunden
Ende AP 13	Meilenstein 3 (M3)	Bauteilanforderungen erfüllt, Bauteil hergestellt, Bauteil geprüft, Wirtschaftlichkeit hinsichtlich der MAI-Carbon-Clusterziele erfüllt.

Tabelle 1: Meilensteinplan

Für jedes Teilprojekt wurde ein Teilprojektleiter benannt sowie ein Steckbrief mit zugeordneten Inhalten, Terminplänen und Statusberichten erstellt. In regelmäßigen Abständen fanden Projektsteuerungs- und Abstimmungsrunden statt. Die Ergebnisse und Aufgaben wurden in einer LOP (list of open points) dokumentiert. In diesen Runden wurden die Ergebnisse der Arbeitspakete vorgestellt und diskutiert. So konnten notwendige Entscheidungen zeitnah getroffen werden.

Zur gemeinsamen Dokumentation der Ergebnisse und als Plattform für einen sicheren Daten- und Informationsaustausch wurde das BMW Group Partner Portal (b2b) genutzt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

CFK Profile

Kontinuierlich faserverstärkte Tapes und Profile in Verbindung mit thermoplastischen Matrixmaterialien sind heute bereits Stand der Technik. Die Profile bestehen dabei aus in Profilrichtung ausgerichteten Endlosfasern, die in einem thermoplastischen Kunststoff, z. B. Polyamid (PA) oder Polypropylen (PP) eingebettet sind. Aufgrund der hohen Faseranteile in den Verstärkungsprofilen liegen die gewichtsspezifischen Festigkeiten in Profilrichtung weit über vergleichbaren metallischen Profilen. Daher sind Verstärkungsprofile aus kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten wesentlich leichter als metallische Profile.

Aus dem Projekt MAI skelett waren derartige Profile verfügbar, die jedoch in Faseranteil und gleichmäßiger Imprägnierqualität noch verbesserungsfähig bzw.-bedürftig waren.

Hybridbauteile aus Endlosfaser- und kurz-/langfaserverstärkten Thermoplasten

Sowohl in der Automobilindustrie als auch in anderen Branchen führt die Forderung nach Leichtbau und Wirtschaftlichkeit zur Entwicklung von Hybridbauteilen, bei denen zwei oder mehrere Werkstoffe kombiniert werden. Hybridbauteile haben Eigenschaften, die ein einzelner Werkstoff in der Regel nicht bieten kann.² Im Automobilbau kommt diese Technologie beispielsweise bei der Fertigung von hochbelastbaren, leichten (Semi-)Strukturbauteilen wie Frontends, Pedallagerböcken oder Bremspedalen zum Einsatz. Als Metallkomponente dienen dabei Stahl- oder Aluminiumbleche.

Gegenwärtig kommen vermehrt Organobleche (Faser-Matrix-Halbzeuge) zum Einsatz. Sie bestehen aus einem Fasergewebe oder einem Fasergelege, die in eine thermoplastische Kunststoffmatrix eingebettet sind. Die Vorteile einer thermoplastischen Matrix liegen in der Warmumformfähigkeit der Halbzeuge und den daraus resultierenden kürzeren Prozesszeiten im Vergleich zu konventionellen duroplastischen Faserverbundwerkstoff.



Abbildung 3: Frontend des AUDI A8 mit Untergurt aus Organoblech. (Quelle: Lanxess, 2010)

² Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München Jahrg. 92 (2002) 11

Recycling von CFK

Die Verwertung von CFK-Materialien wird aufgrund des umfassenden Einsatzes in der Luftfahrtindustrie, der Automobilindustrie, der Windenergiebranche und vielen anderen Bereichen, eine immer bedeutendere Frage werden. Hier ist insbesondere die Werthaltigkeit der Carbonfasern von Bedeutung, für deren Herstellung bereits ein sehr hoher Energieaufwand investiert wurde. Mit einem hochwertigen Recycling lässt sich diese Energie zumindest zu hohen Anteilen erhalten, wenn es gelingt, Verfahren zu entwickeln und zu etablieren, die nur eine möglichst geringe Degradierung der Fasern beinhalten. Dies ist Voraussetzung dafür, dass die Eigenschaften der Fasern auch in einem Bauteil der zweiten Generation zum Einsatz kommen können und nutzbar bleiben. Hinzu kommt, dass die Carbonfasern ein relativ hochpreisiger Rohstoff sind. Somit sind nicht nur ökologische Gründe für das Recycling von Faserverbundwerkstoffen vorhanden, sondern es handelt sich auch um einen wirtschaftlich interessanten Ansatzpunkt, die wiedergewonnenen Fasern einzusetzen.³

Die Rückgewinnung von Carbonfasern aus Eol-CFK-Teilen oder Produktionsabfällen ist bereits heute Stand der Technik und wird im industriellen Maßstab betrieben. Das mittels dieser Recyclingtechnologien aufbereitete Material kann wiederum als Spritzgussgranulat für Skelettbauteile verwendet werden. Da die Herstellung von Carbonfasern sehr teuer und aufwändig ist, sind vor allem sie für eine stoffliche Wiederverwertung interessant. Die dadurch entstehenden Fraktionen erreichen jedoch nicht die Qualität von neuen Fasern. Teilweise müssen nach der Trennung noch Verfahren zur Oberflächenbehandlung nachgeschaltet werden, um wieder einsetzbare Fasern zu erhalten. Ein Einsatzgebiet solcher Recyclingfasern ist als Verstärkung von thermoplastischen Kunststoffen, die im Spritzgießverfahren verarbeitet werden. Im Projekt MAI skelett wurde mit einem derart modifizierten Material bereits ein Bauteil aus dem Automobilbau realisiert und erforscht.

Auf kurzfaserverstärkte Materialien mit Sekundär-Carbonfasern wird im Rahmen des Projektes MAI multiskelett als Stand der Technik zurückgegriffen.

Simulation

Ein Nachteil von CFK sind die derzeit zum Einsatz kommenden Konstruktionsprinzipien. Bei den ersten Metallsubstitutionen durch CFK wurde die Metall-Schalenbauweise bei der Konstruktion der CFK-Bauteile beibehalten. Diese Bauweise, sogenanntes Black-Metal-Design, wurde auch beim Serienfahrzeug BMW i3 angewendet. Nachteilig an diesen Konstruktionsprinzipien ist die wenig lastpfadgerechte Gestaltung, wodurch relativ viel teures Material an Stellen eingesetzt wird, an denen dessen Eigenschaften nicht zwingend erforderlich sind. In diesem Zusammenhang sind auch die derzeitigen Simulationsmöglichkeiten für CFK-Bauteile zu nennen, die auf flächige Konstruktionsprinzipien ausgelegt und weniger auf stark dreidimensionale Bauweisen angepasst sind. Zudem berücksichtigen die derzeitigen Konstruktions-

³ Vgl. <http://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/fil/re/faserrueckgewinnung.html>; Seitenaufruf vom 05.10.2013

methoden anisotrope Materialeigenschaften, die die Basis für eine lastpfadgerechte Konstruktion sind, nur bedingt. Insbesondere bei der Auslegung von Hybridstrukturen aus unterschiedlichen Faserverbundstrukturen (z. B. Pultrusionsstäbe in Kombination mit kurzfaserverstärktem Thermoplast) gibt es kaum Erfahrungen.

Ursprünglich wurde die Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Lösung von Festkörper-Problemen entwickelt. Im weiteren Verlauf der Forschung wurde die FEM immer weiter verallgemeinert und kann nunmehr unter anderem bei technischen Fragestellungen, beispielsweise im Fahrzeugbau, verwendet werden. Dabei werden unter anderem mechanische Festigkeitsberechnungen einzelner Komponenten oder beispielsweise komplette Fahrwerks- und Karosseriestrukturen berechnet, um aufwändige Versuche zu reduzieren.

Bei der FEM werden zunächst aufbauend auf CAD-(Bauteil-)Geometrien Netze (bestehend aus Finiten Elementen) erzeugt. Zusammen mit weiteren Angaben (Lasten, Randbedingungen, etc.) führt ein FEM-Gleichungslöser die Berechnungen aus. Im anschließenden Post-Processing werden die Ergebnisse zumeist grafisch ausgewertet (Abbildung 4).



Abbildung 4: Grafische Darstellung einer Bauteiloptimierung an einem CFK-Bauteil. (Quelle: P+Z Engineering)

Für Crash- und Impactbelastungen an Bauteilen aus Faser-Verbund-Kunststoff (FVK) bieten heute viele FEM-Programme verschiedene Materialmodelle an. Insgesamt werden die FVK-Werkstoffe aus Sicht der Simulation heute noch nicht vollständig verstanden, so dass an neuen und besseren Materialmodellen geforscht wird. Oft vernachlässigt, aber von mindestens

ebensolcher Bedeutung, ist die Bewertung der Finite-Elemente (FE)-Analysen und die Rückführung der Ergebnisse in die Bauteilauslegung zur vollständigen Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials.

Innerhalb des Projekts MAI skelett wurde auch eine an das Herstell- und Produktionsverfahren angepasste Simulationsmethode für die Auslegung der einfachen Bauteile entwickelt, die sich nach den bisherigen Ergebnissen sehr gut mit den Ergebnissen aus den Versuchen an realen Bauteilen deckt.

Herstellung von CFK-Bauteilen in Skelettbauweise

Die Skelettbauweise ist ein Konstruktionsprinzip, bei dem ein lastpfadgerechtes Bauteil entsteht, indem unidirektional faserverstärkte Stäbe durch eine Rippenstruktur aus faserverstärktem Thermoplast verbunden sind. Diese Bauweise wurde im Projekt MAI skelett am Beispiel eines Dachspriegels erforscht. Dabei bestehen die Verstärkungen längs des Spriegels aus Profilen, die im Pultrusionsverfahren aus unidirektionalen Carbonfasertapes und einer Matrix aus thermoplastischem Kunststoff gefertigt werden. Für die Verstärkung der Rippenstruktur kommen Carbonfasern in der Sekundäranwendung (also recycelt) zum Einsatz. Als geöffnete Fasern werden diese mit einem thermoplastischen Kunststoff vermischt und zu einem Spritzgießgranulat compoundingiert. Dieses wird dann im Spritzgießverfahren um die umgeformten Verstärkungen gespritzt und ergibt nach der Entformung das fertige Bauteil. Durch die lastpfadgerechte Anwendung endlosfaserverstärkter Carbonfasern und der Ausnutzung der Geometriefreiheit des Spritzgießprozesses in Kombination mit guten Materialeigenschaften wurde der kostengünstige Leichtbau durch die Skelettbauweise an einem konkreten Anwendungsbeispiel realisiert und erprobt.

Zudem wurden Fertigungsverfahren entwickelt, welche die Basis für eine Weiterentwicklung für die Großserienproduktion bilden. Auch die Kosten der Skelettbauweise sind durch den gezielten Einsatz von Neumaterial-Carbonfasern und Recyclingfasern in den weniger beanspruchten Bereichen auf ein Niveau gesunken, das in vielen Einsatzgebieten wirtschaftlichen Leichtbau ermöglicht. Die bis dato durchgeführten Prozessproben lassen darauf schließen, dass die Anforderungen für eine Großserienproduktion erfüllt werden können.

Die im Rahmen von MAI skelett durchgeführte virtuelle Auslegung der Bauweise mittels Simulationssoftware und Berechnungs- und Optimierungsmethoden übertraf die Erwartungen.

Um eine kostengünstigere Verarbeitung von CFK zu ermöglichen, wurden im Rahmen des Projekts MAI plast Forschungen in diesem Bereich initiiert. Das Ziel von MAI plast war die Entwicklung einer durchgängigen Prozesskette zur Herstellung von FVK mit thermoplastischer Matrix. Dazu sollten geeignete Werkstoffe bzw. Werkstoffkombinationen identifiziert sowie geeignete Herstellungsprozesse entwickelt werden, die für die Herstellung struktureller FVK in der Großserie geeignet sind. Eine signifikante Kostenreduktion sollte durch automatisierbare, integrierte, energie- und materialeffiziente Prozesse erreicht werden.

Bei MAI multiskelett sollten Zykluszeiten von unter einer Minute für die Herstellung von faserverstärkten Leichtbauteilen im Hauptprozess Spritzgießen durch die Wahl geeigneter Wandstärken erreicht werden.

Die Reduzierung auf drei Produktionsschritte (Pultrusion, Umformung und Spritzguss) und die Vermeidung von Fügeschritten durch die Integration mehrerer Bauteile sowie die Kombination von thermoplastischen Matrixwerkstoffen mit etablierten, schnellen Umformverfahren ermöglichen stark reduzierte Zykluszeiten und eine deutliche Verringerung der Materialkosten. Mit dem gewählten Konzeptansatz und der optimierten Bauteilauslegung in Skelettbauweise sollte der nächste Entwicklungsschritt für einen kostengünstigen Leichtbau mit CFK an einem konkreten Anwendungsbeispiel realisiert werden. Im Rahmen von MAI multiskelett war zu erforschen, wie Bauteile von einer vierteiligen Schalenbauweise in komplexe, dreidimensionale Strukturen überführt werden können und wie diese sich mit großserientauglichen Verfahren darstellen lassen.

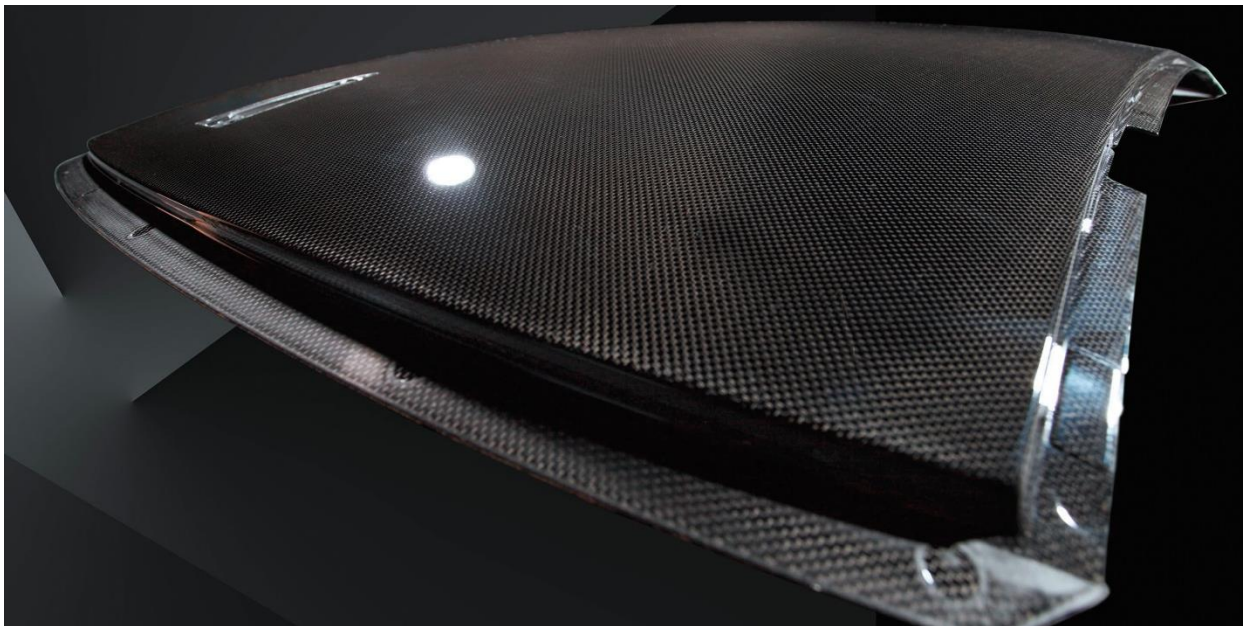


Abbildung 5: Dachpartie des BMW M3 in flächiger Schalenbauweise.

Aus den im Abschnitt Simulation benannten Gründen wurde im vorangegangenen Projekt MAI skelett die Skelettbauweise für CFK-Bauteil erforscht. Dabei wird ein pultrudiertes Profil aus endlosfaserverstärkten CFK zugeschnitten, im erwärmten Zustand umgeformt und mit CF-verstärkten thermoplastischen Kunststoff im Spritzgießprozess umspritzt. Die Stabilität des Bauteils wird zum einen durch das eingelegte Profil gewährleistet und zum anderen durch Verrippungen zwischen den Profilen erreicht, die im Spritzgießprozess entstehen. Dadurch lassen sich flächige Bauteile für einfache Belastungsfälle herstellen, die gleichzeitig leicht, leistungsfähig sowie schnell und kostengünstig herzustellen sind (Abbildung 5).

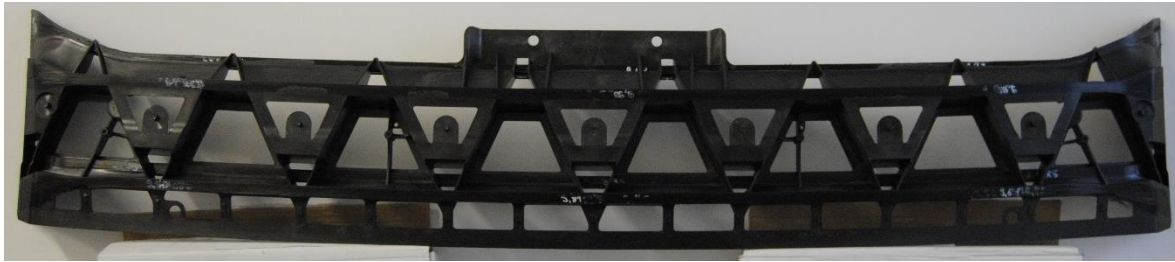


Abbildung 6: Reales Skelettbauteil aus dem Projekt MAI skelett. Die unidirektionalen Einlegeeile sind im Spritzgießverfahren mit thermoplastischer Polymermatrix zu einem belastungsgerechten Dachspiegel umspritzt worden.

Bislang wurden mit der Skelettbauweise jedoch nur einfache Belastungsfälle und Bauteile dargestellt, um Erfahrung mit der neuen Bauweise zu sammeln und Aussagen über den Herstellungsprozess und die erzielbaren Bauteileigenschaften machen zu können. Da der Umformprozess der pultrudierten und endlosfaserverstärkten Einlegeeile, sowie das Umspritzen der vorgeformten Einleger prozesssicher beherrschbar ist, sollten in MAI multiskelett nun auch komplexere, Bauteilstrukturen mit Kreuzungspunkten entwickelt, gefertigt und im Hinblick auf eine Crashbeanspruchung erforscht werden. Dadurch wird die Skelettbauweise auch für mehrachsig belastete Bauteile qualifiziert und kann beispielsweise im Automobil- oder Flugzeugbau universeller eingesetzt werden.

Zu Projektstart lagen auf diesem Themenbereich außer den Ergebnissen von MAI skelett keine Forschungsergebnisse oder Erfahrungen vor. Ein ähnliches Verfahren wurde am Fraunhofer ICT Pfinztal entwickelt. Allerdings kamen hierbei keine -wie in MAI multiskelett geforderten- Konten mit gleichbleibender Stärke zum Einsatz. Es wurden feste Hülsen als Einlegeeile verwendet, die mit Tapes umwickelt wurden. Durch die Einlegeeile und den Platz für die Tapes wird die Bauteildicke bestimmt.

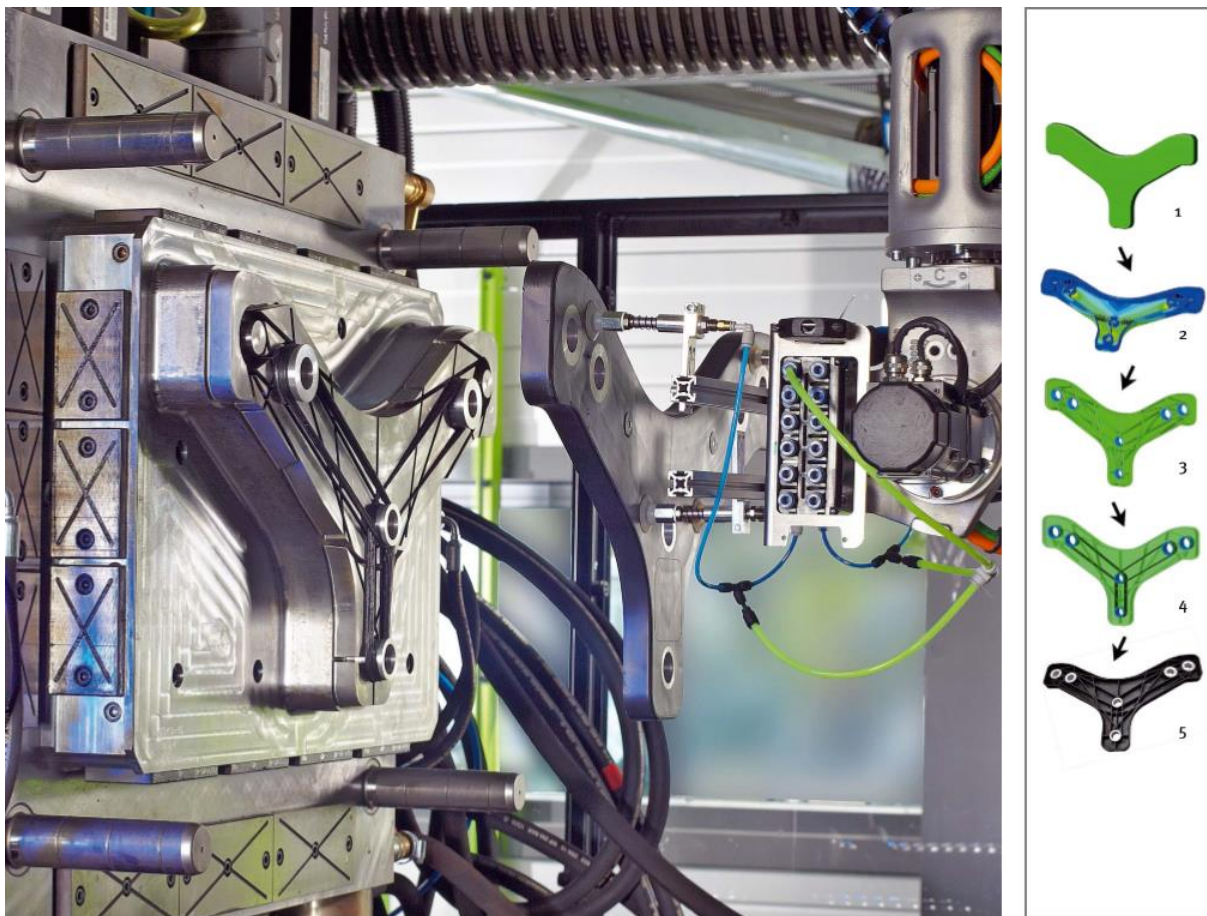


Abbildung 7: Einleger, die mit Tapes umwickelt werden. Quelle: Industrieanzeiger Nr. 24/2012

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Bei BMW waren kontinuierlich die relevanten Fachabteilungen involviert. Explizit zu erwähnen sind hierbei:

- a) Beteiligung von BMW Landshut als Technologiepartner für CFK, im speziellen bei der Stabumformung
- b) Beteiligung der Auslegungs- und Versuchsabteilungen bei der Erarbeitung des Versuchsprogramms.
- c) Unterstützung der Auslegungsabteilung an der Entwicklung der Berechnungsmethodik bei ARRK | P+Z Engineering
- d) regelmäßige Information an Produktentwickler auf Hausmessen, persönlichen Gesprächen und Präsentation der Ergebnisse in zahlreichen Abteilungen.

Die Ergebnisse sind u.a. dem Projekt MAI Hiras+handle zur Verfügung gestellt worden. Es gibt einen Austausch zwischen den Projekten.

II. Eingehende Darstellung

1. Durchführung und Ergebnisse im Einzelnen

Zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurde ein Arbeitsplan mit spezifischen Arbeitspaketen erstellt (Tabelle 2).

AP	Beschreibung
AP 0	Projektkoordination
AP 1	Produktgestaltung
AP 2	Untersuchung Wirkprinzipien
AP 3	Gestaltung Krafteinleitungsstellen
AP 4	Parameterstudie Biegeträger Crashverhalten
AP 5	Produktberechnung / Berechnungs- und Optimierungsmethoden
AP 6	Prozessberechnung
AP 7	Entwicklung Herstellverfahren Spritzgießknoten
AP 8	Entwicklung Fügeverbindung Kreuzungsstelle Faserbündel
AP 9	Versuchsteileherstellung Stabumformung
AP 10	Versuchsteileherstellung Spritzgießen
AP 11	Prüfung Komponenten
AP 12	Abgleich Berechnung – Versuch
AP 13	Wirtschaftlich-technologische Betrachtung

Tabelle 2: Übersicht Arbeitsplan.

Arbeitspaket 0: Projektkoordination (BMW)

Um die komplexen Ziele sicher erreichen zu können, waren die einzelnen Arbeitspakete inhaltlich und terminlich eng aufeinander abzustimmen. Die Aufgabe des Projektkoordinators war hierbei, die Arbeitsaktivitäten zu koordinieren, zu synchronisieren und die Bündelung des anfallenden Knowhows inklusive Dokumentation sicherzustellen.

Die Gesamtverantwortung und -leitung des Vorhabens hatte die BMW AG. Ihr fielen daher sowohl für die fachliche Projektleitung als auch die Definition des Gesamtkonzeptes zu. Die abschließende Validierung der Ergebnisse erfolgte ebenfalls bei der BMW AG. In Zwischenberichten wurde der Projektfortschritt dokumentiert.

Arbeitspaket 1: Produktgestaltung

Im AP 1 wurden die Grundlagen für komplexe Bauteilstrukturen erforscht. Über Stabverbindungen, Knotenbereiche und schließlich Trägerverbindungen wurde dabei die Komplexität der Bauweise schrittweise gesteigert. Abbildung 8 zeigt diese Komplexitätssteigerung an im Projekt entwickelter Methodik und realisierter Hardware. Im Folgenden werden die Produkte und deren relevante Aspekte dargestellt und in den weiteren Kapiteln werden Detailspekte zu Auslegung, Herstellung, Prüfung und Abgleich mit der Auslegung zu diesen Produkten beschrieben.

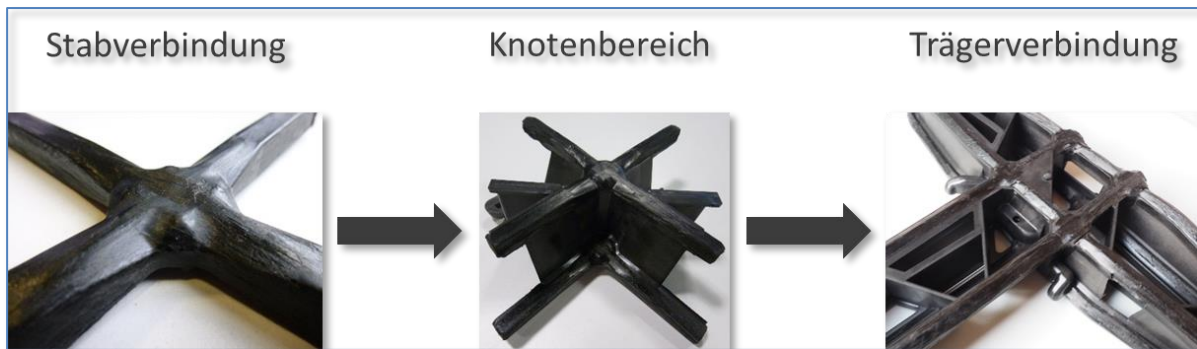


Abbildung 8: Schrittweise Steigerung der Bauteilkomplexität

Knoten

Analog zum Vorgängerprojekt MAI skelett wurde zu Beginn des Projektes mit allen Projektpartnern ein Workshop durchgeführt. Um strukturelle Spritzguss-Bauteile zu realisieren, welche auf komplexere Belastungen ausgelegt werden müssen, benötigt man in der Skelett-Bauweise Stäbe, die sich kreuzen, um die Kräfte auf andere Stäbe und Bereiche zu übertragen. Ein Schwerpunkt von MAI multiskelett war es daher, die Verbindungsstellen (Knoten) zwischen den Stäben prozesssicher zu realisieren. Hauptzweck des Workshops war die Erprobung einer Vielzahl von möglichen Knotengeometrien auf einfachem, händischem Weg. Der Workshop fand bei BMW in Landshut unter Teilnahme aller Projektpartner statt. Anschließend wurden die hergestellten Knoten hinsichtlich Krafteinleitungs-Wirkprinzip und Herstellungsaufwand bewertet.



Abbildung 9: Workshop Knotenverbindungen bei BMW Landshut

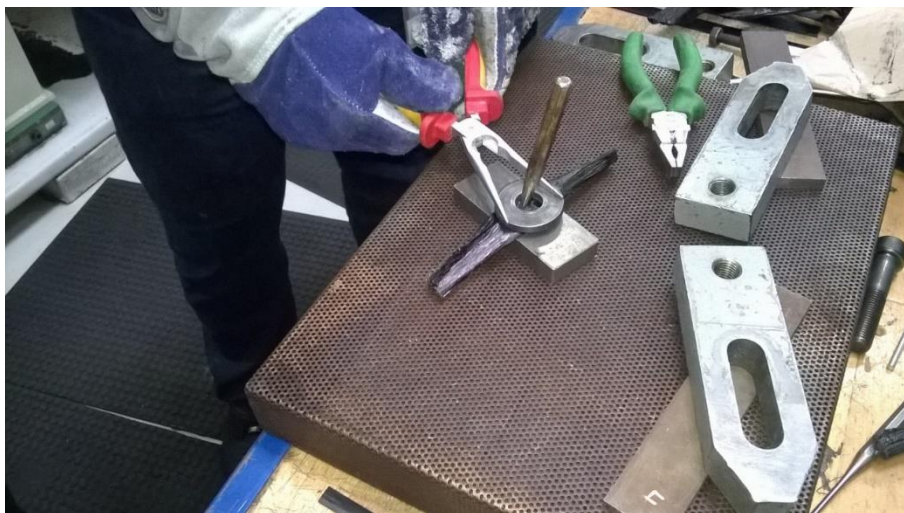


Abbildung 10: Formen einer Öffnung in ein aufgeheiztes Pultrusionsprofil.

Bei den Versuchen kamen ca. 200mm lange 10x10mm²-Pultrusionsprofile (C-Faser-Verstärkung) und C-Faser-UD-Tapes zum Einsatz. Für das Erhitzen der Stäbe auf Umform-Temperatur stand ein Wärmeschrank zur Verfügung. Im Folgenden werden exemplarisch Bilder und Erklärungen zu einigen ausgewählten Knotenelementen dargestellt. Weitere untersuchte Varianten sind im Anhang zu finden.

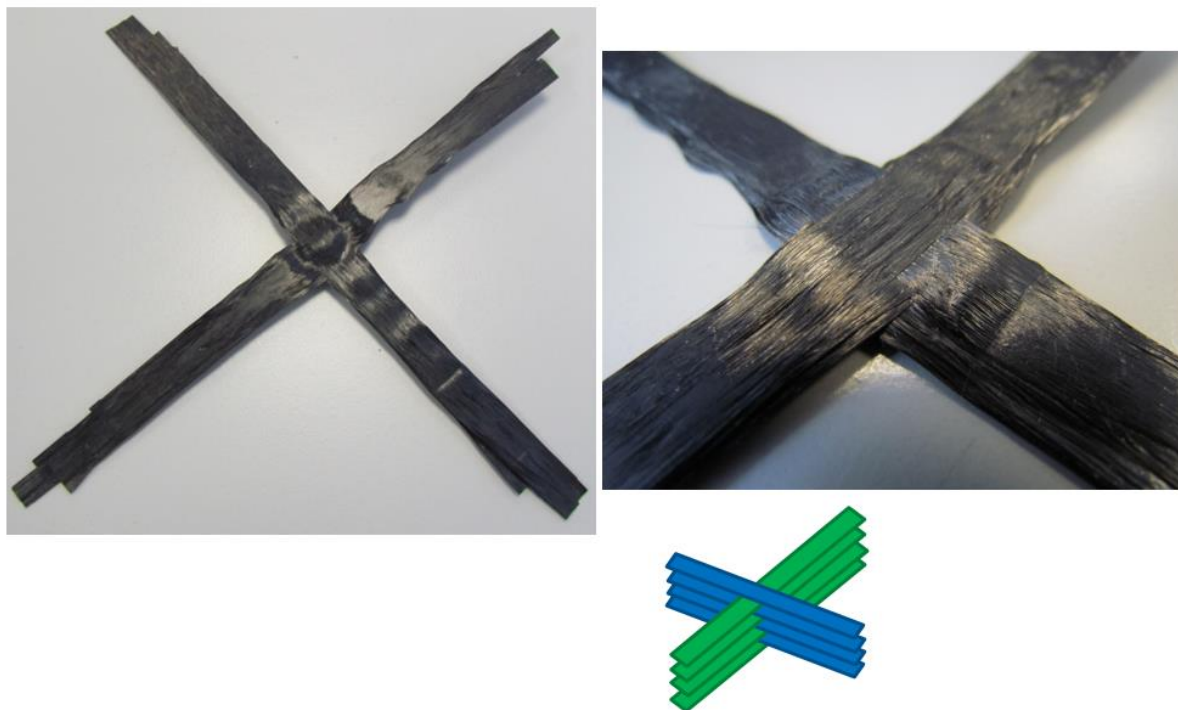


Abbildung 11: Mehrere Lagen Tapes im 90° Winkel überkreuz gelegt.



Abbildung 12: übereinandergelegte, abgeflachte Profile.

Die Herausforderung war, dass beide Stäbe querschnittsgleich über dem kompletten Knoten vorhanden sind. Diese Querschnittsgleichheit ist von erheblicher Bedeutung, da unterschiedliche Querschnitte dazu führen, dass die Stäbe nicht miteinander verpresst werden können und somit keine Verbindung hergestellt werden kann.

Um dieses Problem zu lösen, wurde ein CAD-Modell entwickelt und alle erprobten Stapelvarianten auskonstruiert.

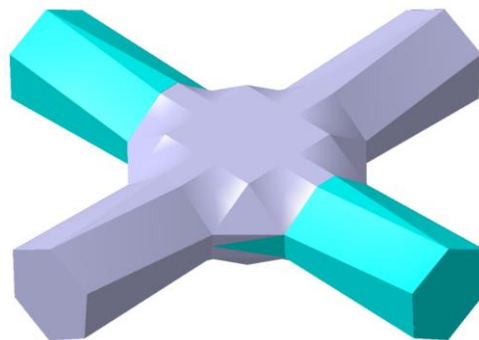


Abbildung 13: idealer Knoten mit querschnittsgleicher Stabverbindung

Knotenbereich

In einem weiteren Projekttreffen (mit allen Projektpartnern) zur Geometrie der Hinterschnitte im Spritzguss-Knoten wurden verschiedene Varianten diskutiert. Abbildung 14 illustriert, dass zwischen den beiden großen, übereinanderliegenden Knoten eine Masseanhäufung entstehen wird. Diese ist im Sinne Leichtbau als auch unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten zu vermeiden. Zur Lösung dieses Effektes wurde einvernehmlich beschlossen zu erproben, ob das Problem mit Hilfe der Gas Injektions Technology (GIT) zu lösen ist. Diese Variante wurde daraufhin bei BMW bzw. im Auftrag von BMW auskonstruiert.

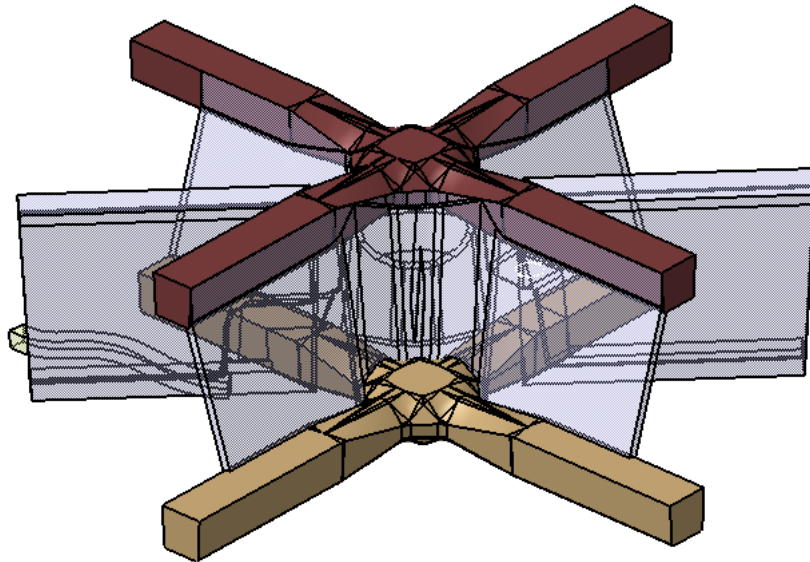


Abbildung 14: Spritzgussknoten der Multiskelettbauweise mit GIT Bereichen.

Trägerverbindung

Untersuchungen zur Absicherung des Knotenbereichs hinsichtlich Herstellbarkeit und Funktion wurden an einem generischen Bauteil durchgeführt und konnten in einer Vielzahl von Iterationsschleifen optimiert werden. Dieses Bauteil stellt sich kreuzende Lastpfade in zwei Ebenen dar und somit ein reales dreidimensionales Fachwerk.

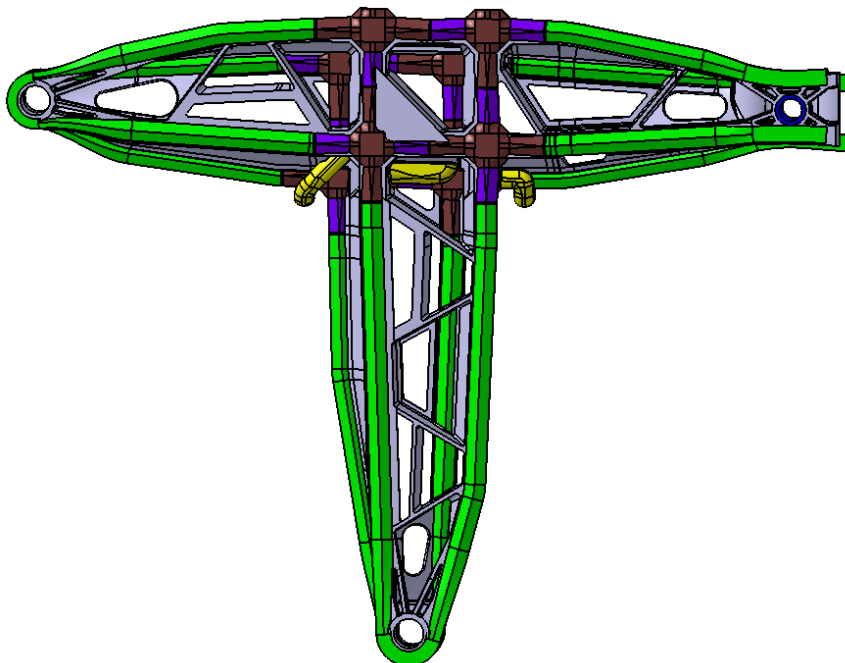


Abbildung 15: Draufsicht T-Bauteil

Das generische Bauteil diente dazu, sowohl die Funktion als auch Herstellbarkeit eines Verbindungsknotens abzusichern. Es bestand daher aus einem Träger und einem Querträger, der an dem Hauptträger über das Knotenelement angebunden war. An den Enden der Träger wurden verschiedene Krafteinleitungspunkte dargestellt.

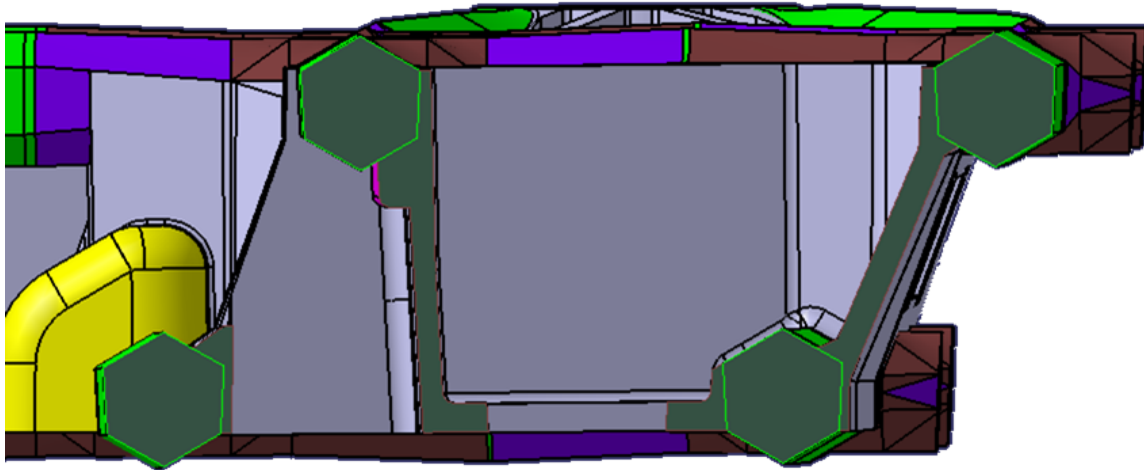


Abbildung 16: Schnitt Ansicht Skelettbauweise weiterentwickelt

Wie in Abbildung 16 dargestellt wurde die Bauweise, die in MAI skelett entwickelt wurde, weiter optimiert. Die umgeformten Stäbe wurden mit sechseckigem Querschnitt realisiert, dadurch konnten Vorteile hinsichtlich Zentrierung im Werkzeug und Reduzierung der spitzen Ecken an den Stäben erzielt werden.

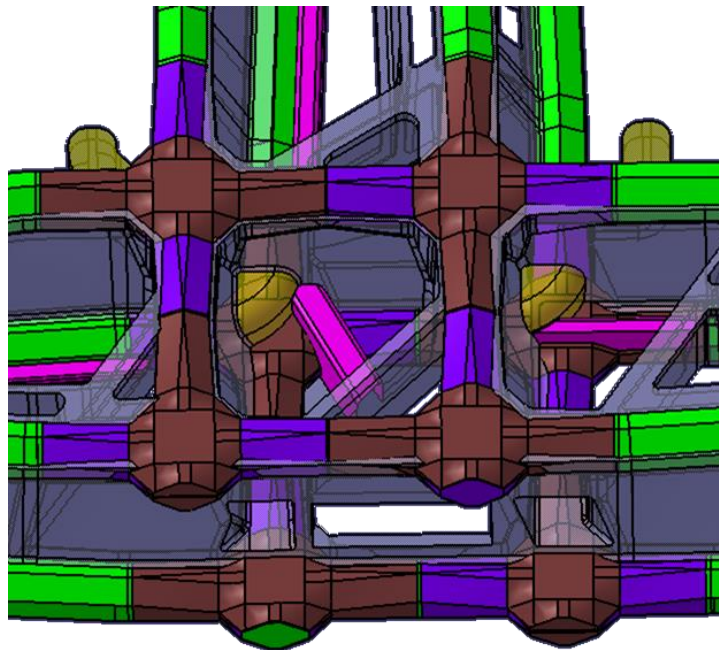


Abbildung 17: Detailansicht Knotenbereich

In dem zentralen Knotenbereich kommt im oberen Bereich der erprobte Lösungsansatz mit dem GIT-Verfahren zum Einsatz. Im unteren Bereich kann die Hinterschnittigkeit mittels eines Schiebers (Abbildung 71) gelöst werden.

Arbeitspaket 2: Untersuchung Wirkprinzipien

Das Arbeitspaket 2 wurde vom LCC der Technischen Universität München bearbeitet. Ziel dieses Arbeitspakets war die detaillierte Untersuchung des Composite-Knotens hinsichtlich Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten unter quasistatischer und dynamischer Belastung. Dazu wurde ein parametrisches FE-Simulationsmodell entwickelt, in dem das nichtlineare Werkstoffverhalten bis zum Totalversagen des Knotens untersucht werden kann. Zusammenfassend erfolgte die Modellentwicklung unter den folgenden Zielsetzungen:

- Vorhersage des nichtlinearen Werkstoffverhaltens bis zum Totalversagen und Bewertung der auftretenden Schädigungsmechanismen
- Identifikation von konstruktiven Schwachstellen
- Ableitung eines repräsentativen experimentellen Versuchsaufbaus
- Numerisch effiziente Umsetzung als Basis für weitere Optimierung der Knotengeometrie
- Abgleich mit vorhandenen Materialdaten und Simulationsmodellen

In einem ersten Schritt wurde ein parametrisches CAD Modell erstellt und in die FE-Software Abaqus importiert. Da es sich bei dem vorliegenden Bauteil nicht um eine dünnwandige, flächige Struktur handelt, sondern insbesondere im Knoten selbst, in dem sich die Stäbe überlappen (Überlappbereich der Stäbe), ein dreidimensionaler Spannungszustand vorherrscht, empfiehlt sich eine Vernetzung mit Solid-Elementen. Da kommerzielle Materialmodelle oftmals nur für zweidimensionale Finite-Elementtypen implementiert sind, werden im parametrischen Modellaufbau mehrere Modellierungsarten betrachtet. Zum einen ist eine Volumenvernetzung mit Kontinuumsschalenelementen möglich – und somit auch eine Anwendung von in der verwendeten FE-Software verfügbaren Versagensmodellen – zum anderen können die vorhandenen Netze aufgrund ihrer kinematischen Kompatibilität einfach in Volumenelemente umgewandelt werden. In diesem Fall wird das Composite-Versagen über ein am LCC entwickeltes Materialmodell betrachtet und mit der kommerziellen Lösung verglichen. Der Überlappbereich der Knotengeometrie ist in Abbildung 18 dargestellt. Um eine prozessbedingte Variabilität des Faservolumengehalts der Stäbe in den mechanischen Kennwerten abzubilden, wurden die elastischen Kennwerte mittels Mikromechanik skaliert. Eine Herausforderung stellten die komplexen Faserorientierungen dar, die sich im Überlappungsbereich des Knoten einstellen. Zur

besseren Nachbildung der räumlich verteilten Faserorientierung wurde ein Interpolationsalgorithmus entwickelt und kontinuierlich verbessert, der den graduellen Übergang der Faserorientierungen bei stark veränderlichen Querschnitten widergeben kann.

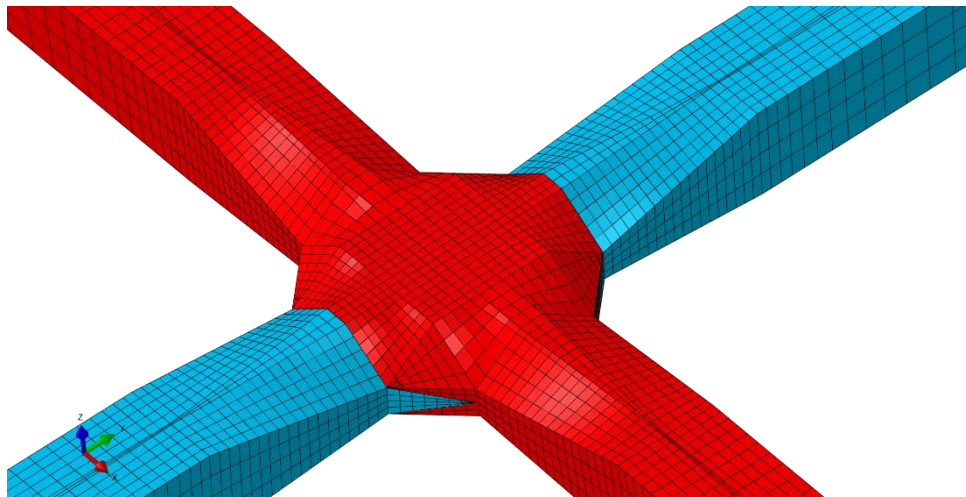


Abbildung 18: Knotengeometrie mit FE Netz

Simulationsmodell des freien Knotens

Die Lasteinleitung erfolgte in diesem Modell an den Knotenenden unter beliebigen Kombinationen. Wird der Knoten als Verbindungstelle mehrerer Stäbe in Strukturbauteilen verwendet, so ist er kombinierten Belastungen ausgesetzt. Für eine Abschätzung des Tragverhaltens empfiehlt es sich, Extremfälle eventueller Lastszenarien abzuleiten, welche später auch experimentell untersucht werden sollen. Aus der Knotengeometrie lassen sich vier Hauptlastfälle ableiten, welche in Abbildung 19 zusammengefasst sind. Zwei Lastfälle ergeben sich aus einer Belastung in Stablängsrichtung, während die Querrichtung sich frei verformen kann. Dadurch erfolgt keinerlei Lastumlenkung durch die Verbindungsstelle. Der komplette Lastfluss erfolgt von einer Knotenseite auf die gegenüberliegende Seite. Aufgrund der geometrisch bedingten Aufteilung einzelner Faserstränge, den daraus resultierenden Ondulationen sowie Querschnittsänderungen im Überlappbereich kommt es dort zu Spannungskonzentrationen, die die effektive Tragfähigkeit im Vergleich zu einem geraden Stab reduziert. Aufgrund der Knotengeometrie lässt sich dieser Lastfall in zwei weitere aufteilen: Erstens wird in Richtung des Stabes belastet, welcher den Innenbereich des Knotens darstellt. Im zweiten Fall erfolgt die Belastung in Richtung des äußeren, vom Querstab aufgeweiteten Stabes. Der zweite übergeordnete Lastfall reproduziert einen Zustand der vollen Lastumlenkung durch den Knoten. Dazu wird erneut die Kraft über den Längsstab eingeleitet, die Lagerung erfolgt jetzt aber am Querstab, ähnlich eines Dreipunktbiegeaufbaus. Die Belastung kann wahlweise als Zug- oder Drucklast aufgebracht werden, wobei letztere bei Faserverbundwerkstoffen den kritischeren Fall darstellt und somit für eine Bauteilabsicherung von größerem Interesse ist. Für den Interpolationsalgorithmus wurden die Orientierungen der mit dem FE-Netz assoziierten Geometrie verwendet.

Diese geometrischen Ecken approximieren den lokalen Faserverlauf und erlauben es, die Orientierungen bei Querschnittsveränderung abzubilden.

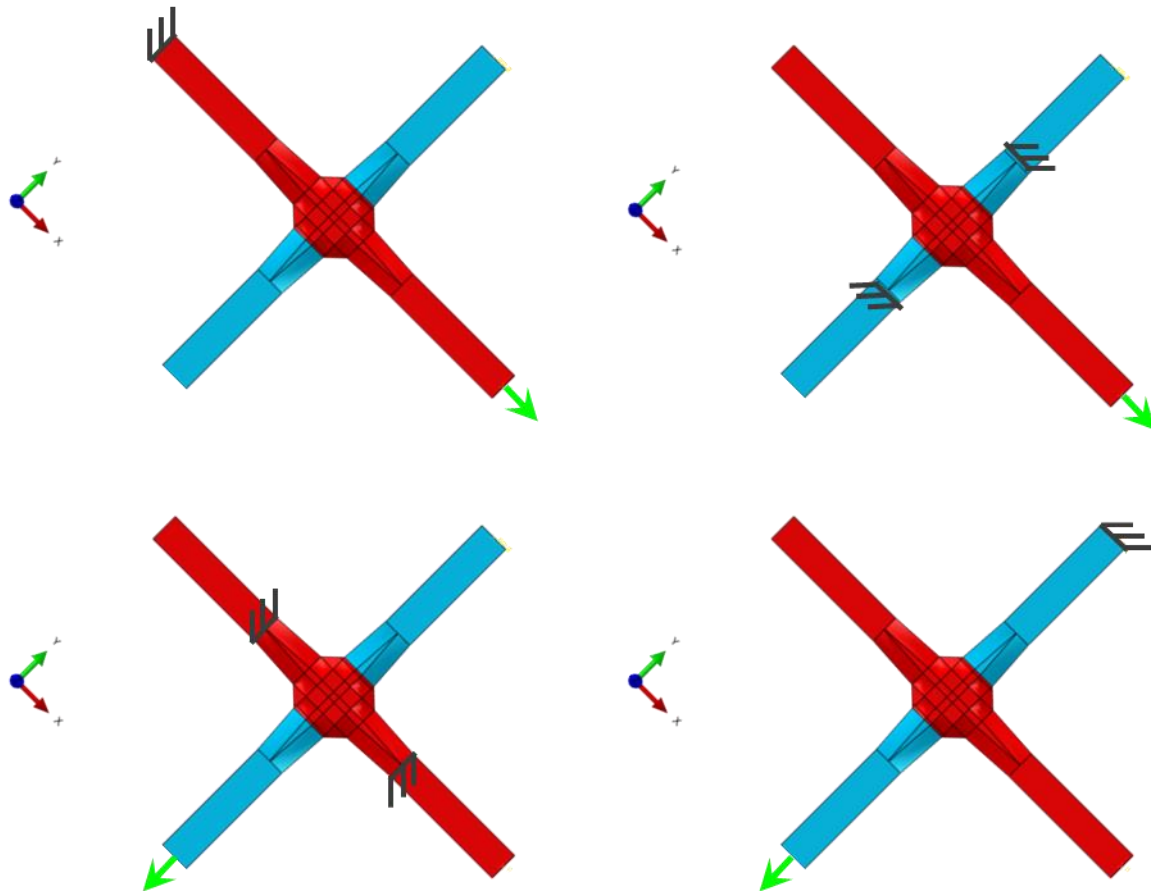


Abbildung 19: Kritische Lastfälle

Zur optimalen Gestaltung der Knotenverbindung wurden hier verschiedene Schichtungskonzepte untersucht. Die untersuchten Varianten sind in Abbildung 20 dargestellt. Der Stabquerschnitt in dieser Untersuchung weist eine hexagonale Form auf. Die einfachste Möglichkeit zur Kreuzung der Stäbe stellt die 1x1-Schichtung dar, bei der beide Stäbe einfach gestapelt umgeformt werden. Bei zunehmend komplexeren Schichtungen erhöht sich die Anzahl an Überlappungen und die resultierende Faserumlenkung wird reduziert. Ziel der Untersuchungen war es, einen sinnvollen Kompromiss zwischen Tragfähigkeit und Fertigungskosten der jeweiligen Knotenverbindung zu ermitteln und etwaige Sättigungen oder Tendenzen abzubilden.

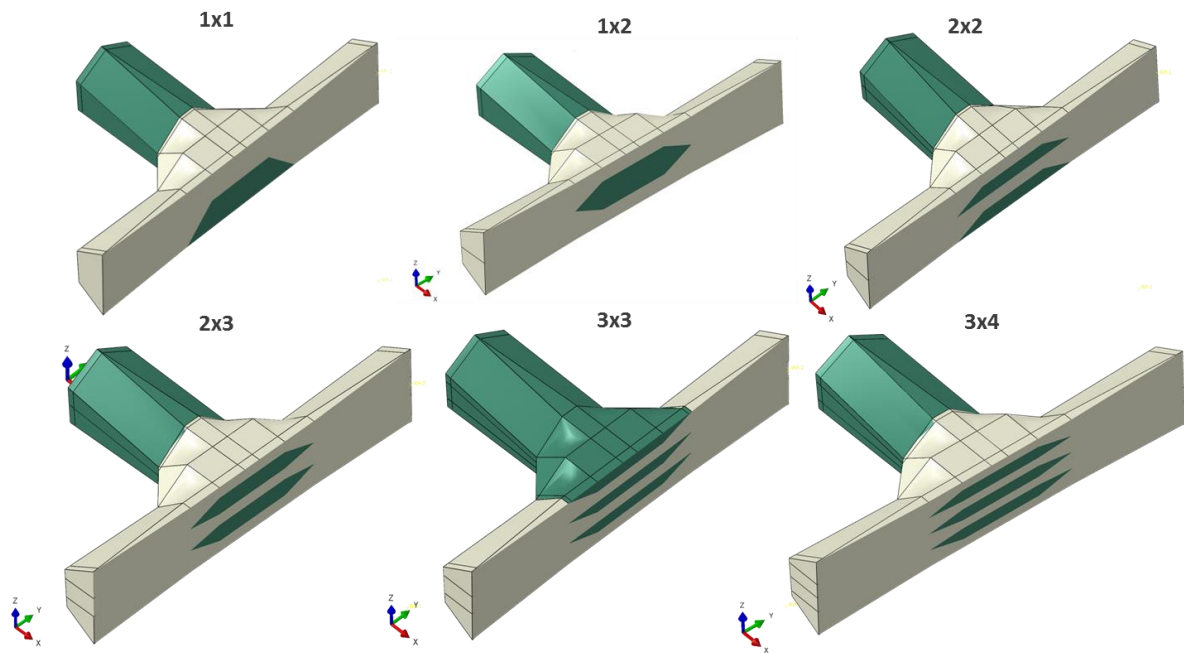


Abbildung 20: Varianten für konstruktive Gestaltung des Knotens (Knoten im Schnitt)

Die Ergebnisse der verschiedenen Knotenvarianten (deren konstruktive Gestaltung bereits in AP 1 erfolgte) für Axialbelastung sind in Abbildung 21 dargestellt. Da eine Krafteinleitung in Zugrichtung nicht möglich war und außerdem das Ausknicken der Stäbe als wesentlich kritischer angesehen wurde als das Reißen unter Zug, erfolgten die weiteren Untersuchungen mit Druckbelastungen.

Aufgrund der Druckbelastung in Faserlängsrichtung wird ein größtenteils lineares Verhalten bis zum Totalversagen für alle Varianten vorhergesagt. Die 1x1-Variante zeigt die geringste Steifigkeit, da aufgrund der nicht-symmetrischen Schichtung im Überlappbereich eine Kopplung aus Dehnungen in Längsrichtungen und Biegung entsteht. Dadurch beginnt der Knoten in Z-Richtung der Last immer mehr auszuweichen, was die starke Reduktion der effektiven Steifigkeit sowie die deutlich erhöhte ertragbare Verschiebung bis zum Bruch erklärt. Den größten Gewinn an Steifigkeit und Festigkeit erfährt die 1x2-Verbindung im Vergleich zur einfachen 1x1-Verbindung. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus wird der Kopplungsterm im Mittel minimiert, was zu einem signifikanten Anstieg der Steifigkeit und Festigkeit führt. Beim Übergang zur 2x2-Schichtung tritt eine deutliche Verbesserung im Vergleich zur 1x1-Schichtung ein, da der Grad der Unsymmetrie deutlich reduziert werden kann. Bei feinerer Schichtung nimmt die Faserumlenkung zusätzlich ab, was einen weiteren Festigkeits- und Steifigkeitsanstieg zur Folge hat. Eine Sättigung ist beim Übergang der 2x3 zur 3x4-Schichtung erkennbar. Hier kann nur noch ein geringer Zuwachs an Festigkeit und ein vernachlässigbarer Steifigkeitsgewinn erzielt werden.

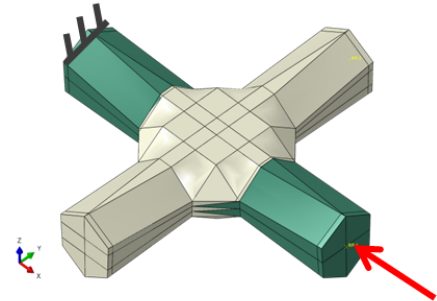
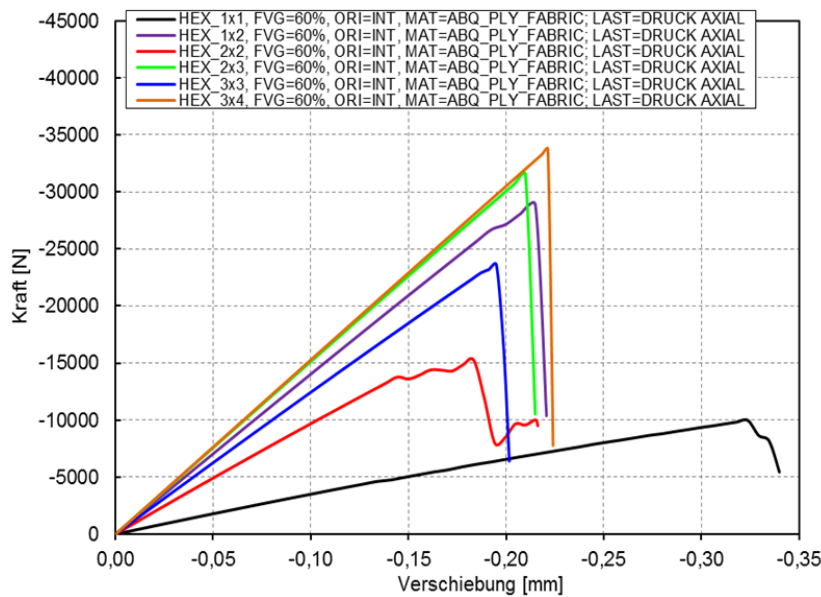


Abbildung 21: Kraft-Weg-Kurven für Druckbelastung in Axialrichtung

Die Kraft-Weg-Kurven für eine Belastung in Querrichtung sind in Abbildung 22 gezeigt. Das Materialverhalten zeigt eine deutlich ausgeprägtere Nichtlinearität im Vergleich zur Axialbelastung, was auf eine Kombination von Plastizität und Schädigung zurückzuführen ist. Erneut zeigt die 1x1-Verbindung die schlechtesten Eigenschaften, eine signifikante Steigerung der Steifigkeit und Festigkeit kann durch die 1x2-Schichtung erreicht werden. Bei zunehmend komplexerer Schichtung zeigt dieser Lastfall aber eine geringere Sensitivität gegenüber den herrschenden Unsymmetrien im Überlappbereich. Das liegt primär daran, dass der vorliegende Lastfall weniger durch das Materialverhalten in Faserlängsrichtung als vielmehr durch die nichtlinearen Quer- und Schubeigenschaften nichtdominiert ist. Komplexere Schichtungen im Vergleich zur 1x2-Variante bieten nur noch einen geringen Zuwachs an Festigkeit und Steifigkeit.

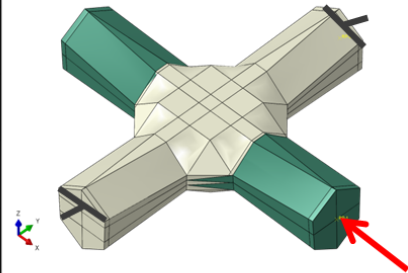
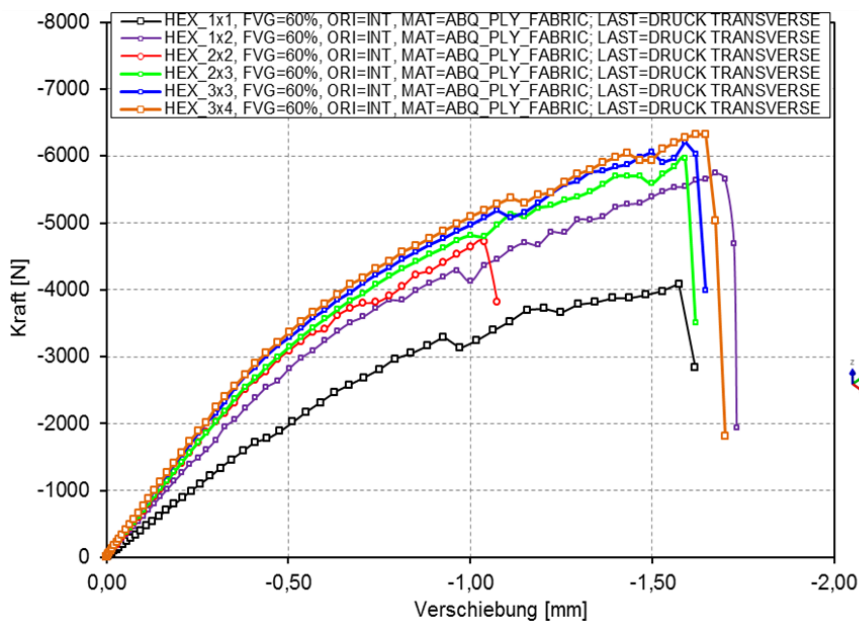


Abbildung 22: Kraft-Weg-Kurven für Druckbelastung in Querrichtung

Simulationsmodell des Versuchsaufbaus

In einem zweiten Schritt werden die allgemeinen Randbedingungen des ersten Simulationsmodells konkretisiert, um einen realen Versuchsaufbau abzubilden. Dazu wird die Lasteinleitung und Einspannung explizit im FE-Modell modelliert. Erneut ergeben sich vier Lastfälle, die durch jeweils zwei Versuchsaufbauten realisiert werden können, wie in Abbildung 23 dargestellt. Durch eine zusätzliche Rotation der Verbindungsstelle um 90° können zwei Lastfälle in axialer Richtung und zwei Lastfälle in Querrichtung verwirklicht werden. Die Lasteinleitung erfolgt im ersten Fall über zwei explizit modellierte Stahlplatten. Die Unterseite wird fixiert und die Oberseite wird kontinuierlich in axialer Richtung verfahren. Der zweite Lastfall soll eine maximale Lastumlenkung erzielen. Dazu wird ein Versuchsaufbau ähnlich eines Dreipunktbiegeversuchs realisiert. Die seitlichen Auflageflächen werden als unendlich steife Körper modelliert und die Interaktion mit dem Knoten erfolgt über Kontaktbedingungen.

Ein großes Arbeitspaket stellt die verbesserte Abbildung der Faserorientierung im Überlappbereich der Stäbe dar. Während anfänglich die Faserorientierung in der Ebene für jede geometrische Zelle separat berechnet wurde, wurde für das vorliegende Simulationsmodell eine weiterentwickelte Version verwendet. Die Interpolation erfolgt dabei über ein globales Feld, wodurch ein deutlich graduelleres Orientierungsverhalten erzielt wird. Die Ergebnisse des Algorithmus sind in Abbildung 24 zusammengefasst.

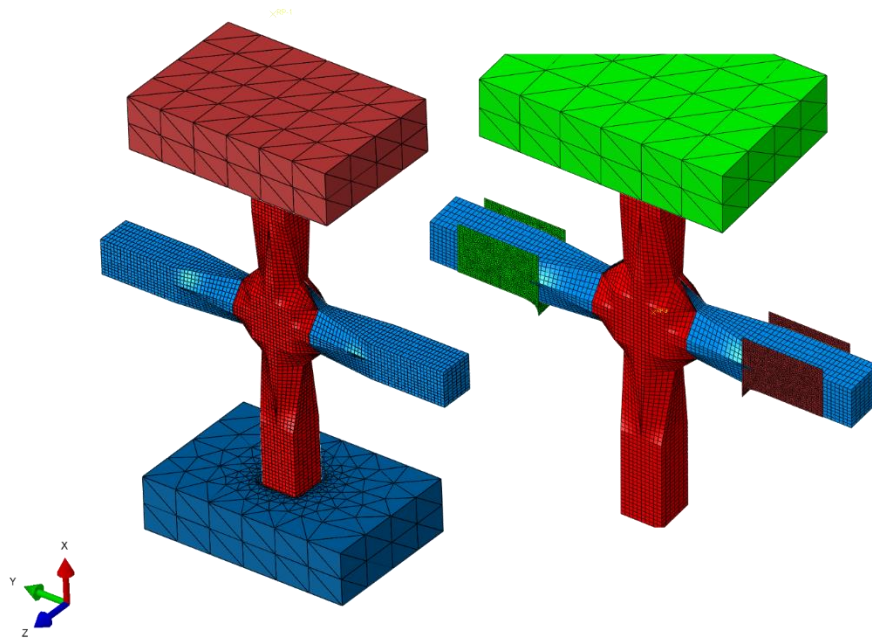


Abbildung 23: Modellierung des Versuchsaufbaus

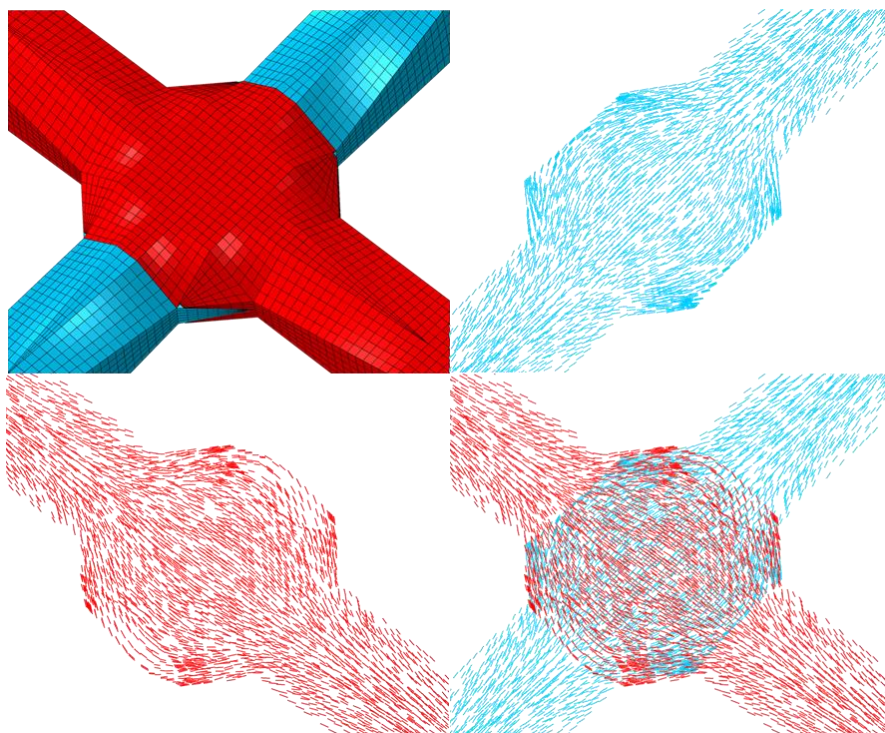


Abbildung 24: Verbesserter Algorithmus zur Abschätzung der lokalen Faserorientierung

Materialmodell

Zur numerischen Erfassung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens werden zwei Materialmodelle untersucht. Einerseits wird eine Vernetzung mit Kontinuumsschalen mit einem zweidimensionalen Werkstoffverhalten (*ABQ_PLY_FABRIC) verwendet. Zur Abschätzung des Einflusses des dreidimensionalen Spannungszustandes wird weiterhin ein am LCC entwickeltes Schädigungsmodell für Solidelemente implementiert. Abbildung 25 zeigt einen Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurve für den Querzug und Schubbereich. Aufgrund der Möglichkeit des 3D Modells, Plastizität in transversaler Richtung abzubilden, können die experimentellen Daten direkt wiedergegeben werden.

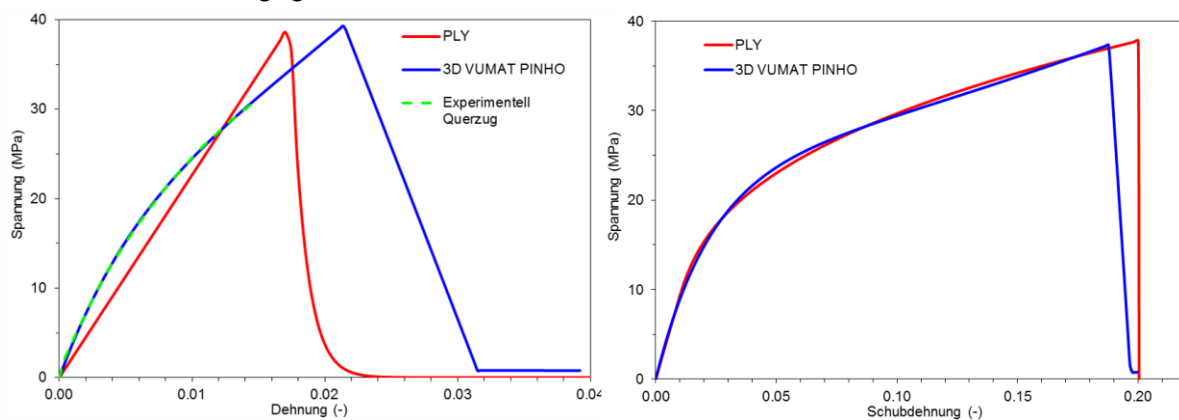


Abbildung 25: Vergleich des Materialverhaltens von 2D und 3D Materialmodells anhand von Einelementtests

Gegenüberstellung Simulation mit Hardware-Ergebnissen

Abbildung 26 zeigt den Vergleich zwischen Versuchs- und Simulationsergebnissen unter axialer Druckbelastung. Weitere Tests wurden im Zusammenhang mit dem AP 11, Prüfung der Komponenten, durchgeführt.

Das Setzverhalten der Probe während der initialen Belastung wurde durch eine lineare Steifigkeitsapproximation eliminiert. Unabhängig vom Materialmodell wird die initiale Steifigkeit durch das Simulationsmodell stark überschätzt. Sowohl das experimentelle wie auch das numerische Verhalten zeigen ein stark lineares faserdominiertes Verhalten bis zum Versagen. Das 3D Materialmodell zeigt eine gute Übereinstimmung bei der Versagenslast, jedoch kann das progressive Plateau nach dem ersten Versagen nicht abgebildet werden. Auch für den zweiten Lastfall bietet das 3D Modell eine bessere Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Hier zeigt sich ein stark nichtlineares Verhalten des Prüfkörpers, welches durch Plastizität sowie progressiver Schädigung des Composites getrieben wird.

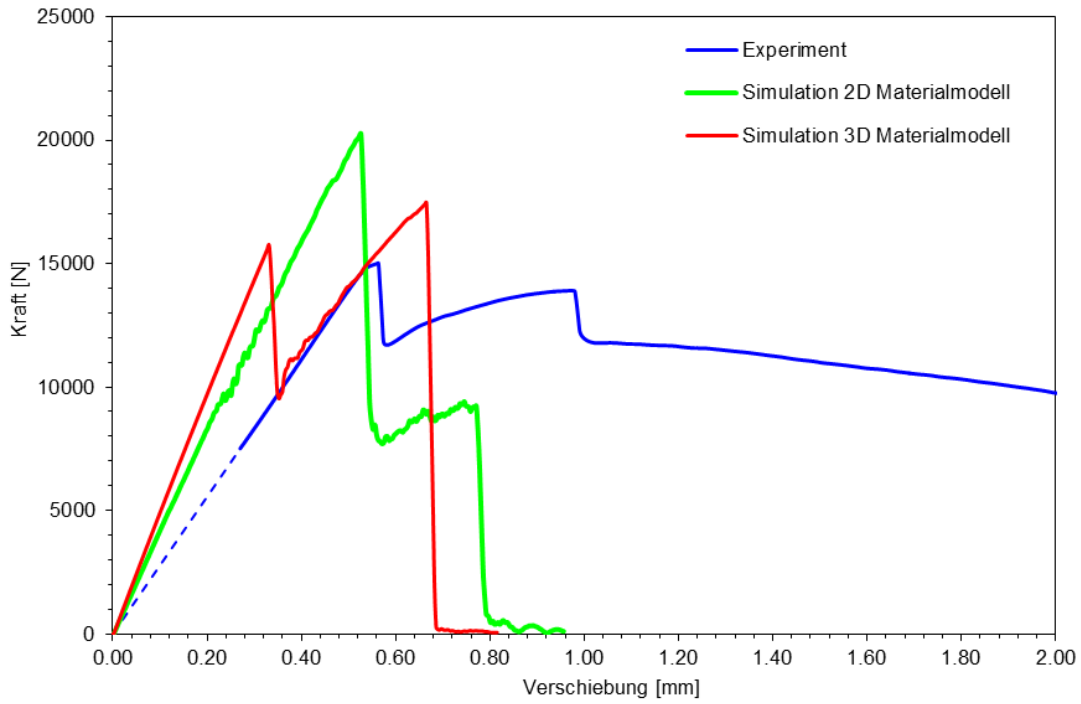


Abbildung 26: Kraft-Weg-Kurven für axiale Druckbelastung

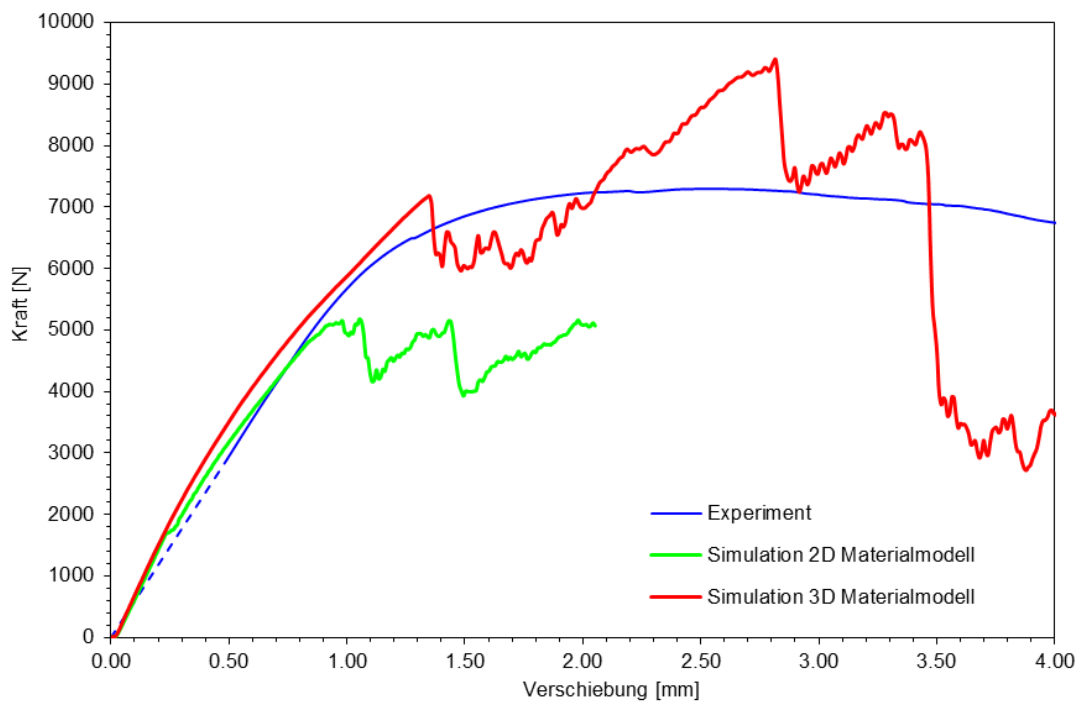


Abbildung 27: Kraft-Weg-Kurven für Querdruckbelastung

Arbeitspaket 3: Gestaltung Kraffteinleitungsstellen

Arbeitspaket 3 beschäftigte sich mit der Entwicklung fasergerechter Lasteinleitungen in die Stabstrukturen und wurde vom LCC erarbeitet. Dazu wurde in einem ersten Schritt ein Workshop am LCC veranstaltet, bei dem alle Projektpartner Ideen generieren und unter verschiedenen Gesichtspunkten diskutierten und bewerteten. Die neuartige Skelettbauweise erfordert ein starkes Umdenken bei der konstruktiven Gestaltung von Lasteinleitungsbereichen, einerseits im Vergleich zu Metallen aufgrund der Faserarchitektur, andererseits aber auch im Vergleich zu gängigen Lösungen im Composite Bereich, welche oft für flächige Strukturen entwickelt wurden. Die Geometrie der Pultrusionsstäbe und ihre leichte Umformbarkeit unter Temperatur erlauben völlig andere konstruktive Lösungen als bei vergleichbaren duroplastischen Harzsystemen. Analogien für die Gestaltung einer werkstoffgerechten Lasteinleitung wurden beispielsweise in der Seiltechnik identifiziert. Auch hier müssen konzentrierte Kräfte möglichst unter Zugbelastung der umliegenden Seile eingeleitet werden. Auch bei endlosfaserverstärkten Kunststoffen ist eine Zugbeanspruchung in Faserrichtung vorteilhaft, da ein Festigkeitsversagen des Verbundes durch Ausknicken der Fasern bei geringerer Drucklast verhindert wird. Eine Übersicht über konstruktive Lösungen aus der Seiltechnik ist in Abbildung 28 dargestellt. Neben den Varianten mit zusätzlichem Metallbeschlag bietet der Schlaufenanschluss großes Potential für weitere Untersuchungen. Im weiteren Verlauf wurden mehrere Konzepte zum Anschluss von einzelnen Verbindungselementen an unidirektionalen Stäbe untersucht. Dazu zählen Onserts, an denen über Klebeflächen oder Verbindungselemente Lasten eingeleitet werden können. Ein weiterer Fokus waren Kupplungsmuffen für die Kombination mehrerer Stabverbindungen.

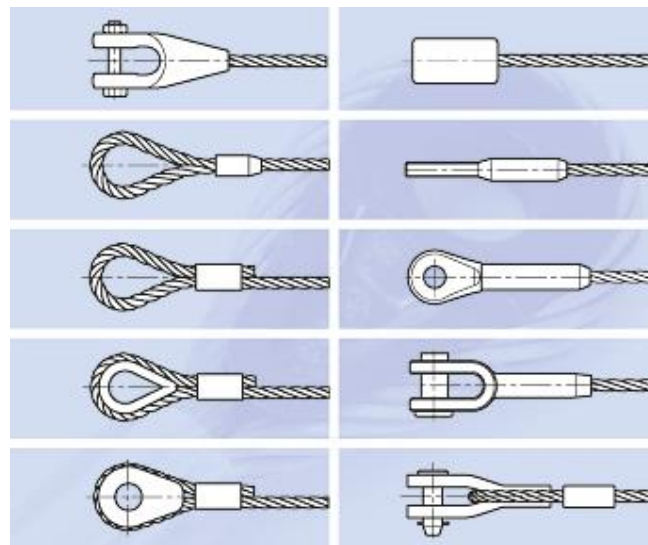


Abbildung 28: Mögliche Seilendverbindungen als Analogie; Quelle: PFEIFER Seil- und Hebetchnik GmbH⁴

Das Arbeitspaket wurde dann im Weiteren in Zusammenarbeit des LCC und der BMW Group durchgeführt. Es wurden drei Kräfteinleitungsstellen für die Einleitung von hohen Kräften ausgearbeitet, die in dem generischen Bauteil dargestellt werden.

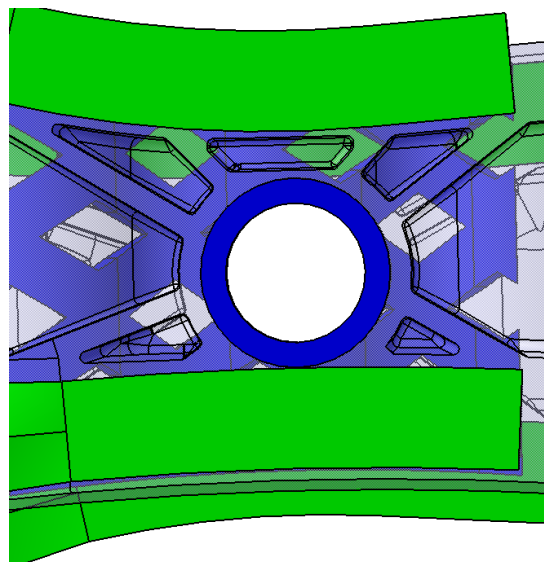


Abbildung 29: Draufsicht Kräfteinleitungsstelle mit Insert

Die erste Kräfteinleitungsstelle war über ein metallisches Insert dargestellt (Abbildung 29 und Abbildung 30). Dieses Insert wurde mit ins Kunststoffspritzgusswerkzeug eingelegt und umspritzt. Durch die Formgebung und vor allem durch die Löcher ergibt sich ein Formschluss mit

⁴ <https://www.pfeifer.de/seilanwendungstechnik/seilendverbindungen/gebraeuchliche-seilendverbindungen/>

der Kunststoffspritzgussmasse. Durch den Stoffschluss der Kunststoffspritzgussmasse mit den Stäben wird die Kraft in die Stäbe eingeleitet.

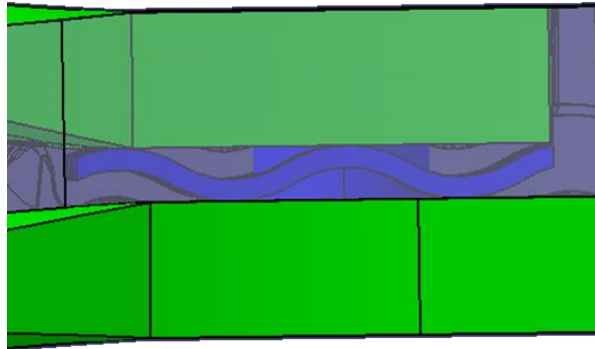


Abbildung 30: Seitenansicht Krafteinleitungsstelle mit Insert

Die zweite und dritte Krafteinleitung zeichnet sich durch das Umschlingen des Krafteinleitungspunktes durch die Stäbe aus (Abbildung 31 und Abbildung 32). Die zweite Verbindung ist gabelförmig ausgebildet. Die Auslegung des T-Bauteils, welche bei P&Z durchgeführt wurde, hat Schwachpunkte in den Bereichen der Krafteinleitungsstellen aufgedeckt. Diese wurden während der Entwicklung erheblich verbessert.

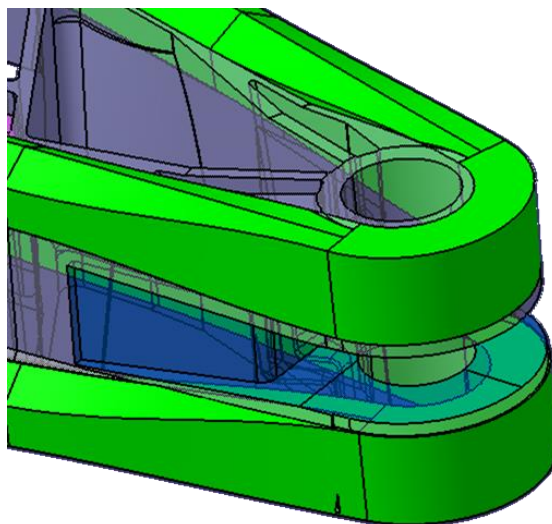


Abbildung 31: Krafteinleitungsstelle Gabel-Öse

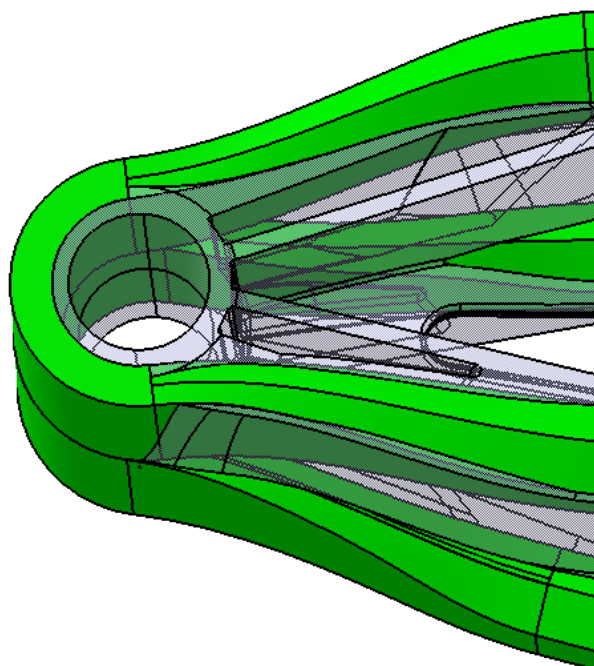


Abbildung 32: Krafteinleitungsstelle Öse

Arbeitspaket 4: Parameterstudie Biegeträger Crashverhalten

Linear-statische und linear-dynamische FE-Berechnungen

Zur Vertiefung der Auswirkung von Parameteränderungen wurden am Dachspiegel, der bereits im Projekt MAI skelett untersucht wurde, von ARRK | P+Z Engineering numerische Parameterstudien durchgeführt.

Untersucht wurde das Strukturverhalten im quasistatischen und dynamischen Biege- und Stauch-Versuch, dabei wurden folgende Parameter variiert: Werkstoffe für Stäbe und Spritzgießumfang, Geometrieanpassung im Werkzeug und Wandstärke der Stäbe.

Basierend auf den untersuchten Varianten wurden weiterführend linear-statische und linear-dynamische Berechnungen durchgeführt. Hauptaugenmerk wurde hierbei auf die Akustik gelegt, welche eine große Bedeutung für Bauteile in diesem Bereich eines Fahrzeugs hat. Abbildung 33 zeigt typische Kurvenverläufe (Beschleunigung an ausgewählten Auswertepunkten des Windlaufs über der Frequenz) für eine Auswahl der betrachteten Varianten:

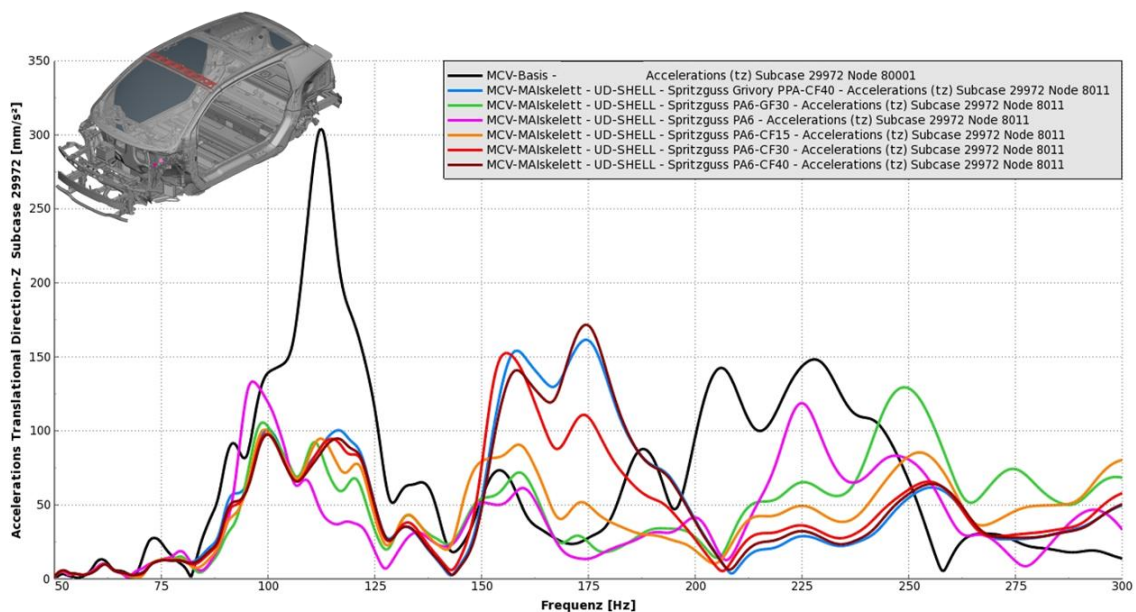


Abbildung 33: Frequenzgang-Analyse des MAI skelett Dachspiegels

An den kritischen Stellen (Maxima der Kurven) wurden detaillierte Betrachtungen unternommen. Dabei wurden Betriebsschwingformen an den kritischen Frequenzen berechnet und die Varianten untereinander verglichen, indem man die Deformationen grafisch animierte, analysierte und interpretierte. Dabei wurde unter anderem festgestellt, dass eine Verringerung der Bauteilsteifigkeit durch „weicherer“ Spritzgussmaterial (Reduzierung des Fasergehalts) einen positiven Effekt auf die Akustik hat.

Tabelle 3 beinhaltet eine Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen einschließlich einer Bewertung aus Sicht der Simulation:

Varianten		Simulation			Freq. Resp. Analyse linear-dyn.	3-Punkt-Biegeversuch explizit - quasi-stat.	Stauchversuch explizit - quasi-stat.
		Beschreibung	Spritzguss-Material				
		Referenz-WL	-	0	0	0	
MATERIAL	Spritzguss-Material-Änderung	PPA – CF40	- / +	-	-		
	Spritzguss-Material-Änderung	PA6 – GF30	++	+	0		
	Spritzguss-Material-Änderung	PA6	++	++	++		
	Spritzguss-Material-Änderung	PA6 – CF15	+++	- *	- *		
	Spritzguss-Material-Änderung	PA6 – CF30	- / +	- *	- *		
	Spritzguss-Material-Änderung	PA6 – CF40	- / +	- *	- *		
GEOMETRIE	flachere UD-Stäbe	PA6	+	++	-		
	Stahleinleger in UD-Stab	PA6	+	+++	+++		
	Geflecht um UD-Stab	PA6	-	+++	+++		
	Umspritzung der UD-Stäbe mit PA6	PA6	-	+	+++		
	Entfernung von Flächen (mittig)	PA6	-	++	++		
	Entfernung der senkrechten Rippen	PA6	-	+++	++		

Tabelle 3: Varianten-Übersicht der Parameterstudie

Durchführung Hardware-Versuche und Vergleich mit FE-Berechnung

Basierend auf den Ergebnissen der FE-Simulation wurden ausgewählte Varianten der Windläufe gefertigt und getestet (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35). Anschließend wurden die Versuchsergebnisse mit den Simulationen verglichen.



Abbildung 34: quasi-statischer 3-Punkt-Biegeversuch



Abbildung 35: quasi-statischer Stauchversuch

Die Versuchsserie hat geringe Unterschiede in den Ergebnissen beim Materialvergleich zwischen PA6-CF30 und PA6-CF40 gezeigt.

Beim 3-Punkt-Biege-Versuch weist die Kraft-Weg-Kurve aus der Simulation sehr gute Übereinstimmungen mit den Kurven aus dem Versuch auf. Dies trifft auch auf den Nachversagensbereich zu. Wie in Abbildung 36 zu sehen ist, war der Abgleich der Bruchstellen zwischen Versuch und Berechnung erfolgreich.

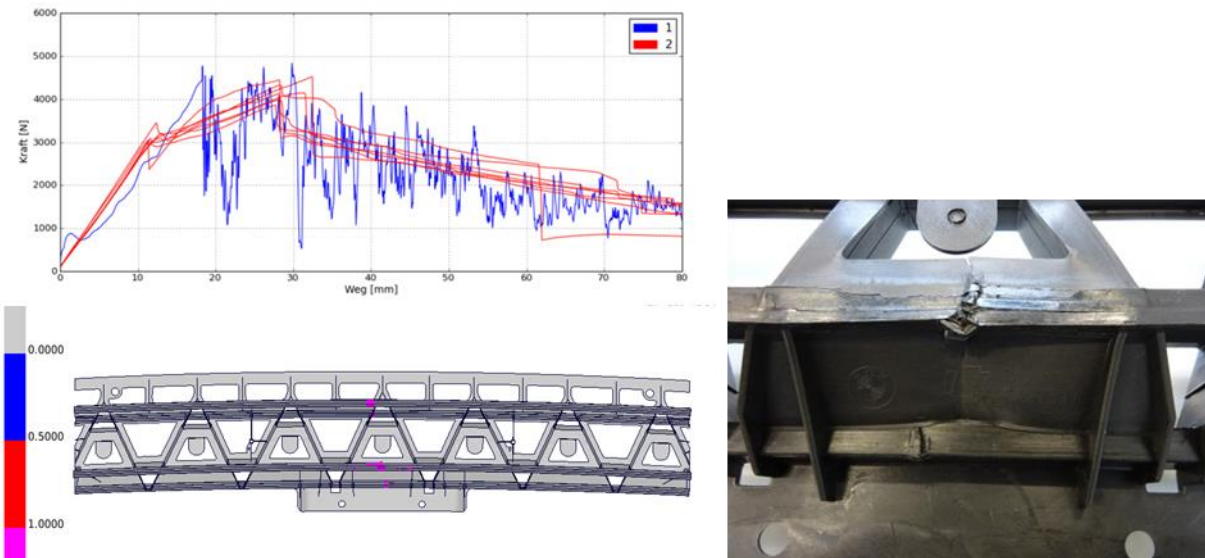


Abbildung 36: Abgleich 3-Punkt-Biegeversuch

Beim Stauchversuch hat die Kraft-Weg-Kurve aus der Simulation die gleiche Anfangssteigung wie die Versuchskurven, was für einen guten Steifigkeits-Abgleich spricht (siehe Abbildung 37). Die Festigkeit in der Berechnung wurde nur zur Hälfte erreicht. Als eine Ursache für die Abweichung in der Festigkeit kommen die verwendeten FE-Materialkarten in Frage, welche nicht speziell für die verwendeten Materialien ermittelt und zu dem auf andere Prozesse abgestimmt sind.

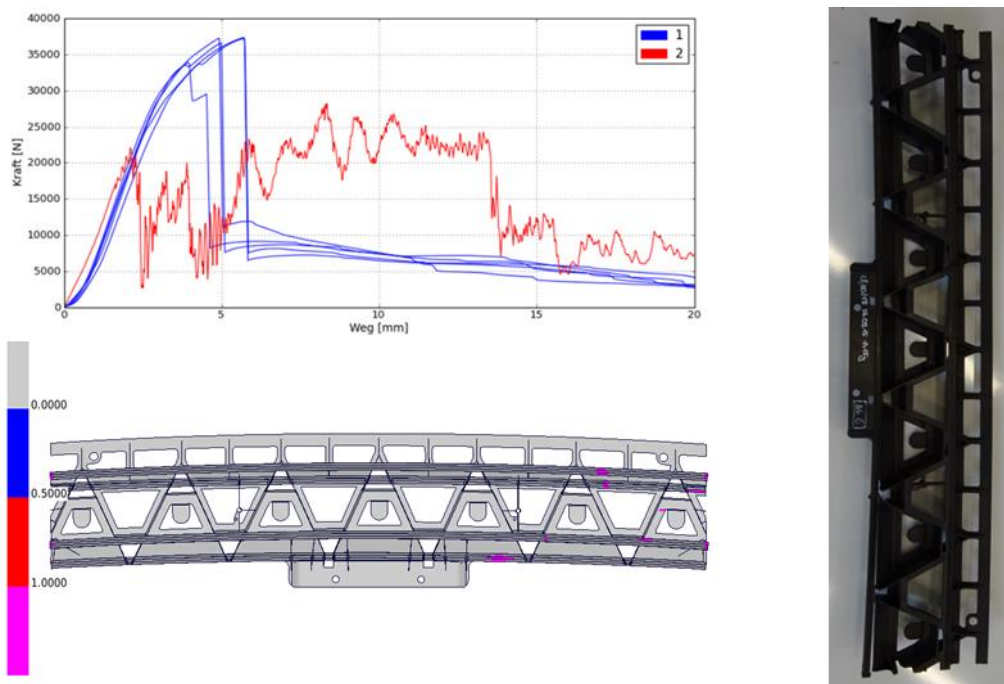


Abbildung 37: Abgleich Stauchversuch

Parameterstudie an Windläufen in Versuch und Simulation

Um den Einfluss der Rippengeometrie auf das Bruchverhalten der Windläufe abschätzen zu können, wurden mit den vorliegenden Simulativ- und Realgeometrien weitere Parameteruntersuchungen mit unterschiedlichen Rippenausschnitten im Mittenbereich durchgeführt (siehe Abbildung 38). Für beide Belastungen führten die Mittenausschnitte erwartungsgemäß zu einer tendenziellen Reduktion der Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte.



Abbildung 38: Mittenausschnitte Windlauf

Im Gegensatz zu den Stauchversuchen konnten Steifigkeit und Festigkeit der Proben sowie das Versagensbild im 3-Punkt-Biegeversuch gut nachgebildet werden. Zudem war die Reduktion der mechanischen Eigenschaften durch die Ausschnitte abbildbar. Als Beispiel soll der Vergleich von Probe 1 (Standardgeometrie) und Probe 3 (Mehrfachausschnitte) dienen (Abbildung 39).

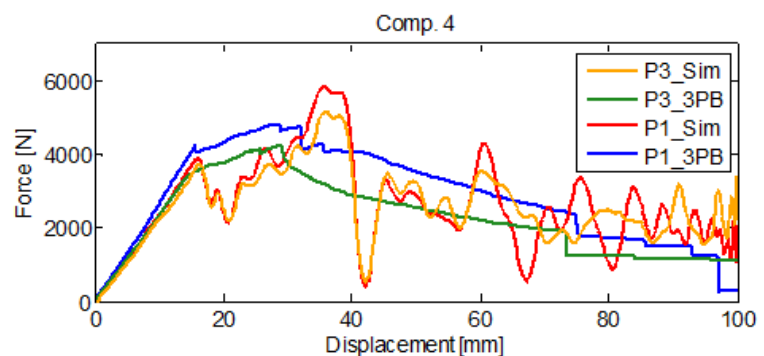
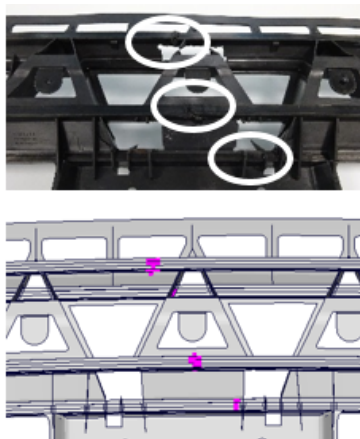


Abbildung 39: Vergleich Test-Simulation 3-Punkt-Biegung

Die fehlende Ausbildung des Lastplateaus aus dem Versuch lässt sich durch die vereinfachte Gitter-Schalenmodellierung erklären, welche zu einem schichtweise diskontinuierlichen Versagen der unidirektionalen Stäbe führt (siehe Abbildung 40).

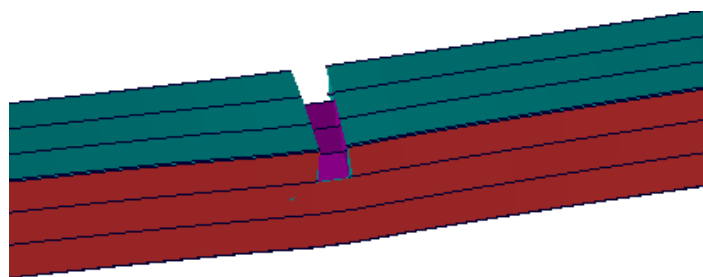


Abbildung 40: Schichtweises Versagen der unidirektionalen Stäbe

Arbeitspaket 5: Produktberechnung / Berechnungs- und Optimierungsmethoden

Produktberechnung / Berechnungsmethode Kreuz-Knoten-Modell

Die Gitter-Schalenmodellierung des Kreuzknotens ermöglicht es, eine fein modellierte Solid-Geometrie (vgl. AP 2.2) stark zu vereinfachen. Diese Modellierung wurde in AP12 mit weiteren Shell- und Solid-Modellierungen validiert und konnte die besten Abgleiche erzielen. Die UD-Stäbe werden hierbei quasi-dreidimensional durch gitterförmig angeordnete Schalenelementen mit Elementkantenlängen von 3-4mm aufgespannt (siehe Abbildung 41 und Abbildung 42). Dadurch reduzieren sich der Modellierungsaufwand und die Rechenzeit mit Hinblick auf den Serienentwicklungsprozess. Zudem lassen sich bereits existierende kalibrierte Materialkarten aus der numerischen Entwicklung von Schalengeometrien weitgehend auf die Problemstellung der Skelettbauweise übertragen.

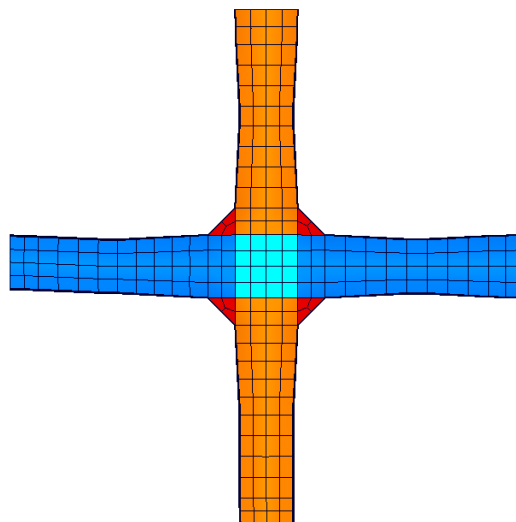


Abbildung 41: Schalenmodellierung Kreuzknoten

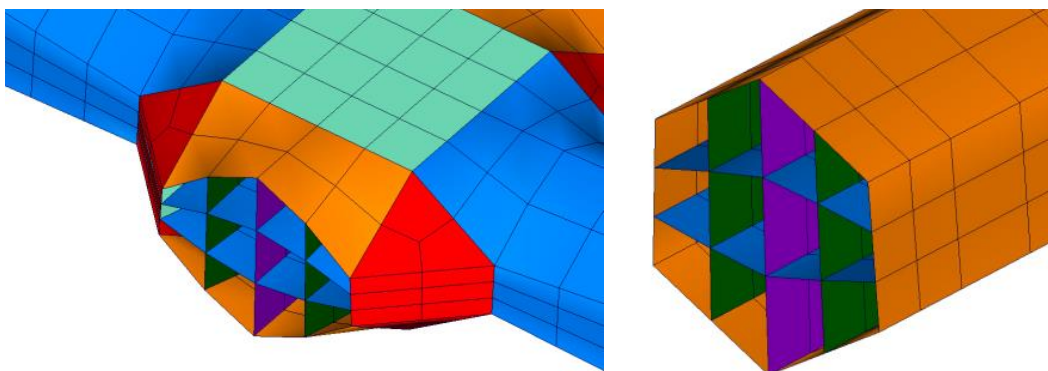


Abbildung 42: Details Kreuzknoten

Neben der Abbildung in Skelettbauweise mit unterschiedlichen Faserorientierungen im Knoten wurden auch grob vernetzte Kreuzknoten-Geometrien (Kantenlänge ca. 4mm) mit Solid-Elementen berechnet. Jedoch traten auch hier Abweichungen der Simulation von den Versuchsergebnissen sowie den Simulationsergebnissen mit feiner Solid-Vernetzung (AP2.2) auf. Um eine realistischere Abbildung des Bauteilverhaltens in Gitter-Schalenmodellierung zu gewährleisten, könnten eigene Materialkarten kalibriert werden. Dies wäre jedoch auf Grund des zeitlichen Aufwandes der Versuchsplanung, Probenvorbereitung etc. im Projektumfang nicht machbar gewesen.

Produktberechnung / Berechnungsmethode Trägerverbindung

Das Modell der Trägerverbindung wurde von der Geometrie des Kreuzknotens abgeleitet. Ziel war die generische Untersuchung der Deformation von Skelettbauteilen bei Biegung und Torsion um verschiedene Achsen (siehe Abbildung 43).

Die simulative Anbindung der Stäbe an den Spritzguss basierte hierbei auf Untersuchungen aus dem MAI skelett-Projekt und wurde ebenso wie die fertigungsgerechte Formgebung der Spritzgussrippen in enger Absprache mit der Konstruktion erstellt. Die Kräfteinleitungen wurden entsprechend AP 2.3 modelliert.

Mit dem Modell konnten Voruntersuchungen über das Verformungsverhalten und die auftretenden Maximalkräfte durchgeführt werden, welche in den Aufbau der Versuchsvorrichtungen einfließen. Die Hardwaretests für die Trägerverbindung wurden in AP11/12 durchgeführt.

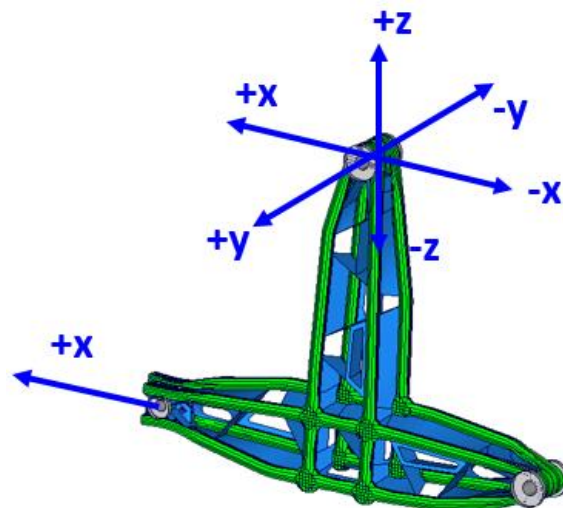


Abbildung 43: FE-Modell der Trägerverbindung

Optimierungsmethode Parameter-Optimierung

„Crash Nachversagensverhalten“

Basierend auf den Erfahrungen im Projekt MAI skelett sowie des AP 4 – „Parameterstudie Biegeträger Crashverhalten“ wurde die konzeptionelle Weiterentwicklung und Verbesserung der Optimierungsmethoden von ARRK | P+Z Engineering durchgeführt. Hierbei wurde ein

halb-automatisierter Prozess zur Erkennung der Sensitivitäten bzgl. Resttragfähigkeit sowie Duktilität bei einer expliziten Crash-Berechnung aufgebaut. Das Ziel war dabei die Minimierung des Aufwands im Vergleich zu einer „manuellen“ Parameterstudie sowie das Erreichen eines globalen Optimums.

Im Zuge der Entwicklung dieser Methode gab es einige Herausforderungen, dazu zählten unter anderem folgende Punkte:

- Die Diskretisierung des Bauteils (Windlauf) in eine angemessene Anzahl von Bereichen (siehe Abbildung 44), um einen guten Kompromiss zwischen dem Detaillierungsgrad und der Simulationsdauer zu erzielen.
- Die Auswahl eines passenden Algorithmus, welcher entweder diskrete oder kontinuierliche Parameter oder sogar beide Arten berücksichtigen kann sowie dies auch zielführend umsetzt.
- Die Parallelisierung sowie die Robustheit der Berechnungen für ca. 2000 Iterationen/Simulationen innerhalb einer Optimierung.
- Die Definition von passenden Randbedingungen sowie einer Zielfunktion, welche die Resttragfähigkeit im Nachversagen möglichst gut wiedergibt und natürlich auch maximiert.

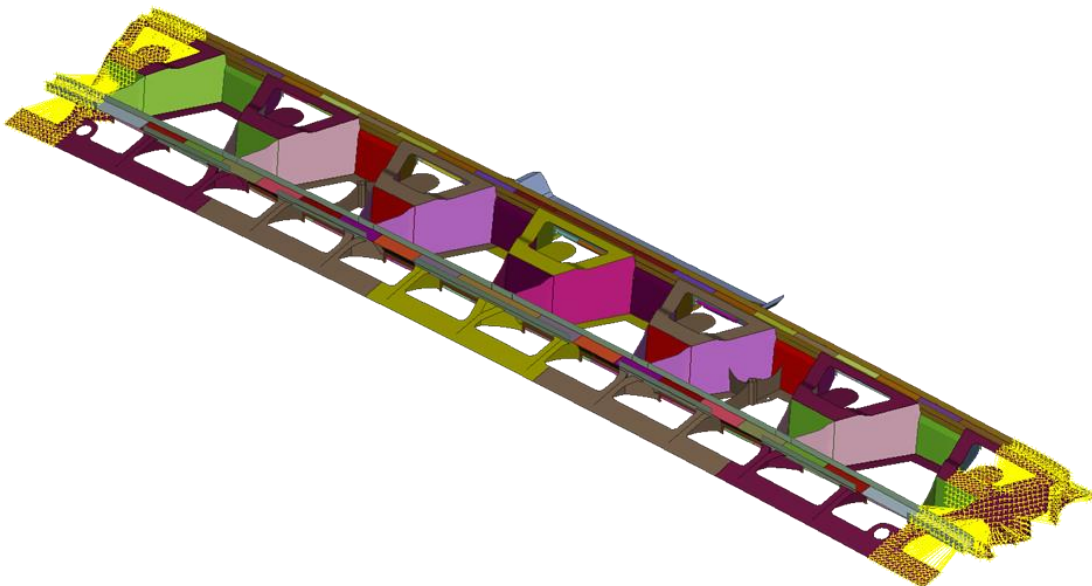


Abbildung 44: Diskretisierung des MAI-skelett Windlaufs

Letztendlich konnten diese Schwierigkeiten überwunden werden und es ist gelungen, ein Optimierungsverfahren bzw. eine Optimierungsmethode, welche die Resttragfähigkeit im Nachversagen erhöht, zu entwickeln. Das Ziel konnte erreicht werden, indem die Wandstärken des

Bauteils optimiert und/oder der Faservolumenanteil „indirekt“ mittels automatisierter Materialvariation erhöht/verringert wurde. Gegenüber einer manuellen Anpassung der Wandstärken- bzw. Material-Variation wird mittels dieser automatisierten Methode in kürzerer Zeit ein deutlich besseres Ergebnis erzielt. Als anschauliches Ergebnis für das Nachversagensverhalten soll Abbildung 45 dienen.

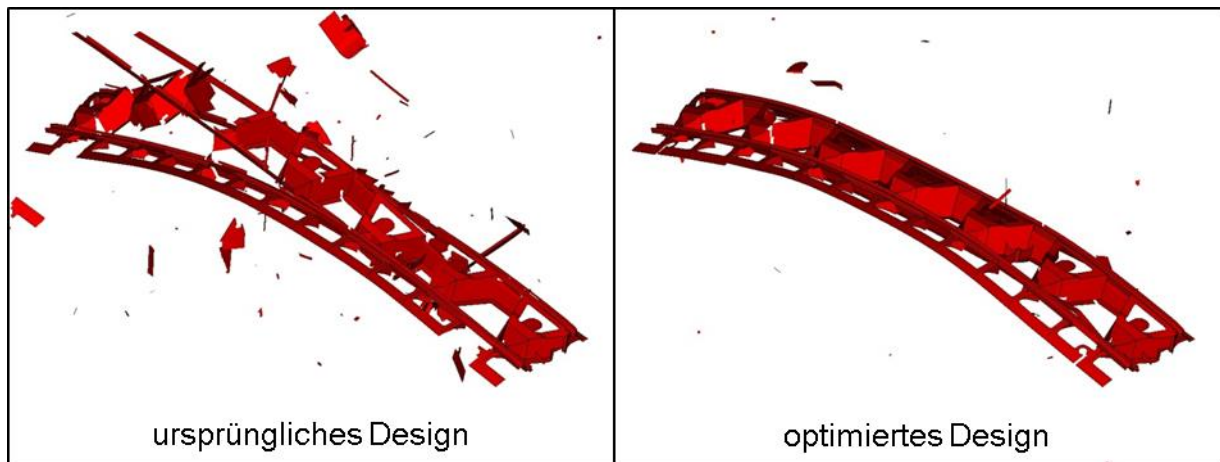


Abbildung 45: Ergebnis der Crash-Optimierung

Optimierungsmethode Struktur-Optimierung

Nach der erfolgreichen Umsetzung einer Parameter-Optimierungsmethode für das Crash-Nachversagensverhalten in der ersten Hälfte des Projektzeitraums wurde eine Erweiterung der Struktur-Optimierungsmethode erarbeitet. Basierend auf den Erkenntnissen im vorangegangenen Forschungsprojekt MAI skelett, sollen nun die Fortschritte in den Struktur-Optimierungs-Solvern untersucht, angewandt und idealerweise verbessert werden.

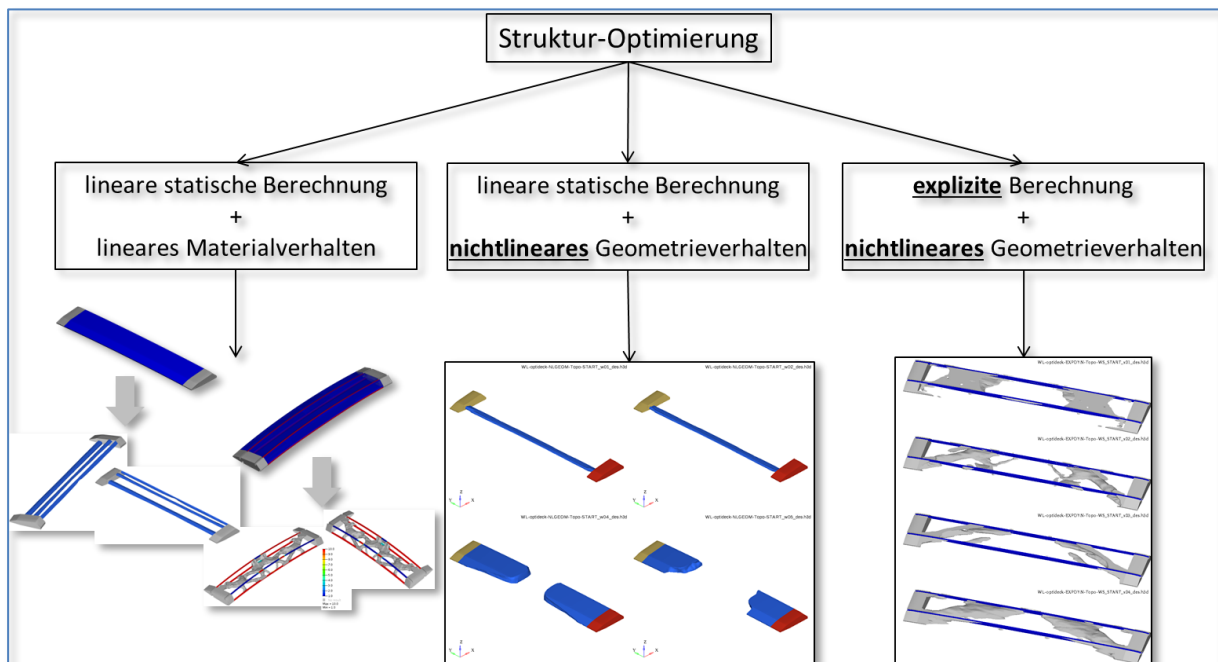


Abbildung 46: Vorgehen und Ergebnisse der Struktur-Optimierungsmethode

In Abbildung 46 ist das prinzipielle Vorgehen für die unterschiedlichen Kombinationen für (nicht-)lineares Geometrieverhalten und statischer/expliciter Berechnung dargestellt. Die Ergebnisse in der linken Spalte entstammen dem Projekt MAI skelett.

Die ersten Untersuchungen bzgl. des nichtlinearen Geometrieverhaltens mit den neusten OptiStruct-Versionen (v14 & v2017) deuteten zunächst auf einen Fortschritt hinsichtlich der Machbarkeit hin. Allerdings führte die steigende Komplexität dieser Berechnungen zu einer deutlichen Reduzierung der Robustheit in den Optimierungen. Damit stieg gleichzeitig der Aufwand eine optimale Optimierungs-Parameter-Einstellung zu finden, welche realistische und plausible Ergebnisse liefert. An diesem Punkt wurde im letzten Projektabschnitt intensiv gearbeitet. Das forcierte Ziel einer nichtlinearen Struktur-Optimierungsmethode, welche keine Spezial- oder Sonderlösung darstellt, sondern im realen Bauteilentwicklungsprozess herangezogen werden kann, konnte aufgrund von fehlenden Erweiterungen der kommerziellen Struktur-Optimierungs-Solver nicht vollständig erreicht werden. Es fand ein intensiver Austausch mit den jeweiligen Entwicklungsabteilungen der Softwareanbieter statt, jedoch wurde aufgrund der extrem hohen Komplexität seitens der Softwareentwickler entschieden, die gewünschten Funktionen nicht weiterzuentwickeln und zu implementieren. Nichtsdestotrotz konnten Struktur-Optimierungsmethoden erarbeitet werden, welche einen Entwicklungsprozess für die hier betrachteten Bauteile unterstützen und einen sinnvollen Konstruktionsentwurf generieren.

Arbeitspaket 6: Prozessberechnung

Der in AP 1 auskonstruierte Spritzgussknoten (vergl. Abbildung 13) wurde von der Firma Eckerle in einer Prozesssimulation in zwei Schritten untersucht.

Prozesssimulation Spritzgussknoten

Ziel der ersten Simulation war die Vorfüllung der Kavität im Kompaktspritzgussverfahren zur Abklärung evtl. auftretender Fertigungsprobleme und deren Behebung im Vorfeld der Werkzeugfertigung.

Durchführung

Es wurden die Materialdaten von GRILON TSC-40/4 EC verwendet, da es bezogen auf das Zielmaterial simulationstechnisch vergleichbare Eigenschaften aufweist. Die Überlaufkavität ist noch nicht Bestandteil des Modells, da sie erst in der Gassimulation erforderlich ist. Als Prozessparameter wurden Standardparameter (290° C Masse- und 90° C Werkzeugwandtemperatur) angenommen.

Zusätzlich wurde der Wärmeübergang an die einzulegenden Knotenstrukturen mit niedrigen $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen, um deren isolierende Wirkung anzunähern.

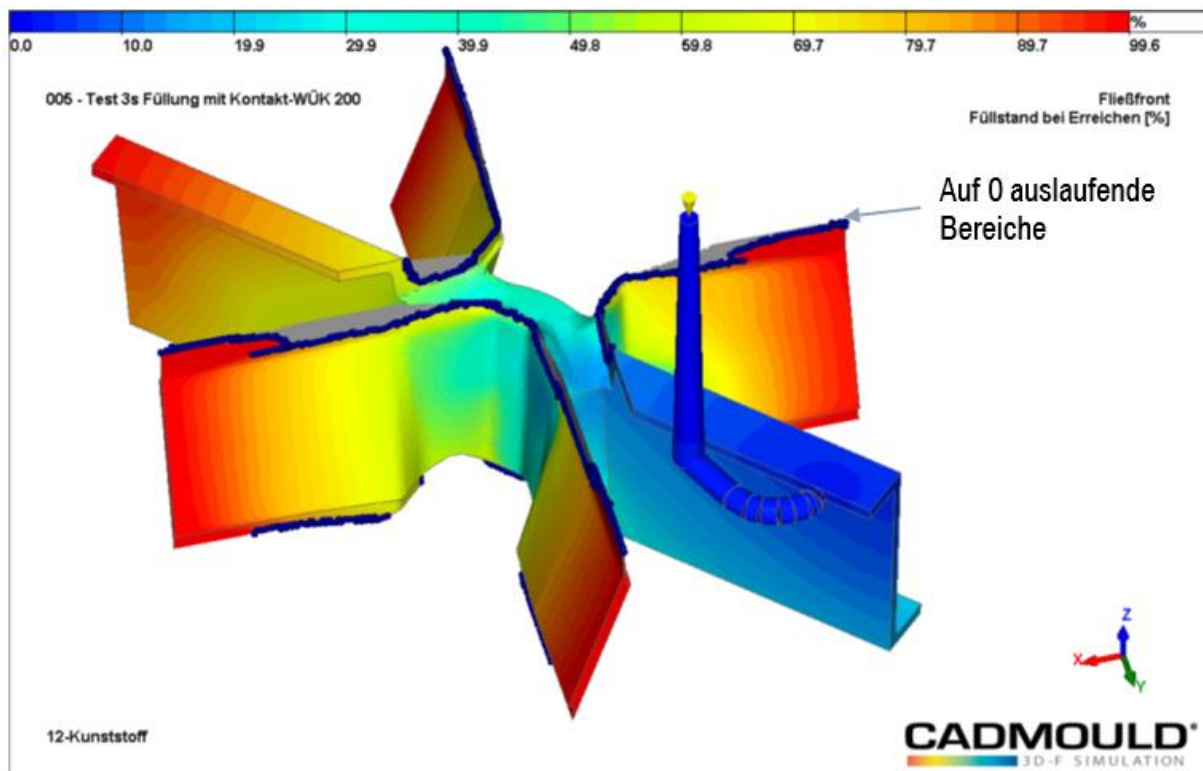


Abbildung 47: Spritzgussimulation; Füllstudie MAI Multiskelettknoten (Knoten ausgeblendet)

Fazit

Die Modellaufbereitung einschließlich der Wanddickenanalyse zeigte sehr dünne, auf 0 auslaufenden Anschlussflächen an die Knotenstäbe (dunkelblaue Markierungen). Dies führte in der Folge zu einem verzögerten Eindringen der Fließfronten in diese Spaltstrukturen, da die größeren Wanddicken bevorzugt durchströmt werden. Dies führte zu Teilfüllungen durch Erstarren der Fließfronten. Es kam zu einem „Backfill“, d. h. teilweise füllte die Masse von den entfernteren Stellen rückwärts in die Spalten. Die eindringende Masse hat eine sehr niedrige Temperatur, was eine deutliche Schwächung des Verbunds mit den Knotenstäben bewirken kann. Der Füllgrad wird durch geringe Schwankungen seitens Prozess oder Material beeinflusst, was zu nicht reproduzierbaren Qualitäten führen kann. Der Fülldruckbedarf lag mit gut 1200 bar an der oberen Grenze des typischerweise angestrebten Drucks (700 bar im Artikel bei 98 % Füllstand).

Prozesssimulation GIT

Ziel der zweiten Simulation ist es, die Vorfüllung der Kavität im Kompaktspritzgussverfahren zur Abklärung evtl. auftretender Fertigungsprobleme und deren Behebung im Vorfeld der Werkzeugfertigung und anschließend die Gaseinleitung mit Verdrängung des Kunststoffes in die Nebenkavität zu simulieren.

Durchführung

Es wurden die Materialdaten von GRILON TSC-40/4 EC verwendet. Die Berechnung erfolgte für eine Kavität. Die Überlaufkavität wurde gemäß Werkzeugdaten anmodelliert. In der Voraussetzung war sie noch nicht Bestandteil des Modells, da sie erst in der Gassimulation erforderlich ist. Als Prozessparameter wurden unverändert die Standardparameter und auch Bedingungen für die Stäbe angenommen.

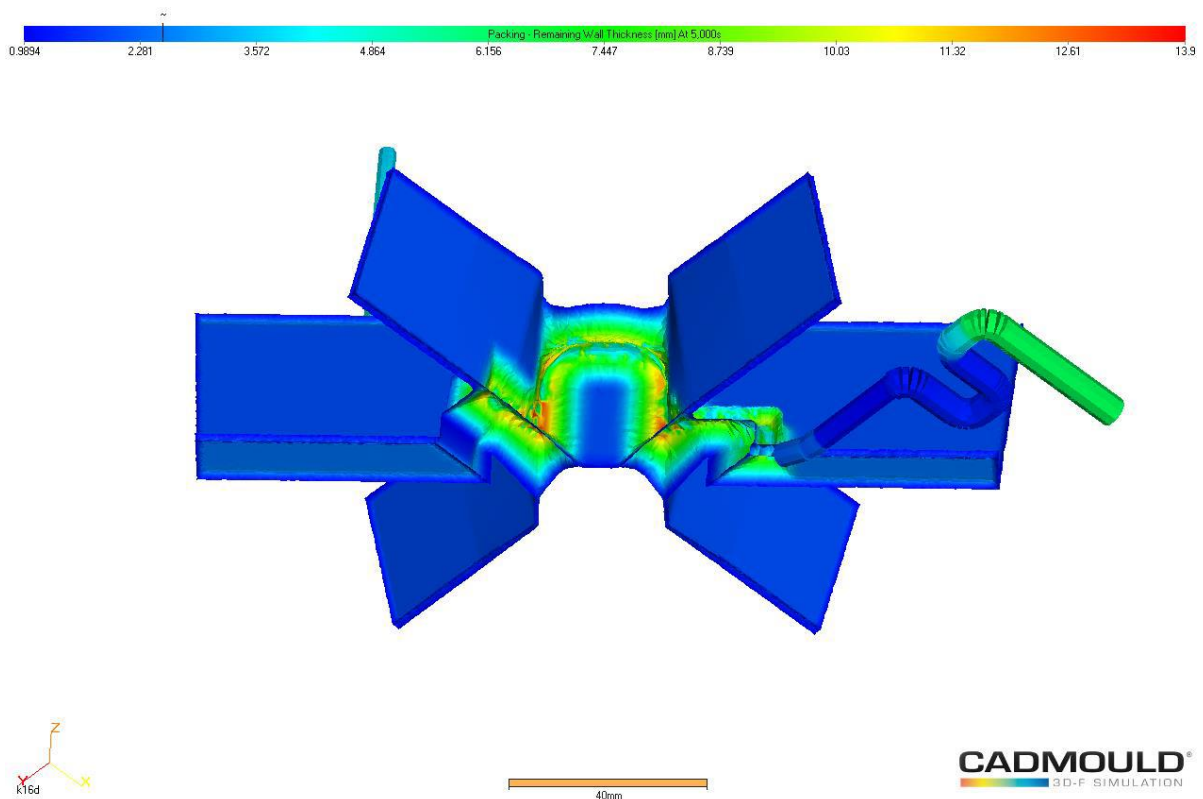


Abbildung 48: Prozesssimulation GIT Ende der Gasphase

Fazit Gasphase

Unter Vernachlässigung der o.g. dünn auslaufenden Kanten ist die Hauptkavität ohne Probleme zu füllen. Eine ausreichend lange konventionelle Nachdruckphase ist nötig, um ein Fingern des Gases in die Flächen zu vermeiden. Diese wurde aus dem Einfrierverhalten mit 2 s definiert. Anschließend an die Nachdruckphase wird Gas eingeleitet. Der Druck wurde zu 300 bar gesetzt, da dies der am Einleitungspunkt noch herrschende Nachdruck ist, gegen den der Gasdruck anwirken muss. (Nahezu) zeitgleich wird die Nebenkavität freigegeben, so dass das Gas die im dickeren Gaskanal stehende Schmelze verdrängen kann. Eine bei GIT typische Bevorzugung der Fließwegsinnenbahn ist an allen Umlenkungen festzustellen. Die Nebenkavität ist überdimensioniert, da Gas in sie hineindrängt. Der nach ca. 5 s Druckaufgabe noch ungefüllte Nebenkavitätskanal beträgt ca. 1 cm³ Volumen.

Prozesssimulation Trägerverbindung

Mit der entwickelten Geometrie wurden Moldflow-Untersuchungen in ähnlicher Weise auch zum generischen T-Bauteil von der Firma Eckerle durchgeführt.

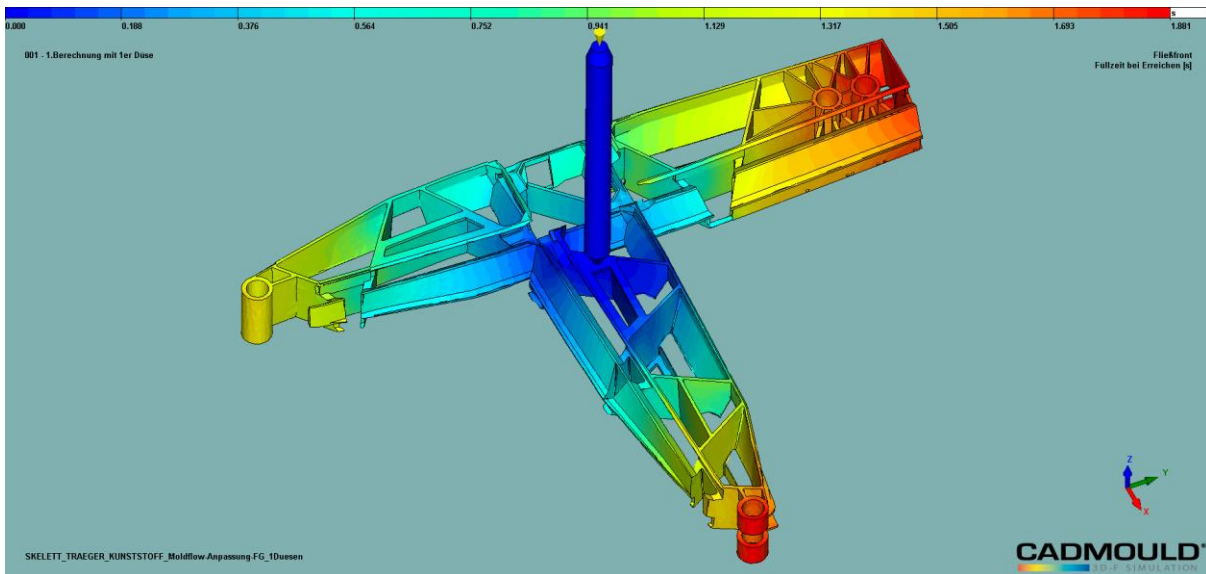


Abbildung 49: Fließfront Füllsimulation Version 1 T-Bauteil

Eine vollständige Füllung konnte mit einer Düse erreicht werden.

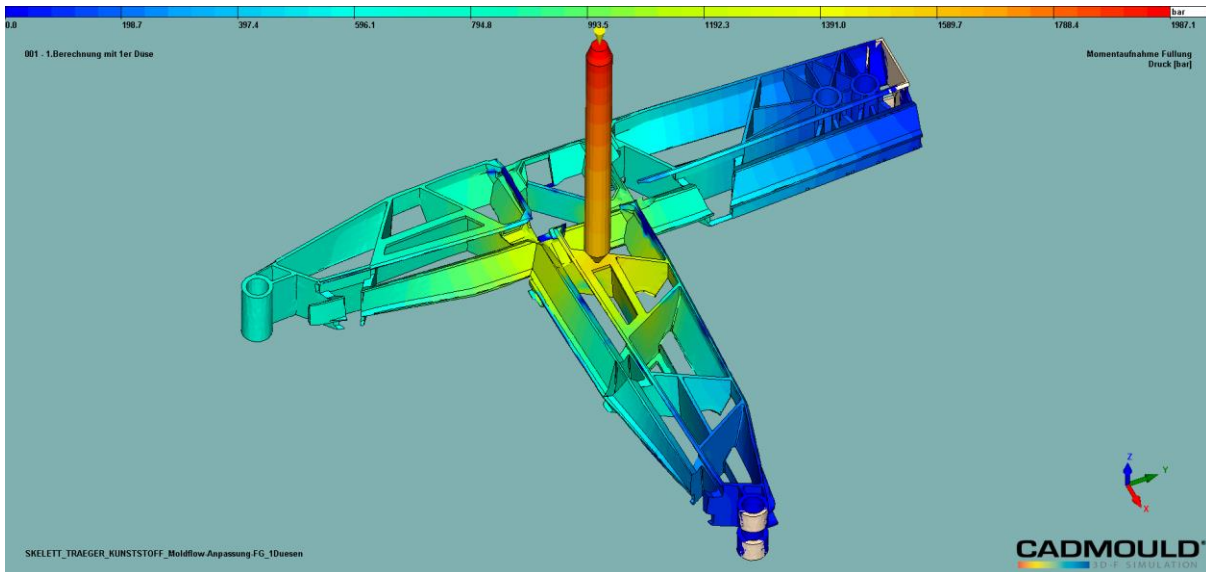


Abbildung 50: Spritzdruck Füllsimulation Version 1

Der Spritzdruck betrug jedoch bis zu 2000 bar. Dieser ist zu hoch, weshalb konstruktive Optimierungen vorgenommen werden mussten, um den Spritzdruck zu senken. Hierzu wurde eine Parameterstudie mit unterschiedlichen Wandstärken durchgeführt.

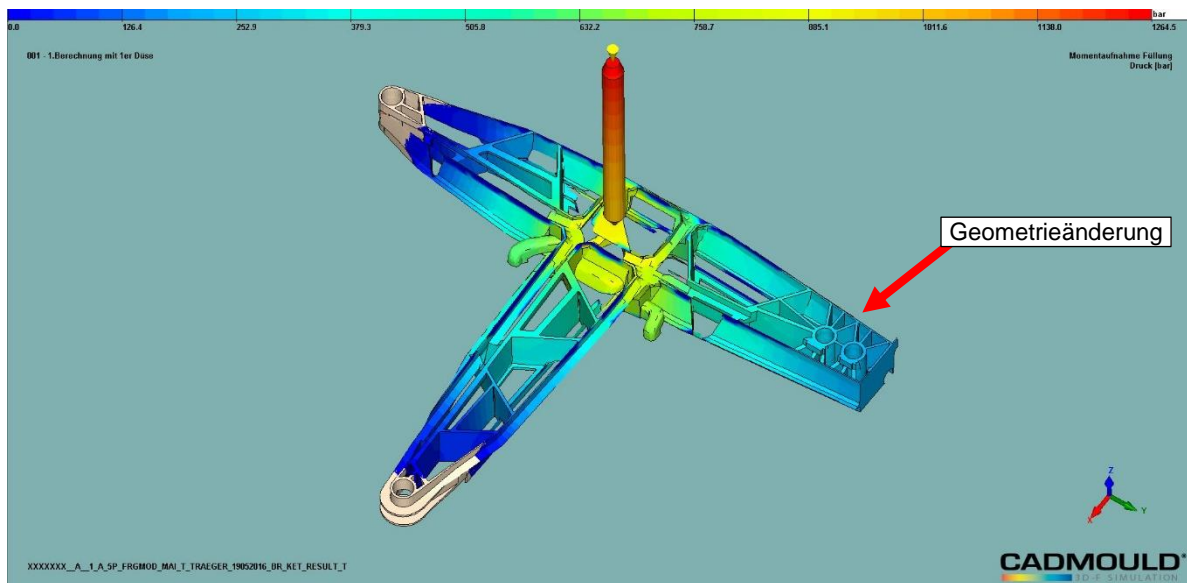


Abbildung 51: Spritzdruck Füllsimulation mit geänderten Wanddicken

Mit dem geänderten Datensatz bzw. geänderter Geometrie konnte ein optimierter Stand mit gleichmäßiger Füllung von 98% bei 2300 bar Spritzdruck erreicht werden. Auch das Geometrieupdate hinsichtlich der Funktion wurde mit der Füllsimulation auf Herstellbarkeit überprüft. Es wurde eine gleichmäßige Füllung von 97% bei 1800 bar Spritzdruck erreicht.

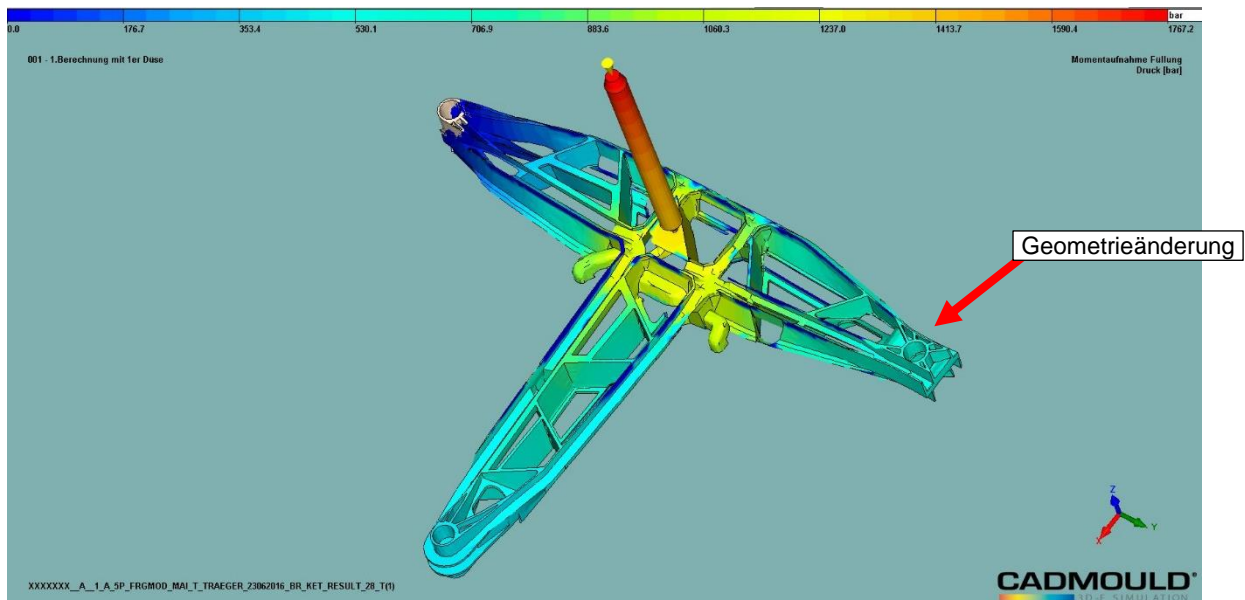


Abbildung 52: Spritzdruck Füllsimulation der weiterentwickelten Geometrie

Das Arbeitspaket 6 wurde von Firma Eckerle erarbeitet. Zum 27.07.2016 wurde mit einem weiteren Datenstand eine gleichmäßige Füllung von 94% bei 3180 bar Spritzdruck erreicht.

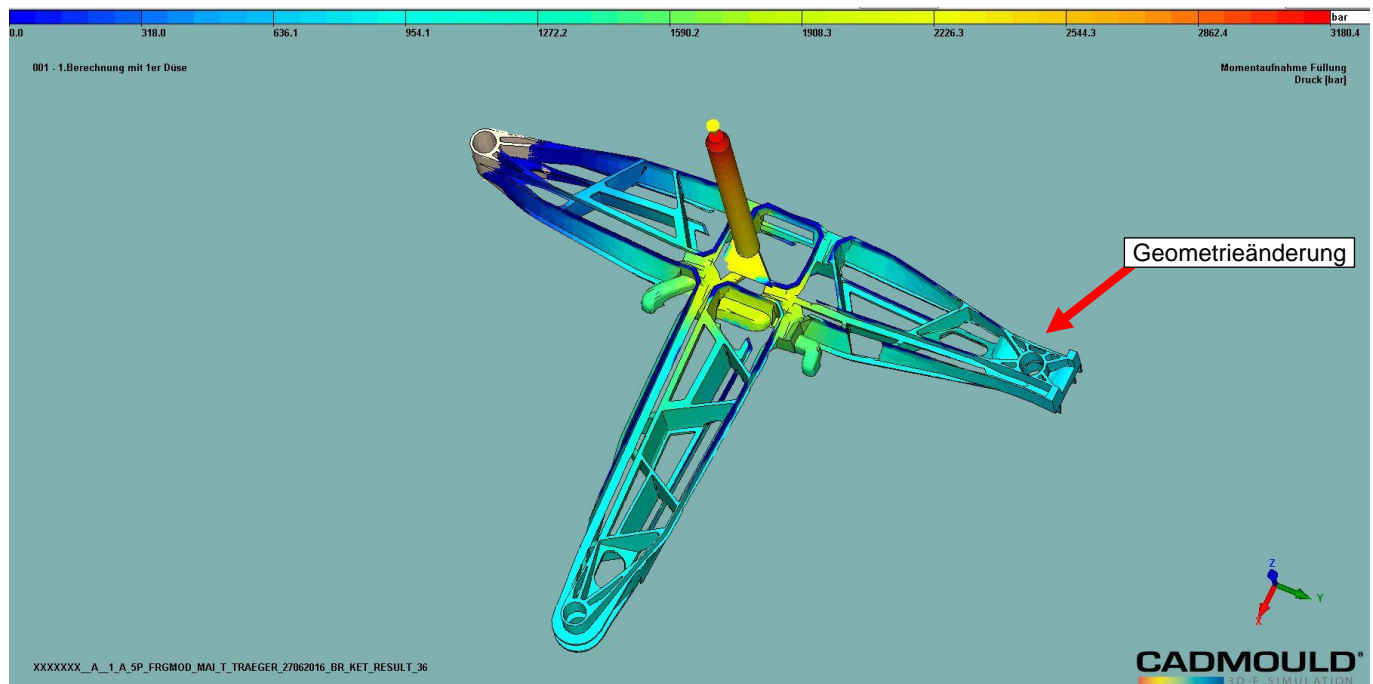


Abbildung 53: Füllanalyse Zwischenstand

Da der Spritzdruck zu hoch ist, mussten hier noch weitere Fließhilfen und Wandaufdickungen eingebracht werden. Daher wurde ein weiterer Datensatz erstellt und die Simulation durchgeführt. Mit dem Stand zum 08.08.2016 wurde die Stahlfreigabe erteilt.

Weitere Bauteilmodifizierungen führten dann zu einem guten Ergebnis. Die damit finale rheologische Berechnung wurde am 21.09.2016 durchgeführt. Die Ergebnisse mit ca. 1740 bar Spritzdruck sowie Schwindung und Verzug vom ca. 1 mm liegen im Zielbereich.

Im Anschluss wurden einige Bauteile mit diesen Parametern in der Praxis produziert. Es hat sich gezeigt, dass das Bauteil den Anforderungen entsprach und sich sehr gut sogar mit wesentlich niedrigeren Drücken als 1740 bar herstellen ließ.

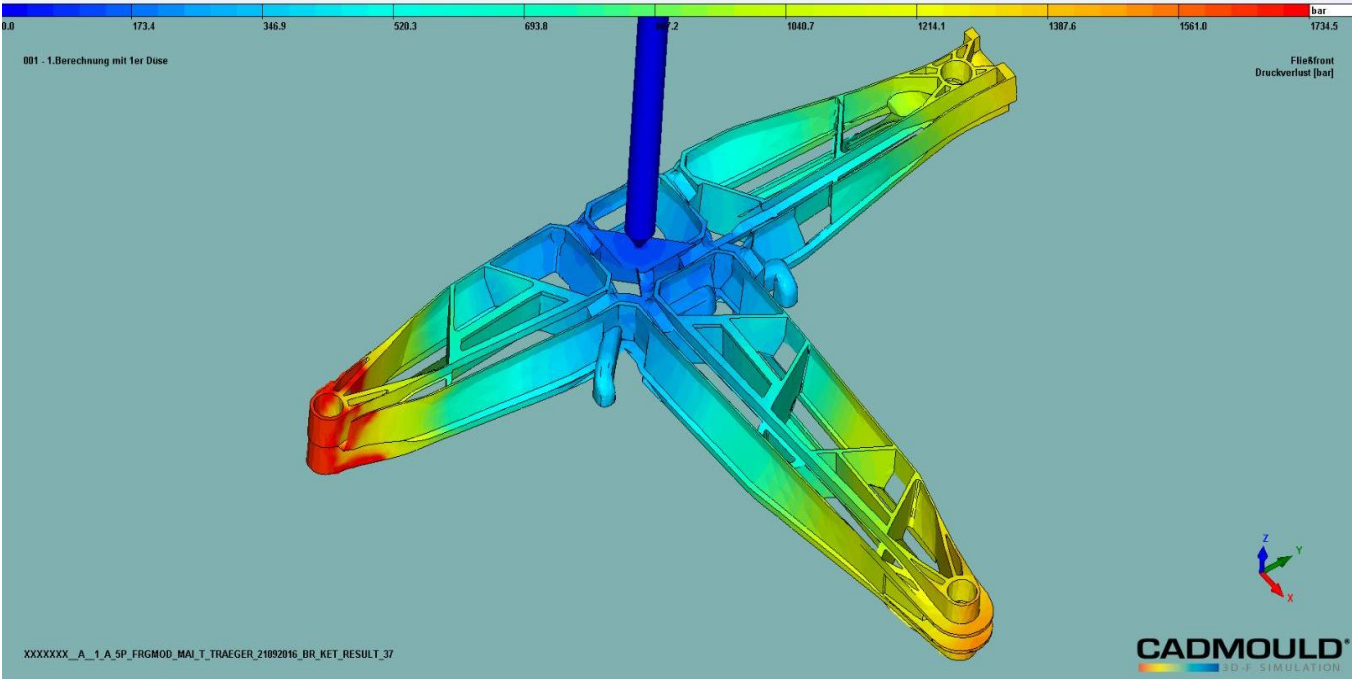


Abbildung 54: Finale Füllanalyse mit ca. 1740 Bar Spritzdruck

Arbeitspaket 7: Entwicklung Herstellverfahren Spritzgießknoten

Zur Überprüfung der erarbeiteten Lösung wurde ein Versuchswerkzeug für den Spritzgussknoten hergestellt.

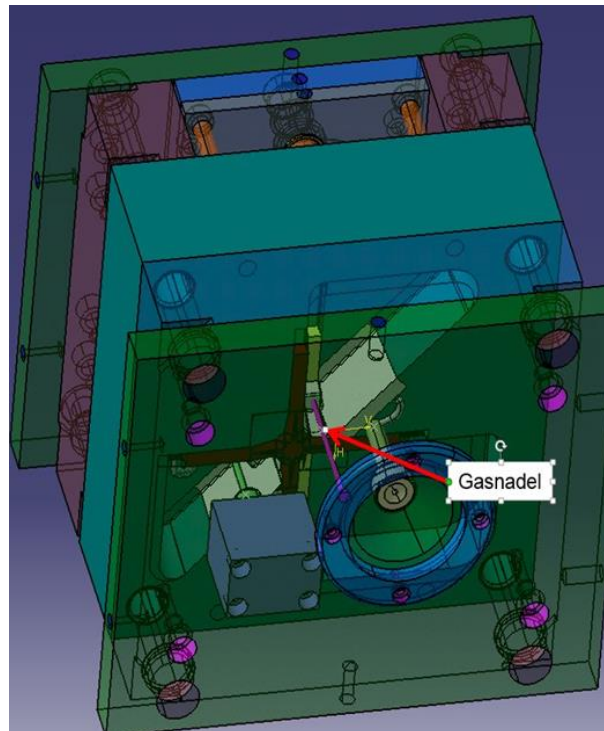


Abbildung 55: Konstruktion Spritzgusswerkzeug

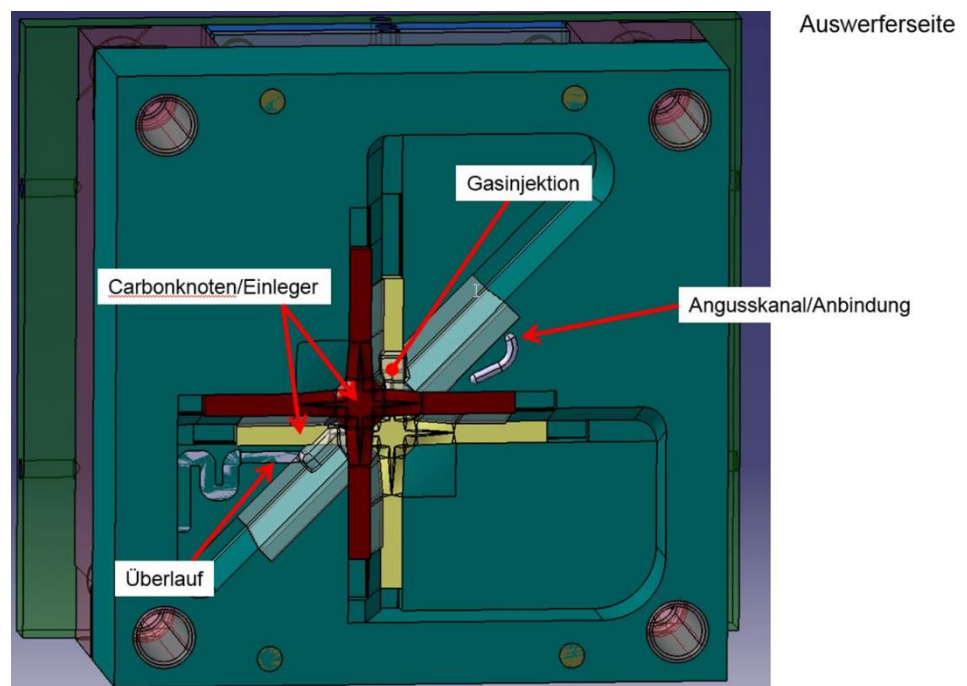


Abbildung 56: Konstruktion Spritzgusswerkzeug Ansicht Auswerferseite

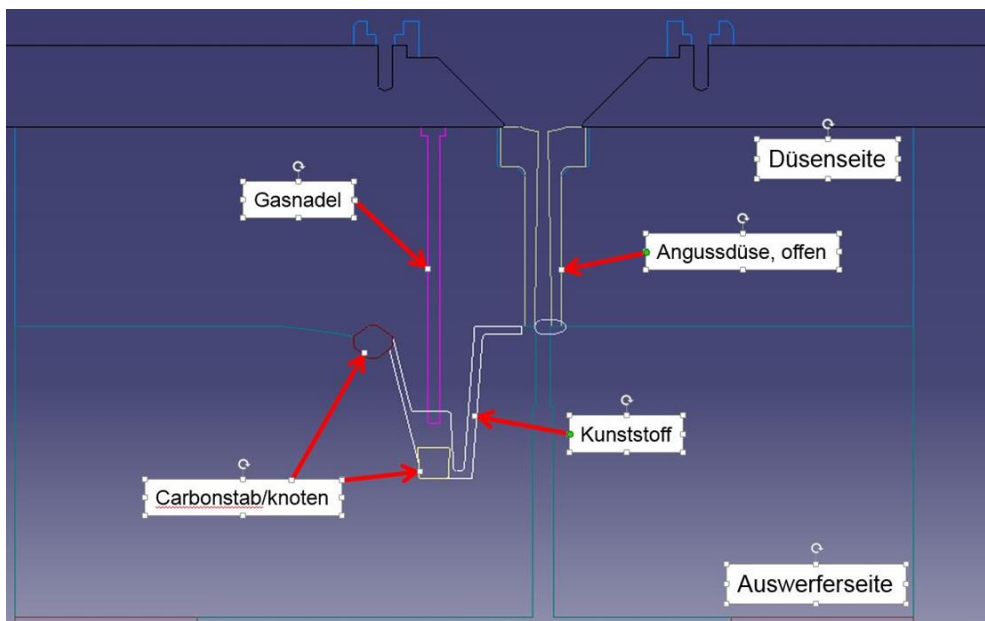


Abbildung 57: Konstruktion Spritzgusswerkzeug Schnittdarstellung

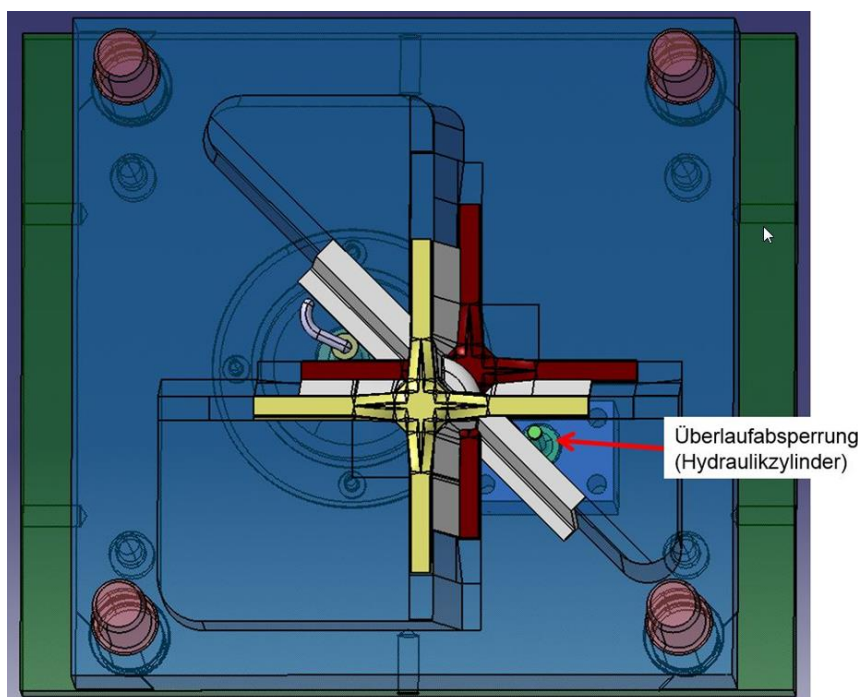


Abbildung 58: Konstruktion Spritzgusswerkzeug Darstellung Überlaufabsperung

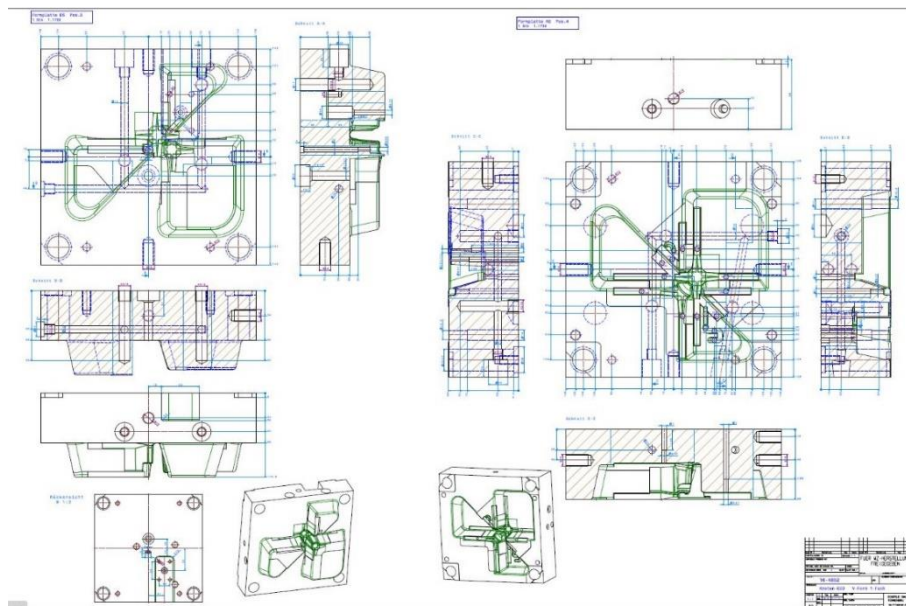


Abbildung 59: Zeichnung Werkzeug zur Absicherung GIT im Knotenbereich.

In Abbildung 60 ist die Auswerfer seitige Formhälfte im Zusammenbau dargestellt.



Abbildung 60: Werkzeug Auswerferseite

In Abbildung 61 ist die düsenseitige Formhälfte mit Gasnadel und Überlaufkanal dargestellt



Abbildung 61: Werkzeug Düsenseite



Abbildung 62: Bauteil Erprobung Herstellkonzept Spritzguss

Die Funktionsbemusterung konnte erfolgreich durchgeführt werden. Es wurde jedoch in der ersten Musterung festgestellt, dass die Überlaufkavität nicht ausreichend ist. Daher wurde diese konstruktiv überarbeitet und in das Werkzeug eingearbeitet.

In Abbildung 63 ist der Verlauf des Gaskanals zu erkennen.



Abbildung 63: Erprobungsbauteil Spritzgussprozess Aufgeschnitten

Die überarbeitete Größe des Überlaufs erwies sich in der Musterung als zielführend. Der Gaskanal konnte komplett gebildet werden. Besonders wichtig war dabei, dass ein Heißkanalsystem mit Nadelverschluß verwendet wird, um die Plastifizierschnecke vom Werkzeug zu entkoppeln, denn der Gegendruck der Plastifizierschnecke ist geringer als der GID-Druck von 225 bar GID-Druck.

Arbeitspaket 8: Entwicklung Fügeverbindung Kreuzungsstelle Faserbündel

Für die im Workshop erarbeiteten Lösungen wurde zur Absicherung der Herstellbarkeit und zur Erprobung der Festigkeit der Verbindung ein Umformwerkzeug erstellt in dem unterschiedliche Varianten der Knoten mit Tapes und Pultrusionsprofilen hergestellt werden können.

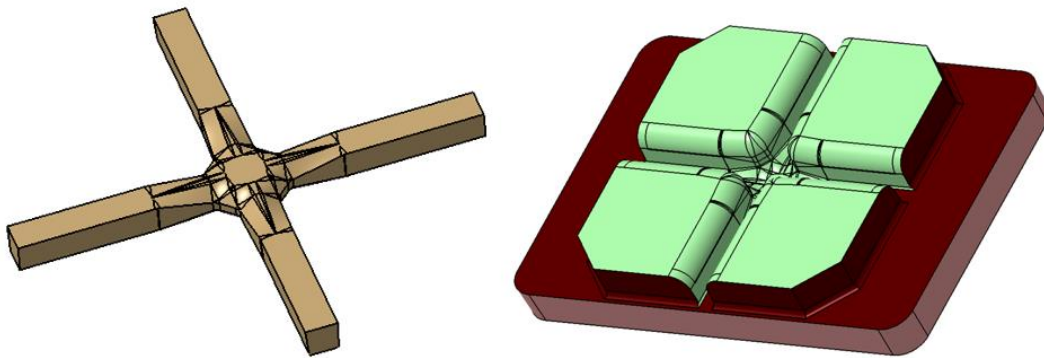


Abbildung 64: Geometrie Knotenelement für Versuche inkl. Formplatte unten

Für die Herstellung der Knoten wurde ein bestehendes Formenträger-Spritzgusswerkzeug (Stammwerkzeug) ausgewählt (Abbildung 65).

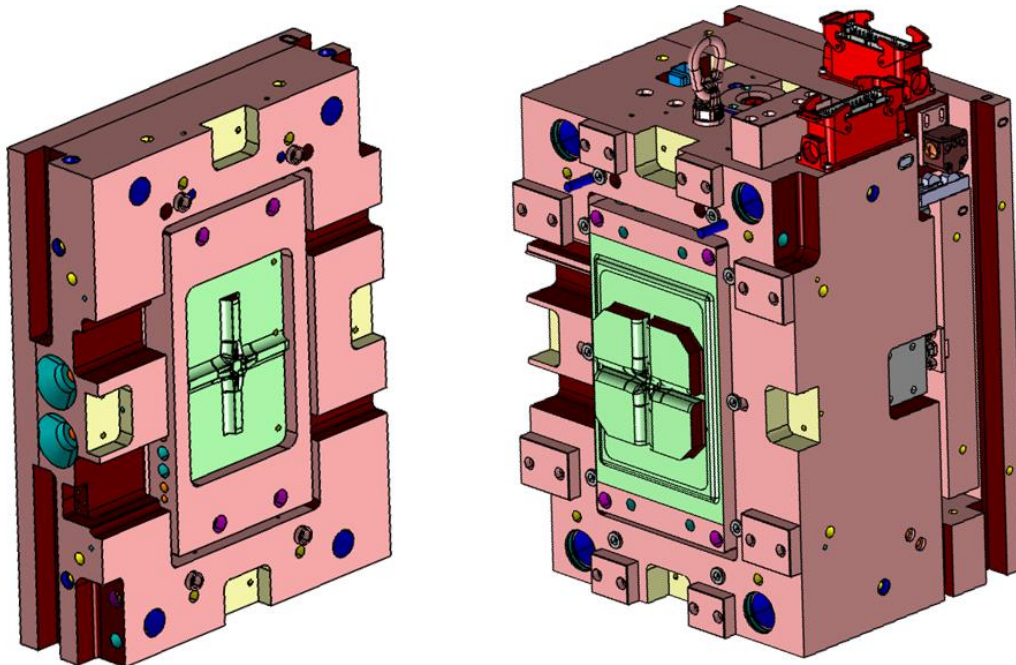


Abbildung 65: Formenträger-Spritzgusswerkzeug inkl. Knotenelement Formplatten.

In Verbindung mit einer vertikalen Spritzgießmaschine vom Typ Engel mit 400t Schließkraft können die Knotenelemente mit einer Pressenbewegung ohne aufwendiges Haltekonzept im Werkzeug hergestellt werden.

Im Zuge der Bauteilherstellung ist die Idee entstanden, das Handling der Stäbe anderweitig zu gestalten, um auch die Über-Kreuz-Positionierung im Umformwerkzeug zu vereinfachen. Durch diese Lösung soll auch das Handling der Stäbe im Werkzeug vereinfacht werden, um komplexere Stabarmierungen realisieren zu können (Abbildung 66)

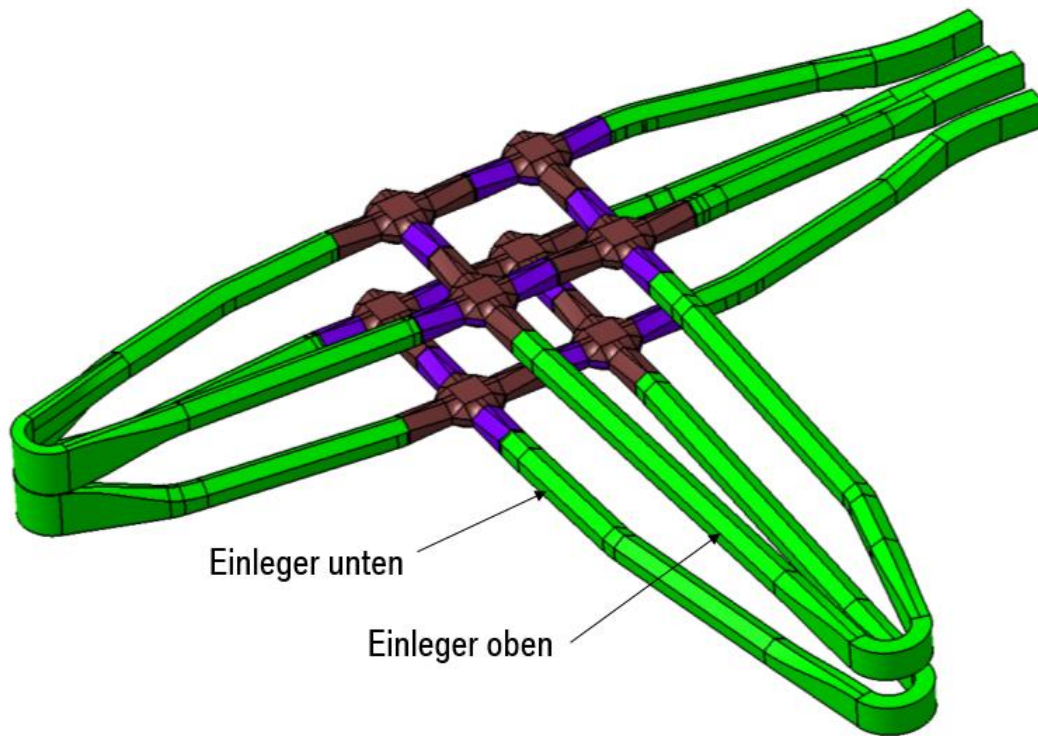


Abbildung 66: Pultrusionsprofil-Einleger T-Knoten

Arbeitspaket 9: Versuchsteileherstellung Stabumformung

a) Beschaffung Werkzeuge, Peripherie und Halbzeuge

Das Arbeitspaket wurde von BMW erarbeitet. Für die Umformung der Stäbe zum T-Profilknoten wurde eine bestehende Engel 400 Spritzpresse ausgewählt. Durch die Bauweise der Maschine (Vertikal fahrende SchlieÙe) ist das Einlegen der Stäbe erleichtert und es müssen keine speziellen Fixierungen/ Haltekonzepte erarbeitet werden. Als Spezifikation wurden einfache Aluminium-Werkzeuge ohne zusätzliche Schieber festgelegt. In Abbildung 67 sind die Werkzeughälften für einen der Profilknoten dargestellt.

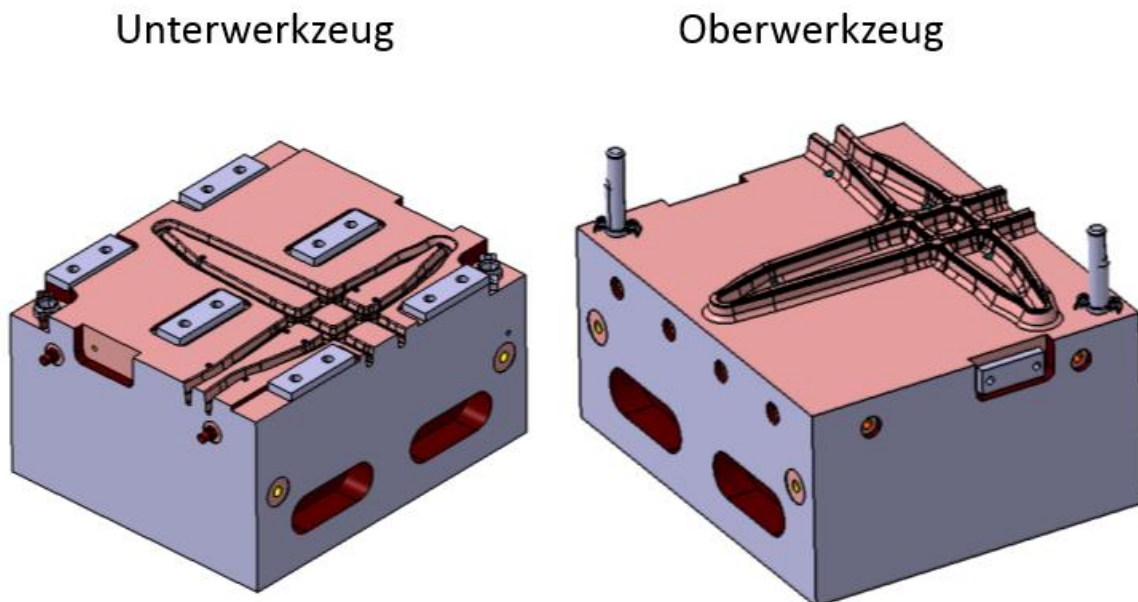


Abbildung 67: Umformwerkzeug T-Profilknoten

Für die Umformung der Stäbe zu späteren Einlegeumfang für das Spritzgießen wird für die vorausgehende Aufheizung ein Warmluftofen mit Gittereinschüben verwendet, der im LITZ Technikum der BMW Group in Landshut vorhanden und von der Größe ausreichend ist.

Für die Beschaffung der Halbzeuge wurden die Abwicklungen der Stäbe (Abbildung 68) im CAD gemessen und mit einem Aufschlag von 10mm versehen.

Abmessungen:

Strang 1:	886mm
Strang 2:	705mm
Strang 3:	913mm
Strang 4:	663mm

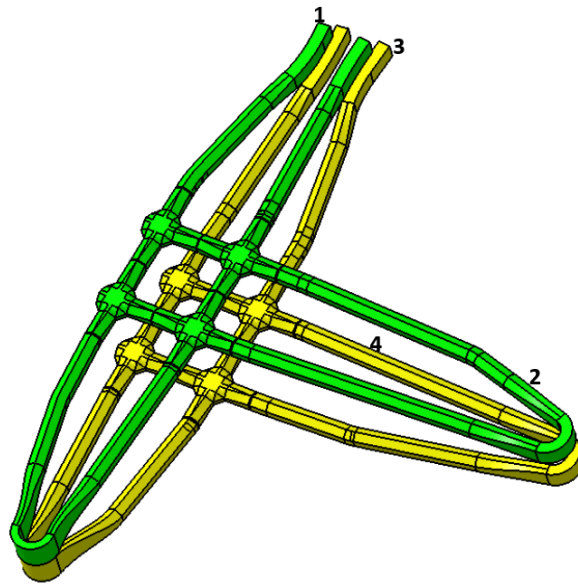


Abbildung 68: Bestimmung benötigte Stablängen

b) Versuchsvorbereitung

Für die Bauteilherstellung wurde der Ofen auf 300°C geheizt. Dies liegt ca. 30°C oberhalb der vom Lieferanten angegebenen Schmelztemperatur, führte aber zu keiner Materialschädigung. Der Temperaturüberschuss wurde für die Handlingszeit und den Werkzeugkontakt bis zur Umformung benötigt. Der Ofen wurde möglichst nah an der Spritzpresse positioniert, um kurze Handlingszeiten zu ermöglichen.

Aufgrund der Materialstärke der Stäbe dauerte es ca. 7 min, bis diese vollständig und homogen erwärmt waren.

Das Werkzeug wurde auf 90°C aufgeheizt und mit Trennmittel behandelt. Dies wurde für die Entformung benötigt, da keine Auswerfer im Werkzeug vorhanden sind.

c) Versuchsdurchführung

Für einen unsymmetrischen Aufbau wurden für einen Knoten zwei Profile aufgeheizt (jeweils 100 mm² Querschnitt). Für den aus ersten Versuchen empfohlenen symmetrischen Aufbau (vgl. Ergebnisse von AP 2) wurden insgesamt drei Profile aufgeheizt: zwei mit 50 mm² und einer mit 100 mm² Querschnitt. Dies erhöhte aber auch die Handlings- und Einlegekomplexität, zumal dies im heißen Zustand der Profile erfolgen muss.

Bei der Versuchsdurchführung für beide Varianten kam es zu Problemen beim Einlegen der Stäbe in die Kavität. Im Bereich der 180°-Umlenkung waren die Soll-Profilquerschnitte im Werkzeug stark abgeflacht/umgeformt (Abbildung 69). Im Bereich 1 (Abflachung auf 8 mm) ließ sich das Profil gerade noch einlegen, nicht so im Bereich 2 (Abflachung auf 5 mm). Hier sperrte das Material im Bereich des schrägen Einlaufs und ließ sich auch nicht unter Zuhilfenahme von Hilfsmitteln wie Holzspateln usw. in die Kavität drücken.

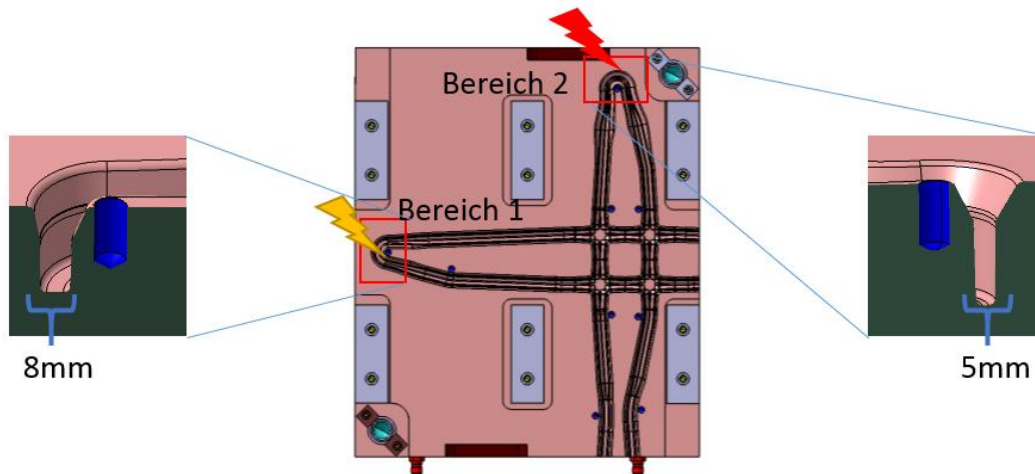


Abbildung 69: Kritische Profilquerschnitte im Umformwerkzeug

Zu erklären ist das mit dem Werkzeugkontakt und der dadurch erkaltenden Kunststoffhaut, welche die Positionierung behindert. Das Einlegen von aufgeheizten Stäben in Kavitäten mit stark abweichenden Querschnitten zum Ausgangshalbzeug bzw. in Querschnitte mit niedriger Höhe/Breite wurde im Projekt (und in vorigen Projekten) bisher nicht untersucht und stellt eine neue Herausforderung dar. Aus diesen Gründen konnte in der ersten Abmusterung kein T-Profilknoten hergestellt werden.

d) Optimierungsmaßnahmen

Gemeinsam mit dem internen Werkzeugbau der BMW Group am gerüsteten Werkzeug wurden die notwendigen Änderungen erarbeitet. Die Lösung sieht vor, die Bereiche 1 und 2 frei zu machen und eine zusätzliche Umformung über Schrägschieber zu ermöglichen (siehe Abbildung 70).

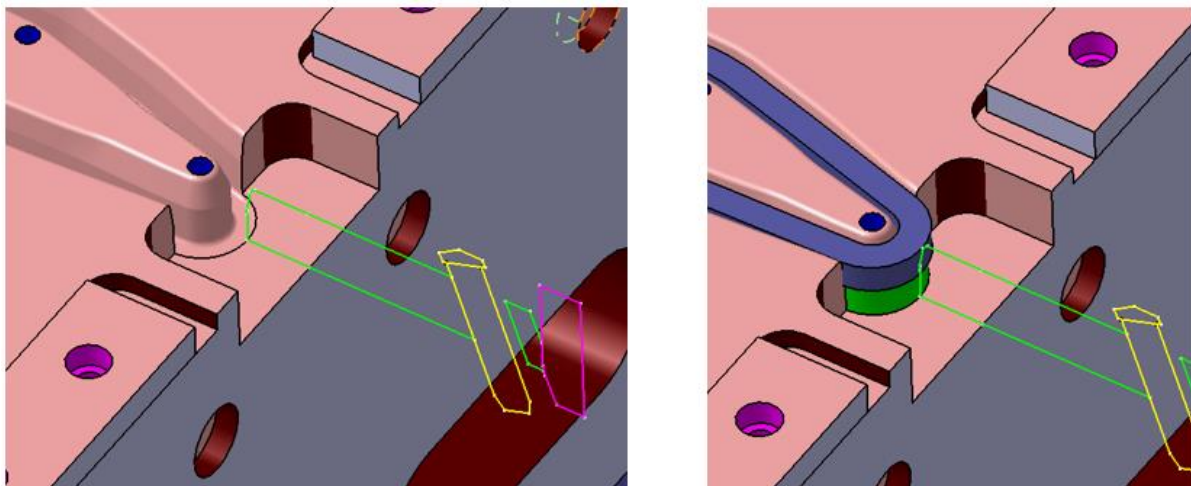


Abbildung 70: Konzept für Schieberintegration in Umformwerkzeug

Arbeitspaket 10: Versuchsteileherstellung Spritzgießen

Das Arbeitspaket 10 wurde von der Firma Eckerle durchgeführt. Aus der intensiven Zusammenarbeit mit BMW mit zahlreichen Maßnahmen zur fertigungstechnischen Optimierung wurde die Werkzeugkonstruktion finalisiert.

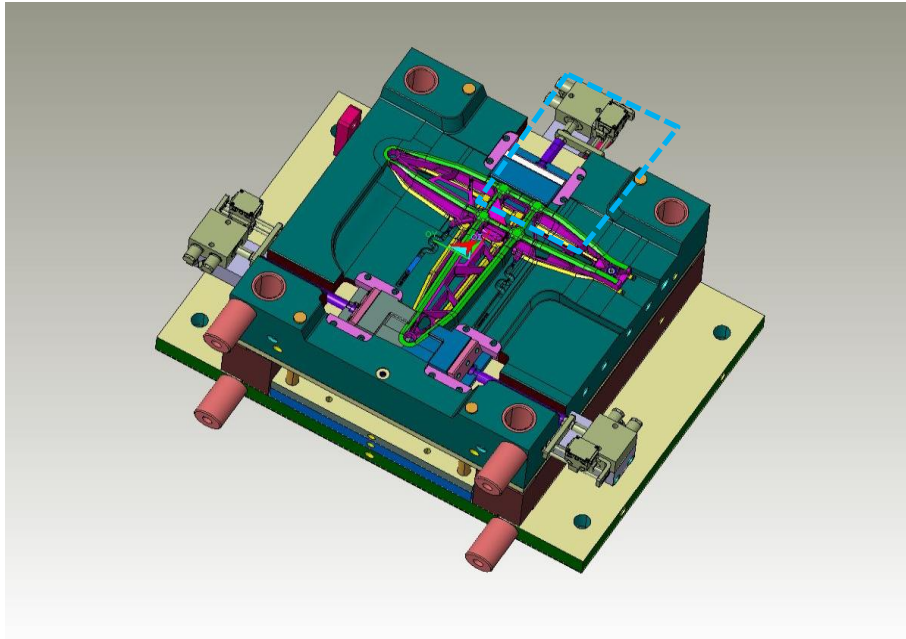


Abbildung 71: Auswerferseitige Formhälfte mit Schieber (blaue Markierung)

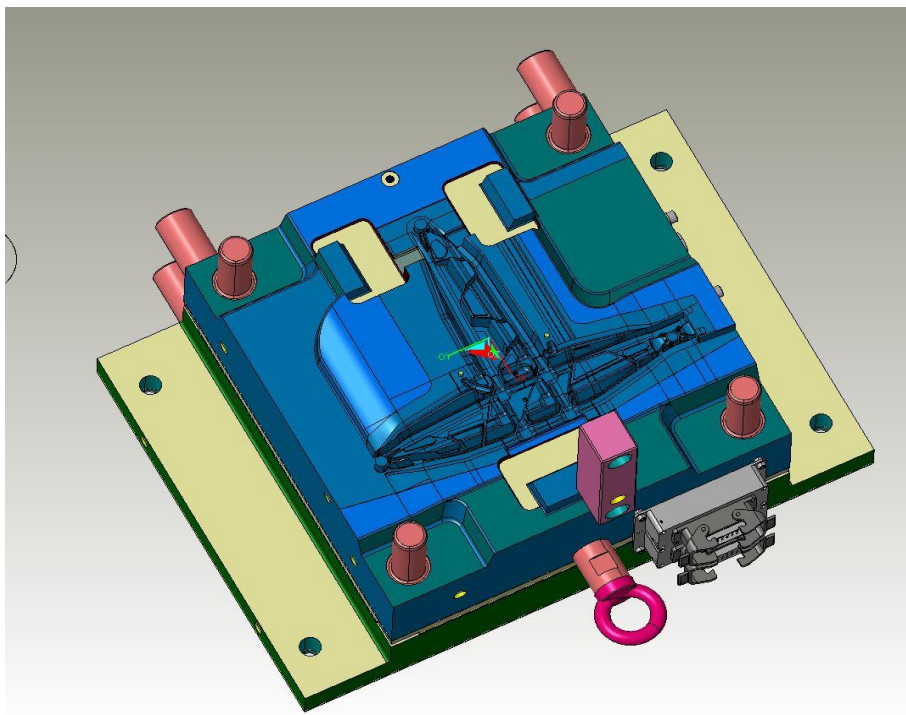


Abbildung 72: Düsenseitige Formhälfte

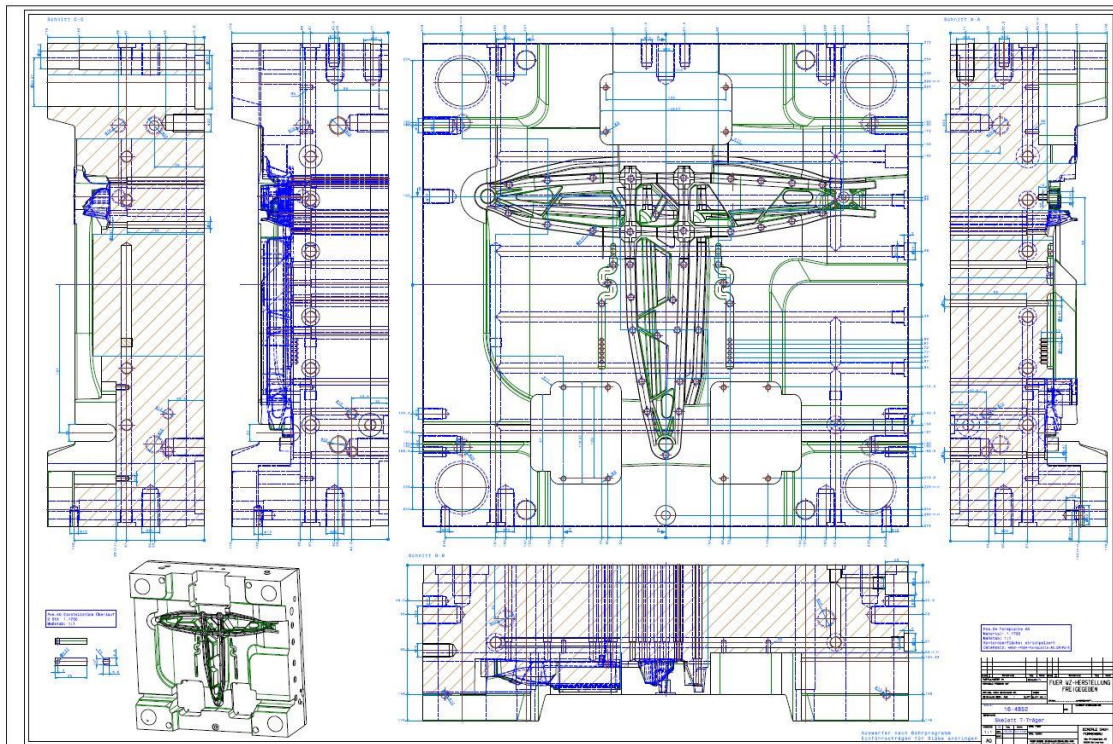


Abbildung 73: Zeichnungsstand Auswerferseite zum 26.09.2016

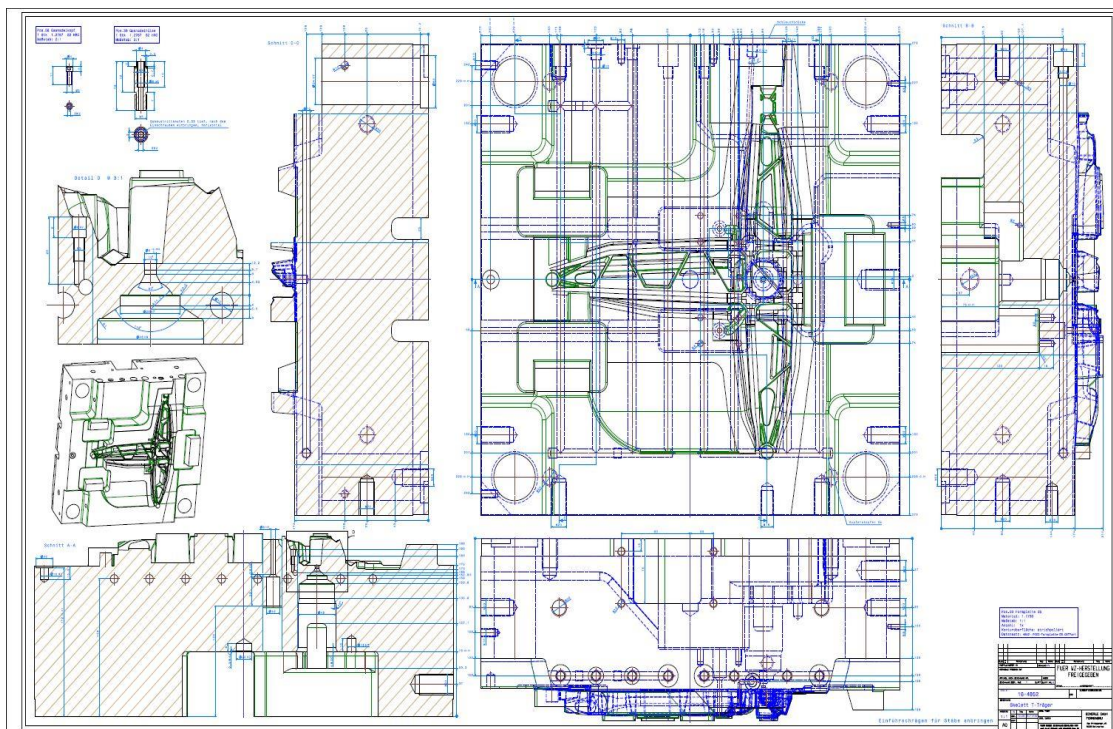


Abbildung 74: Zeichnungsstand Düsenseite zum 26.09.2016

Die Werkzeuge wurden bis auf die Tuschierarbeiten komplett im Zeitplan fertiggestellt. Die Fertigstellung und erste Teileherstellung (Abmusterung) erfolgte gemeinsam mit dem Lieferanten des GID-Steuergerätes in der Spritzerei der Fa. Eckerle.

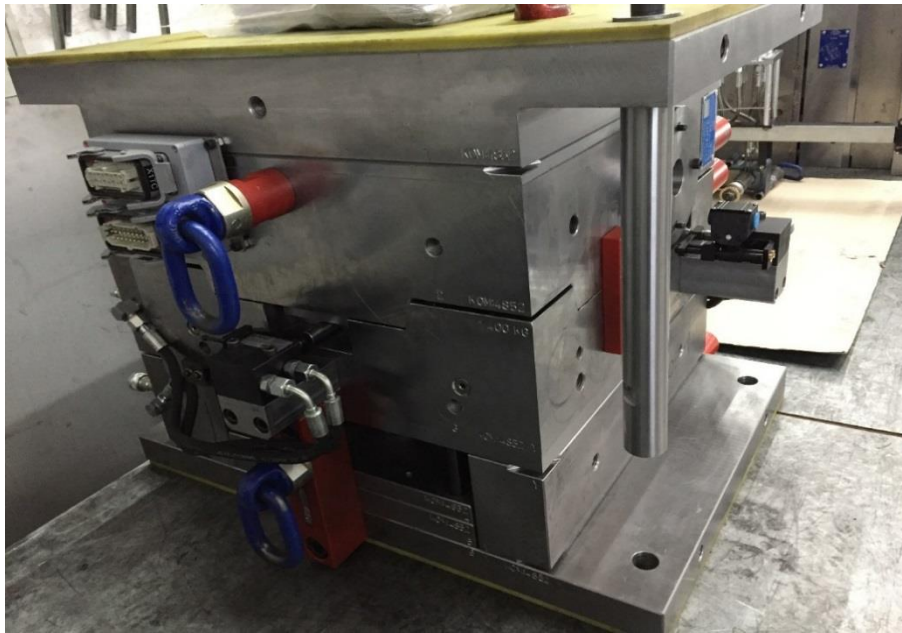


Abbildung 75: Aktueller Werkzeugstand Spritzgusswerkzeug

Arbeitspaket 11/12: Prüfung Komponenten und Abgleich Berechnung – Versuch

Es wurden die verschiedenen Schichtungsvarianten hinsichtlich ihrer Eigenschaften zur Kraftübertragung und auch die Schwächung des Stabes durch die Stabverbindung untersucht.

Im Diagramm Abbildung 77 werden die Ergebnisse der Tests dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass nur die einfachste 1x1-Schichtung im Kraftübertragungstest versagt. Schon die 1x2-Schichtung erreicht ein Kraftniveau von über 7KN.

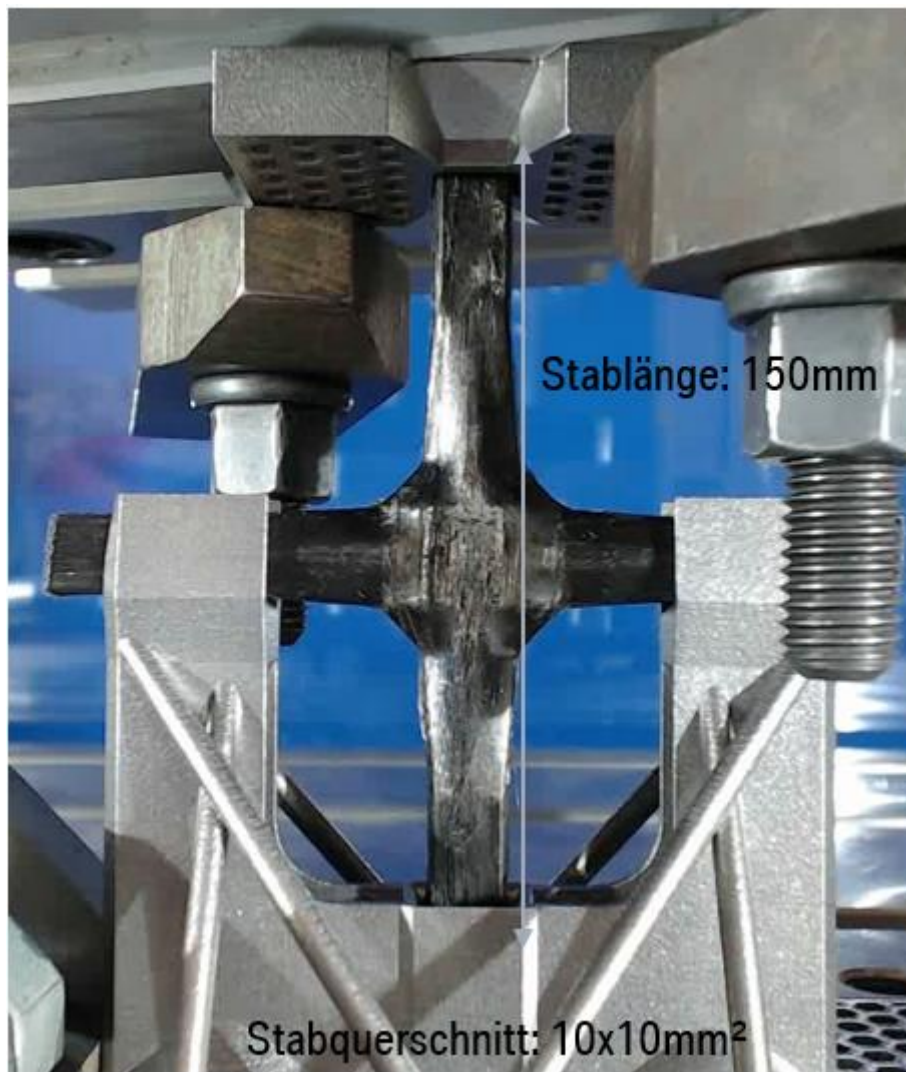


Abbildung 76: Prüfung Kraftübertragung der Stabverbindung

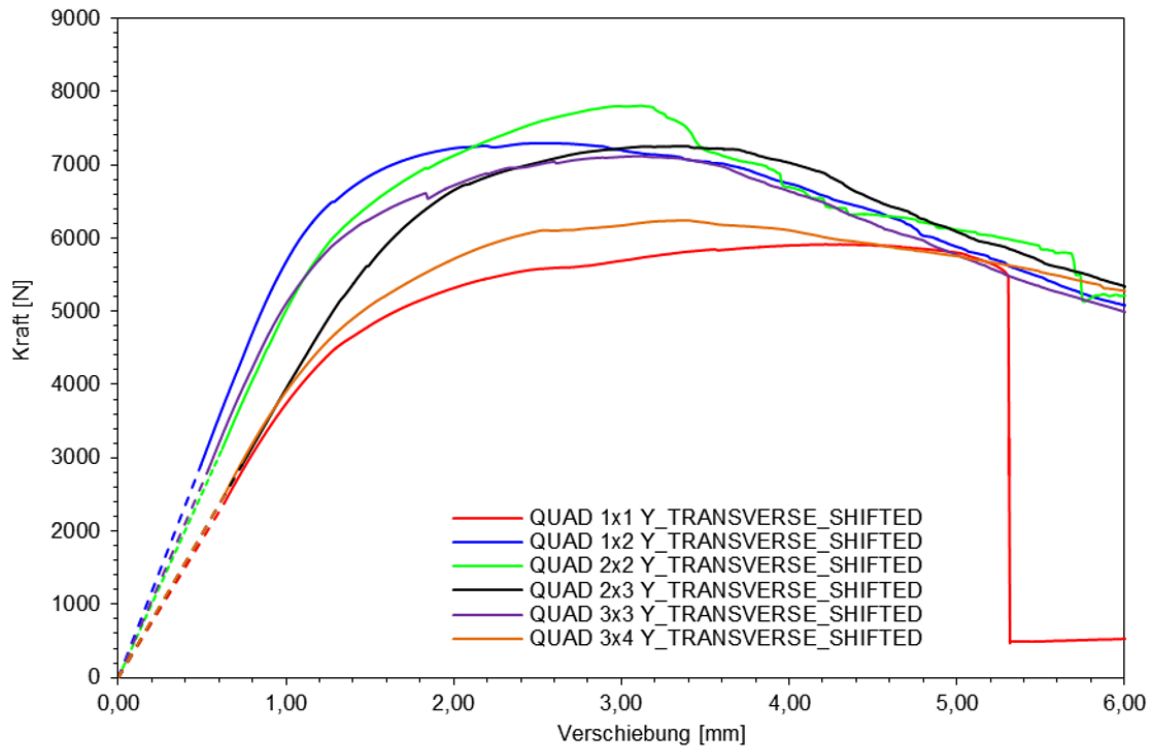


Abbildung 77: Ergebnis der quasistatischen Tests zur Kraftübertragung



Abbildung 78: Prüfung der Schädigung der Stabverbindung

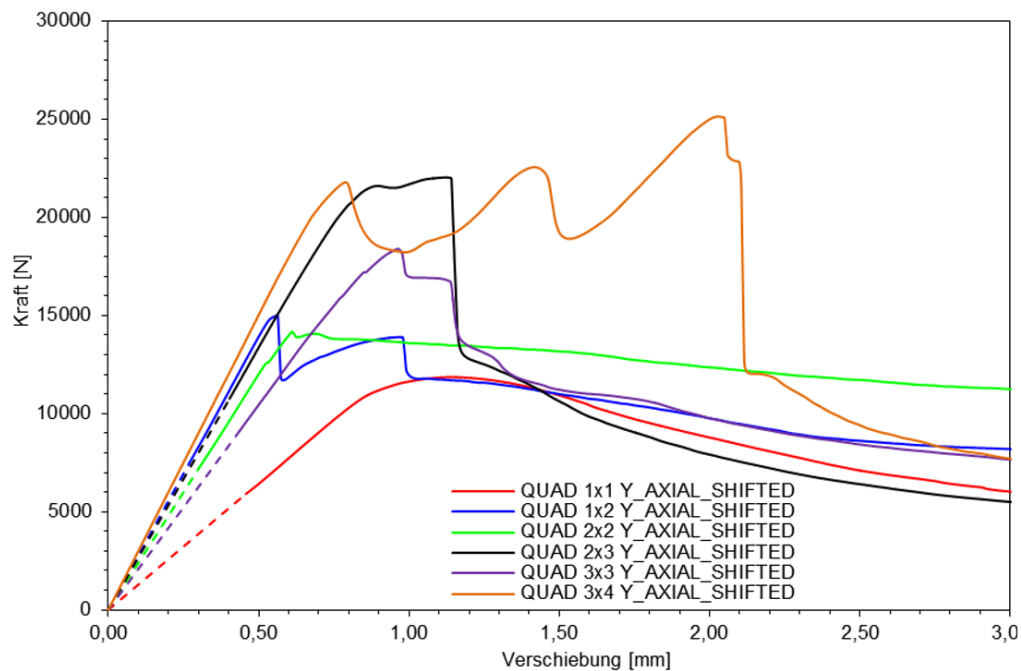


Abbildung 79: Ergebnis der quasistatischen Tests Schädigung

Bei den Tests zur Schwächung des Stabes durch die Stabverbindung haben sich die Ergebnisse aus der Berechnung bestätigt: Die symmetrischen Verbindungen haben eine höhere Steifigkeit und eine höhere Festigkeit. Die für die meisten Anwendungsfälle ausreichende und in der Herstellung einfache Stabverbindung mit einer 1x2-Schichtung ist als Kompromiss zwischen mechanischer Performance und fertigungstechnischer Serien-Umsetzbarkeit die sinnvollste Verbindung. Nur bei hohen Anforderungen hinsichtlich Festigkeit im Bereich einer Stabverbindung kann eine höhere Anzahl an Schichtungen sinnvoll sein.

Untersucht wurde weiterhin der MAI multiskelett T-Träger. Dazu wurde das in der folgenden Abbildung dargestellt Versuchsprogramm erstellt.








Name	Geschwindigkeit	Masse	Probe	Kommentar
Probe 1	0,5 mm/s	-	Zug z	
Probe 2	0,5 mm/s	-	Druck z	
Probe 3	0,5 mm/s	-	Zug y	 Einspannung links verrutscht
Probe 4	0,5 mm/s	-	Druck y	
Probe 5	0,5 mm/s	-	Zug x	 z-Verschiebung gesperrt
Probe 6	0,5 mm/s	-	Druck x	 z-Verschiebung gesperrt
Probe 7	0,5 mm/s	-	Zug x (unten)	

Abbildung 80: Versuchsprogramm

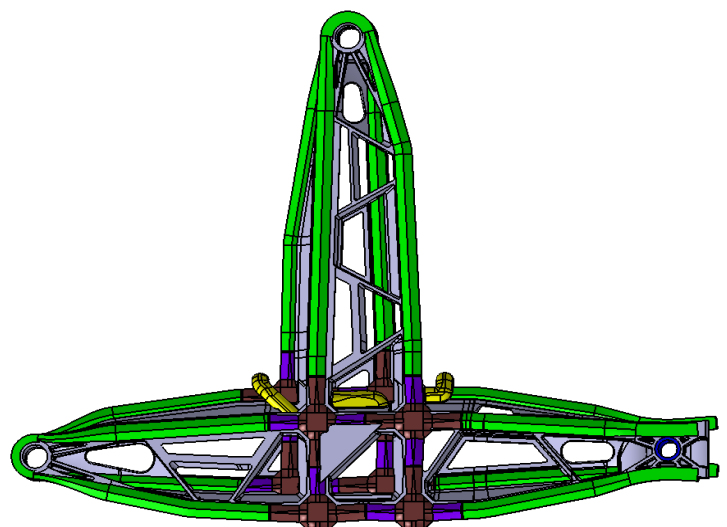


Abbildung 81: Zug- / Druckprüfung T-Träger

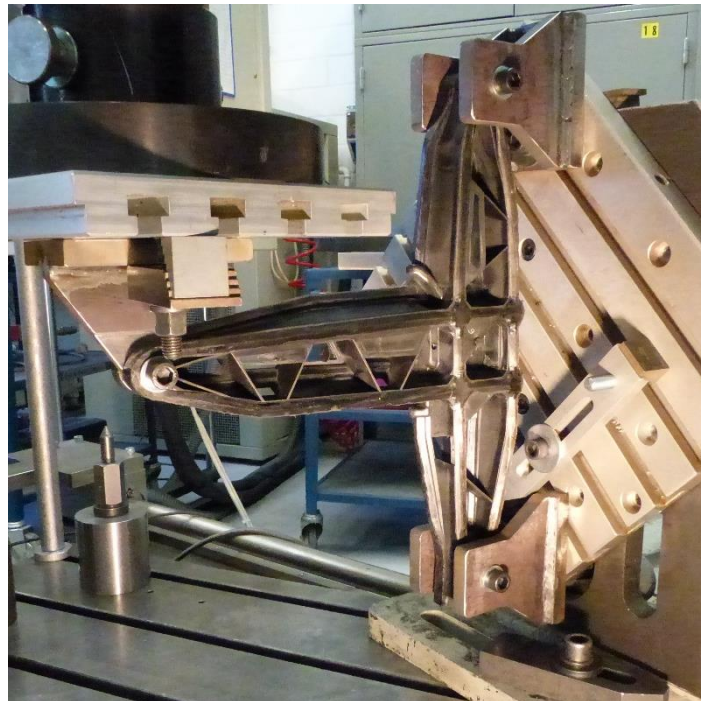


Abbildung 82: Druckprüfung in x-Richtung

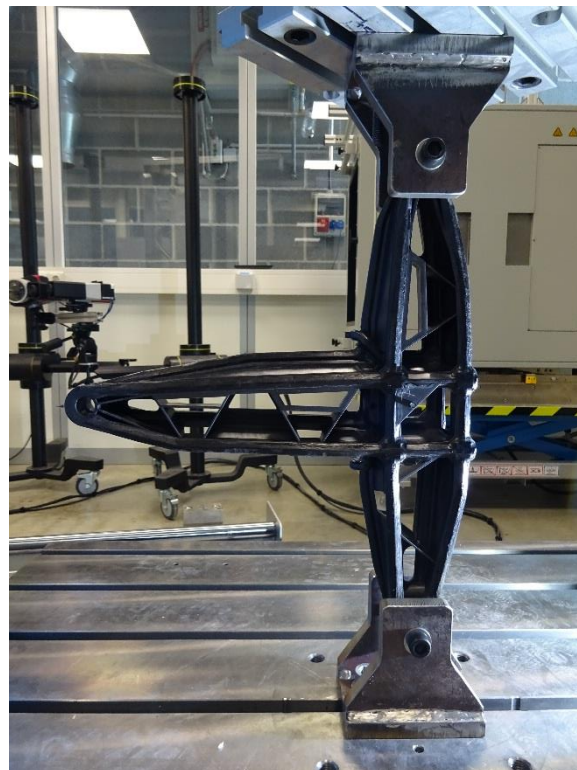


Abbildung 83: Zugprüfung in X-Richtung

Die Messdaten wurden ausgewertet und Schadensanalysen durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt den Messschrieb eines Zug-/Druckversuchs an einem T-Träger.

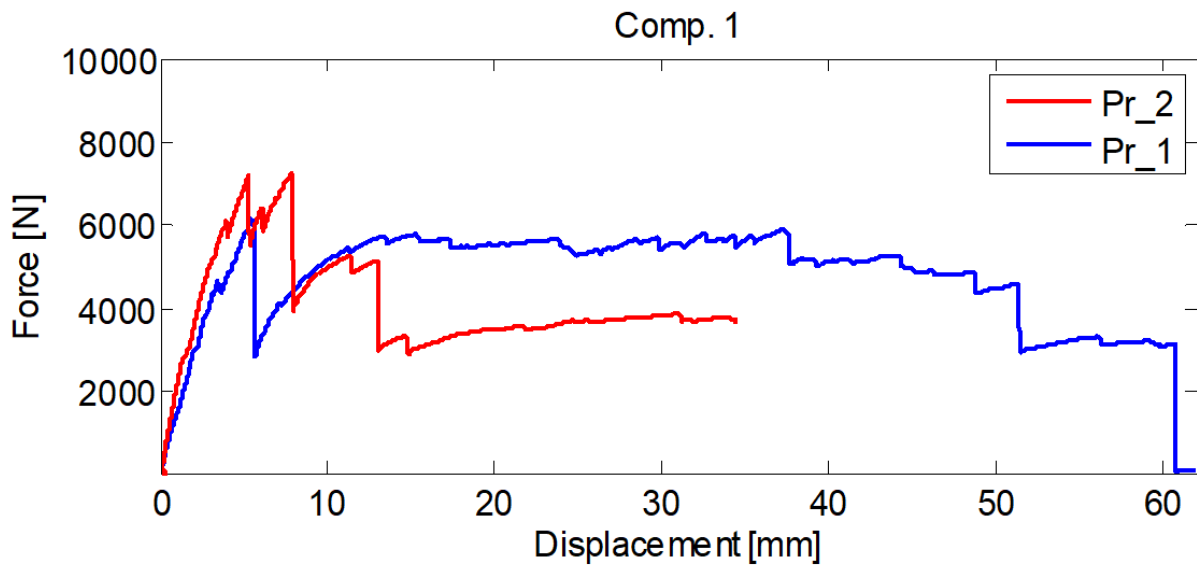


Abbildung 84: Hardwaretest; Beispiel einer Aufzeichnung eines Zug-/Druckversuches in z-Richtung.

Anhand der Versuchsreihe konnten die Simulation evaluiert werden. Es hat sich gezeigt, dass das Reißen der Fasern in der Simulation überschätzt wurde (siehe Abbildung 85)

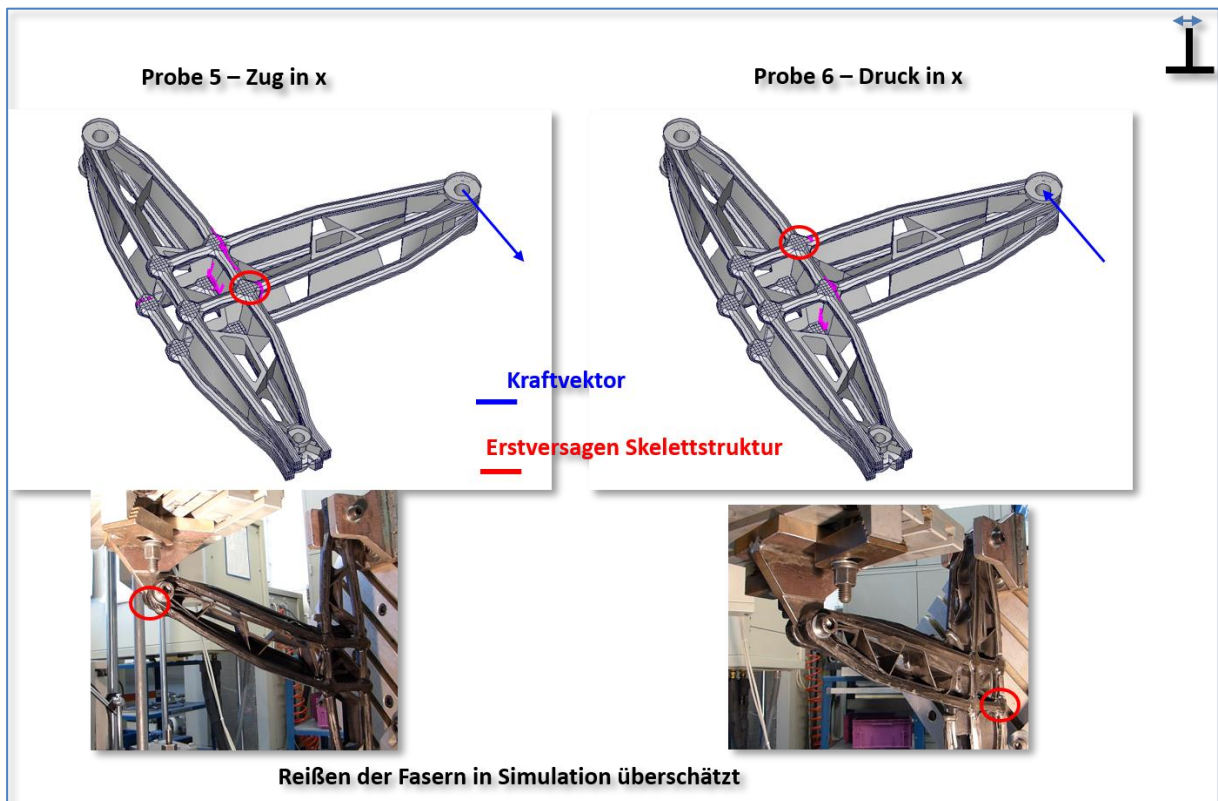


Abbildung 85: Schadensanalyse T-Träger

Fazit:

Auffällig war, dass allgemein über alle Versuche die Stabhaftung deutlich reduziert bzw. nicht gegeben war. Es kam zu großflächigen Ablösungen. Hierfür konnte innerhalb der Projektlaufzeit noch keine schlüssige Erklärung gefunden werden. Probleme dieser Art sind im Vorgängerprojekt MAI skelett nicht aufgetreten. Die Ursachen wurden außerhalb des Projekts bei BMW erforscht. Eine Wiederholung der Versuche mit Bauteilen mit guter Stabhaftung ist geplant.

Abgleich Berechnung – Versuch

Abgleich des Kreuzknoten-Modells

Auf Basis der Stauch- sowie Biegeversuche (siehe Abbildung 86) aus AP2.11 konnten die unterschiedlichen entwicklungsnahe Kreuzknoten-Geometrien, die in AP2.5 entworfen wurden, bewertet werden.

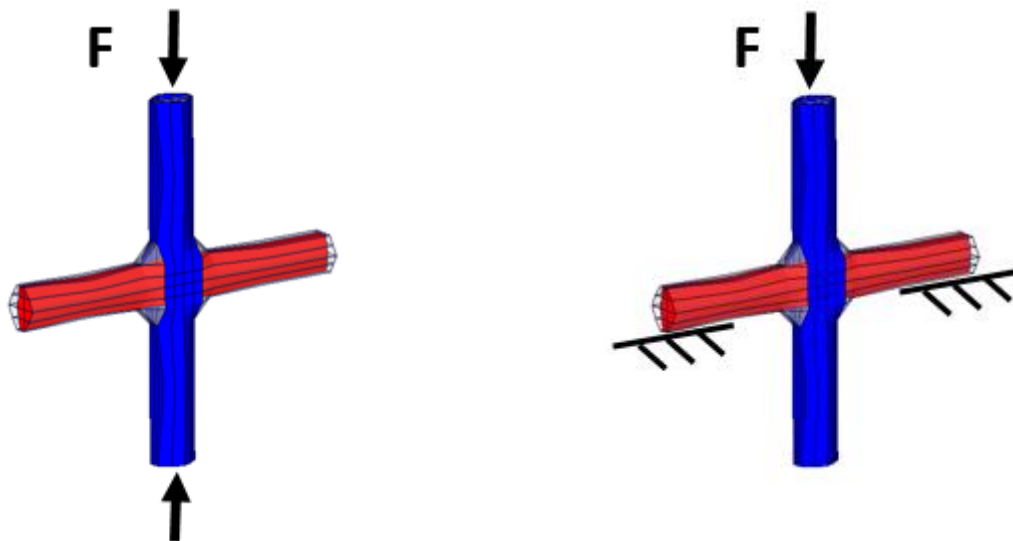
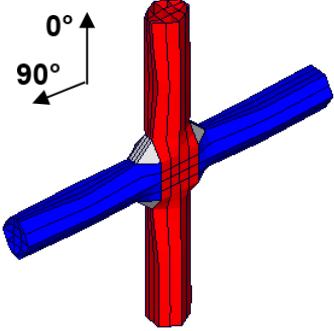
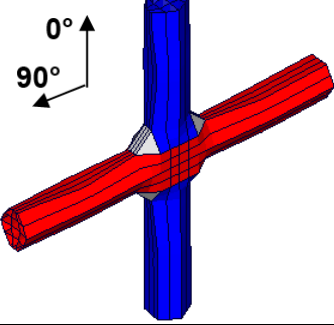
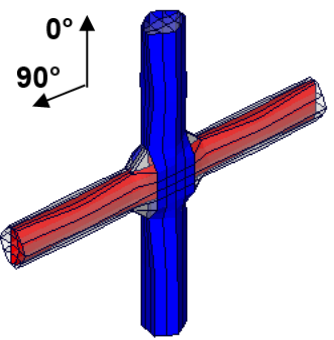
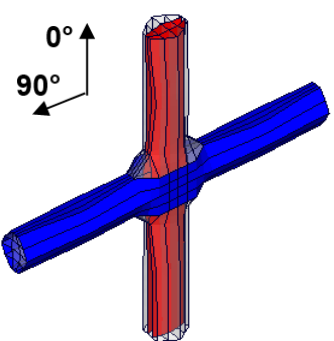


Abbildung 86: Schematische Darstellung des Stauch- und 3PB-Versuchs

Folgende Abbildung gibt einen Überblick der untersuchten Modellierungsvarianten und der Resultate des Abgleichs mit den Versuchen.

Variante/ Art der Orientierung		Abgleich mit dem Stauch-Versuch erfolgreich bedingt erfolgreich nicht erfolgreich	Anmerkungen
<p>Variante 1</p> <p>3D Schalen-Modellierung</p> <p>Bevorzugte Orientierung im Knoten: 0°</p>		<p>Festigkeit Steifigkeit Deformation Versagen</p>	
<p>Variante 2</p> <p>3D Schalen-Modellierung</p> <p>Bevorzugte Orientierung im Knoten: 90°</p>		<p>Festigkeit Steifigkeit Deformation Versagen</p>	<p>Gutes Deformationsbild trotz Unterbrechung der 0°-Lagen</p>
<p>Variante 3</p> <p>3D Schalen-Modellierung</p> <p>Bevorzugte Orientierung im Knoten: - innen: 90° - außen: 0°</p>		<p>Festigkeit Steifigkeit Deformation Versagen</p>	<p>Modellierung mit größter geometrischer Nähe zum 2x1-Knoten</p>
<p>Variante 4</p> <p>3D Schalen-Modellierung</p> <p>Bevorzugte Orientierung im Knoten: - innen: 0° - außen: 90°</p>		<p>Festigkeit Steifigkeit Deformation Versagen</p>	<p>Modellierung mit größter geometrischer Nähe zum 2x1-Knoten</p>

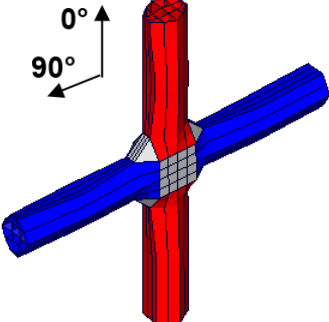
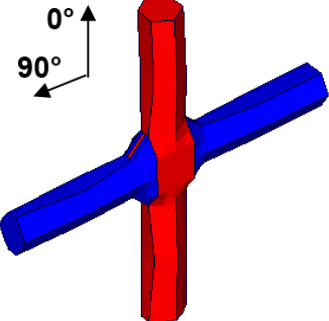
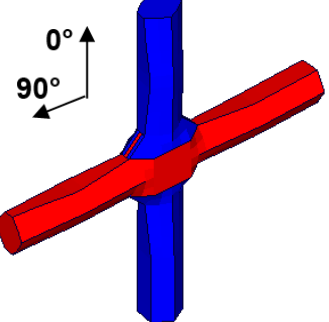
<p>Variante 5</p> <p>3D Schalen-Modellierung</p> <p>Bevorzugte Orientierung im Knoten: - symmetrischer 0°-90°-Lagenaufbau</p>		<p>Festigkeit Steifigkeit Deformation Versagen</p>	
<p>Variante 6</p> <p>Solid-Modellierung:</p> <p>Bevorzugte Orientierung im Knoten: 0°</p>		<p>Festigkeit Steifigkeit Deformation Versagen</p>	<p>Materialkarte un-angepasst</p>
<p>Variante 7</p> <p>Solid-Modellierung:</p> <p>Bevorzugte Orientierung im Knoten: 90°</p>		<p>Festigkeit Steifigkeit Deformation Versagen</p>	<p>Materialkarte un-angepasst</p>

Abbildung 87: Untersuchte Kreuzknoten-Modellierungsvarianten

Die Varianten 3 bzw. 4 wurden wegen der – abgesehen von der Steifigkeit – guten Validierungsergebnisse und der besten geometrischen Übereinstimmung mit der realen Kreuzknotengeometrie zur weiteren Untersuchung in 3-Punkt-Biege(3PB)-Simulationen verwendet. Der Vergleich der Kraft-Weg-Kurven von Versuch und numerischer Berechnung ist in Abbildung 88 zu sehen. Die Festigkeit wurde mit vorliegender Materialkarte zwar stark überschätzt, jedoch entspricht das Erst- sowie Nachversagen weitgehend den Testergebnissen (vgl. auch Abbildung 89).

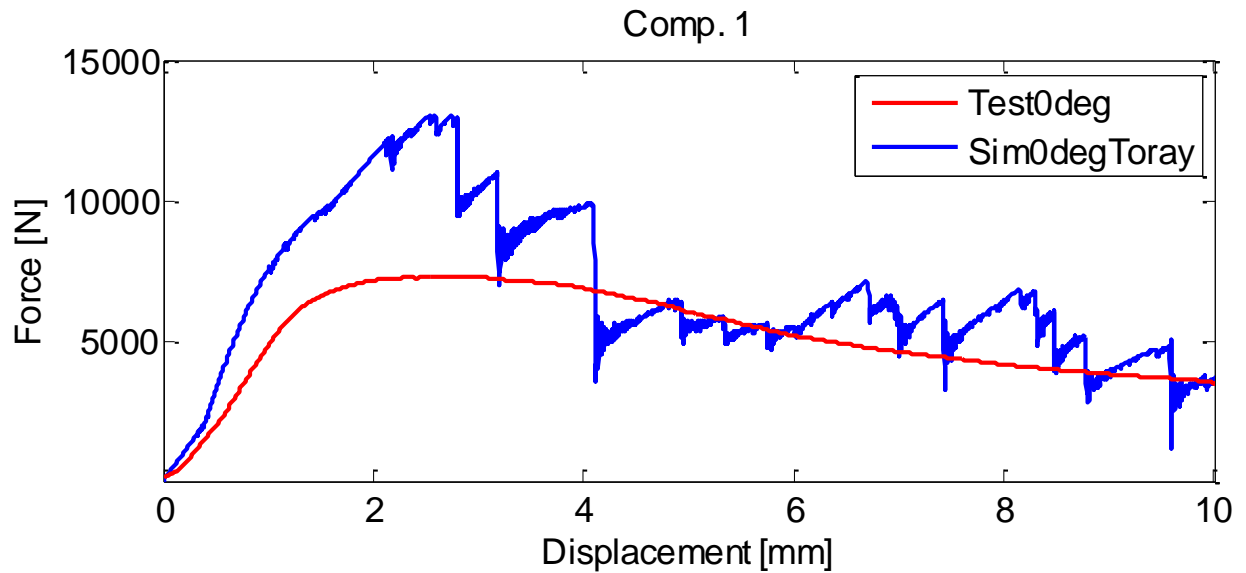


Abbildung 88: Abgleich 3PB Test vs. Simulation

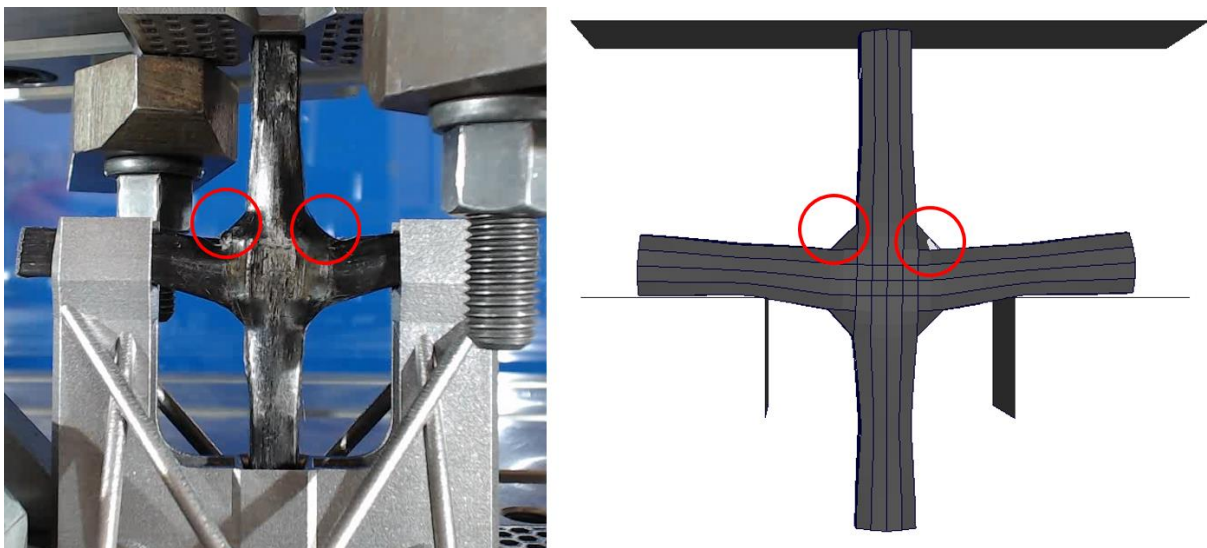


Abbildung 89: Erstversagen 3PB Test vs. Simulation

Nach den Machbarkeitsstudien für die Fertigung des Kreuzknotens in AP2.8 wurden in Q4/2016 mit alternativen Herstellverfahren erneut Proben erstellt, die jedoch auf Grund von zu niedrigem Verpressungsdruck und zu geringem Matrixanteil stark streuende Prüfergebnisse zeigten und somit für den erneuten Vergleich mit der Simulation nicht herangezogen wurden.

Abgleich des T-Knoten-Modells

An die quasistatischen Belastungsversuche am T-Knoten aus AP 2.5 anschließend wurden Validierungssimulationen mit zum Kreuzknoten analoger Modellierung erstellt.

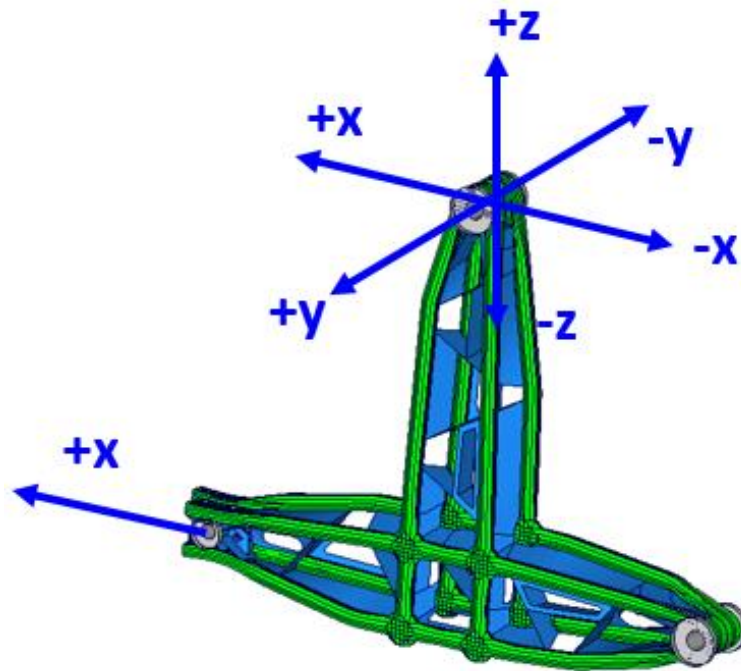


Abbildung 90: T-Knoten

Als Beispiel für die simulative Validierung des T-Knoten-Modells soll hier die Biegung in $-y$ -Richtung dienen:

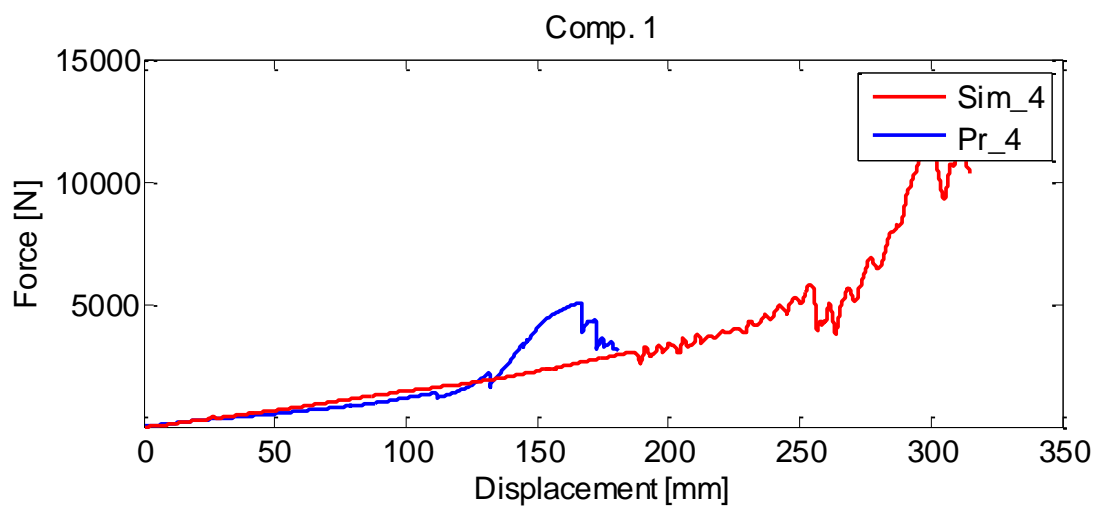


Abbildung 91: Kraft-Weg-Kurven Simulation vs. Versuch



Erstversagen

Abbildung 92: Erstversagen in Simulation und Versuch

Aus dem Kraft-Weg-Diagramm (Abbildung 91) ist ersichtlich, dass zwar die Anfangssteifigkeit mit der Simulation (*Sim_4*) nachbildbar war, Bruchdehnung und Festigkeiten jedoch durch die Simulation in etwa um denselben Faktor gegenüber dem Hardwaretest (*Pr_4*) überschätzt wurden. Zudem wich im Beispiel das Versagensbild ab (siehe Abbildung 92). Die Abweichungen waren bei den übrigen Belastungen z.T. noch erheblicher (siehe Abbildung 93). Zu erklären sind die Unterschiede v. a. durch die schlechte Haftung zwischen unidirektionalen Stäbe und dem spritzgegossenen Material sowie erneut die auf Schalenbauteile kalibrierte Materialkarte.








Name	Probe		Steifigkeit	Festigkeit	Bruchdehnung	Erstversagen	
Probe 1	Zug z		✓	✓	✓	✗	vergleichbar bedingt vergleichbar abweichend
Probe 2	Druck z		✓	✓	✓	✗	
Probe 3	Zug y		✓	-	-	-	
Probe 4	Druck y		✓	✓	✓	✓	
Probe 5	Zug x		✓	✗	✓	✗	
Probe 6	Druck x		✓	✗	✓	✗	
Probe 7	Zug x (unten)		✗	✗	✗	✗	

Abbildung 93: Probenübersicht Vergleichbarkeit Simulation-Test

Arbeitspaket 13: Wirtschaftlich-technologische Betrachtung

Folgende Ziele hat sich das MAI Carbon Forschungscluster vorgenommen:

- Reduzierung der Zykluszeit auf weniger als eine Minute
- Reduzierung der Prozesskosten (im Vergleich zu 2010) um 90 Prozent
- Steigerung der Prozesseffizienz um 60 Prozent
- Reduzierung des Abfalls (Verschnitts) im Produktionsprozess auf kleiner 10 Prozent
- Erhöhung der Recyclingrate um 80 Prozent
- Positive CO₂ Bilanz

Zykluszeit

Einzig die Reduzierung der Taktzeit auf weniger als eine Minute konnte innerhalb des Projektes nicht gänzlich erreicht werden. Mit noch 75 Sekunden wurde dieses Ziel knapp verfehlt. Bestimmend war hier in erster Linie der Spritzgussprozess.

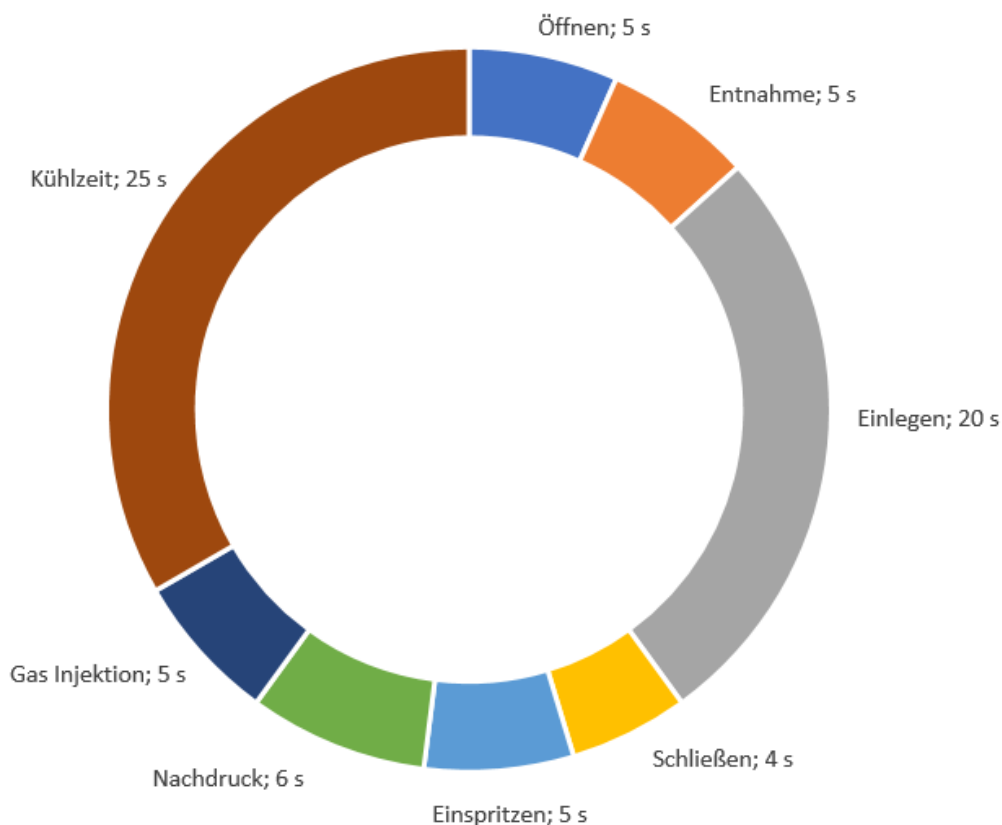


Abbildung 94: typische Taktzeiten für den Spritzguss

Allerdings hat das erforschte Verfahren das Potenzial bewiesen, die Taktzeiten gegenüber dem heutigen Standard erheblich zu verkürzen.

Reduzierung Prozesskosten und Steigerung der Prozesseffizienz

Durch das vorgestellte Verfahren konnte der Produktionsprozess auf drei Prozessschritte reduziert werden. Aufwändige Nachbehandlungen wie Pressen von Preforms oder Tempern entfielen. Dadurch konnten die Prozesskosten signifikant reduziert werden.

Die proportionalen Herstellkosten für CFK-Bauteile sanken erheblich durch

- die Verwendung von Recyclingmaterial,
- den Entfall von Anlagentechnik,
- die Reduzierung von Montagekosten sowie
- die für den Zusammenbau erforderlichen Anlagentechnik und
- die Reduzierung des Verschnitts auf unter 5 Prozent.

Ein weiterer Vorteil ist, dass die Bauteile nach dem Spritzgussprozess final fertig sind und nicht noch nachbearbeitet (z. B. befräst) werden müssen. Bei der Betrachtung des Stabumformungsprozesses fällt auf, dass mehrheitlich die Materialkosten zu Buche schlagen.

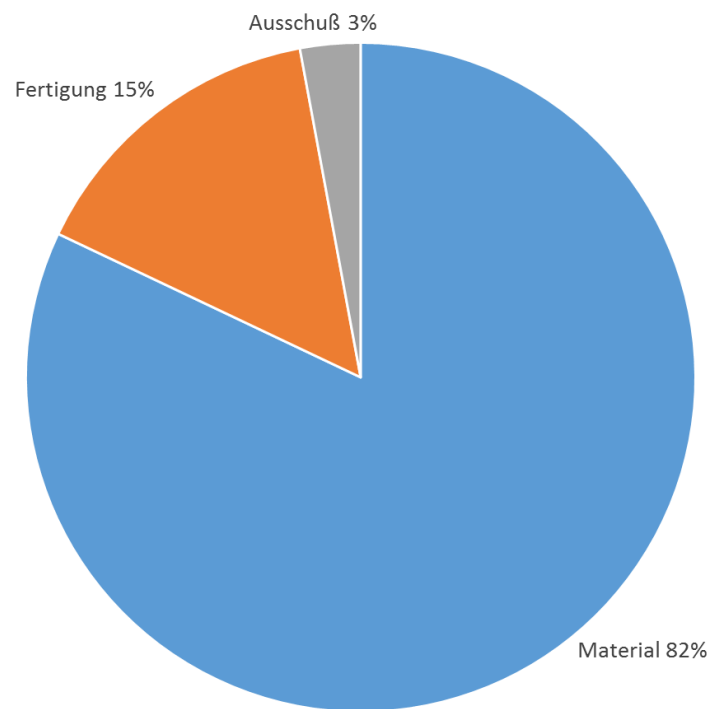


Abbildung 95: Kostenaufteilung Stabumformung

Im Gesamtherstellungsprozess zeigte sich, dass auch hier die Kosten für die Stäbe bestimmend sind.

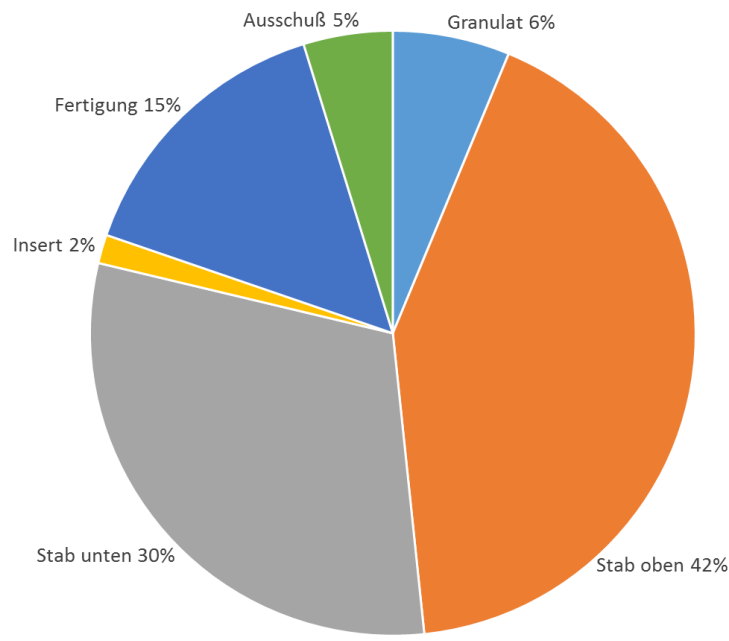


Abbildung 96: Kostenaufteilung Gesamtprozess, inkl. Spritzguss

Ressourceneffizienz:

Recyclingrate und Verschnitt:

Durch das vorgestellte Verfahren kann der Verschnitt bei der Herstellung von FVK von teilweise bis zu mehr als 20 Prozent auf weniger als 5 Prozent signifikant reduziert werden. Hinzu kommt, dass durch die Verwendung von Recyclingmaterial und die Verwendung des Spritzgießprozesses die Materialeinsatzkosten sinken.

CO₂ Bilanz:

Insbesondere für die Anwendung im Fahrzeugbau bieten die FKV aufgrund ihres - im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen - geringeren Gewichts ein erhebliches Potenzial zur CO₂ Einsparung.

Die Skelettbauweise weist durch folgende Merkmale eine positive CO₂-Bilanz auf:

- Durch Reduzierung des Einsatzes von neuen Endlosfasern ist die Skelettbauweise deutlich günstiger als die herkömmlicher CFK-Bauweisen. Der Anteil neuer Endlosfasern beträgt nur noch ca. 30 Prozent des Bauteilgewichtes.
- Recyclingfasern kommen beim Kunststoffspritzguss zum Einsatz.
- Der Bauteilverschnitt reduziert sich auf weniger als 5 Prozent.

BMW verwendet Kohlefasern, die mittels regenerativer Energie produziert werden, was die CO₂ Bilanz von FVK positiv beeinflusst.

Fazit:

In enger und vertrauensvoller Zusammenarbeit der Partner konnte mit MAI multiskelett eine Sprunginnovation zur Herstellung und verbreiteten Anwendung von FVK in vielen Anwendungsbereichen wie Fahrzeug-, Maschinen und Flugzeugbau erreicht werden. Nur durch die gute und interdisziplinäre Zusammenarbeit der Partner war es möglich, die exzellenten Ergebnisse zu erzielen. Die Versuche auf der Zugmaschine haben gezeigt, dass die Knotenverbindungen extrem belastbar (bis zu 7.000 N, vergl. Abbildung 77) sind. Es hat sich gezeigt, dass mit dem MAI multiskelett-Verfahren sowohl die Prozess- wie auch die Herstellkosten deutlich reduziert werden können. Mit dem vorgestellten Verfahren sind Herstellkosten von weniger als 18 € pro Kilogramm Bauteil realistisch. Die ehrgeizigen Projektziele konnten auch in Bezug auf Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erreicht werden.

2. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis ist Bestandteil der Erfolgskontrollberichte der Partner.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In den letzten Jahren kommt dem Leichtbau, insbesondere im Automobilbau, eine immer größer werdende Bedeutung zu. Umweltaforderungen und Elektromobilität begünstigen diese Entwicklung. Damit einhergehend hat die Verarbeitung von CFK-Bauteilen einen völlig neuen Stellenwert erhalten und ist mittlerweile in den Entwicklungskonzepten moderner Fahrzeug fest verankert.

Mit den Fahrzeugen der BMW i-Reihe, bei denen erstmalig CFK-Strukturbauteile im Serienautomobilbau Verwendung fanden, hat die BMW AG einen Technologiewandel vollzogen und die Technologieführerschaft auf diesem Gebiet erlangt. Durch die hohe Festigkeit des Werkstoffs bietet die Fahrgastzelle den Insassen bestmöglichen Schutz bei Unfällen, kann durch ihr niedriges Gewicht aber gleichzeitig dazu beitragen, dass Mehrgewicht des Elektrofahrzeugs auszugleichen, das durch die Hochvoltbatterien anfällt. Hohe Invest- und Produktionskosten stellen jedoch ein Hemmnis für eine breite Anwendung dieser Technologie dar. Allerdings bietet die Fertigungstechnik, gleich ob RTM oder andere Prozesse, noch ein großes Potenzial hinsichtlich Zeit- und Kosteneinsparung. Um im Bereich der Rohmaterialien Kosten einzusparen gilt es, die Materialeinsatzquote (Verschnitt) deutlich zu verbessern und die Zykluszeit zu minimieren. Darüber hinaus müssen geeignete und wirtschaftliche Recyclingtechnologien für CFK gefunden werden. Durch intensive Forschung an innovativen Herstellprozessen für CFK-Bauteile, insbesondere im Spitzencluster MAI Carbon, so auch in den Projekten MAI skelett und MAI multiskelett konnte aufgezeigt werden, wie diese Hemmnisse beseitigt werden können.

Derzeit werden FVK hauptsächlich mit duroplastischen Matrixmaterialien realisiert. Dies hat Nachteile hinsichtlich der Prozesskosten, der Funktionsintegration und dem Recycling. Bei duromeren FVK kann kein Wiedereinsatz durch Aufschmelzen der Matrix und erneute Formgebung erfolgen, so dass die Matrix vollständig entfernt werden. Im Sinne der Ressourcenschonung kommen den Aspekten Energieaufwand, Leichtbau, Materialverschnitt und Recycling besondere Bedeutung zu.

Die positiven Ergebnisse aus dem Vorgänger Projekt MAI skelett, gepaart mit der Resonanz auf die Forschungsergebnisse waren Ansporn und zugleich Verpflichtung, in einem weiteren Projekt die Forschungsarbeiten weiter voranzutreiben um kosteneffiziente, nachhaltige und gewichtssparende Fertigungs- und Anwendungsmöglichkeiten an Serienbauteilen zu entwickeln. Gepaart mit der Reduzierung der Prozess- und Herstellkosten für CFK-Bauteile leisten die Ergebnisse aus MAI multiskelett hierzu einen wichtigen, unverzichtbaren Beitrag.

Ein einzelner Partner wäre nicht im Stande gewesen, ein so komplexes Forschungsvorhaben alleine und mit eigenen Mitteln zu realisieren. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb des Verbundprojektes -entlang der Prozesskette- und durch die öffentliche Förderung war es möglich, die Kosten für die Partner in einem vertretbaren Rahmen zu halten und die ambitionierten Ziele in der vorgegebenen Zeit zu erreichen. Für die beteiligten Unternehmen sind die Forschungsergebnisse eigenständig nutzbar. Über die guten Kontakte zu Universitäten und Hochschulen, wie der Technischen Universität München, werden die Ergebnisse an Lehre und Forschung und somit an Studierende weitergegeben.

4. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens anderer Stellen

In Bezug auf Lastpfad orientiertes Design wurden am Fraunhofer ICT Entwicklungen vorangetrieben, mit denen ähnliche Ziele -wie die in MAI multiskelett formulierten- verfolgt wurden. Hierbei kommen als Einleger faserverstärkte thermoplastische UD-Bänder, die um Hülsen gewickelt werden, zum Einsatz (Abbildung 97). Bis auf das Konstruktionsprinzip Lastpfadgerechte Auslegung und einer ähnlichen Prozessabfolge sind aber große Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen. Zum einen unterscheiden sich die Dimensionen der UD-Bänder erheblich, so dass die übertragbaren Lasten des ICT-Ansatzes deutlich geringer sind. Des Weiteren ist daher Herausforderung einer Masseanhäufung mit Lösungsansatz GID auch nur beim Projekt MAI multiskelett gegeben. Zum anderen ist die Differenzierung im Knotenbereich. Diese werden im Projekt MAI multiskelett konkret hergestellt, während sie sich bei der ICT-Lösung nur aus der sich berührenden Verbindung der gewickelten UD-Materialien ergeben.

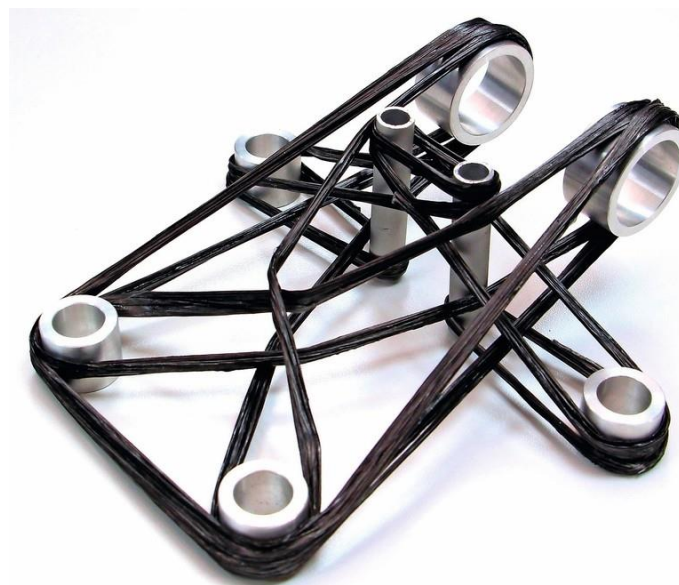


Abbildung 97: Beispiel für eine Lastpfad-optimierte Verstärkungsstruktur, die „beliebig komplex“ werden kann. Bilder: Fraunhofer ICT

5. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Auf der 17ten European Conference on Composite Materials (ECCM17) vom 26. bis 30. Juni 2016 wurde das Projekt einem internationalen Fachpublikum präsentiert.

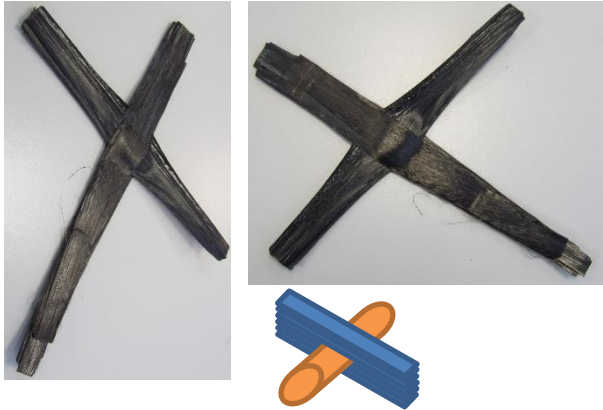
Eine weitere Präsentation erfolgte im Juli 2017 auf der MAI Carbon Ergebniskonferenz.

Durch die Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), der ein öffentlicher Bericht zugeht, werden die Forschungsergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

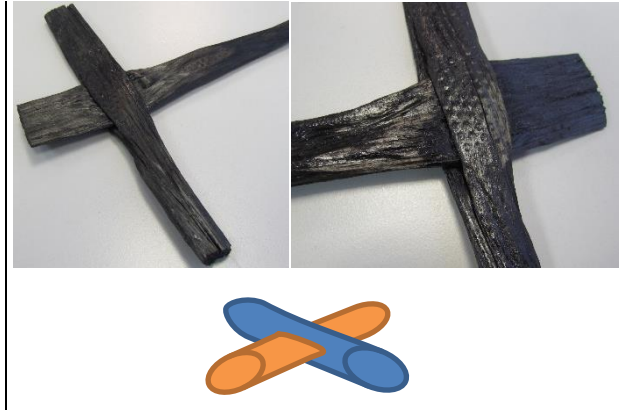
Weitere Veröffentlichungen sind im Rahmen der Offenlegung von angemeldeten Patenten zu erwarten. Insgesamt wurden von den Konsortialpartnern bisher mehr als zehn Erfindungsmeldungen eingereicht, von denen bereits neun zum Patent angemeldet wurden.

III. Anhang

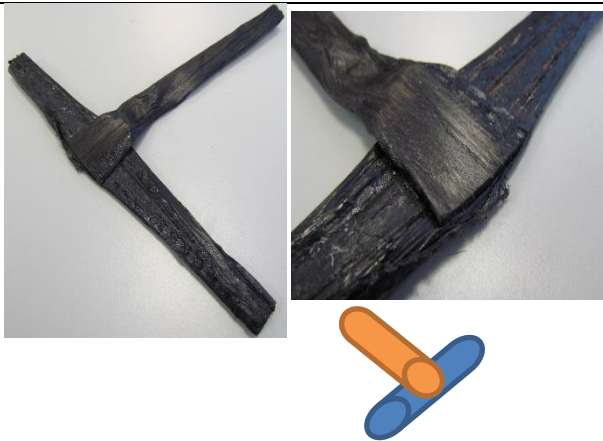
Knotenverbindungen



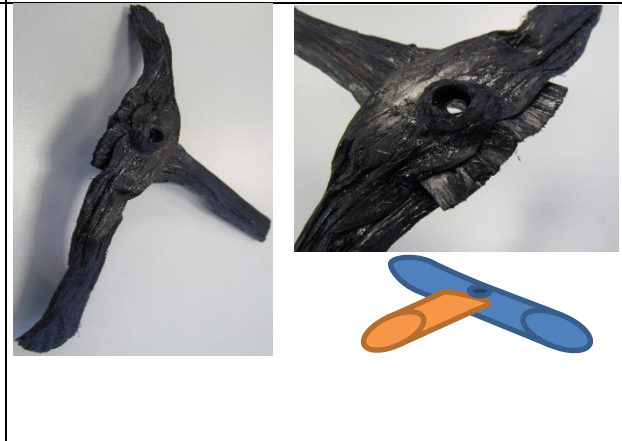
Abgeflachtes Profil zwischen mehreren Lagen Tape



Abgeflachtes Profil in gespaltenem Profil



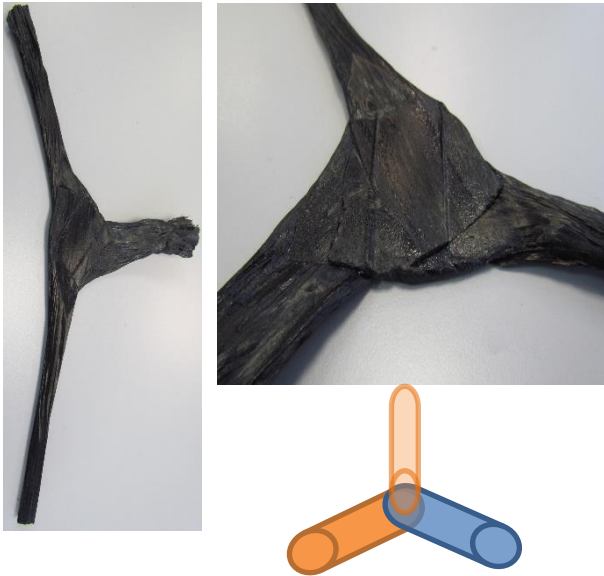
Zwei an der Verbindungsstelle abgeflachte Profile



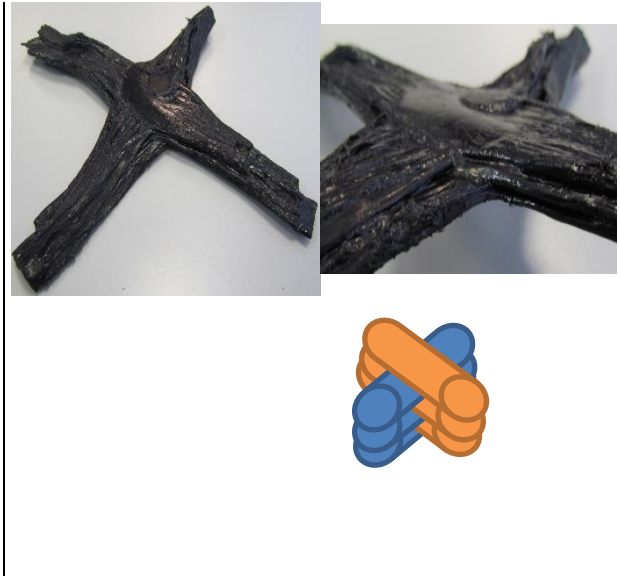
Abgeflachtes Profil in gespaltenem Profil mit Loch (geformt)



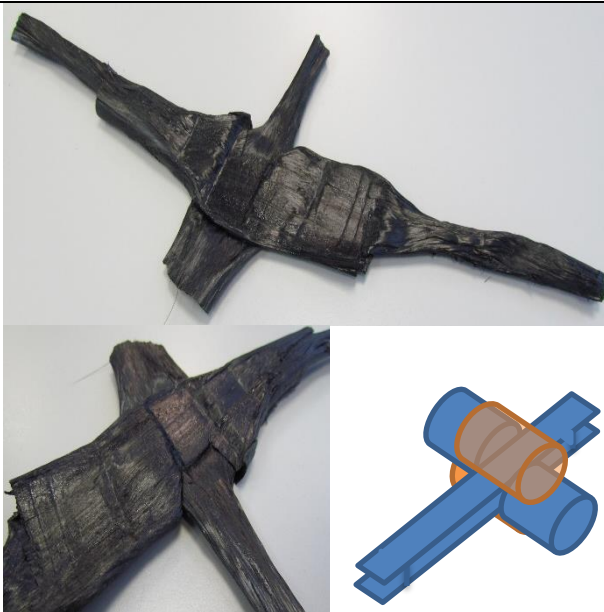
Abgeflachtes Profil zwischen zwei Lagen abgeflachter Profile



Drei an der Verbindungsstelle abgefachte Profile zu einem Stern gelegt



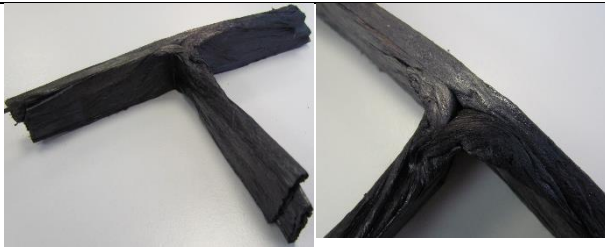
Mehrere Lagen abgefachte Profile übereinander über Kreuz



Vier abgefachte Profile



Zwei Profile geflochten



Drei abgeflachte Profile zu einem T gelegt



Abgeflachtes Profil, umgeschlagen um Profil



Abgeflachtes Profil umgeschlagen



Abgeflachtes Profil zusammengelegt mit Loch (geformt)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzeptuntersuchung zur Veranschaulichung der Skelettbauweise.	6
Abbildung 2: Terminplan	8
Abbildung 3: Frontend des AUDI A8 mit Untergurt aus Organoblech	10
Abbildung 4: Grafische Darstellung einer Bauteiloptimierung an einem CFK-Bauteil.....	12
Abbildung 5: Dachpartie des BMW M3 in flächiger Schalenbauweise.	14
Abbildung 6: Reales Skelettbauteil aus dem Projekt MAI skelett.	15
Abbildung 7: Einleger, die mit Tapes umwickelt werden.	16
Abbildung 8: Schrittweise Steigerung der Bauteilkomplexität	18
Abbildung 9: Workshop Knotenverbindungen bei BMW Landshut	19
Abbildung 10: Formen einer Öffnung in ein aufgeheiztes Pultrusionsprofil.	19
Abbildung 11: Mehrere Lagen Tapes im 90° Winkel überkreuz gelegt.....	20
Abbildung 12: übereinandergelegte, abgeflachte Profile.....	20
Abbildung 13: idealer Knoten mit querschnittsgleicher Stabverbindung.....	21
Abbildung 14: Spritzgussknoten der Multiskelettbauweise mit GIT Bereichen.	22
Abbildung 15: Draufsicht T-Bauteil	22
Abbildung 16: Schnitt Ansicht Skelettbauweise weiterentwickelt	23
Abbildung 17: Detailansicht Knotenbereich	23
Abbildung 18: Knotengeometrie mit FE Netz	25
Abbildung 19: Kritische Lastfälle.....	26
Abbildung 20: Varianten für konstruktive Gestaltung des Knotens (Knoten im Schnitt).....	27
Abbildung 21: Kraft-Weg-Kurven für Druckbelastung in Axialrichtung.....	28
Abbildung 22: Kraft-Weg-Kurven für Druckbelastung in Querrichtung	29
Abbildung 23: Modellierung des Versuchsaufbaus	30
Abbildung 24: Verbesserter Algorithmus zur Abschätzung der lokalen Faserorientierung	30
Abbildung 25: Vergleich des Materialverhaltens von 2D und 3D Materialmodells anhand von Einelementtests.....	31
Abbildung 26: Kraft-Weg-Kurven für axiale Druckbelastung	32
Abbildung 27: Kraft-Weg-Kurven für Querdruckbelastung	32
Abbildung 28: Mögliche Seilendverbindungen als Analogie.....	34
Abbildung 29: Draufsicht Krafteinleitungsstelle mit Insert	34
Abbildung 30: Seitenansicht Krafteinleitungsstelle mit Insert	35
Abbildung 31: Krafteinleitungsstelle Gabel-Öse.....	35
Abbildung 32: Krafteinleitungsstelle Öse	36
Abbildung 33: Frequenzgang-Analyse des MAI skelett Dachspriegels	37
Abbildung 34: quasi-statischer 3-Punkt-Biegeversuch	39
Abbildung 35: quasi-statischer Stauchversuch	39
Abbildung 36: Abgleich 3-Punkt-Biegeversuch	40
Abbildung 37: Abgleich Stauversuch	40
Abbildung 38: Mittenausschnitte Windlauf	41

Abbildung 39: Vergleich Test-Simulation 3-Punkt-Biegung.....	41
Abbildung 40: Schichtweises Versagen der unidirektionalen Stäbe.....	42
Abbildung 41: Schalenmodellierung Kreuzknoten.....	43
Abbildung 42: Details Kreuzknoten.....	43
Abbildung 43: FE-Modell der Trägerverbindung	44
Abbildung 44: Diskretisierung des MAI-skelett Windlaufs	45
Abbildung 45: Ergebnis der Crash-Optimierung.....	46
Abbildung 46: Vorgehen und Ergebnisse der Struktur-Optimierungsmethode	47
Abbildung 47: Spritzgussimulation; Füllstudie MAI Multiskelettknoten (Knoten ausgeblendet)	48
Abbildung 48: Prozesssimulation GIT Ende der Gasphase	50
Abbildung 49: Fließfront Füllsimulation Version 1 T-Bauteil.....	51
Abbildung 50: Spritzdruck Füllsimulation Version 1	51
Abbildung 51: Spritzdruck Füllsimulation mit geänderten Wanddicken	52
Abbildung 52: Spritzdruck Füllsimulation der weiterentwickelten Geometrie	52
Abbildung 53: Füllanalyse Zwischenstand.....	53
Abbildung 54: Finale Füllanalyse mit ca. 1740 Bar Spritzdruck.....	54
Abbildung 55: Konstruktion Spritzgusswerkzeug	55
Abbildung 56: Konstruktion Spritzgusswerkzeug Ansicht Auswerferseite	55
Abbildung 57: Konstruktion Spritzgusswerkzeug Schnittdarstellung	56
Abbildung 58: Konstruktion Spritzgusswerkzeug Darstellung Überlaufabspernung	56
Abbildung 59: Zeichnung Werkzeug zur Absicherung GIT im Knotenbereich.	57
Abbildung 60: Werkzeug Auswerferseite	57
Abbildung 61: Werkzeug Düsenseite.....	58
Abbildung 62: Bauteil Erprobung Herstellkonzept Spritzguss	58
Abbildung 63: Erprobungsbauteil Spritzgussprozess Aufgeschnitten.....	59
Abbildung 64: Geometrie Knotenelement für Versuche inkl. Formplatte unten	60
Abbildung 65: Formenträger-Spritzgusswerkzeug inkl. Knotenelement Formplatten.	60
Abbildung 66: Pultrusionsprofil-Einleger T-Knoten.....	61
Abbildung 67: Umformwerkzeug T-Profilknoten.....	62
Abbildung 68: Bestimmung benötigte Stablängen	63
Abbildung 69: Kritische Profilquerschnitte im Umformwerkzeug	64
Abbildung 70: Konzept für Schieberintegration in Umformwerkzeug.....	64
Abbildung 71: Auswerferseitige Formhälfte mit Schieber (blaue Markierung)	65
Abbildung 72: Düsenseitige Formhälfte	65
Abbildung 73: Zeichnungsstand Auswerferseite zum 26.09.2016.....	66
Abbildung 74: Zeichnungsstand Düsenseite zum 26.09.2016.....	66
Abbildung 75: Aktueller Werkzeugstand Spritzgusswerkzeug.....	67
Abbildung 76: Prüfung Kraftübertragung der Stabverbindung.....	68
Abbildung 77: Ergebnis der quasistatischen Tests zur Kraftübertragung	69

Abbildung 78: Prüfung der Schädigung der Stabverbindung	69
Abbildung 79: Ergebnis der quasistatischen Tests Schädigung.....	70
Abbildung 80: Versuchsprogramm	71
Abbildung 81: Zug- / Druckprüfung T-Träger	71
Abbildung 82: Druckprüfung in x-Richtung.....	72
Abbildung 83: Zugprüfung in X-Richtung	72
Abbildung 84: Hardwaretest; Beispiel einer Aufzeichnung eines Zug-/Druckversuches in z-Richtung.....	73
Abbildung 85: Schadensanalyse T-Träger.....	73
Abbildung 86: Schematische Darstellung des Stauch- und 3PB-Versuchs	74
Abbildung 87: Untersuchte Kreuzknoten-Modellierungsvarianten.....	76
Abbildung 88: Abgleich 3PB Test vs. Simulation	77
Abbildung 89: Erstversagen 3PB Test vs. Simulation	77
Abbildung 90: T-Knoten.....	78
Abbildung 91: Kraft-Weg-Kurven Simulation vs. Versuch	78
Abbildung 92: Erstversagen in Simulation und Versuch.....	79
Abbildung 93: Probenübersicht Vergleichbarkeit Simulation-Test.....	80
Abbildung 94: typische Taktzeiten für den Spritzguss.....	81
Abbildung 95: Kostenaufteilung Stabumformung	82
Abbildung 96: Kostenaufteilung Gesamtprozess, inkl. Spritzguss.....	83
Abbildung 97: Beispiel für eine Lastpfad-optimierte Verstärkungsstruktur, die „beliebig komplex“ werden kann.....	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Meilensteinplan.....	9
Tabelle 2: Übersicht Arbeitsplan.....	17
Tabelle 3: Varianten-Übersicht der Parameterstudie	38

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel MAI multiskelett Multiaxial beanspruchtes Integralbauteil im Kunststoffspritzguss mit lastpfadgerechten pultrudierten endlosfaserverstärkten Carbonfaserbündeln in Skelettbauweise.	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Thomas Hogger	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2017
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft 80788 München	9. Ber. Nr. Durchführende Institution ---
	10. Förderkennzeichen 03MAI37A
	11. Seitenzahl 101
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben ---
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 110
16. Zusätzliche Angaben ---	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek Hannover	
18. Kurzfassung Ziel des Projektes war, die Skelettbauweise für thermoplastische Materialien, basierend auf den Ergebnissen des Projektes MAI Skelett, weiterzuentwickeln, sodass diese auch für Integralbauteile mit multi-axialer Beanspruchung eingesetzt werden kann. Dafür waren die notwendigen Produktionsprozesse zu erforschen und die Funktionsfähigkeit der multi-axialen Skelettbauweise nachzuweisen. Dabei sollten gleichzeitig mit dieser Bauweise die Bauteilkosten auf unter 18 €/kg reduziert werden. Die Zykluszeit zur Herstellung von Bauteilen aus Hochleistungsverbundwerkstoffen in hoher Stückzahl sollte für die begrenzende Prozessschritte auf unter 90 Sekunden gesenkt werden. Im Rahmen des Projektes wurden die Wirkprinzipien und die Gestaltung von Kraftereinleitungsstellen für Kontenverbindungen erforscht. Die durch Simulation erzeugten Daten wurden an realen Bauteilen (generischer Trägerverbindung und Heckmodul) evaluiert. Im Rahmen des Projektes konnten die oben genannten Ziele erreicht werden. Mit MAI multiskelett wurde eine Sprunginnovation zur Herstellung und verbreiteten Anwendung von FKV für viele Anwendungsbereiche wie Fahrzeug-, Maschinen und Flugzeugbau erreicht. Es hat sich gezeigt, dass mit dem MAI multiskelett Verfahren sowohl die Prozess- wie auch die Herstellkosten deutlich reduziert werden können. Mit dazu bei tragen auch eine quasi verschnittfreier Materialeinsatz als auch die Verwendung von Recyclingmaterial bei, die zugleich wichtige Stellhebel für die Ressourceneffizienz sind. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem vorgestellten Verfahren Herstellkosten von weniger als 18 € pro Kilogramm Bauteil realistisch sind. Die ehrgeizigen Projektziele konnten auch in Bezug auf Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erreicht werden.	
19. Schlagwörter CFK, Carbonfaser, Skelettbauweise, Kunststoffspritzguss, FKV, Simulation, GID, Lastpfad	
20. Verlag	21. Preis