

## Abschlussbericht

Datum	15.03.2017
Zuwendungsempfänger (ZE)	Voith Composites GmbH & Co. KG
Förderkennzeichen	03MAI30A
Vorhabensbezeichnung	MAI AutoPreg – Verfahrensentwicklung CPP (Carbon Preimpregnated Pressforming) für das wirtschaftliche Herstellen und Verpressen maßgeschneiderter CF Platinen zu komplexen Bauteilen für die Automobilindustrie unter Großserien- Randbedingungen
Laufzeit des Vorhabens	01.11.2014 – 30.04.2016
Berichtszeitraum	Abschlussbericht

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Inhalt

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>3</b>	
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>5</b>	
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>7</b>	
<b>1</b>	<b>Kurzdarstellung</b>	<b>8</b>
1.1	Aufgabenstellung	8
1.2	Voraussetzungen	10
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	10
1.4	Stand der Technik und Wissenschaft	12
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>16</b>
2.1	Ergebnisse des Forschungsvorhabens	16
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	69
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	69
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	70
2.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	70
2.6	Veröffentlichung des Ergebnisses	70
2.7	Beitrag zum Spitzencluster MAI Carbon	71

## Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
AWL	Abdeckung Windlauf
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer Aided Design
CF	Carbonfaser
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CPP	Carbon Preimpregnated Pressforming
CT	Computertomographie
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverbundkunststoff
FVW	Faserverbundwerkstoff
gWIM	geschlossenes Wellenimprägniermodul
IE	Imprägniereinheit
IM	Imprägniermodul
IW	Imprägnierwellen
IWZ	Imprägnierwerkzeug
MAI	München Augsburg Ingolstadt
MDA	Misch- und Dosieranlage
oWIM	offenes Wellenimprägniermodul
OEM	Original Equipment Manufacturer

QA	Qualitätsanalyse
QS	Qualitätssicherung
RTM	Resin Transfer Moulding
HD RTM	Hochdruck RTM
Stack	Stapel von Einzellagen
u.a.	unter anderem
UD	unidirectional
VOC	Voith Composites GmbH & Co. KG
VP	Verbundprojekt
VR	Versuchsreihe
z.B.	zum Beispiel

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Prozesskette Prepreg .....	9
Abbildung 2 Seitenrahmen des BMW i3; hergestellt im HD RTM-Prozess .....	12
Abbildung 3: Imprägniermodul erste Generation .....	21
Abbildung 4: Imprägniermodul zweite Generation (Abb. ohne zweite Seitenwand) .....	21
Abbildung 5: drei Geometrien des Imprägniermoduls II .....	22
Abbildung 6: auf Versuchsstand montiertes Imprägniermodul II .....	23
Abbildung 7: Entnommene Probe .....	23
Abbildung 8: Ausgehärtete Probe .....	23
Abbildung 9: Thermographie-Analyse .....	23
Abbildung 10 Schliffbild Tape VR02 .....	24
Abbildung 11 Schliffbild Tape VR08 .....	24
Abbildung 12 CAD-Modell IM mit IWZ-1 .....	28
Abbildung 13 Komponenten der Online-Imprägniereinheit (Explosionsdarstellung) .....	30
Abbildung 14 Komponenten der Werkzeugoberseite (Explosionsansicht) .....	31
Abbildung 15 Komponenten der Werkzeugunterseite (links: isometrische Ansicht, rechts: Vorderansicht) .....	32
Abbildung 16 Geometrie der Imprägnierkavität .....	34
Abbildung 17 Montage der Imprägniereinheit .....	35
Abbildung 18 Öffnungsmechanismus der Imprägniereinheit .....	35
Abbildung 19 Scharnier für den Öffnungsmechanismus .....	36
Abbildung 20 Beheizen der Imprägniereinheit mittels Heizpatronen .....	37
Abbildung 21 - Schikane-WZ, Pressen - Oberwerkzeug .....	38
Abbildung 22 – Schikane-WZ, Pressen - Unterwerkzeug .....	38
Abbildung 23 - Schikanebauteil Detailansicht .....	39
Abbildung 24 - Schikanebauteile .....	39
Abbildung 25 Ondulationen (verschwommene Fasern ) .....	40
Abbildung 26 Aufbau Doppeldiaphragma .....	41
Abbildung 27 Unregelmäßigkeiten und Trockenstellen bei VR 01 .....	41
Abbildung 28 Versuchsaufbau mit offenen Seiten VR 03 .....	42
Abbildung 29 Verbesserte Imprägnierung VR 03 (harzreich links; harzarm rechts) .....	42
Abbildung 30 Harzreiche Seite VR 08 mit Abreißgewebe .....	43
Abbildung 31 Harzreicher Streifen aus VR 03 .....	43
Abbildung 32 Harzarme Seite von VR 08 .....	43
Abbildung 33 CPP-Produktivbauteile Windlauf Schale 1 (links) und Schale 2 (rechts) .....	45
Abbildung 34 Programmierte Bandablage .....	46
Abbildung 35 Programmierter Maschinencode .....	47
Abbildung 36 Programmierte Bandablage (links) und gewickelte Bandablage (rechts) .....	47
Abbildung 37 Wickelkern .....	48
Abbildung 38 Einlegen der Preform in das Presswerkzeug .....	48
Abbildung 39 Erste Produktivbauteile "Abdeckung Windlauf" .....	49
Abbildung 40 Fräsroboter .....	49
Abbildung 41 Fräsaufnahme Windlauf oben .....	50
Abbildung 42 CT Untersuchung Fräsimprägnierung (Luft einschlüsse in Gelb visualisiert) .....	51

Abbildung 43 Blasen im ausgehärteten Bauteil .....	52
Abbildung 44 Schnitt durch die Blase quer zur Faserrichtung .....	52
Abbildung 45 Prozessschaubild des CPP-Prozesses.....	53
Abbildung 46 Konzeption Größe Wickelkern .....	54
Abbildung 47 Prinzip-Skizze Entformung .....	55
Abbildung 48 Roboterbeschnitt Bauteil Preformen .....	55
Abbildung 49 Prinzip-Skizze Preforming .....	56
Abbildung 50 Positionierung der AWL in einem Tiefkühlcontainer.....	56
Abbildung 51 Prozessplan Serienfertigung AWL .....	57
Abbildung 52 Layout Konzept Serienfertigung AWL "Base Case" .....	58
Abbildung 53 Prozessplan Serienfertigung AWL "Max Case" .....	59
Abbildung 54 Layout Konzept Max Case.....	60
Abbildung 55 Funktionsprinzip Abspuleinheit .....	61
Abbildung 56 Seitenansicht Abspuleinheit.....	62
Abbildung 57 Draufsicht Abspuleinheit .....	62
Abbildung 58 Imprägniermodul erste Generation .....	63
Abbildung 59 Imprägniermodul zweite Generation .....	63
Abbildung 60 Imprägniermodul zweite Generation auf Versuchsstand .....	63
Abbildung 61 Optimierung Imprägniereinheit - Konzept Versuchsstand .....	64
Abbildung 62 Optimierung Imprägniereinheit - Versuchsstand .....	64
Abbildung 63 Roboter mit Ultraschallmesser.....	65
Abbildung 64 Fixierung der Stacks mittels Klebeband.....	65
Abbildung 65 Prinzip Vakuumtisch .....	66
Abbildung 66 Roboterbeschnitte Preformen .....	66
Abbildung 67 Konzept Vakuumverspannung mit Vakuumbohrungen unter der Bauteilkontur.....	66
Abbildung 68 Trennfolie und Beschnittbänder (Stackbeschnitt) auf Kern aufbringen.....	67
Abbildung 69: Protokoll zur Versuchsreihe 19/12 vom 27.04.2016.....	68

Tabelle 1 Übersicht über die Projektbeteiligung und Arbeitsteilung im Projekt MAI AutoPreg.....	11
Tabelle 2 Zielsetzung und Ergebnisse von AP 1.1-1.6 .....	19
Tabelle 3 Schwachstellen und Lösungskonzepte der bisherigen Imprägniermoduls.....	25
Tabelle 4 IWZ-alt.....	26
Tabelle 5 IWZ-1 .....	26
Tabelle 6 IWZ-2 .....	26
Tabelle 7 IWZ-3 .....	27
Tabelle 8 Parameter von V29 - VR40.....	29
Tabelle 9 Verschnittprognose via Berechnung und Versuchsergebnissen .....	54

## Literaturverzeichnis

- FOLEY, M., & GILLESPIE, J. (2005). *Modelling the effect of fibre diameter and fibre bundle count on tow impregnation during liquid molding process*. Journal of Composite Materials, Vol. 39, No.12.
- Miaris, A. (2012). *Experimental and simulatative analysis of the impregnation mechanics of endless fiber rovings*. Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern.
- Shotton-Gale, N. (2012). *Clean Filament Winding Process Optimisation*. Birmingham: School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham.
- Stemick, R. (2016). *Optimierung der Fadenführung und Online-Imprägnierung eines automatisierten CFK-Prepreg-Wickelprozesses*. München: TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik.
- STEPHAN, U. (kein Datum). *LV "Mathematik/Numerik" im Studiengang Bauingenieurwesen*. Berlin: TFH Berlin.
- Wevers, R. J. (1998). *Impregnation of a glass fibre roving with a polypropylen melt in a pin assisted process*. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing.
- Wos, R. (31. 01 2017). *Entwicklung und Konstruktion einer Online-Imprägniereinheit zur Herstellung von CFK-Prepregs im Wickelverfahren für Großserienbauteile*. München: Lehrstuhl für Carbon Composites, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München.

## 1 Kurzdarstellung

### 1.1 Aufgabenstellung

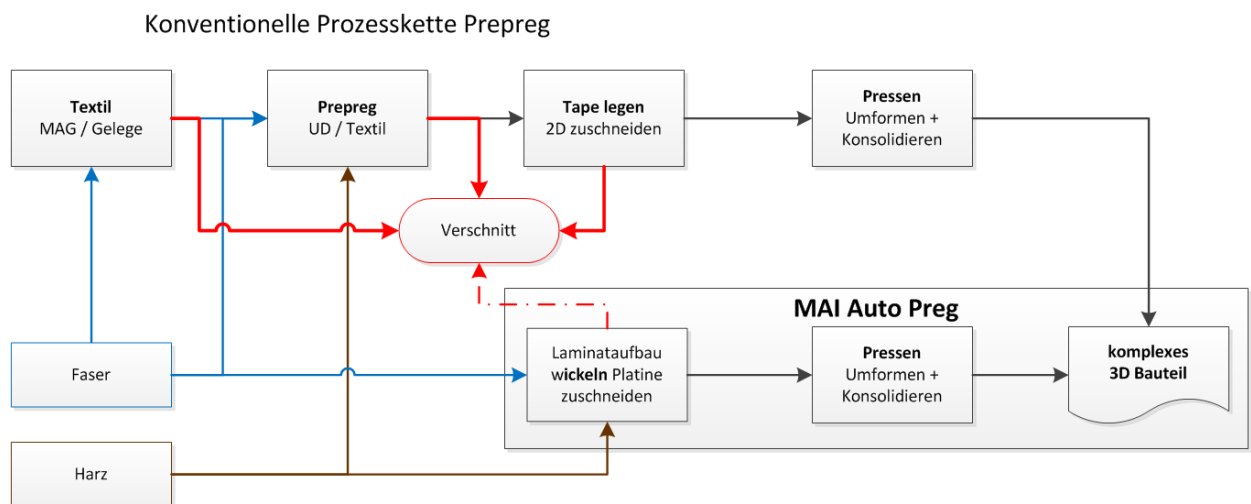
Das Prepreg-Verfahren ist in der Luft- und Raumfahrt nach wie vor der Produktionsstandard. Die hohe Fertigungsqualität (gestreckte Fasern, gleichbleibender Faservolumengehalt, geringe Porendichte, ...), wird durch eine Entkopplung des Imprägnierprozesses vom Aushärte- bzw. formgebenden Prozess erreicht. Die in der Luftfahrt überwiegend großen und schwach gekrümmten Bauteile haben zu großen Produktionsanlagen geführt, die für vergleichsweise kleine und komplexe Bauteile aus dem Automobilbereich nicht geeignet sind. Das Prepreg-Verfahren wird daher in der Automobilindustrie nur in einer Manufaktur für Prototypen und kleinste Stückzahlen eingesetzt. In MAI AutoPreg sollte das bereits heute hoch industrialisierte Wickelverfahren verwendet werden, um die Prozessschritte Matrix Einbringung, Flächenbildung und Laminataufbau in einem Schritt kostengünstig zu integrieren – unter Erreichung der gleichen Fertigungsqualität wie bei den bekannten Prepregverfahren. Hierzu sollte das Forschungsprojekt mit einer Verfahrensentwicklung bzw. Verfahrensanpassung für das wirtschaftliche Herstellen und Verpressen maßgeschneiderter CF Platinen (vorimprägniertes Halbzeug) zu komplexen Bauteilen für die Automobilindustrie unter Großserien-Randbedingungen einen weiteren Beitrag liefern. Die technische Machbarkeit sollte über die reale Umsetzung erprobt und weitere Vorteile bzgl. Umformbarkeit und Verschnittreduktion untersucht werden. Ein technisches und wirtschaftliches Benchmarking, mit den bereits in der Automobilindustrie etablierten Prozessen (i.d.R. RTM/Nasspressen mit einem verwirkten, flächigen Textil), wurde berücksichtigt. Das geplante Projekt bringt hierfür alle notwendigen Disziplinen, mit der Auswahl der Partner, zusammen.

Die Technischen Ziele des Clusters werden im Folgenden umfassend adressiert:

- Drastische Reduktion der Produktionskosten durch einen hohen Automatisierungsgrad und eine Verkürzung der Wertschöpfungskette unter Einsatz von kostengünstigen Primärhalbzeugen;  
Ziel: Kostenreduktion > 50%
- Verkürzung der Taktzeit; Ziel: 4 Minuten (Duromere Harzsysteme)
- Steigerung der Energieeffizienz durch die Vermeidung von energieintensiven Prozessschritten in der Herstellung bzw. in der Lagerung des Halbzeuges



- Steigerung der Qualität und Reproduzierbarkeit sowohl beim Halbzeug als auch beim fertigen Produkt
- Verkürzung der Gesamtdurchlaufzeit durch angepasste Prozessschritte und der Entwicklung von speziell auf diesen Prozess abgestimmten Materialsystemen
- Steigerung der Effizienz des Gesamtprozesses der CFK-Bauteilherstellung ohne Zwischenschritte vom Roving über die vollständig imprägnierte Platine zum fertigen Pressteil
- Reduktion des Materialverbrauchs während des Herstellungsprozesses durch die Vermeidung von textilen Zwischenhalbzeugen und Reduktion des Verschnitts;  
Ziel: Verschnitt über die gesamte Prozesskette < 20%



**Abbildung 1 Prozesskette Prepreg**

Die weiteren politischen Ziele, insbesondere die Vernetzung zwischen den Industriepartnern und die Stärkung von KMUs in der Region, wurden mit einer Förderung erfüllt.

MAI AutoPreg dient dazu, die Prozesskette, abgestellt auf einen robusten Fertigungsprozess, für Stückzahlen bis zu 100.000 Bauteilen pro Jahr innerhalb der Automobilindustrie sicher zu stellen.

Zukünftig könnten durch eine Verwendung von angepassten duroplastischen oder thermoplastischen Matrixsystemen bei gleichbleibenden bzw. modifizierten Prozessabläufen (z.B.: Entfall der Kühlkette; nicht Gegenstand dieses Antrags) auch Taktzeiten von einer Minute oder darunter möglich sein. Die Basis hierfür wurde mit dem Projektantrag geschaffen.

## 1.2 Voraussetzungen

Ziel des Projektes MAI AutoPreg war die Industrialisierung des Prepreg-Verfahrens bzw. die Herstellung von Halbzeugen aus CFK für die automobiler Großserienverarbeitung → CPP (Carbon Preimpregnated Pressforming). In Anlehnung an die Blechtechnik erschien das reine Umformen der Bauteile in eine 3D Geometrie mittels der Presstechnik am sinnvollsten. Es lassen sich mit entsprechender Stückzahl qualitativ hochwertige, formgenaue und reproduzierbare Ergebnisse erzeugen. Entsprechende Anlagen sowie großes Erfahrungspotenzial in der Werkzeugtechnik und der Automation sind vorhanden. Der entscheidende Schritt zum serienfähig verarbeitbaren Halbzeug, der Rohplatte mit spezifischem Laminataufbau, war in der bestehenden Prepreg-Prozesskette zu kostenintensiv.

In MAI AutoPreg sollte das bereits heute hoch industrialisierte Wickelverfahren verwendet werden, um die Prozessschritte Matrix Einbringung, Flächenbildung und Laminataufbau in einem Schritt kostengünstig zu integrieren.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt ist in Haupt- und Unterarbeitspakete untergliedert. Als Verantwortliche für jedes Haupt-Arbeitspaket ist ein Projektpartner benannt. Die Aufteilung der Verantwortlichkeiten richtet sich nach der technischen Expertise der Partner, näheres ist in Kapitel 1.5 beschrieben. Die an den jeweiligen Arbeitspaketen beteiligten Partner sind in der Beschreibung der Arbeitspakete aufgeführt (siehe Kapitel 2.1). Die Dokumentation, Koordination sowie Leitung aller Sitzungen für das Projekt MAI AutoPreg übernahm Voith. Die Zusammenarbeit der Partner wurde zusätzlich über einen gemeinsamen Kooperationsvertrag geregelt.

Eine Übersicht der Projektpartner und Arbeitsaufteilung während der Projektlaufzeit ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Übersicht über die Projektbeteiligung und Arbeitsteilung im Projekt MAI AutoPreg

MAI AutoPreg		BMW	C-CON	VOITH
AP 0	Projektkoordination			★
0.1	Übergeordnete Koordination Konsortium / Teilprojekte	B	B	L
0.2	Organisation Projekt-Review	B	B	L
AP 1	Definition Produkthanforderungen & Prozessrandbedingungen	★		
1.1	Definition Zielbauteilspektrum	L		
1.2	Definition der Materialanforderungen	B	L	B
1.3	Definition Schikanewerkzeug, -bauteil und Testzyklus	L	B	B
1.4	Definition Platinenentwicklung	L	B	B
1.5	Definition Pressprozess	B	L	B
1.6	Definition Bauteilbeschnitt	B	L	B
AP 2	Prozessentwicklung		★	
2.1	Material-Benchmark (Prozessfähigkeit, Materialperformance)	L	B	B
2.2	Entwicklung Online Imprägniermodul		B	L
2.3	Erstellung eines Testwickelprogrammes, Platinenerstellung (Halbzeug)		L	B
2.4	Konstruktion und Erstellung Schikanewerkzeuge		L	B
2.5	Herstellung verschiedener Schikanebauteile	B	L	B
2.6	Testen und Auswertung der Schikanebauteile	L	B	B
AP 3	Produktivphase		★	
3.1	Auswahl eines Produktivbauteils	L	B	B
3.2	Konstruktion und Erstellung des Prepregwerkzeuges und Modifikation des Presswerkzeuges	B	L	B
3.3	Pressen der Produktivbauteile	L		B
3.4	Bauteilbeschnitt		L	
3.5	Bauteilprüfung	L		B
AP 4	Industrialisierung			★
4.1	Konzeption und Dokumentation verschiedener Prozessrouten	B	B	L
4.2	Automation und Handlingskonzepte	B	B	L
4.3	Integration bestehender Anlagen zu einer Testumgebung		B	L
4.4	Testbetrieb (Verifizierung der Industrialisierbarkeit)	B	B	L
4.5	Abschluss und Bewertung des CPP Prozesskonzeptes	L	B	B
★ AP-Koordinator      L : Leitung      B : Beteiligung				

## 1.4 Stand der Technik und Wissenschaft

Die kosteneffiziente Herstellung von Bauteilen aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) im Großserienmaßstab ist bis heute eine große Herausforderung. Das derzeitige Kostenniveau von diesen erstklassigen Leichtbaumaterialien ist das größte Hindernis beim Einsatz für die meisten größeren Fahrzeugprojekte der Automobilindustrie. Lediglich in kleineren Serien, insbesondere von hochpreisigen Fahrzeugen im Premiumsegment, werden die modernen Werkstoffe bereits zu einem nennenswerten Anteil verbaut.

Derzeit in der Automobilindustrie eingesetzte Serienprozesse, wie zum Beispiel Presspreforming von Multiaxialgelegen mit anschließender Matrixeinbringung im Hochdruck-RTM, sind gekennzeichnet durch hohe Prozess- und Materialkosten. Die Materialkosten ergeben sich dabei neben den hohen Faserpreisen aus den aufwändigen Prozessen zur Weiterverarbeitung in textile Halbzeuge wie zum Beispiel Gelege oder Gewebe. Überdies fällt bei den klassischen Preformingmethoden ein hoher Anteil von Verschnittmaterial an, was dazu führt, dass über die gesamte Prozesskette gesehen teilweise weniger als die Hälfte des ursprünglichen Fasermaterials im Bauteil Verwendung findet.



Abbildung 2 Seitenrahmen des BMW i3; hergestellt im HD RTM-Prozess

Das in der Luft- und Raumfahrt weit verbreitete Prepreg-Verfahren ist ebenfalls aufgrund der hohen Materialpreise in der Automobilindustrie nicht wirtschaftlich einsetzbar. Hinzu kommen die geringe

Produktivität der klassischen Anlagentechnologie zur Verarbeitung der Materialien sowie die aufwändige Logistik, wie zum Beispiel die Notwendigkeit der tiefgekühlten Lagerung der Materialien. Ein sehr vielversprechender Ansatz zur Kostenreduzierung ist die direkte Verarbeitung von Rovings ohne aufwändige und verschnittproduzierende Prozesse. Hierzu ist ein Verfahren bekannt, bei dem die Rovings mit Harz imprägniert, in einem Wickelprozess zu Platinen verarbeitet und in einem anschließenden Heißpressen zu dreidimensional geformten Bauteilen geformt und ausgehärtet werden [1]. Obwohl dieses Verfahren seit mehr als 20 Jahren bekannt ist und bereits zur Herstellung kleinerer Bauteile und Serien angewendet wird, besitzt es nicht die Technologiereife für den industriellen Einsatz. Die Gründe hierfür sind zum einen die fehlende Anpassung der Materialien (insbesondere des Harzsystems), auf die speziellen Anforderungen des Verfahrens, sowie viele ungelöste Probleme in Bezug auf das prozessichere Handling als Grundlage für eine Automatisierung. Überdies kann es bei diesem Verfahren systembedingt zu großen Verschnittanteilen kommen, wenn der Prozess nicht auf konkrete Bauteilgeometrien angepasst wird. Die Komplexität sowie die Anzahl der genannten Probleme haben dazu geführt, dass dieses aus Kostengründen äußerst attraktive Verfahren bisher nicht im größeren Maßstab zum Einsatz gekommen ist. Zudem bedarf es durch die fachliche Vielfalt der Schwierigkeiten eines multidisziplinären Teams, welches kaum ein einzelnes Unternehmen aufweisen kann. Mit dem geplanten Konsortium im Projekt MAI AutoPreg, welches alle notwendigen Disziplinen vereint, soll dieser CPP-Prozess systematisch weiterentwickelt und die eingesetzten Materialien sowie Technologien aufeinander angepasst werden.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

**BMW** ist aktuell Vorreiter in der CFK-Technologie für automobiler Serienprozesse, wie aktuell in den Medien bekannt. BMW i steht für visionäre Elektrofahrzeuge und Mobilitätsdienstleistungen, inspirierendes Design sowie für ein neues Verständnis von Premium, das sich stark über Nachhaltigkeit definiert und einen ganzheitlichen Ansatz verfolgt: Mit maßgeschneiderten Fahrzeugkonzepten, einem Schwerpunkt auf Nachhaltigkeit in der gesamten Wertschöpfungskette und einer ganzen Reihe von ergänzenden Mobilitätsdienstleistungen definiert BMW i das Verständnis von individueller Mobilität neu.

Mit der ersten aus Serienproduktion stammenden Fahrgastzelle aus Carbon, einem Baustein der BMW EfficientDynamics Leichtbau-Technologie, revolutioniert BMW i den Automobilbau. Der

Werkstoff Carbon ist ca. 50 % leichter als Stahl und ca. 30 % leichter als Aluminium. Damit setzt BMW i nicht nur neue Maßstäbe in Leichtbau, sondern gleicht das zusätzliche Gewicht, das zum Beispiel durch die HV-Batterie (Hochvolt-Batterie mit Lithium-Ionen) zustande kommt, vollständig aus. Gleichzeitig ist Carbon ein hochfester Werkstoff der konstruktiv sehr individuell angewendet werden kann und die Sicherheit aller Passagiere erhöht.

Zu den in Serie startenden Prozessen und Halbzeugen galt es in Vorentwicklungen kosten- und taktzeitgünstigere Prozesse zu entwickeln, die höhere Stückzahlen ermöglichen und somit mögliche Lieferanten hierfür aufzubauen. Hier tritt BMW als der OEM auf, der den Forecast, die Rahmenbedingungen (bspw. merkmalsoptimierte Bauteile), die Materialabsicherungen/Prüfungen und die Anlehnung an die bestehenden Prozesse mit in das Projekt einbringt.

Die **C-CON** Unternehmensgruppe ist seit 1991 als innovatives und technologisch führendes Unternehmen in der Entwicklung, Konstruktion, Fertigung und im Prozessmanagement tätig. Die Kunden des Unternehmens entstammen vorwiegend der Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie, sowie deren Systempartner und aus dem allgemeinen Maschinenbau. Das Leistungsportfolio erstreckt sich von der ersten Idee bis zur Realisierung des fertigen Produktes und deckt somit die gesamte Prozesskette ab. Die FVK-Kompetenz im Hause C-CON ist sehr ausgeprägt. So erfüllt das Unternehmen beispielsweise die Bauteilverantwortung vom ersten Federstrich bis zur Serienbetreuung für CFK-Teile im BMW i3 und i8. Im Jahr 2011 baute die C-CON am Standort Rottenburg an der Laaber ein eigenes Technikum zur Vorserien- und Serienfertigung von FVK-Bauteilen auf. Hintergrund dafür war die Forderung der OEMs nach einem Großserieneinsatz von FVK in der Automobilindustrie sowie die Beauftragung mit der Serienfertigung von jährlich 5000 FVK-Kondenswasser-Auffangwannen für den Frachtraum des Airbus A350. Dies begründete zahlreiche Entwicklungs- und Kleinserienprojekte wie beispielsweise eine Automobiltüre (Strukturinnenblech) des Elektrofahrzeuges MUTE in Zusammenarbeit mit der TUM, von der Bauteilentwicklung über die Werkzeuganfertigung bis zur Abpressung. Fahrwerksträger sowie Längsträgeranschluss des Roding Roadster, von der Bauteilentwicklung über die Werkzeuganfertigung bis zur Abpressung. Anbauelement BMW-Motorradarmlehne als CFK-Hohlkammerkonstruktion (realisiert von der Idee bis zum fertigen Produkt). C-CON konnte bereits die Fertigung von nass gewickelten Bauteilen realisieren und somit entsprechende Erfahrungen in einer Serienproduktion sammeln. Der Fokus liegt dabei auf der Weiterentwicklung und Umsetzung hochautomatisierter CFK Fertigungsprozessketten für den kostensensitiven Automobilindustrieinsatz.

Im Bereich Faserverbundwerkstoffe gibt es bei **Voith** schon seit Jahren zahlreiche Aktivitäten, so zum Beispiel bei Voith Paper. Eine Papiermaschine enthält als eine der Schlüsselkomponenten Walzen, die inzwischen überwiegend aus Carbon-Composites gefertigt werden. Bestandteil einer Papiermaschine sind ebenfalls die sogenannten Doctor-Blades aus Composite, welche der fortlaufenden Reinigung der Walzen im Produktionsprozess dienen.

Auch bei **Voith Turbo** gibt es Komponenten, die aus Faserverbundwerkstoffen bestehen. Seit 1993 werden am Standort in Rostock Schiffspropeller von Voith Turbo AIR aus Carbon Composites gefertigt. Voith Turbo Scharfenberg als einer der führenden Hersteller von Kupplungen und Frontmodulen für Schienenfahrzeuge setzt für die Frontmodule Glas- und Polyester-Sandwich-Komponenten ein. Um die Kompetenz von Voith in dem Bereich der Faserverbundwerkstoffe weiter auszubauen und die bereits vorhandenen Fähigkeiten und Kenntnisse zu bündeln, ist am 01.10.2010 die Voith Composites GmbH & Co. KG gegründet worden. Mit ihrem Sitz in Garching bei München baut Voith Composites das Geschäftsfeld weiter aus. Ein Schwerpunkt ist dabei die Umsetzung hochautomatisierter CFK-Fertigungsprozessketten für die kostensensitive Automobilindustrie. Im Bereich der Industrieprodukte hat Voith Composites bereits die Fertigung von Faserverbundbauteilen für nass gewickelte Bauteile realisiert und entsprechende Erfahrungen in einer Serienproduktion gesammelt. Voith Composites baut zurzeit ein eigenes Technikum zur Vorserienfertigung von FVK Bauteilen für den Großserieneinsatz im Automobilbereich auf. Erste Prototypen konnten dort bereits für einen OEM (Audi) erfolgreich umgesetzt werden. Schwerpunkte waren dabei die Umsetzung einer geeigneten Preformbauweise. In dem LUFO IV Projekt „ROHAL“ konnte Voith Composites Verfahren zur Preformfertigung, z.B. das Faserspritzen, für automobiler Anwendungen untersuchen und u.a. für o.a. Prototypen anwenden (siehe Abschlussbericht Projekt ROHAL im Verbundprojekt FACT, LUFO IV, 2. Call).

Im Spitzencluster MAI Carbon ist Voith Composites seit der ersten Förderphase tätig und leitet neben der Mitarbeit in den Leitprojekten MAI Plast und MAI Recycling das Verbundprojekt MAI Pop. Durch die Erfahrungen in der Zusammenarbeit im Spitzencluster brachte Voith sehr gute Voraussetzungen für eine erfolgreiche Koordination des Projektes MAI AutoPreg mit. Das Projekt bot dabei eine gute Ergänzung zu den bisherigen Arbeiten und somit eine fruchtbare Basis der Zusammenarbeit bei einzelnen Fragestellungen mit anderen MAI Projekten.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Ergebnisse des Forschungsvorhabens

In diesem Kapitel werden die einzelnen Arbeitspakete des Projektes MAI AutoPreg sowie die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Paketen vorgestellt. Außerdem werden die Beteiligungen der einzelnen Projektpartner an den Arbeitspaketen aufgeführt.

Die Projektpartner übernahmen im Projekt, analog zu ihren Expertisen, folgende Arbeitsschwerpunkte: BMW definierte als OEM im Wesentlichen die Anforderungen an das Produkt und den Prozess. Durch die Erfahrungen in der Produktion der i-Fahrzeugtypen mit einem für diese Seriengröße einzigartigen Anteil an CFK-Komponenten, hatte BMW zudem eine hervorragende Informationsbasis für einen Benchmark von neuen zu bestehenden Prozesstechnologien. C-CON bot mit seiner Erfahrung beim Herstellen und Verpressen von Wickel-Platinen eine ideale Basis sowie die entsprechende Anlagentechnik zur Anwendung und Weiterentwicklung dieser Technologie. Voith Composites hatte mit seiner erfolgreichen Umsetzung der Wickeltechnologie im industriellen Maßstab die notwendige Erfahrung zur Industrialisierung einer CFK-Fertigungs-Technologie und brachte darauf fokussierte Arbeitsinhalte auch in diesem Projekt primär ein. Eine Pilotlinie zur Entwicklung von automatisierten/ verketteten CFK-Herstellungsprozessen für automobiler Anwendungen rundete die guten Randbedingungen ab.

#### AP0 Projektkoordination

Als Projektkoordinator war Voith für die Abstimmung und den Austausch der Projektpartner im Konsortium zuständig und erfüllte dabei wichtige organisatorische Aufgaben. Die fachliche Lenkung und Konsistenzprüfung der Arbeiten in den einzelnen Paketen war dabei der zentrale Gegenstand und ein wesentlicher Beitrag zum Erfüllen der Ziele. Voith begleitete hierzu die Arbeiten der Projektpartner über die gesamte Projektlaufzeit. Ergebnisse wurden geprüft und die entsprechende Vernetzung mit anderen Partnern und den zusammenhängenden Arbeiten gesteuert. Kam es bei Meilensteinen oder Zwischenergebnissen zu Verzögerungen oder unerwarteten Problemen, war Voith für die Information aller betroffenen Partner zuständig, die weitere Vorgehensweise abzustimmen und Korrekturen der Zeitpläne vorzunehmen.



Zum Austausch der Partner organisierte Voith regelmäßige Treffen und stimmte das Berichtswesen ab. Inhalte wurden bei Voith zentral gesammelt und in konsistenter Form an den Projektträger übergeben.

## **AP 1 Definition Produktanforderungen & Prozessrandbedingungen**

Im Arbeitspaket 1 wurden die Grundlagen und Randbedingungen für das Projekt MAI AutoPreg geschaffen. Die ersten drei Arbeitspakete (AP 1.1. - 1.3) definieren die Produktanforderungen, in den Arbeitspaketen 1.4 bis 1.6 wurden die Prozessanforderungen festgelegt.

### **AP 1.1 - 1.2 Produktanforderungen**

Zur anwendungsnahen Weiterentwicklung und Industrialisierung der CPP Technologie wurde in AP 1.1 ein Zielbauteilspektrum definiert. Hierbei handelte es sich um eine repräsentative Gruppe von CFK Bauteilen aus einem Fahrzeugprojekt von BMW, für die der Prozess befähigt werden sollte. Das Bauteilspektrum bildete dabei die Anforderungen an die Umformbarkeit sowie notwendige Faserarchitekturen ab.

Im Arbeitspaket 1.2 wurden von diesem Bauteilspektrum die Materialanforderungen von C-CON in enger Abstimmung mit den Projektpartnern abgeleitet und in unterschiedliche Klassen eingeteilt. Hierbei konnten Klassen für Sichtcarbon-, Struktur-, Hochtemperatur- oder Interieur-Bauteile gebildet werden. Jede dieser Bauteilklassen hat unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich Ihres Anforderungsprofils wie Glasübergangstemperatur (TG), Oberflächenbeschaffenheit, Lackier- sowie KTL-Fähigkeit, mechanische Eigenschaften, etc..

### **AP 1.3 - 1.6 Prozessanforderungen**

Auf Grundlage des klassifizierten Bauteilspektrums wurde im Arbeitspaket 1.3 von BMW ein Schikanebauteil erarbeitet, das die wesentlichen Anforderungen widerspiegelte und eine Prüfung der Prozessfähigkeit ermöglichte. Das Schikanebauteil sollte dabei nicht nur die reine CFK-Struktur darstellen, sondern analog zu einem realen Automobilbauteil auch u.a. Befestigungselemente aufweisen. Neben dem Bauteil selbst wurde in diesem Arbeitspaket auch das Presswerkzeug konstruiert, ausgelegt sowie ein Testzyklus zur Prüfung des geforderten Bauteil-Eigenschaftsprofils erarbeitet.

In einem ersten Schritt (AP 1.4) wurde der Herstellungsprozess der Platinen durch BMW definiert. Hierfür wurden von den Bauteilanforderungen (AP 1.3) ein Lagenaufbau sowie der benötigte Platinenzuschnitt abgeleitet und Grenzen für tolerierbare Faserwinkelabweichungen durch den Umformprozess festgelegt. Neben der Faserarchitektur wurden in diesem Arbeitspaket auch prozesstechnische Anforderungen an das Harzsystem ausgearbeitet. Hierbei konnte eine „nasse“ Platine, bei der das Harz nach dem Wickelprozess mit einer relativ geringen Viskosität eine Zwischenlagerung erschwert und somit eine direkte Weiterverarbeitung im Pressprozess erforderte, beabsichtigt werden. Eine andere Möglichkeit war es eine „trockene“ Platine zu entwickeln, bei der das Harz nach dem Wickeln einen Prepreg-typischen Zustand erreichte, der das Handling sowie Zwischenlagerungen wesentlich vereinfachte. Der Hauptvorteil in der Verarbeitung derartiger Platinen lag in dem Entfallen von größeren Verschmutzungen und damit wesentlich reduzierten Reinigungsarbeiten, die bei „nassen“ Platinen zwangsläufig notwendig sind.

Aufbauend auf den definierten Platineneigenschaften wurden der Wickeldorn sowie eine Werkzeugmethode (mit sogenannten Voreilern), passend zum Schikanenwerkzeug, ausgelegt und konstruiert.

Das folgende Arbeitspaket 1.5 beinhaltet die Definition des Pressprozesses. Entsprechend der Produkthanforderungen aus AP 1.3 sowie der gewählten Prozessroute aus AP 1.4 wurden Parameter wie Umform- und Aushärtetemperatur, Zeiten und Drücke, unter Berücksichtigung der geforderten Taktzeiten, festgelegt.

Abschließend wurde in AP 1.6 der Beschnittprozess der fertigen Bauteile definiert. Hierfür musste eine entsprechende Verfahrenstechnik ausgewählt sowie Vorrichtungen konstruiert werden.

Tabelle 2 Zielsetzung und Ergebnisse von AP 1.1-1.6

<b>Zielsetzung:</b>	Definition von notwendigen Produkthanforderungen und Prozessrandbedingungen als Grundlage für die Arbeiten in den folgenden Arbeitspaketen.	
<b>Federführung</b>	BMW	
<b>Co-Federführung:</b>		
<b>Mitarbeit</b>	C-CON, Voith	
<b>Arbeitspaket 1:</b>	Definition Produkthanforderungen & Prozessrandbedingungen	
<b>Teilpakete des Arbeitspaketes</b>	<b>AP 1.1 Definition Zielbauteilspektrum</b>	BMW
	<b>AP 1.2 Definition der Materialanforderungen</b>	BMW, C-CON, Voith
	<b>AP 1.3 Definition Schikanewerkzeug, -bauteil und Testzyklus</b>	BMW, C-CON, Voith
	<b>AP 1.4 Definition Platinenentwicklung</b>	BMW, C-CON, Voith
	<b>AP 1.5 Definition Pressprozess</b>	BMW, C-CON, Voith
	<b>AP 1.6 Definition Bauteilbeschnitt</b>	BMW, C-CON, Voith
<b>notwendige Ausgangsdaten</b>	Produkt und Prozess Knowhow, Datenbasis für Benchmark mit bestehenden Serienprozessen (im Konsortium gegeben).	
<b>Ergebnis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zielbauteilspektrum</li> <li>• Anforderungen an Material / Prozesse</li> <li>• Schikanebauteil &amp; -werkzeug / Testbedingungen</li> <li>• Konzept für Platinen-Herstellung (Prozess-Halbzeugherstellung) und Pressprozess</li> <li>• Konzept Beschnitttechnologie</li> </ul>	

## **AP 2.1 Material-Benchmark (Prozessfähigkeit, Materialperformance)**

Basierend auf den Anforderungen an Material, Geometrie und Prozess aus AP1 erfolgte die Auswahl von Faser- und Matrixsystemen unter Berücksichtigung der spezifischen Bedingungen des halbzeugseitigen Faserwickel- und des bauteilseitigen Heißpressverfahrens. BMW als Endanwender leitete unter Abstimmung der Partner das Thema Benchmark federführend.

Dafür wurden auf einem rotationssymmetrischen Kern Laminat begrenzter Größe bei C-CON gewickelt, zur Platine ausgelegt und unter Druck und Temperatur bei den Partnern zu ebenen Platten verpresst, beschnitten und bewertet. Hierbei wurden Eigenschaften wie erzielter Faservolumengehalt, Faserorientierungen, Porengehalt, Oberflächenbeschaffenheit etc. mit Faserverbundstrukturen anderer Prozesse bei BMW verglichen.

Faser- und Matrixsysteme sowie die Parameter des Wickel- und Pressverfahrens wurden dabei systematisch variiert, bis ein oder mehrere, den Anforderungen genügende Materialsysteme festgelegt wurden. Ergebnis sind Materialsysteme und Prozessparameter, die den Anforderungen einer automobilen Serienproduktion genügen.

## **AP 2.2 - Entwicklung Online-Imprägniermodul**

Das für die ersten Versuche eingesetzte Online-Imprägniermodul ist eine aus vier Wellen bestehende Konstruktion (s. Abbildung 3). Dieses Prinzip der offenen Trommelimprägnierung hatte sich nach ersten Versuchen zwar als funktionsfähig aber aus mehreren Gründen auch als nicht serientauglich erwiesen.

- unpräzise Positionierung der Austragsdüse
- manuelle Eingriffe notwendig
- Gefahr durch abtropfendes Harz (Selbstentzündung ab kritischer Menge)
- dadurch prozesstechnisch inhomogener nicht wiederholbarer FVG
- in den CF-Rovings selbst inhomogener FVG aufgrund der nur einseitig befestigten Imprägnierwellen (→ Vibration der Wellen aufgrund der hohen Abzugsgeschwindigkeiten - dadurch zeitweise fehlender Kontakt → geringer Imprägniergrad an dieser Stelle)
- Kostenfaktor Harzverlust (ca. 2 kg pro Wicklung = ~20%)

Deshalb wurde ein weiteres Imprägnierungskonzept konzipiert und getestet, worin auch Erkenntnisse aus den Versuchen mit dem ersten Imprägniermodul beibehalten bzw. übernommen wurden:

- Führungs- und Imprägnierrollen mit Steg zur Fadenführung
- Misch- und Dosieranlage mit dynamischem Mischer
- flächiger Harzauftrag über Breitschlitzdüse

Hauptsächlich zur Verringerung des Harzverlustes wurden bei der Weiterentwicklung des Online-Imprägniermoduls ein Teil der Wellen auf der Unterseite geschlossen und bilden den Basiskörper eines sogenannten Wellenmoduls. Im Zusammenbau wurde dieses zusätzlich mit seitlichen Abdeckplatten ausgeführt, um sicherzustellen, dass das gesamte Harz in den Roving imprägniert wird und nicht abtropft. Drei Wellen mit Steg stellen auf der Oberseite die Rovingführung sicher. Die Harzzufuhr erfolgt im Gegensatz zur ersten Generation von unten (s. Abbildung 4).



Abbildung 3: Imprägniermodul erste Generation

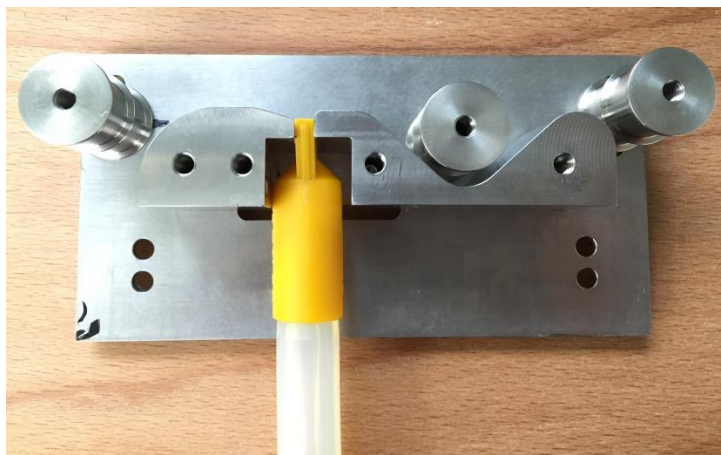


Abbildung 4: Imprägniermodul zweite Generation (Abb. ohne zweite Seitenwand)

Zur genaueren Untersuchung des Imprägnierverhaltens dieses Konzeptes wurden mehrere Geometrien des Moduls gefertigt.

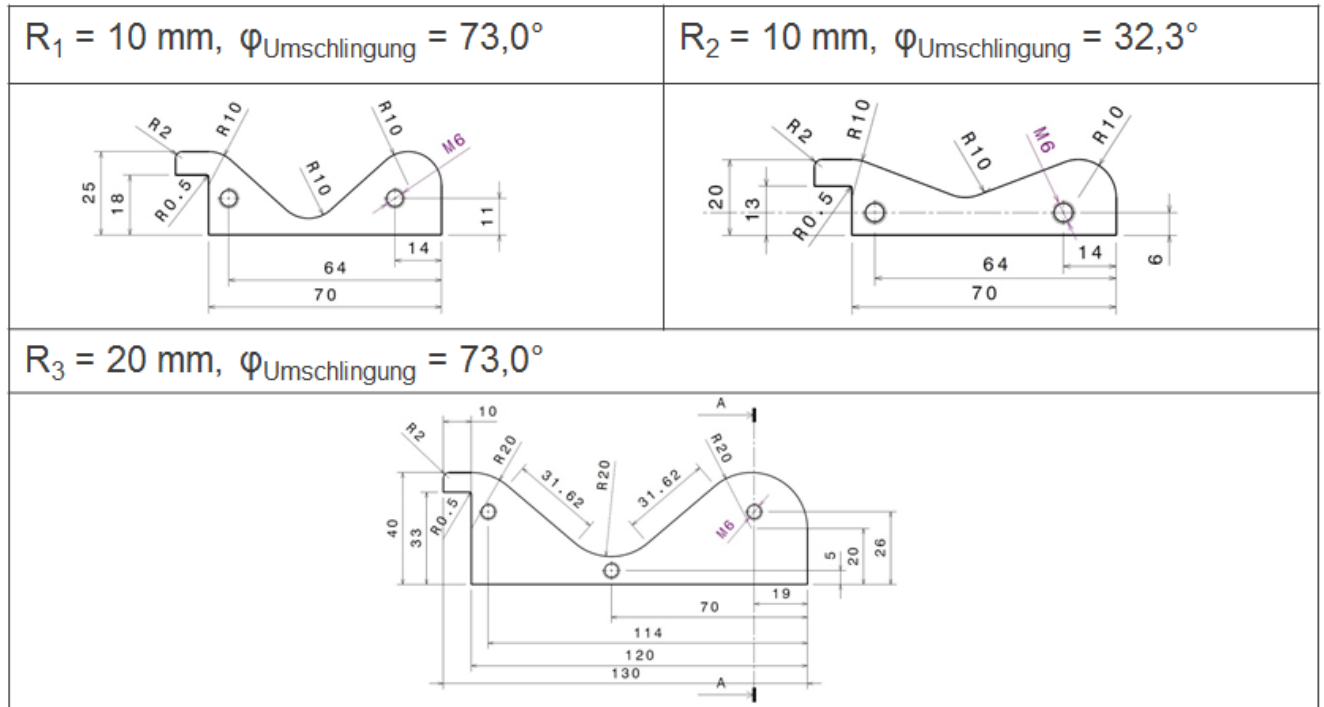


Abbildung 5: drei Geometrien des Imprägniermoduls II

Um zur Untersuchung der verschiedenen Imprägnierungs-Parameter nicht auf eine der Serien Wickelmaschinen zurückgreifen zu müssen, wurde ein einfacher Versuchsstand konzipiert (s. Abbildung 6) und gebaut. Auf diesen wurden die Imprägniermodule montiert und Versuche durchgeführt (s. AP 4.2).

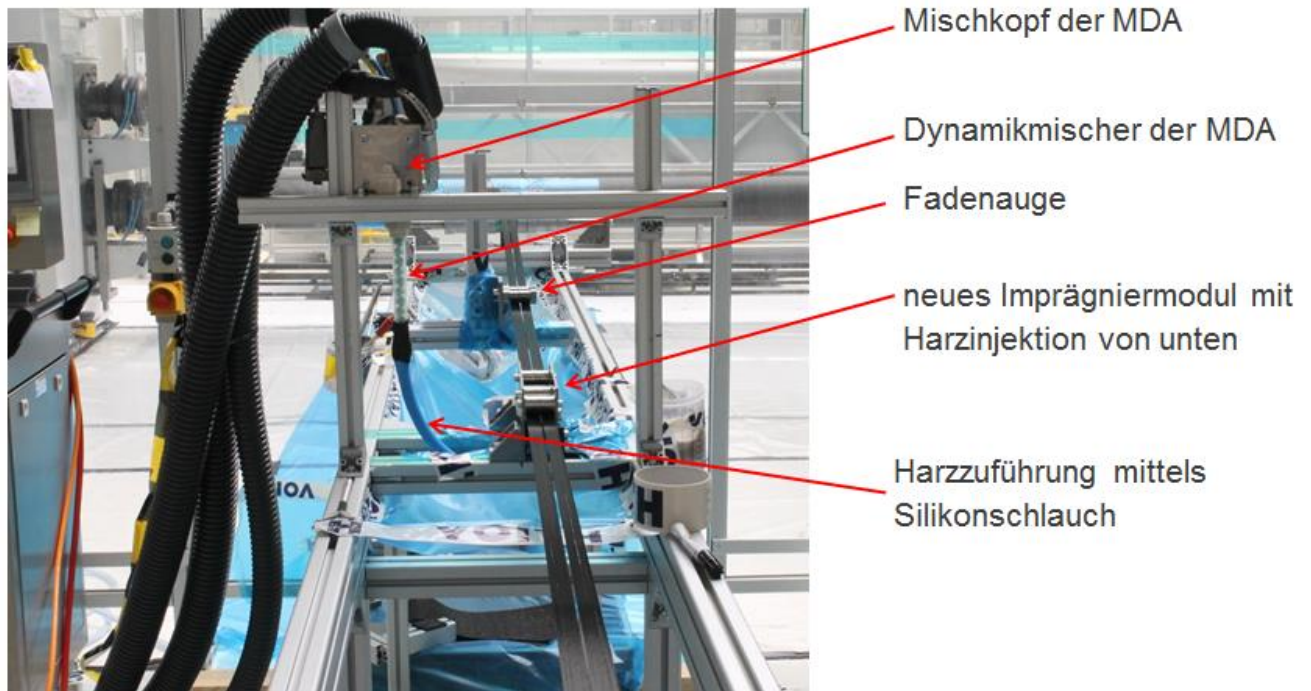


Abbildung 6: auf Versuchsstand montiertes Imprägniermodul II

Für die Versuche wurden, analog zum aktuellen Fertigungsprozess, zwei 50k-Rovings mit definierten Geschwindigkeiten und Abzugskräften getestet. Aus den so erhaltenen, imprägnierten Fasern, wurden Proben entnommen und ausgewertet.



Abbildung 7: Entnommene Probe



Abbildung 8: Ausgehärtete Probe

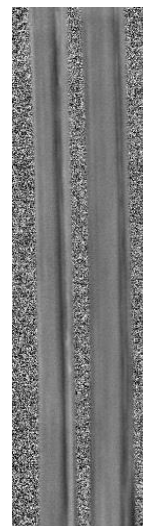


Abbildung 9: Thermographie-Analyse

## Vergleich zwischen altem Imprägniermodul und IWZ-1

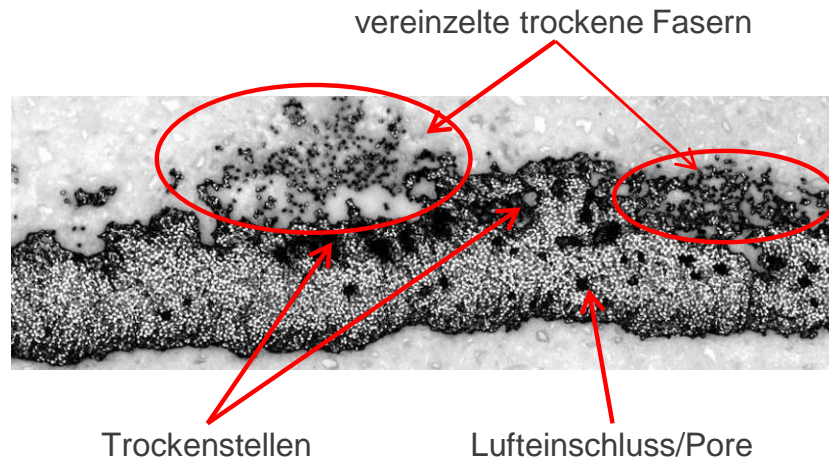


Abbildung 10 Schliffbild Tape VR02

oWIM; R = 10 mm; v = 100 %,  $m_{\text{Harz}} = 330 \text{ g/min}$

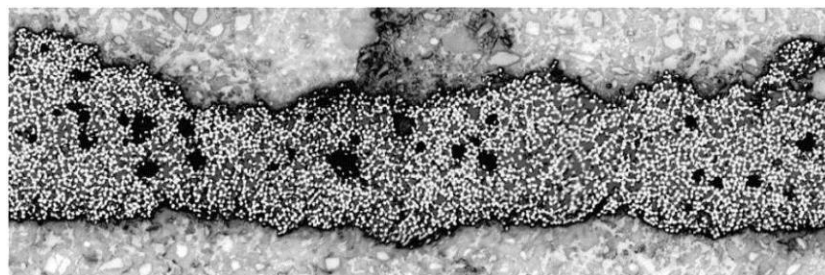


Abbildung 11 Schliffbild Tape VR08

IWZ-1; R = 10 mm; v = 100 %,  $m_{\text{Harz}} = 300 \text{ g/min}$

Bei der Imprägnierung mittels des alten IWZ sind in Abbildung 10 deutliche Trockenstellen und vereinzelte Fasern im Randbereich zu sehen. Der Roving wurde durch das oWIM nicht beidseitig homogen imprägniert. Die Stecke, der Druck und die Zeit im IM reichen nicht aus, um die Matrix vollständig in den Roving zu bringen. Aufgrund der geringen Imprägnierstrecke im oWIM kann nicht die gesamte Matrix vom Roving mitgenommen werden und tritt aus der IE aus. Die Folge ist ein um 7-8 % höherer FVG als der berechnete. Abbildung 11 zeigt den Roving, welcher mit IWZ-1 und geringerer Austragsleistung imprägniert wurde. Alle Fasern sind von der Matrix eingeschlossen und es besteht ein geschlossener Verbund. Demnach ist die Imprägniergüte deutlich höher und der Matrixausschuß wesentlich geringer im Vergleich zur Trommelimprägnierung.



Zusätzliche Weiterentwicklungen und Optimierungen wurden durch Abschlussarbeiten im Rahmen des MAI AutoPreg Projektes realisiert. Die nachfolgende Tabelle greift Schwachstellen, Ursachen und Lösungskonzepte des bisherigen Entwicklungsstandes auf.

**Tabelle 3 Schwachstellen und Lösungskonzepte der bisherigen Imprägniermoduls**

Schwachstelle	Ursache	Lösungskonzept
kein gleichmäßiger FVG	entweichende Matrix	geschlossene Imprägnierkavität
kein gleichmäßiger FVG	Vibration der einseitig eingespannten Wellen	beidseitige Einspannung des Imprägnierwerkzeugs
variierender Umschlingungswinkel	unpräzise Positionierung der IW	Verbindung der einzelnen Wellen oder eindeutige Position
erhöhte Fertigungskosten	austretende Matrix	geschlossene Imprägnierkavität
Gefahr durch selbstentzündliches Harz-Härter-Gemisch	austretendes Harz-Härter-Gemisch	geschlossene Imprägnierkavität
variierender Matrixauftrag	unpräzise Positionierung der Breitschlitzdüse	Integration der Austragsdüse in das Werkzeug

Als Basis für die Entwicklung eines neuen IWZ galt das bisher verwendete oWIM mit zwei Führungs- und zwei Imprägnierwellen. Die sukzessiven Weiterentwicklungen unter Berücksichtigung von Tabelle 3 und der bisherigen Erkenntnisse zur Rovingimprägnierung sowie die Anpassung an den CPP-Prozess lieferten ein nach unten geschlossenes Werkzeugkonzept mit drei Imprägnierzonen und indirektem Matrixauftrag. Aufgrund der hohen Abzugsgeschwindigkeiten und der dadurch geringen Imprägnierzeit, kam nach Foley und Gillespie (FOLEY & GILLESPIE, 2005) weiterhin nur eine Kontaktimprägnierung in Frage. Der Roving wird so ins Werkzeug eingeführt, dass die drei Zonen des Imprägniervorgangs (Eintrittszone, Imprägnierzone und Kontaktzone) gegeben sind.

Als relevante Parameter gehen vor allem die Permeabilität und der Druck in Form der Fadenspannung ein. Die Permeabilität, wird von der Kompaktierung des Rovings beeinflusst, welche wiederum von den Umlenkungen beeinflusst wird. Die Fadenspannung, welche den größten Einfluss bei der Kontaktimprägnierung über eine gekrümmte Fläche hat, hängt ebenfalls von der

Umschlingung ab. Radius und Umschlingungswinkel des Werkzeugs bestimmen also maßgeblich die Imprägnierstrecke, die Imprägnierzeit und damit auch den Imprägniergrad.

In [Tabelle 5](#), [Tabelle 6](#), und [Tabelle 7](#) sind die Geometrien der neu entwickelten Werkzeuge dem alten Werkzeug in [Tabelle 4](#) gegenübergestellt:

**Tabelle 4 IWZ-alt**

Bezeichnung	alt	
Radius [mm]	10	
Umschlingung in Kontaktzone [°]	209,6	
Strecke in Kontaktzone [mm]	36,6	
Umschlingung in Imprägnierzone [°]	159,4	
Strecke in Imprägnierzone [mm]	27,8	

**Tabelle 5 IWZ-1**

Bezeichnung	IWZ-1	
Radius [mm]	10	
Umschlingung in Kontaktzone [°]	166,0	
Strecke in Kontaktzone [mm]	29,0	
Umschlingung in Imprägnierzone [°]	156,0	
Strecke in Imprägnierzone [mm]	27,2	

**Tabelle 6 IWZ-2**

Bezeichnung	IWZ-2	
Radius [mm]	20	
Umschlingung in Kontaktzone [°]	166,8	
Strecke in Kontaktzone [mm]	54,7	
Umschlingung in Imprägnierzone [°]	156,8	
Strecke in Imprägnierzone [mm]	53,0	

Tabelle 7 IWZ-3

Bezeichnung	IWZ-3	
Radius [mm]	10	
Umschlingung in Kontaktzone [°]	84,6	
Strecke in Kontaktzone [mm]	14,8	
Umschlingung in Imprägnierzone [°]	74,6	
Strecke in Imprägnierzone [mm]	13,0	

Wie den obenstehenden Tabellen zu entnehmen ist, wurde sowohl die Umschlingung in der Imprägnierzone, v.a. aber die Gesamtumschlingung in der Kontaktzone bei den neu entwickelten IWZ-Geometrien reduziert. Die Maße und Parameter in der Imprägnierzone von IWZ-1 bewegen sich im Bereich des alten IWZ. Sowohl die Umschlingung, als auch die Strecke sind annähernd identisch. Die Gesamtumschlingung im Kontaktbereich wurde allerdings durch Einsparung der ersten Umlenkung ( $50,2^\circ$ ) deutlich reduziert. Bei IWZ-2 wurden die Umlenkradien auf 20 mm verdoppelt und die Umschlingung im Vergleich zu IWZ-1 gleich gehalten. Dies liefert fast eine Verdopplung der Imprägnierstrecke von IWZ-1 zu WZ-2. Die Vorgabe an IWZ-3 ist die Reduzierung der Umschlingung bei gleichem Radius wie IWZ-1. Die Gesamtumschlingung wurde dabei halbiert, was eine Reduzierung der Fadenspannung um mehr als 75% bedeutet.

Die Geometrie der Injektionskavität, zur Erzeugung des Matrixfilms unter den Faserbündeln, musste exakt festgelegt werden. Die Kavität wurde am unteren Ende abgeschrägt, um die Flussrichtung des Harzsystems zu begünstigen. Außerdem musste ein Höhenunterschied zwischen Anfang und Ende der Kavität konzipiert werden, sodass kein Rückfluss des Harzsystems zum Anfang stattfindet.

Zudem musste sichergestellt werden, dass die Injektionskavität zu jedem Zeitpunkt während des Prozesses vollständig gefüllt ist, um einen konstanten Matrixfilm zu generieren.

Das geschlossene Wellenimprägniermodul (gWIM) besteht aus insgesamt sechs unterschiedlichen Komponenten. Alle Wellen (Führungswellen und Imprägnierwelle) haben einen Steg in der Mitte,

welcher die beiden Rovings trennt ohne sie einzuschnüren. Somit überlappt das Band nicht und die Permeabilität ist über die gesamte Breite homogen. Das dreidimensionale CAD-Modell von IWZ-1 (s. Abbildung 12) wurde im Rahmen einer Masterarbeit erstellt.

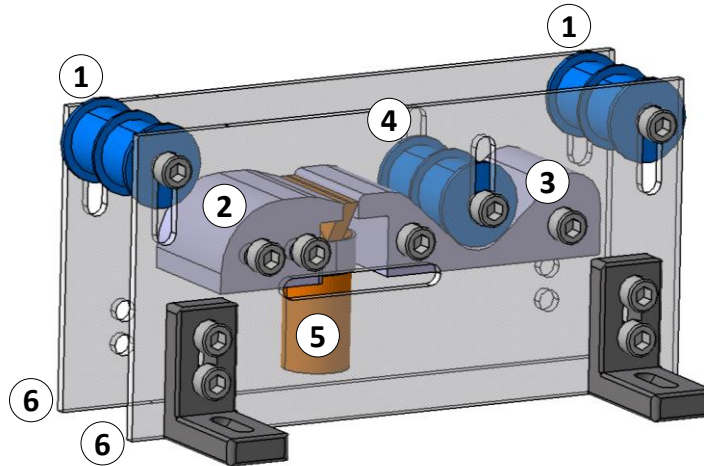


Abbildung 12 CAD-Modell IM mit IWZ-1

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 1 – Führungswellen (Eingang- u. Ausgang) | 2 – Injektionsblock (Eingangsradius) |
| 3 – Imprägnierkavität                    | 4 – Imprägnierwelle                  |
| 5 – Breitschlitzdüse                     | 6 – Grundplatte (beidseitig)         |

Der Roving wird über die linke Führungswelle (1) in das IM geleitet und an dieser Stelle auf die Zielbreite begrenzt. Der Düsenhalter (2) klemmt die Breitschlitzdüse (3) an die Imprägnierkavität (4). Hier sammelt sich die Matrix die vom geführten Roving durch eine Schleppestromung in die Imprägnierkavität (4) transportiert wird.

Die ausgearbeiteten Lösungskonzepte wurden in alle drei IWZ integriert und anschließend getestet. Tabelle 8 zeigt die Parameter der Versuchsreihen 29 bis 40. Die definierten Schwachstellen wurden durch die Umsetzung der Lösungsansätze behoben.

Tabelle 8 Parameter von V29 - VR40

Versuchsreihe	Werkzeug	$v \left[ \frac{m}{min} \right]$	$\dot{m}_{Matrix} \left[ \frac{g}{min} \right]$	$FVG_{soll} [\%]$
VR29	IWZ-2	83,3	250	60,4
VR30			300	56,0
VR31			350	52,2
VR32			380	50,1
VR33		62,5	188	60,4
VR34			225	56,0
VR35			262	52,2
VR36			285	50,1
VR37		41,7	125	60,4
VR38			150	56,0
VR39			175	52,2
VR40			190	50,1

#### Lösungsansätze:

- einem ungleichmäßigen FVG aufgrund von austretender Matrix, wird durch eine nach unten geschlossene Kavität (4) entgegengewirkt
- einem ungleichmäßigen FVG aufgrund vibrierender Wellen, wird durch beidseitig verschraubte Grundplatten (6) entgegengewirkt
- Ein variierender Umschlingungswinkel in der IE wird durch eine präzise festgelegte Position der Imprägnierkavität (2+4) eingeschränkt
- Erhöhte Fertigungskosten durch austretende Matrix werden wie auch schon der ungleichmäßige FVG durch eine einseitig geschlossene Kavität (4) reduziert
- Um einen variierenden Matrixauftrag aufgrund unpräziser Positionierung der Breitschlitzdüse (3) zu vermeiden, wird sie zwischen Düsenhalter (2) und Imprägnierkavität (4) eingeklemmt

Außerdem sind folgende Verbesserungen durch die Verwendung von IWZ-2 erreicht worden:

- Der Matrixverlust im Wickelprozess wurde im Vergleich zum oWIM um 90% reduziert.  
( $m_{Matrix, Verlust, oWIM} = 1400 - 1500g$ ,  $m_{Matrix, Verlust, gWIM} = 145 g$ )

- Gesamtumschlingung wurde von 209° auf 165° reduziert, was eine Verringerung der Fadenspannung um 54 % bedeutet.
- Der FVG kann geschwindigkeitsabhängig auf +0,7 % eingestellt werden.
- geschlossener Verbund – keine vereinzelt trockenen Fasern an Ober- oder Unterseite des Rovings.

Um das Handling des Imprägniermoduls möglichst einfach zu gestalten und die Schwachstellen aus Tabelle 3 weiter zu optimieren, wurde im Rahmen einer zusätzlichen Abschlussarbeit eine neue Generation der Online-Imprägniereinheit entwickelt. Diese wurde aus Kostengründen bisher allerdings nicht realisiert. Sobald eine problemlose Serienfähigkeit garantiert werden kann, ist daran zu denken diese Entwicklung in den Prozess zu integrieren.

Die Online-Imprägniereinheit basiert auf einem dreiteiligen System, bestehend aus den folgenden Komponenten (s. Abbildung 13)

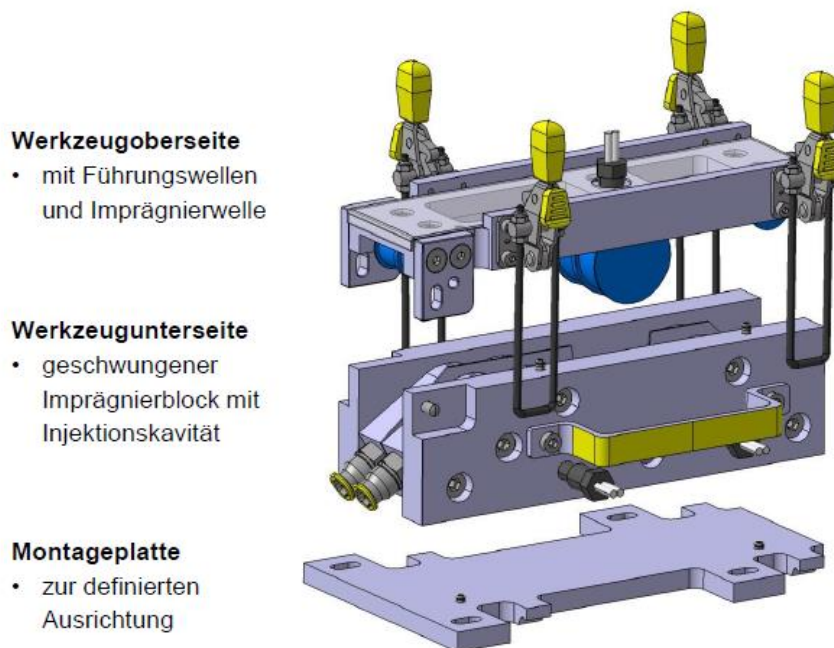


Abbildung 13 Komponenten der Online-Imprägniereinheit (Explosionsdarstellung)

Mit Hilfe der Montageplatte wird die Imprägniereinheit an der vorgesehenen Position auf dem Wickelschlitten montiert. Durch die Verschraubung auf darunterliegenden Querprofilen kann das

System um die vertikale Achse gedreht und somit die Rovingführung präzise eingestellt werden. Die eigentliche Imprägniereinheit, bestehend aus Werkzeugunterseite und Werkzeugoberseite, wird auf der Montageplatte mittels Aufnahmebolzen positioniert und über Schnellverschlüsse fixiert. Nach einem Wickeldurchgang müssen zur Demontage dann lediglich die Schnellverschlüsse gelöst und die beiden Werkzeughälften entnommen werden. Da die ausgerichtete Montageplatte nicht demontiert wird, ist nach einem Werkzeugwechsel keine erneute Ausrichtung der Rovingführung nötig.

Jedem Roving steht eine separate Injektionskavität sowie Imprägnierkavität zur Verfügung. Die Problematik der lokalen Trockenstellen, welche bei Prototypen im Entwicklungsprozess beobachtet wurde, könnte dadurch behoben werden. Durch Aussparungen im Grundkörper (1) kann der Imprägnierprozess von oben überwacht werden. Eine durchsichtige Kunststoffabdeckung (8) verhindert dabei ein mögliches Herausspritzen der Matrix im Falle einer Störung.

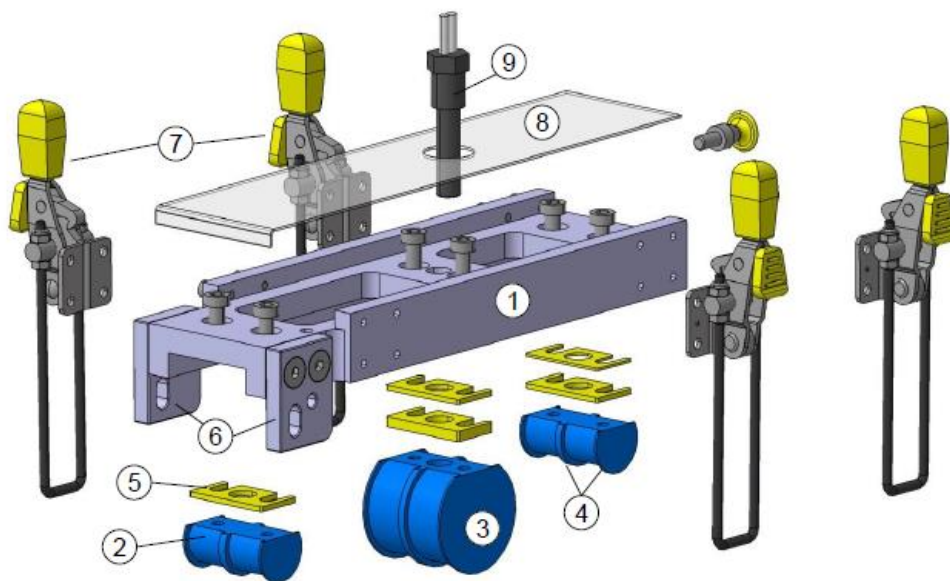


Abbildung 14 Komponenten der Werkzeugoberseite (Explosionsansicht)

- |                    |                              |                        |
|--------------------|------------------------------|------------------------|
| 1) Grundkörper     | 4) Stege und Wellenschultern | 7) Schnellverschlüsse  |
| 2) Führungswellen  | 5) Abstandsbleche            | 8) Kunststoffabdeckung |
| 3) Imprägnierwelle | 6) Scharniere                | 9) Heizpatrone         |

Auf ein Dichtungskonzept in Form von Kunststoffdichtungen wird hier bewusst verzichtet, da es die Komplexität der Imprägniereinheit unnötig erhöht. Außerdem erschweren Kunststoffdichtungen die Reinigung des Systems, führen gegebenenfalls zu Dichtproblemen und müssen von Zeit zu Zeit

ausgetauscht werden. Zudem haben die Versuche mit den Prototypen gezeigt, dass die Matrix nicht durch den Spalt zwischen Imprägnierblock und Seitenplatte dringt und somit auch nicht nach unten aus dem System austritt. Für ein spaltfreies und dichtes Anliegen der Komponenten werden die Auflageflächen daher plangefräst. Über sechs Zylinderschrauben (5) mit selbstsichernden Muttern werden die fünf Teilkomponenten an der Werkzeugunterseite aneinandergedrückt, wodurch das System abgedichtet wird.

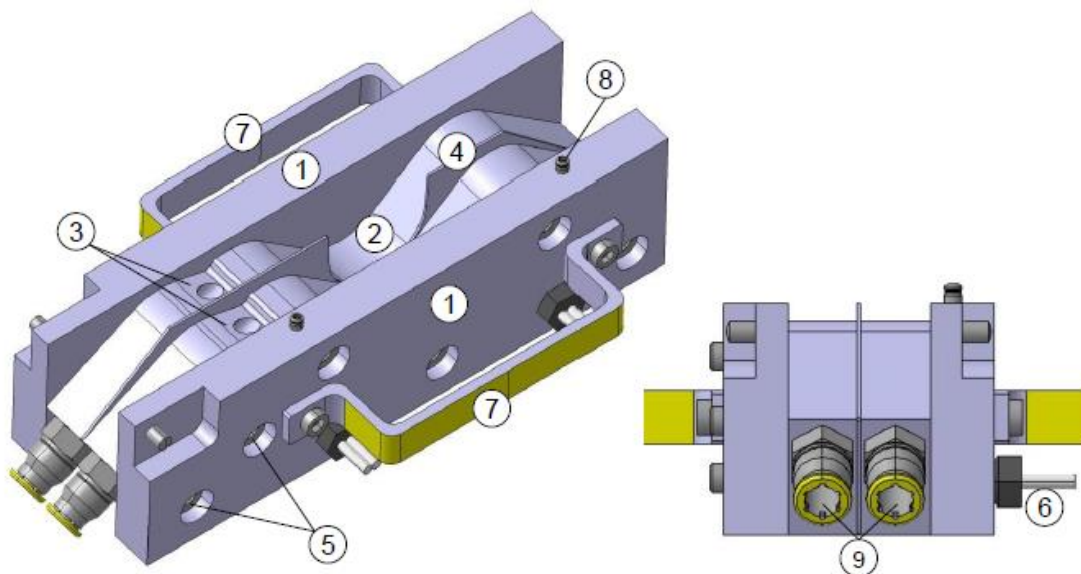


Abbildung 15 Komponenten der Werkzeugunterseite (links: isometrische Ansicht, rechts: Vorderansicht)

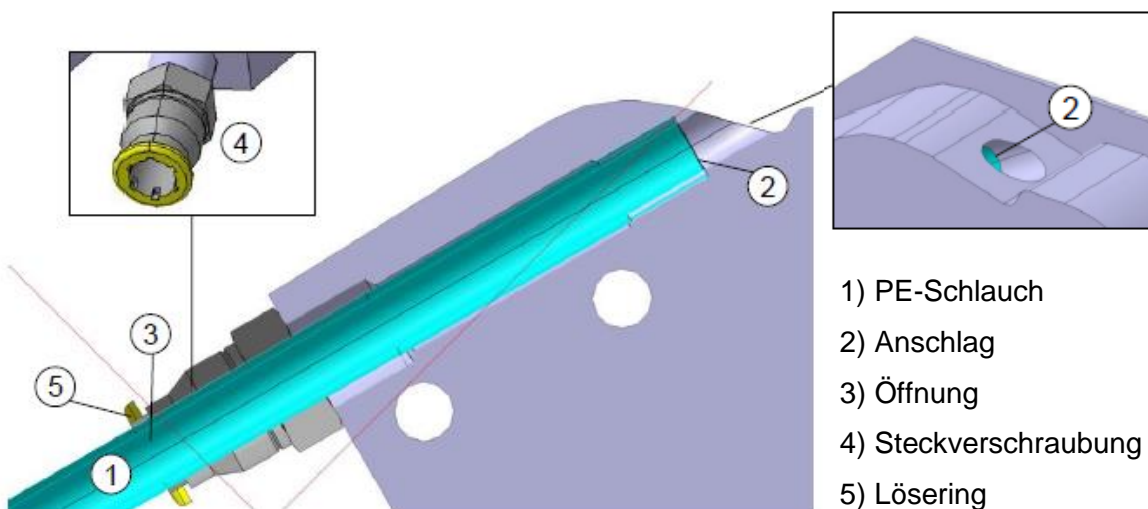
- |                      |                     |                       |
|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 1) Seitenblock       | 4) Blech            | 7) Griffe             |
| 2) Imprägnierblock   | 5) Zylinderschraube | 8) Aufnahmebolzen     |
| 3) Injektionskavität | 6) Heizpatrone      | 9) Steckverschraubung |

Außerdem besteht die Möglichkeit Heizpatronen (6) einzusetzen, um die Imprägniereinheit auf die gewünschte Betriebstemperatur vorzuwärmen und diese Temperatur während des Prozesses zu halten. An zwei Griffen (7) kann das System angehoben und transportiert werden. Die beiden Aufnahmebolzen (8) dienen der präzisen Positionierung der Werkzeuggeste auf der Werkzeugunterseite und an den Steckverschraubungen (9) werden die Schläuche der Matrixzufuhr angeschlossen.



## Injektionskavität

Aufgrund der positiven Erfahrungen aus den Versuchen mit der Injektionskavität der Prototypen wird das Höhenprofil für die finale Konstruktion beibehalten. Jedoch wird auf die Matrixzufuhr über eine Breitschlitzdüse verzichtet und die Matrix stattdessen über einen Schlauch direkt in die Kavität gefördert. Der Anschluss befindet sich aus Gründen der Montagefreundlichkeit und Zugänglichkeit an der Vorderseite des Systems, s. Abbildung 15.



Dazu muss der Schlauch (1) lediglich bis zum Anschlag (2) durch die Öffnung (3) geführt werden und wird dann mit Hilfe einer präparierten Steckverschraubung (4) fixiert. Um den Schlauch wieder zu lösen, muss der Lösering (5) eingedrückt werden. Dadurch entfallen das Vorbereiten und Zuschneiden der Breitschlitzdüsen sowie die umständliche Montage. Zudem werden durch eine geringere Anzahl an Verbrauchsartikeln Kosten eingespart.

## Imprägnierkavität

Die Geometrie der Imprägnierkavität kann in Abbildung 16 betrachtet werden. Der Bereich vor der Matrixzufuhr wurde bezüglich der generierten Fadenspannung optimiert. Diverse Untersuchungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass für sehr hohe Abzugsgeschwindigkeiten nur die Imprägnierung durch Radiusumlenkung eine hohe Imprägniergüte erzielen kann [2, 3, 5]. Durch einen kleineren Kontaktbereich (1) wird dabei die Reibung zwischen Roving und

Umlenkelement reduziert. Die Gesamtumschlingung beträgt  $168^\circ$ , wovon 6 % den Anteil an trockener Umschlingung darstellen. Somit ergibt sich eine Fadenspannungserhöhung um den Faktor 18,6.

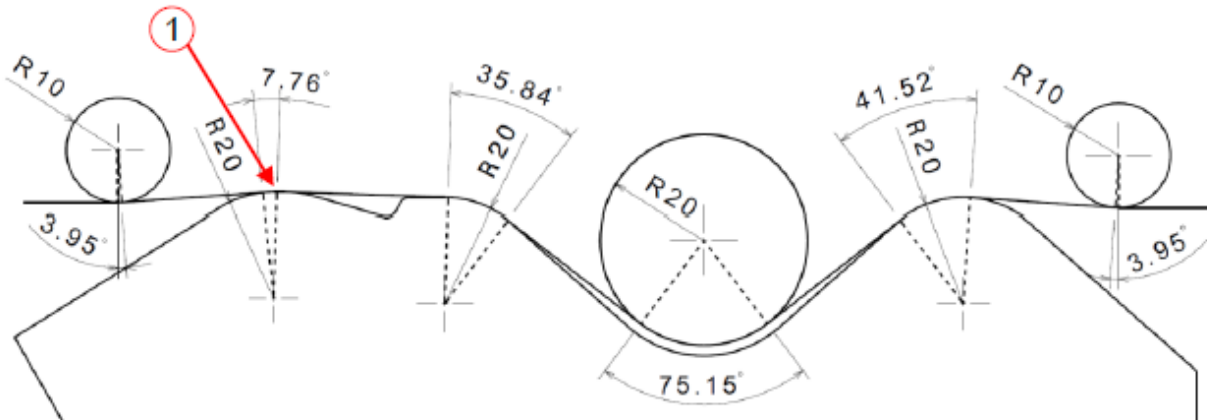


Abbildung 16 Geometrie der Imprägnierkavität

## Montageplatte

Die Montage der Imprägniereinheit ist beispielhaft in Abbildung 4.7 dargestellt. Mit Hilfe von vier Langlöchern (1) wird die Montageplatte (2) auf dem Wickelschlitten verschraubt und ausgerichtet. Zwei Passstifte (3) garantieren eine präzise Positionierung der Werkzeugunterseite zusammen mit der Werkzeugoberseite auf der Montageplatte. Um das System zu verspannen, müssen die Hebel (4) der Schnellverschlüsse gelöst (horizontale Stellung) und die Zugbügel (5) um die Haken (6) gelegt werden. Zuletzt werden alle Hebel wieder in die vertikale Spannstellung versetzt. Die Schnellverschlüsse sind mit einer Verriegelung (7) ausgestattet. Dadurch wird ein unbedachtes oder durch Vibrationen verursachtes Lösen der Spannstellung unterbunden. Zum erneuten Lösen muss die Verriegelung (7) lediglich eingedrückt werden.

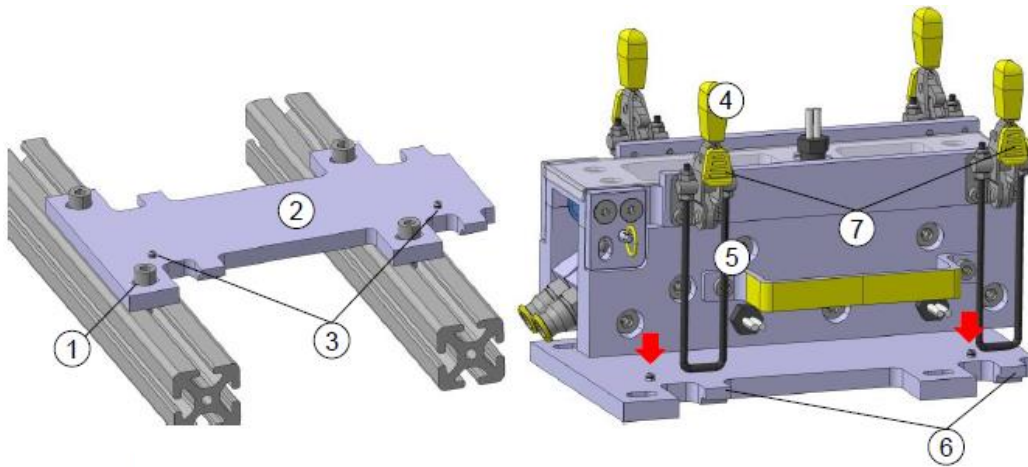


Abbildung 17 Montage der Imprägniereinheit

- 1) Langlöcher für Befestigung 2) Montageplatte 3) Passstifte 4) Hebel 5) Zugbügel  
6) Haken für Zugbügel 7) Verriegelung

## Öffnungsmechanismus

Besonders das Einlegen der Rovings hat sich bei den Prototypen als sehr aufwendig erwiesen. Daher entschied man sich bei der finalen Konstruktion für ein einfaches System mit Schnellverschlüssen. Zusätzliches Werkzeug wird dadurch nicht benötigt und die Rovings können ohne großen Aufwand präzise in das System eingelegt werden. Der Öffnungsmechanismus der Imprägniereinheit ist beispielhaft in Abbildung 18 dargestellt.

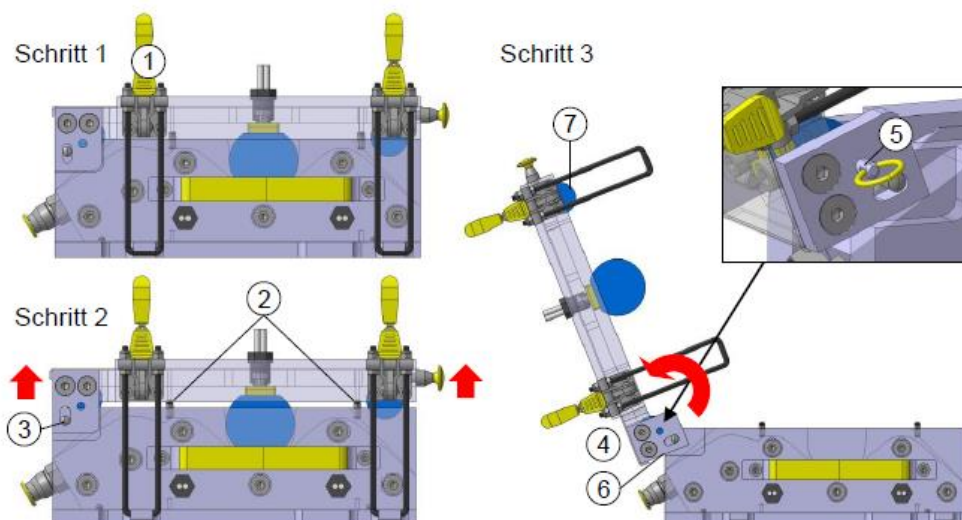


Abbildung 18 Öffnungsmechanismus der Imprägniereinheit

Zunächst werden mit vier Handgriffen die Schnellverschlüsse (1) gelöst. Die Werkzeugoberseite kann dann vertikal nach oben gehoben werden, bis die Pasmstifte (2) die Rotation um den Bolzen (3) nicht mehr einschränken. Jetzt muss die Werkzeugoberseite nur noch nach links gekippt werden, bis sie die stabile Position (4) erreicht. Um ein ungewolltes Zuklappen zu verhindern, muss der Sicherungsstift (5) eingesetzt werden. Die Werkzeugoberseite ist nun in ihrer Position fixiert. Die Rovings können anschließend unterhalb der Führungswelle (6) am Eingang bis zur zweiten Führungswelle (7) durchgeführt und zwischen den Stegen positioniert werden. Während die Werkzeugoberseite zuletzt wieder in die Ausgangsposition versetzt wird, müssen die Rovings am Ausgang festgehalten werden.

Dadurch ist ein einfaches Einlegen der Rovings möglich, ohne dass einzelne Fasern innerhalb des Werkzeuges eingeklemmt werden können.

Bei der Konstruktion des Scharniers für den Öffnungsmechanismus wurden bewusst keine Lager in Form von Wälz- oder Gleitlagern eingesetzt. Diese könnten unter Umständen durch das Harzsystem verschmutzt und dadurch verklebt werden, wodurch die Öffnungsfunktion nicht mehr gewährleistet wäre. Zudem erschweren Lager die Reinigung. Aus diesen Gründen wird ein einfaches System umgesetzt, bei dem zwei Zylinderstifte in einer Führung laufen (s. Abbildung 19).

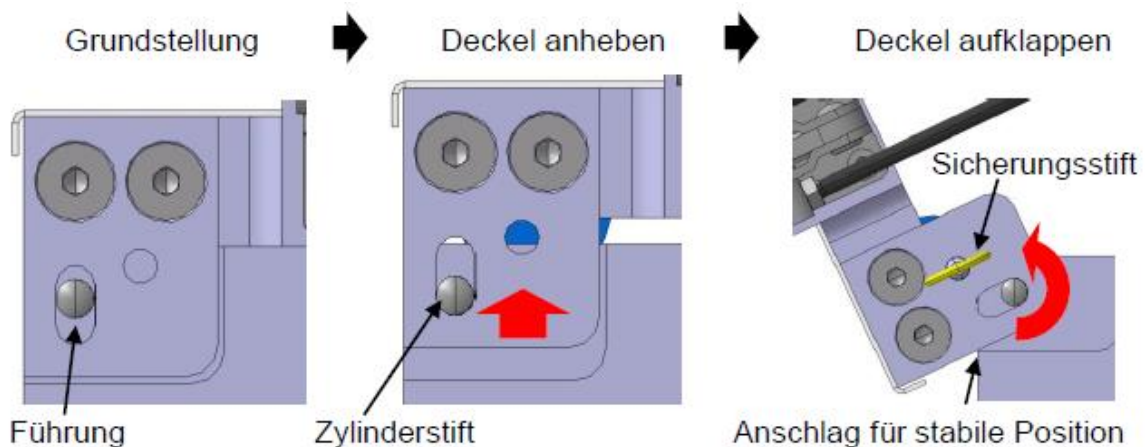


Abbildung 19 Scharnier für den Öffnungsmechanismus

## Beheizen der Imprägniereinheit

Bei der aktuellen Imprägnierung im CPP-Prozess werden die Führungselemente derzeit nicht beheizt. Für den Fall, dass dies jedoch im Laufe der Prozessentwicklung notwendig wird, soll die Möglichkeit für diese Funktion vorgesehen werden.

Eine denkbar einfache Umsetzung ist die Nutzung von Heizpatronen, welche bei Bedarf von außen in das System eingesetzt werden (Abbildung 20).

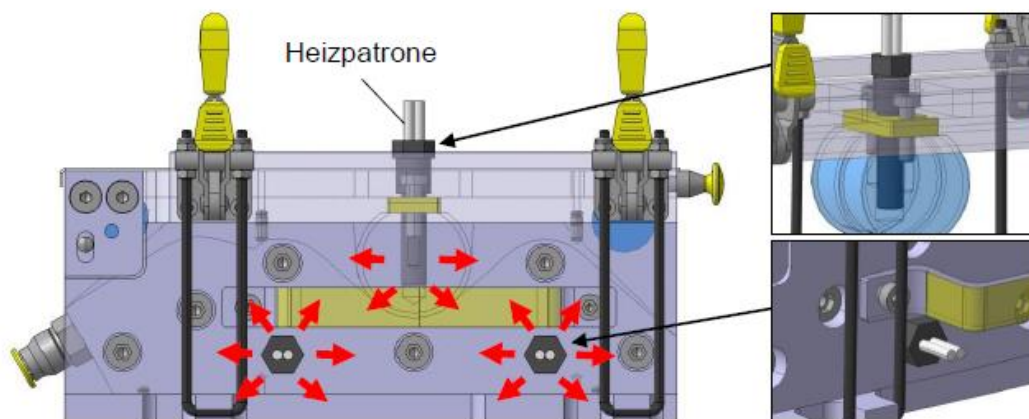


Abbildung 20 Beheizen der Imprägniereinheit mittels Heizpatronen

Dazu werden zwei Heizpatronen von der Seite in die dafür vorgesehenen Bohrungen in der Werkzeugunterseite unterhalb der Imprägnierzonen eingesetzt. Die dritte Heizpatrone wird von oben senkrecht in die Imprägnierwelle zwischen zwei Befestigungsschrauben eingeführt. Somit befinden sich die Wärmequellen in unmittelbarer Nähe der drei Imprägnierzonen. Durch ein Außengewinde am Ende jeder Heizpatrone, können diese mit der Werkzeugunterseite bzw. Werkzeuoberseite verschraubt werden. Auf die Ansteuerung der Heizpatronen mit Hilfe eines speziellen Steuergeräts, einem sogenannten Multizonen-Regler, wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

## AP 2.3 Erstellung eines Testwickelprogrammes, Platinenerstellung (Halbzeug)

- beteiligt -

Das Testwickelprogramm wurde bei C-CON mit COMPOSCAD™ erstellt und simuliert. Der Dorn für die Platinenwicklung wurde bereitgestellt. Erste Platinen für die Schikane-Wanne wurden im April 2015 gewickelt.

## Ü-AMS: Erste Platine(n) erfolgreich hergestellt

Die erste Platinenwicklung für die Schikane-Wanne mit entsprechendem Materialsystem, wurde gemäß dem Anforderungsprofil Anfang Mai 2015 gefertigt. Die Platine liegt vor und der Meilenstein konnte erreicht werden.

### AP 2.4 Konstruktion und Erstellung Schikanewerkzeuge

- beteiligt -

Das entsprechende Werkzeug wurde konstruiert, gefertigt und zur Fertigung der Wanne verwendet (Abbildung 21, Abbildung 22).



Abbildung 21 - Schikane-WZ, Pressen - Oberwerkzeug

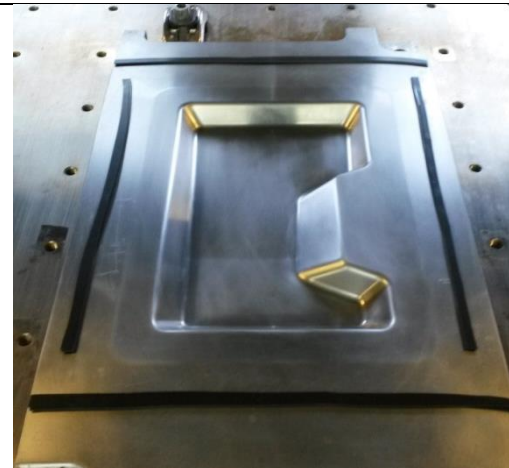


Abbildung 22 – Schikane-WZ, Pressen - Unterwerkzeug

## AP 2.5 Herstellung verschiedener Schikanebauteile

- beteiligt -

Es wurden ca. 50 Stück der (Schikane) Wannen gefertigt (s. Abbildung 24).



Abbildung 23 - Schikanebauteil Detailansicht



Abbildung 24 - Schikanebauteile

## AP 2.6 - Testen und Auswerten der Schikanebauteile

Das Schikanebauteil „Testwanne“ wurde seitens BMW mehrfach qualitativ getestet (Thermographie, Schliff, Schnitt). Dabei hat sich durchweg die Imprägnierqualität der Rovings als entscheidender, aber auch problematischer Prozessschritt gezeigt. Dies wurde durch einzelne Trockenstellen und Blasen in den ausgehärteten Bauteilen sichtbar. Die positionsgenaue Rovingablage stellte sich als reproduzierbarer Prozess dar, eine konstante Ablagebreite muss zum Serienprozess hin aber noch optimiert werden. Eine kritische Faserwinkeländerung ist durch den Umformprozess nicht entstanden. Durch die fehlende Fixierung z.B. durch vernähen der Rovings kommt es jedoch zu einem Verschwimmen der Fasern, v.a. der UD-Lagen im Inneren des Bauteils.



Abbildung 25 Ondulationen (verschwommene Fasern )

Das verwendete RTM-Serienharzsystem von BMW stellt aufgrund der hohen Reaktivität bei Raumtemperatur die höchsten Ansprüche an den Prozess. Eine erhöhte Temperatur (ca. 40° C) ist im Imprägnierschritt notwendig, um die niedrige Viskosität zum vollständigen Durchtränken des Rovings zu gewährleisten. Allerdings verringert sich dadurch die Topfzeit drastisch, weswegen eine anschließende Kühlung der Wickelumgebung und eine Tiefkühlung der fertig gewickelten Platinen notwendig sind.



Um diesen Prozess weiter zu optimieren, wurde Voith intern eine Reihe von Konsolidierungsversuchen mittels eines Doppeldiaphragma's durchgeführt. Der grundsätzliche Aufbau wird in Abbildung 26 dargestellt.

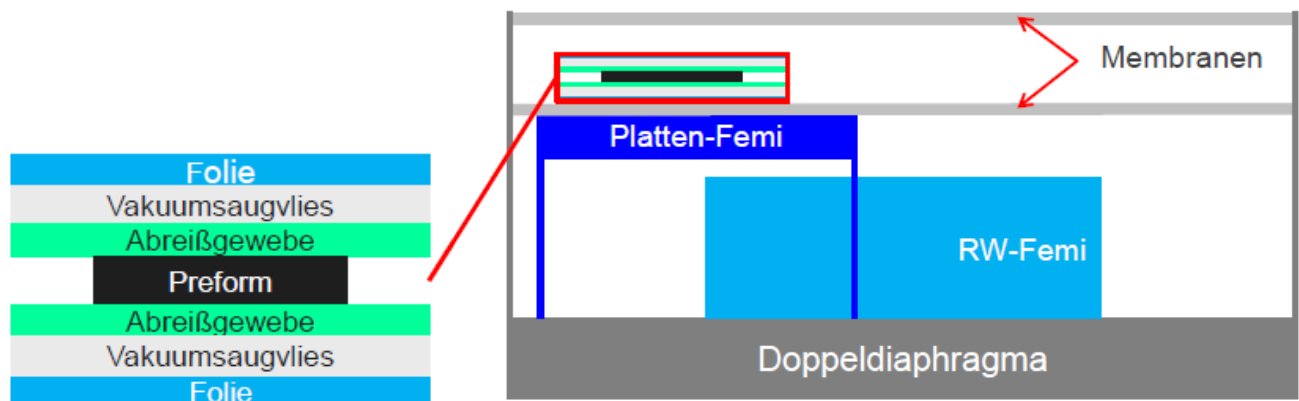


Abbildung 26 Aufbau Doppeldiaphragma

Da sich die Folie in diesem Fall nach dem Tiefkühlprozess noch auf dem Bauteil befindet, kann die Luft von der Laminatoberfläche nicht abgesaugt werden. Durch das dicke, unebene Paket kann schlecht Druck aufgebaut werden und es kommt zu einer unzureichenden Verteilung des Harzes auf der harzreichen Seite und zu einer schwachen Imprägnierung auf der harzarmen Seite Abbildung 27.



Abbildung 27 Unregelmäßigkeiten und Trockenstellen bei VR 01

Im Laufe der Versuchsreihe wurde der Versuchsaufbau immer wieder verändert. Erste Optimierungen sind bei Versuch 3 aufgetreten. Der Aufbau wurde hier folgendermaßen gewählt:

Laminat → perforierte Folie → dickes Saugvlies → unperforierte Folie

Drei Seiten des Aufbaus wurden hierbei offen gelassen (s. Abbildung 28) um die Luft besser absaugen zu können. Ein Saugvlieskanal, in Richtung Vakuumsaugstutzen, wurde in den Schichtaufbau integriert.

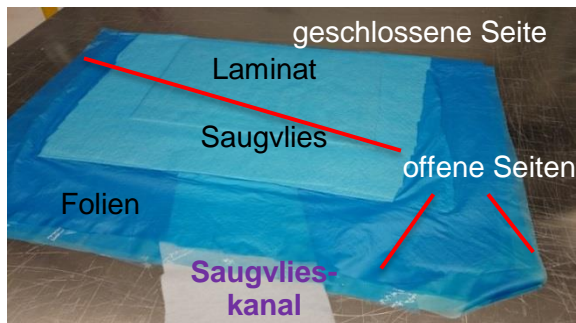


Abbildung 28 Versuchsaufbau mit offenen Seiten VR 03

Die harzreiche Seite weist hier eine bessere Verteilung des Harzes an der Oberfläche auf. Trockenstellen sind nur noch punktuell zu finden. Die harzärmere Seite wurde ebenfalls besser imprägniert und besitzt weniger Trockenstellen (s. Abbildung 29)

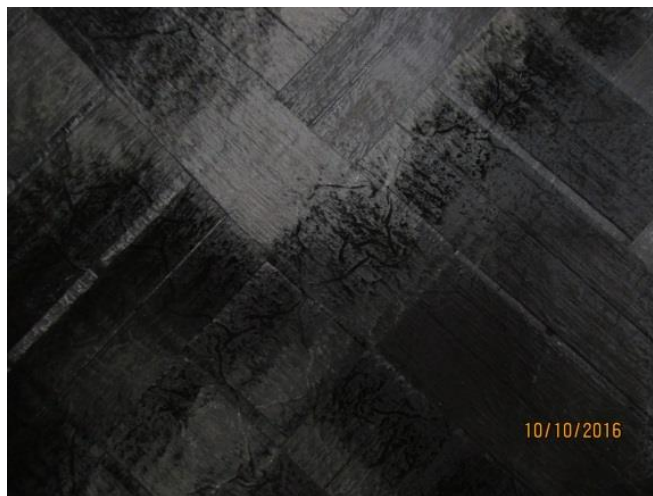


Abbildung 29 Verbesserte Imprägnierung VR 03 (harzreich links; harzarm rechts)

Bei den Versuchen 05-08 wurde zusätzlich ein Abreißgewebe in den Versuchsaufbau integriert. Der Einsatz von Saugvlies und perforierter Folie variiert in den unterschiedlichen Versuchen. Versuch 08 zeigt verbesserte Ergebnisse zu den vorherigen Versuchen.

Der Versuchsaufbau besteht aus:

Laminat → Abreißgewebe → dickes Saugvlies → unperforierte Folie

Abbildung 30 zeigt oberflächlich kleine Bläschen und Unebenheiten auf der harzreichen Seite des Bauteils.



Abbildung 30 Harzreiche Seite VR 08 mit Abreißgewebe

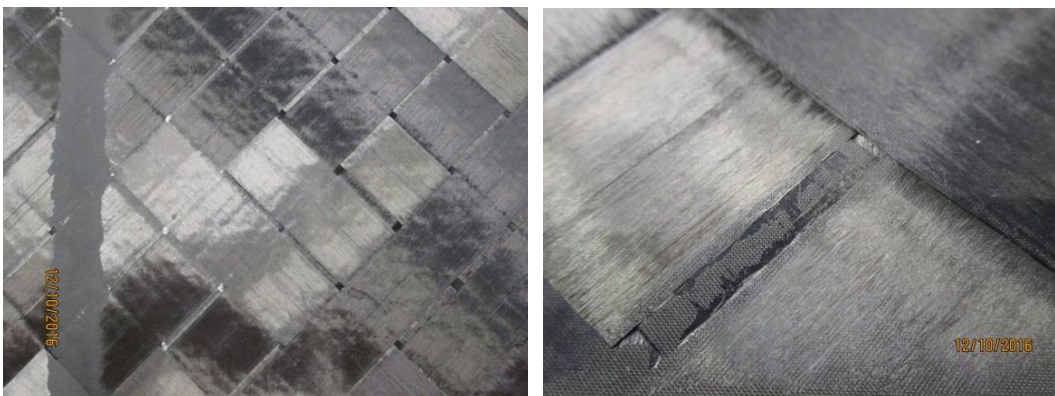


Abbildung 32 Harzarme Seite von VR 08

Abbildung 31 Harzreicher Streifen aus VR 03

Die harzarme Seite des Bauteils besitzt zu viele Trockenstellen. Man sieht einen deutlichen Unterschied zur harzreichen Seite des Bauteils aus Versuch 03 (s. Abbildung 31). Aufgrund der positiven Ergebnisse aus den Versuchen 05-08 lässt sich erschließen, dass das Abreißgewebe besser geeignet ist als eine perforierte Folie. Das Abreißgewebe ermöglicht ein flächendeckendes Vakuum und verhindert Saugvliesrückstände auf der Bauteiloberfläche. Der damit einhergehende Nachteil ist, dass sich das Abreißgewebe teils unzureichend drapieren lässt, führt bei der dreidimensionalen Umformungen zur Faltenbildung.

Nachfolgend wird der Best-Practice-Folienaufbau dargestellt:

Laminat → Abreißgewebe → Vakuumvlies → unperforierte Folie



Ist die Preform in Folie eingeschlagen und die harzreiche Seite nach oben gelegt, sodass mehr Harz auf die harzarme Seite fließen kann, fließt nur sehr wenig Harz aus der Preform heraus. Nachteil ist allerdings, dass das Saugvlies viel Harz aufsaugt (teilweise bis zu 10% Gewichtsverlust). Weitere Konsolidierungsversuche fanden auf einem Plattenwerkzeug statt. Die Versuchsreihe 01-04 zeigt dabei je Versuch unterschiedliche Ergebnisse. In den Versuchen 01-02 wurde jeweils die harzarme Seite nach oben gelegt. Das führte zu starken Ondulationen der Fasern und teilweiser Harzansammlungen an der harzreichen Seite. Auf der harzarmen Seite hingegen finden sich Trockenstellen und kleine Luftblasen.

Bei den Versuchen 03-04 wurde die harzreiche Seite nach oben gelegt, damit auch hier mehr Harz auf die harzarme Seite fließen kann. Auf der harzarmen Seite finden sich allerdings dennoch Trockenstellen und Luftblasen. Die harzreiche Seite zeigt hier eine schwächere Ondulation der Fasern.

Fazit dieser Versuchsreihe ist, die Folien bereits in der Tiefkühlung abzuziehen. Die Stacks sollten außerdem erst eingefroren, dann zugeschnitten und dann wieder eingefroren werden damit die Fasern nicht ondulieren bzw. schwimmen. Die besten Ergebnisse lassen sich erreichen, wenn die harzreiche Seite nach oben gerichtet ist, damit das Harz auf die harzarme Seite durchgedrückt wird.

## M2 Erfolgreiche Darstellung des CPP-Prozesses

- Lead: BMW –

Die Funktionalität des CPP-Prozesses wurde anhand des Schikanebauteils grundsätzlich validiert, allerdings bestehen Limitierungen hinsichtlich des von BMW verwendeten RTM-Harzsystems und durch nicht vorhandene Nähfäden zur Fixierung der Rovings (siehe AP 2.6).

Beim Wickeln wird die Imprägnierung als entscheidender Schritt angesehen. Dies muss weiter optimiert werden.

Im Prozessschritt Pressen ist eine genaue Steuerung der Pressen sowie optimierte Presswerkzeuge von entscheidender Bedeutung. Durch diese muss ein Verschwimmen der UD-Lagen sichergestellt werden.

Dieser Meilenstein wurde erreicht.

### AP 3.1 - Auswahl eines Produktivbauteils

- Lead BMW -

Als CPP-Produktivbauteil wurde seitens BMW ein zweischalige Windlauf ausgewählt.

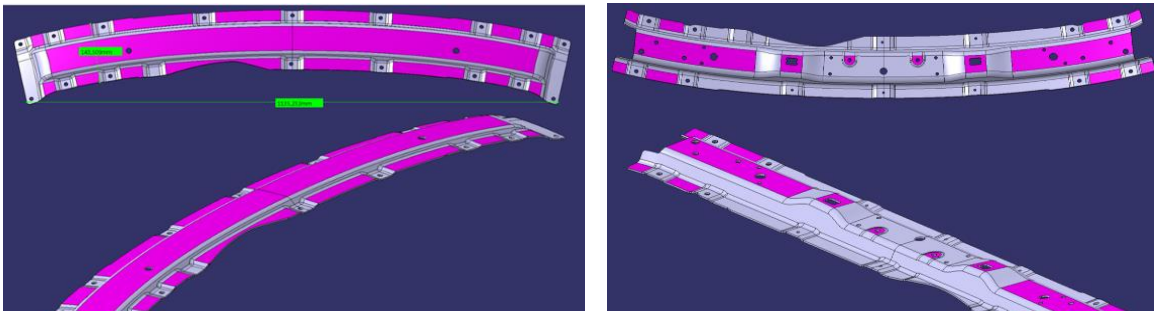


Abbildung 33 CPP-Produktivbauteile Windlauf Schale 1 (links) und Schale 2 (rechts)

Der Grund zur Auswahl dieses Bauteils ist die gute Vergleichbarkeit (qualitativ wie wirtschaftlich) zum bereits in Serie verbauten CFK-Serienbauteil.. Dieses wird aktuell im Nasspressverfahren hergestellt.

### AP 3.2 - Konstruktion und Erstellung des Prepregwerkzeugs und Modifikation des Presswerkzeugs

- Lead: C-CON -

Zur Herstellung des Prepregs werden zwei 50k-Rovings auf einen Dorn mit den Abmaßen  $\varnothing=414\text{mm}$  und  $l=5.350\text{mm}$  gewickelt. Diese Abmaße erlauben die maximale Ausnutzung der (Prepreg)Fläche in Abhängigkeit zur maximal möglichen Gelerzeit des Harzsystems, die auf das Bauteil Windlauf ausgelegt ist.

**Behälter und Flaschen**

Projekt: Kern | Kontur | Maschinenprogramm | Ausführung

Kernversatz: 255.00 mm

Zylinderdurchmesser: 414.00 mm

Zylinderlänge: 6000.00 mm  Gesamtlänge: 6150.00 mm

Symmetrisch  Beinhalten den Länge Aufnahme

Dom vorne:  Isotensoid  Elliptisch

Länge: 75.00 mm, Durchmesser: 120.00 mm, Länge Aufnahme: 0.00 mm, Durchmesser Einspannung: 20.00 mm, Länge Einspannung: 0.00 mm

Dom hinten:  Isotensoid  Elliptisch

Länge: 75.00 mm, Durchmesser: 120.00 mm, Länge Aufnahme: 0.00 mm, Durchmesser Einspannung: 20.00 mm, Länge Einspannung: 0.00 mm

Anzahl Linearsegmente: 50, Anzahl Segmente im Dornbereich: 50

Verwenden Dorn Konturdatei

C:\business\customer data\Germany\C-Con\test240214a.mdr | Load Contour

Anzahl Radialsegmente: 50

---

**Laminat Behälter/Flasche**

Schicht	Fehler	Beschreibung	WA (deg)	BW (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (kg)	Zeit (min)	Kosten (€)	OD (mm)
1	Helix	NC=28, R=+9, HP=292.74mm, TP=292.74mm	45.00	34.00	0.403	5.02	6.42	0.00	414.81
2	Umlaufende	SP=40.00mm, EP=5960.00mm	88.50	34.00	0.388	4.59	5.04	0.00	415.58
3	Umlaufende	SP=-20.00mm, EP=-75.00mm	88.50	34.00	0.194	0.02	0.08	0.00	415.97
4	Helix	NC=29, R=-9, HP=292.74mm, TP=292.74mm	45.00	34.00	0.396	5.20	6.71	0.00	416.76
5	Umlaufende	SP=40.00mm, EP=5960.00mm	88.50	34.00	0.388	4.59	5.04	0.00	417.54
6	Umlaufende	SP=-20.00mm, EP=-75.00mm	88.50	34.00	0.194	0.02	0.08	0.00	417.93
7	Helix	NC=29, R=-9, HP=292.74mm, TP=292.74mm	45.00	34.00	0.396	5.20	6.71	0.00	418.72
8	Umlaufende	SP=40.00mm, EP=5960.00mm	88.50	34.00	0.388	4.59	5.04	0.00	419.49
9	Umlaufende	SP=-20.00mm, EP=-75.00mm	88.50	34.00	0.194	0.02	0.08	0.00	419.88
10	Helix	NC=29, R=-9, HP=292.74mm, TP=292.74mm	45.00	34.00	0.396	5.20	6.71	0.00	420.67

Originalkern: Spindelstock | Zylinder | Reitstock

Durchmesser: 120.00 | 414.00 | 120.00 mm

Position: -75.00 | 0.00 | 6000.00 | 6075.00 mm

Gesamtdicke: 3.34 mm, Gesamtgewicht: 34.45 kg, Gesamte Wickelzeit: 41.91 min, Gesamte Werkstoffkosten: \$ 0.00

Abbildung 34 Programmierte Bandablage

Hierfür wurde ein Wickelprogramm generiert, welches die Rovings in den geforderten Faserwinkeln ablegt. Die Schwierigkeit hierbei ist die saubere Umlenkung um die Polkappen. Das Rovingband darf sich hierbei nicht zusammenziehen, so dass die komplette Dorn/Zylinderfläche optimale Laminatqualität aufweist. Es sind verschiedene Musterkennzahlen möglich, die sich durch die Überkreuzungen der positiven und negativen Bänder unterscheiden.

Der daraus generierte Maschinencode muss dann so fein korrigiert werden, bis alle Maschinenachsen die geforderten Bewegungen ausführen, dass weder eine Rovingverjüngung durch Verrutschen des Bandes noch durch ungewollte Fadenspannungen auftreten. Hierbei kann beispielsweise die A-Achsendrehung angepasst werden.

```

1 % N_MP_BMW_D6_WLO_AWL_14L_MPF
2 ;$PATH=/_N_MPF_DIR
3 N00100 MSG ("")
4 N00110 ACC[Z]=50 ;XQR 1 - 100$
5 N00120 G01 G71 G94 G641 ADIS=50
6 N00130 FGROUPE (C,A,X,Z)
7
8 N00140 G90 X0.000 F9000
9 N00150 M00
10 N00160 Z206.381 F15000
11 N00170 A3.242 F5400
12 N00180 X87.000 F9000
13
14 N00190 G91
15 N00200 M00
16 N00210 SP_BMW_D6_WLO_AWL_14L_L1 P28
17 N00220 M00
18
19 N00230 G90 X0.000 F9000
20 N00240 M00
21 N00250 Z295.000 F15000
22 N00260 A0.000 F5400
23 N00270 X87.000 F9000
24
25 N00280 G91
26 N00290 M00
27 N00300 SP_BMW_D6_WLO_AWL_14L_L2 P1
28 N00310 M00

```

```

% N_SP_BMW_D6_WLO_AWL_14L_L1_MPF
; $PATH=/_N_MPF_DIR
N00100 G01 G91 C0.883 Z7.604 X0.034 A5.300 F21148
N00110 C0.758 Z6.509 X-0.002 A3.248 F27890
N00120 C0.612 Z5.210 X-0.009 A2.630 F33264
N00130 C0.510 Z4.282 X-0.006 A2.313 F35395
N00140 C0.451 Z3.743 X-0.003 A2.118 F37180
N00150 C0.422 Z3.435 X-0.002 A1.984 F39156
N00160 C0.407 Z3.252 X-0.000 A1.897 F41277
N00170 C0.400 Z3.143 X-0.000 A1.814 F43423
N00180 C0.402 Z3.082 X-0.000 A1.754 F45317
N00190 C0.409 Z3.059 X-0.000 A1.705 F44167
N00200 C0.420 Z3.070 X0.001 A1.662 F43196
N00210 C0.436 Z3.110 X0.001 A1.624 F42395
N00220 C0.458 Z3.179 X0.002 A1.585 F41759
N00230 C0.487 Z3.281 X0.002 A1.549 F41289
N00240 C0.521 Z3.415 X0.003 A1.511 F40987
N00250 C0.563 Z3.587 X0.005 A1.470 F40853
N00260 C0.615 Z3.803 X0.005 A1.426 F40880
N00270 C0.680 Z4.069 X0.007 A1.378 F41038
N00280 C0.756 Z4.397 X0.010 A1.322 F43070
N00290 C0.853 Z4.799 X0.015 A1.261 F45168
N00300 C0.970 Z5.290 X0.019 A1.192 F47382
N00310 C1.115 Z5.891 X0.029 A1.115 F49760
N00320 C1.293 Z6.620 X0.040 A1.027 F52345
N00330 C1.515 Z7.497 X0.058 A0.931 F55177
N00340 C1.784 Z8.537 X0.083 A0.825 F58291
N00350 C2.111 Z9.741 X0.118 A0.707 F54597
N00360 C2.501 Z11.094 X0.169 A0.581 F50108
N00370 C2.976 Z12.615 X0.255 A0.454 F44456
N00380 C3.584 Z14.445 X0.403 A0.350 F36864
N00390 C4.381 Z16.822 X0.590 A0.299 F24643
N00400 C5.297 Z19.610 X0.658 A-0.024 F28588
N00410 C6.055 Z23.418 X0.169 A-0.058 F28457
N00420 C6.475 Z23.419 X0.169 A-0.058 F44192
N00430 C6.630 Z23.419 X0.169 A-0.058 F55323
N00440 C13.347 Z46.837 X0.338 A-0.116 F62390
N00450 C1602.719 Z5759.983 X-0.002 A-0.001 F62279
N00460 C6.653 Z20.417 X0.687 A-0.182 F57063

```

Abbildung 35 Programmierter Maschinencode

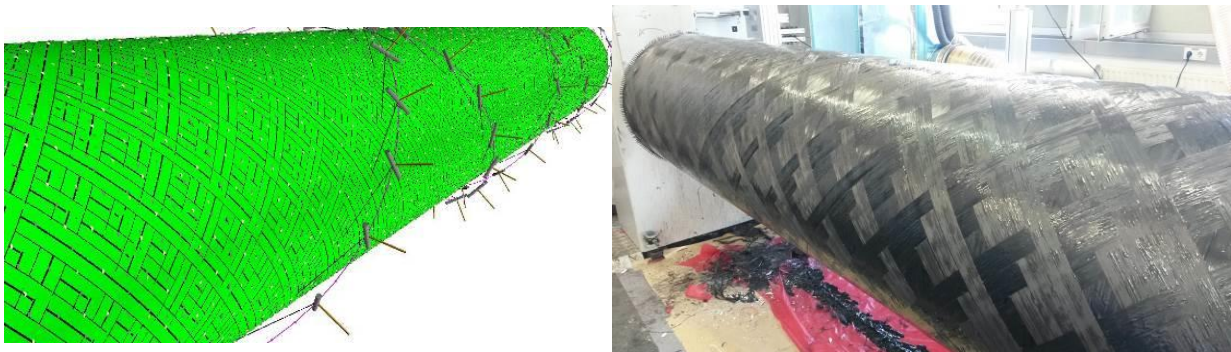


Abbildung 36 Programmierte Bandablage (links) und gewickelte Bandablage (rechts)

Für das Prepregwerkzeug (Wickeldorn) sind dann zusätzliche Schneidgummis notwendig die einen sauberen Umlauf- und Längsschnitt, zum Abziehen der Prepregplatte ermöglichen.



Abbildung 37 Wickelkern

### AP 3.3 - Pressen der Produktivbauteile

- Lead BMW -

Die tiefgekühlten und vorgeformten Wickelplatinen werden in einem beheizten Formwerkzeug, analog dem Nasspressen, eingelegt und verpresst. Durch Vorformung der Platinen lassen sich diese sowohl manuell, wie auch automatisiert mit dem Roboter einlegen. Durch die Vorformung zentriert sich die Platine von selbst im Presswerkzeug.



Abbildung 38 Einlegen der Preform in das Presswerkzeug

Die Schliesskurve der Presse muss so optimiert werden, dass das vorimprägnierte Material einerseits vollständig verpresst wird und andererseits ein zu starkes Verschwimmen der Lagen verhindert wird.



## M3 Produktivteile mit definiertem Eigenschaftsprofil (AP1) hergestellt

Es konnten diverse Produktivbauteile (Windlauf) mit dem CPP-Prozess erfolgreich hergestellt werden. Es bestehen weiterhin die gleichen Limitierungen hinsichtlich der Imprägnierung, dem Verschwimmen der Fasern und der Rovingablage wie bei dem Schikanebauteil aus AP2.



Abbildung 39 Erste Produktivbauteile "Abdeckung Windlauf"

Das gewünschte Eigenschaftsprofil aus AP1 konnte dabei erzielt und der Meilenstein damit erreicht werden.

### AP 3.4 - Bauteilbeschnitt

- Lead C-CON -

Die Produktivbauteile sind bei C-CON erfolgreich befräst worden. Es gab keine zu beanstandenden Probleme. Wie vom Fräsen von CFK bekannt, mussten die Bauteile anschließend entgratet werden, um die scharfe Schnittkante zu beseitigen.

Weitere Bauteile wurden zum Fräsbeschnitt an BMW übergeben und auf der Serien-Fräsanlage bearbeitet.





Abbildung 41 Fräsaufnahme Windlauf oben

## AP 3.5 - Bauteilprüfung

- Lead BMW -

Die gepressten Bauteile „Windlauf oben“ wurden bezüglich der Qualität im Labor untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass die Imprägnierung der Fasern mit Harz nicht immer vollständig war. In einem CT-Bild wurden die trockenen Bereiche entlang der Fasern visualisiert.

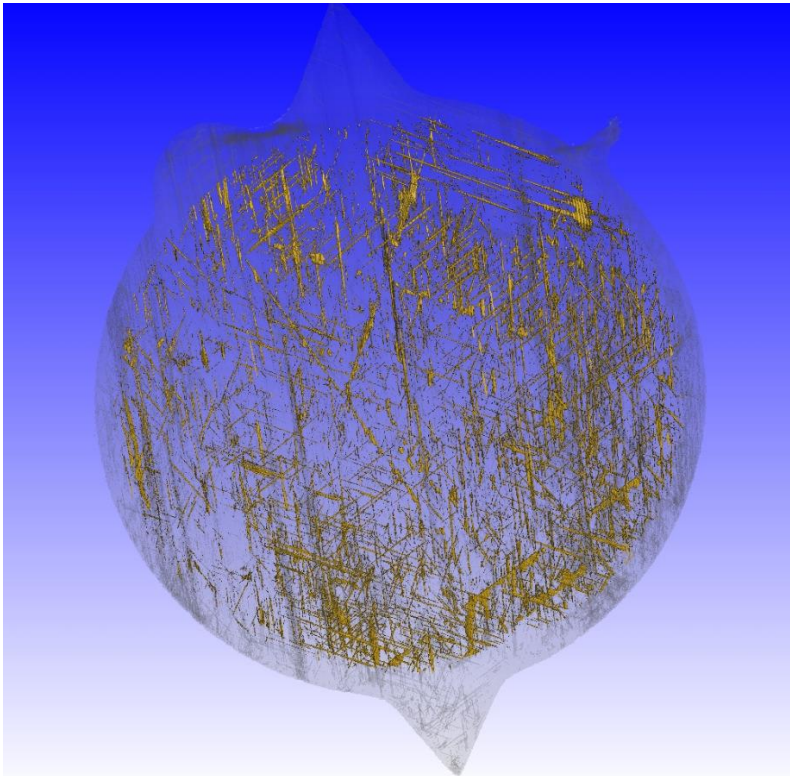


Abbildung 42 CT Untersuchung Fräs Imprägnierung (Lufteinschlüsse in Gelb visualisiert)

Untersuchungen ergaben, dass die Faserwinkel im Bauteil starken Schwankungen unterlagen. Es wurden Faser-Winkelabweichungen von bis zu  $8^\circ$  gemessen. Diese Abweichungen können sowohl im Wickelprozess als auch beim Verpressen der Bauteile stattfinden. Die genaue Ursache konnte bisher noch nicht festgestellt werden. Die Faserwinkelabweichungen wirkten sich auch in Form von starken Schwankungen der mechanischen Kennwerte, insbesondere in den Zugfestigkeiten, im Bauteil aus.

Beim Verpressen der Wickelplatinen trat ein weiteres Fehlermerkmal auf - Luftblasen zwischen den Laminatschichten. In Abbildung 42 ist ein Schnitt durch eine Blase dargestellt. Aufgrund der Größe und der vollständigen Trennung der Laminatschichten, führt dieses Merkmal zum Ausschuss eines Bauteils.

Die Ursache der Blasenbildung konnte durch die gewonnenen Erkenntnisse aus verschiedenen Versuchsreihen, stark reduziert werden (s. Kap. 2.6).



Abbildung 43 Blasen im ausgehärteten Bauteil

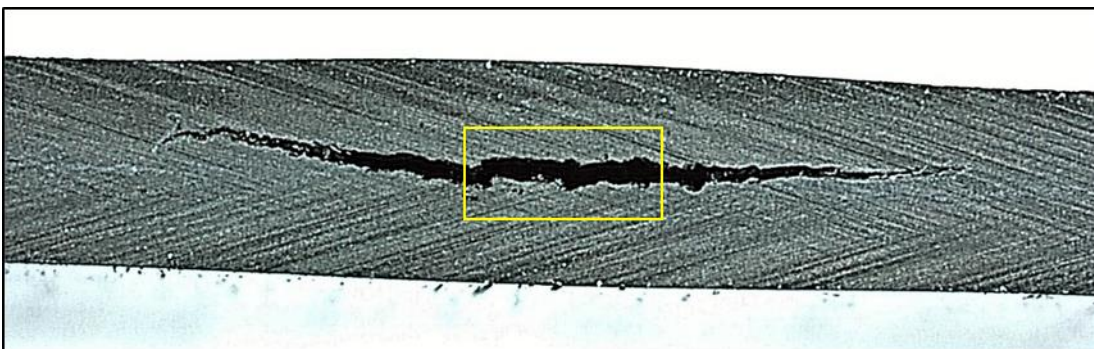


Abbildung 44 Schnitt durch die Blase quer zur Faserrichtung

## AP 4.1 - Konzeption und Dokumentation verschiedener Prozessrouten

- Lead Voith -

Es wurden verschiedene Serienfertigungsszenarien erarbeitet. Basierend auf den bisherigen Tests und Versuchen wurden Prozesspläne und dazugehörige Layouts entworfen. Im Folgenden wird das Prozessrouten-Konzept Serienfertigung Abdeckung Windlauf (Base Case) beschrieben.

### Serienfertigung Abdeckung Windlauf (Base Case)

Das Serienfertigungs-Konzept zur Fertigung des Produktivbauteils „Abdeckung Windlauf“ (AWL) basiert auf einer Gesamtstückzahl von 340 Tsd. Bauteilen über Laufzeit, also ca. 50 Tsd. pro Jahr. Das entspricht in der Automobilindustrie einer mittleren Serie (Oberklasse).

In der folgenden Abbildung 45 wird der CPP-Prozess zur Herstellung der AWL-Bauteile aufgezeigt. Durch die direkte Ablage der imprägnierten Fasern, dem anschließend automatisierten Stack-Beschnitt und der langen Tiefkühl-Lagerungszeit der Prepregs, kann ein serienfähiges-Konzept aufgezeigt werden.

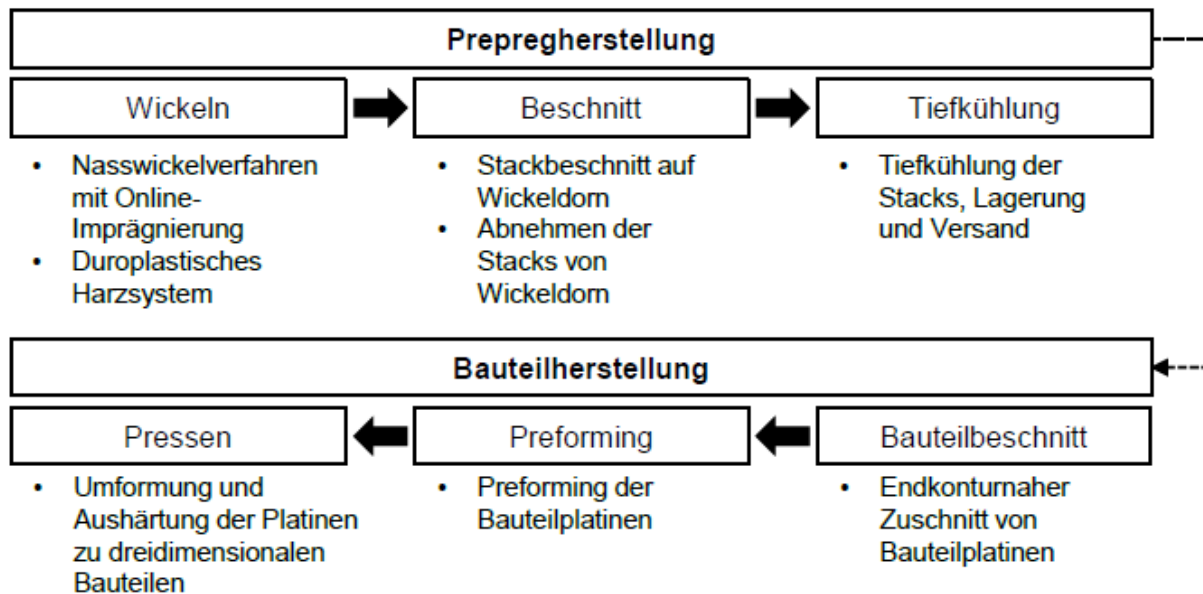


Abbildung 45 Prozessschabild des CPP-Prozesses

## Wickelprozess Serienfertigung AWL

Dabei wird als zentrales Fertigungselement eine einspindelige Wickelmaschine geplant. Neben dieser befinden sich im Layout Kernablageplätze für die zum Betrieb der Anlage notwendigen Wickelkerne. Die Wickelkerne werden mittels eines Hallenkrans bewegt.

Die Größe des zur Produktion gedachten Wickelkerns wird durch die Verwendung von 2 x 14 kg Rovingspulen begrenzt. Nutzt man diese optimal aus, kommt man zu dem Ergebnis einen ca. 8,5 m langen Wickelkern mit einem Umfang von 1,2 m zu planen (s. Abbildung 46) Aus dem so produzierten Stack werden 53 Bauteile geschnitten.

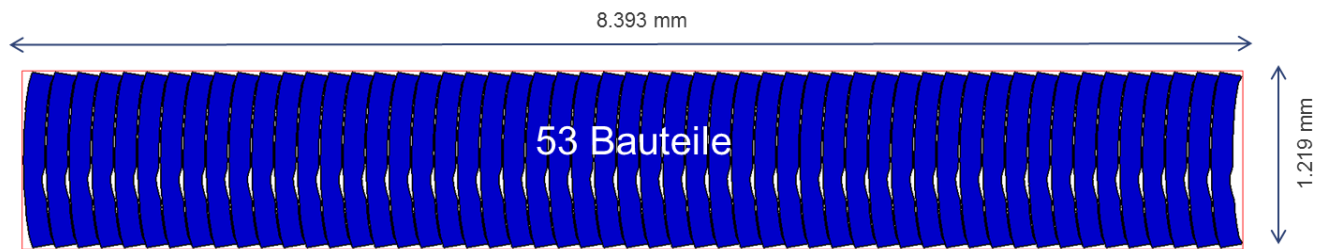


Abbildung 46 Konzeption Größe Wickelkern

Kombiniert man die so erhaltene Bauteilfläche mit der Gesamtfläche und berücksichtigt zusätzlich den Verschnitt der Polkappen (Erfahrungswerte) kann für dieses Konzept ein Verschnitt von ca. 15% prognostiziert werden.

Tabelle 9 Verschnittprognose via Berechnung und Versuchsergebnissen

Abdeckung Windlauf	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Dicke [mm]	Volumen [l]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Masse [kg]
Stack	10,23	2,55	26,09	1550	40,44
Bauteil einzeln	0,17	2,55	0,43	1550	0,67
Bauteile gesamt (53)	9,01	2,55	22,98	1550	35,61
Verschnitt	1,22	2,55	3,11	1550	4,83
Verschnitt Polkappen (Mittelwert)					1,33
<b>Verschnitt gesamt</b>					<b>6,15</b>

$$\frac{6,151 \cdot 100\%}{40,4 + 1,3} = 14,75\%$$

Eines der Projektziele, die Reduktion des Materialverbrauchs während des Herstellungsprozesses durch die Vermeidung von textilen Zwischenhalbzeugen und Reduktion des Verschnitts über die gesamte Prozesskette auf < 20% konnte somit erreicht werden.

## Entformung / Beschnitt Serienfertigung AWL

Nach dem Wickelprozess wird das Laminat mittels Ultraschallmesser vom Kern geschnitten und danach abgezogen (s. Abbildung 47)

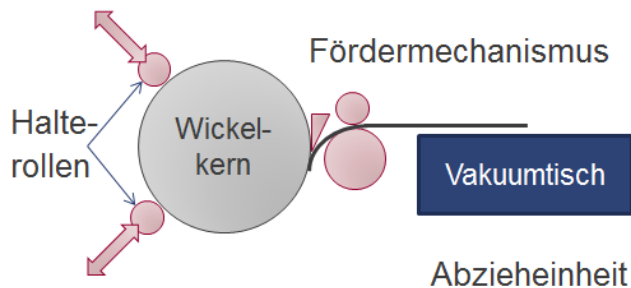


Abbildung 47 Prinzip-Skizze Entformung

Das Laminat wird auf einem Vakuumentisch zum Beschnitt abgelegt. Der Beschnitt erfolgt aktuell in Teilsegmenten der Wickelplatine mittels Ultraschallmesser, welches an einem Roboter montiert ist. Das Serienfertigung-Szenario geht davon aus, das vollständige Laminat (gesamte Wickelfläche) auf dem Vakuumentisch zu schneiden. Am Vakuumentisch sind insgesamt zwei Roboter geplant, von denen einer die Bauteilpreformen ausschneidet und der zweite anschließend jeweils vier Preformen mittels Nadel- oder Vakuumgreifer auf den Preformtisch befördert.



Abbildung 48 Roboterbeschnitt Bauteil Preformen

## Preforming

Auf dem Preformtisch befinden sich Formen über denen die Preforms vom Roboter positioniert und dann umgeformt werden (s. Abbildung 49). Es handelt sich dabei um eine grobe erste Formgebung. Das aktuelle Konsolidierungskonzept des Bauteils sieht die Verwendung eines Tauchkannten-

Werkzeugs vor. Insofern wird mit diesem Preforming Konzept erreicht, dass die später tiefgefrorene Bauteil-Preform in diese Kavität eingelegt werden kann. Die eigentliche Formgebung erfolgt dann im Tauchkannten-Werkzeug.

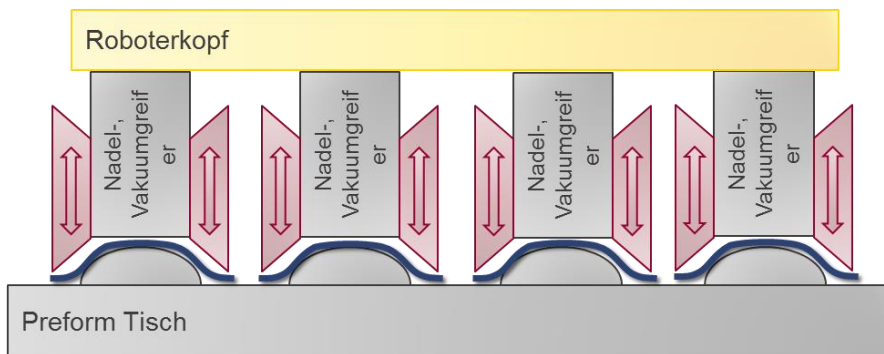


Abbildung 49 Prinzip-Skizze Preforming

### Lagerung / Transport

Nach dem Umformen werden die Preformen vom Roboter in Transportkisten gestapelt. Die Transportkisten sind mit Formschalen ausgestattet um die noch weichen Preformen zu stabilisieren. Diese werden in ca. 5 Bauteil-Packungen gestapelt und dann in einem Kühlcontainer gelagert. Sobald dieser Container voll oder ein Produktionsbatch erreicht ist, wird er per LKW zum Kunden transportiert und durch einen leeren ersetzt.

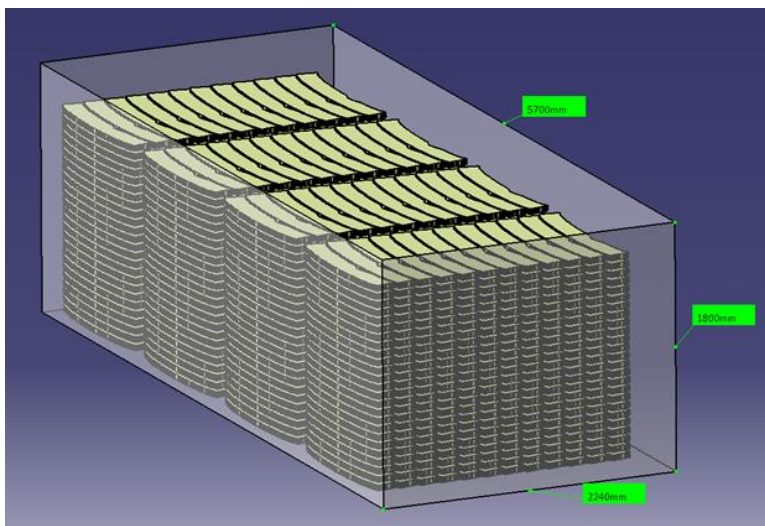


Abbildung 50 Positionierung der AWL in einem Tiefkühlcontainer



Basierend auf diesen Überlegungen entstand folgender Prozessplan (s. Abbildung 51). Da die hier angenommene Wickelzeit sich auf die Zeit der durchgeführten Versuche bezieht, wird für dieses Konzept das Clusterziel, die Verkürzung der Taktzeit auf 4 Minuten (Duromere Harzsysteme) pro Bauteil, unterschritten.

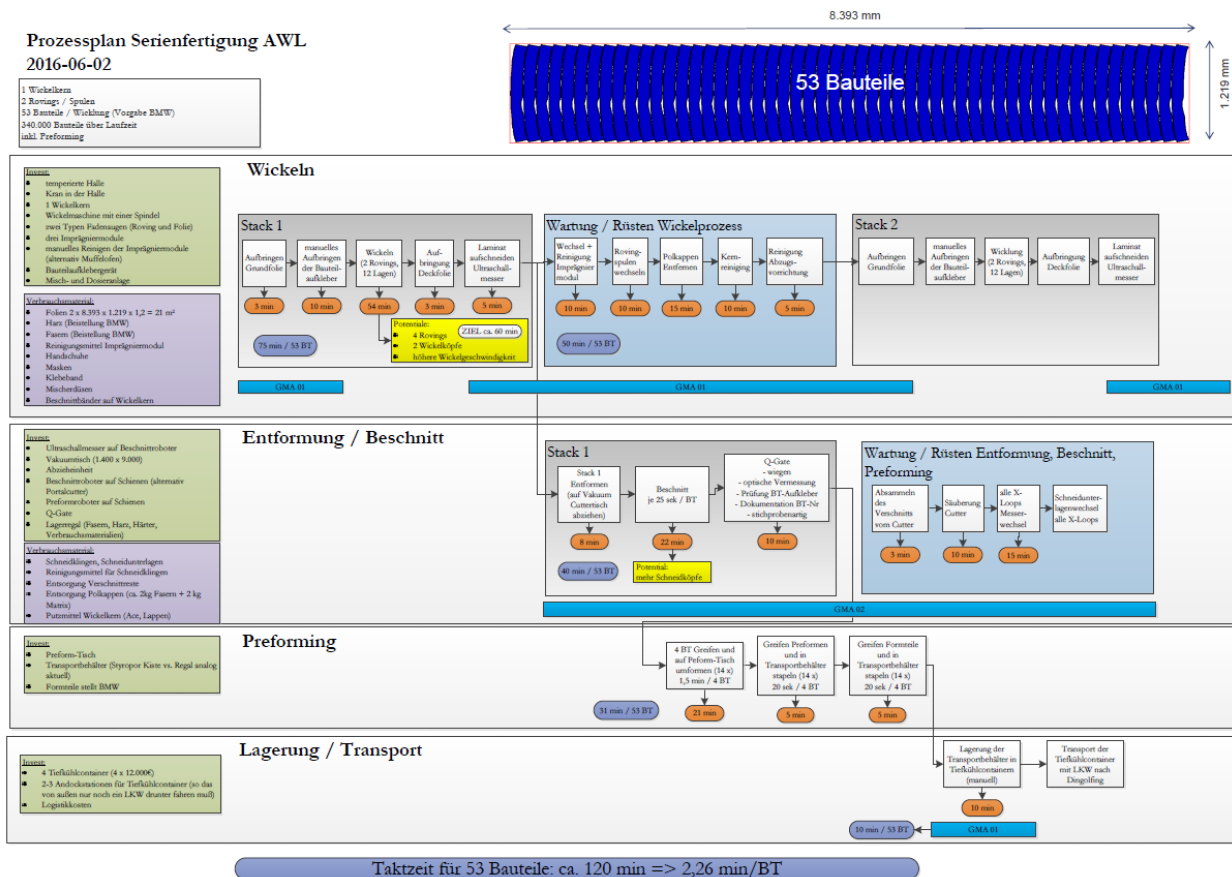


Abbildung 51 Prozessplan Serienfertigung AWL

Dazu sind verschiedene Layout Konzepte bzgl. Maschinenpark und Materialfluss denkbar. Vorhandene Maschinen sollten optimal ausgelastet sein und je nach Bedarf umgebaut werden. Eine Erweiterung dieser Fertigungslinie ist denkbar.

Layout Konzept Serienfertigung AWL „grüne Wiese“  
BaseCase  
2016-06-02

Reihe:		Länge:	0,5 m
Transportbehälter:	1,5 m	Wickelkern:	2,5 m
Roboter-Verfahrweg:	2,5 m	Weg:	2,5 m
Vakuumtisch:	2 m	Sicherheit:	1,3
Wickelmaschine:	2 m	<b>SUMME:</b>	<b>15 m</b>
Abstellplatz:	0 m		
Sicherheit:	1,3		
<b>SUMME:</b>	<b>20 m</b>		

=> 20 m x 15 m = 300 m²

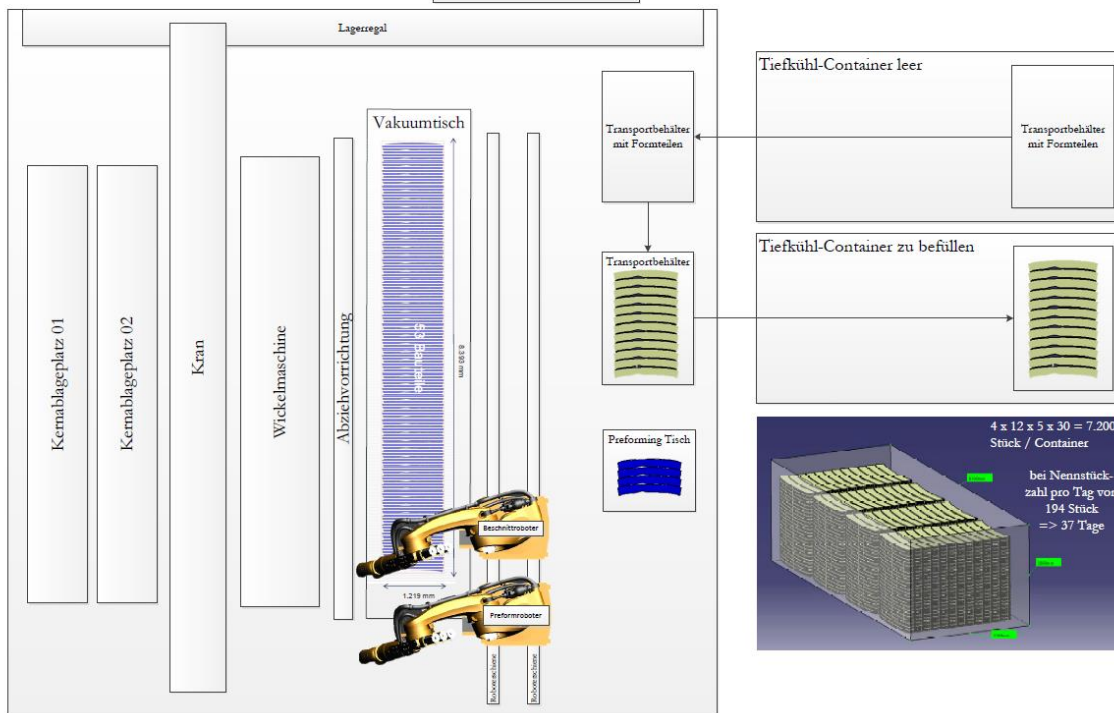


Abbildung 52 Layout Konzept Serienfertigung AWL "Base Case"

Basierend auf den Überlegungen zum Base Case mit der Beschränkung Stückzahlen für eine Oberklassenserie zu fertigen, entstand ein weiteres Szenario „Max Case“. Darin wird auf Basis der Nichtauslastung des im Base Case erstellten Fertigungslayouts die Frage nach der maximal möglichen Stückzahl untersucht.

Dabei wird das Fertigungskonzept bis auf zwei Punkte nicht verändert. Erstens entfällt im Max Case das Preforming, auf Basis der Überlegung dass das Handling, die Lagerung und der Transport von zweidimensionalen Preformen einfacher ist als der von dreidimensionalen. Das Preforming lässt sich in diesem Fall kurz vor dem Abpressen durchführen.

Die zweite Veränderung ist die Verwendung von zwei Wickelkernen. Im Base Case wird der Wickelkern bewickelt und verbleibt zum Beschneid, zur Wartung und zur Rüstung in der Wickelmaschine. Im Max Case wird der erste Wickelkern nach Ende des Wickelprozesses aus der Wickelmaschine gehoben, und durch einen weiteren ersetzt. Die Kerne werden auf einem Lagerplatz neben der Maschine beschneid und für die nächste Wicklung vorbereitet. Pro Stunde realisiert man so eine Wicklung zu je 53 AWL.

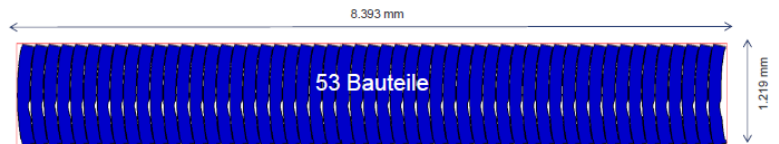
Bauteile/Wicklung · Wicklungsdauer · Produktionszeit · Produktionstage/Jahr  
 = max. Bauteile/Jahr

$$53 \cdot 1h \cdot 23h \cdot 240t = 292.560 BT/a = 2.047.920 BT/Laufzeit$$

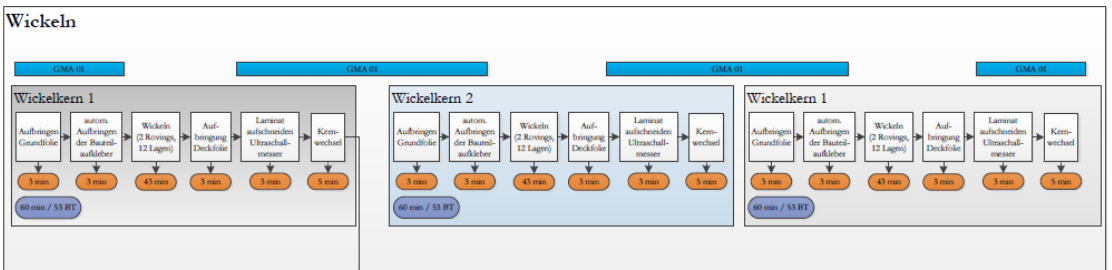
Mit dem Fertigungsszenario Max Case wäre also die Fertigung von ca. 2 Mio. Bauteilen über die gesamte Laufzeit (Annahme 7 Jahre) möglich.

**Prozessplan Serienfertigung AWL  
 Max Case  
 2016-06-22**

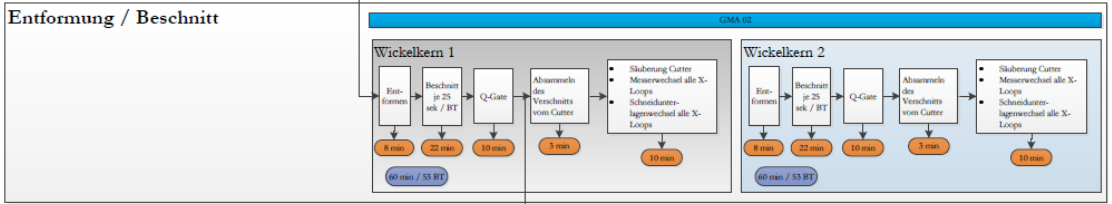
2 Wickelkern  
 2 Rovings / Spulen  
 53 Bauteile / Wicklung (Vorgabe BMW)  
 2.133.250 Bauteile über Laufzeit



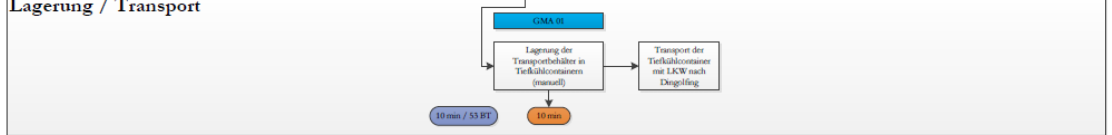
- Install:**
- temporäre Halle
  - Kran in der Halle
  - 2 Wickelkern
  - Wickelmaschine mit einer Spindel
  - zwei Typen Fadenagen (Roving und Folie)
  - sechs Impulsgerätemodule
  - Multifilament-Roving
  - Bauzeilaufleger
  - Misch- und Dosieranlage
- Vorbereitungszeit:**
- Folien 2 x 8,393 x 1,219 x 1,2 = 21 m<sup>2</sup>
  - Harz (Bestellung BMW)
  - Fasern (Bestellung BMW)
  - Reinigungsgerät Impulsgerätemodul
  - Handschuhe
  - Masken
  - Klebband
  - Mischerdosen
  - Beschreibblätter auf Wickelkern



- Install:**
- Ultraschallmesser auf Beschneidroboter
  - Vakuumtech (1.400 x 9.000)
  - Abscheibe
  - Beschneidroboter auf Schienen (alternativ Pendelarm)
  - Profomerbötter auf Schienen
  - Q-Gate
  - Lagerregal (Fasern, Harz, Hämte, Vielfachschneidmesser)
- Vorbereitungszeit:**
- Schneidklängen, Schneidunterlagen
  - Reinigungsgerät für Schneidklängen
  - Entzung Verschleißteile
  - Entzung Polkappen (ca. 2kg Fasern + 2kg Harz)
  - Patented Wickelkern (Ace, Lappen)



- Install:**
- 4 Tiefkühlcontainer (4 x 12.000)
  - 2-3 Anbohrstationen für Tiefkühlcontainer (so das von außen nur noch ein LKW fruster fährt muß)
  - Logistikkosten



Taktzeit für 53 Bauteile: ca. 60 min => 1,13 min/BT

Abbildung 53 Prozessplan Serienfertigung AWL "Max Case"

Layout Konzept MaxCase  
2016-06-22

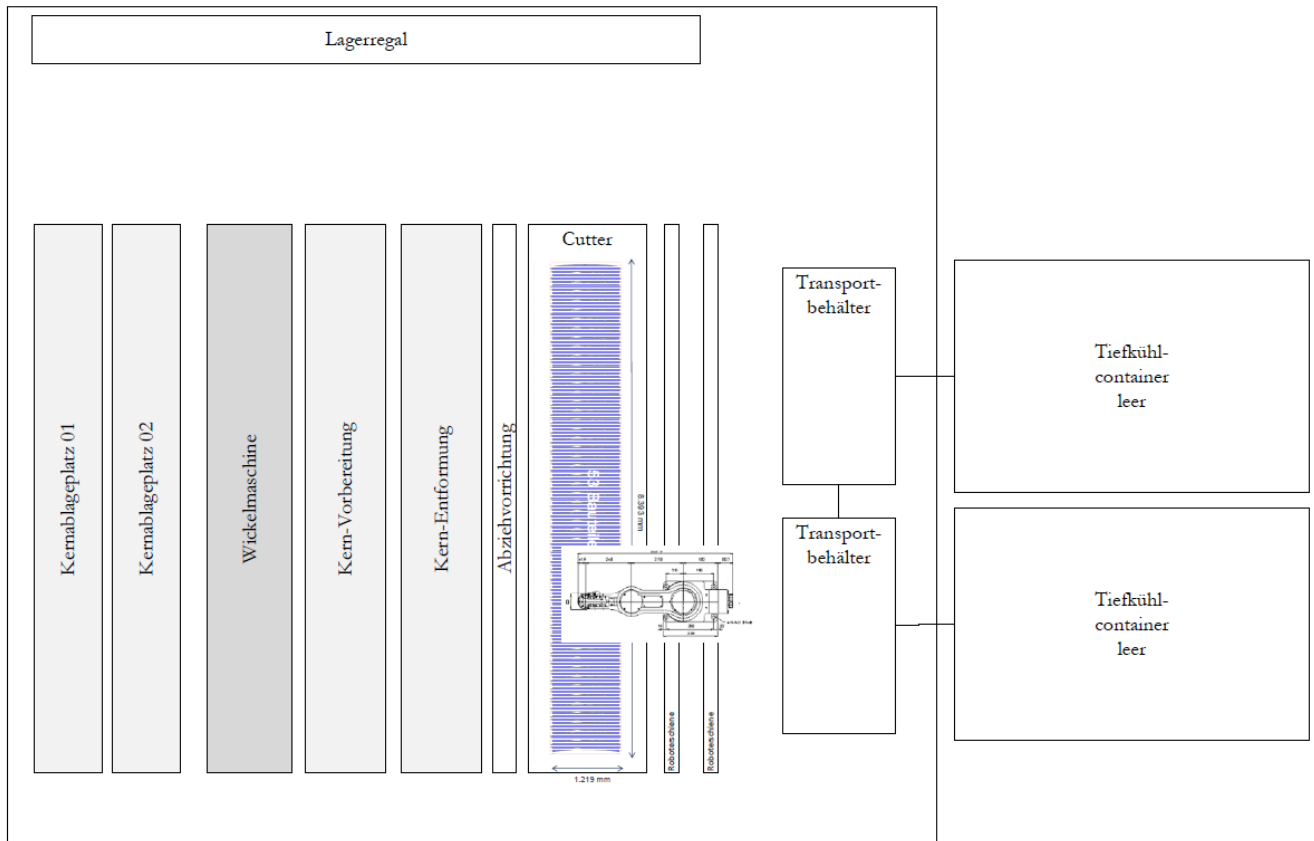


Abbildung 54 Layout Konzept Max Case

Weitere Potentiale entstehen beispielsweise durch die Verwendung einer Zweispindel-Wickelmaschine, was die mögliche Bauteilanzahl noch einmal verdoppelt. Dabei würden anstelle von einem Kern, gleich zwei Kerne getauscht. Insgesamt wären bei diesem Konzept also vier Kerne im Einsatz.

## AP 4.2 - Automation und Handlingskonzepte

- Lead Voith -

### Wickelvorgang, Imprägnierung

Der Wickelvorgang beginnt mit dem Abspulen des C-Faserroving von den Spulen. Dafür wurde eine Abspuleinheit (s. Abbildung 55, Abbildung 56, Abbildung 57) mit folgenden technischen Eigenschaften entwickelt.

- gleichbleibende Entfernungen der (Führungs-) Elemente zueinander; kein Ziehharmonika Effekt in den Rovings
- homogenes Bremsen der Spulen bei unterschiedlichen Abzugsgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Spulenmassen (Spulendurchmessern)
- Regelung der Abzugsgeschwindigkeit zur Realisierung einer geschwindigkeitsgesteuerten Harzzufuhr

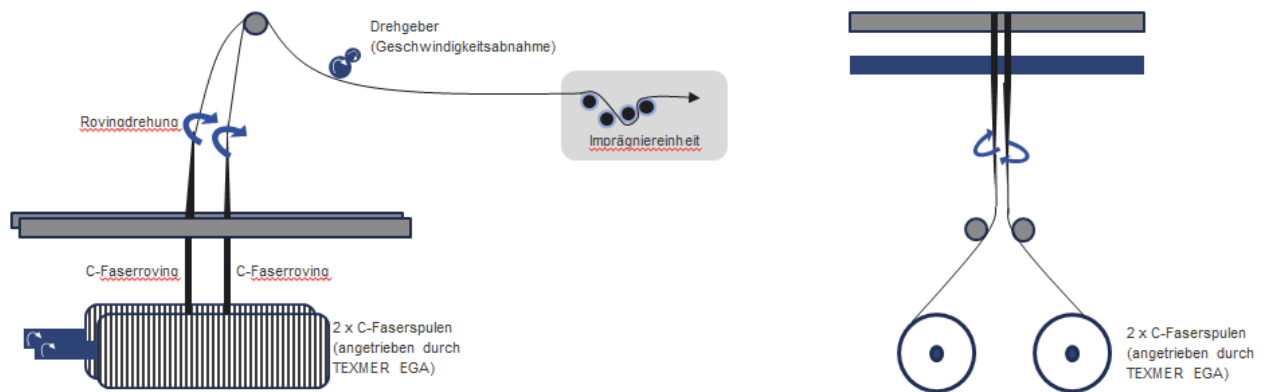


Abbildung 55 Funktionsprinzip Abspuleinheit



Abbildung 56 Seitenansicht Abspuleinheit



Abbildung 57 Draufsicht Abspuleinheit

Das Abspulen der C-Faserrovings wurde mit dem Modul auf der Wickelmaschine erprobt.

Die Fadenführung wurde gegenüber der Abspuleinheit aus dem Spulenschrank verbessert. Der C-Faserroving läuft in gleichmäßiger Breite in die Imprägniereinheit ein. Twists werden nur sehr selten durch die Imprägniereinheit gezogen (anders beim Spulenschrank).

Die Imprägnierung der Rovings erfolgte bisher über eine einfache Rollenimprägnierung (s. Abbildung 58). Für das Imprägniermodul der zweiten Generation wurden mehrere Dinge übernommen:

- Führungs- und Imprägnierrollen mit Steg zur Fadenführung
- Misch- und Dosieranlage mit dynamischem Mischer
- flächiger Harzauftrag über Breitschlitzdüse

Das Imprägniermodul der zweiten Generation (s. Abbildung 59) ist nun geschlossen, mit seitlichen Abdeckplatten zur Abdichtung des Harzes, ausgeführt. Diese Optimierung wurde umgesetzt um sicherzustellen, dass das gesamte Harz in den Roving imprägniert wird und nicht seitlich heruntertropfen kann. Erste Versuche auf einem Versuchsstand (s. Abbildung 60) zeigten einen deutlich reduzierten Matrixausschuß und eine verbesserte Imprägnierqualität.



Abbildung 58 Imprägniermodul erste Generation

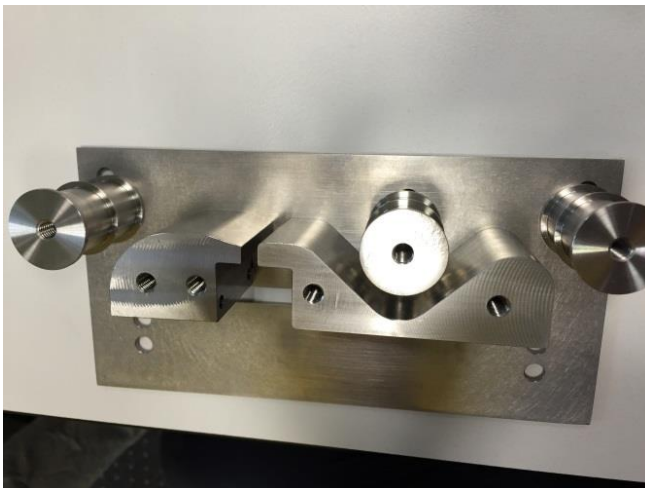


Abbildung 59 Imprägniermodul zweite Generation



Abbildung 60 Imprägniermodul zweite Generation auf Versuchsstand

Es wurde geplant das Testing sowie die weitere Optimierung und Entwicklung dieses zweiten Imprägniermoduls, neben eigenen Versuchen, in einem Unterauftrag an das „Institut für Verbundwerkstoffe GmbH“ in Kaiserslautern als F&E-Auftrag zu vergeben.

Um verschiedenen Imprägnierungs-Parameter zu untersuchen und nicht auf eine bei Voith vorhandene Wickelmaschinen zurückgreifen zu müssen, wurde ein einfacher Versuchsstand konzipiert (s. Abbildung 61) und realisiert (s. Abbildung 62).

Hier wurden im Rahmen einer Abschlussarbeit erste Tests durchgeführt.

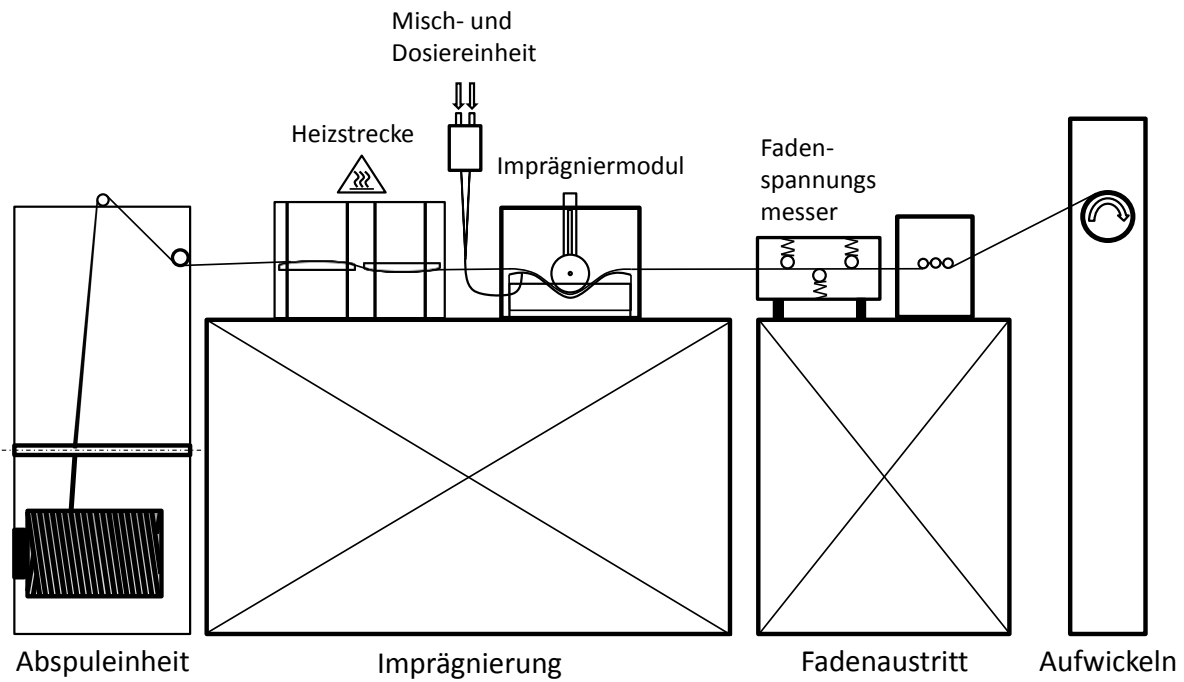


Abbildung 61 Optimierung Imprägniereinheit - Konzept Versuchsstand



Abbildung 62 Optimierung Imprägniereinheit - Versuchsstand



## AP 4.3 - Integration bestehender Anlagen in eine Testumgebung zur prototypischen Serienproduktion

- Lead Voith -

Neben den Wickelanlagen ist bei Voith Composites bereits ein Roboter vorhanden, der mit einem Ultraschall-Schneidsystem ausgestattet ist. Dieses arbeitet mit speziellen Schneidklingen. Abbildung 63 zeigt diesen Roboter und den ersten Versuchsaufbau zum Schneiden der Prepreg-Stacks. Dabei wurde der Stack auf dem Beschnitttisch abgelegt. In weiteren Versuchen zeigte sich dass der Stack für eine sichere Versuchsdurchführung auf dem Tisch fixiert werden muss. Anfangs wurde dies manuell, mit Prozessunterbrechung durch Klebebänder realisiert.



Abbildung 63 Roboter mit Ultraschallmesser

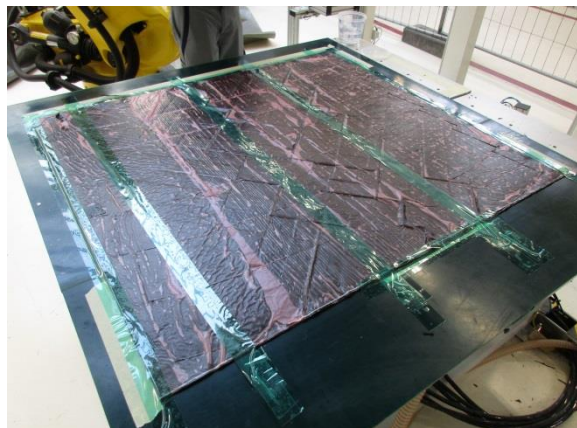


Abbildung 64 Fixierung der Stacks mittels Klebeband

Da eine solche Vorgehensweise für einen Serienprozess nicht in Frage kommt, wurde auf dem Beschnitttisch eine Fixierung durch Unterdruck realisiert (Vakuumtisch).

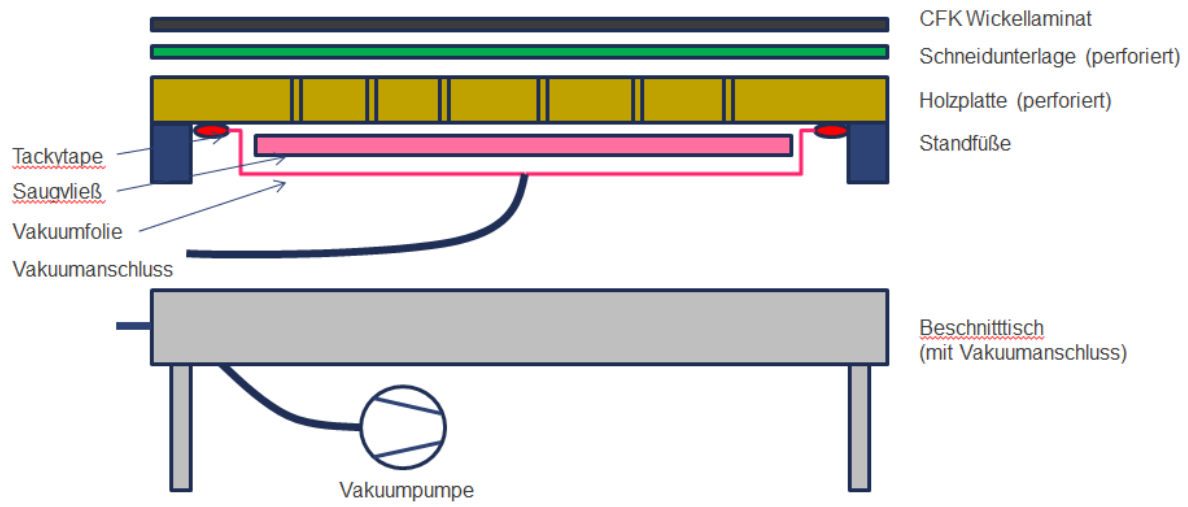


Abbildung 65 Prinzip Vakuumtisch



Abbildung 66 Roboterbeschnittene Preformen

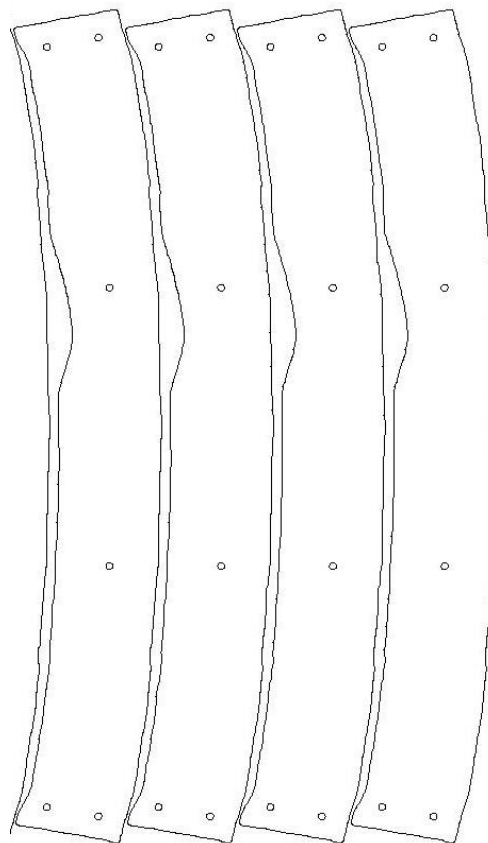


Abbildung 67 Konzept Vakuumverspannung mit Vakuumb Bohrungen unter der Bauteilkontur

## AP 4.4 – Testbetrieb (Verifizierung der Industrialisierbarkeit)

- Lead Voith -

Bei VOC wurden dutzende Wicklungen durchgeführt, wobei während der Fertigung Prozesszeiten und -temperaturen protokolliert wurden. Aus diesen Protokollen entstanden erste Abschätzungen bzgl. eines Serialprozesses, die in die Konzeption und Dokumentation der Vorbereitung verschiedener Prozessrouten eingingen. Für die direkte Vorbereitung der Anlage wurden 15 min geplant.

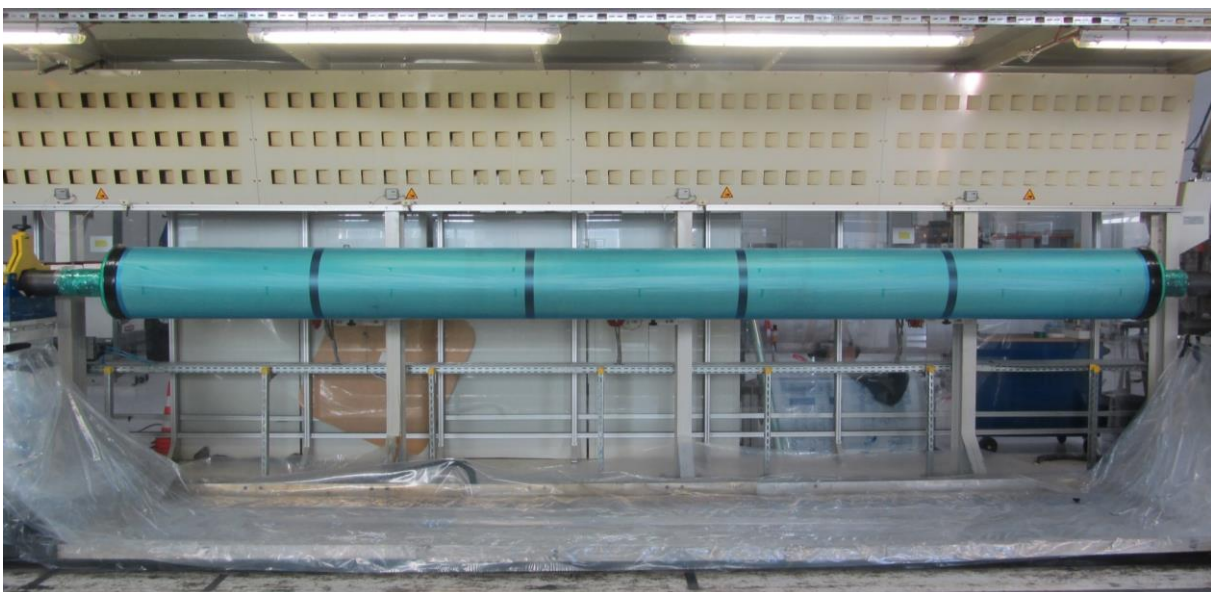


Abbildung 68 Trennfolie und Beschnittbänder (Stackbeschnitt) auf Kern aufbringen

Mit der bisher auf der Wickelmaschine verwendeten Imprägniereinheit, in Verbindung mit einer Misch-/Dosieranlage inkl. dynamischen Mischkopf, wurden Faservolumengehalte von ca. 53 % erzielt.

Pro Wicklung wurden dabei ca. 12 kg Matrix verbraucht. Abbildung 69 zeigt Versuchsprotokoll zur Versuchsreihe 19-12.

Vorbereitung, Wickeln

Versuchsparameter-Dokumentation VR 19/12 Datum: 27.4.16

Protokollführer: Bleina

Bauteilbez.: AWL

Lagenaufbau: 8 s Lagen

Lagen:	
1. Lage	1/2 45°, 60 % @ 13:26 mit 200 g/min
2. Lage	+90°, 80 % @ 13:41 mit 240 g/min
3. Lage	-90°, 80 % @ 13:45 mit 240 g/min
4. Lage	1/2 45°, 60 % @ 13:55 mit 200 g/min
5. Lage	+90°, 80 % @ 13:57 mit 240 g/min
6. Lage	-90°, 80 % @ 14:10 mit 240 g/min
7. Lage	45°, 60 % @ 14:17 mit 200 g/min
8. Lage	+90°, 70 % @ 14:25 mit 210 g/min
9. Lage	-90°, 70 % @ 14:27 mit 210 g/min
10. Lage	1/2 45°, 60 % @ 14:35 mit 200 g/min
11. Lage	+90°, 70 % @ 14:38 mit 210 g/min
12. Lage	-90°, 70 % @ 14:43 mit 210 g/min
13. Lage	1/2 45°, 60 % @ 14:48 mit 200 g/min
14. Lage	°, % @ mit g/min

Vorbereitung:		Start @	13:02
T <sub>Heiz,V:</sub>	42,0 °C @	13:02	
T <sub>Härter,V:</sub>	28,2 °C @	13:02	
T <sub>Umgebung,V:</sub>	20,0 °C @	13:10	
T <sub>Wickelkern,V:</sub>	18,9 °C @	13:10	
T <sub>Wellen,Imp,V:</sub>	20,1 °C @	13:10	
T <sub>Wellen,FA,V:</sub>	20,2 °C @	13:11	

Wickeln:		Start @	13:23	Ende @	14:48
T <sub>Umgebung,S:</sub>	19,9 °C @	13:20		T <sub>Umgebung,1:</sub>	17,5 °C @ 14:20
T <sub>Wickelkern,S:</sub>	18,1 °C @	13:20		T <sub>Wickelkern,1:</sub>	18,4 °C @ 14:20
T <sub>Wellen,Imp,S:</sub>	34,3 °C @	13:18		T <sub>Wellen,Imp,1:</sub>	35,1 °C @ 14:21
T <sub>Wellen,FA,S:</sub>	30,1 °C @	13:18		T <sub>Wellen,FA,1:</sub>	37,7 °C @ 14:22
T <sub>Umgebung,2:</sub>	17,7 °C @	14:46		T <sub>Umgebung,3:</sub>	16,9 °C @ 14:35
T <sub>Wickelkern,2:</sub>	18,5 °C @	14:46		T <sub>Wickelkern,3:</sub>	18,7 °C @ 14:35
T <sub>Wellen,Imp,2:</sub>	22,4 °C @	14:47		T <sub>Wellen,Imp,3:</sub>	35,4 °C @ 14:34
T <sub>Wellen,FA,2:</sub>	32,1 °C @	14:47		T <sub>Wellen,FA,3:</sub>	39,1 °C @ 14:34
T <sub>Umgebung,4:</sub>	17,2 °C @	13:57		T <sub>Umgebung,5:</sub>	17,3 °C @ 14:44
T <sub>Wickelkern,4:</sub>	18,2 °C @	13:57		T <sub>Wickelkern,5:</sub>	18,7 °C @ 14:44
T <sub>Wellen,Imp,4:</sub>	39,4 °C @	13:57		T <sub>Wellen,Imp,5:</sub>	35,4 °C @ 14:45
T <sub>Wellen,FA,4:</sub>	43,7 °C @	13:58		T <sub>Wellen,FA,5:</sub>	42,1 °C @ 14:45

Folie & Beschnitt:		Start @	14:50	Ende @	15:20
--------------------	--	---------	-------	--------	-------

In Tiefkühlung:	Stack 1 @	15:24	In Tiefkühlung:	Stack 6 @	:
	Stack 2 @	15:27		Stack 7 @	:
	Stack 3 @	15:30		Stack 8 @	:
	Stack 4 @	15:35		Stack 9 @	:
	Stack 5 @	15:37		Stack 10 @	:

Kommentare: 15:27 Stopp Fedanlage nach guttieren; Restzeit 15:28  
 15:30 [ ] welche Altonalüber zum elektr. Brauca gibt es 15:34  
 15:44 Stopp Fedanlage nach guttieren; Restzeit: 15:46

Polkappen = 1.420 g

Abbildung 69: Protokoll zur Versuchsreihe 19/12 vom 27.04.2016

## **AP 4.5 - Abschluss und Bewertung des CPP Prozesskonzeptes**

- Lead BMW -

Die Herstellung von Prepreg-Wickelplatinen mittels CPP-Verfahren ist grundsätzlich möglich. Es sind jedoch weitere Optimierungsschritte notwendig (z.B. Harzaustrag, Beschnitt, neue Halbzeuge,...)

Auch ein Screening zu einem neuen Harzsystems wird aktuell als notwendig betrachtet (aktuelles gesundheitlich bedenklich, und fertigungstechnisch nicht optimal).

Intern ist der Umzug des Prozesses auf eine alternative Wickelmaschine notwendig da die bisherige Wickelmaschine durch Aufträge ausgelastet ist.

## **2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Als wesentliche Position des zahlenmäßigen Nachweises sind die Aufwände im Bereich der Personalkosten für die Entwicklung zu nennen. Dieser Anteil für Engineering-Tätigkeiten war bereits bei Antragsstellung als Hauptposition identifiziert worden. Zudem wurden Aufwände für die Fertigung der Prepregs wie erwartet erforderlich. Des Weiteren kamen kleinere Aufwände für Reisen zu Projekttreffen und Partnern wie auch Materialkosten auf.

Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ist im entsprechenden Verwendungsnachweis zu finden.

## **2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Idee in MAI AutoPreg, im Verhältnis zu vielen MAI-Projekten der ersten Generation (MAI Recycling, MAI Last) war, mit wenigen spezialisierten Partnern die Projektziele zu erreichen. Dieses Konzept war aufgrund der unkomplizierten Kommunikation und der klar verteilten Rollen (C-CON - Entwicklungspartner, Voith Composites - Industriepartner, BMW - OEM) sehr erfolgreich.

Der klassische Wickelprozess wurde in Richtung Prepreg verändert und binnen kurzer Zeit wurden von den beiden fertigenden Partnern C-CON und Voith Composites Bauteile hergestellt und der Prozess auf „dem kurzen Dienstweg“ kontinuierlich und schnell optimiert. Es wurden mehrere Dutzend Schikane-, Produktivbauteile und Platten zur Materialqualifikation hergestellt.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Aus dem Projekt konnte Voith Composites wichtige Erkenntnisse zur Verarbeitung von vorimprägnierten Carbon-Faserstrukturen für Serienanwendungen, vor allem in Bezug auf automobiler Anwendungen, gewinnen. Innerhalb des Projekts konnte das Wickelverfahren optimiert und mittels einer automatisierten Prototypenanlage erprobt und demonstriert werden. Auch nach Projektende werden die Entwicklungsarbeiten fortgeführt, um eine deutliche Kosten- und Zykluszeitenreduktion in der Prozesskette zu realisieren. Durch das Projekt kann zukünftig auf eine neue Preformingtechnologie zurückgegriffen werden, die insbesondere in Kombination mit weiteren Verfahren für die Fertigung hybrider Preformstrukturen geeignet ist. Ziel ist die Realisierung einer effizienten und wirtschaftlichen Produktion von Carbon-Bauteilen und somit das Ergänzen des Produktportfolios für Voith Composites.

Voith Composites beschäftigt sich neben dem Einsatz von Composites in automobilen Großserien ebenfalls intensiv mit dem Einsatz von CFK im industriellen Anlagenbau, zum Beispiel im Bereich Leichtbau-Komponenten in Papiermaschinen oder in der Antriebstechnik. Ergebnisse des Vorhabens können in Zukunft auch in diesen Bereichen genutzt werden (Imprägniermodul).

Die aus dem Projekt gewonnenen Ergebnisse werden in der Entwicklung neuer Prozesse bzw. neuer Verfahren zur kostengünstigen Herstellung von vorimprägnierten Faserstrukturen verwendet. Ebenfalls wird das in MAI AutoPreg gewonnene Know-how in zukünftige Forschungen und Prozessentwicklungen fließen. Die durch das Projekt entstandene Vernetzung mit Partnern aus Industrie und Forschung trägt dazu bei, die wissenschaftliche Kompetenz optimal zu nutzen und zu erweitern. Die erarbeiteten Ergebnisse können über den Austausch innerhalb der MAI Carbon Plattform breite Anwendung in der Faserverbundforschung finden und darüber hinaus der Ausbildung von wissenschaftlichen Nachwuchskräften zugutekommen. Letztlich resultieren aus dem Projekt auch die Schaffung neuer Arbeitsplätze und die wirtschaftliche Stärkung des umliegenden Wirtschaftsraumes.

## 2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

*nicht bekannt*

## 2.6 Veröffentlichung des Ergebnisses

Voith engagiert sich intensiv als Gründungsmitglied im Kompetenz-Netzwerk CCeV. Über Veröffentlichungen, Präsentationen und Arbeitskreise zur Entwicklung von FVK-Fertigungstechnologien findet in diesem Verein kontinuierlich ein breiter fachspezifischer Austausch mit anderen Mitgliedern bzw. weiteren Partnern statt. Über das Netzwerk werden Ergebnisse diskutiert und einer größeren Anzahl von Anwendern zugänglich. Eine Veröffentlichung im Rahmen weiterer Composite-Veranstaltungen ist geplant.

Auszug Veröffentlichungen:

<http://www.carbon-composites.eu/de/projekte/mai-carbon-projekte/produktionssysteme/mai-autopreg/?division=3472>

<http://voith.com/composites-de/mai-projects.html>

<http://www.compositesworld.com/blog/post/jec-2017-aiming-for-industrialization>

## 2.7 Beitrag zum Spitzencluster MAI Carbon

Die folgenden Technischen Ziele des Clusters wurden erreicht

- Reduktion der Produktionskosten durch Automatisierung und eine Verkürzung der Wertschöpfungskette unter Einsatz von kostengünstigen Primärhalbzeugen; Ziel: Kostenreduktion > 50%
- Verkürzung der Taktzeit auf unter 4 Minuten
- Steigerung der Qualität und Reproduzierbarkeit sowohl beim Halbzeug als auch beim fertigen Produkt => s. Schikanebauteil und Produktivbauteil
- Verkürzung der Gesamtdurchlaufzeit durch angepasste Prozessschritte und der Entwicklung von speziell auf diesen Prozess abgestimmten Materialsystemen
- Steigerung der Effizienz des Gesamtprozesses der CFK-Bauteilherstellung ohne Zwischenschritte vom Roving über die vollständig imprägnierte Platine zum fertigen Presse teil
- Reduktion des Materialverbrauchs während des Herstellungsprozesses auf < 20% durch die Vermeidung von textilen Zwischenhalbzeugen und Reduktion des Verschnitts

Die weiteren politischen Ziele, insbesondere die Vernetzung zwischen den Industriepartnern wurde erreicht.

MAI AutoPreg diente unter anderem dazu, die Prozesskette, abgestimmt auf einen robusten Fertigungsprozess, für Stückzahlen (am Beispiel Windlauf) von bis zu 100.000 Bauteilen pro Jahr für die Automobilindustrie sicher zu stellen. Auf Basis in diesem Projekt realisierten Fertigungsparametern konnten Prozessketten mit einer Kapazität von bis zu 300.000 BT/a konzipiert werden.