

Öffentlicher Schlussbericht für die Technische Informationsbibliothek (TIB) an der Universität Hannover

zum Verbundvorhaben

Materialeffizienter Leichtbau für eine Ressourceneffiziente Mobilität – MAREMO –

Förderprogramm	BMBF: r+Impuls
Titel	Materialeffizienter Leichtbau für eine Ressourceneffiziente Mobilität
Akronym	MAREMO
Laufzeit des Vorhabens	01.01.2017 bis 31.12.2020
Berichtszeitraum	01.01.2017 bis 31.12.2020

ZE		Ansprechpartner	Förderkennzeichen
Wethje Carbon Composites GmbH (Projektkoordinator)	Donaustr. 35, 94491 Hengersberg	Wolfgang Krassnitzer +49 8549 9712 0 Wolfgang.Krassnitzer@wethje-gmbh.com	033R177A
BMW GROUP	Ohmstraße 2, 84030 Landshut	Franz Maidl +49 871 702 4134 franz.maidl@bmw.de	033R177B
TISORA Sondermaschinen GmbH	Nordstraße 46, 09113 Chemnitz	Steffen Rein +49 371 46114 16 rein@tisora.de	033R177C
AFPT GmbH	Trinkbornstraße 10, 56281 Dörth	Dr. Patrick Kölzer +49 6747 950 1853 patrick.koelzer@afpt.de	033R177D
SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft mbH	Donnerschweer Straße 4a, 26123 Oldenburg	Lucas Tiemann +49 441 960210 tiemann@swms.de	033R177E
AT – Automation Technology GmbH	Hermann-Bössow-Straße 6, 23843 Bad Oldesloe	Dr. André Kasper +49 4531 880 110 andre.kasper@automationtechnology.de	033R177F
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU	Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz	Maren Hagedorn +49 371 5397 1028 Maren.Hagedorn@iwu.fraunhofer.de	033R177G
Cetex Institut gGmbH	Altchemnitzer Str. 11, 09120 Chemnitz	Sebastian Nendel +49 371 5277 200 nendel@cetex.de	033R177H

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
TEIL 1: KURZBERICHT	1
1. Ursprüngliche Aufgabenstellung	1
2. Stand der Technik	1
3. Ablauf des Vorhabens	2
4. Wesentliche Ergebnisse	2
TEIL 2: EINGEHENDE DARSTELLUNG	3
1. Inhalt	3
1.1. Ziel	3
1.2. Darstellung und Wertung der erzielten Ergebnisse	3
1.2.1. Cost Engineering	3
1.2.2. Ressourceneffiziente Materialbasis	6
1.2.3. Anlagen Technik zur Herstellung von Near-Net-Shape-Verbundhalbzeugen	8
1.2.4. Ressourceneffiziente Faserverbund-Leichtbauweise	18
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	21
3. Voraussichtlicher Nutzen	22
4. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	22
5. Veröffentlichungen des Ergebnisses	22

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Dreistufiger Lösungsansatz des Vorhabens MAREMO	3
Abb. 2: Zusammensetzung der Herstellungskosten TowPreg	4
Abb. 3: Detaillierte Darstellung der Herstellungskosten	4
Abb. 4: Potential- und Stellhebelanalyse TowPreg	4
Abb. 5: Potential- und Stellhebelanalyse Stack	4
Abb. 6: Herstellungskosten Stack, max.(li.) und min. (re.) Ausbringung	5
Abb. 7: Detaillierte Darstellung Herstellungskosten 2 (max. (li.), min. (re.))	5
Abb. 8: Prinzip der Herstellung und Charakterisierung des Basismaterials mit Recyclingfasern	7
Abb. 9: Modulare Laborfertigungslinie für Tape und TowPreg-Materialien am Fraunhofer IWU	7
Abb. 10: Prinzipdarstellung der Pin-Imprägnierung	8
Abb. 11: CAD-Konstruktion der Siphon-Imprägnierung	8
Abb. 12: Schematische Darstellung des Dreiwalzenauftragungssystems	8
Abb. 13: Konzept und Zuständigkeiten	8
Abb. 14: Entwurfsvariante der Near-Net-Shape Legeanlage als Portalbauweise	8
Abb. 15: Schneidprinzipien: Stanzen (li.), Schneiden mit Gegenmesser (re.)	9
Abb. 16: Aktuelles Ablegesystem (li.), getrenntes Ablegesystem (re.)	9
Abb. 17: Antriebskonzepte für modularisiertes Scheibenspulenmagazin	9
Abb. 18: Montiertes Ablegemodul	10
Abb. 19: MAREMO-Legeanlage in Erprobungsphase	11
Abb. 20: Vollständiger Satz Spulen mit Alubordscheiben	11
Abb. 21: Prozesskette von der Konstruktion bis zur Fertigung mittels offline Programmierung über die CAESA® Composites TapeStation Software	11
Abb. 22: Prozessparameter mit der dazugehörigen Visualisierung	12
Abb. 23: Eine Lage des Schubfelds auf dem Drehtisch (TapeStation)	12
Abb. 24: Detektion von Delaminationen in Faserverbundstrukturen	13
Abb. 25: Darstellung der Integration des Thermografiesensors in die Ablegesystem	14
Abb. 26: Integration des 3D-Lichtschnittsensor in das Ablagesystem	14
Abb. 27: Ablegen von Tapes (1. Bahn links, 2. Bahn rechts)	15
Abb. 28: Substitution einer Tafelführung aus Blech mit Radien durch Frästeile ohne Radien	16
Abb. 29: Gaps und Overlaps bei der Tape-Ablage	16
Abb. 30: Legebild vor (li.) und nach erfolgter Optimierung (re.)	17
Abb. 31: Unterschiedliche Biegesteifigkeit des Versuchsmaterials (li. Thermoplasttape/ re. TowPreg)	18
Abb. 32: Geplanter TowPreg-Stack (li.) für geplantes Musterbauteil Schubfeld (re.)	18
Abb. 33: CFK Dach (1:4)	18
Abb. 34: Betrachtungsumfang Stackgeometrien	18
Abb. 35: MAREMO-Legeanlage im Fraunhofer IWU Technikum mit TowPreg und GF/PP-Tapes	19
Abb. 36: Förderwalze mit TowPreg und Förderwalze mit PTFE-Klebeband und TowPreg	19
Abb. 37: Schematische Darstellung des Legekopfes in der MAREMO-Legeanlage	19
Abb. 38: Ergebnisse der zweiten Imprägnierung der TowPregs mit CTP Hotmeltsystem	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgangswerte zur Kalkulation der Herstellungskosten "Stack"	5
Tabelle 2: Kenndaten der Thermografiesensoren.....	13
Tabelle 3: Ursachen und Maßnahmen im Rahmen des Optimierungsprozesses.....	16
Tabelle 4: Vergleich der mechanischen Eigenschaften	20
Tabelle 5: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	21

TEIL 1: KURZBERICHT

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Die Herstellung von Kohlenstofffasern ist erdöl-, kosten- und energieintensiv. Um dennoch über das gesamte Produktleben deutliche Vorteile hinsichtlich des Energie- und Ressourcenverbrauchs zu realisieren, sind folgende konstruktive und technologische Maßnahmen im Rahmen von MAREMO seriennah umzusetzen:

1. Konzeption und ressourcenfreundliche Herstellung von Recyclingfaser-Prepregs und Recyclingfaser-Pressmassen als Basismaterial für Leichtbau-Schalenstrukturen
2. Entwicklung von Produktionsverfahren für das Positionieren und Fixieren von materialeffizienten und belastungsgerechten Kohlenstofffaserverstärkungen (TowPreg) auf dem Basismaterial; dadurch Bereitstellung von materialeffizienten vorimprägnierten Near-Net-Shape-Verbundhalbzeugen.
3. Realisierung einer repräsentativen hochbelasteten Automobilstruktur in neuartiger Faserverbund-Leichtbauweise auf Basis der neuartigen Near-Net-Shape-Verbundhalbzeuge; dadurch Einsparung von teuren und energieintensiven Kohlenstofffasern.

Durch das geplante Vorgehen kann zum einen die benötigte Menge an Kohlenstofffasern je Verbundbauteil deutlich reduziert werden, womit sich signifikante Energie- und Kosteneinsparungen in der Herstellung ergeben. Ein bedeutender Teil der Struktur (z. B. Karosserie) besteht dann aus ressourcen-neutralem Recycling-Material. So können lastpfadgerechte Kombinationen von wenigen beanspruchungsgerecht platzierten Endlosfaserverstärkungen mit preiswerten Pressmassen aus geschnittenen Recycling-Fasern (z.B. Sheet-Moulding-Compound) für Nebenformelemente wie z. B. Rippen und Verschraubungspunkte genutzt werden. Das eröffnet ganz neue Potentiale für den ressourceneffizienten Leichtbau in der Großserie. Die in MAREMO weiterentwickelten Fertigungstechnologien gestatten eine sprunghafte Steigerung von Produktivität und Kosteneffizienz und somit ein hohes Innovationspotential für den Einsatz von ressourceneffizienten Near-Net-Shape-Materialien im Großserien-Automobilbau. Die geplanten Maßnahmen ergeben signifikante Energieeinsparungen sowohl für den Herstellungsprozess als auch für die Betriebsphase von Kraftfahrzeugen.

2. Stand der Technik

Bei Luftfahrtanwendungen haben sich das „Automated Tape Laying (ATL)“ und das „Automated Fiber Placement (AFP)“ als Fertigungsverfahren für Schalenstrukturen durchgesetzt. Bei diesen Verfahren werden z. B. 16 oder 32 vorimprägnierte Faser-Bänder mit Hilfe von roboter- oder portalgeführten Legeköpfen auf Laminiertischen oder Formwerkzeugen parallel abgelegt. Die in den Legeköpfen integrierte Schneidtechnik ermöglicht ein endkonturnahes Laminieren und ein relativ genaues Platzieren von zusätzlichen lokalen Verstärkungen. Zu den etablierten Anlagenherstellern zählen z. B. Ingersoll, MTorres, Brötje Automation, Coriolis, Automated Dynamics. Mit ATL- und AFP-Anlagen werden höchst beanspruchungsgerechte Laminataufbauten bei hoher Materialeffizienz realisiert. Derartige Tape-Legetechnologien konnten bislang nicht auf automobile Serienanwendungen übertragen werden. Gründe sind in der zu geringen Produktivität und in den zu hohen Halbzeugkosten zu sehen. Automobilgerechte Tape-Legeverfahren befinden sich bei einigen Anlagenherstellern in der Entwicklung und zum Teil auch in der Erprobung. So etwa wird von Fibreforge/Dieffenbacher (Snowmass, Colorado, USA bzw. Eppingen) Tape-Legetechnik für Industrie- und Automobilanwendungen angeboten. Diese Fibreforge-Technologie ermöglicht das Ablegen von Endlosfaser-Thermoplast-Verbund-Tapes zu endkonturnahen Stacks. Hiermit lassen sich endkonturnahe und beanspruchungsgerechte Tape-Laminare zusammensetzen. Die Formgebung dieser Stacks erfolgt nach Erwärmung auf Schmelztemperatur mit Hilfe von Spritzgieß- oder Pressverfahren. Ein Einsatz der Fibreforge-Technik für Duroplast-Verbunde und Anwendungen in der automobilen Serienfertigung sind bislang nicht bekannt geworden. Die BA Composites GmbH (Brötje-Automation Gruppe) befasst sich mit Tape-Legetechnologien für Automobilanwendungen. Zum Portfolio gehört z. B. ein Tape-Lege-Center für das endkonturnahe Ablegen von 16 Prepreg- oder Thermoplast-Tapes als Stand-Alone-Lösung. Ein Nachteil dieser Technologie besteht in der relativ geringen Arbeitsbreite des Legekopfs mit maximal 16 Tapes à ½ Zoll Breite. Ähnliches gilt für die Tape-Legetechnik der Firma Compositence:

Dieses Start-Up-Unternehmen bietet ebenfalls Anlagentechnik mit robotergeführten Legeköpfen an. Einige Anwendungen im Bereich von Forschung und Entwicklung sind bereits bekannt geworden. Automobile Großserienprojekte stehen jedoch noch aus.

3. Ablauf des Vorhabens

Wie eingangs beschrieben, beruht der Lösungsansatz des Vorhabens MAREMO auf drei übergeordneten Maßnahmen: **Rückführung von hochwertigen Faserabfällen:** Mit steigenden Produktionszahlen für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffbauteilen im Automobilsektor wachsen auch die Lagerbestände an Faserabfällen. Im Rahmen von MAREMO sollen Recyclingfaserhalbzeuge genutzt werden, um ressourceneffiziente Basismaterialien herzustellen. Diese vorimprägnierten Flächenhalbzeuge dienen sowohl als Ablegegrund für die Near-Net-Shape-Prepregs als auch zur quasi-isotropen Verstärkung des herzustellenden Bauteils. Diese quasi-isotrope Verstärkung ist für viele Bauteilbereiche zumeist ausreichend. Lediglich die hochbeanspruchten Bereiche werden mit zusätzlichen UD-Tapes belastungsgerecht verstärkt. **Produktion von materialeffizienten und belastungsgerechten Faserverbund-Halbzeugen:** Neu produzierte Kohlenstofffasern sollen im Sinne der Materialeffizienz derart positioniert werden, dass ein signifikanter Beitrag zur strukturellen Funktion des Bauteils geleistet wird. Beim betrachteten Produktionsverfahren werden die neuen, hochwertigen Kohlenstofffasern in Form von vorimprägnierten Endlosfaser-Tapes eingebracht. Materialeffiziente Near-Net-Shape-Halbzeuge entstehen also, wenn diese Tapes nur für die höher beanspruchten Bauteilbereiche positioniert werden. Andere Bereiche bleiben ohne Endlosfaserverstärkung. Die Produktion der Near-Net-Shape-Halbzeuge soll in einem automatisierten Prozess erfolgen, bei dem die bauteilspezifischen Tape-Muster auf dem Basismaterial abgelegt und angeheftet werden. Der dazu benötigte Legekopf wird modular aufgebaut, so dass eine Skalierung auf die jeweilige Bauteilgröße relativ einfach zu realisieren ist. **Erarbeitung einer ressourceneffizienten Faserverbund-Leichtbauweise:** Die Ressourcen-effizienz wird maßgeblich mit der Bauteilkonstruktion bestimmt. In einem iterativen Optimierungsprozess (Topologieoptimierung) müssen Faserverstärkungen und Bauteilbeanspruchungen aufeinander abgestimmt werden. Aus der Bauteilauslegung sind dann geeignete Ablegemuster für die Prepreg-Tapes abzuleiten. Die Bauteilkonstruktion soll exemplarisch anhand einer repräsentativen Automobilstruktur durchgeführt werden, wobei Erfahrungen in eine praxistaugliche Konstruktions- und Auslegungsanleitung münden.

4. Wesentliche Ergebnisse

Ein wesentlicher Schwerpunkt des Forschungsvorhabens war die Herstellung und Verarbeitung von klebfreien TowPregs (ohne Trennpapier) auf einer im Projekt entwickelten vollautomatisierten Legeanlage zu Near-Net-Shape-Halbzeugen. Mithilfe eines ausgewählten Harzsystems und einer erprobten Imprägnierstrategie zeigten die gefertigten TowPregs bezüglich ihrer Haptik ähnliche Produkteigenschaften wie thermoplastische Faserhalbzeuge. Die klebfreien TowPregs weisen bei Raumtemperatur ein steifes Materialverhalten auf. Allerdings ist die Imprägnierung der gespreizten Kohlenstofffaserrovings noch zu optimieren. So können die entwickelten TowPregs aufgrund der einseitigen Imprägnierung nicht mit der entwickelten Near-Net-Shape-Legeanlage verarbeitet werden, da die trockenen Kohlenstofffasern an bestimmten Stellen zu einem Materialstau führen. Durch eine sachgerechte Verwendung der im Projekt weiterentwickelten offline Programmierumgebung CAESA® Composites TapeStation ist es möglich, effiziente Laminatfertigungsoperationen zu programmieren. Durch integrierte Analysetools kann direkt eingesehen werden, wie hoch die Materialeinsatzquote – also der Verschnitt – ist und so eine optimale Belegung mit minimalem Verschnitt erstellt werden. Ebenfalls kann die Prozessoptimierung die Legezeit betreffen und die Belegung anhand dessen angepasst werden. Weiterhin lässt sich die Produktionsdauer auch durch die sog. Prozessparameter, wie z.B. die Vorschübe, optimieren. Diese Parameter ermöglichen eine zielgerichtete Laminatoptimierung, sei es der Verschnitt oder die Produktionszeit, die letztendlich maßgebend sind. Mit der Near-Net-Shape-Legetechnologie sind Herstellungskosten < 20 €/kg möglich. Der maßgebliche Faktor bei der TowPreg-Herstellung liegt in den Materialkosten. Hier gibt es aktuelle Entwicklungen zur kosteneffizienteren Herstellung von Kohlenstofffasern, welche Kosten von < 12 € ermöglichen. Bei der Herstellung des Stacks sind die wichtigsten Faktoren, neben der Legegeschwindigkeit und der Anzahl der TowPregs, die Auslastung der Legefläche. Die Kombination dieser Faktoren führt zu hohen Ablageraten (kg/h) und somit zu einer kosteneffizienten Herstellung von endkonturnahen Faser-Stacks.

TEIL 2: EINGEHENDE DARSTELLUNG

1. Inhalt

1.1. Ziel

Faser-Kunststoff-Verbunde mit Langfaser-, Endlosfaser- oder Textilverstärkung gehören längst zu den etablierten Strukturwerkstoffen im Automobilbau. Höchste Leichtbaugrade lassen sich mit dem Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) erreichen, da diese Werkstoffgruppe höchste spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten aufweist. Die damit erreichbaren Leichtbaugrade tragen unmittelbar zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emission bei. Die von der EU-Kommission vorgegebene Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von ehemals 130 g/km auf aktuell 95 g/km fördert somit den Trend hin zum Faserverbund-Leichtbau im Automobil. Das Verbundprojekt hatte zum Ziel sowohl ein geeignetes Material als auch ein dazu passendes Verfahren für eben jenen ressourceneffizienten Leichtbau zu entwickeln. Bei der Materialentwicklung stand ein neuartiges, nicht-klebriges TowPreg im Mittelpunkt der Entwicklung, welches in den Bereichen: Lagerfähigkeit, Verarbeitung und Kosten deutliche Vorteile gegenüber allen am Markt verfügbaren Lösungen bieten sollte. Auf dem Feld der Anlagentechnik wurde ein seriennaher Prototyp entwickelt und gebaut, welcher die speziellen Materialeigenschaften aufgreift und mittels modular erweiterbarem Aufbau und intelligenter Legeprogramme ebenso materialeffizient und ressourcenschonend daraus FKV-Halbzeuge als Vorstufe diverser Automobilteile herstellt. Der dreistufige Lösungsansatz gliedert sich wie folgt:



Abb. 1: Dreistufiger Lösungsansatz des Vorhabens MAREMO

1.2. Darstellung und Wertung der erzielten Ergebnisse

1.2.1. Cost Engineering

Das übergeordnete Ziel im Hinblick auf die Beteiligung der BMW Group im Kontext des Projekts MAREMO als Industrievertreter, ist die Bereitstellung von Materialien und Technologien für die Fertigung langfristig wettbewerbsfähiger Faserverbundbauteile. Für eine kosten- und materialeffiziente Fertigung müssen hier einerseits geringe Materialeinsatzquoten (MEQ), bspw. durch (Near-) Net-Shape Fertigung, als auch materialgerechter Werkstoffeinsatz zur Anwendung kommen. Hierzu zählen die Verwendung von lokaler Verstärkung (krafftflussgerecht) und Multimaterialdesign, bspw. durch die Kombination von Kohlenstoff- und Glasfasern. Klassische Herstellungsmethoden wie beispielsweise das RTM Verfahren (resin transfer molding) bringen eine sehr aufwendige Prozesskette mit sich. Neben der Vielzahl der Prozessschritte und der damit verbundenen hohen Investitionskosten in Anlagen und Werkzeugtechnik, kommt es entlang der Prozesskette zu hohem Materialeinsatz. Die Herstellung von textilen Halbzeugen mit unterschiedlichen Orientierungen und Faserflächengewichten setzt den Einsatz von spezifischen Anlagen voraus, welche bedingt durch die Art der Herstellung einen hohen Materialeinsatz an den Warenkanten hervorrufen. Auch bei der Herstellung von konturnahen Stacks kommt es durch einheitliche Warenbreiten zu schlechter Materialausnutzung. Tape-Legetechnologien sind hier in der Lage das Material deutlich verschnittärmer und effizienter einzusetzen. Der im Rahmen des Projektes verfolgte Ansatz zur Herstellung von CFK-Bauteilen auf Basis von vorimprägnierten und vorkonfektionierten Endlosfaser-Stacks (ebene, endkonturnahe Faservorformlinge) bietet durch die verwendete Materialität und die hohe Fertigungseffizienz wesentliche Vorteile im Vergleich zum Großteil der Anlagensysteme auf dem Markt. Im Rahmen des Projektes liegt der Fokus auf einer effizienten und kostenoptimierten Herstellung von Tape-Halbzeug, dem sogenannten TowPreg, sowie einem hocheffizienten Stackherstellungsprozess (Tape-Leger). Der Tape-Legeprozess soll sich durch eine hohe Legeleistung und eine Reduzierung der MEQ auszeichnen. Zu Beginn des Projektes wurden folgende **Zielwerte** skizziert: mittlere Bauteilherstellungskosten ≤ 18 €/kg und Herstellungskosten Halbzeug (TowPreg) ≤ 12 €/kg. Im ersten Schritt werden die **Herstellungskosten des Halbzeugmaterials** Tape im Rahmen einer betriebswirtschaftlichen Kalkulation ermittelt und

aufgezeigt. Im Anschluss daran erfolgt eine Aufschlüsselung und Darstellung der wesentlichen Kosten. In Form einer sogenannten Stellhebelanalyse werden Potentiale zur Reduzierung der Herstellungs- und Gesamtkosten aufgezeigt. Für die Kalkulation der Herstellungskosten des Ausgangsmaterials TowPreg wurden zu Projektbeginn material- und prozessspezifischen Prämissen festgelegt. Auf Basis dieser Vorgaben wurden die notwendigen Voraussetzungen für die Herstellung und Weiterverarbeitung von TowPreg und Stack abgeleitet. Auf Basis der spezifischen Eingangsgrößen können Herstellungskosten von 14,2 €/kg ermittelt werden. Diese setzen sich aus 11,3 €/kg Materialkosten und 2,4 €/kg Fertigungskosten zusammen. Hinzu kommen Overhead und Gewinn in Höhe von 0,5 €/kg welcher sich aus 20% der ermittelten Fertigungskosten errechnet. Der wesentliche Beitrag der Herstellungskosten liegt mit einem Anteil von ca. 80% bei den Ausgangsmaterialien Faser und Harz (vgl. Abb. 2). In der folgenden Abbildung ist eine weitere Detaillierung der Herstellungskosten zu sehen (Abb. 3).

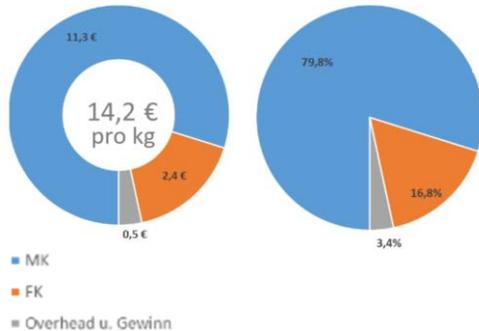


Abb. 2: Zusammensetzung der Herstellungskosten TowPreg

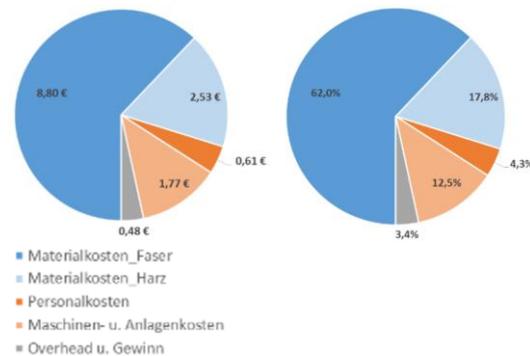


Abb. 3: Detaillierte Darstellung der Herstellungskosten

Anhand der Ergebnisse der Kostenbewertung werden die unterschiedlichen Bestandteile der gesamten Herstellungskosten einer Potentialbewertung zur Reduzierung der Herstellungskosten unterzogen. Durch die unterschiedlichen Szenarien können potentielle Herstellungskosten in Höhe von ca. 10,5 € dargestellt werden (vgl. Abb. 4). Die größten Stellhebel bestehen auf Seiten der Materialkosten. Bei der Reduzierung der Faserkosten von 13,5 €/kg auf prognostizierte 11,0 €/kg ergibt sich der größte Stellhebel in Höhe von 1,6 €/kg auf die Herstellungskosten. Parallele Entwicklungen auf Seiten unterschiedlicher Faserhersteller zeigen, dass dieses Potential zukünftig, bei entsprechenden Abnahmemengen, darzustellen ist. In Reduzierung der Materialkosten Harz um 25% liegt ein weiteres Potential in Höhe von ca. 0,8 €/kg TowPreg. Weitere Stellhebel sind die Erhöhung der Ausbringung durch Steigerung der Abzugsgeschwindigkeit sowie die Reduzierung der Investitionen. Bei Berücksichtigung aller aufgezeigten Szenarien stehen Gesamtherstellungskosten in Höhe von 10,5 €/kg in Aussicht (vgl. Abb. 4). Die zu Projektbeginn prognostizierten Herstellungskosten TowPreg in Höhe von 12,0 €/kg sind mit den aktuellen Prämissen nicht darstellbar, bei Berücksichtigung der aufgezeigten Szenarien ist der Zielwert zu erreichen bzw. auch zu unterschreiten.

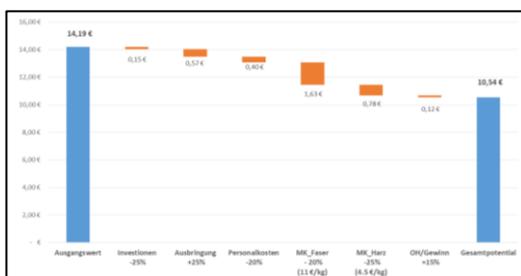


Abb. 4: Potential- und Stellhebelanalyse TowPreg

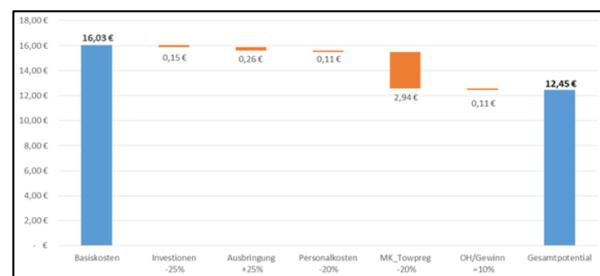


Abb. 5: Potential- und Stellhebelanalyse Stack

Als nächstes wird die **Herstellung des endlosfaser Stack** mit der im Projekt entwickelten neuartigen hocheffizienten Legetechnologie bewertet. Dazu fließen Projektprämissen bzgl. der Materialanforderungen (alle Partner), die Bauteil- und Stackanforderungen (BMW) ebenso wie die Prozesssimulation (SWMS) in die Ermittlung der Bauteilkosten ein. Auf Basis der BMW seitigen Vorgaben wurden unterschiedliche Betrachtungsumfänge zu Stackgeometrien definiert. Ausgehend von einem einfachen Rechteck-Stack mit niedriger Komplexität wurden unterschiedliche Kontur-Stacks

mit zunehmender Komplexität definiert. Diese Vorgehensweise soll im Wesentlichen die Vorteile einer verschnitt- und legezeitoptimierten Legetechnologie herausstellen. Bei Einsatz einer klassischen CFK-Prozesskette geht mit steigender Komplexität in der Regel eine höhere MEQ einher. Mit den Eingangsgrößen aus den Projektprämissen und den stackspezifischen Lagenaufbauten ermittelte der Projektpartner SWMS die jeweiligen Legezeiten und Materialeinsatzquoten. Der einfache „Rechteck-Stack“, welcher die Geometrie des Demobauteils $\frac{1}{4}$ Dach darstellt, wurde zusätzlich auf ein Real Dach hochgerechnet (vgl. Abb. 34). Mit der Auswertung der ermittelten Legezeiten der einzelnen Stacks und den dazugehörigen Rüst- und Nebenzeiten konnten für jeden Stack Ausbringungs- bzw. Ablagemengen errechnet werden. In der Folge wurden für den Stack mit der minimalen sowie für den Stack mit der maximalen Ablagemenge (kg/h) die Herstellungskosten ermittelt. Zur Ermittlung der Bandbreite der Ablagemenge wurden hierzu die Prozessparameter Ablagegeschwindigkeit (0,5 m/min, 1,0 m/min) und die Anzahl der an der Anlage verwendeten „Stack-Kassetten“ (Anzahl TowPregs 24 bzw. 48) variiert. Die Auswertung von SWMS zeigt eine im Vergleich zur klassischen CFK-Prozesskette sehr niedrige Materialeinsatzquote. Ausgehend von Werte von > 80% für die Prozesskette Preform/RTM lässt sich mit der MAREMO Legetechnologie eine deutliche Reduzierung auf Werte von < 12 % darstellen. Für die Kalkulation der Herstellungskosten „Stack“ wurden die folgenden Ausgangswerte festgelegt.

Tabelle 1: Ausgangswerte zur Kalkulation der Herstellungskosten "Stack"

Investitionskosten	1.260.000,- € (20.000 € je Abspulstelle 300.000 € für das Grundgestellung)
Produktionsstandort	Deutschland, (Hoch Lohn DE)
Auslastung	Ausschließlich ein Produkt auf der Anlage.
Abschreibungszeitraum	8 Jahre, linear
Kalkulatorische Zinsen	5 %
Arbeitszeit	5 Tage, 3 Schichten

Die Bandbreite der ermittelten Herstellungskosten Stack ist durch die beiden Stackvarianten „einfacher Rechteck Stack, real Dach“ (max. Ausbringung, ca. 60kg/h) und der „komplexen Stackgeometrie mit lokalen Verstärkungen“ (min. Ausbringung, ca. 12kg/h) begrenzt. In der Folge sind die Herstellungskosten für die beiden Varianten dargestellt. Die Ergebnisse der Kostenbewertung zeigen, dass bei der Herstellung von einfachen Stackgeometrien, welche die Legefläche auf der Anlage nahezu optimal ausnutzen die niedrigsten Kosten darzustellen sind. Diese Art von Stacks zeigen auch die geringsten MEQ der bewerteten Stackgeometrien auf. Stacks mit höheren Komplexitäten lassen sich mit der MAREMO Legetechnologie sehr materialeffizient herstellen (MEQ < 12%), allerdings steigt der Anteil der Fertigungskosten bedingt durch die Verringerung der Ablagemenge von ca. 7% auf über 48%. Durch unterschiedliche Szenarien, in Form einer Stellhebelanalyse (vgl. Abb. 5), können potentielle Herstellungskosten für die Variante „max. Ausbringung“ in Höhe von ca. 10,5 € dargestellt werden. Der größte Stellhebel besteht auf der Seite der Materialkosten. Bei der Reduzierung Towpreg-Kosten um 20% auf einen Wert von ca. 11,3 €/kg und unter Berücksichtigung aller weiteren Szenarien können Gesamtkosten in Höhe von 12,5 €/kg in Aussicht gestellt werden.



Abb. 6: Herstellungskosten Stack, max. (li.) und min. (re.) Ausbringung

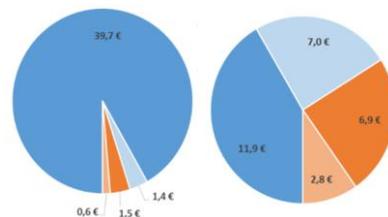


Abb. 7: Detaillierte Darstellung Herstellungskosten 2 (max. (li.), min. (re.))

Es lässt sich festhalten, dass mit einer derartigen Legetechnologie Herstellungskosten von < 20 €/kg darzustellen sind. Der maßgebliche Faktor bei der Towpreg-Herstellung liegt in den Materialkosten. Es gibt aktuelle Entwicklungen zur kosteneffizienteren Herstellung von Kohlenstofffasern welche Kosten von < 12 € ermöglichen.

Bei der Herstellung des Stacks sind die wichtigsten Faktoren, neben der Legegeschwindigkeit und der

Anzahl der TowPregs, die Auslastung der Legefläche. Die Kombination dieser Faktoren führt zu hohen Ablageraten (kg/h) und somit zu einer kosteneffizienten Herstellung von endkonturnahen Faser-Stacks.

1.2.2. Ressourceneffiziente Materialbasis

Materialspezifikation

Die Materialanforderungen wurden unter Berücksichtigung der gewünschten mechanischen Eigenschaften im Verbund sowie im Hinblick auf Prozesskette, Kostenvorgaben und Verfügbarkeit erstellt. Ausgehend davon wurden unterschiedliche Harzsysteme betrachtet. Dabei kommen sowohl epoxid-, als auch polyurthanbasierte Harzsysteme in Frage. Diese weisen im Ursprungszustand unterschiedliche Aggregatzustände auf, welche von flüssig über pastös bis hin zu pulverförmig reichen. Zur Charakterisierung wurden beispielsweise die Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) für die Polymerisations- oder Härtereaktion bzw. den Schmelzvorgang bei Hotmeltssystemen herangezogen. Weiterhin wurden rheologische Untersuchungen zur Bestimmung der Viskosität bei verschiedenen Prozessbedingungen (isotherm, variotherm) angestellt. Eine Bewertung kann anhand der Verarbeitungsbedingungen, wie z.B. der Dosiertechnologie, der Topfzeit, der Reaktionskinetik oder der Klebrigkeit erfolgen. Weitere Bewertungskriterien sind die Verfügbarkeit seitens des Herstellers und die Materialpreise sowie die mechanischen Eigenschaften.

Charakterisierung, Bewertung, Auswahl geeigneter Harzsysteme

Es wurden sechs Harzhersteller kontaktiert und insgesamt acht Harzformulierungen getestet. Dabei wurde deutlich, dass bislang kein Produkt auf dem Markt ist, das ad hoc alle MAREMO-Anforderungen erfüllt. Aus diesem Grund wurden die Recherchen für ein passendes Harzsystem weitergetrieben und vier weitere Anbieter bzgl. MAREMO-tauglicher Harzformulierungen angefragt. Dabei wurden folgende Anforderungen definiert: geringe Klebrigkeit, Materialpreis max. 6 €/kg, ausgehärtet bei Raumtemperatur und Lagerfähigkeit, -beständigkeit bei Raumtemperatur. Aus zahlreichen Versuchen haben sich folgende drei Matrixsysteme als aussichtsreich herausgestellt:

- Huntsman Advanced Materials (Europe) bvba:
 - B-Stage: Araldite LY 1556/Aradur 1571/Accelerator 1573/Hardener XB 3403
 - Hotmelt: LY 3508/Aradur 1571/Accelerator 1573
- CTP Advanced Materials GmbH: Hotmelt (KD 2017-3-3)

Die Materialsysteme wurden im Ganzen hinsichtlich ihrer mechanischen und verarbeitungstechnischen Eigenschaften sowie im Hinblick auf die Systemkosten charakterisiert und bewertet. Mittels eines Platte-Platte-Rheometers wurden die Viskositäten für unterschiedliche Temperaturen bestimmt, woraus Imprägniertemperaturen und Reaktionszeiten abzuleiten waren. Um sowohl die nach der Imprägnierung erreichte Glasübergangstemperatur, als auch die verbleibende Reaktivität von den vorimprägnierten Halbzeugen zu messen, wurde das Verfahren der DSC angewendet. Hieraus ergaben sich wichtige Erkenntnisse für den Imprägnierprozess. Die untersuchten Harzsysteme gliedern sich im Wesentlichen in sogenannte Hotmelt- und B-Stage-Systeme, wobei sich diese Harz-Klassen grundlegend in ihren Verarbeitungsviskositäten und den Reaktionszeiten unterscheiden.

Herstellung und Erprobung von Recyclingfaser-Prepregs

Zur Herstellung von recyclingfaser-verstärkten Basismaterialien wurden geeignete Vlieshalbzeuge beschafft. Diese Flächenhalbzeuge wurden mit Recyclingfasern aus Produktionsabfällen der Firma TK Industries hergestellt. Am Fraunhofer IWU erfolgt das Imprägnieren mit einem ausgewählten Hotmelt-Harz und die Verarbeitung zu klebfreien Recyclingfaser-Prepregs. Darüber hinaus wurden die handelsüblichen Vliesprodukte (SIGRATEX) der Firma SGL Automotive Carbon Fibers (SGL ACF) beschafft und getestet. Sowohl die Recyclingvliese als auch die beschafften Vliese wurden mit unterschiedlichen Harzsystemen imprägniert und anschließend mithilfe einer hydraulischen Presse zu Prepreg-Platten verpresst (vgl. *Abb. 8*).

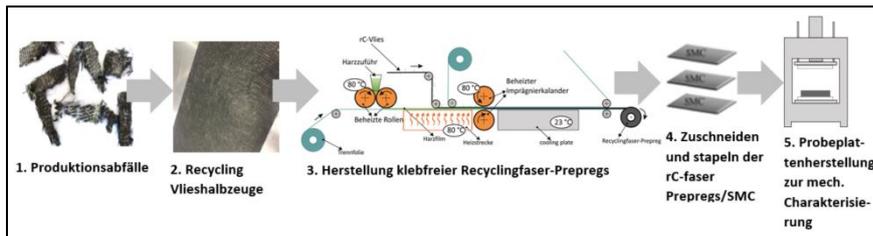


Abb. 8: Prinzip der Herstellung und Charakterisierung des Basismaterials mit Recyclingfasern

Zur Ermittlung mechanischer Kennwerte wurden die gefertigten Probekörper der Zug- (DIN EN ISO 527-4) und Druckprüfung (DIN EN 14126) unterzogen. Die Ergebnisse sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Konzeptionierung, Aufbau, Erprobung einer Fertigungsstrecke für TowPregs

Für die **Konzeptionierung** der Fertigungsstrecke für TowPregs war es vor allem wichtig die verschiedenen Möglichkeiten zur Imprägnierung der Kohlenstofffasern zu betrachten. In der engeren Auswahl standen dazu Imprägnierstationen in Anlehnung an die Extrusion sowie die Pultrusion in vertikaler oder horizontaler Anordnung. Die am Fraunhofer IWU für das Vorhaben MAREMO planmäßig aufgebaute **Laborfertigungslinie** für Tape- und TowPreg-Materialien ist in *Abb. 9* dargestellt.

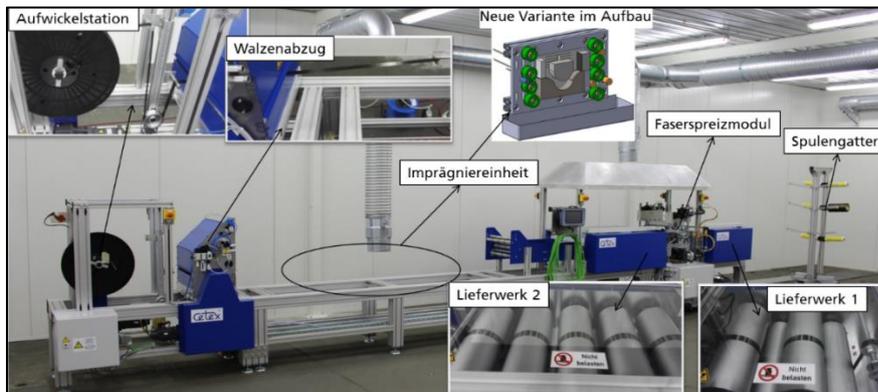


Abb. 9: Modulare Laborfertigungslinie für Tape und TowPreg-Materialien am Fraunhofer IWU

Die modular aufgebaute Imprägnieranlage lässt sich an sehr unterschiedliche zu testende Harzsysteme anpassen. Das Bild zeigt exemplarisch die Konstruktion einer neuen Imprägniereinheit, die sowohl für Hotmelt als auch für B-Stage Systeme geeignet ist. In der Zwischenzeit sind auf der Anlage eine Vielzahl unterschiedlicher Imprägniereinheiten bzw. -verfahren getestet worden.

Drei **Imprägniermethoden**: die *Pin-Imprägnierung* (*Abb. 10*), die *Siphon-Imprägnierung* und eine *Kalanders-Imprägnierung* wurden entwickelt und erprobt. Zusammenhänge der Imprägnierqualität mit der Werkzeugtemperatur, Harzviskosität, Harzfilmdicke, Anlagegeschwindigkeit, Rovingbreite sowie mit der Kontaktlänge und dem Reibungskoeffizienten zwischen der Imprägniereinheit und dem TowPreg wurden untersucht. Ergebnisse der ersten Imprägnierstudien haben zur Konstruktion und Bau eines Umlenkwerkzeuges geführt (*Siphon-Imprägnierung*), welches auf der TowPreg-Pilotanlage integriert wurde und als Vorversuchswerkzeug dient (siehe *Abb. 11*). Die am Fraunhofer IWU entwickelte und eingebaute Siphon-Imprägniereinheit ermöglicht eine gleichmäßige Temperierung mittels optimal verteilten Heizpatronen und Thermoelementen. Darüber hinaus findet durch die verstellbare Umlenktaufe eine Anpassung des Kontaktwinkels zwischen Roving und Werkzeug statt.

Die gleichmäßige Harzdosierung auf die gespreizten Kohlenstofffasern hat sich als ein wichtiges Thema herauskristallisiert und wurde im Rahmen des Berichtszeitraumes intensiv betrachtet. Verschiedene Dosierhersteller wurden kontaktiert, um die Herausforderungen der sehr geringen benötigten Dosiermenge (ca. 2,5 g Harz pro Meter 50K-TowPreg) sowie der hohen Reaktivität des Harzsystems zu überbrücken. Zahlreiche Vorversuche haben dazu beigetragen, eine innovative Harzdosierlösung zu definieren, indem die etablierte Prepreg-Anlagentechnik modifiziert und an unsere Anforderungen angepasst wurde. Die klassische Prepreg-Technologie mit dem Auftrag eines Harzfilms auf einer Transferfolie und Ablage der gespreizten Faserbänder auf dem Harzfilm wurde durch das direkte Auftragen vom Harzsystem auf die Fasern ersetzt. Hierdurch werden die Kosten und Umweltbelastungen reduziert. Das Prinzip für die Erreichung einer gleichmäßigen Harzdosierung über

die Breite des TowPregs, welches gleichzeitig eine kostengünstige industrielle Lösung für die Großserie anbietet, ist in *Abb. 12* dargestellt.

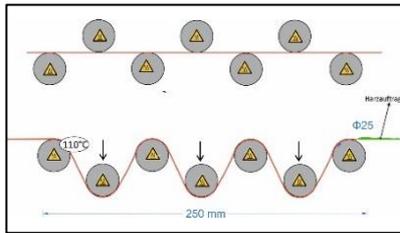


Abb. 10: Prinzipdarstellung der Pin-Imprägnierung

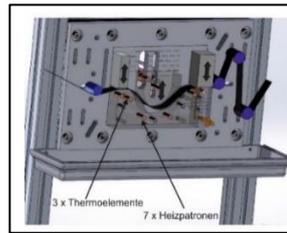


Abb. 11: CAD-Konstruktion der Siphon-Imprägnierung

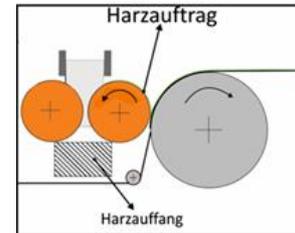


Abb. 12: Schematische Darstellung des Dreiwalzenauftragssystems

1.2.3. Anlagen Technik zur Herstellung von Near-Net-Shape-Verbundhalbzeugen

Konzeptionierung der Anlage

Nach dem Start des Fördervorhabens ist mit den beteiligten Partnern die Gesamtanlagenspezifikationen diskutiert und erste Randbedingungen definiert worden. Hier standen vor allem die Anforderungen des automobilien Endanwenders hinsichtlich Serieneinsatz, Anlagenflexibilität und Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses bezüglich der relevanten Bauteilklassen im Vordergrund. In Zusammenarbeit (vgl. *Abb. 13*) der Partner Cetex Institut gGmbH, AFPT GmbH und TISORA Sondermaschinen GmbH wurde ein Konzept für eine Anlage zur automatisierten Ablage von klebfreien TowPregs entwickelt. Favorisiert wird dabei ein Konzept in **Portalbauweise** (vgl. *Abb. 14*). Bauteildimensionen, Anlagenabmaße und verfügbare Stellfläche wurden aufeinander abgestimmt und weitere Parameter vorab spezifiziert.

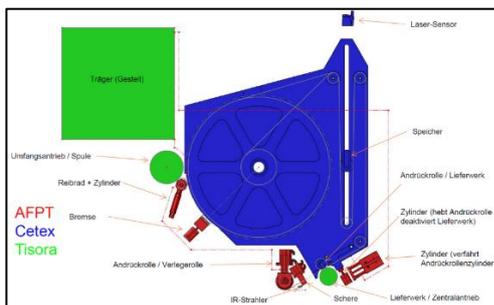


Abb. 13: Konzept und Zuständigkeiten

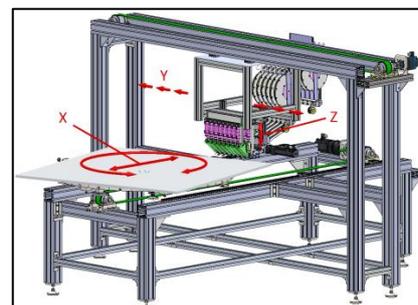


Abb. 14: Entwurfsvariante der Near-Net-Shape Legeanlage als Portalbauweise

Das für die MAREMO-Anlage benötigte Portalsystem dient der Realisierung der gewünschten Relativbewegung zwischen der Legekopf-Batterie und einem Laminiertisch. Der bevorzugte Entwurf für eine Kombination von Portalsystem und Drehtisch ist in *Abb. 14* dargestellt. **Wesentliche Merkmale** der Anlage sind, dass das zu verarbeitende TowPreg-Material hat eine Breite von 25 mm. Weiterhin weisen die Einzellegeköpfe eine Breite von max. 48 mm auf. Jeder Einzellegekopf enthält eine eigene Vorschub- und Schneideinheit. Die Einzellegeköpfe werden zu einer Legekopf-Batterie zusammengesetzt, so dass sich die Einzellegeköpfe wechselweise gegenüberstehen. Unter der Legekopf-Batterie wird der Laminiertisch alternierend vor- und zurückbewegt. Die eine Hälfte der Legeköpfe platziert TowPregs bei Vorwärtshub, die andere Hälfte bei Rückwärtshub. Mit einem Vorwärts- und Rückwärtshub lässt sich eine komplette Laminatschicht realisieren. Die Heizung wird nach Möglichkeit mit IR-Strahlern realisiert (ca. 750 Euro je Einzellegekopf). Heizlösungen mit Laser werden als zu teuer erachtet (ca. 50.000 Euro je Einzellegekopf). Nachdem die ersten Randbedingungen grob definiert wurden, hat die Firma AFPT GmbH kritische Punkte identifiziert, welche zum Erreichen der Anforderungen konzeptionell besonderer Aufmerksamkeit bedürfen. Hierzu zählen vor allem das schnelle Bereitstellen der abzulegenden Tapestücke, die Notwendigkeit der sehr schnellen Konsolidierung sowie der modulare und kostengünstige Aufbau der Produktionsanlage. Aufgrund der Erfahrungen der AFPT GmbH mit unterschiedlichen Verbundmaterialien sowohl mit thermoplastischer als auch mit duroplastischer Matrix wurden in einem ersten Schritt die

Besonderheiten beim Konfektionieren, sprich Schneiden, des Tapematerials betrachtet. Für eine Serienanwendung müssen ohne Wartung der Schneideinheit prozesssicher Schnittzahlen von weit über 100.000 Schnitten erzielt werden können. Weiterhin müssen kurze Schnittzeiten realisiert werden, um die Ablegerate der Anlage zu erfüllen. Dazu hat die AFPT GmbH die Schnittprinzipien (Abb. 15) Stanzen sowie Schneiden mit Gegenmesser genauer untersucht.

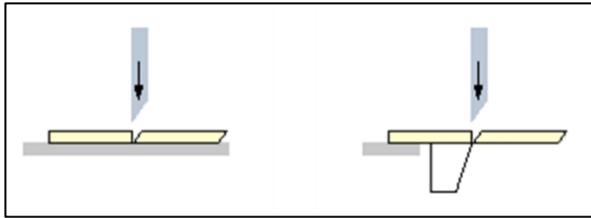


Abb. 15: Schneidenprinzipien: Stanzen (li.), Schneiden mit Gegenmesser (re.)

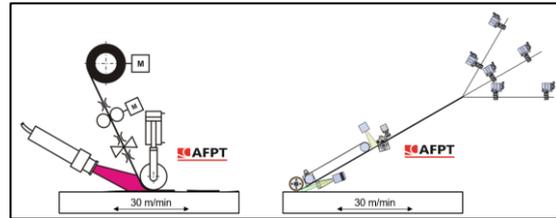


Abb. 16: Aktuelles Ablegesystem (li.), getrenntes Ablegesystem (re.)

Da seitens der AFPT GmbH sehr gute Erfahrungen beim Schneiden von thermoplastischen Tapes mit Messer und Gegenmesser vorliegen, wird dieses Schneidprinzip bevorzugt. Voraussetzung hierfür ist, dass das innerhalb des Fördervorhabens zu entwickelnde Tape wie geplant keine Klebrigkeit aufweist. Dem Vorteil von sehr hohen Schnittzahlen (> 100.000), was Grundbedingung für eine sehr hohe Anlagenverfügbarkeit ist, steht beim Schneiden mit Gegenmesser der Nachteil der erhöhten Schnittzeit gegenüber. Bei Ablegegeschwindigkeiten von 30 m/min bzw. 60 m/min wird bei einer kontinuierlichen Ablage des Tapematerials bei einer Schnittzeit von 0,1 s ein Weg von 50 mm bzw. 100 mm zurückgelegt. Selbst bei einer Reduzierung der Schnittzeit auf nur 0,01 s, was technisch nur schwer erreichbar ist, bewegt sich das Tapematerial während des Schnittes um 5 mm bzw. 10 mm. Um ein reibungslosen Ablegeprozess realisieren zu können, müsste die Schneideinheit mitbewegt werden oder das Schneiden vom Ablegen prozesstechnisch getrennt werden. Die Umsetzung von motorisch mitbewegten Schneideinheiten wird die Kosten für eine spätere Anlage derart erhöhen, dass ein wirtschaftlicher Betrieb nicht mehr möglich ist. Bei aktuellen Ablegesysteme der AFPT GmbH sind das Schneiden und das Ablegen nicht voneinander getrennt (siehe Abb. 16 links). Um die Anforderungen innerhalb des Projekts erfüllen zu können, geht AFPT GmbH derzeit davon aus, dass ein Ablegesystem mit einer Trennung zwischen Ablegen und Schneiden erfolgen muss. Ein erstes rudimentäres Konzept wurde hierzu ausgearbeitet (siehe Abb. 16 rechts). Zudem wurden Antriebskonzepte für ein beliebig erweiterbares Scheibenspulengatter entwickelt, um eine Skalierbarkeit des Prototyps in eine spätere Serienanlage realisieren zu können. Eine Antriebsvariante via Zahnriemen wurde erarbeitet, scheint jedoch mit Blick auf Wartung und Rüstzeiten der Anlage wenig geeignet. Aktuell gehen die Bestrebungen deswegen auf ein Konzept mit Zahnradantrieb der Spulen über dem Umfang mit gleichzeitiger Dreipunktlagerung (Abb. 17).

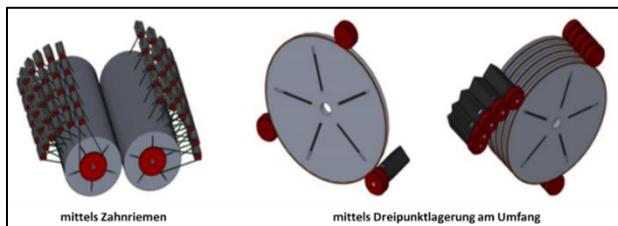


Abb. 17: Antriebskonzepte für modularisiertes Scheibenspulenmagazin

Neben dem hardwareseitigen Konzept haben die Projektpartner AFPT GmbH, TISORA Sondermaschinen GmbH und Cetex Institut gGmbH damit begonnen ein **Steuerungskonzept** zu erstellen. In dessen Rahmen wurde ein vorläufiges Ablaufdiagramm zur Visualisierung der notwendigen zeitlichen Ansteuerung einzelner Aktoren erarbeitet. Die Steuerung der Anlage erfolgt mit einer SPS OMRON. Die wesentlichen funktionellen Belange sind abgestimmt. Auf Grund der Spezifik einer völlig neuen Technologie bedingt durch das neu entwickelte Material wurde eine weitgehend offene Bedienoberfläche angestrebt in der diverse Parameter beeinflusst und optimiert werden können.

Konstruktion und Bau eines modularen Legekopfs für die neuen Tape-Halbzeuge

Der benötigte MAREMO-Legekopf wurde bei AFPT GmbH entwickelt und aufgebaut, wobei eine vorhandene, bewährte Konstruktion als Ausgangsbasis diente. *Abb. 18* zeigt eins der drei aufgebauten Ablegmodule, während rechts eine Übersicht über den Aufbau des Legekopfes zu sehen ist.



Abb. 18: Montiertes Ablegmodul

Zur einfachen Montage des Ablegmodules ist ein Schnellspannsystem entwickelt worden. Darüber hinaus wurde eine Aufnahmevorrichtung zum arretieren der Kassetten am Ablegmodul konstruiert. In jedem Ablegmodul befinden sich ein Rundzylinder mit Beschleunigungsrollen und ein Führungszylinder mit Reibbelag. Bei entsprechendem Signal aus der Anlagensteuerung wird der Rundzylinder ausgefahren und überträgt die konstante Drehbewegung der Speicherwalze auf die Flansche der Materialspule. Durch diesen Vorgang wird Material in das Tänzersystem der Kassette gefördert. Das TowPreg wird an die synchron zum Tisch bewegte Förderwalze geführt, so dass das TowPreg durch die Schneideinheit bis unter die Konsolidierungsrolle vorgeschoben wird. Am Ende einer Ablegebahn wird das sich bewegende TowPreg mittels der Schneideinheit (cut on the fly) geschnitten. Um dieses zu realisieren, ist die neu entwickelte Schneideinheit in der Lage sich während des Schneidvorgangs mitzubewegen. Dadurch wird auch bei hoher Ablegegeschwindigkeit das Schneiden des TowPregs gewährleistet. Mittels der Konsolidierungsrolle wird das TowPreg-Material auf dem Tisch angedrückt. Aufgrund des niedrigen Wärmeniveaus ($<100^{\circ}\text{C}$) wurde als Wärmequelle Infrarotstrahlung gewählt. Um die Wärmeeinbringung zwischen zugeführten TowPreg und Substrat während der Inbetriebnahme und für spätere Prozessuntersuchungen variieren zu können, wurde eine Halterung konstruiert, die eine drehbare Verstellung des Infrarotstrahlers um seine Längsachse ermöglicht. Aus wirtschaftlichen und bauraumbedingten Gründen wurde eine manuelle Verstellung des Infrarotstrahlers realisiert. Die Halterung des Infrarotstrahlers wird aus Montagegründen am Träger der Förder- und Speicherwalze montiert.

Konstruktion und Realisierung der TowPreg-Ablegeeinheit

Durch das seitens Fraunhofer IWU entwickelte TowPreg ergeben sich nun einige Anforderungen an die Verlegetechnik, die Auswirkungen auf das Maschinensystem und dessen Steuerung haben. In mehreren Arbeitstreffen der Projektpartner wurden diverse technische Varianten diskutiert und Versuche ausgewertet. Im Ergebnis wurde folgendes Konzept gemeinsam beschlossen:

Die Materialspulen werden in schnellwechselbare Kassetten eingelegt, die einen Speicher mit Tänzer, eine Bremse und zwei extern lösbare Andruckrollen enthalten. Damit können sowohl der Spulenantrieb, als auch der Antrieb des Lieferwerkes problemlos extern fest installiert und beim Spulenwechsel nur mechanisch angekoppelt werden. Es sind also keine Medienankopplungen erforderlich. Alle Spulen, wie auch die Vortriebe der TowPregs werden von externen durchgehenden Wellen zentral angetrieben. Die Momente werden über Reibung eingekoppelt und pneumatisch geschaltet. Die Andruckrolle wird nicht angetrieben, sondern dreht sich durch die Verlegebewegung mit. Sie wird pneumatisch angedrückt. Die Schere sitzt unmittelbar hinter der Andruckrolle, um eine minimale Verlegelänge von 120 mm zu gewährleisten. Sie ist über eine pneumatisch vorgespannte Feder angetrieben. Die Erwärmung des TowPregs beim Ablegen erfolgt mittels Infrarotstrahler. Dieses neue Konzept wurde von der AFPT GmbH, Cetex Institut gGmbH und TISORA Sondermaschinen GmbH in Gemeinschaftsarbeit auskonstruiert und umgesetzt. Außerdem hat der Maschinentisch, auf dem die TowPregs verlegt werden, an seiner Oberfläche folgende besonderen Anforderungen:

- Luftdurchlässigkeit, um mit Vakuum eine Trägerfolie zu fixieren
- Temperaturbeständigkeit bis 100°C

- ausreichende Druckfestigkeit bei max. Temperatur
- geringe Wärmeleitfähigkeit, um die Haftung des TowPregs auf der Trägerfolie zu gewährleisten
- kostengünstig, da Verschleiß / Verschmutzung zu erwarten ist.

Aufbau der prototypischen Produktionsanlage für NNS-Halbzeuge und Inbetriebnahme

Während der Inbetriebnahme- und Erprobungsphase (siehe *Abb. 19*) wurden Details der Bedienung und der Programmabläufe angepasst und modifiziert, wie beispielsweise der synchrone Lauf zwischen Tisch und Transportrolle des Legekopfes. Punkte zur Steuerung und Software der Anlage können ständig modifiziert werden, sodass ein ordentliches Legen von Mustern auf der Anlage sichergestellt werden kann.



Abb. 19: MAREMO-Legeanlage in Erprobungsphase



Abb. 20: Vollständiger Satz Spulen mit Alubordscheiben

Als Versuchsmaterial diente während der Erprobungsphase ein Glas/PP-Tape, welches auf die Scheibenspulen gewickelt wurde (siehe *Abb. 20*). Dieses ist komplett klebfrei und im Vergleich zu duromeren TowPregs eher steif. Das hat den Vorteil, dass die Anlage nicht mit verschiedenen Harzsystemen verklebt und in Folge dessen oftmals gereinigt werden muss. So können Versuche zeitoptimiert stattfinden. Spätere Legeversuche wurden mit TowPregs durchgeführt (siehe S. 17).

Entwicklung eines durchgängigen CAM-Systems mit Schnittstelle zum QS-System

Nach Erhalt der Eingangsdaten für den in MAREMO darzustellenden Prozess hat die SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft mbH die im Folgenden (*Abb. 21*) dargestellte Prozesskette durchlaufen. Die bereitzustellenden Eingangsdaten belaufen sich dabei auf die 3D Daten der Fertigungsanlage, also des End-Effektors und der Maschine. Weiterhin werden die Fertigungsinformationen benötigt. Dazu gehören die Abmaße des Materials, das Plybook (der Lagenaufbau, auch „Stacking“) und die Geometrie des zu belegenden Bauteils. Für ebene Lamine sind dies dxf Dateien, die die Außenkontur(en) definieren.

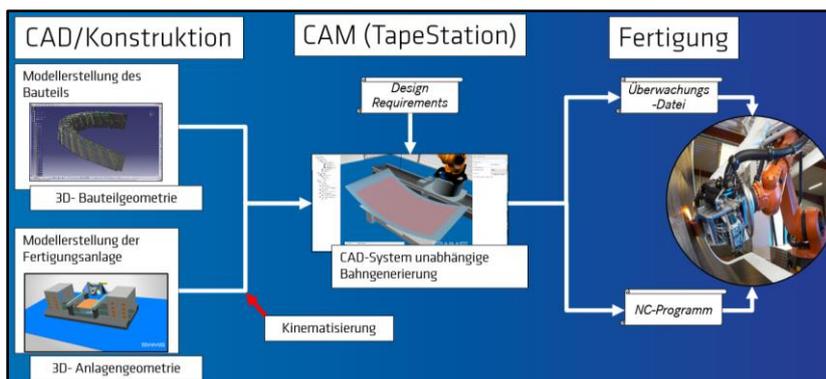


Abb. 21: Prozesskette von der Konstruktion bis zur Fertigung mittels offline Programmierung über die CAESA® Composites TapeStation Software

Für das Programmieren von planaren Bauteilen sind diverse Eingriffsmöglichkeiten vorhanden. Der CAM Programmierer kann sämtliche Prozessparameter über eine Eingabemaske editieren. Diese Eingabemaske gehört standardmäßig zu den notwendigen Ressourcen für das Definieren von Belegungsdaten und Legeprogrammen. Begleitend zu den Eingabefeldern ist eine schematische Visualisierung der einzelnen Schaltpunkte und Abstände im Legeprozess abgebildet. Zu diesen Prozessparametern (*Abb. 22*) zählen:

- Vorschübe,
- Umschaltpunkte für Vorschübe in Relation zu dem gelegten Material,
- Heiztemperatur/-leistung und die
- Minimale Tow-Länge

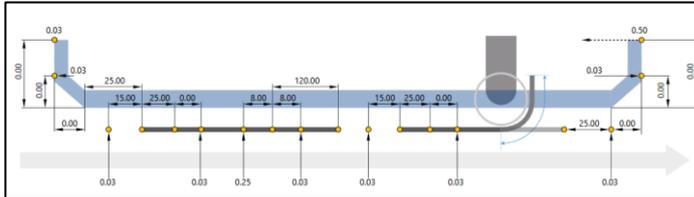


Abb. 22: Prozessparameter mit der dazugehörigen Visualisierung

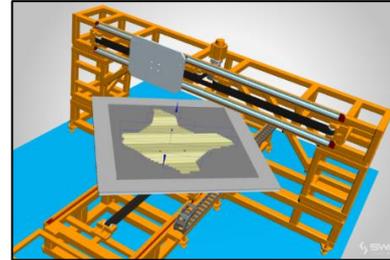


Abb. 23: Eine Lage des Schubfeldes auf dem Drehtisch (TapeStation)

Für die Verwendung der Maschine in der Software galt es weiterhin, diese zu kinematisieren, um ihre Bewegungen im Legeprozess zu simulieren. Dazu wurde das bereitgestellte CAD Model aufbereitet und in die Software integriert (Abb. 23). Die Kinematik besteht aus 3 Komponenten:

- Dem Drehtisch auf einer Linearachse (X-Achse),
- der Rotation des Drehtisches (A-Achse) und
- den Legeköpfen an dem Gestell (Y-Achse)

Mit dem Erhalt dieser Daten generiert SWMS mit der TapeStation Software eine angepasste Bahnplanung mit Verschnittanalyse. Für diese Bahnplanung ist es dann möglich, eine Simulation und Kollisionsanalyse für den vollständigen Legeprozess zu berechnen und das NC-Programm für die jeweilige Maschine zu exportieren. Für die im Projekt entstandene Anlage wird eine Omron Steuerung mit einer SPS Typ NJ 501 – 5300 verwendet. Diese wird per G-Code angesteuert. Der Post-Processing Schritt der TapeStation überführt die in der Software generierten Legedaten in das definierte G-Code Format. Die exportierten Legeprogramme werden dann auf die Anlage überführt, sodass sie von der Maschine bearbeitet werden können. Im Bereich der Qualitätssicherung galt es, das Konzept für die thermographische Überwachung des Legeprozesses zu realisieren. Über die Analyse eines aktuellen Wärmebildes ist dadurch eine Defektfeststellung (Gaps, Overlaps, verdrehte Tows, fehlende Tows, Bridging) gegeben. Ein Vergleich der Soll- und Ist-Werte erfolgt über den Abgleich einer ausgegebenen XML-Datei mit den von der Kamera aufgenommenen und aufbereiteten Daten. Dies wurde im Rahmen des Projekts nicht erprobt, die softwareseitigen Schnittstellen und Funktionalitäten sind jedoch implementiert und funktionsbereit. Die SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft mbH war weiterhin in der Lage, anhand des definierten Lagenaufbaus des Schubfeldes des BMW i8, Materialverbrauchsanalysen (Materialeinsatzquoten und Verschnittberechnungen) durchzuführen (Abb. 23). Durch die parametrisierbare und modulare Gestaltung der Software konnten auch Analysen durchgeführt werden, die über das im Projekt umgesetzte Maß hinausführten. So wurden in Absprache mit BMW auch Legezeitanalysen für eine Anlage mit 24 und mit 48 Kassetten durchgeführt. Die CAESA® Composites TapeStation kann die Funktionalität der Anlage komplett abbilden und für die Auslegung und Programmierung diverser Bauteile verwendet werden.

In-Line-Überwachung des Tape-Legeprozesses

In enger Abstimmung mit AT – Automation Technology GmbH, AFPT GmbH, TISORA Sondermaschinen GmbH und SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft mbH galt es eine In-Line-Prozessüberwachung zu entwickeln und zu implementieren. Dazu gehörte die Auswahl und die Adaption geeigneter Sensorsysteme. Für die Aufnahme und Erkennung typischer Fehlermuster wie etwa Gaps, Overlaps, twisted tows und Fremdmaterial kommen **Thermografiesensoren** in Betracht. Darüber hinaus ermöglicht der zusätzliche Einsatz von 3D-Laserlichtschnittsensoren die Erfassung geometrischer Merkmale mit hoher Auflösung und Geschwindigkeit. Auf der Basis des Anlagenkonzeptes und Lastenheftes erfolgte die Auslegung und Realisierung einer für den Prozess und die Fertigungsanlage optimierten inline Sensorik. Diese Sensoren wurden anschließend im Rahmen von Labor- und Anlagenversuchen validiert (Abb. 24).

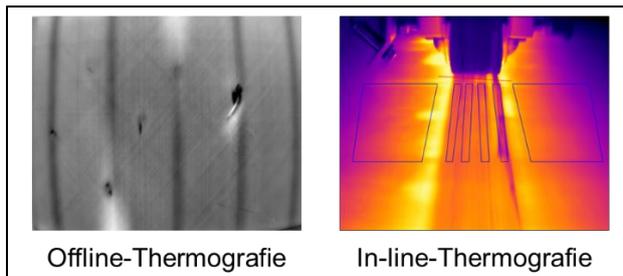


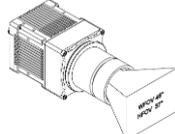
Abb. 24: Detektion von Delaminationen in Faserverbundstrukturen

Nachfolgend sind die für die Auslegung der Sensorik relevanten Anlagenparameter aufgeführt:

- 150 mm Messbreite pro Sensor (entspricht 6 Tapes a 25mm)
- Positioniergenauigkeit des Tapes: $\pm 0.5\text{mm}$
- Vorschubgeschwindigkeit: ca. 1m/s

Im Rahmen der Arbeiten wurden zwei Thermografiesensoren und ein 3D-Sensor für die Integration in den Ablegekopf ausgelegt. Die zwei Thermografiesensoren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, Einbaugröße und auch ihrer Anschaffungskosten. Der Thermografiesensor 2 stellt eine kostenoptimierte Variante mit geringerer lateraler Auflösung dar.

Tabelle 2: Kenndaten der Thermografiesensoren

	Kenndaten Thermografiesensor 1:	Kenndaten Thermografiesensor 2:
		
Auflösung	640x480 Pixel	160x120 Pixel
Thermische Auflösung (NETD):	< 30mK	< 50mK
Bildrate:	50Hz in kleinerem Auslesefenster bis zu 300Hz	9Hz
Scheinpflugganordnung möglich:	ja	nein
Sichtbereich (Öffnungswinkel):	48° mit Optik f=12mm	57°
Messbreite:	150mm im Abstand von 168mm	150mm im Abstand von 138mm
Abmessung:	55mm x 55mm x 119mm	44mm x 44mm x 51mm

Die Thermografiesensoren sollen als Smart-Sensoren realisiert werden und die Ergebnisse der integrierten Bildanalyse werden über ein Ethernet Feldbus Protokoll an die Anlagensteuerung und das QS-System übergeben. Für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes werden die Messergebnisse der Sensoren über ein PC-System aufgezeichnet und ausgewertet. Die Profildaten des **3D-Sensors** werden ebenfalls über ein PC-System aufgezeichnet und ausgewertet. Eine im 3D-Sensor integrierte Auswertung ist auf Grund der hohen 3D-Datenrate nicht realisierbar. Die Auswertung der 3D-Profildaten erfolgt mit Hilfe einer PC-basierten Auswertungssoftware. Für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes erfolgt diese Auswertung zunächst offline. Ziel ist es dabei eine vollständige 3D Erfassung aller abgelegten Lagen zu realisieren. Aus diesem 3D-Datensatz werden Merkmale berechnet die Rückschlüsse auf die Optimierung der Anlage bzw. des Ablageprozesses geben können.

Realisierung: Im Projekt wurde ein Prototyp des spezifizierten **3D-Sensor** entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Der Sensor basiert auf einer bei AT – Automation Technology GmbH vorhandenen Plattform für 3D-Sensoren. Zur Realisierung der geforderten Spezifikation wurde eine spezifische Anordnung von Sensor, Optik und Laser berechnet. Bei der Anordnung von Optik und Sensor wurde eine Scheinpflugganordnung gewählt, um auch bei schwankenden Abständen zur Tow-Oberfläche eine

optimale Bildschärfe und damit eine bestmögliche Ortsauflösung zu gewährleisten. Zudem wurde der optische Strahlengang mit Hilfe der optischen Simulationssoftware ZEMAX optimiert. Basierend auf der Auslegung und Simulation wurde eine Konstruktion des Sensors erstellt und gefertigt. Ebenfalls basierend auf der bei AT – Automation Technology GmbH vorhandenen Kameraplattform wurde ein **Thermografiesensor** gemäß Anlagenspezifikation ausgelegt und aufgebaut. Die Kenndaten des realisierten Thermografiesensors beruhen dabei auf der Auslegung „Thermografiesensor1“. Der Thermografiesensor wurde als Smart-Sensor mit Ethernet-Schnittstelle realisiert. Für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes werden die Messergebnisse der Sensoren über ein PC-System aufgezeichnet und ausgewertet. Die Übergabe der Resultate erfolgt per Modbus TCP. Parallel zu den im Sensor ausgewerteten Resultaten werden die Temperaturbilder an die Aufzeichnungssoftware per GigE-Vision Protokoll übertragen. Damit ist insbesondere für die Validierungsphase sichergestellt, dass die Versuchsdaten auch nachträglich offline ausgewertet werden können und somit auch neue Auswertungsalgorithmen entwickelt und validiert werden können. Folgende thermische Parameter werden von dem in der Kamera integrierten Auswertungsverfahren bereitgestellt:

- Berechnung einer mittleren, minimalen und maximalen Temperatur im Ablagebereich. Diese Temperaturwerte dienen der Überwachung und Nachregelung der während des Ablageprozesses eingebrachten Temperatur.
- Berechnung einer lokalen Temperaturentwicklung über die Zeit. Diese thermische Abklingkurve ermöglicht die Erkennung von Fremdkörpern und lässt Rückschlüsse auf die Ablagequalität zu.

Innerhalb des Prozesses kann durch die in der Kamera integrierten TowPreg-Kanten-Erkennung die Position der Tape-Kanten sowie der resultierende Gap-Wert zwischen zwei TowPregs ermittelt werden.

Integration: Der **Thermografiesensor** wird in den mittleren Teil der Y-Achse der Anlage integriert und kann somit 6 Tapes (drei von jeder Seite) mit einmal überwachen (siehe Abb. 25).

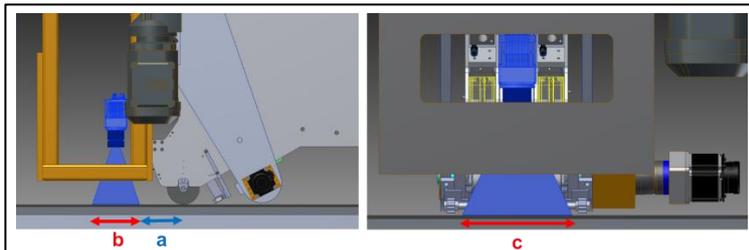


Abb. 25: Darstellung der Integration des Thermografiesensors in die Ablagesystem

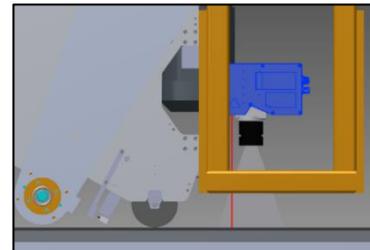


Abb. 26: Integration des 3D-Lichtschnittsensors in das Ablagesystem

Der Thermografiesensor bietet über seine embedded Software die Möglichkeit der kontinuierlichen Temperaturmessung im Ablagebereich. Zu diesem Zweck wird eine mittlere Temperatur im Ablagebereich ermittelt und diese als Messgröße für eine adaptive Steuerung des Wärmeeintrages bereitgestellt. Zur einfachen Integration in die Anlage kann diese Stellgröße über ein Modbus Ausgabemodul als Spannung zur Verfügung gestellt werden. Der **3D-Sensor** wird wie der Thermografiesensor in der Y-Achse des Ablagesystems untergebracht (siehe Abb. 26). Der Sichtbereich senkrecht zur Ablagerichtung beträgt 160 mm. Der Sichtbereich ist somit ausreichend für die gleichzeitige Überwachung aller 6 Tapes einer Ablageeinheit. Der Abstand der 3D-Profilmessung zum eigentlichen Ablagepunkt ist mit 130 mm minimal gehalten und garantiert eine schnelle Rückkopplung von geometrischen Sensorinformationen in die Bahnsteuerung. Es wurden Versuche zur thermografischen Überwachung im Ablageprozess durchgeführt. Zur Vereinfachung wurde bei den Versuchen die Ablage einzelner TowPregs überwacht. Die Überwachung aller drei parallelen TowPregs ist durch den ausreichend großen Sichtbereich des realisierten Sensors gewährleistet. Dabei konnte die messtechnische Eignung der entwickelten Sensorik zur Überwachung des Konsolidierungsprozesses nachgewiesen werden. Zudem wurden vom Projektpartner AFPT GmbH Parameterstudien des Ablageprozesses mit thermografischer Überwachung für verschiedene thermoplastische Prepregmaterialien durchgeführt. Mit den Versuchen konnte eine Qualitätssteigerung des Ablageprozesses nachgewiesen werden. In weiteren Labor-Versuchen erfolgte die Erkennung von

Ablagefehlern. Es konnten die geometrischen Positionen der TowPreg-Kanten sicher detektiert werden und somit auch das Fehlerbild „Gap“ erkannt werden. Die Versuche erfolgten mit vier und zwei einzelnen TowPregs durch eine simulierte Ablage mit erwärmten TowPregs. Das Fehlerbild Overlaps und twisted TowPregs konnten durch ein geändertes Temperaturprofil des betroffenen TowPregs erkannt werden. Die Validierung der Auswertung von hot- und cold-Spots war über einen einfachen Schwellwertalgorithmus möglich. Somit konnte auch der Nachweis für eine Erkennung von Störungen im Wärmefluss durch Fremdkörper oder eine mangelhafte Anbindung demonstriert werden.

Erstellung technischer Dokumente

In Folge der finalen Gestaltung des Anlagenkonzepts, bei der Bau und Konstruktion der Grundmaschine sowie die Programmierung der Steuerung und aller Antriebe auf den Projektpartner TISORA Sondermaschinen GmbH entfallen, wurde die Betriebsanleitung zur Grundmaschine vom Hersteller der Anlage, der TISORA Sondermaschinen GmbH erstellt. Für die Lege-Module seitens der AFPT GmbH und die von der Cetex Institut gGmbH realisierten Kassetten und den Materialspeicher gibt es ergänzende technische Dokumentationen. Von der Cetex Institut gGmbH wurde nach Maschinenrichtlinie in der Fassung 2006/42/EG eine Betriebsanleitung zu den Kassetten erstellt. Im Zusammenspiel mit der EG-Einbauerklärung nach Anhang II 1 B der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG ist die von der Cetex Institut gGmbH erstellte Dokumentation Teil der Gesamt-Maschinendokumentation.

Optimierung von Prozess und Anlage

Erste Versuche bei der Inbetriebnahme haben gezeigt, dass die Maßhaltigkeit der Tapebreite hohe Priorität hat. Das verwendete Mustermaterial ist teilweise geringfügig breiter als 25 mm gewesen und führte zu Funktionsstörungen der Anlage. Zum einen drängt das Material in den vorgesehenen Tafeführungen und hat die Tendenz sich aufzustellen, wodurch die Ablagegenauigkeit negativ beeinflusst wird. Zum anderen kann zu breites Material zwischen den Bordscheiben eingeklemmt werden und so den Legeprozess unterbrechen. Da beim Herstellungsprozess des Versuchsmaterials eine gewisse Breitentoleranz auf Grund der leicht abweichenden Faserausrichtung auftreten kann, wurde das neue Versuchsmaterial für die weiteren Legeversuche für eine bessere Funktionssicherheit auf Untermaß (24,5 mm Tapebreite) gefertigt. Perspektivisch müssen die Tapebreite und deren Toleranz auf der TowPreg-Anlage natürlich so eingestellt werden, dass es einerseits keine Overlaps und andererseits keine Gaps größer als 1 mm zwischen benachbarten Tapes nach dem Ablegeprozess gibt. Unter Verwendung der neuzugeschnittenen Tapes mit einer Breite von rund 24,5 mm konnte das Testprogramm ablaufen, wobei 6 Tapes nebeneinander auf eine Länge von 300 mm abgelegt werden. Der Ablegeprozess ist so konzipiert, dass drei Tapes in einem Abstand von 25 mm gelegt werden, so dass zunächst Lücken zwischen den gelegten Tapes ersichtlich sind (siehe *Abb. 27*). Im anschließenden Prozessschritt werden diese Lücken dann mit Tapematerial geschlossen.

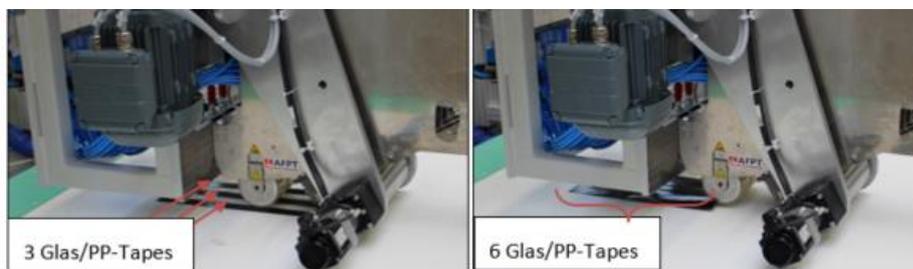


Abb. 27: Ablegen von Tapes (1. Bahn links, 2. Bahn rechts)

Optimierungsbedarf ergab sich während der Inbetriebnahme an den Reibrollen der Beschleunigungswalze, an der Aufnahme und der Arretierung der Kassetten sowie der Tafeführung an der Schneideinheit. Dem wird aktuell konstruktiv und durch zusätzliche Montage- und Justagearbeiten begegnet. So sind die Radien in der aktuellen Tafeführung aus Blech ungünstig und führen zu einem Aufstellen des Tapes. Durch eine präzise gefräste Führung, mit definierten Kanten und ohne Radien wird dieses Problem gelöst (siehe *Abb. 28*).

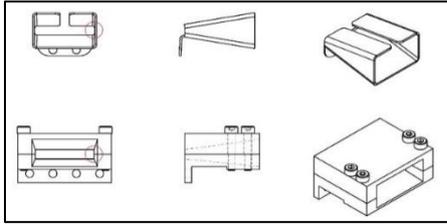


Abb. 28: Substitution einer Tapeführung aus Blech mit Radien durch Frästeile ohne Radien

Um nach der Inbetriebnahme das Ablage-Ergebnis weiter zu verbessern, waren zusätzliche Optimierungsmaßnahmen erforderlich. Sowohl am Ablageprozess als auch an Teilen und Baugruppen der Anlage selbst wurden umfangreiche Optimierungsarbeiten und Verbesserung entwickelt und umgesetzt. Dies war notwendig, damit das Verlegebild der Tapes den hohen gestellten Anforderungen entspricht und der Prozess stabil und kontinuierlich läuft, ohne dass es zu Fehlern im Legebild kommt. Konkret kam es in der Anfangsphase zu erheblichen Gaps und Overlaps zwischen benachbarten Tapes auf Grund mangelnder Parallelität (siehe Abb. 29), welche eliminiert wurden.

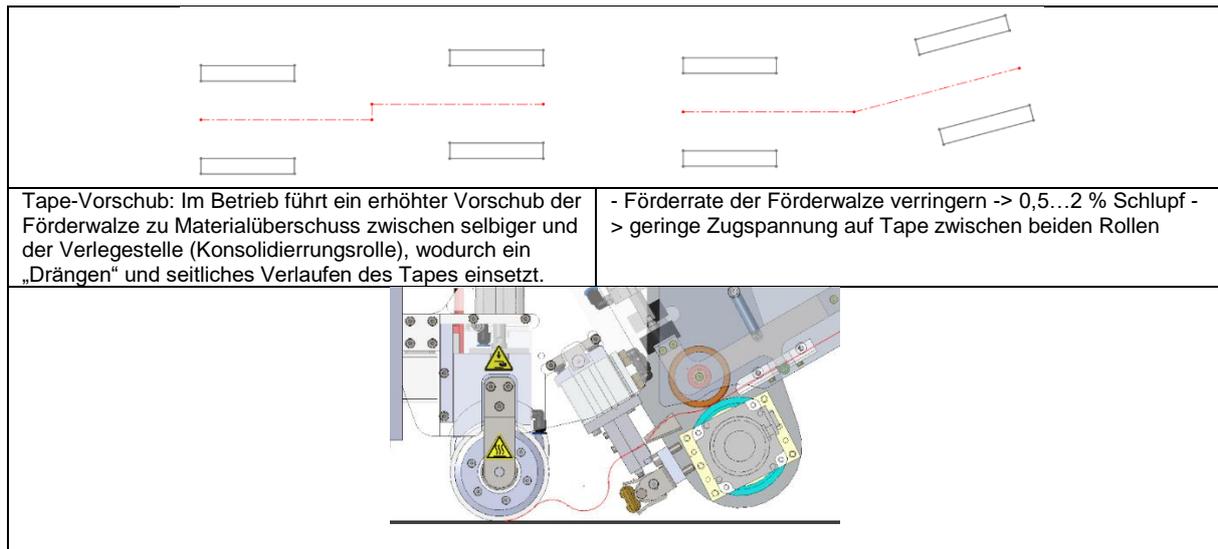


Abb. 29: Gaps und Overlaps bei der Tape-Ablage

Es wurde ein Versuchsplan definiert und in dessen Rahmen verschiedene Legemuster unter reproduzierbaren Bedingungen abgelegt und fotografisch dokumentiert. Zum einen, um den Ist-Zustand festzuhalten und zum anderen um Veränderungen nach erfolgter Optimierung bewerten zu können. Es wurden Überlegungen zu den Ursachen für die Winkel- und Lageabweichungen der Tapes bei der Ablage angestellt und mögliche Gegenmaßnahmen evaluiert.

Tabelle 3: Ursachen und Maßnahmen im Rahmen des Optimierungsprozesses

Ursache	Maßnahme
Ungenügende Führung des Tapes zwischen Schere und Andruckrolle / 115 mm frei Strecke	In Kooperation mit der AFPT GmbH zusätzliche Tapeführung einfügen Mögliche Probleme: - im Wirkungsbereich des IR-Strahlers - keine fixen Montagepunkte - Tape-Anfang nach Schnitt
Übermäßiges Spiel des Tapes in seinen Führungen ermöglicht Schiefstellen / Winkelfehler	- Tapebreite und Breitentoleranz optimieren - Breite der Führungen auf optimiertes Tape abstimmen - Evtl. Breite der Führungen untereinander anders gestalten?
Fertigungstoleranzen führen zu Parallel- und/oder Winkel-Versatz der Tapeführungen	- Versatz ermitteln / Führungen zueinander Ausrichten - Evtl. Breite der Führungen untereinander anders gestalten ?



Eine zusätzliche Führung des Tapes zwischen Schere und Konsolidierungsrolle wurde nicht realisiert, da beide Elemente beweglich ausgeführt sind und keine fixen Montagepunkte zur Verfügung stehen. Um eventuellen Parallel- oder Winkelversatz sowie mögliches Spiel der Tape-Führungen zueinander zu ermitteln wurde ein Satz Führungs-Lehren aus Edelstahl (federhart) in den Breiten 24,8 / 25 / 25,2 mm gefertigt. Beim Ausrichten einzelner Anlagenteile zueinander mit Hilfe besagter Lehren konnten Fertigungsungenauigkeiten als Ursache für Winkelversatz an einzelnen Modulen ausgemacht und eliminiert werden. Nach Umsetzung jeder einzelnen Maßnahme wurden erneut Versuche gefahren und das Ablagebild hinsichtlich Overlaps, Gaps und Parallelität bewertet. Schrittweise konnte so das Ergebnis bei der Ablage verbessert werden (siehe *Abb. 30*). Aber auch nach Durchführung aller Maßnahmen zur Optimierung der Tape-Ablage gab es vereinzelt Overlaps, oder unzulässig große Gaps. Ursachen dafür sind zum einen das thermoplastische Tape-Material, welches zumeist keine ideale Form (in sich gekrümmt/ verdreht) und eine vergleichsweise hohe Steifigkeit aufweist (im Vergleich zu TowPreg-Material), zum anderen die fehlende Führung zwischen der Schere und der Konsolidierungsrolle (ca. 120 mm freie Strecke), welche mangels geeigneter Montagepunkte verworfen wurde.



Abb. 30: Legebild vor (li.) und nach erfolgter Optimierung (re.)

Sämtliche Vorversuche fanden mit thermoplastischen Tapes statt, da zu diesem Zeitpunkt am Standort der Anlage Versuche mit Carbon nicht möglich waren und ein Umsetzen der Anlage durch die Corona-Pandemie ebenso ausgeschlossen war. Da die verbliebenen Abweichungen vom Optimum bei der Ablage der thermoplastischen Tapes primär auf materialspezifische Eigenschaften zurückgeführt werden können, wurden vorerst keine weiteren Optimierungen mit dem thermoplastischen Material unternommen. Die erheblichen Unterschiede beider Tape-Materialien (thermoplastisches Tape oder TowPreg) bei der maschinellen Verarbeitung bergen ein hohes Risiko mit ungerechtfertigt hohem Aufwand die Anlage lediglich auf das Ausweichmaterial zu optimieren, ohne von den gemachten Vorschritten nach einem Materialwechsel zu profitieren (siehe *Abb. 31*).

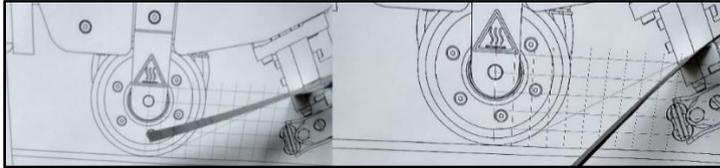


Abb. 31: Unterschiedliche Biegesteifigkeit des Versuchsmaterials (li. Thermoplasttpe/ re. TowPreg)

1.2.4. Ressourceneffiziente Faserverbund-Leichtbauweise

Spezifikation eines repräsentativen Musterbauteils

Als erstes Musterbauteil wurde seitens BMW das so genannte Vorderachs-Schubfeld des Fahrzeugs i8 (Abb. 32) ausgewählt. Es handelt sich dabei um ein Element zur Aussteifung/Verstärkung der Karosserie im Bereich des Bodens. Das Bauteil verfügt über eine Reihe von Anbindungspunkten, welche durch die Integration von metallischen Inserts zu realisieren sind. Das Vorderachsschubfeld verfügt über unterschiedliche Komplexitäten im Hinblick auf die optimale Materialnutzung im Sinne von Near-Net-Shape-Fertigung. Bedingt durch die konturierte Außengeometrie und das Vorhandensein von Durchbrüchen im Bauteil kann an diesem Bauteil eine materialeffiziente Methode zur Herstellung von multiaxialen Stacks sehr gut erprobt werden. Ziel ist es, den Stack mit möglichst geringer Materialeinsatzquote (MEQ) zu erzeugen, das bedeutet schon den Grund-/ Ausgangsstack mit geringstmöglichem Materialverlust herzustellen. Ein Beschnitt auf die Endkontur des späteren Bauteils ist dabei zielführend, da somit im Idealfall auf eine mechanische Bearbeitung nach dem Pressvorgang verzichtet werden kann. Beim Zielbauteil CFK Dach (vgl. Abb. 33) handelt es sich aufgrund der Bauteilgeometrie im Wesentlichen um einen „einfachen Rechteck“ Stack. Die Kenngrößen zur Ermittlung der Fertigungszeit Stack können mit dieser Geometrie aufgezeigt und mit bereits bewerteten etablierten Technologien verglichen werden. Die Maße des benötigten Stacks beträgt 730 x 680 mm. Aufgrund veränderter wirtschaftlicher Randbedingungen zeigt sich der Kostenrahmen für Anwendungen im Bereich von Fahrzeugstrukturbauteilen deutlich angespannter. Für derartige Anwendungen müssten die zu Projektstart prognostizierten Ziel-Leichtbaukosten nochmal unterschritten werden. Im Fokus für den Einsatz von CFK-Bauteilen stehen Leichtbaumaßnahmen welche vom Kunden explizit wahrnehmbar sind, d. h. im wesentlichen Bauteile der Fahrzeugaußenhaut (Exterieur) sowie Anwendungen im Bereich des Interieurs. Aus diesem Grund wurde ein Wechsel auf eine CFK Dachanwendung als Demonstrator Bauteil vorgeschlagen und im Projekt abgestimmt.

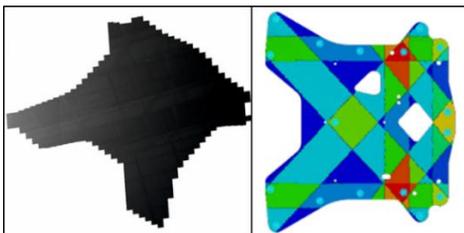


Abb. 32: Geplanter TowPreg-Stack (li.) für geplantes Musterbauteil Schubfeld (re.)

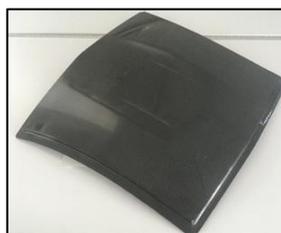


Abb. 33: CFK Dach (1:4)

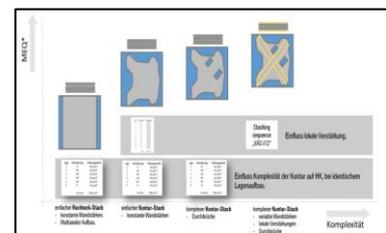


Abb. 34: Betrachtungsumfang Stackgeometrien

Technologiegerechte Konstruktion der Leichtbaustruktur

Durch die Bereitstellung der CAD-Daten des geplanten Demonstratorbauteils seitens der BMW GROUP und durch die erstellten Materialspezifikationen (TowPreg-Breite, FVG, Mechanische Kenngrößen) bezüglich des am Fraunhofer IWU entwickelten TowPreg konnte durch den Projektpartner SWMS Systemtechnik mbH die Bauteilkonstruktion angepasst und der Aufbau der erforderlichen Near-Net-Shape-Preform definiert werden. Da es sich bei diesem Bauteil um eine nicht strukturmechanisch hochbeanspruchte Komponente handelt, wurde auf eine lastpfadgerechte Auslegung des Bauteils verzichtet und eine vollständige Endlosfaserverstärkung in Form von TowPregs umgesetzt. Ein Stack mit den Maßen 730 x 680 mm besteht aus 12 Lagen, um die Zieldicke des Bauteils von 1,1 mm zu erreichen. Die Stacks weisen den folgenden Lagenaufbau auf: $0^\circ / 0^\circ / 60^\circ / 60^\circ / -60^\circ / -60^\circ / -60^\circ / -60^\circ / 60^\circ / 60^\circ / 0^\circ / 0^\circ$.

Herstellung von TowPregs und Near-Net-Shape-Halbzeugen

Für die Herstellung von klebfreien TowPregs wurde auf ein Matrixsystem der Firma Huntsman Advanced Materials (Europe) bvba zurückgegriffen. Bei diesem sogenannten Hotmeltsystem handelt es sich um ein neues Produkt, welches seit Jahresanfang 2019 auf dem Markt erhältlich ist. Für die TowPreg-Herstellung wurden die bereitgestellten trockenen Kohlenstofffasern von der Firma Mitsubishi verwendet. Im Produktionsprozess wurde der Kohlenstofffaseroving zunächst auf eine Breite von 25 mm gespreizt und anschließend mit dem Hotmeltsystem der Fa. Huntsman Advanced Materials (Europe) bvba vollständig imprägniert. So entsteht ein klebfreier TowPreg, der ohne Trennfolie auf eine Spule aufgewickelt werden kann. Die verwendete Spule (vgl. Abb. 20) kann für die Herstellung der Near-Net-Shape-Halbzeug direkt in die Legeanlage eingesetzt werden. Für die ersten Versuche wurde das Material zunächst nur auf die erste Kassette von links gespult (siehe Abb. 35).

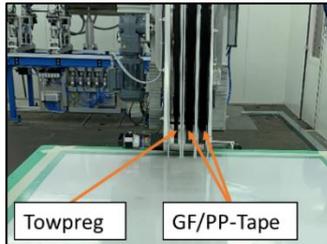


Abb. 35: MAREMO-Legeanlage im Fraunhofer IWU Technikum mit TowPreg und GF/PP-Tapes



Abb. 36: Förderwalze mit TowPreg und Förderwalze mit PTFE-Klebeband und TowPreg

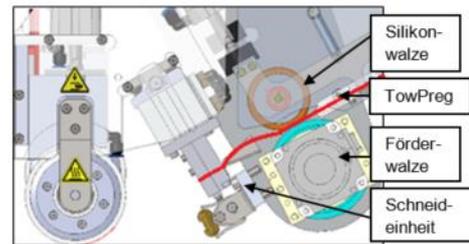


Abb. 37: Schematische Darstellung des Legekopfes in der MAREMO-Legeanlage

Als Ablageuntergrund diente eine nichtklebende Folie, welche vom Vakuumtisch angesaugt wird und somit eine faltenfreie Oberfläche gewährleistet. Für die gezielte Ablagelänge der Tapes wird zu Beginn eines Legeprogramms immer ein sogenannter Bandschnitt durch die integrierte Schneideinheit im Legekopf vorgenommen. Anschließend beginnt die Förderung des Materials. Dabei wickelte sich bei den ersten Versuchen das TowPreg um die Förderwalze. Auch das Abkleben der Stahlwalze mit Teflonklebeband brachte keine Verbesserung (vgl. Abb. 36). In Abb. 37 ist der schematische Aufbau des Legekopfes der MAREMO-Legeanlage dargestellt. Dabei wird nochmals veranschaulicht, dass das TowPreg zwischen der Silikon- und Förderwalze geführt wird. Sobald die Anlage den ersten Bandverschnitt mittels Schneideinheit praktiziert hat, drückt die Silikonwalze mit 6 bar auf die Förderwalze und klemmt das Tape ein. Da das TowPreg nicht vor der Schneideinheit gehalten wird, rollt sich das TowPreg infolge der Rotation der Förderwalze um diese. Bei den nächsten Versuchen wurde auf den ersten Bandverschnitt verzichtet. Dadurch drückte die Konsolidierungsrolle auf das TowPreg, während dieses gleichzeitig von der Förderwalze gefördert wurde. Somit konnte eine Legebahn mit dem TowPreg-Material abgelegt werden, diese hatte aber nicht die gewünschte Länge. Sobald erneut geschnitten wurde, kommt es zum gleichen Resultat wie zuvor. Das TowPreg wickelte sich erneut um die Förderwalze. Ein weiterer Nachteil des Huntsman TowPreg zeigte sich in seinem biegeschlaffen Materialverhalten. Hierdurch findet keine definierte Führung zwischen Schneidmodul und Andrückrolle statt, wodurch der TowPreg-Anfang nicht den Koordinaten des definierten Startpunktes des Legeprogramms entspricht. Um erfolgreiche Legeversuche mit TowPreg-Material auf der Near-Net-Shape-Legeanlage realisieren zu können, wurde nach einem alternativen Matrixsystem gesucht. Dieses sollte ein steifes Materialverhalten bei Raumtemperatur aufweisen, um ein definiertes fördern zwischen Schneidmodul und Andrückrolle zu gewährleisten. Dazu kam ein Hotmeltsystem (KD 2017-3-3) der Firma **CTP Advanced Materials GmbH** zum Einsatz. Bei Raumtemperatur ist eine der beiden Komponenten des Matrixsystems fest, so dass das Mischen des Matrixsystems sowie auch die Imprägnierung unter Temperaturzuführung stattfinden muss, damit die Matrix fließfähig wird. Durch den Abkühlvorgang nach der Imprägnierung sind die neuen TowPregs absolut klebfrei und weisen eine ähnliche Steifigkeit wie thermoplastische Tapes auf. Bei der Herstellung der TowPregs auf der Produktionslinie des Fraunhofer IWU konnte der CF-Roving nur einseitig imprägniert werden. Bei den folgenden Legeversuchen mit diesen TowPregs zeigte sich, dass die vielen trockenen Kohlenstofffasern auf der nicht mit Harz imprägnierten Seite an diversen Komponenten der Legelange

hängen bleiben und ein Fördern des TowPregs häufig verhindern. Das größte Problem ist dabei, das Fördern in das Schneidmodul. Hier kommt es zu einem Materialstau durch die vielen trockenen Kohlenstofffasern. Dieses Problem ist unabhängig davon, ob die imprägnierte Seite des TowPregs nach oben oder nach unten zeigt. Um diesem Problem entgegen zu wirken, sollten die TowPregs erneut durch die TowPreg-Anlage geführt und die trockene Seite zusätzlich Imprägniert werden. Dabei traten folgende Probleme auf:

- Abwickeln der TowPregs nur teilweise möglich, da sich die einzelnen Lagen durch die trockenen Kohlenstofffasern miteinander verbunden haben (vgl. *Abb. 38*, links, mittig).
- Zielbreite von 25 mm kann durch das erneute Einbringen von Wärme und gleichzeitiger Faserspannung nicht gewährleistet werden (vgl. *Abb. 38*, links, rechts).
- Es treten vereinzelt immer noch trockene Bereiche auf, wodurch der Faservolumengehalt stark schwankt.



Abb. 38: Ergebnisse der zweiten Imprägnierung der TowPregs mit CTP Hotmeltsystem

Für die **Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften** wurden Zug-, Druck- sowie Biegeeigenschaften ermittelt. Zur Herstellung von Prüfplatten erfolgte zunächst eine Parameterstudie bezüglich effizienter Pressparameter in Abhängigkeit zur Plattenqualität. Um die Imprägnier- und Plattenqualität zu prüfen, wurden aus den gepressten Platten Schliffproben zur optischen Charakterisierung mittels Mikroskop gefertigt. Mithilfe dieser Vorstudie am Fraunhofer IWU konnten erste Fertigungsparameter definiert und an den Projektpartner Wethje Carbon Composites GmbH als Referenzwerte übermittelt. Die nächsten Schritte befassen sich mit der Fertigung von Platten mehrlagiger CFK-Stacks bei Wethje Carbon Composites GmbH, damit eine vollständige Materialcharakterisierung durchgeführt und die industriellen Fertigungsparameter definiert werden können. Nach dem mit dem Hotmeltsystem von der Firma Huntsman Advanced Materials (Europe) bvba (Neuentwicklung) TowPregs erfolgreich hergestellt werden konnten, ist für die anschließende mechanische Materialcharakterisierung die Fertigung von Prüfplatten erforderlich. Dazu wurden die TowPregs zu einem Stack mit den Abmessungen von 300 mm x 300 mm und abhängig von der Prüfung mit einer Dicke von 1 mm (Zugprüfung DIN EN ISO 527-5) oder einer Dicke von 2 mm (3-Punkt-Biegeversuch DIN EN ISO 14125, ILSS DIN EN ISO 14130) aufgebaut und im Plattenwerkzeug (300 mm x 300 mm) bei dem Projektpartner Wethje Carbon Composites GmbH verpresst. Basierend auf den generierten Prozessparametern, welche mittels Vorversuchen am Fraunhofer IWU ermittelt wurden, folgte die Einstellung folgender Spezifikationen an der Anlage mit folgenden Pressparametern: Temperatur = 155°C, Druck = 55 bar - 180 bar, Zeit = 2 - 3 min. Aufgrund der hohen Pressdrücke von 55 - 180 bar im Vergleich zu den Vorversuchen 10 - 20 bar konnte die Luft aus dem Stack nahezu vollständig entweichen, so dass kaum Lufteinschlüsse bei der Betrachtung der Schliffbilder identifiziert werden konnten. Weiterhin zeigt, dass die einzelnen Faserlagen homogen zu einer Platte verpresst werden konnte, wobei es vorwiegend in den Randbereichen der Platte zu offensichtlichen Faserverschiebungen kommt. Nach dem Wechsel auf das Hotmeltsystem der Fa. CTP Advances Materials GmbH wurden zusätzliche Prüfplatten aus diesem Material hergestellt und untersucht.

Tabelle 4: Vergleich der mechanischen Eigenschaften

		Recycling Vlies	TowPreg - Huntsman	TowPreg - CTP
Zugfestigkeit	0°	68 MPa	1.750 MPa	1.361 MPa
	90°	46 MPa	20 MPa	38 MPa
Druckfestigkeit	0°	51 MPa	947 MPa	718 MPa
	90°	36 MPa	165 MPa	132 MPa

Biegefestigkeit		1.495 MPa	1.200 MPa
------------------------	--	-----------	-----------

Anhand von mikroskopischen Aufnahmen wurde zudem die Imprägnierqualität ermittelt. Dabei zeigte sich für beide Matrixsysteme, dass überwiegend gut imprägnierte Bereiche vorhanden sind, vereinzelt jedoch trockene Stellen innerhalb der Probe erkennbar sind.

Presstechnische Fertigung von Musterbauteils und Qualitätsprüfung

Aufgrund der oben dargestellten Probleme bei der Produktion und der Verarbeitung der entwickelten TowPreg-Materialien auf der Near-Net-Shape- Legeanlage konnten vom Fraunhofer IWU keine Stacks produziert werden. In Folge dessen standen für die Projektpartner BMW GROUP sowie Wethje Carbon Composites GmbH keine Stacks zur Verfügung, um diese mittels presstechnischer Fertigung zu Musterbauteilen zu verarbeiten. Von den Projektpartnern wird angestrebt in weiteren Versuchen TowPregs zu produzieren, die den Anforderungen entsprechen, um mit der Near-Net-Shape-Legetechnologie am Fraunhofer IWU verarbeitet zu werden. Wenn möglich können bei erfolgreicher Stackherstellung Versuche zur presstechnischen Fertigung bei der BMW GROUP bzw. bei Wethje Carbon Composites GmbH auf eigene Kosten durchgeführt werden.

Erstellung eines praxistauglichen Konstruktionsleitfadens

Für die Erstellung von Konstruktionsrichtlinien galt es zunächst das verwendete Material zu spezifizieren und charakterisieren. Für die Endlosfaserverstärkung wurden die TowPregs bestehend aus den bereitgestellten trockenen Kohlenstofffasern von der Firma Mitsubishi Chemical Carbon Fibre and Composites (MCCFC) Typ TRW40 mit den epoxidharzbasierten Hotmeltsystemen von Huntsman Advanced Materials (Europe) bvba und CTP Advanced Materials GmbH ausgewählt. Für die Vliesverstärkung sollten Recyclingvliese aus Carbonfasern Verwendung finden, welche vom Sächsischen Textilforschungsinstitut e.V. (stfi) bezogen wurden. Die Ergebnisse der Materialcharakterisierung finden sich in *Tabelle 4* wieder. Die für das Bauteil notwendigen Randbedingungen, wie beispielsweise Krafteinleitung, Bauteilabmessungen, -dicke, FVG, etc. sowie die Anlagenanforderungen stammten von dem Demonstratorgeber und dem Bauteilhersteller und wurden als Datengrundlage allen Partnern bereitgestellt. Daraus wurde der Lagenaufbau und die Gestalt der Near-Net-Shape-Preform abgeleitet. Für die Definition der Prozessparameter und -grenzen dienten die Ergebnisse der Pressversuche zur Materialcharakterisierung als Grundlage für die Bauteilherstellung. Im Rahmen dieser Versuche wurden je nach eingesetztem Harzsystem individuelle Pressparameter erarbeitet und optimiert, so dass effiziente Verarbeitungsprogramme für die Herstellung von großserientauglichen Bauteilen entstanden sind. Diese Fertigungsparameter sollten direkt in die Bauteilfertigung überführt und evaluiert werden.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 5: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Projektpartner	Summe in €	Begründung
Wethje Carbon Composites GmbH	41.361	Personalkosten
BMW GROUP	377.934	Personalkosten
	5.600	Fremdleistung
TISORA Sondermaschinen GmbH	370.722	Personalkosten
	17.500	FE-Fremdleistung
	190.000	Materialkosten
	1.690	Reisekosten
AT – Automation Technology GmbH	354.849	Personalkosten
	16.654	Materialkosten

SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft mbH	299.567	Personalkosten
	1.540	Reisekosten
	24.320	Lizenzkosten
AFPT GmbH	369.955	Personalkosten
	18.089	Materialkosten
	47.071	Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten
Cetex Institut gGmbH	292.402	Personalkosten
	69.180	Gegenstände und sonstige Kosten
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik	504.016	Personalkosten
	9.288	Verstärkungsfaser, Basismaterial
	26.111	Imprägnierwerkzeug für TowPregs (0847)
	22.488	Heizsystem (0847)
	3.695	Schulungskosten (0850)
	6.883	Reisekosten

3. Voraussichtlicher Nutzen

Für die BMW GROUP als Anwender ist eine Kosteneinsparung von 25% realisierbar, welche sich hauptsächlich aus der Materialeinsparung sowie kürzeren Prozesszeiten ergibt. Hieraus ergibt sich zudem ein Potential zur CO₂-Einsparung. Die anderen Projektpartner wie AT - Automated Technology GmbH, TISORA Sondermaschinen GmbH, SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft mbH sowie AFPT GmbH können mit den einzelnen Komponenten der Legeanlage ihr Produktportfolio gegenüber den Kunden erweitern und sich ein Alleinstellungsmerkmal auf dem Markt sichern. Für die Forschungseinrichtungen Cetex Institut gGmbH und Fraunhofer IWU dienen als Projektergebnis vor allem das gewonnene Knowhow sowie die aufgebauten Kompetenzen im Bereich der TowPreg-Herstellung sowie deren Verarbeitung. Dadurch kann an zukünftigen Förderprogrammen teilgenommen werden und zudem als attraktiver Forschungspartner für Industriekunden agieren.

4. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nach wie vor sind TowPregs mit Kohlenstoffasern von 12K bis 50K und Epoxidharzen von Materialherstellern mit Trennpapier erhältlich, wobei sich diese für Wickeln, Pultrudieren und Tapelegen eignen. Eine Lagerung bei Raumtemperatur über 2 Wochen hinaus ist bei diesen Systemen äußerst kritisch und laut Herstellerangaben nicht zu empfehlen. Das Ablegen dieser vorimprägnierten Halbzeuge mittels Fertigungsverfahren wie dem „Automated Tape Laying (ATL)“ oder „Automated Fiber Placement (AFP)“ ist im Bereich der Luftfahrtanwendungen gang und gäbe. Für das automobilgerechte Tape-Legeverfahren sind derzeit thermoplastisches Tapematerial im Fokus. Eine Verarbeitung von klebfreien TowPregs im Legeprozess zur Serienfertigung von Near-Net-Shape-Preforms sind bislang nicht bekannt. Die Firma Compositence verfügt über eine Tape-Legetechnik primär für thermoplastische Anwendungen, ist aktuell aber gewillt einen Legekopf für TowPregs zu entwickeln. Demnach sind seit der Beantragung kein weiterer Fortschritt an anderer Stelle bekannt.

5. Veröffentlichungen des Ergebnisses

Es wurden Veröffentlichungen mit den relevanten Ergebnissen aus dem MAREMO-Projekt bei der LightCon 2021, IMTC 2021 und Textile Conference 2021 eingereicht. Auf der Textile Conference 2021 wird das Thema als Posterbeitrag vorgestellt.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Materialeffizienter Leichtbau für eine Ressourceneffiziente Mobilität – MAREMO –	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Hagedorn, Maren (Fraunhofer IWU) Laue, Anne (Fraunhofer IWU) Maidl, Franz (BMW Group) Tiemann, Lucas (SWMS) Dr.-Ing. Kölzer, Patrick (AFPT) Krassnitzer, Wolfgang (Wethje) Rein, Steffen (TISORA) Dr.-Ing. Kasper, André, (AT) Nendel, Sebastian (Cetex) Astrid Kirchberg (Cetex)	5. Abschlussdatum des Vorhabens 12/2020
	6. Veröffentlichungsdatum 07/2021
	7. Form der Publikation Öffentlicher Schlussbericht für die TIB
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) BMW GROUP , Ohmstraße 2, 84030 Landshut TISORA Sondermaschinen GmbH , Nordstraße 46, 09113 Chemnitz AT – Automation Technology GmbH , Hermann-Bössow-Straße 6, 23843 Bad Oldesloe SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft mbH , Donnerschweer Straße 4a, 26123 Oldenburg AFPT GmbH , Trinkbornstraße 10, 56281 Dörth Cetex Institut gGmbH , Altchemnitzer Str. 11, 09120 Chemnitz Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU , Reichenhainer Straße 88 , 09126 Chemnitz	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 033R177
	11. Seitenzahl 26
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 38
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Textile Conference 2021, digitale Veranstaltung, 09.-10.11.2021	

18. Kurzfassung

Die Herstellung von Kohlenstofffasern ist erdöl-, kosten- und energieintensiv. Um dennoch über das gesamte Produktleben deutliche Vorteile hinsichtlich des Energie- und Ressourcenverbrauchs zu realisieren, waren folgende konstruktive und technologische Maßnahmen im Rahmen von MAREMO seriennah umzusetzen:

1. Konzeption und ressourcenfreundliche Herstellung von Recyclingfaser-Prepregs und Recyclingfaser-Pressmassen als Basismaterial für Leichtbau-Schalenstrukturen
2. Entwicklung von Produktionsverfahren für das Positionieren und Fixieren von materialeffizienten und belastungsgerechten Kohlenstofffaserverstärkungen (TowPreg) auf dem Basismaterial; dadurch Bereitstellung von materialeffizienten vorimprägnierten Near-Net-Shape-Verbundhalbzeugen.
3. Realisierung einer repräsentativen hochbelasteten Automobilstruktur in neuartiger Faserverbund-Leichtbauweise auf Basis der neuartigen Near-Net-Shape-Verbundhalbzeuge; dadurch Einsparung von teuren und energieintensiven Kohlenstofffasern.

Durch das Vorgehen kann zum einen die benötigte Menge an Kohlenstofffasern je Verbundbauteil deutlich reduziert werden, womit sich signifikante Energie- und Kosteneinsparungen in der Herstellung ergeben. Ein bedeutender Teil der Struktur (z. B. Karosserie) besteht dann aus ressourcen-neutralem Recycling-Material. So können lastpfadgerechte Kombinationen von wenigen beanspruchungsgerecht platzierten Endlosfaserverstärkungen mit preiswerten Pressmassen aus geschnittenen Recycling-Fasern (z.B. Sheet-Moulding-Compound) für Nebenformelemente wie z. B. Rippen und Verschraubungspunkte genutzt werden. Das eröffnet ganz neue Potentiale für den ressourceneffizienten Leichtbau in der Großserie. Die in MAREMO weiterentwickelten Fertigungstechnologien gestatten eine sprunghafte Steigerung von Produktivität und Kosteneffizienz und somit ein hohes Innovationspotential für den Einsatz von ressourceneffizienten Near-Net-Shape-Materialien im Großserien-Automobilbau. Die geplanten Maßnahmen ergeben signifikante Energieeinsparungen sowohl für den Herstellungsprozess als auch für die Betriebsphase von Kraftfahrzeugen.

Ein wesentlicher Schwerpunkt des Forschungsvorhabens war die Herstellung und Verarbeitung von klebfreien TowPregs (ohne Trennpapier) auf einer im Projekt entwickelten vollautomatisierten Legeanlage zu Near-Net-Shape-Halbzeugen. Mithilfe eines ausgewählten Harzsystems und einer erprobten Imprägnierstrategie zeigten die gefertigten TowPregs bezüglich ihrer Haptik ähnliche Produkteigenschaften wie thermoplastische Faserhalbzeuge. Die klebfreien TowPregs weisen bei Raumtemperatur ein steifes Materialverhalten auf. Allerdings ist die Imprägnierung der gespreizten Kohlenstoffaseroberflächen noch zu optimieren. So können die entwickelten TowPregs aufgrund der aktuell einseitigen Imprägnierung nicht mit der entwickelten Near-Net-Shape-Legeanlage verarbeitet werden, da die trockenen Kohlenstofffasern an bestimmten Stellen zu einem Materialstau führen. Durch eine sachgerechte Verwendung der im Projekt weiterentwickelten offline Programmierumgebung CAESA® Composites TapeStation ist es möglich, effiziente Laminatfertigungsoperationen zu programmieren. Durch integrierte Analysetools kann direkt eingesehen werden, wie hoch die Materialeinsatzquote – also der Verschnitt – ist und so eine optimale Belegung mit minimalem Verschnitt erstellt werden. Ebenfalls kann die Prozessoptimierung die Legezeit betreffen und die Belegung anhand dessen angepasst werden. Weiterhin lässt sich die Produktionsdauer auch durch die sog. Prozessparameter, wie z.B. die Vorschübe, optimieren. Diese Parameter ermöglichen eine zielgerichtete Laminatoptimierung, sei es der Verschnitt oder die Produktionszeit, die letztendlich maßgebend sind. Mit der Near-Net-Shape-Legetechnologie sind Herstellungskosten < 20 €/kg möglich. Der maßgebliche Faktor bei der TowPreg-Herstellung liegt in den Materialkosten. Hier gibt es aktuelle Entwicklungen zur kosteneffizienteren Herstellung von Kohlenstofffasern, welche Kosten von < 12 € ermöglichen. Bei der Herstellung des Stacks sind die wichtigsten Faktoren, neben der Legegeschwindigkeit und der Anzahl der TowPregs, die Auslastung der Legefläche. Die Kombination dieser Faktoren führt zu hohen Ablageraten (kg/h) und somit zu einer kosteneffizienten Herstellung von endkonturnahen Faser-Stacks.

19. Schlagwörter

Duroplastische TowPregs, klebfreie TowPregs, Near-Net-Shape Legeanlage, Cost Engineering, automatisierter Legeprozess, inline Prozessüberwachung, Materialeffizienz

20. Verlag

21. Preis