

»3D-ThermoLay« – Laserunterstütztes thermoplastisches Prepreglegen zur Fertigung von komplexen Faserverbundstrukturbauteilen Abschlussbericht zum InnoNet-Projekt »IN-6518«

Laufzeit des Projekts:
01. Januar 2008 – 31. Mai 2011

Projektleiter:
Dipl.-Ing. Markus Dubratz

**Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnologie IPT**

Steinbachstraße 17
52074 Aachen
Telefon: +49 (0) 2 41 / 89 04 - 2 69
Fax: +49 (0) 2 41 / 89 04 - 62 69

Erstellt durch : Dipl.-Ing. Markus Dubratz

Aachen, 02. September 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Informationen	2
1.1	Zielsetzung und Projektbeschreibung	2
1.2	Projekt-Konsortium	4
2	Arbeits- und Zeitplanung	3
	Tabelle 2.1: Arbeitsplanung	5
3	Projektergebnisse	6
3.1	AP 1 Projektmanagement	6
3.2	AP 2 Entwicklung Tapelegekopf	6
3.3	AP 3 Entwicklung der Prozesstechnik Tapelegen	20
3.4	AP4 Anwendungserprobung und Bewertung	30
3.5	AP 5 Prozess- und Bauteilanalyse	33
4	Zusammenfassung der durchgeführten Projektarbeiten	39
5	Öffentlichkeitsarbeit	41
5.1	Veröffentlichungen	41
5.2	Messeauftritte	41
6	Verwertung der Projektergebnisse	42

1 Allgemeine Informationen

1.1 Zielsetzung und Projektbeschreibung

Das InnoNet-Verbundvorhaben IN-6518 »Laserunterstütztes thermoplastisches Prepreglegen zur Fertigung von komplexen Faserverbundstrukturbauteilen« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit gefördert.

Ziel des Verbundprojekts war die Entwicklung eines industrietauglichen ganzheitlichen Systems für die Herstellung von Faserverbund-Strukturbauteilen, welches erstmals die unterschiedlichen Anforderungen für die verschiedenen Anwendungsbereiche von Industrie und Technik erfüllt. Die FVK-Komponenten entstehen dabei durch einen mehrschichtigen Laminataufbau der thermoplastischen Prepregs auf einer Ablegeform. Zu diesem Aufbau des Strukturbauteils werden zunächst die Tapebänder in mehreren Ablegeschritten zu einer kompletten Laminatschicht abgelegt, bevor eine neue Schicht aufgetragen werden kann. Damit sich die Matrix des abzulegenden mit der des bereits abgelegten Tapes miteinander verbinden kann, werden die Oberflächen der Prepregs mit einem Laser zunächst aufgeschmolzen und anschließend mit einer flexiblen Andruckrolle zusammengepresst. Dieser Vorgang läuft in einer kontinuierlichen Bewegung ab, sodass eine wirtschaftliche Bauteilherstellung erreicht werden kann. Ein Teilziel in diesem Projekt ist es, eine Ablegegeschwindigkeit von ca. 0,5 m/s im Tapelegeprozess zu erreichen. Das abzulegende Prepreg läuft im Prozess von einer Tapebevorrattungsspule durch den Tapelegekopf, bevor es auf der Bauteilform abgelegt wird.

Der Tapelegekopf trägt dabei alle benötigten sensorischen und aktorischen Komponenten, um die Tapes definiert abzulegen und ein Bauteil herstellen zu können. Dazu gehört neben der Bevorrattungseinheit der Materialspulen sowie den Spulen selber ein Lasersystem mit Laserquelle, Lichtleitfaser und Optiken. Die erzeugte Laserstrahlung wird in die Laseroptik eingekoppelt, über den Flächenquerschnitt in ihrer Leistung homogenisiert und zu einem in Grenzen variabel einstellbaren Rechteckspot geformt. Die Tapebänder absorbieren die Laserstrahlung, sodass die Tapeoberflächen in Abhängigkeit der Laserleistung aufschmelzen. Um möglichst homogene Materialeigenschaften des Bauteils zu erreichen, müssen die Oberflächen von abgelegtem und abzulegendem Tape mit nahezu gleicher Temperatur aufeinander gepresst werden. Dazu wird auf dem Tapelegekopf eine Infrarotkamera befestigt, die im Projekt »3D-ThermoLay« entwickelt wird. Es ist das Ziel, mit dieser Kamera die Temperaturverteilung der Tapeoberflächen zu detektieren und anhand dieser Verteilung die Laserausrichtung in der Form zu verändern, sodass sich eine Gleichverteilung der Tapetemperatur einstellt. Um an kritischen Bauteilgeometrien, wie z.B. Krümmungen oder engen Radien, ein Ablegen der Tapes zu ermöglichen, wird an dem Tapelegekopf eine zu entwickelnde anpassbare Laseroptik angebracht. Mit dieser Optik soll eine homogene Intensitätsverteilung der Laserstrahlung erreicht werden, wodurch ein gleichmäßiges Aufheizen der Prozesszone realisiert wird. Zusätzlich soll sich die Höhe und die Breite des Laserbrennflecks einstellen lassen. Dadurch wird das Einbringen der Laserenergie auf einen

definierten Prozessbereich beschränkt und eine ungewollte Erwärmung von benachbarten Tapelegekopf-Komponenten verhindert. Somit lassen sich die zugeführten Prepregbänder und die unterliegende Laminatschicht erwärmen und mit einer flexiblen Andruckrolle zusammenpressen. Der Werkstoff, aus dem diese Rolle besteht, muss dabei geometrisch flexibel sein, damit auch bei Änderung der Bauteilgeometrie, wie z.B. auf gekrümmten Flächen, das Tape gleichmäßig über die gesamte Kontaktfläche angepresst werden kann. Nach der Ablage eines Tapestreifens ist an dem Tapelegekopf eine Schneideinheit vorzusehen, die ein automatisches Abtrennen ermöglicht. Um das Tape von der Bevorrattungsspule definiert der Ablageform zuzuführen, sind Zentrierleisten, Spannelemente, Motoren sowie eine Bremse vorzusehen, damit das Prepreg immer im gleichen Spannungszustand abgelegt werden kann. Für das Ablegen der ersten Schicht ist dabei ein Haftmittel zu entwickeln, welches zunächst die Tapes auf der Werkzeugoberfläche haften lässt und vor Verrutschen schützt. Durch einen wärmebedingten Umwandlungsprozess soll dieses Haftmittel seine Eigenschaften verändern und als Trennmittel wirken, wodurch das Bauteil dann leicht von der Form abzulösen ist.

Um die am Tapelegekopf befestigten Komponenten einstellen und regeln zu können, ist eine eigene Steuerung des Tapelegekopfes vorzusehen. Damit lassen sich alle notwendigen Parameter – auch während des Prozesses – einstellen und verändern. Dies ist insbesondere auch im Hinblick auf die angestrebte Bauteilqualität erforderlich, da die oben beschriebenen Komponenten die Eigenschaft haben, auf die prozesstechnologisch wichtigen Prozessparameter wie z.B. Temperatur, Temperaturverteilung oder Andruckkraft, Einfluss zu nehmen. Damit eine Rückkopplung auf die Bewegungen des Portalrobotersystems und damit die Prozessgeschwindigkeit eingestellt werden kann, wird eine Verbindung zwischen Tapelegekopf- und Portalrobotersteuerung hergestellt. Dadurch wird eine Optimierung des gesamten Prozesses, insbesondere im Hinblick auf die Bauteilqualität erreicht, die für eine industrietaugliche Anwendung notwendig ist.

Das für den Aufbau und die Erstellung des Fertigungsprozesses benötigte Knickarmrobotersystem ist am Fraunhofer IPT vorhanden. Die sich durch die unabhängige Bewegung von 6 Achsen ergebenden Freiheitsgrade sind für die Fertigung von komplexen Bauteilgeometrien – wie sie in Industrie und Wirtschaft benötigt werden – notwendig, sodass der Tapelegekopf während des Herstellungsprozesses in jedem Punkt der Ablagebahnen orthogonal zur Oberfläche steht. Um dies zu realisieren, ist der Aufbau eines Werkzeugsystems erforderlich, mit der die Faserverbundkomponenten gefertigt werden können. Für die gleichmäßige Ablage der Bänder, müssen die Bewegungsachsen in der Lage sein, mit der übergeordneten Steuerung zu kommunizieren und synchron zu verfahren. Dies wird durch eine Erweiterung der Schaltkomponenten des Portalrobotersystems erreicht, über die die hinzukommenden Achsen nach den gewünschten Vorgaben ansteuern können.

Für industrietaugliche Applikationen und für eine hohe Transferfähigkeit der Prozesstechnik ist es unumgänglich, CAD-Daten des gewünschten Bauteils direkt in den durch das Vorhaben zu generierenden Prozess einbinden zu können. Zu diesem Zweck soll eine CAD/CAM-Steuerung aufgebaut werden, die aus den CAD-Daten Steuerungsparameter errechnet und somit die abzufahrenden Bahnen für den Tapelegekopf bestimmt. Mit dieser Technologie

können am PC erstellte Bauteile direkt mit dem zu entwickelnden Fertigungsprozess hergestellt werden.

1.2 Projekt-Konsortium

Das Konsortium bündelt die für das Projekt relevanten Kernkompetenzen und ergänzt sich in notwendiger Weise, um die innovative Produktentwicklung der »3D-ThermoLay«-Faserverbundtechnik erfolgreich durchzuführen. Nachfolgend sind die Verbundpartner aufgeführt, die sich zur Durchführung des InnoNet-Projekts »3D-ThermoLay« zusammengeschlossen haben:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Projektverantwortlicher und Projektkoordination:

Dipl.-Ing. Markus Dubratz

Steinbachstraße 17

52074 Aachen

Tel. +49 (0)241 / 8904-269

Telefax: +49 (0)241 / 8904-6269

markus.dubratz@ipt.fraunhofer.de

www.ipt.fraunhofer.de

Institut für Kunststoffverarbeitung IKV

Projektverantwortlicher

Dipl.-Ing. Roman Schöldgen

Pontstraße 49

D-52062 Aachen

Tel.: +49 (0)241 / 80-23 823

Fax: +49 (0)241 / 80-22316

schoeldgen@ikv.rwth-aachen.de

www.ikv-aachen.de

AFPT B.V.

Projektverantwortlicher

Herr Coert Kok

Van der Duinstraat 24

5161 BP Sprang-Capelle

Niederlande

Tel.: +31 416 544 021

Fax: +31 416 544 054

afpt@planet.nl

CENIT AG Systemhaus

Projektverantwortlicher

Herr Nikolai D'Agostino

Großer Kolonnenweg 21

D-30163 Hannover

Tel.: +49 (0)511 / 54275 66

Fax: +49 (0)511 / 54275 88

n.dagostino@cenit.de

www.cenit.de

DIAS Infrared GmbH

Projektverantwortlicher
Dr. Frank Nagel
Gostritzer Straße 63
D-01217 Dresden
Tel.: +49 (0)351 / 871 7229
Fax: +49 (0)351 / 871 7230
f.nagel@dias-infrared.de
www.dias-infrared.de

Eurocopter Deutschland GmbH

Projektverantwortliche
Patricia P. Parlevliet
D-81663 München
Tel.: +49 89 / 60 72 91 14
patricia.parlevliet@eurocopter.com
www.eurocopter.com

AFPT GmbH (vormals KOELRIT GmbH)

Projektverantwortlicher
Dr.-Ing. Patrick Kölzer
Trinkbornstraße 15-17
D-56281 Dörth
Tel.: +49 6747 / 950 1851
Fax: +49 6747 / 950 1859
koelzer@afpt.de
www.afpt.de

INGENERIC GmbH

Projektverantwortlicher
Dr. Volker Sinhoff
Dennewartstraße 25-27
D-52068 Aachen
Tel.: +49 241 / 963 13 43
Fax: +49 241 / 963 13 49
sinhoff@ingeneric.com
www.ingeneric.com

Robert Timm GmbH

Projektverantwortlicher
Herr Wilfried Müller
Hammer Deich 142-146
D-20537 Hamburg
Tel.: +49 40 / 21 13 44
Fax: +49 40 / 210 27 34
w.mueller@robert-timm.de
www.robert-timm.de

2 Arbeits- und Zeitplanung

In der folgenden Tabelle 2.1 ist die Arbeits- und Zeitplanung des Gesamtprojekts mit der Kennzeichnung der Meilensteine dargestellt. In Kapitel 3 werden anschließend die innerhalb des Berichtszeitraums erzielten Ergebnisse strukturiert nach Arbeitspaketen erläutert und beschrieben.

AP	Arbeitspakete	2008	2009	2010	2011	Projekt-partner
1	Projektmanagement	K				IPT
2	Entwicklung Tapelegekopf					
2.1	Anforderungen, Entwicklung und Aufbau Tapelegekopf					IPT, AFPT B.V., Eurocopter, Ingeneric KOELRIT, Dias Infrared
	Spezifikation der Anforderungen an den Tapelegekopf					
	Konzeption Tapelegekopf					
	Bewertung und Auswahl Konzept					
	Konstruktion / Detaillierung Konzept					
	Erstellen Fertigungszeichnungen / Stückliste					
	Fertigen der Komponenten und Bestellen der Zukaufteile					
	Aufbau Tapelegekopf					
Funktionstest und Einrichtung						
2.2	Flexible Andruckrolle					IPT, AFPT B.V.
	Konzeption Andruckrolle					
	Bewertung und Auswahl Konzept					
	Konstruktion / Detaillierung Konzepte					
	Aufbau flexible Andruckrolle					
2.3	Anpassbare Laseroptik					Ingeneric, IPT
	Ermitteln erforderlicher Laserspots					
	Konzeption Linsenformen					
	Fertigung freiformflächiger Linsen					
2.4	Entwicklung der Steuerung / Regelung					AFPT B.V., IPT, KOELRIT
	Planung des Regelsystems					
	Schnittstellenprogrammierung					
	Konzeption der Regelalgorithmen					
	Programmieren der Regelalgorithmen					
Validierung und Optimierung des Regelsystems						

AP	Arbeitspakete	2008	2009	2010	2011	Projekt-partner	
3	Entwicklung der Prozesstechnik Tapelegen	■	■	■	■	■	
	Ermittlung Anforderungen	■	■				
3.1	Auswahl Demonstrationsbauteil	■					
	Ableiten der Prozessanforderungen	■					
	Ableiten Anlagenanforderungen	■	■				
	Ableitung des Pflichtenhefts	■	■				
3.2	Erstlagenfixierung	■	■	■			Robert Timm GmbH, IPT
	Methoden zur Erstlagenfixierung	■	■				
	Recherche nach Additiven	■	■				
	Testen bestehender Substanzen		■	■			
	Entwicklungsbegleitende Tests		■	■			
3.3	Entwicklung / Aufbau der Kinematik	■	■	■	■		KOELRIT GmbH, IPT
	Konzeption der Kinematik	■	■				
	Bewertung und Auswahl der Konzepte		■	■			
	Konstruktion / Detaillierung der Konzepte		■	■			
	Erstellen der Fertigungszeichnungen und Stücklisten		■	■			
	Aufbau der Kinematik		■	■			
3.4	CAD / CAM-Kopplung	■	■	■	■	■	Cenit, IPT
	Analyse des Prepreglegeprozesses	■	■				
	Bestimmen der Prozessparameter		■	■			
	Konzeption der Steuerungsstrategie		■	■			
	Programmierung des CAM-Systems			■	■		
	Programmierung des Postprozessors			■	■		
	Validieren / Optimieren des CAD / CAM-Systems			■	■	■	

AP	Arbeitspakete	2008	2009	2010	2011	Projekt partner
4	Anwendungserprobung und Bewertung					
4.1	Bauteilfertigung					IPT, IKV, Eurocop ter
	Fertigung des ausgewählten Demonstrationsbauteils					
	Bauteilprüfung und Bewertung der Ergebnisse					
	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung					
5	Prozess- und Bauteilanalyse					
5.1	Auswahl eines Demonstrators und Erstellung eines Anforderungskatalogs					IKV, IPT, Euro- copter
5.2	Prozessgrundlagenforschung					IKV, IPT, AFPT B.V.
	Aufstellen des Versuchsplans und Herstellung der Probeplatten					
	Untersuchung der Probeplatten					
5.3	Prozessanalyse mit Hilfe des neu realisierten Tapelegekopfes					IKV, IPT AFPT B.V., Euro- copter
	Übertragung des erlangten Prozessverständnisses auf die neue Anlagentechnik					
	Variation weiterer Prozessparameter & Test der neuen Komponenten					
5.4	Analyse des Demonstrators					IKV, AFPT B.V.
	Übertragung des erlangten Prozessverständnisses auf die komplexe Bauteilgeometrie					
	Analyse der Bauteilqualität					

Tabelle 2.1: Arbeitsplanung

3 Projektergebnisse

3.1 AP 1 Projektmanagement

Das Fraunhofer IPT hat mit ansprechenden Messeauftritten auf den JEC shows 2009-2011 in Paris die Projektziele und -teilergebnisse einem breiten Fachpublikum und potenziellem Anwenderspektrum vorstellen können. Durch den direkten Kontakt zu internationalen Experten sowie durch die fachliche Diskussion konnte für die Technologie, das Projekt und das Projektkonsortium geworben werden. Im Vorfeld zu den Messeauftritten hat das Fraunhofer IPT über Presseflyer interessierte potenzielle Anwender der »3D-ThermoLay«-Technologie über das Forschungsprojekt in Form von Flyern und Informationsbroschüren persönlich informiert.

Neben dem Kick-Off Meeting im Februar 2008 sind jeweils im April 2009 und 2010 am Fraunhofer IPT Projekt-Statustreffen durchgeführt worden, bei dem sich alle am Projekt beteiligten Partner über die durchgeführten Arbeiten und den Stand des Projektfortschritts informiert und weitere Schritte untereinander vereinbart haben. Im Juni 2011 ist das Projektabschlusstreffen am Fraunhofer IPT durchgeführt worden, bei dem den Projektpartnern der Tapelegeprozess mit dem neu entwickelten Tapelegekopf an 3D-Bauteilen demonstriert werden konnte.

3.2 AP 2 Entwicklung Tapelegekopf

Anforderungen, Entwicklung und Aufbau Tapelegekopf

Bevor mit der Entwicklung des Tapelegekopfes begonnen werden konnte, sind in Absprache mit allen am Arbeitspaket beteiligten Projektpartnern die notwendigen Anforderungen für die sichere Funktionsweise und den mechanischen Aufbau des Kopfes definiert worden. Dabei stand insbesondere die Fähigkeit im Mittelpunkt, dreidimensionale Werkzeugoberflächen mit dem Kopf belegen zu können. Dies schließt sowohl einen kompakten Gesamtaufbau für enge Ablegeradien als auch eine betriebssichere Funktionsweise des Kopfes bei schnellen Bewegungen mit ein.

Ausgehend von dem erstellten Lasten-/ Pflichtenheft und dem erarbeiteten Konzeptmodell ist die Konstruktion des Tapelegekopfs durchgeführt worden. Das Ergebnis der Konstruktionsarbeiten ist ein Tapelegekopf für die laserunterstützte Verarbeitung von thermoplastischen Tapebändern auf 3D-Werkzeugoberflächen. Darüber hinaus sind die bereitzustellenden Teilsysteme der Projektpartner (Laserzoom-Optik, Thermokamera) mit in den Tapelegekopf integriert worden. Das Konstruktionsmodell sieht vor, dass die sechs Tapespulen horizontal übereinandergeschichtet sind und die abzuspulenden Tapebänder über Umlenkrollen der Ablegeeinheit zugeführt werden. Die Ablegeeinheit führt die Tapebänder unter der Andruckrolle zusammen und trägt dabei die zur Verarbeitung notwendigen Komponenten wie z.B. Thermokamera, Laseroptik, Andruckeinheit, Vorschubsysteme und Laserstrahleinkopplung. Die Tapebevorratungseinheit ist dabei an den Tapelegekopf angeschraubt und zu einer festen Einheit montiert.

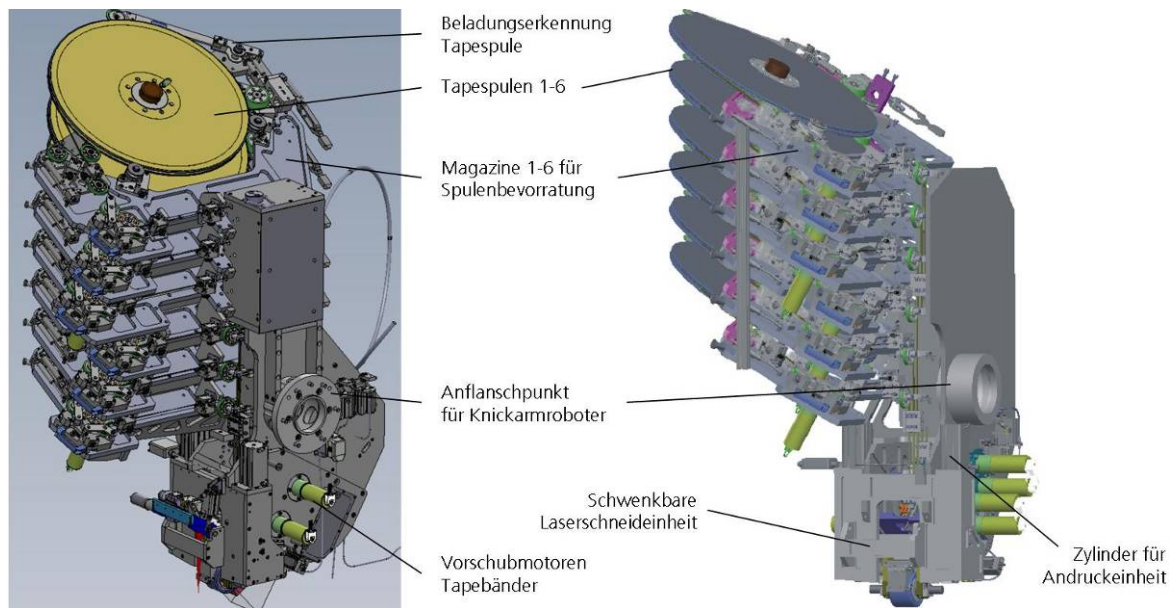


Abbildung 3-1: Konstruktion des Tapelegekopfs

Abbildung 3-1 zeigt das Konstruktionsmodell des Tapelegekopfsystems. Ausgehend von einem Konzeptmodell ist schrittweise die detaillierte 3D-Konstruktion erarbeitet worden. Alle Bauteile und Baugruppen sind dabei unter Berücksichtigung der im Lasten-/ Pflichtenheft definierten Anforderungen weiterentwickelt worden, sodass für die mechanische Fertigung des Kopfes die 2D-Ableitungen erstellt sowie die benötigten Norm- und Zukaufteile beschafft worden sind. Parallel zu dem mechanischen Aufbau des Tapelegekopfs ist die Verkabelung aller elektrischen Komponenten mit dem zentralen Schaltschrank sowie die Integration der Signalleitung in den Regelrechner erfolgt. Im Folgenden wird der mechanische Aufbau des Tapelegekopfs schrittweise dargestellt und die einzelnen Funktionen des Tapelegekopfs nach Bereichen erläutert und beschrieben. Abbildung 3-2 zeigt den Gesamtaufbau des Tapelegekopfs nach Abschluss des mechanischen Aufbaus.

In der Tapebevorratung werden die Tapespulen positioniert, welche während dem Tapelegeprozess kontinuierlich Tapematerial bereitstellen. Damit bei der Tapeablage auf 3D-Oberflächen möglichst enge Ablegeradien abgelegt werden können und trotzdem zur Erzielung kurzer Prozesszeiten bei der Bauteilherstellung ein hoher Materialdurchsatz ermöglicht wird, wurde eine Tapebreite von 6 mm und eine Tapeanzahl von 6 Bändern gewählt. Die Tapebänder sind einzeln ansteuerbar, sodass die Anzahl der aktiv abzulegenden Tapebänder zwischen einem Band und sechs Bändern frei gewählt werden kann. Mit diesen

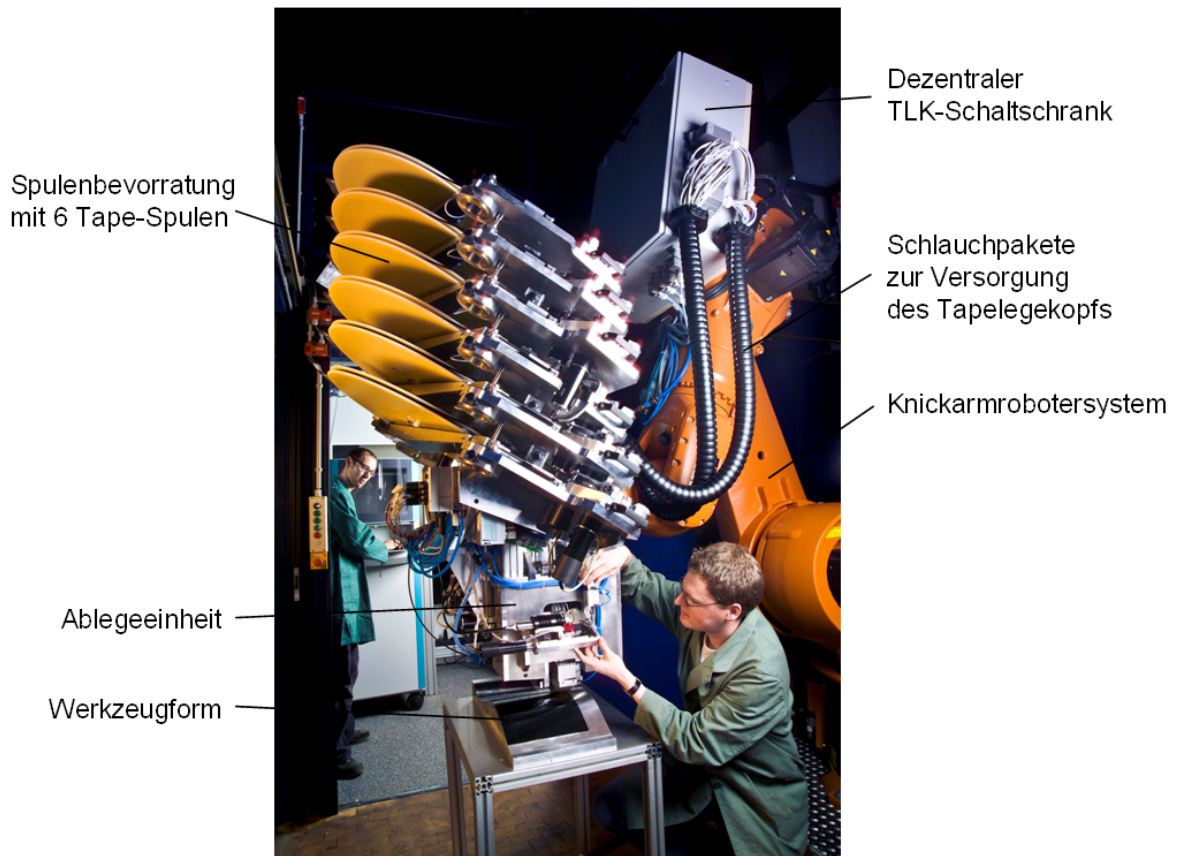


Abbildung 3-2: Aufgebauter Tapelegekopf mit Robotersystem

sechs Bändern können somit gleichzeitig bis zu 36 mm Tapebreite abgelegt werden. Da die Tapebänder einzeln ansteuerbar sind und unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten beispielsweise bei der Ablage von Kurven realisiert werden können, besteht die Möglichkeit, komplexe Bauteilgeometrien herzustellen. Dies wird zudem durch die Fähigkeit des Kopfes unterstützt, variabel bei der Anzahl der abzulegenden Tapebänder zu sein. Um bei ruckartigen Abzugsbewegungen kein Nachlaufen der Tapebänder von der Tapespule zu erhalten, wird die Spule permanent durch ein Motorsystem abgebremst. Somit ist das Tape kontinuierlich unter Spannung, wodurch eine Schlaufenbildung verhindert wird. Damit die Belastung der einzelnen Tapebänder durch Führung, Umlenkung und Torsion möglichst reduziert wird, sind die Spulen um 30° gegenüber der Horizontalen geneigt. Dies führt zu einer Reduzierung der Torsion des Tapebandes von 90° auf 60° und kompaktiert den Gesamtaufbau der Spuleneinheit, sodass Störkonturen wegfallen und engere Bauteilradien mit dem Tapelegekopf abgelegt werden können.

Abbildung 3-3 zeigt die gekippte Anordnung der Spulen sowie den Beginn der Bandführung in den Tapelegekopf. Die Tapespulen sind mittig gelagert und können zum Einlegen neuer Spulen über einen externen Drehpunkt ausgeklinkt werden. Nach der Entnahme der leeren Spule erfolgt das Bestücken mit einer vollen Spule sowie das Einklinken der Tapespule und die Zuführung des Tapebandes in das Bandführungssystem.

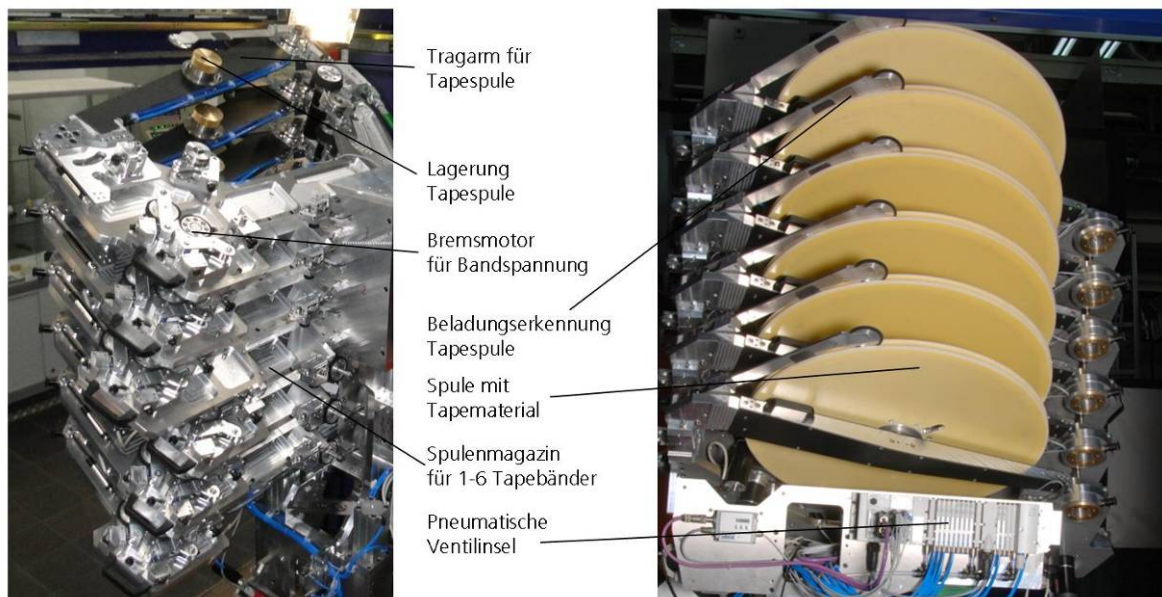


Abbildung 3-3: Tapebevorratung mit Tapespulen (rechts) und ohne Tapespulen (links)

Über ein angetriebenes Bandführungssystem werden die Tapebänder von den Tapespulen abgezogen und umgelenkt, so dass sie in den Tapelegekopf geführt werden können. Bei dem ausgewählten Konzept ist im Vergleich zu bestehenden Tapelegeanlagen von Thermoplasten auf eine möglichst schonende Führung der Tapebänder geachtet worden. Die Bänder werden im »3D-ThermoLay«-Tapelegekopf von der Tapespule abgespult, zweimal um 90° umgelenkt, tordiert und anschließend direkt der Ablegeeinheit zugeführt (Abbildung 3-4).

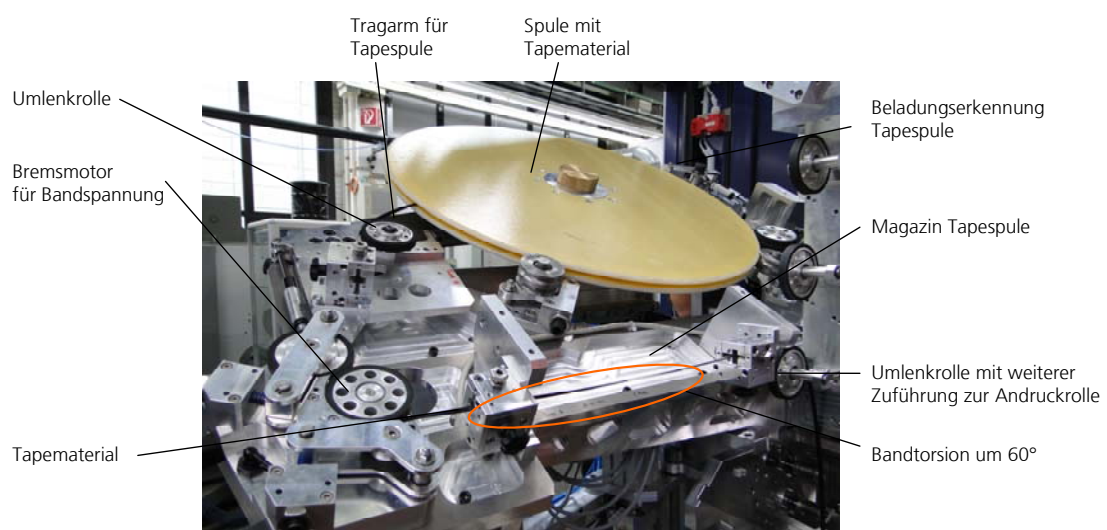


Abbildung 3-4: Bandführung in einem Tapemagazin

Die bisher eingesetzten Kunststoff-Tapespulen für 6 mm breites Tapeband haben im Einsatz gezeigt, dass das abzulegende Tapeband mit einer relativ schlechten Führungsgenauigkeit von der Spule abgezogen wird und aufgrund dessen in Abzugsrichtung starken seitlichen Positionsschwankungen unterlegen ist. Dies liegt einerseits an dem großen Abstand von 8 mm der Seitenflächen zueinander, sodass bereits beim Bespulen seitliche Positionsschwankungen entstehen. Andererseits sind die Seitenflächen sehr flexibel und lassen sich mit geringem Kraftaufwand derart elastisch verformen, dass die seitliche Bandführungsfunktion der Spule verloren geht. Diese Gründe haben zu der Entscheidung geführt, neue Tapespulen für den Tapelegekopf zu konstruieren und einzusetzen. Nach Rücksprache mit Tape-Herstellern ist das Bespulen von kundenspezifischen Spezialspulen mit Tapematerial ein gebräuchliches Vorgehen. Abbildung 3-4 zeigt die konstruierte Tapespule mit zwei Seitenteilen und einer Nabe. Die Seitenteile bestehen aus Aluminiumwaben, die beidseitig mit einer glasfaserverstärkten Deckschicht verklebt sind. Beide Seitenteile sind auf einer Nabe aufgeschraubt, sodass sich zwischen den Seitenflächen ein maximaler Abstand für das Be- und Abspulen von 6,5 mm einstellt. Durch die vergleichsweise steifen Seitenteile sowie die Nabe aus Aluminium wird ein präzises Ablaufen der Bänder während dem Legeprozess ermöglicht.

Das Gesamt-Führungskonzept des Tapelegekopfs sieht vor, dass durch Einsatz mehrerer Führungseinheiten und zwei Umlenkeinheiten das Tapeband in die Ablegeeinheit geführt wird. Die Führungseinheiten besitzen einen Führungsquerschnitt von 6,1 mm x 0,2 mm, da nach Aussagen des Tapeherstellers die Fertigungstoleranzen des Tapebandes in Breiten- und Dickenrichtung $\pm 3 \mu\text{m}$ betragen. Das Tapeband kann aufgrund seiner Struktur seitliche Kräfte nur unzureichend aufnehmen und neigt in einem solchen Fall zum Knicken. Aufgrund dessen muss die Position der Führungs- und Umlenkeinheiten im Tapelegekopf dabei so aufeinander abgestimmt werden, dass durch Positionsabweichungen der Führungseinheiten das Tapeband nicht beschädigt wird. Für die Verarbeitung der Bänder werden diese zunächst über 1er Führungseinheiten von den jeweiligen Tapemagazinen in den Rahmen des Tapelegekopfs geführt und dort in zwei 3er Führungseinheiten zusammengefasst. Diese zwei Tapestränge werden dann durch Antriebe in eine 6er Führungseinheit vorgeschoben und anschließend unter die Andruckrolle zur Verarbeitung vorgeschoben. Abbildung 3-5 zeigt dabei die entwickelten und in den Tapelegekopf integrierten Führungseinheiten.

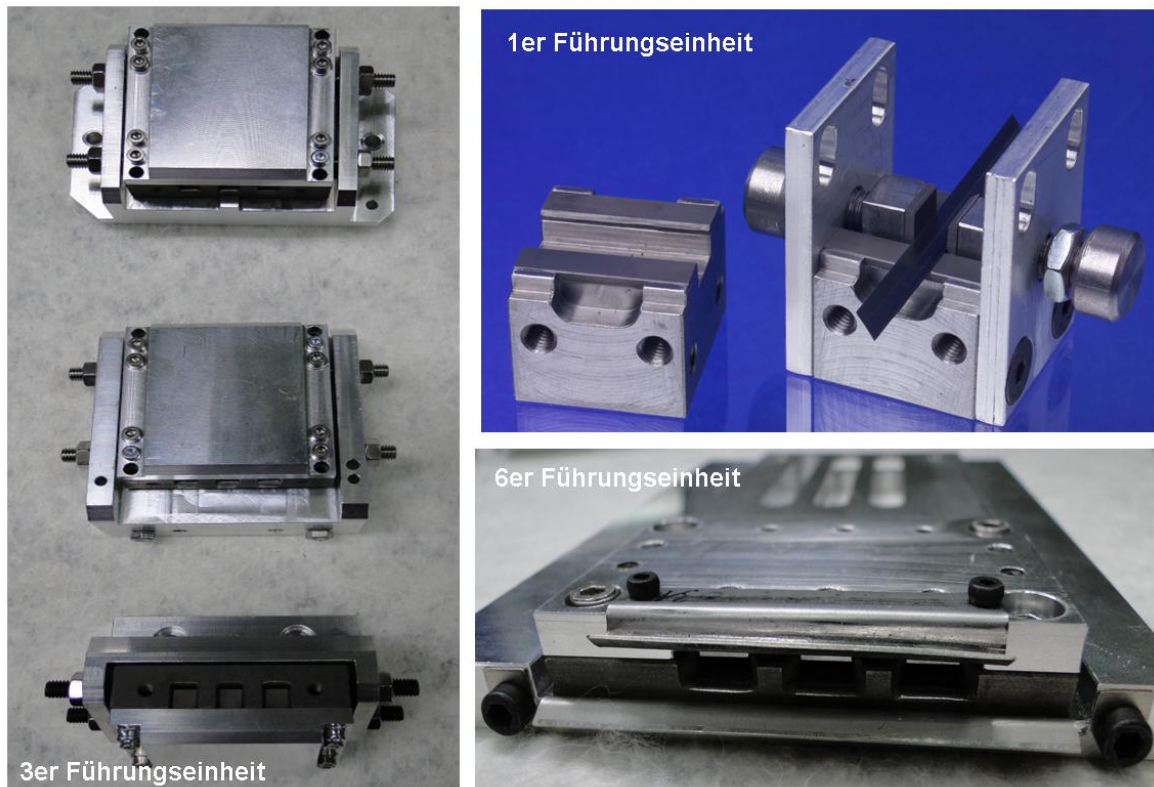


Abbildung 3-5: 1er-, 3er- und 6er-Tapeführungseinheiten

In der Ablegeeinheit befinden sich die benötigten Antriebe, die die Bewegung der Tapebänder ermöglichen und von den Tapespulen abziehen. Damit die Tapebänder einerseits bis in den Prozessbereich vorgeschoben werden und andererseits während des Herstellungsprozesses Zugspannungen auf die Tapebänder aufgebracht werden können, ist eine Vor- und Rückwärtsbewegung der Tapes erforderlich. Entsprechend wurden für die Ansteuerung Bewegungsmotoren ausgewählt, so dass dies realisiert worden ist. Um eine spaltfreie Ablage der Tapes auf einer Oberfläche zu ermöglichen, müssen die Tapes bereits in der Ablegeeinheit räumlich eng aneinander geführt werden, da eine nachträgliche Zusammenführung der Tapes aufgrund ihrer Steifigkeit nicht mehr möglich ist. Nach dem Austritt der Tapes aus dem Tapelegekopf werden diese in den Prozessbereich unter die Andruckrolle geführt. Während dieser Wegstrecke ist keine Führung der einzelnen Tapebänder mehr möglich, da sonst die Führungselemente in den Aufheizbereich ragen und der Laserstrahlung ausgesetzt sind. Ungeführt ist keine definierte Platzierung der Tapes auf der Werkzeugform möglich, da die Tapes aufgrund von Eigenspannungen und der zunehmenden Erwärmung durch den Laserstrahl beginnen, zu tordieren und sich somit nicht auf dem ihnen zugeordneten Ablegepunkt positionieren lassen. Aus diesem Grund werden die Tapebänder vor der Zuführung der Bänder unter die Andruckrolle und einmalig nach dem Austritt aus dem Tapelegekopf mit einer Schweißzange quer zur Faserrichtung miteinander verschweißt. Die somit miteinander verbundenen Tapebänder können dann als eine Einheit durch die Vorschubmotoren gemeinsam unter die Andruckrolle vorgeschoben werden. Über zwei Andruckzylinder wird die für die Konsolidierung der einzelnen Laminatlagen notwendige Prozesskraft aufgebracht, die über Federpakete an die Andruckrolle weitergeleitet werden. Durch den Einsatz eines Druckregelventils ist diese Prozesskraft bis zu einer Maximalkraft von 1300 N einstellbar. Die Andruckrolle ist mit einem Kühlsystem versehen, sodass die vom Laminat aufgenommene oder direkt von der Laserstrahlung absorbierte Wärme abgeführt werden kann. Abbildung 3-6 zeigt die Ablegeeinheit des

Tapelegekopfs sowie die darin eingesetzten Baugruppen ohne die Rahmenverkleidung der Einheit.

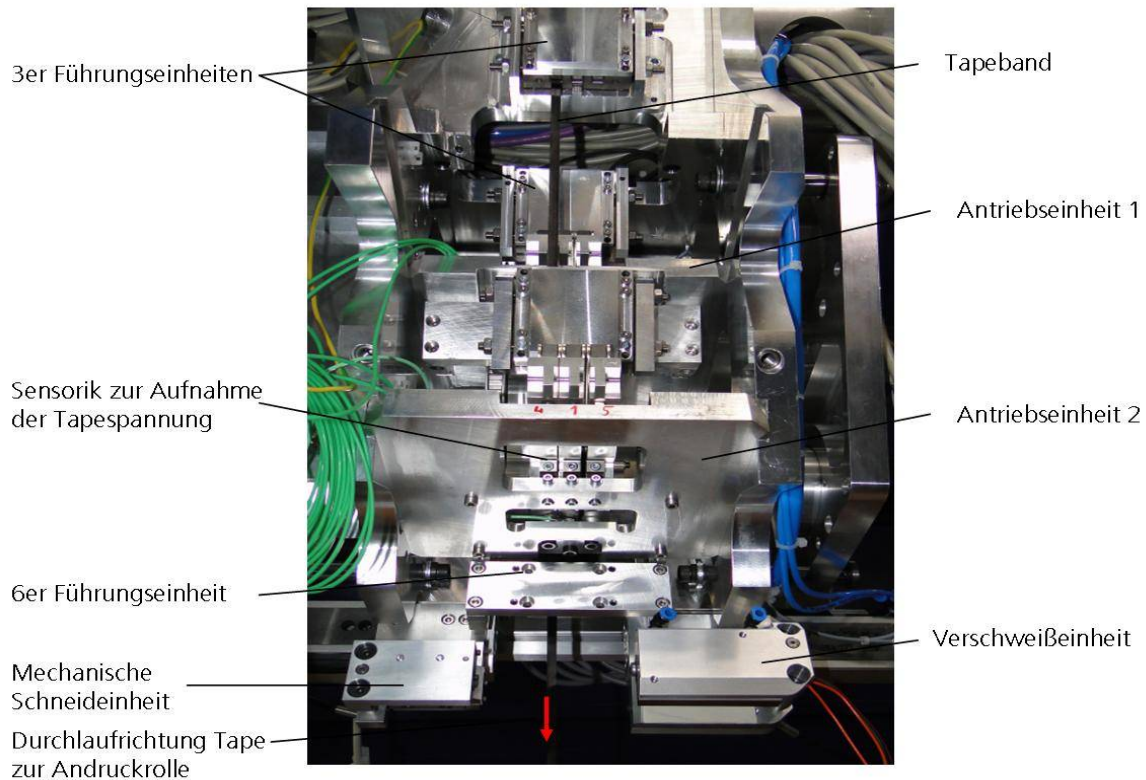


Abbildung 3-6: Ablegeeinheit des Tapelegekopfs

Für eine optimale Verbindung der Laminatschichten untereinander ist eine gleich hohe Temperatur von bereits abgelegtem und neu hinzugefügtem Tapematerial während dem Herstellungsprozess notwendig. Damit unterschiedliche Temperatureinflüsse wie z.B. Aufheiz- oder Abkühleffekte während der Verarbeitung ausgeglichen werden können, ist eine aktive Laserhöhenverstellung notwendig. Dazu wird der Messbereich der Thermokamera in zwei horizontale rechteckige Messzonen aufgeteilt: Die Messzone 1 beschreibt den Bereich des einlaufenden Tapebandes, die Messzone 2 das bereits abgelegte Laminat. Das Ziel, für die Messbereiche 1 und 2 annähernd gleich große Temperaturen während des Ablegeprozesses einzustellen, wird durch eine aktive Laserhöhenverstellung realisiert. Bei einer solchen Verstellung des Lasers ist die Position des Brennflecks in seiner Höhe einstellbar und variabel. In der Grundposition des Laserbrennflecks werden Bauteil und einlaufende Tapes zu gleichen Anteilen mit Laserenergie bestrahlt. Sind die gemessenen Temperaturen der Messzonen voneinander verschieden, kann der Laserbrennfleck in den kälteren Messbereich verschoben werden. Mit dieser Regelung erfolgt ein Temperaturengleich, sodass bei der Verarbeitung die Tapes mit gleich hohen Temperaturwerten miteinander verschweißt werden können. Um eine solche Verstellung zu realisieren, muss zum einen der Laserbrennfleck in situ seine Position verändern können. Zum anderen erfolgt währenddessen weiterhin die Temperaturmessung der zwei Messzonen. Für diese Anforderungen ist in dem entwickelten Konzept des Tapelegekopfs ein Spiegelsystem vorgesehen, wie es in Abbildung 3-7 dargestellt ist. Bei dieser Anordnung sind die Komponenten Lichtleitfaser, Kollimationsoptik, Laser-Zoomoptik, Andruckeinheit sowie Thermokamera fest mit dem Tapelegekopfgehäuse verbunden.

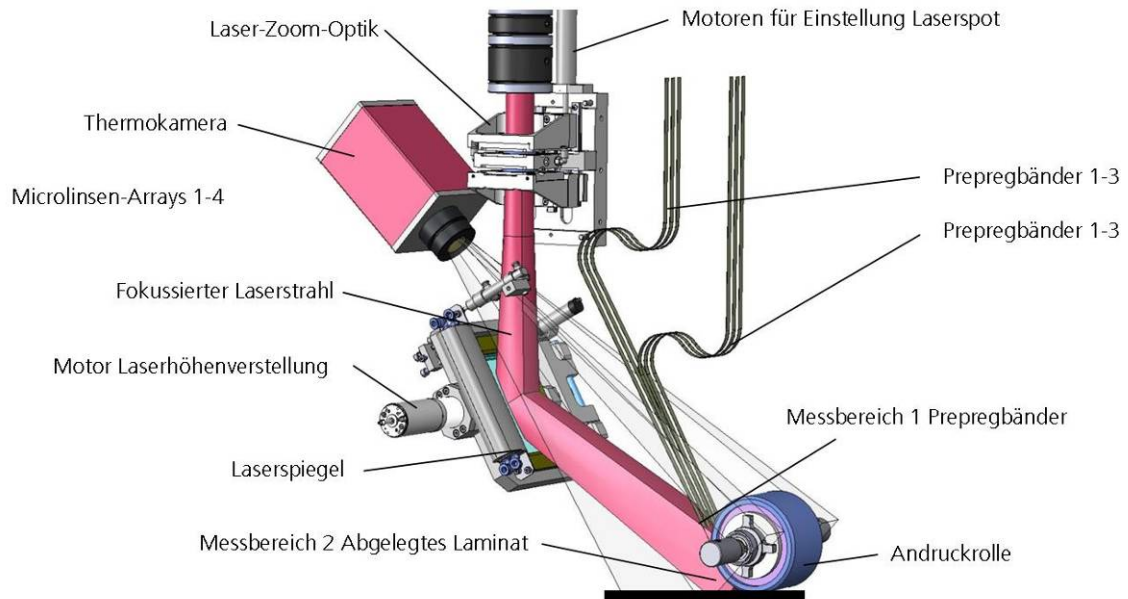


Abbildung 3-7: 3D-Detaildarstellung von Laseroptik, Spiegelsystem und Andruckrolle

Der Spiegel ist auf einer Rotationsachse gelagert und kann durch einen Stellmotor um seine eigene Achse bewegt werden. Die zum Laserstrahl weisende Spiegelseite ist im Bereich von 900 nm – 1100 nm mit einer Breitbandvergütung versehen, sodass die Strahlung nahezu ohne Verlust am Spiegel in den Prozessbereich weitergeleitet wird. Abbildung 3-8 zeigt die ermittelte Transmission des Umlenkspiegels, die im Bereich von 920nm bis ca. 1000nm im Bereich von maximal 0,1% liegt. Diese vom Spiegel noch absorbierte Reststrahlung wird durch ein Wasser-Kühlsystem abgeführt.

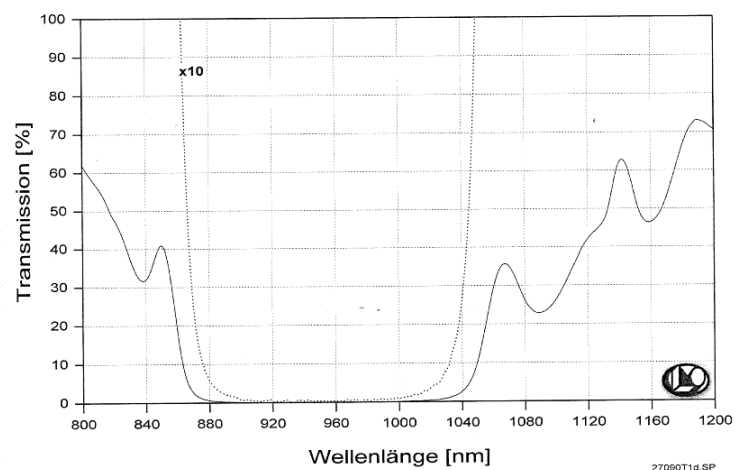


Abbildung 3-8: Messkurve Transmission Umlenkspiegel

Flexible Andruckrolle

Das Andruckrollensystem übernimmt die Konsolidierung der Laminatlagen untereinander. Dabei wird das neu abzulegende und über das Führungssystem in den Prozessbereich geführte Tapematerial mit der darunter liegenden Laminatschicht auf der Werkzeugform in einem Schweißprozess verbunden. Voraussetzung für diese Verbindung ist bei der Tapeablage die Übertragung eines flächigen Anpressdrucks auf die abzulegenden Tapebänder. Aufgabe des Andruckrollensystems ist es daher, einerseits eine hinreichend große Andruckkraft vom Bewegungssystem auf das Tapematerial zu übertragen und andererseits eine entsprechende Andruckfläche zu erzeugen.

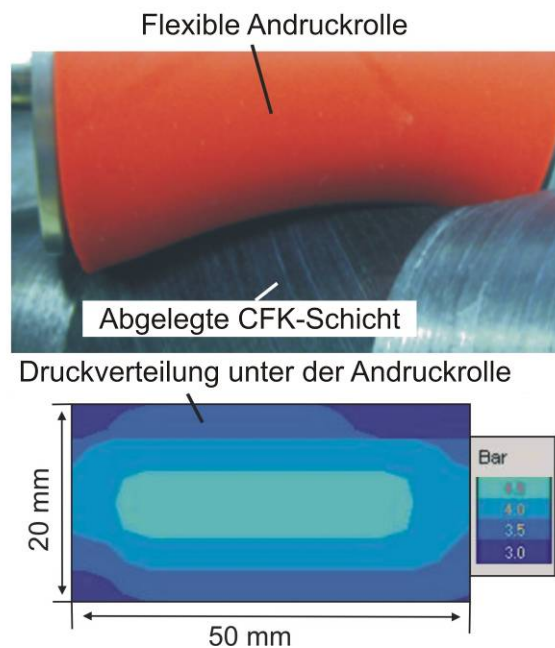


Abbildung 3-9: Schematische Abbildung des Andruckprozesses mit einer flexiblen Andruckrolle

Die Andruckrolle überträgt die aufgebrachte Andruckkraft auf die abzulegenden Tapes und den darunter liegenden Laminataufbau. Damit sich eine Andruckfläche während der Tapeablage auf mehrdimensionale Konturen ausbilden kann und somit komplexe Bauteilgeometrien mit dem Tapelegprozess erzeugt werden können, ist die Andruckrolle formflexibel gestaltet, wie Abbildung 3-9 darstellt.

Die Andruckrolle besteht aus einem beidseitig gelagerten festen Stahlkern, der mit einer formbaren Elastomer-Schicht ummantelt ist. Diese Schicht hat die Eigenschaft, sich formflexibel der Werkzeuggeometrie anzupassen und gleichzeitig eine Andruckfläche auszubilden. Dies ist Voraussetzung für die Herstellung qualitativ hochwertiger dreidimensionaler Faserverbundbauteile aus thermoplastischen Prepregs.

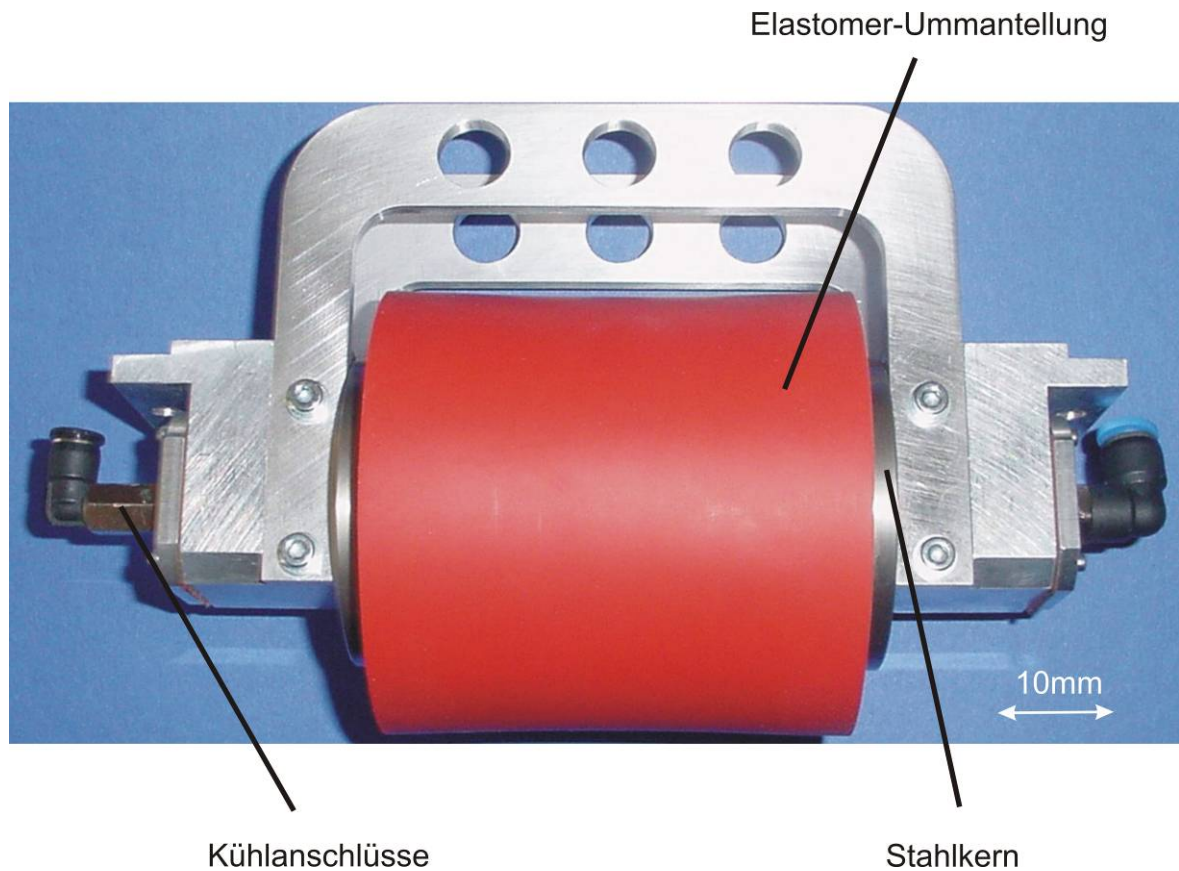


Abbildung 3-10: Andruckrolle mit Silikon-Mantel

An der Rollenachse sind seitlich Kühlan schlüsse angebracht, damit die Erwärmung der Rolle durch Streustrahlung des Lasers und durch Konvektion von bereits abgelegten Laminatschichten auf eine definierte Verarbeitungstemperatur geregelt werden kann. Der Kern ist als Hohlwelle ausgeführt, sodass ein Durchströmen der Rolle möglich ist. Über diese Anschlüsse kann mit Wasser oder mit Luft gekühlt werden. Die Temperatur der Andruckrolle wird mit einem Pyrometer ermittelt. Über einen Kühlregelkreis kann somit die durchströmte Rolle durch Regelung des Durchflussvolumens konstant temperiert werden. Zusätzlich ist das Elastomer des Rollenmantels so gewählt, dass über einen geringen Absorptionskoeffizienten die über die Mantelfläche der Rolle aufgenommene Laserleistung reduziert wird. Durch die Zoom-Optik ist es möglich, den Laserbrennfleck in der Breite einstellbar zu gestalten. Aufgrund dessen kann der Laserbrennfleck bis auf einen kleinen Randbereich von ca. 1-2 mm auf die zu verarbeitende Tapebreite eingestellt werden, so dass so wenig wie möglich an Laserenergie neben den einlaufenden Tapes auf die Andruckrolle trifft (Abbildung 3-10).

Anpassbare Laseroptik

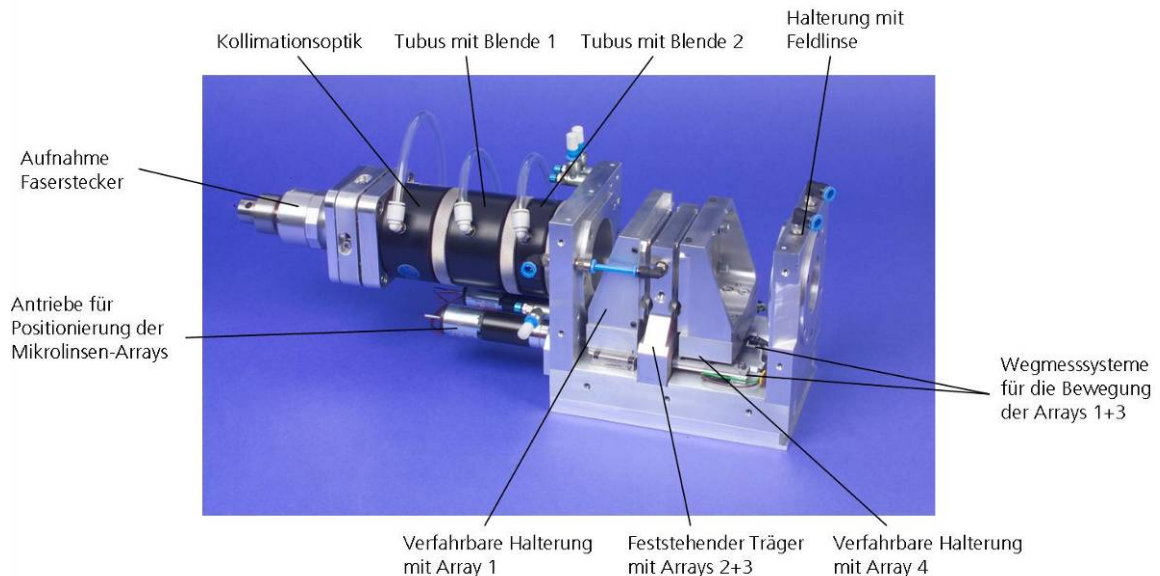


Abbildung 3-11: Mechanischer Aufbau der Laser-Zoomoptik

Die Aufgabe der Laser-Zoomoptik ist es, den Laserstrahl hinsichtlich seiner geometrischen Form und seiner Intensität so aufzubereiten, dass die gestellten Anforderungen für die Tape-Aufheizung erfüllt werden. Der von der Laserquelle erzeugte Laser-Rohstrahl wird in dem erstellten Tapelegekopf-Konzept mit einer Lichtleitfaser in den Tapelegekopf eingeleitet. Erst durch Einsatz einer Lichtleitfaser kann die kompakte Anordnung des Gesamtsystems realisiert werden, da der Laser nicht in den Tapelegekopf integriert werden muss. Der Aufbau der Laseroptik sieht vor, dass der Faserstecker der Lichtleitfaser von der Zoom-Optik aufgenommen wird. Eine Kollimationsoptik parallelisiert den Laserrohstrahl, welcher im Anschluss durch zwei gekühlte Blenden auf einen definierten Durchmesser kalibriert wird. Die Homogenisierung und Rechteck-Formgebung der Laserstrahlung erfolgt durch 4 Linsenarrays, die in Strahlrichtung nacheinander angeordnet sind. Das erste und das vierte Array ist beweglich, sodass durch die Kombination der Bewegungen die Laserbrennfleckgröße variiert werden kann. Den Abschluss der Optik bildet eine Feldlinse, die mit ihrer definierten Brennweite eine scharfe Abbildung in der Bildebene erzeugt (vgl. Abbildung 3-11). Innerhalb des Projekts wurde die Konstruktion des optischen Systems konstruiert und die Zeichnungsableitungen erstellt. Darüber hinaus sind anhand der Stückliste alle mechanischen, elektrischen und optischen Komponenten des Systems beschafft worden, die zum Aufbau und zur Montage der Optik notwendig sind. Anschließend ist die Optik im Hause Ingeneric montiert und justiert worden, sodass die mechanische und optische Funktionalität des Systems erreicht und getestet werden konnte. Abbildung 3-12 zeigt die Intensitätsverteilung verschiedener Brennfleckgrößen, die qualitativ mit Laserlicht der Wellenlänge 600nm ermittelt worden sind. Die Intensitätsverteilung ist dabei für ein 20 mm x 8 mm (1 Tape), 50mm x 30mm (4 Tapes) und ein 60 mm x 40 mm (6 Tapes) großes Rechteckfeld in der Bildebene gemessen worden. Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich insbesondere bei den beiden größeren Laserspotgeometrien eine sehr homogene Verteilung der Laserleistung einstellt und sich aufgrund optischer Rahmenbedingungen bessere Abbildungseigenschaften aufweisen als bei der kleineren Geometrie. Der Zentralbereich des kleinen Rechteckfeldes ist unter Einbezug von Erfahrungswerten homogen genug, um eine gleichmäßige Aufheizung des Tapebandes zu gewährleisten.

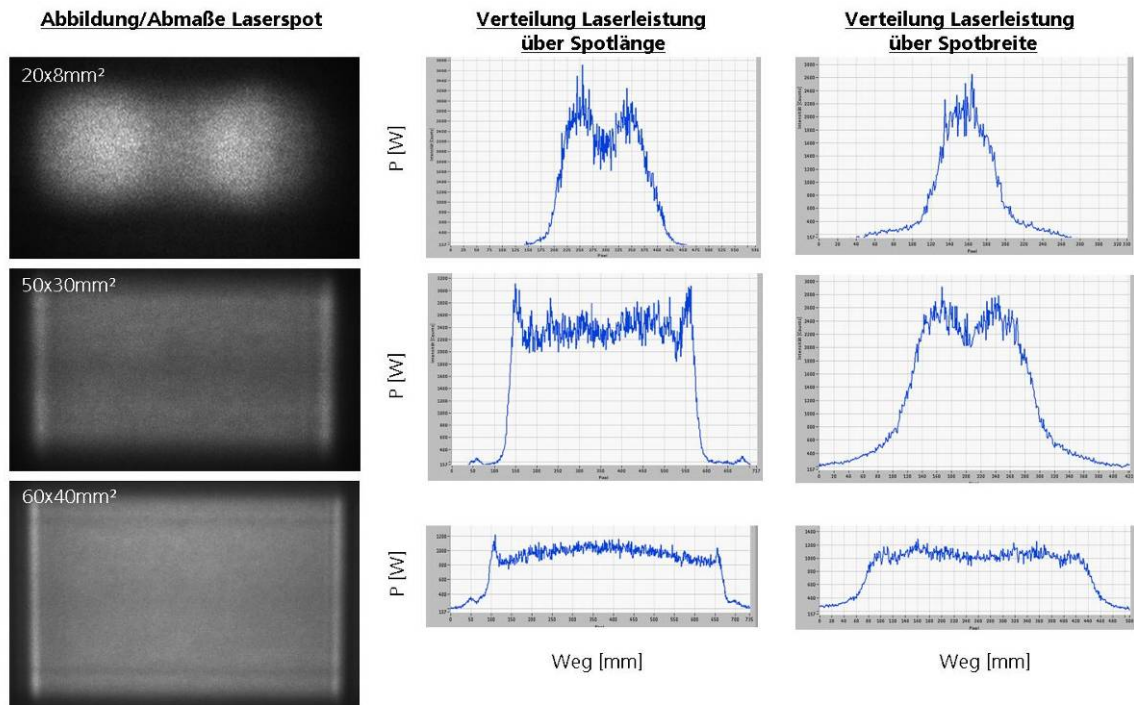


Abbildung 3-12: Laserleistungsverteilung verschiedener Laserspotabmessungen

Entwicklung der Steuerung und Regelung

Innerhalb des Projekts ist in enger Abstimmung mit der Firma KOELRIT GmbH die Steuer- und Regelung des Tapelegekopfs mit dem dafür beschafften echtzeitfähigen Hardwaresystem der Firma d-space GmbH umgesetzt worden, welches sämtliche Daten der einzusetzenden Aktorik und Sensorik verarbeiten kann. Dieses Regelungssystem hat die Aufgabe, alle einzelnen anzusteuern und zu regelnden Systemkomponenten des Tapelegekopfs miteinander zu vernetzen und eine Kommunikation untereinander zu ermöglichen. Diese einzelnen Module sind die Temperaturerfassung durch die Infrarot-Kamera (Dias Infrared), die anpassbare Laseroptik (Ingeneric), das Lasersystem (Laserline) sowie die softwaretechnischen Schnittstellen zum CAD/CAM-System (Cenit). Neben der Funktionalität der eingesetzten Komponenten ist bereits bei der Auswahl der elektrischen Komponenten auf die Implementierbarkeit in das Steuer- und Regelungssystem geachtet worden, so dass über

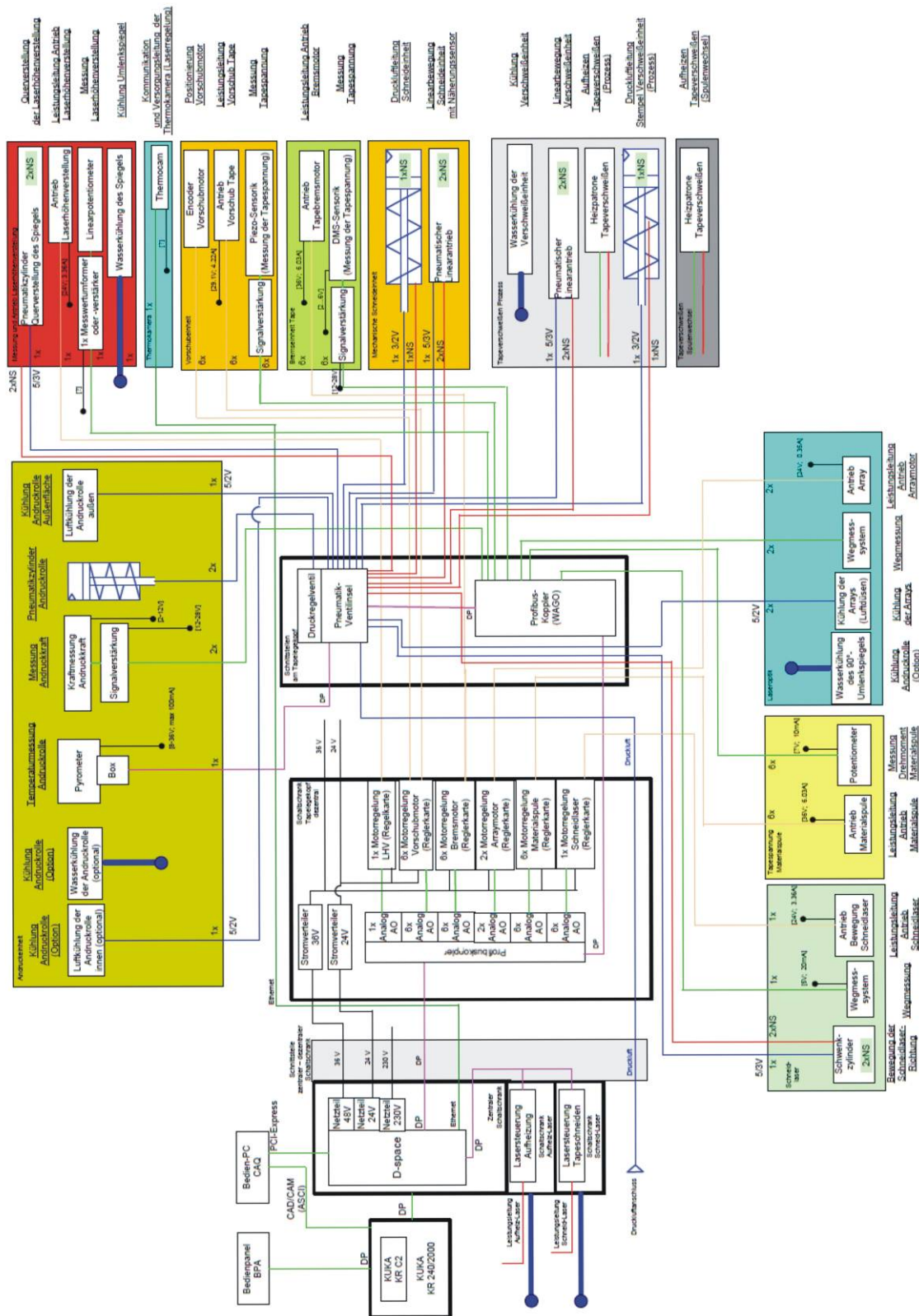


Abbildung 3-13: Übersicht zur Verkabelung des Tapelegekopfs

verschiedene Schnittstellen ein reibungsloser Ablauf bei dem Aufbau des Regelsystems gewährleistet werden kann.

Mithilfe dieser Plattform können alle notwendigen Regelalgorithmen des Tapelegekopfs programmiert und gesteuert werden. In Verbindung mit der Robotersteuerung wird ein funktionsoptimierter Betrieb des gesamten Tapelegesystems und das Ablegen der Tapematerialien auf der Werkzeugform ermöglicht. Die dazu notwendige Verkabelung der Aktorik und Sensorik ist dabei mit Hilfe eines Verkabelungsplans durchgeführt worden, sodass eine Kommunikation der d-space Plattform einerseits mit dem Robotersystem und andererseits mit allen elektrischen Modulen des Tapelegekopfs hergestellt werden konnte.

Für die technische Funktionalität des gesamten Prozessablaufs mit Tapeverarbeitung, Einstellung einer definierten Bandspannung, Auslesen der Prozesstemperatur, Induzierung einer temperaturabhängigen Laserleistung, Schneiden der Tapebänder sowie der Kommunikation mit dem Robotersystem sind Regelalgorithmen entworfen und programmiert worden. Im Rahmen der Inbetriebnahme des Tapelegekopfs konnten dabei zunächst alle Teilmodule separat getestet und anschließend schrittweise zu einem Gesamt-Regelablauf zusammengeführt, angepasst und optimiert werden.

Damit die Anzahl der Kabelverbindungen reduziert werden kann, wird am Tapelegekopf ein Profibuskoppler und einer Pneumatik-Ventilinsel montiert, die die pneumatischen und elektrischen Signalleitungen bündeln und an die Steuerung weiterleiten. In einem direkt am Robotersystem montierten dezentralen Schaltschrank werden die Steuerkarten der einzusetzenden Motoren integriert, sodass die zur Versorgung notwendigen Kabel kurz gehalten werden können und nicht bis zur Steuerung komplett mitgeführt werden müssen. Der dezentrale Schaltschrank enthält ebenfalls verschiedene Stromverteiler, die die elektrischen Komponenten entsprechend ihrer benötigten Spannung versorgen. Die zentrale Verarbeitungsstelle der Daten und der Regelalgorithmen ist das d-space-System. Dieses System regelt die steuerungstechnischen Abläufe des Tapelegekopfs sowie die Ansteuerung des Lasers. Eine Übersicht zum elektrotechnischen Aufbau gibt Abbildung 3-13.

Die hierarchische Verwaltung des Zugriffs auf die steuerungstechnischen Komponenten des Tapelegekopfs erfolgt durch ein Master/Slave System. In diesem System ist ein Teilnehmer der Master, alle anderen sind die Slaves. In dem betrachteten Tapelegesystem ist dabei die Steuerung des Portalrobotersystems der Master. Das Robotersystem kann dabei programmierte Befehle an das untergeordnete d-space System als Slave weitergeben. Das d-space System verarbeitet diese Befehle und hat zur Ausführung seinerseits als Master-System Zugriff auf das Lasersystem und das Tapelegekopfsystem. Entsprechend regelt das d-space System z.B. die Verarbeitungstemperatur oder die Tapespannung und gibt dazu die nötigen Kenngrößen an Lasersystem und Tapelegekopf weiter. Über entsprechende Rückkopplungen von Tapelegekopf und Laser zum d-space System sowie vom d-space System zur Portalrobotersteuerung erfolgt die Kommunikation der Komponenten untereinander sowie die Schließung des Regelkreises. Abbildung 3-14 zeigt den Steuerungsablauf des Systems.

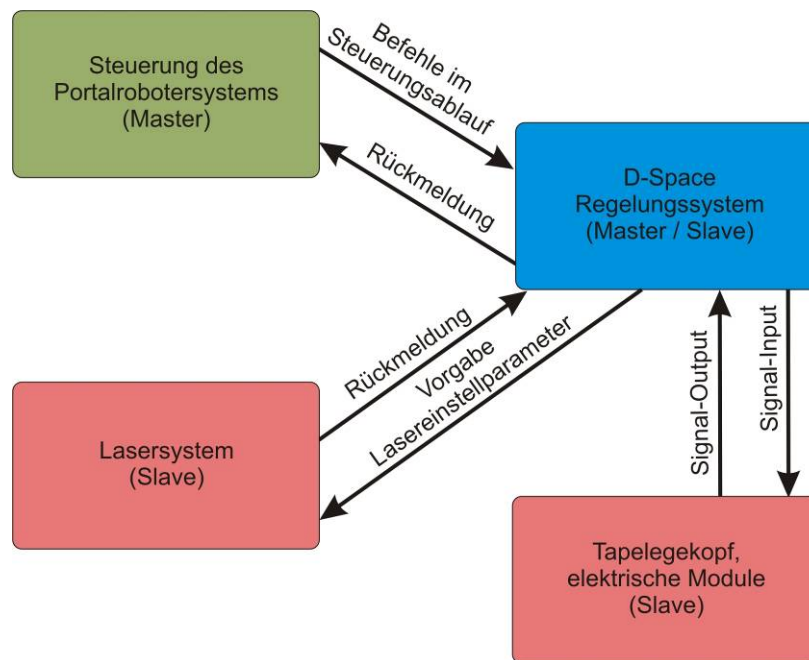


Abbildung 3-14: Steuerungsablauf Tapelegesystem

3.3 AP 3 Entwicklung der Prozesstechnik Tapelegen

Ermittlung der Anforderungen

Durch die beschriebenen Ergebnisse der Arbeitspakete 2.1 – 2.4 sind wichtige Prozessanforderungen abgeleitet und gewonnenen worden, die in das Lasten- und Pflichtenheft eingefügt worden sind. Diese Anforderungen haben sich auf den Gesamtprozess, die Bauteilgeometrie und das Werkzeug einer Demonstratorgeometrie ausgewirkt. Die materialtechnischen Anforderungen an ein faserverstärktes Strukturbauteil sind in Zusammenarbeit mit der Firma Eurocopter erarbeitet und definiert sowie in das Lasten- und Pflichtenheft eingefügt worden.

Bei dem Prozess zur Definition einer Demonstratorgeometrie mussten neben den geometrischen Aspekten zur Generierung einer 3D-Werkzeugfläche weitere Rahmenparameter wie Fertigungskosten und Kollisionsbetrachtungen des Tapelegekopfs werden. Aufgrund dessen sind in Abstimmung mit der Firma Eurocopter Deutschland GmbH, der Firma Cenit Systemhaus AG sowie dem IKV und dem Fraunhofer IPT verschiedene Werkzeuggeometrien erarbeitet und untersucht worden. Um eine Tape-Ablage auf einer dreidimensionalen Werkzeugfläche durchführen zu können, wurde letztendlich eine dreidimensionale Werkzeugform in Form einer Gauß-Kurve mit einer Seitenlänge von 500mm und einer maximalen Höhe von 80mm ausgewählt (Abbildung 3-15, Form 4).

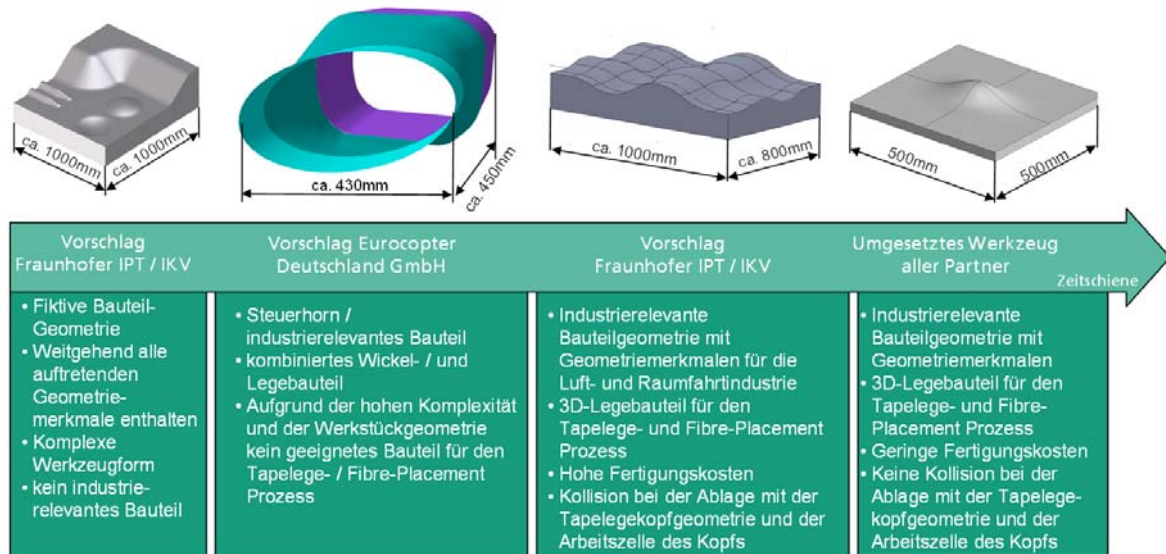


Abbildung 3-15: Entwicklungsschritte zur Bestimmung der Werkzeuggeometrie

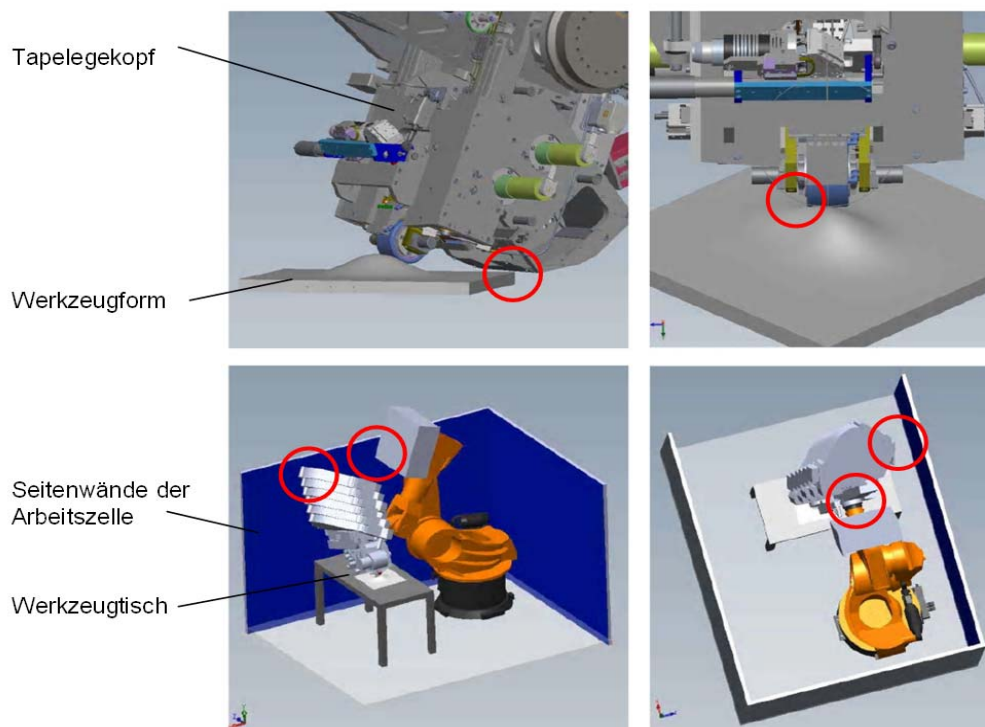


Abbildung 3-16: Kollisionsbetrachtung des Tapelegekopfs mit Werkzeugform, Roboter und den Seitenwänden der Arbeitszelle

Aufgrund der genannten Rahmenbedingungen mussten die vorliegenden Konzepte insbesondere aufgrund der räumlich stark begrenzten Arbeitszelle vereinfacht werden, ohne den Anspruch an eine komplexe 3D-Werkzeugform aufgeben zu müssen. Für die finale Werkzeuggeometrie ist daher eine in zwei Raumrichtungen unterschiedlich ausgeprägte Gaußform ausgewählt worden. Bei der Auslegung der Werkzeugform war somit eine Analyse der geometrischen Randbedingungen notwendig, bei der zwei Faktoren berücksichtigt

werden mussten. Zum einen musste die Größe und Position der Werkzeugform in der Roboterzelle so gewählt werden, dass eine Kollision des Tapelegekopfs mit den Wänden der Kabine in jeder Stellung des Kopfs, die für die Ablage auf der Werkzeugform notwendig ist, ausgeschlossen werden konnte. Des Weiteren erfolgte die Kollisionsbetrachtung zwischen dem Tapelegekopf und der Werkzeugform. Diesbezüglich ist in mehreren Anpassungszyklen die Werkzeugform angepasst worden, sodass die Tape-Ablage auf der gesamten Werkzeugform in verschiedenen Ablegewinkeln ermöglicht werden konnte (Abbildung 3-16).

Erstlagenfixierung

Beim Aufbau eines Faserverbundbauteils aus Endlosfasern mit thermoplastischer Matrix ist die Fixierung der ersten Laminatschicht der thermoplastischen Tapebänder auf dem Formwerkzeug ein wesentlicher Aspekt im Fertigungsprozess. Das spalt- und überlappungsfreie Ablegen der Prepregs sowie die Verschmelzung der benachbarten Kunststoffmatrizen der Tapelagen untereinander ist unabdingbar für die volle Entfaltung der Festigkeitseigenschaften des Bauteils. Spalte und Überlappungen der Tapematerialien führen während der Tapeablage zu einer Verminderung der Bauteilfestigkeit, da die Homogenität der Struktur nicht gewährleistet ist. Der durch eine spalt- und lunkerfreie Ablage entstehende feste Verbund von einzelnen Laminatschichten aus Matrix und Fasern bildet dabei die Grundlage für ein optimales Faserverbundbauteil und ist für den Herstellungsprozess unabdingbar.

Bei der Bauteilherstellung stellt die Erzeugung der ersten Laminatschicht eine besondere Herausforderung dar. Um einen möglichst breiten Anwenderkreis anzusprechen und eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung der Tapetechnologie anzubieten, ist es notwendig, komplexe Strukturbauteile herstellen zu können. Diese werden gewöhnlich mit einem Formwerkzeug hergestellt. Auf der Oberfläche dieser Form werden die oben beschriebenen Laminatschichten abgelegt und nach Abschluss des Fertigungsprozesses als fertiges Bauteil entfernt. Die erste Laminatschicht muss somit direkt auf die Werkzeugoberfläche abgelegt werden. Da diese jedoch keinen Anhaftmechanismus bietet, muss dieser durch einen Fertigungsprozess geschaffen und in der Produktionskette vorgesehen werden. Es ist dabei wichtig, dass nach dem Entformungsschritt keine Schäden oder Verunreinigungen am Bauteil selbst verbleiben.

Eine Möglichkeit, diese Anforderungen realisieren zu können, besteht darin, ein wachshaltiges Trennmittel zu verwenden, welches auf die Werkzeugform aufgetragen wird. Dieses Trennmittel lässt nach einer gewissen Trocknungszeit das Tape zunächst auf der Oberfläche kleben. Nach dem Herstellungsprozess kann durch Erwärmung der Werkzeugform das Trennmittel wieder in den flüssigen Zustand versetzt werden und das erzeugte Bauteil von der Oberfläche einfach entnommen werden. Um dieses Verfahren zu testen, wurden dazu Versuche mit dem Trennmittel Rotisol von der Firma Robert Timm GmbH durchgeführt. Dazu wird auf planen Edelstahlplatten Fühlerlehrenband in unterschiedlichen Stärken so aufgeklebt dass sich jeweils zwischen 2 Bandstreifen die Möglichkeit ergibt mit einem ebenfalls planen Spachtel eine definierte Schichtdicke des Trenn-/Klebstoffes Rotisol aufzutragen (Abbildung 3-17). In den durchgeführten Untersuchungen wurden Dicken von 0,01mm, 0,03mm, 0,05mm und 0,09mm eingesetzt.

Rotisol ist ein wachshaltiger Kleber, der nach Aushärtung durch Wärmezufuhr wieder ablösbar wird. Die erste Erstarrung des Klebstoffes erfolgt durch die Auskondensation des im Rotisol enthaltenen Wassers. Für den Prozess der Erstlagenfixierung ist nun von Interesse nach welcher Trocknungszeit die optimale Anhaftkraft erreicht ist bzw. in welchem Zeitintervall eine Anhaftung möglich ist.

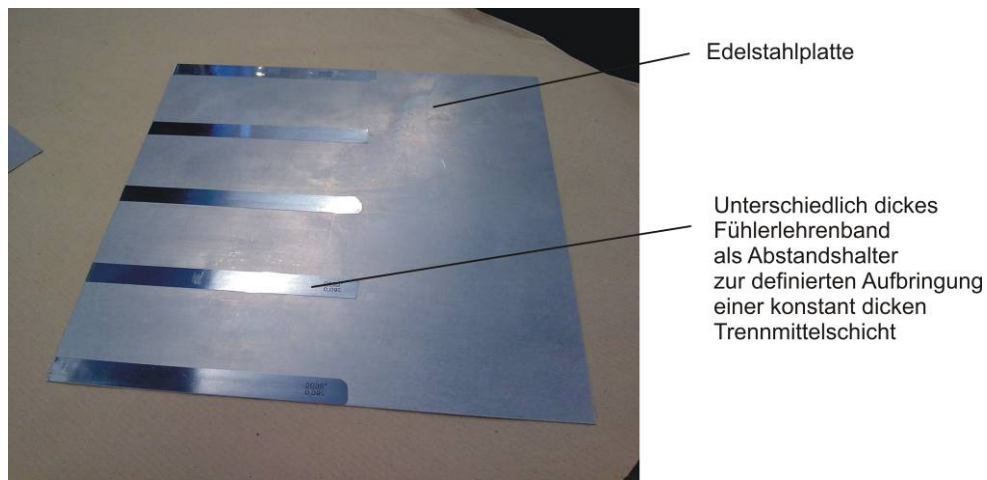


Abbildung 3-17: Edelstahlplatte mit aufgeklebtem Fühlerlehrenband

Diese Parameter sind primär abhängig von der Dicke der aufgetragenen Schicht des Klebemittels. Nach Aufbringung der Schichtdicke wird ein Tapeestreifen nach einer bestimmten Trocknungszeit auf das Trennmittel abgelegt. Dies erfolgt bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen, da das Antrocknen des Trennmittels erheblichen Einfluss auf Klebefähigkeit des Trennmittels hat. Um die Anhaftkraft des Tapeestreifens auf der Form feststellen zu können, wurden Kraftmessungen mit dem Tapeestreifen rechtwinklig zur Faserrichtung durchgeführt (Abbildung 3-18).

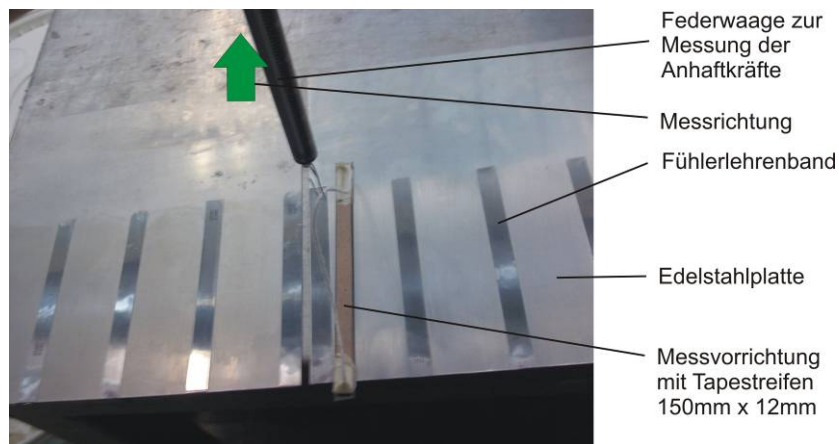


Abbildung 3-18: Versuchsaufbau für Kraftermittlung

Dazu wird ein Streifen von 15 cm Länge und 12mm Breite derart vorbereitet, dass in der Mitte des Tapeestreifens die Kraftmessung erfolgen kann. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur und bei 50°C durchgeführt. In Abhängigkeit von der Zeitspanne Auftragen des Trennmittels bis Ablage des Tapes auf das Trennmittel werden unterschiedliche Ablösekräfte erreicht.

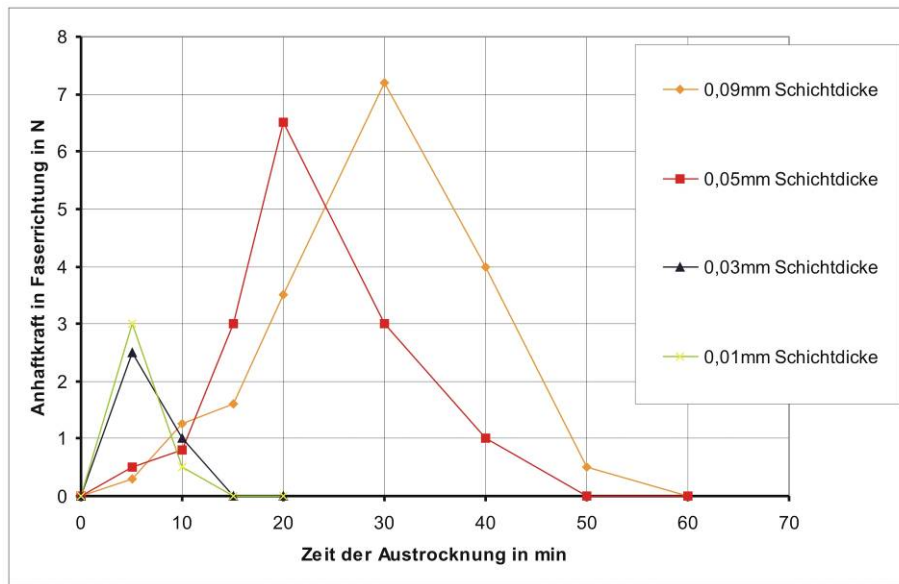


Abbildung 3-19: Anhaftkräfte bei unterschiedlichen Schichtdicken bei Raumtemperatur

In den Diagrammen der Abbildung 3-19 und Abbildung 3-20 ist zu erkennen, dass die Schichtdicke des aufgetragenen Trennmittels erheblichen Einfluss auf die Anhaftkraft des Tape Streifens hat. Je dicker die aufgetragene Trennmittelschicht ist, desto höher ist die erreichte Anhaftkraft des Tape Streifens auf der Werkzeugoberfläche. Die ermittelten Graphen der Anhaftkräfte nehmen annähernd eine Gauß-Verteilung an, bei der nach einer bestimmten Zeit ein Maximum an Anhaftkraft erreicht wird und anschließend ein Abfall der Kraft zu verzeichnen ist. Bei einer Schichtdicke von 0,1mm lässt sich eine maximale Anhaftkraft von ca. 7N bei Raumtemperatur und etwa 8N bei 50°C Umgebungstemperatur bezogen auf einen Tape Streifen ermitteln. Bei Raumtemperatur wird das Maximum der Anhaftkraft allerdings erst nach einer Trocknungszeit von ca. 30 Minuten erreicht. Diese Zeit lässt sich auf 4 Minuten reduzieren, indem die Umgebungstemperatur auf 50°C erhöht wird. In Abhängigkeit von der notwendigen Anhaftkraft, die sich aus den Spezifikationen des Tapes und der Krümmung der Werkzeugoberfläche einstellt, kann eine Schichtdicke und eine Umgebungstemperatur ausgewählt werden, mit der eine geringe Haftung der Bänder realisiert werden kann.

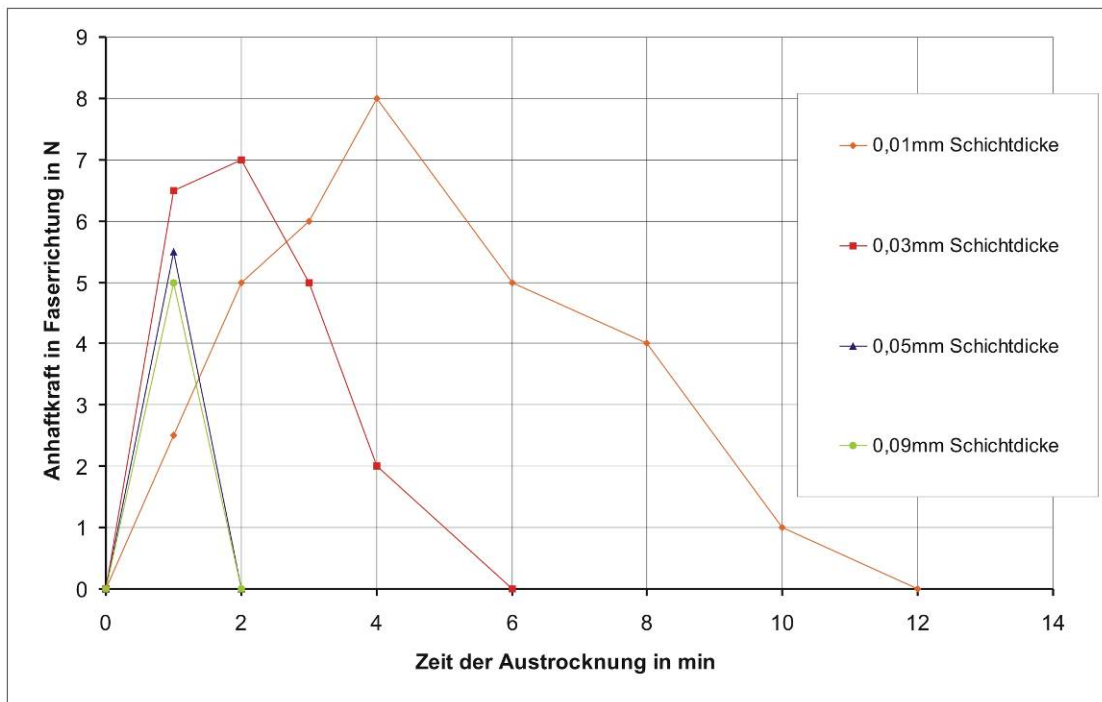


Abbildung 3-20: Anhaftkräfte bei unterschiedlichen Schichtdicken bei 50°C

Neben den Anhaftkraft-Versuchen ist zusätzlich das Trennmittel einem Prozessversuch unterzogen worden. Dabei ist eine Schichtdicke von 0,05mm auf einer Werkzeugplatte aufgetragen worden und gemäß den Ergebnissen aus den Anhaftkraft-Versuchen nach 1 Minute mit den Ablege-Versuchen begonnen worden. Bei der Ablage zeigt sich, dass das notwendige Kräftegleichgewicht von Rollenreibungskraft, Haftkraft des Trennmittels und der Tapespannungskraft auch bei Erhöhung der Andruckkraft nicht erzielt werden kann. Das Thermoplasttapes kann somit nicht auf der Werkzeugform fixiert werden. Zusätzlich verunreinigt das vergleichsweise niedrig-viskose Trennmittel bei dem Ablegeprozess die Andruckrolle, sodass diese nach jeder Ablage gereinigt werden muss. Nur durch mechanische Fixierung der Tapes am Anfang einer abzulegenden Bahn kann eine vollständige Tapelage auf der Werkzeugform abgelegt werden. Die Tapespur zeigt deutlich, dass sich links- und rechtsseitig der Rollenbahn ein hoher Schichtdickengradient des Trennmittels durch die Verdrängung der Andruckrolle aufbaut. Auch in diesem Fall tritt eine starke Rollenverschmutzung auf, die bei weiteren Tapelagen das Trennmittel auf die Oberseite des Tapes transportieren würde und somit eine hochwertige Verbindung der Tapes verhindern würde.

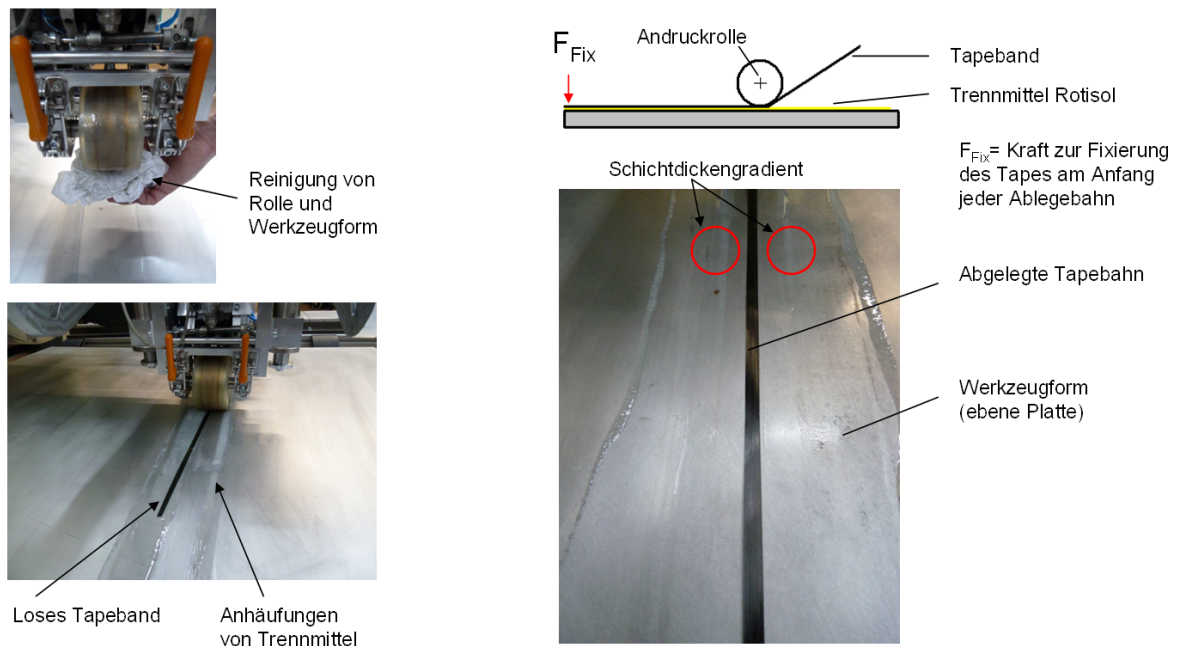


Abbildung 3-21: Prozessuntersuchungen zur Erstlagenfixierung auf ebener Form

Im Hinblick auf die prozesstechnischen Eigenschaften, die ein Trennmittel besitzen muss, um wirtschaftlich und prozessfähig beim laserunterstützten Tapelegen einsetzbar zu sein, lassen sich folgende Schlussfolgerungen treffen:

- Die Verunreinigungen, die durch das Trennmittel am Bauteil verbleiben, beschränken sich nicht nur auf die Unterseite des Laminates. Durch die Kontamination der Andruckrolle gelangt das Trennmittel beim spaltfreien Ablegen der Tapes nebeneinander auch auf die Oberseite eines bereits liegenden Tapebandes und führt somit beim laserunterstützten Konsolidieren der Nachfolgeschicht zur Verunreinigung im Bauteilinneren
- Eine Reinigung der Werkzeugform stellt sich als sehr zeitaufwendig dar
- Die mit dem Trennmittel Rotisol erzielbaren Haltekräfte haben nicht ausgereicht, um den auftretenden Motor- und Reibmomenten zu Beginn des Legevorganges durch die Tapespannung sowie den inneren Reibkräften entgegen zu wirken. Das Tapeband musste folglich mechanisch festgehalten werden.
- In der Folge ließ sich feststellen, dass die Andruckrolle das Trennmittel teilweise verdrängt und es zu Anhäufungen am Rand der Rollenbahn kommt und die zuvor aufgebrauchte Schichtdicke nicht konstant bleibt.
- Das Trennmittel wurde bei Raumtemperatur und auf einer 50 °C warmen Platte auf seine Hafteigenschaften und die Haftdauer untersucht. Im Verarbeitungsprozess herrschen jedoch Werkzeug- und Konsolidierungstemperaturen von über 200 °C. Das wässrige Trennmittel Rotisol kann bei dieser Temperatur keinen dauerhaften Anhaftmechanismus bieten.

Entwicklung / Aufbau der Kinematik

Das kinematische System wurde zusammen mit der Konstruktion des Tapelegekopfs entwickelt und ist zeitgleich mit der Montage des Tapelegekopfs mechanisch aufgebaut und in Betrieb genommen worden. Das kinematische System besteht aus dem Knickarmroboter mit 6 frei beweglichen rotatorischen Achsen (Tragkraft 360kg, Gewicht Tapelegekopf 340kg) sowie aus einer zusätzlichen rotatorischen Achse zur Drehung des Werkzeugs in der horizontalen Werkzeugebene. Der Roboter besteht aus einem feststehenden Grundgestell, auf dem sich um eine senkrechte Achse, das "Karussell", mit Schwinde, Arm und Hand

dreht. An der Hand ist über den Anbauflansch der Tapelegekopf befestigt. Die Traglast und das Eigengewicht der Gelenkkomponenten werden durch ein in sich geschlossenes Gewichtsausgleichssystem statisch weitgehend ausgeglichen. Die Wegmessung für die Grund- und Handachsen (A1 bis A3 bzw. A4 bis A6) erfolgt über ein zyklisch absolutes Wegmesssystem mit einem Resolver für jede Achse. Der Antrieb erfolgt durch transistorgesteuerte, trägheitsarme AC-Servomotoren. In die Motoreinheiten sind Bremse und Resolver integriert. Der Arbeitsbereich des Roboters wird in allen Achsen über Software-Endschalter begrenzt. Mechanisch werden die Arbeitsbereiche der Achsen 1, 2, 3 und 5 über Endanschläge mit Pufferfunktion begrenzt (Abbildung 3-22).

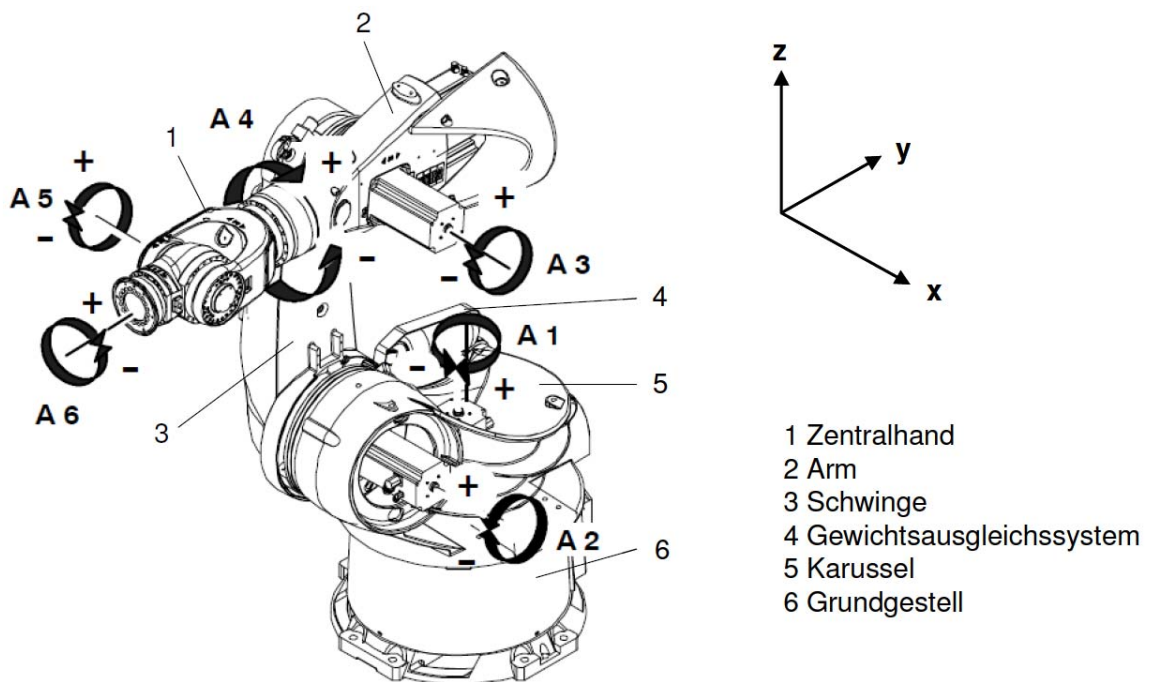


Abbildung 3-22: Kinematisches System des Knickarmroboters

Bei der Anbindung des Tapelegekopfs an die Kinematik war zu beachten, dass der Schwerpunkt des Tapelegekopfs aus kinematischen Gründen möglichst dicht am der Anflanschfläche des Robotersystems befestigt werden muss. Um den vom Hersteller angegebenen Bereich einhalten zu können, ist innerhalb des Projekts die Konstruktion des Tapelegekopfs gleichzeitig mit der Umsetzung der Kinematik erfolgt. Die kinematische Anbindung des Tapelegekopfs an das Robotersystem war daher eine Teilaufgabe, die im Rahmen der Gesamtkonstruktion mit umgesetzt wurde und mit der Montage des Legekopfs abgeschlossen.

Aufgrund der räumlich begrenzten Arbeitszelle ist für die Werkzeugform eine zusätzliche Drehachse aufgebaut und umgesetzt worden. Die durchgeführten Kollisionsbetrachtungen des modellierten Gesamtsystems haben innerhalb des Arbeitsraums eine Vorzugsbewegungsrichtung des Tapelegekopfs aufgezeigt, bei der sowohl in Ablegerichtung als auch quer dazu ausreichend Freiraum für die Herstellung des Bauteils ist. Durch die Rotation des Werkzeugs kann diese Bewegungsrichtung für verschiedene Ablegewinkel derart ausgenutzt werden, sodass die Fertigung quasiisotroper Laminate ermöglicht wurde.

Entwicklung einer CAD / CAM- Kopplung

In Zusammenarbeit mit der Firma Cenit Systemhaus AG ist der Prozess des thermoplastischen Tapelegens analysiert worden. Ferner wurden die einfließenden Prozessparameter bestimmt und in einem Anforderungskatalog festgehalten. Darüber hinaus konnten Spezifikationen für die Konzeption einer Steuerungsstrategie definiert werden:

- **Spaltfreies Nebeneinanderablegen** der Tapes (bis zu 6 Bändern) zu einer kompletten formabdeckenden Bauteilschicht mit einem vorher definierten Faserwinkel der abzulegenden Prepregs.
- Einteilung der Oberflächengeometrie in sog. **Sections**, in denen eine zweidimensionale Tapeablage möglich ist (sectioning-Algorithmus, Entwicklung von speziellen Ablegestrategien für nichtabwickelbare Oberflächen (Spaltproblematik).
- Der Laminataufbau wird bis zu einer vorgegebenen **Dicke des Bauteils** realisiert. Während des Schichtaufbaus ändert sich für jede abzulegende Schicht in Abhängigkeit von der Werkzeugoberfläche die Werkstückoberfläche. Daher müssen die Ablegebahnen bzw. der Belegungsplan für jede Schicht neu erstellt und angepasst werden. Ein entsprechender und bereits eingesetzter Normalen-Offset wird mit im Rahmen der CAD/CAM-Kopplung berücksichtigt.
- Weitgehende freie **Einstellbarkeit des Faserwinkels** der Tapeschichten für den Laminataufbau des zu fertigenden Bauteils (in Abhängigkeit von der Geometrie des zu fertigenden Bauteils / Oberfläche).
- Berücksichtigung einer **Breitentoleranz der Tapebänder** von ca. $\pm 0,1$ mm.
- Die abzulegende **Tapebreite** beträgt 6mm pro Tape, es können mit dem Tapelegekopf bis zu 6 Tapes gleichzeitig abgelegt werden.
- Die zu verarbeitende **Tapedicke im Projekt** beträgt 0,15mm. Dabei muss eine Dickentoleranz der Tapebänder von ca. $\pm 0,05$ mm berücksichtigt werden.
- Die Ablage von unterschiedlichen **Tapeanzahlen** ist vorzusehen (In Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie und des Analysewerkzeuges). Dabei ist zu berücksichtigen, dass immer nur Tapes abgelegt werden können, die direkt nebeneinander im Tapelegekopfsystem angeordnet sind (z.B. Tapebänder 2-5 oder 1-3, etc.).

Anhand der finalen Demonstratorgeometrie sind Voruntersuchungen der Firma Cenit AG an dreidimensionalen Testoberflächen durchgeführt worden. Die Tapeablage konnte dabei mit dem aufgebauten Tapelegesystem in Verbindung mit dem Robotersystem erfolgreich simuliert und auf die Anlage übertragen werden.

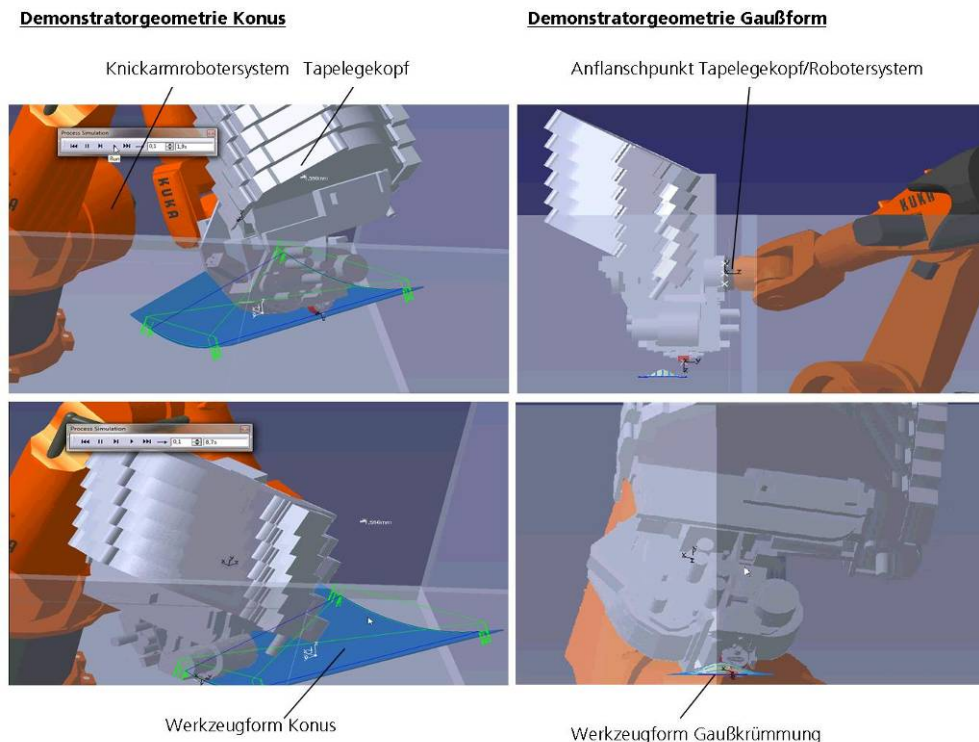


Abbildung 3-23: Modellerte CAD/CAM-Bewegungen des TLK auf den Demonstratorflächen

Dazu ist zunächst die Arbeitszelle mit dem möglichen Bewegungsraum des Knickarmroboters sowie der Knickarmroboter selbst mit dem Tapelegesystem und Werkzeugform modelliert worden. Mit der CAD/CAM-Software der Firma Cenit konnten anschließend Bahnpfade ermittelt werden, die die möglichst spaltfreie Ablage der Tapebänder bei verschiedenen Faserrichtungen realisieren. Wichtig für die Ablage der Bänder auf der Form ist dabei die exakte Vermessung des Tool-Center-Points, der den Mittelpunkt der generierten Bahnpfade bei der Ablage beschreibt. In Abhängigkeit dieses Bezugspunktes und der Geometrie der Werkzeugform sowie der zwingenden Randbedingung des Tool-Center-Points, stets orthogonal zur Werkzeugoberfläche zu verfahren, werden mit Hilfe der CAD/CAM-Software entsprechende Roboterbewegungen der einzelnen Bewegungsachsen des Robotersystem erzeugt.

Abbildung 3-23 zeigt die gewählte 3D-Demonstratorgeometrien mit den generierten Bahnpfaden des CAD/CAM-Systems. Die Maschinensimulation umschließt dabei auch zur Kontrolle die Kollisionsbetrachtung des Robotersystems mit dem angeflanschten Tapelegekopf und der umgebenden Arbeitszelle. Somit können neben den Bahnpfaden auch die kinematischen Bewegungen des Tapelegekopfs im Raum simuliert und ggfs. bei Bedarf die Position der Demonstratorgeometrien relativ zum Robotersystem oder zur Arbeitszelle angepasst werden. Die somit gewonnenen Ergebnisse werden iterativ angepasst und für den Tapelegeprozess optimiert. Neben der Kollisionsbetrachtungen und der Positionierung der Demonstratorgeometrien werden in weiteren Optimierungsschritten wie z.B. die Realisierung der Bauteildicke, die Einstellung der gewünschten Faserwinkel, die Breitentoleranz der Tapebänder sowie die Anzahl der abzulegenden Tapebänder. Der Test der CAD/CAM-Kopplung ist zur realen Bauteilherstellung nach der Inbetriebnahme des Tapelegekopfs auf der hergestellten Werkzeugform durchgeführt worden.

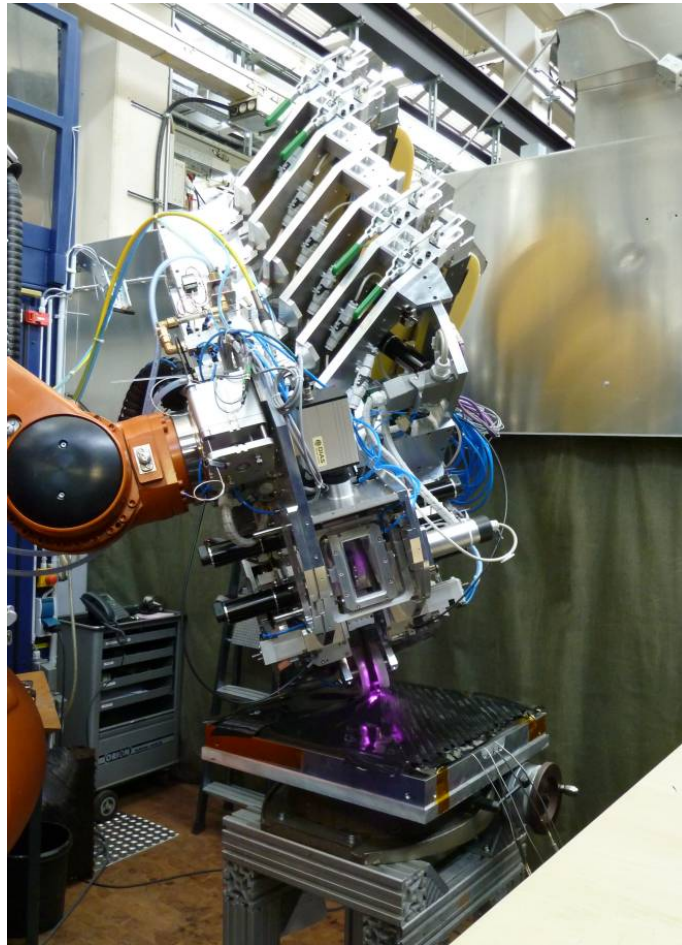


Abbildung 3-24: Bewegung des Tapelegekopfs auf dem 3D-Werkzeug mittels CAD/CAM-Unterstützung

Abbildung 3-24 zeigt den Tapelegekopf während der Tapeablage auf der 3D-Werkzeugoberfläche. Das CAD/CAM-Tool ist dahingehend angepasst worden, dass auch alle notwendigen Programmierbefehle für den Funktionsablauf des Legeprozesses in den Roboter-Programmen integriert sind und somit ein weitgehend automatisierter Arbeitsablauf ermöglicht wird.

3.4 AP4 Anwendungserprobung und Bewertung

Nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme des Tapelegekopfs sowie dem Test der CAD/CAM-Kopplung ist das Demonstratorbauteil in den verschiedenen Ablegewinkeln 0° , 45° , -45° und 90° hergestellt worden. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine flächendeckende Ablage auf 3D-Geometrien möglich ist. Innerhalb der ersten Tests konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass Abhängigkeiten zwischen den Prozessparametern Krümmungsradius der Ablegeebene, Andruckkraft, Scherweg des Bandes sowie der eingestellten Verarbeitungstemperatur existieren.

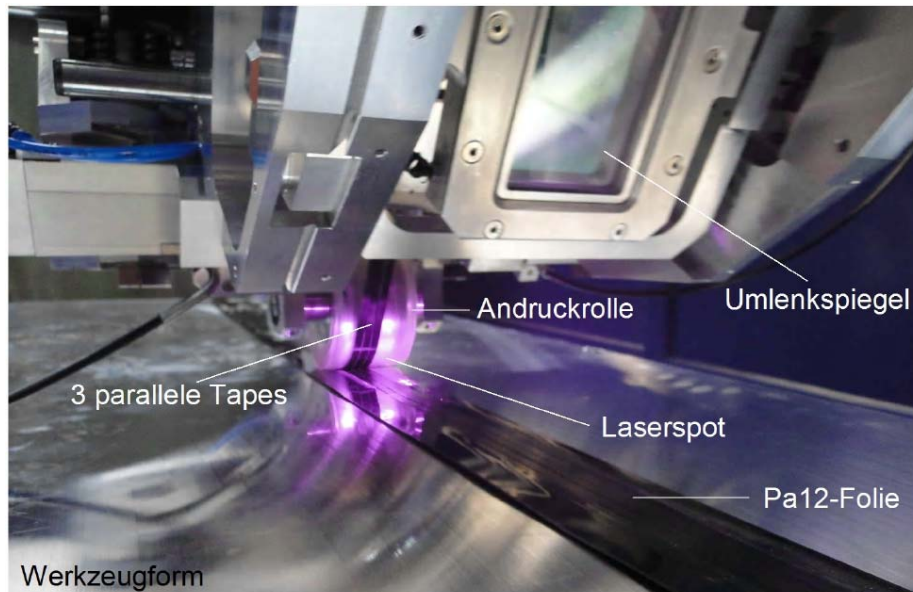


Abbildung 3-25: Erste Ablegeversuche mit dem Tapelegekopf auf ebener Werkzeugform

Ziel erster Legeversuche war die Verifizierung der Funktionsfähigkeit der einzelnen Tapelegekopf-Module durch die Ablage thermoplastischer PA12-Prepregs auf einer ebenen Werkzeugform. Es wurden zunächst dabei drei Tapes parallel abgelegt (vgl. Abbildung 3-25). Im Rahmen dieser ersten Ablegeversuche konnte die Funktionalität der Module Führungssystem, Laseroptik, Laserhöhenverstellung, Andruckkraftregelung und der mechanischen Schneideinheit gezeigt werden. Zu dem Führungssystem, welches für jedes einzelne Tape vorhanden ist, zählen die Tafeführung von der Spulenbevorratung bis hin zur Vorschubeinheit, die das Tape letztendlich unter die Andruckrolle vorschiebt. Mit Hilfe der Laseroptik erfolgte das Einstellen der Spotgröße auf die Anzahl der abzulegenden Tapes. Wie in Abbildung 3-25 zu sehen ist, ermöglicht die aktive Laserhöhenverstellung das gleichmäßige Aufteilen des Laserspots auf neu zugeführtes Tape und abgelegtes Substrat. Durch die Regelung der Andruckkraft war es möglich zwei Bahnen mit insgesamt sechs Tapes spaltfrei nebeneinander abzulegen. Mit Hilfe dieses ersten Versuchs konnte die grundlegende Funktionsfähigkeit des neu entwickelten FPK für die Tape-Ablage auf 2D Werkzeugformen nachgewiesen werden.

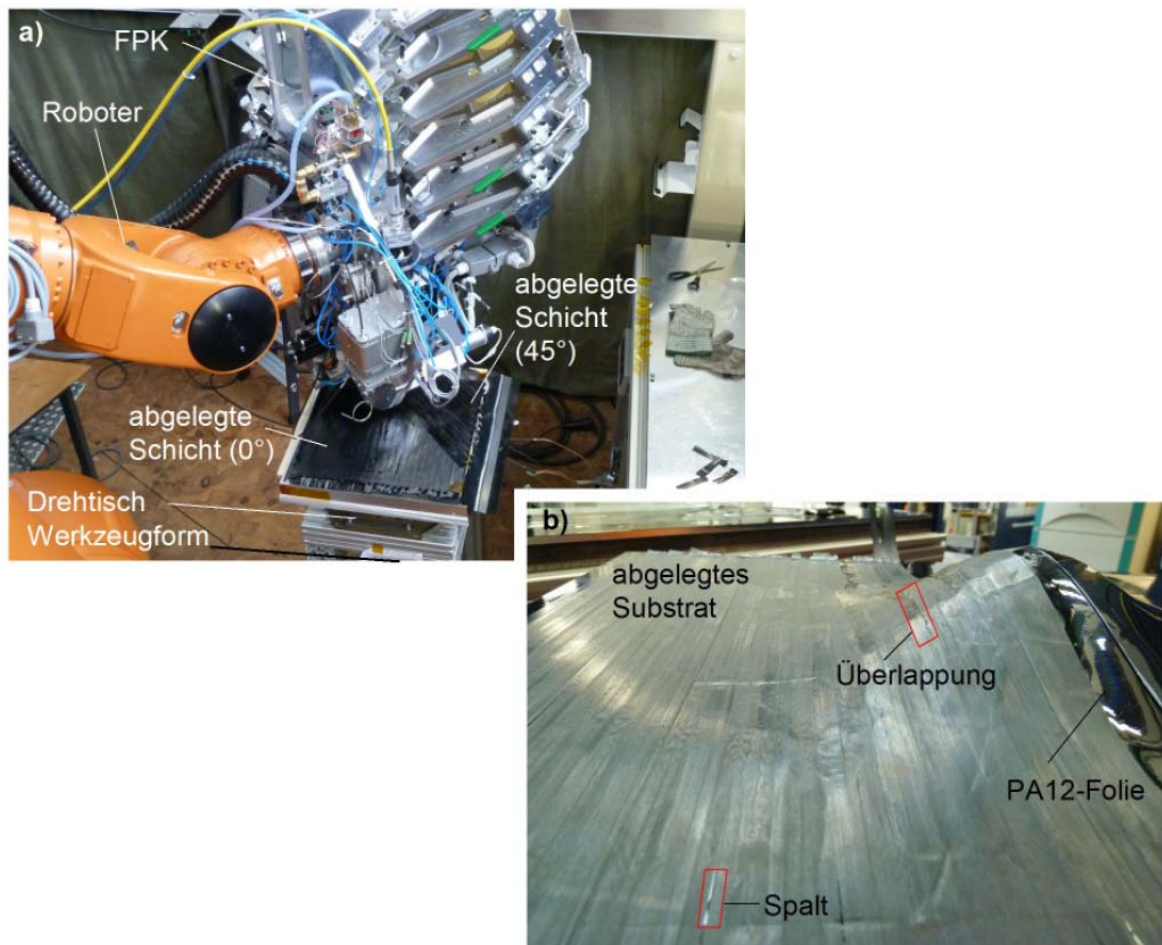


Abbildung 3-26: Versuchsaufbau für erste Ablegeversuche auf einer 3D-Werkzeugform

Darauf aufbauend wurden erste Ablegeversuche auf der dreidimensionalen Werkzeugform durchgeführt (Abbildung 3-26). Eine erste Tapeschicht wurde unter Einbezug der erstellten CAD/CAM-Legeprogramme unter einem Winkel von 0° abgelegt (Abbildung 3-26,b). Anschließend wurden weitere Schichten unter Winkeln von 90° , $+45^\circ$ und -45° über der ersten Schicht abgelegt. Auch hier wurden vorläufig jeweils drei Tapes pro Bahn parallel abgelegt. Wie in Abbildung 3-26,b) zu sehen ist, konnte die Gauß-Werkzeugform vollständig mit thermoplastischen Tapes belegt werden, d.h. das grundlegende Funktionsprinzip der Verwendung mehrerer schmaler Tapebänder konnte auch für die Tape-Ablage auf dreidimensionalen Werkzeugformen nachgewiesen werden. Folglich ist es möglich, durch das flexibel aufgehängte Andrucksystem sowohl Roboterungenauigkeiten auszugleichen, wie auch sich der Werkzeugform anzupassen. Zusätzlich verfügt die Andruckrolle durch den Silikonmantel selber über ein gewisses Anpassungsvermögen an die Werkzeugform. Darüber hinaus zeigt das Ergebnis, dass die aktive Laserhöhenverstellung funktioniert, d.h. dass durch die automatische Verstellung des Umlenkspiegels zu jeder Zeit die optimale Verarbeitungstemperatur von Tape und Substrat im Zwickelbereich gewährleistet wird. Während der ersten Ablegeversuche kam es zu dem Auftreten von Spalten und Überlappungen, welche die Laminatqualität beeinflussen. Das kann in diesem ersten Stadium der Prozessbetrachtung allerdings auf eine Vielzahl von Ursachen und Wechselwirkungen zurückzuführen sein:

- Reibungs- und Spannungszustände im Tape während der Verarbeitung
- ungleichmäßige Leistungsverteilung über der Spotgröße

- zu geringe / hohe Anpresskraft
- ungünstig gewählte Ablegestrategie
- Einstellung der Regelparameter
- Positionierungenauigkeiten der Roboterachsen

Die auftretenden Effekte müssen daher zur Erzielung hochwertiger CFK-Lamine mit thermoplastischer Matrix in weiterführenden Prozessuntersuchungen analysiert werden. Innerhalb dieser Arbeiten ist jedoch festzustellen, dass das Ablegen von thermoplastischen Prepregs auf einer ebenen, wie auch auf einer dreidimensionalen Werkzeugform erfolgreich durchgeführt werden konnte. Zur Verbesserung der Laminatqualität sind weiterführende Prozessanalysen hinsichtlich der Optimierung der Steuerung, der Ablegestrategie, der Erstlagenfixierung etc. notwendig.

3.5 AP 5 Prozess- und Bauteilanalyse

Auswahl einer Probenform und Erstellung eines Anforderungskatalogs

Die Vorgehensweise zur Auswahl der 3D-Demonstratorgeometrie ist in xy dargestellt. An dieser Stelle wird die notwendige 2D-Probengeometrie zur Herstellung der Prüflamine festgelegt. In Abstimmung mit dem IKV ist die Probengeometrie aus CFK/PA12 wie folgt bestimmt worden: Länge 1000mm, Breite ca. 20mm, Dicke ca. 2mm. Die Tapes sollen dabei nach dem Mauerprinzip versetzt geometrisch angeordnet werden (vgl. Abbildung 3-27).

Als zu untersuchende Einflussparameter werden für die Versuche

- der Lasereinstrahlwinkel, kombiniert mit Tapeinlaufwinkel,
- die Prozesstemperatur (Laserleistung) und
- die Andruckkraft

festgelegt. Mit diesen Parametern soll zunächst grundsätzlich eine erste Bewertung und Beurteilung der Bauteilqualität erfolgen. Weitere Einflussparameter wie die Legegeschwindigkeit (Bandabzugsgeschwindigkeit), Tapespannung und verschiedene Materialien können ggfs. bei nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt werden.

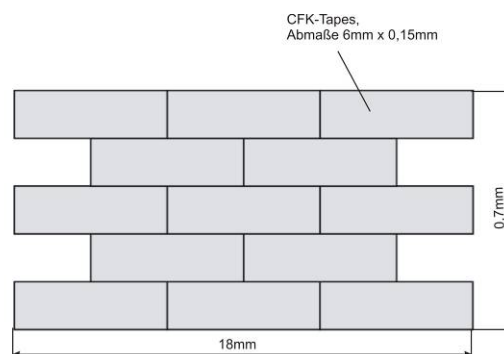


Abbildung 3-27: Aufbau eines Probengeometrie-Querschnitts

Als Untersuchungsmethoden werden für die Proben

- die Ultraschallprüfung,
- die DSC-Analyse sowie
- Schliffbilder des Laminats (Lichtmikroskopische Untersuchung)
- Biegeprüfung

festgelegt. Mit diesen Untersuchungen können Aussagen über Lunker, Laminatfehler, Poren, Delamination und Kristallisationsgrad getroffen werden.

Prozessgrundlagenforschung und Prozessanalyse mit Hilfe des realisierten Tapelgekopfs

Die Versuche zur Prozessgrundlagenforschung wurden bereits im Jahr 2009 mit einem vorhandenen Mono-Tapelegekopf des Fraunhofer IPT durchgeführt. Mit diesem System kann nur ein einzelnes Band verarbeitet werden. Die herstellbaren Laminatgeometrien sind darüber hinaus auf ebene Flächen beschränkt, da sich das Andrucksystem nicht flexibel einer Kontur anpassen kann. Als Material für die Versuche wurde ein Prepreg-Material der Firma Suprem SA, Yverdon-les-Bains, Schweiz, aus der Produktreihe „Suprem T narrow“ verwendet. Das Tape ist dabei 12 mm breit und 0,15 mm dick und besteht aus unidirektionalen Kohlenstoff-Endlosfasern, die mit einer PA12 Matrix getränkt sind. Bei den Fasern handelt es sich um AS4 HT-Kohlenstofffasern der Firma Hexcel (Stanford, Connecticut, USA), die mit einem Faservolumengehalt von 55 % im Tape verarbeitet sind.

Zur Verifizierung und statistischen Absicherung der gewonnenen Ergebnisse ist der Versuchsplan nach Tabelle 3.1 erstellt und die entsprechenden Prüflamine angefertigt worden. Die Auslegung der Probengeometrie ist dabei in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen erfolgt, das die benötigten Einrichtungen für die Untersuchungen an den fertigen Probekörpern besitzt. Die Geometrie ist dabei mit den gegebenen Möglichkeiten am Fraunhofer IPT abgestimmt und beschreibt eine möglichst lange, ebene Strecke, damit eventuell auftretende Schwankungen und Fehler während des Prozesses im Laminat sichtbar gemacht werden können. Aus dem Laminat sollen mehrere Proben sowohl quer als auch längs der Faserrichtung entnommen werden. Bei der Bestimmung der Laminatgeometrie müssen die Normen der Untersuchungsmethoden berücksichtigt werden. Die Probengeometrie hat daher die Abmaße 2000 mm x 60 mm und besteht aus 14 unidirektionalen Lagen. Bei der Verwendung von 12 mm breitem Tape besteht jede Lage abwechselnd aus 5 bzw. 4 Einzelbahnen die im Mauerprinzip abgelegt werden.

Die Laminatqualität wird im wesentlichen von den Prozessparametern Konsolidierungskraft, Laserleistung, Verarbeitungstemperatur und -geschwindigkeit sowie der Bandspannung beeinflusst. Zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit und Stabilität des Prozesses, sind diese Daten während dem Prozess kontinuierlich erfasst worden. Die Beeinflussung der Laminatqualität durch das Bedienpersonal und äußere Bedingungen können weitestgehend ausgeschlossen werden, da es sich um einen fast vollständig automatisierten Prozess handelt. Für die Ermittlung der Laminatqualität sind 9 Prüflamine – sogenannte Faktorstufenkombinationen (FSK) – mit unterschiedlichen Prozessparametern im Rahmen eines statistischen Versuchsplans hergestellt und untersucht worden.

Zur mechanischen Ermittlung der Verbindungsqualität der Laminatlagen untereinander sind die Laminatproben an das IKV übergeben worden, wo mit 3P-Biegeversuchen und

Keilprüfung die Qualität der Verbindungsfestigkeit getestet, überprüft und statistisch hinterlegt worden ist. Die Begutachtung der morphologischen Struktur der Bauteile wird dabei mittels Ultraschallanalyse durchgeführt. So ist eine Aussage über Fehlstellengehalt, Matrix-, Faseranhäufungen und Fehlstellenverteilung über das Bauteil möglich.

FST-Nr. Prozessparameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lasereinfallswinkel [°]	-3	0	0	0	0	-6	-6	-6	-6
Geschwindigkeit [mm/s]	187,5	250	250	125	125	250	250	125	125
Druck	3	6	0	6	0	6	0	6	0
mittlere Aufweitung [mm]	13,57	14,74	13,29	15,06	13,55	12,50	12,02	13,23	12,22
Ablageabstand [mm]	12,4	13,6	12,9	14	13	12	12	12,6	12
Differenz [mm]	1,17	1,14	0,39	1,06	0,55	0,50	0,02	0,63	0,22

Tabelle 3.1: Versuchsübersicht

Die Laminat offenbaren in den Ultraschallscans eine gute Qualität und somit eine geringe Schallabschwächung. Über die gesamte Länge des Laminates zeigt sich darüber hinaus eine gleichbleibende Struktur in Ultraschallergebnissen. Besonders deutlich sind in den Laminaten Linien längs der Faserrichtung mit erhöhter Schallabschwächung zu erkennen. Aufgrund der Abstände der Linien zueinander und ihrem teilweise kontinuierlichen Verlauf von Anfang bis Ende sind diese Linien durch die Fugestellen der einzelnen Tapes nebeneinander zu erklären. Die Abschwächung des Schalls kann an diesen Stellen entweder von Aufdickungen und Wellungen der Oberfläche oder von schlecht gefügten Tapes und daraus resultierenden Lücken/Lunkern zwischen den Tapes herrühren. Es ist ersichtlich, dass ein Lasereinfallswinkel von 0° tendenziell zu besseren Laminaten führt, ebenso wie eine geringe Geschwindigkeit. Bei einem Lasereinfallswinkel von -6° sind Auswirkungen der Andruckkraft in der Hinsicht deutlich zu erkennen, dass bei gesteigerter Andruckkraft die Anzahl der kleinen abgegrenzten Bereiche mit hoher Schallabschwächung sichtbar ansteigt. Abbildung 3-28 zeigt, dass eine untertemperierte Werkzeugform zu einer stark steigenden Schallabschwächung führt, die Verteilung ist jedoch dabei gleichmäßiger.

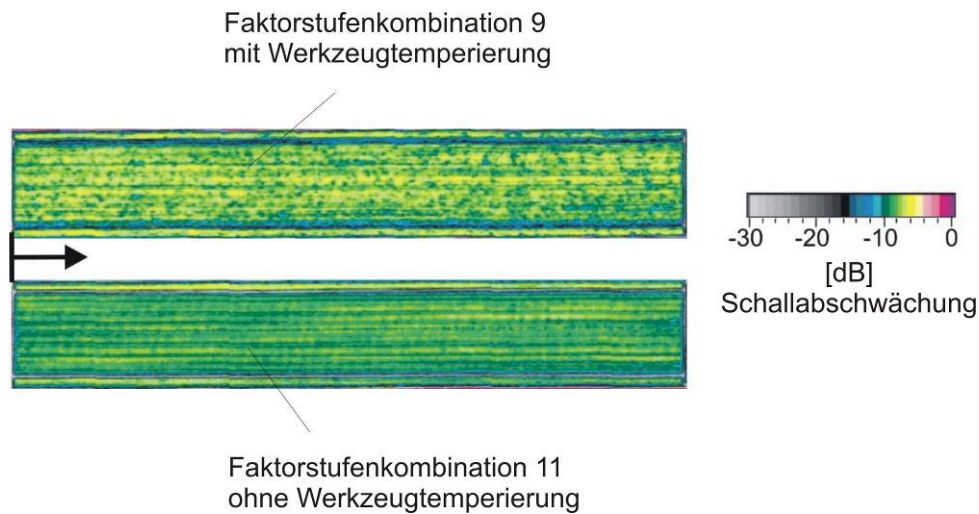


Abbildung 3-28: Ausschnitte der Ultraschallscans mit /ohne Werkzeugtemperierung

Abbildung 3-29 zeigt die Ergebnisse der Faktorstufenkombinationen und des gepressten Referenzlaminates. Das Referenzlaminat wurde zusammen mit den Versuchslaminaten am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen, getestet. Alle Laminat versagen im Test durch Knicken der Laminatstruktur. Dabei spielt die Verbindung der Lagen untereinander eine wichtige Rolle, denn die interlaminare Verbindungsfestigkeit ist matrixdominiert. Die Matrix hat durch ihre Stützwirkung für die Fasern einen Einfluss auf die Biegefestigkeit der Laminat, wohingegen die Faser Biegemodul bestimmend ist. Ein schnelles Versagen der Laminat durch eine nicht ausreichende Biegefestigkeit ist somit ein Hinweis auf eine schlechte Verbindungsqualität.

In Abbildung 3-29 sind deutlich die guten Biegemodulwerte der Laminat zu erkennen, die im Bereich des Plattenwertes liegen und sogar über diese hinaus gehen (FSK 1, 2, 4). Die Biegefestigkeit der Platte kann durch die Laminat nicht erreicht werden, sie erreichen mit FSK 9 maximal ca. 87 % der Plattenwerte. Die Abweichungen der Ergebnisse innerhalb einer Probe liegen bei 3 % bis 7 %.

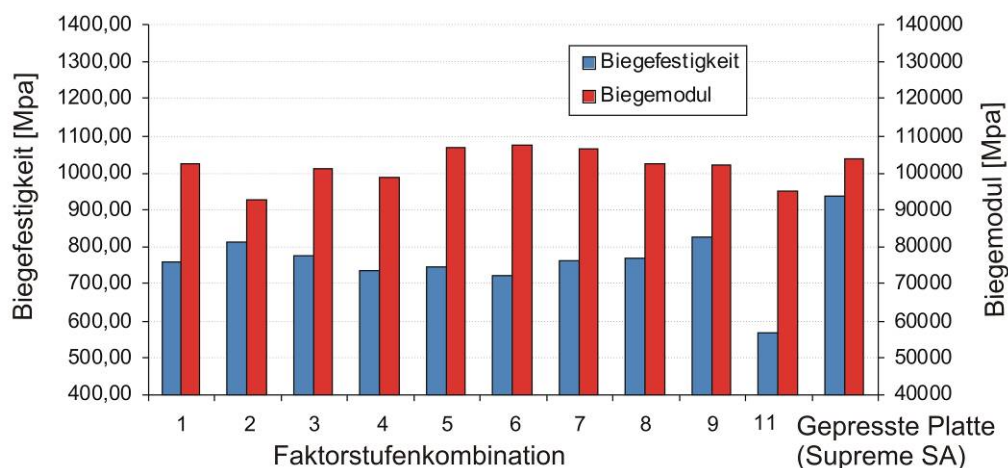


Abbildung 3-29: Ergebnisse der 3P-Biegeprüfungen

Ebenfalls deutlich ist der starke Abfall der Biegefestigkeit bei FSK 11 zu sehen. Ihre Parameter sind mit FSK 9 vergleichbar, als einziger Unterschied ist die Temperatur der Werkzeugform zu nennen, in FSK 11 ist die Werkzeugform untemperiert. Die Auswertung zeigt keine signifikanten Effekte auf Biegemodul oder -festigkeit, da der Probenumfang für die Ermittlung einer Signifikanz zu gering ist. Sie liefert allerdings eine Aussage über die Stärke der Effekte. Starke Effekte bilden demnach die Wechselwirkungseffekte von Lasereinfallswinkel/ Ablagegeschwindigkeit und Lasereinfallswinkel/ Andruckkraft in Biegefestigkeit und Biegemodul. Bei den Haupteffekten lässt sich allein dem Lasereinfallswinkel eine Auswirkung auf den Biegemodul zuschreiben. Auffällig ist, dass die Effekte mit dem größten Einfluss immer eine Wechselwirkung mit dem Lasereinfallswinkel aufweisen oder der Lasereinfallswinkel selber einen hohen Einfluss hat.

Zur Maximierung der Biegefestigkeit muss nach der Wechselwirkung Ablagegeschwindigkeit/ Lasereinfallswinkel der erhöht werden. Dies hat jedoch genau den gegenteiligen Effekt auf den Biegemodul des Laminates. In Folge der Wechselwirkung von Andruckkraft/Lasereinfallswinkel stellt sich mit Erhöhen der Andruckkraft für die Biegefestigkeit bei einem Lasereinfallswinkel von -6° und für den Biegemodul bei einem Lasereinfallswinkel von 0° eine starke Veränderung ein. In beiden Fällen wirkt sich die jeweilige Veränderung negativ auf die Biegefestigkeit/Biegemodul aus. Der Effekt des Lasereinfallswinkels auf den Biegemodul zeigt ein Ansteigen der Werte mit verringertem Lasereinfallswinkel.

Für die Prüfung der Laminare im Keilprüfstand werden zu jeder Faktorstufenkombination jeweils drei Keilproben hergestellt. Die Ablagebedingungen entsprechen den Bedingungen bei der Laminatherstellung. Die Proben werden aus 12 mm breitem CF-PA12 Tape hergestellt und sind ca. 1 m lang. Die mittels Keilprüfstand ermittelten und gemittelten Werte für die Verbindungsgüte zwischen zwei CF-PA12 Tapes zeigen nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Faktorstufen. Dabei treten in den Messungen Standardabweichungen von bis zu 12% (vgl.: Tabelle 3.2) auf.

Faktorstufe	Maximalwert [N/mm]	Mittelwert [N/mm]	Standardabweichung [N/mm]
1	3,61	3,05	0,17
2	3,51	3,06	0,19
3	4,22	3,67	0,24
4	4,21	3,51	0,30
5	4,52	3,73	0,33
6	3,01	2,60	0,19
7	3,94	3,12	0,36
8	3,85	3,29	0,33
9	2,99	2,53	0,20

Tabelle 3.2: gemittelte Spaltkräfte der Keiltests

Aus den Einzelwerten der Proben ist festzustellen, dass sich ein signifikanter Effekt auf die erforderliche Spaltkraft durch den Lasereinfallswinkel und die Kombination von Konsolidierungsdruck und Geschwindigkeit einstellt: Danach ist mit steigendem Lasereinfallswinkel eine höhere Spaltkraft erforderlich, was bedeutet, dass eine bessere Verbindungsqualität vorliegt. Die Veränderung der Spaltkraft durch die Änderung der

Andruckkraft ist durch Wechselwirkung mit der Ablagegeschwindigkeit bei kleineren Geschwindigkeitsbereichen schwächer als bei hohen Geschwindigkeiten. Bei niedrigen Geschwindigkeiten ist das Material bereits stärker erwärmt, so dass bei geringen Anpressdrücken eine hohe Verschweißung stattfindet und diese durch erhöhte Andruckkraft nur geringfügig verändert werden kann.

Der alleinige Effekt der Andruckkraft zeigt sich bei fast allen Faktorstufenkombinationen (FSK) durch eine höhere Spaltkraft bei einer Andruckkraft von 0 bar (Eigengewicht der Andruckrolle), nur FSK 8 zeigt ein entgegengesetztes Verhalten. Dazu muss der Eintrag der Energie in dieser FSK beachtet werden, der ca. 20% höher ist als in den übrigen FSK. Der erhöhte Eintrag führt zu einer besseren Verschweißung der Tapes und dadurch zu erhöhten Spaltkräften.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass im Vergleich zu einem Pressprozess bereits ca. 85% der Festigkeiten im Tapelegeverfahren erreicht werden können.

4 Zusammenfassung der durchgeführten Projektarbeiten

In den vom Fraunhofer IPT durchgeführten Arbeitspaketen AP1, AP2, AP3, AP4, AP5.1 und AP5.2 wurde der Arbeitsplan zeitlich und inhaltlich aufgrund der aufwändigen Konstruktions- und Montagearbeiten in AP2 angepasst und nach Bewilligung eines entsprechenden Projektverlängerungsantrags um 5 Monate bis einschließlich Mail 2011 verlängert.

In Arbeitspaket 2 wurde ausgehend von einem durch das Konsortium definierten Lasten- und Pflichtenheft ein Tapelegekopfsystem entwickelt, welches die gleichzeitige Ablage mehrerer Tapes auf 3D-Werkzeugflächen ermöglicht. Dazu wurde ein Tapelegekopf mit den entsprechenden Teilfunktionen konzipiert, konstruiert und aufgebaut (AP2.1). Neben einem flexiblen Andruckrollensystem (AP2.2) und einer anpassbaren Laseroptik (AP2.3) ist ein Steuer- und Regelungssystem entwickelt worden, in welches die einzelnen anzusprechenden Module integriert und zu einem funktionsfähigen Gesamt-Prozessablauf zusammen gefügt werden. Nach der Montage des Tapelegekopfs und der Inbetriebnahme sind erste Lamine auf ebenen Flächen erzeugt worden, deren hohe Verarbeitungsqualität eine Übertragung der Prozesseinstellungen und -parameter auf 3D-Werkzeugflächen ermöglicht.

In Arbeitspaket 3 ist die notwendige Prozesstechnik für die Ablage auf 3D-Flächen erfolgt. Dazu ist innerhalb von AP3.1 neben der Ableitung von Prozessanforderungen ein Demonstratorbauteil definiert worden, anhand dessen die Grenzen der Technologie auf 3D-Flächen bestimmt werden können. Dieses ist innerhalb des Projekts konstruiert, gefertigt und auf einen Werkzeugunterbau montiert worden, sodass das Werkzeug mit mehreren Faserwinkeln hergestellt werden kann. Darüber hinaus ist mit Hilfe von verschiedenen wachshaltigen Trennmitteln versucht worden, eine industrietaugliche Erstlagenfixierung zu realisieren, mit der die erste Laminatschicht auf der Werkzeugform fixiert werden kann und nach Fertigstellung des Gesamtbauteils leicht entnommen werden kann (AP3.2). Zu diesem Zweck sind mehrere Trennmittel mit verschiedenen Wachs-/Wasseranteilen und verschiedenen Schmelzpunkten untersucht worden, die für die industrietaugliche Realisierung der Erstlagenfixierung zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis geführt haben. Ferner ist für den Tapelegekopf eine Bearbeitungszelle mit einer Bewegungskinematik konstruiert und umgesetzt worden (AP3.3), mit der der Tapelegekopf über mehrachsige Bahnbewegungen über die 3D-Fläche geführt werden kann, sodass der Tapelegekopf während der Bearbeitung immer orthogonal zur Werkzeugoberfläche positioniert werden kann. Diese Bewegungen können über eine im AP3.4 entwickelte CAD/CAM-Kopplung der Robotersteuerung zu Verfügung gestellt werden, sodass der Roboter den Tapelegekopf entsprechend der Werkzeugform bewegen kann.

Nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme des Gesamtsystems sind mit der 3D-Werkzeugform Prozessuntersuchungen durchgeführt worden, in der die Funktionalität des Ablegesystems sowie der entwickelten Prozesstechnik nachgewiesen werden konnte. Innerhalb des Projekts konnte grundsätzlich der Nachweis geführt werden, dass der Ansatz für die Herstellung von endlosfaserverstärkten 3D-Thermoplastbauteilen mittels mehreren und sehr schmalen Bändern (6mm Breite) sehr potentialträchtig ist und eine flächenbündige und spaltfreie Ablage auch bei nicht abwickelbaren Geometrien zu erzielen ist. Allerdings war es innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr möglich, eine abschließende Prozessanalyse durchzuführen. Dies ist jedoch für eine weiterführende Bewertung hinsichtlich Bauteilqualität, Einsatz verschiedener faserverstärkter Thermoplastmaterialien, Grenzen des Verfahrens und Optimierung der Prozesstechnik notwendig.

Anhand eines bereits vorhandenen Tapelegekopfs ist innerhalb von Arbeitspaket 5 die mit dem laserunterstützten Tapelegeverfahren erreichbare Verbindungsqualität untersucht worden. Zu diesem Zweck sind innerhalb einer Prozessparameterstudie Prüflamine aus PA12/CF definiert und mit unterschiedlichen Prozessparametereinstellungen gefertigt und untersucht worden. Ergebnis der Untersuchungen ist, dass mit dem Tapelegeprozess in Abhängigkeit von den Prozessparametern und bei Verwendung von PA12/CF eine Verbindungsfestigkeit von ca. 85% im Vergleich zu gepressten Laminaten erreicht werden können.

5 Öffentlichkeitsarbeit

5.1 Veröffentlichungen

Abgeschlossene Veröffentlichungen:

Brecher, C.; Wenzel, C.; Dubratz, M.: Laserunterstütztes Fiber Placement – Technologie der Zukunft, Automotive Materials, Giesel-Verlag, Ausgabe 01/08, Februar 2008, S. 38-40

Brecher, C.; Wenzel, C.; Steyer, M.; Dubratz, M.: Faserverbundproduktion im Wandel der Zeit, lightweightdesign, Vieweg+Teubner Verlag, Ausgabe 5/08, September 2008, S. 46-50

Brecher, C.; Dubratz, M.; Steyer, M.; Schütte, A.; Emonts, M.; Wenzel, C.: Laser-assisted thermoplastic tape-laying systems, JEC Magazine Composites 47 (2009), 3, ISSN 1639-965X, S. 39-41

Brecher, C.; Dubratz, M.:
Laser-Assisted Tapelaying of Thermoplastic Prepregs
Veranstaltung: "JEC Composites Show", Paris, 25.03.2009

Brecher, C.; Kermer-Meyer, A., Steyer, M.; Dubratz, M., Emonts, M.:
Laser-assisted tape-laying is moving forward to 3D,
JEC Magazine Composites 57 (2010), 3, ISSN 1639-965X, S. 28-30

5.2 Messeauftritte

JEC COMPOSITES Show, Paris

- Paris, 24.-26.03.2009
- Paris, 13.-15.04.2010
- Paris, 29.-31.03.2011

6 Verwertung der Projektergebnisse

Die Verwertung der Ergebnisse des beantragten Vorhabens in Form eines marktfähigen und industrietauglichen Fertigungsprozesses wird vorrangig von den am Projekt beteiligten Industriepartnern umgesetzt. Der Einsatz und die Vermarktung der »3D-ThermoLay«-Technologie ist nach dem Projektende durch den Projektpartner AFPT B.V. nach erfolgreichem Projektabschluss geplant.

Durch die hohe Interdisziplinarität des Projekts sowie die enge Mitarbeit aller Verbundpartner im Forschungsprojekt kann eine Verwertung der in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern entwickelten Projektergebnisse über die Firma AFPT B.V. erfolgen. Die einzelnen Projektpartner bringen dazu ihre entwickelten Teilmodule der Technologie mit ein. Im einzelnen sind dies aus Sicht der Projektpartner folgende Punkte:

AFPT B.V.

Die Firma AFPT B.V. betrachtet den Tapelegekopf als Technologieplattform und Technologieträger, bei dem einzelne Teilmodule wie z.B. die Laserschneideinheit, das Führungskonzept, die Laser-Zoom-Optik, die Andruckeinheit oder die Verschweißeinheit spezifisch für Kundenanfragen in bestehende Tapelegekopfsysteme eingesetzt werden können. Aus diesem Grund wird zwischen dem Fraunhofer IPT, KOELRIT GmbH und AFPT B.V. vereinbart, das Tapelegesystem nach Abschluss des Projekts zu Testzwecken bei der Firma KOELRIT GmbH aufzubauen, sodass alle Funktionen auf ihre Industrietauglichkeit getestet werden können. Innerhalb dieser Testphase ist geplant, die Ergebnisse des Projekts »3D-ThermoLay« durch eine ausgerichtete Öffentlichkeitsarbeit weiterhin werbewirksam zu publizieren.

Cenit AG

Generisch integrierte Lösungen sind nach Angabe der Firma Cenit AG für Ablegeaufgaben bei Endkunden sehr attraktiv. Aufgrund dessen strebt die Firma Cenit AG an, nach Projektende die getätigten Arbeiten und Ergebnisse zu publizieren, damit eine gezielte Vermarktung der generierten Software angestoßen werden kann. Eine weitere Zusammenarbeit im Projektkonsortium, insbesondere aber mit den Firmen AFPT B.V. und KOELRIT GmbH sowie dem Fraunhofer IPT wird daher auch nach Projektende angestrebt. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse durch das Projekt »3D-ThermoLay« ist bei Nachfrage eine schnelle Industriefähigkeit der entwickelten CAD/CAM-Kopplung gegeben.

DIAS Infrared

Ausgehend von einem Grundmodell hat die Firma Dias Infrared GmbH innerhalb des Projekts »3D-ThermoLay« eine Thermokamera für die Applikation in einem Tapelegesystem weiter entwickelt. Dabei ist das Kameragehäuse verkleinert, ein optimierter Sensor eingefügt und die Auflösung angepasst worden. Die entwickelten Neuerungen sind mittlerweile schon standardmäßig in alle Kameras integriert worden. Aufgrund der rasanten Entwicklungen bei sensorischen Komponenten, bietet auch zukünftig das nun vorhandene Kamerasystem

Potential für weitere Anpassungen, wobei immer ein Kompromiss zwischen Kosten und Qualität gefunden werden muss.

Eurocopter Deutschland GmbH

Die Firma Eurocopter hat als Endanwender im Projekt mitgewirkt, um entsprechende Einsatzpotentiale der Technologie für das Unternehmen zu identifizieren. Innerhalb des Projekts »3D-ThermoLay« hat sich die Firma Eurocopter von der Technologie überzeugt. Die Frage stellt sich nun für das Unternehmen, ob und in welcher Form die Technologie einsetzbar ist. Dafür sind weitere Untersuchungen und Kennwerte notwendig, die die Potentiale und Leistungsfähigkeit des Kopfes charakterisieren und Aussagen über die Qualität der hergestellten Bauteile ermöglichen.

Ingeneric GmbH

Die Firma Ingeneric hat innerhalb des Projekts »3D-ThermoLay« eine Laser-Zoomoptik für Diodenlaserstrahlung entwickelt. Dabei ist das Einsatzpotential der Optik nicht auf den Einsatz in Tapelege-Applikation beschränkt sondern kann direkt bei anderen Anwendungen wie z.B. dem Laser-Härten von Werkstoffen eingesetzt werden. Es ist somit ein industrienahe, neues System entwickelt worden, welches auch für andere Anwendungen angepasst werden kann.

KOELRIT GmbH

Aus Sicht der Firma KOELRIT GmbH ist es ebenfalls wichtig, den Tapelegekopf zur Bewertung seiner Teilfunktionen bei sich in Betrieb zu nehmen und die Teiltechnologien separat zu testen und zu bewerten. Zuvor muss jedoch sichergestellt werden, dass alle Teilsysteme des Kopfes beim Fraunhofer IPT funktionieren und alle Teilfunktionen in Betrieb genommen worden sind.

Robert Timm GmbH

Aus den Untersuchungen des Fraunhofer IPTs ist hervorgegangen, dass das bisher verwendete Trennmittel zwar verbessert werden konnte, aber noch nicht den Anforderungen für einen industrietauglichen Ablegeprozess entspricht. Die Firma Robert Timm möchte daher die bisherige Rezeptur durch andere Zugaben wie z.B. Wachse weiterentwickeln, sodass die Klebewirkung für die Tapes verstärkt wird. Insbesondere die Werkzeugtemperatur muss dabei berücksichtigt werden, sodass trotz der Temperatur eine hohe Klebewirkung erreicht werden kann. Ebenfalls kann durch Veränderung der Rezeptur die Zeit bis die Klebewirkung eintritt verkürzt und gleichzeitig die Klebezeit verlängert werden, sodass sich ein deutlich größeres Prozessfenster für die Tapeablage ergibt.