

# AUTOMATISIERTES ENDKONTURNAHES PREFORMING CARBONFASER-VERSTÄRKTER THERMOPLASTE MITTELS ROBOTISCHER HALBZEUGABLAGE

M. Kühnel, A. Schuster, A. Buchheim, M. Kießig, T. Gerngross, M. Kupke  
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie (BT), Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP),  
 Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Germany

## Zusammenfassung

Dieses Paper soll zeigen, dass der Preforming-Prozess für Luftfahrt-Strukturbauteile aus Carbonfaser-verstärkten Thermoplasten verbessert werden kann, wenn man verschiedene Methoden und Technologien wie Drapier- und Umformsimulationen, verschnittarme Nestings, autonome Zuschnittserkennung, Ultraschallschweißen, Erstlagenfixierung sowie robotisches Greifen und Ablegen von Faserhalbzeugen geschickt miteinander kombiniert. Die Autoren dieses Beitrags möchten somit einen Beitrag zu mehr thermoplastischen CFK-Anwendungen im modernen Flugzeugbau bewirken, was in der Regel auch zu einer Verbesserung des Leichtbaupotentials solcher Flugzeuge führt.

## 1. MOTIVATION

Carbonfaser-verstärkte Thermoplaste haben gegenüber ihren duromeren Werkstoff-Nachbarn zahlreiche Vorteile wie z.B. gute Schlagzähigkeit, hohe Schadenstoleranz, Schweißbarkeit, kurze Prozessierbarkeit, unproblematische Lagerbarkeit, gute Recyclingfähigkeit. Demgegenüber stehen Nachteile wie z.B. höhere Materialkosten für den Kunststoffanteil, teilweise erhöhte Feuchtigkeitsaufnahme, Kriechverhalten v.a. bei erhöhten Einsatztemperaturen [1] [2]. Vermutlich deshalb werden sie bis heute im modernen Flugzeugbau noch sehr selektiv eingesetzt, wenn auch mit steigender Tendenz (siehe BILD 1):

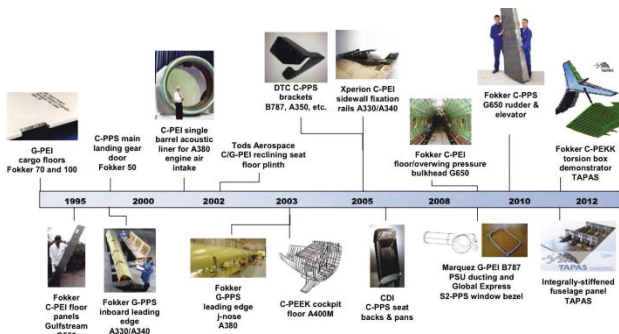


BILD 1: Zunahme thermoplastischer CFK-Anwendungen im zivilen Flugzeugbau in den vergangenen zwei Dekaden (Quelle: *composites world*).

Bereits im Jahre 2013 konnte das DLR-ZLP Augsburg mit einem ersten Prototyp-Endeffektor zeigen, dass das automatisierte Preforming Carbonfaser-verstärkter Thermoplaste mittels robotischer Halbzeugablage prinzipiell machbar ist und sich unter zu Hilfenahme bestimmter Technologien noch wesentlich verbessern lässt (siehe BILD 2):

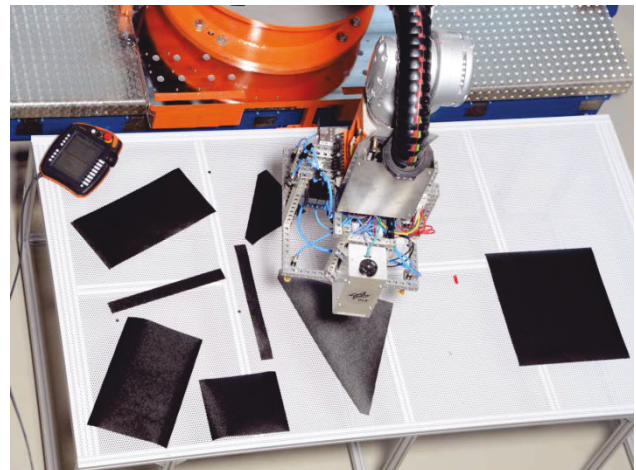


BILD 2: Prototyp zum Greifen von pulverimprägniertem CF/PEEK-Gewebe mit Zuschnittserkennung, ohne integrierte Heftleinheit.

## 2. TECHNOLOGIE-DEMONSTRATOR

Im BMBF-geförderten Projekt MAI Plast des Spitzenclusters MAI Carbon entschieden sich die Projektpartner der AG Luftfahrt als Demonstrator der zu erforschenden Prozesstechnologien ein Stringer-versteiftes Hautfeld zu bauen (siehe BILD 3). Das Hautfeld besitzt eine einfache zylindrische Krümmung mit 3m Krümmungsradius und stellt eine generische Außenhautkomponente einer zivilen Luftfahrtanwendung (z.B. eines A350) dar. Aufgabe u.a. des DLR-ZLP Augsburg innerhalb von MAI Plast ist es, das Hautfeld mit seinen unterschiedlichen Lagendicken automatisiert abzulegen und anschließend per Vakuum Aufbau zu konsolidieren. Hierbei soll das automatisierte, endkonturnahe Preforming mittels robotischer Halbzeugablage zum Einsatz kommen.

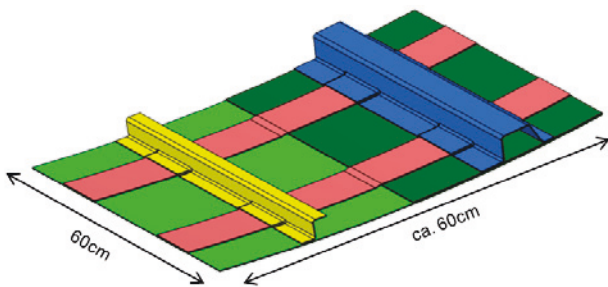


BILD 3: Technologiedemonstrator „Stringer-versteiftes Hautfeld“ der AG Luftfahrt innerhalb MAI Plast (Quelle: Premium AEROTECH GmbH).

### 2.1. Betrachtete Materialien

Innerhalb des Projektes wurde ein Halbzeugtyp mit zwei Thermoplasten ausgewählt: Ein Carbonfaser-UD-Tape mit PES-Matrix welches von den Projektpartnern SGL, BASF und TCG parallel im Projekt entwickelt wird, sowie bis zu dessen Verfügbarkeit ein Carbonfaser-UD-Tape mit PEEK-Matrix. Am DLR-ZLP Augsburg steht hier Material der Halbzeughersteller TenCate und Toho Tenax in der Breite 12" (= 304,8mm, siehe BILD 4) zur Verfügung.



BILD 4: 12" breites CF/PEEK UD-Tape der Fa. TenCate, aufgerollt auf einem Pappkern mit 6" innerem Kerndurchmesser.

### 2.2. Lagenaufbau und Zuschnittsgeometrien

Der Lagenaufbau des Hautfeldes besteht aus 32 symmetrisch angeordneten, quasi-isotropen<sup>1</sup> UD-Lagen im dicken und 16 im dünnen Hautfeld-Bereich, die lokal durch jeweils 8 Verstärkungslagen (je 4 in 0° und 90°-Richtung) durchdrungen werden. Die Übergänge von dicken zu dünnen Bereichen wurden derart gestaltet, dass Lagenausläufe von benachbarten Lagen möglichst weit auseinanderliegen und sich somit Lastspitzen möglichst gut über die gesamte Laminatdicke sowie die Übergangsbreite verteilen [3]. Dadurch ergeben sich diamantförmig angeordnete Lagenausläufe (siehe BILD 5).

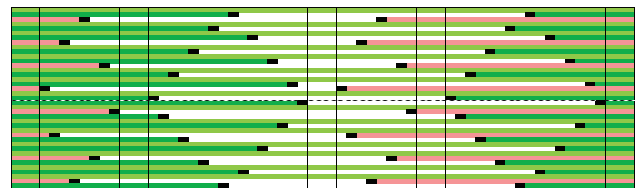
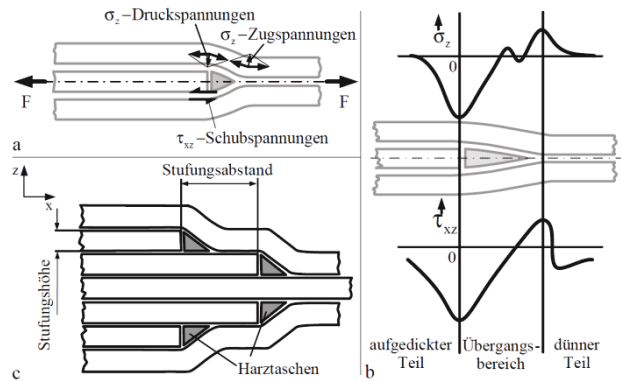


BILD 5: Schürmannsche Gestaltungsrichtlinien von Schäl- und Scherspannungsarmen Laminatstufungen [3] (oben) und Diamantförmige Lagenausläufe in den Übergangsbereichen (unten).

Aufgrund der UD-Tapebreite von 12" (= 304,8mm) mussten sämtliche Lagen, die quer zur Faserrichtung breiter als 12" sind, auf diese Breite geschlitzt (*Slicing*) und somit in mehrere Zuschnittsstücke (*Cutpieces*) aufgeteilt werden. Dabei mussten die Slicing-Kurven auf dem 3D-Bauteil derart konstruiert werden, dass die Zuschnittsbreiten nach dem Abflachen auf 2D (*Flattening*) die 12" nicht überschreiten. Dies konnte durch geodätische Abstände auf der 3D Form erzielt werden.

Die Abhängigkeit des Preforming-Prozesses von der Halbzeugbreite stellt eine der größten Einschränkungen dar: Eine Änderung der Halbzeugbreite führt weitreichende Änderung nachgeschalteter Prozesse mit sich und ist daher nicht ohne weiteres möglich. Im Gegenzug sind Vorteile im Vergleich zu anderen Preforming-Prozessen, dass bei entsprechender Berücksichtigung in der Prozessplanung sämtliche Halbzeugtypen und Zuschnittsgeometrien abgelegt werden können und z.B. keine Einschränkungen hinsichtlich unerwünschten Lagenausläufen bestehen.

### 2.3. Drapiersimulation und Flattening

Für die Drapiersimulation und das anschließende Flattening der Zuschnittsgeometrien ins 2D wurde das Software-Modul *Composite Part Design* (CPD) in *CATIA V5* benutzt (siehe BILD 6). Hier war es wichtig, dass die Startpunkte der Drapierung (*Seedpoints*) eines jeden Cutpieces (nahezu) identisch mit den späteren Greifpunkten (*Grippoints*) sind, um Verformungseffekte der Zuschnittsgeometrien beim Flattening zu verhindern.

Das Setzen der Seedpoints in der CAD-Umgebung erfolgte manuell. Um das Prozessengineering hier zu beschleunigen, ist es in Zukunft denkbar, diesen Schritt über einen Software-Algorithmus zu automatisieren.

<sup>1</sup> Kombination aus 0°, 90°, +45° und -45° Lagen

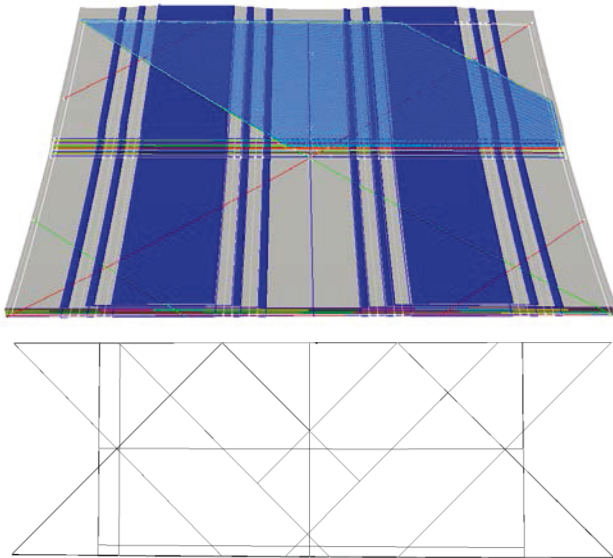


BILD 6: Drapiersimulation für einen Zuschnitt (hellblau schraffiert) der oberen Verstärkungslage (oben) und extrahierte Flattenings für die ersten 8 Hautfeld- und 2 Verstärkungslagen (unten).

#### 2.4. Nesting und Cuttern der Zuschnitte

Die aus dem Flattening erzeugten Zuschnittsgeometrien konnten nun als dxf-Dateien aus dem CAD extrahiert, in der am DLR-ZLP Augsburg verwendeten Cutter-Software *GTK Cut* importiert, genestet und anschließend auf dem DLR-eigenen Cutter der Fa. Zünd gecuttern werden (siehe BILD 7). Um den Aufwand für die Erforschung nachgeschalteter Produktionsprozesse zu reduzieren, wurden die nachfolgenden Schritte für die ersten 8 Hautfeld- und 2 Verstärkungslagen (von insgesamt 40 Lagen → ca. 1/4 des Plybooks) durchgeführt, welche eine repräsentative Auswahl aller Zuschnittsgeometrien des Plybooks darstellen.

Das Nesting erfolgte auf Materialbreite mit dem Nesting-Algorithmus *AutoNester-T* des Fraunhofer SCAI. Bei den oben genannten 10 Zuschnitten konnte bereits eine **Materialausnutzung von 95%** erzielt werden. Der hohe Materialausnutzungsgrad stellt zweifelsohne einen der größten Vorteile des Prozesses dar. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die einzelnen Cutpieces die Materialbreite so gut wie möglich ausnutzen.

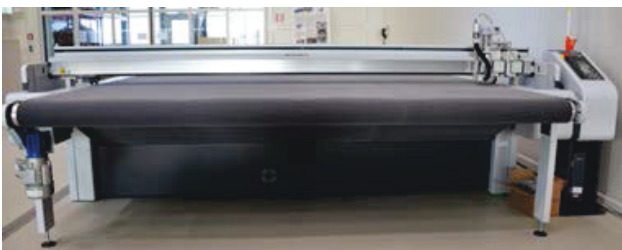


BILD 7: Zünd-Cutter des DLR-ZLP Augsburg (oben) und Nesting (unten) für die ersten 8 Hautfeld- und 2 Verstärkungslagen.

Beim Cuttern der Zuschnitte ergaben sich einige Herausforderungen, deren Lösungsvarianten aktuell noch erforscht werden. Diese sind im Folgenden beleuchtet:

Beim Zuführen des TenCate-Materials auf den Cuttertisch riss das Material leicht ein, was aufgrund der Saugerverteilung des späteren Greifers auf die Zuschnittsgeometrien unbedingt vermieden werden muss, da ansonsten die Zuschnittsgeometrien von der Planung abweichen und somit nicht mehr Prozesssicher gegriffen werden können.



BILD 8: Einreißen des UD-Tapes beim manuellen Auflegen auf das Cutterband.

Außerdem reichte die Vakuumabsaugung des Cuttertisches nicht aus, um das aufgrund seiner Eigenspannungen zur Aufwölbung neigende Tape oder einzelne Zuschnitte eben zu halten. Dies hat zur Folge, dass beim Cuttern selbst einzelne Zuschnitte durch das Schneidwerkzeug des Cutters (hier verwendet: angetriebenes Drehmesser) mitgerissen werden können. Um dies zu vermeiden, kann eine Vakuumfolie als Schneidhilfe auf das Schneidgut aufgelegt werden, was allerdings zusätzliche Materialkosten und Prozesszeit mit sich bringt. Das Einreißen als auch das Aufwölben sind Material- und Anlagenspezifische Phänomene, die spezielle Anforderungen an die Materialhersteller sowie an die Anlagenhersteller für eine spätere automatisierte Zuführung der Halbzeuge zum Cutter stellen (siehe hierzu Absatz 5.2). Lässt sich das Aufwölben des Tapes in einem späteren automatisierten Prozess mit Wickelmechanismus nicht verhindern, sollte eine flache Materialbereitstellung ohne Aufwicklung des Halbzeuges durch den Materialhersteller in Betracht gezogen werden. Da die Zuschnittsbreite identisch mit der Halbzeugbreite ist, müssen das Material sauber gefertigt bzw. geschnitten sowie die Referenzpunkte zur Orientierung und Positionierung des Schneidbereichs sehr genau gesetzt werden. Beim manuellen Absortieren der Zuschnitte ergibt sich die Herausforderung, auch sehr ähnliche Zuschnitte voneinander unterscheiden zu können. Diese kann unter Verwendung einer hinreichend präzisen autonomen Zuschnittserkennung (siehe hierzu Absatz 3.3) oder einer automatisierten Absortierung, die direkt auf die Schneiddaten des Cutters zugreift, bewältigt werden.

### 3. GREIFERBAU

Als Träger des robotischen Greifers steht am DLR-ZLP Augsburg u.a. ein 6-Achs-Industrieroboter der Fa. KUKA mit 210kg Nutzlast und 3100mm Reichweite (KR 210 R3100 Ultra F) auf einer Linearachse mit 5,4m Hub zur Verfügung. Das Grundgerüst des Greifers besteht aus Aluminium Profilen der Fa. Item. Daran befestigt sind die Einzelkomponenten des Greifers:



- Saugerrahmen mit Vakuumsaugern
- Vakuumerzeugung und Ventilinsel
- Ultraschall-Generator
- Linearachse mit US-Hefteinheit auf vertikaler Vorschubeinheit
- Steuerrechner der Linearachse
- Kamera zur Zuschnittserkennung
- Sensorik

Um einen unbeschwerlichen Zusammenbau, eine Teil-Inbetriebnahme außerhalb der Roboterzelle sowie die Transportfähigkeit des Greifers zu gewährleisten, wurde ein Greiferwagen konstruiert und gebaut, auf den der robotische Greifer aufgesetzt werden kann (siehe BILD 9):

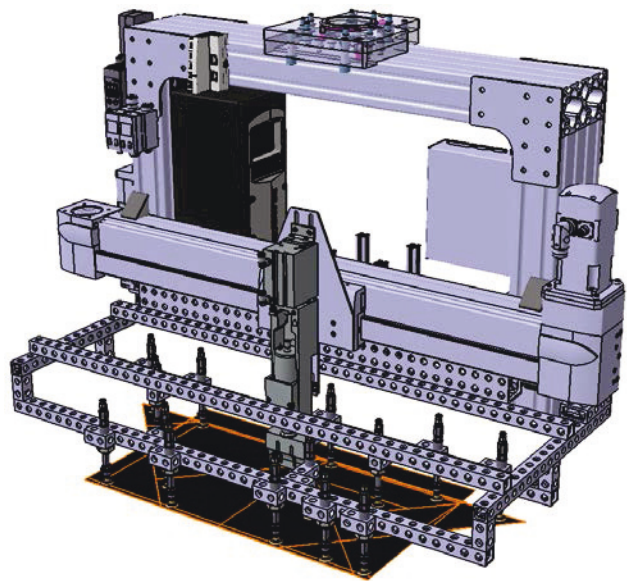
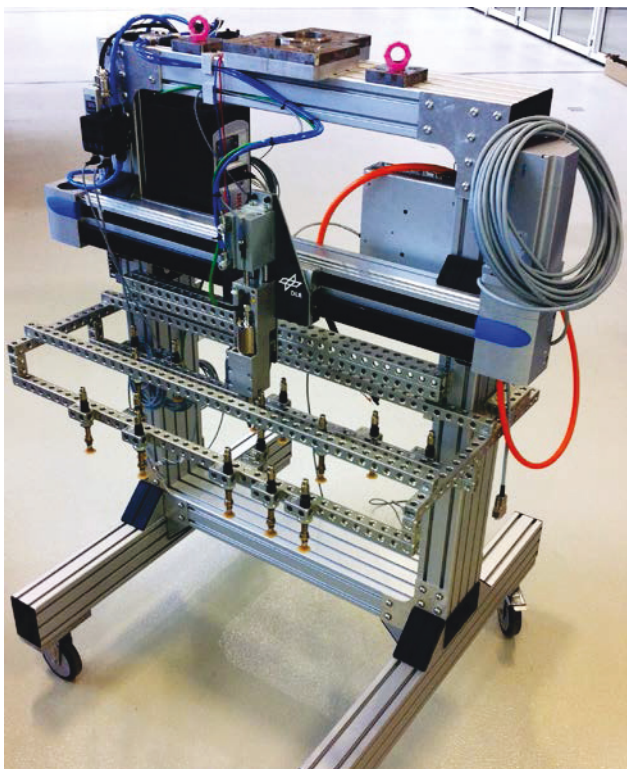


BILD 9: Thermoplastgreifer in MAI Plast Konfiguration auf Greiferwagen (o.) und CAD-Modell (u.).

Des Weiteren wurde ein CAD-Modell des gesamten Greifers erstellt. Dieses ermöglicht es, einzelne Greiferkomponenten zu konstruieren, den Zusammenbau des Greifers abzustimmen und die Lastdaten des Greifers möglichst genau zu bestimmen, um spätere Abweichungen des Robotersystems gering zu halten.

### 3.1. Saugerauswahl

Zur Auswahl der effektivsten Sauger wurde eine Testreihe durchgeführt. Für das relativ gut konsolidierte und damit recht Luftdichte UD-Tape erzielten vakuumbeaufschlagte Sauger die höchsten Haltekräfte (siehe BILD 10).

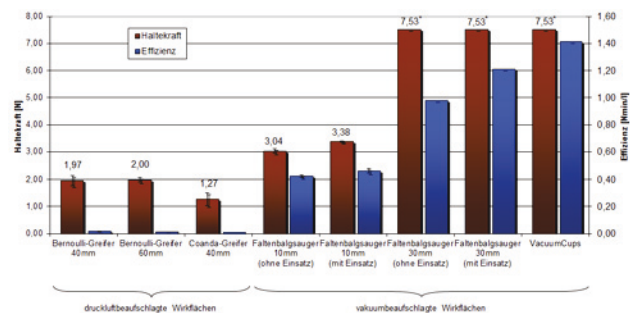


BILD 10: Haltekräfte verschiedener Saugertypen für CF/PEEK UD-Tape.

Um ein direktes Ablegen der Zuschnitte in die leicht zylindrisch gekrümmte Form zu ermöglichen und die unterschiedlichen Laminatdicken auszugleichen, mussten Sauger ausgewählt werden, die einen Höhenausgleich von max. 25mm zulassen. Daher begrenzte sich die oben genannte Auswahl auf Vakuumcups auf einem Federstößel, sowie elastische Faltenbalg-Sauger (beide Fa. Schmalz, siehe BILD 11). Da aufgrund der nötigen Ablagegenauigkeit der Tapes ein seitliches Verrutschen verhindert werden muss, und die Vacuum-Cups die höchste Effizienz (Volumenstrom-spezifische Haltekraft) aufwiesen, wurden diese in Kombination mit Federstößeln als bevorzugten Saugertyp ausgewählt.

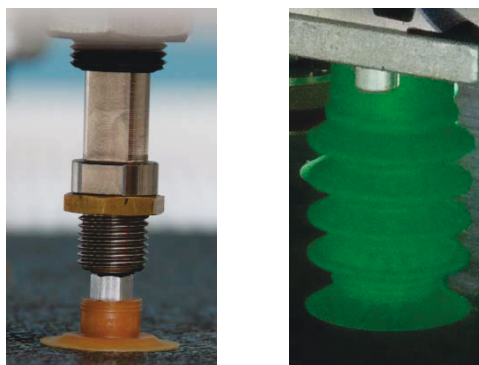


BILD 11: Vacuum-Cups auf Federstößel (links) und Faltenbalg-Sauger (rechts).

### 3.2. Saugerverteilung

Da die Sauger möglichst modular befestigt werden sollen, um den Saugerrahmen an sämtliche Zuschnittsgeometrien anpassen zu können, wurden zur Aufnahme der Sauger gelochte Aluminium-Profile der Fa. Witte mit einem Lochabstand von 25mm ausgewählt. Die Saugerverteilung ergab sich aus den extrahierten Flattenings aus Absatz 2.3. Hierzu wurde über diese zunächst eine Matrix aus

Vacuum-Cups im Raster der Witte-Profile von 25mm gelegt. Anschließend konnten bis zu 24 Sauger anhand dieser Rasterung so positioniert werden, dass sie jeden Zuschnitt des repräsentativen Plybooks sicher greifen können (siehe BILD 12). Da die Haltekraft eines Saugers das Gewicht des größten Zuschnitts übersteigt, lag der Fokus der Saugerpositionierung lediglich darauf, dass keine Zuschnittsecken herabhängen und somit die Prozesssicherheit gefährden können. Die Sauger wurden anschließend nummeriert und mit der Ventilinsel verschlachtet. Die Ansteuerung der Ventilinsel wie auch die übergeordnete Robotersteuerung wird von der Steuerung des Zuschnittserkennungs-Systems übernommen.

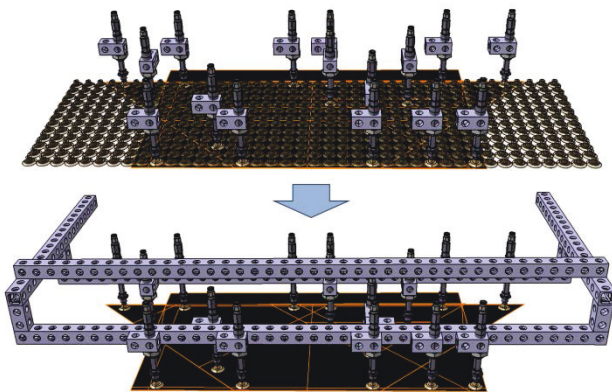


BILD 12: Positionierung der einzelnen Sauger entlang der Witte-Rasterung (oben) und Verbinden zu einem am Robotergreifer montierbaren Saugerrahmen mittels Witte-Profilen (unten) [12].

### 3.3. Autonome Zuschnittserkennung mittels Computer Vision

Um die einzelnen Zuschnitte des gesamten Plybooks in der richtigen Reihenfolge präzise greifen und ablegen zu können ohne jeden Vorgang einzeln dem Robotersystem beibringen zu müssen, wurde am DLR Augsburg ein autonomes Zuschnittserkennungs-System entwickelt, das auch die Steuerung des Robotergreifers übernimmt. Die aus dem Flattening der Umformsimulation bekannten 2D Zuschnittskonturen werden einem Algorithmus übergeben, der diese mit den erfassten Zuschnittskonturen eines am Greifer montierten Kamerasystems vergleicht und anschließend Lage sowie Orientierung des jeweils gesuchten Zuschnitts im Kamera-Koordinatensystem ausgibt (siehe BILD 13 und BILD 14).

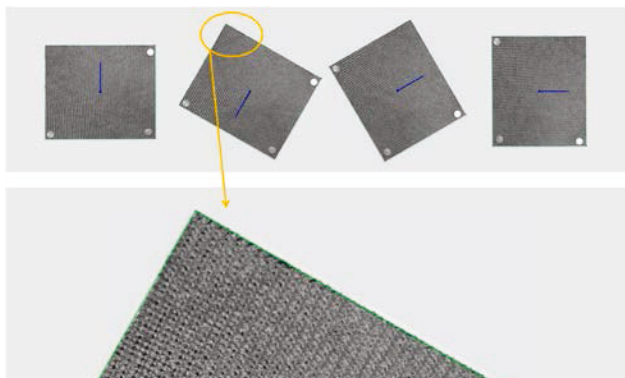


BILD 13: Erkennung von Kontur, Lage und Orientierung eines Zuschnitts.

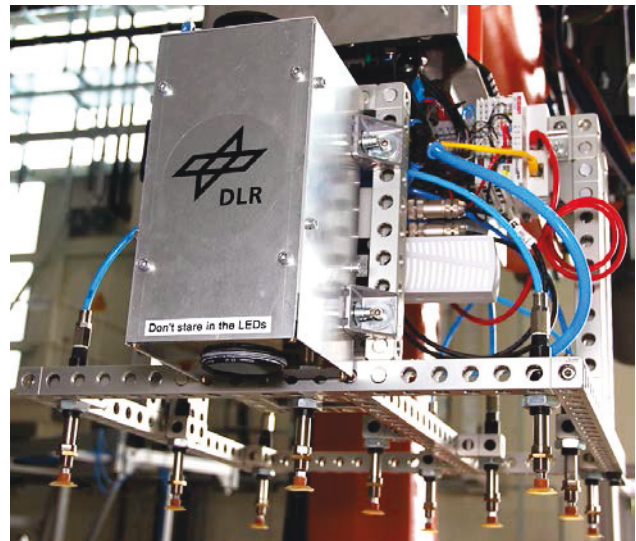


BILD 14: Kamerasystem an Prototyp-Greifer.

Diese Koordinaten werden der Robotersteuerung übergeben, die den Greifer mit angepasster Orientierung an die entsprechende Position führt. Somit können quasi wahllos orientierte und positionierte Zuschnitte in der richtigen Reihenfolge präzise erkannt gegriffen und abgelegt werden, ohne dass ein Eingreifen durch einen externen Bediener notwendig wäre. Mit der heutigen Konfiguration kann bereits heute eine **Ablagegenauigkeit** von **0,2 mm** erreicht werden. Ziel des DLR für die Zukunft ist eine kontinuierliche Verbesserung der Genauigkeit, welche auch in einer typischen Industrie-Umgebung gewährleistet wird.

### 3.4. Heften des Lagenpakets

Um ein Verrutschen bereits abgelegter Lagen für die nachgeschalteten Prozessschritte zu verhindern, müssen diese an die Erstlage zumindest punktuell fixiert werden. Hierfür stehen prinzipiell folgende Technologien zur Verfügung (siehe BILD 15, [5]).

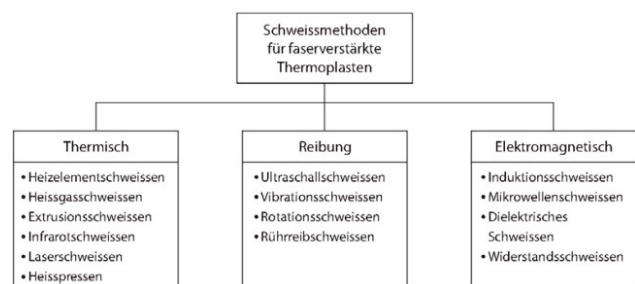


BILD 15: Schweißmethoden für Faserverstärkte Thermoplaste [5].

Um Prozesszeit zu sparen und das Laminat möglichst wenig zu schädigen wurde das Verfahren Ultraschall-(US) Schweißen ausgewählt. Dieses hat den Vorteil, dass in relativ kurzer Zeit definierte Energiemengen gezielt in die zu verschweißende Flächenpaarung eingebracht werden können [2]. Allerdings bewirken die Ultraschallschwingungen im Laminat ein unerwünschtes Verrutschen der abzuliegenden Einzellege während dem Schweißvorgang. Um dies und ein Aufwölben des Laminats zu verhindern, sollte der Schweißvorgang bei niedergedrückten Saugern durchgeführt werden, was durch kombinierte Greif-Heftversuche gezeigt werden konnte (siehe BILD 16).





BILD 16: Kombiniertes Greifen und Heften mittels US.

Insgesamt lassen sich die einzelnen UD-Tape-Lagen aus CF/PEEK durch diese Verbindungstechnologie zufriedenstellend miteinander verbinden. Dies belegen Thermografie-Messungen, die die Ausprägung einer stoffschlüssigen Schweißverbindung sichtbar machen (BILD 17), sowie Haltekraftmessungen an Scherproben, die den Nachweis über ausreichend hohe Haltekraft der Schweißverbindung bei Wahl entsprechender Schweißparameter erbracht haben (BILD 18).

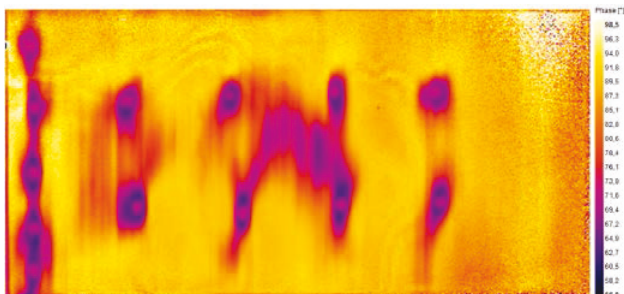


BILD 17: Thermographie-Aufnahme eines punktuell mittels US gehefteten Lagenpakets [6].

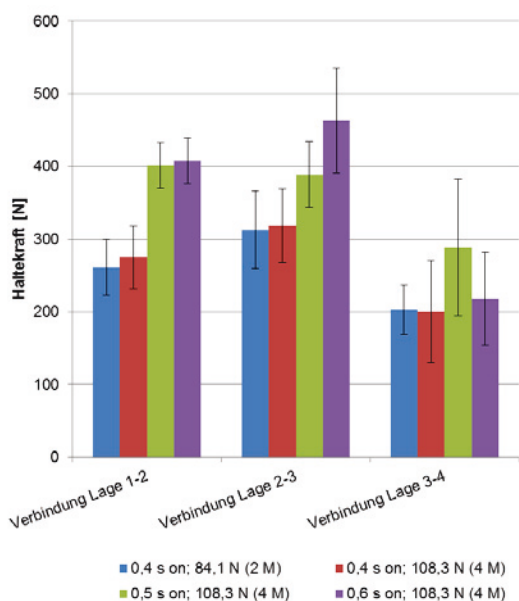


BILD 18: Maximale Scherkräfte der punktuellen Schweißverbindungen in Abhängigkeit der untersuchten Schweißparameter und Lagenverbindung [6].

### 3.5. Niederhalter

Zusätzlich kann der Saugerrahmen mit einer Niederhalteeinheit ausgerüstet werden, die über den Abwurf einer flächigen Gummimatte gewährleistet, dass die abgelegten Zuschnitte während dem Heftprozess flächig in die Form gedrückt werden. Abwurf und Aufnahme der Gummimatte erfolgen über sog. Elektropermanentmagneten, die aus Sicherheitsgründen stromlos greifen und über eine konische Aufnahmevorrichtung immer in die gleiche Position zentriert werden (siehe BILD 19).

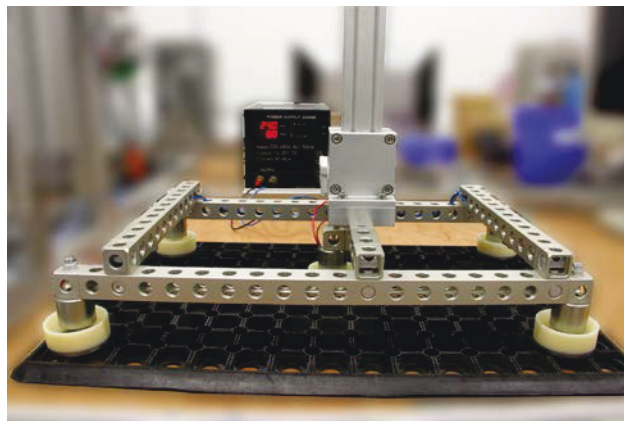


BILD 19: Niederhalteeinheit an Greiferprüfstand.

## 4. FORMENBAU

Aufgrund der geringen, zylindrischen Krümmungen des Demonstrator-Bauteils ist ein wichtiges Merkmal des Preforming-Prozesses, Zuschnitte eben aufzunehmen und direkt in die gekrümmte Form einzulegen, um eventuelle zwischenschritte einzusparen. Die hierfür notwendigen geringen Drapierungen der Zuschnitte werden wie in Absatz 3.1 erwähnt über die Federstößel der Sauger und/oder das Niederhaltesystem erbracht. Um die Sachkosten gering zu halten, sollte das Ablege-Formwerkzeug auch als Konsolidierungswerkzeug verwendet werden können. Die Form besteht aus einem zylindrisch gekrümmten Stahlblech mit seitlichen Abstützungen (siehe BILD 20).

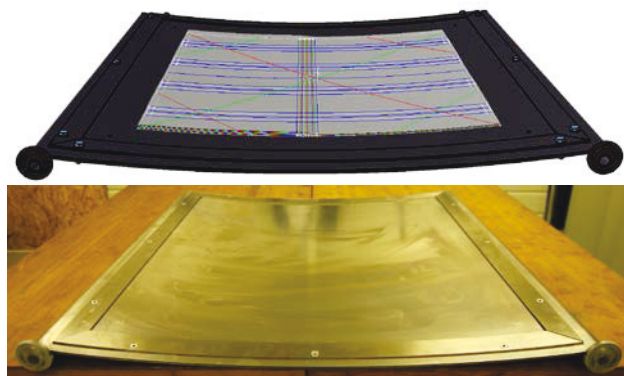


BILD 20: MAI Plast Ofenblech mit aufgelegtem Hautfeld im CAD (oben) und in Realität (unten) [12].

An der Unterseite ist eine Vakuumverrohrung angebracht, mittels derer an 8 Punkten (je 4 unterhalb und außerhalb des Bauteils) über eine übliche Vakuumpumpe mit DN40-Anschluss für die Fixierung der Preform sowie für die

Vakuumkonsolidierung Vakuum gezogen werden kann. Auf der Oberseite der Form sind je 2 ebene und gebogene Bleche verschraubt, die zusammen einen Rahmen bilden, der Leckage und ein Verrutschen des Vakuumaufbau im Ofen verhindern soll. Erste Tests konnten bereits die Vakuumdichtheit der Verrohrung zeigen [12]. Erste Vakuumkonsolidierungstests stehen noch aus.

#### 4.1. Fixierung der Erstlage

Die Fixierung des gehefteten Lagenpakets erfolgt über die Fixierung der Erstlage. Um zukünftig verschiedene Technologien anwenden zu können, wurden hierzu zwei möglichst schädigungsfreie, automatisierbare Verfahren untersucht [7].

##### 4.1.1. Elektrostatik

Das Elektrostatik-Prinzip ist im Bereich des Greifens von CFK-Halbzeugen ein vergleichsweise noch sehr junges, wenig erforschtes Verfahren, bei dem von vornherein nicht klar war, ob hinreichend große Kräfte erzielt werden können, um ein sicheres Fixieren der ersten Lage zu gewährleisten. Aufgrund seines geringen Energieverbrauchs und seiner guten Automatisierbarkeit erscheint es sehr attraktiv. So konnten bereits das Fraunhofer IPT in Aachen [8], Prof. Monkman von der HS Regensburg (vormals University of Hull, UK) [9] sowie SRI / Grabit™ in den USA durch Ihre Vorarbeiten zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, sowohl nicht bis schlecht leitende Materialien wie z.B. thermoplastische oder duromere Kunststoffe als auch vergleichsweise gut leitende Materialien wie z.B. Carbonfaser-Halbzeuge mittels elektrostatischer Kräfte zu greifen und zu fixieren. Hierbei gilt es folgende beiden Prinzipien der Kraftentstehung zu unterscheiden:

- Polarisation eines Dielektrikums / elektrischen Nichtleiters (z.B. im Halbzeug enthaltener Kunststoff) durch anliegendes elektrisches Feld (E-Feld).
- Ladungsverschiebung innerhalb eines elektrischen Leiters durch Influenz im anliegenden E-Feld (siehe BILD 21).

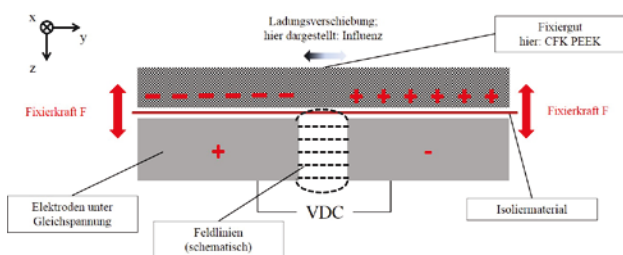


BILD 21: Ladungsverschiebung innerhalb eines Leiters durch Influenz in angelegtem E-Feld [7].

Die prinzipiellen Einflussgrößen der Haltekraft können Formel (1) entnommen werden [9]. Je größer Elektrodenfläche, Dielektrizitätszahl und Spannung, bzw. je niedriger der Abstand des Elektrodenpaares ist, desto größer wird die Haltekraft:

$$(1) \quad F_{hold} = \frac{\epsilon A}{2} \left( \frac{U}{d} \right)^2$$

So konnten für verschiedene Elektrodengeometrien/-flächen bei konstanter Dielektrizitätszahl unter Variation von Spannung und Abstand für Papier und CF/PEEK UD-Tape die maximalen Abziehkraften in einem dafür entwickelten Versuchsaufbau ermittelt werden (siehe BILD 22):

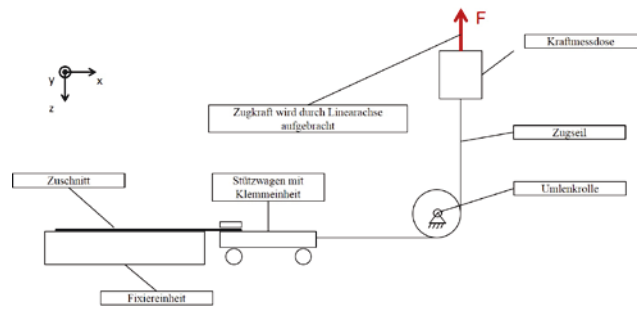


BILD 22: Prinzipieller Versuchsaufbau zur Messung der Abziehkraften (oben) [7].

Für CF/PEEK UD-Tape und eine ca. 200 cm<sup>2</sup> große Elektroden-Gesamtfläche lagen die Abziehkraften bei lediglich 7,3 N (BILD 23), was etwa **365 N/m<sup>2</sup>** entspricht und im Versuch nicht ausreichte, um das UD-Tape aus eigener Kraft eben zu halten. Generell war bei den Elektrostatik-Versuchen das größte Problem das Durchschlagen der Luft zwischen den Elektroden, was einen Zusammenbruch des elektrischen Feldes und damit der Haltekraft zur Folge hat. Insofern sind hier weitere Untersuchungen mit verschiedenen Dielektrika nötig, um ein frühzeitiges Durchschlagen zu verhindern und so größere Haltekraften zu erzielen. Da dies den Rahmen dieses Vorhabens sprengen würde, entschloss man sich, das Elektrostatik-Prinzip für diesen Anwendungsfall nicht weiter zu untersuchen.

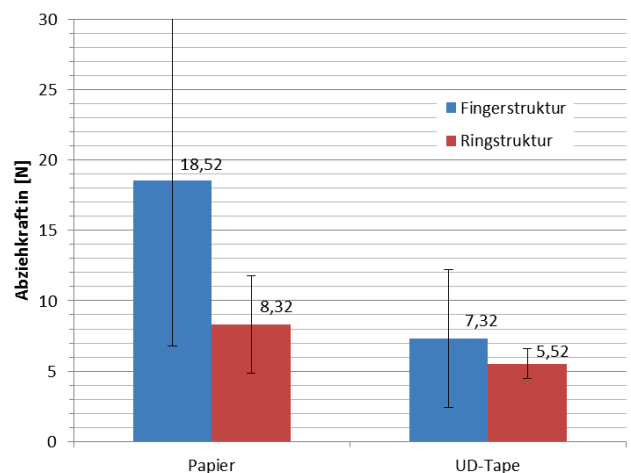
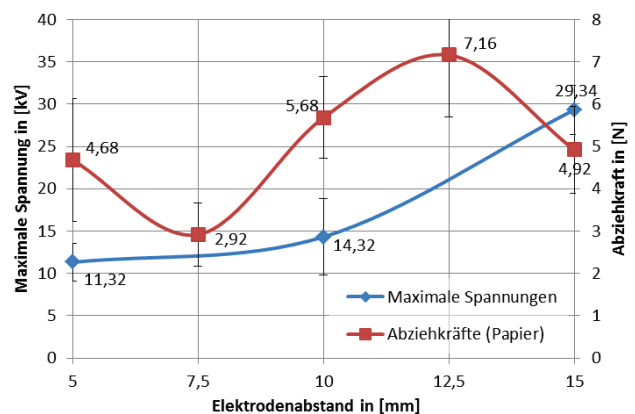


BILD 23: Max. Spannungen und Abziehkraften (für Papier) über Elektrodenabstand (o.) und max. Spannungen und Abziehkraften bei Finger und Ringstruktur für Papier und UD-Tape (u.) [12].

#### 4.1.2. Vakuumabsaugung

Das Vakuum-Prinzip ist ein Verfahren, welches bestens erforscht ist und beim Fixieren von CFK-Halbzeugen bereits industriell angewandt wird (vgl. Vakuumabsaugung des Cutters). Insofern war hier die Erwartungshaltung hinsichtlich der Fixierwirkung etwas größer als beim Elektrostatik-Prinzip. Zur Untersuchung der erzielbaren Haltekräfte wurde ein ebenes Tooling entwickelt, das sich auch als alternative Preforming-Unterlage eignet sowie dafür, Zuschnitte für die Zuschnittserkennung eben bereitzustellen. Aus Kostengründen ist das Tooling nicht aus dem Vollen gefräst sondern besteht aus mehreren gefügten Einzelteilen (siehe BILD 24):

- Bodenplatte aus Aluminium
- Zwischenteil mit Vakuumborungen aus Aluminium
- drei verschieden gelochte, austauschbare Deckel aus Edelstahl
- Kunststoffeinleger zur Abstützung des Deckels während Halbzeugablage oder US-Schweißvorgang

Die Lochabstände der 3mm starken Lochbleche betragen 20, 30 und 40mm. Die Bohrungen haben jeweils einen Durchmesser von 1mm und sind per Mikrowasserstrahlverfahren geschritten. Mit diesem Durchmesser soll sichergestellt werden, dass der Leckage-Volumenstrom nicht zu groß wird, wenn nicht alle Löcher bedeckt sind, und trotzdem ausreichend Volumenstrom durch die Löcher dringen kann, um eine entsprechende Kraftwirkung aufzubauen. Zur Aufbringung des Vakuums wurde ein Sauggebläse der Fa. Actiro mit 425 W Saugleistung und 2.580 l/min maximalem Volumenstrom (bei „idealem“ Betrieb mit maximaler Leistung und ohne Strömungsverluste/-widerstände) verwendet. Dieser wird aufgrund von Strömungsverlusten/-widerständen in den Zuleitungen und der Vakuumplatte auf ca. 736 l/min reduziert (Summe der Einzel-Messwerte am Verteiler bei voller Leistung).

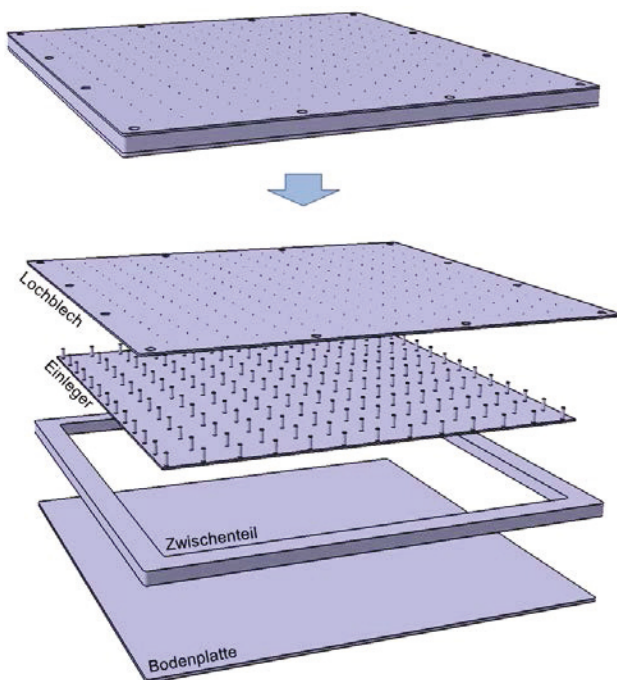


BILD 24: Vakuumabsaugplatte mit 40mm Lochblechraster zusammengebaut (oben) und Einzelteile (unten), ohne Absauganschlüsse [12].

Der Einleger wurde in 49 Einzelteilen aus Kunststoff auf dem DLR-eigenen 3D-Drucker der Fa. MakerBot gedruckt. Deren Geometrien sind so angepasst, dass sie den Deckel abstützen ohne die Absaugleistung des Tooling wesentlich zu beeinträchtigen.

Bei vollständig bedeckter Absaugfläche (60x60cm<sup>2</sup>) konnten mit dem kleinsten Lochabstand von 20mm Abziehkkräfte von 376 N erzielt werden was ca. **1044 N/m<sup>2</sup>** und damit knapp dem **Dreifachen der Elektrostatik-Wirkung** entspricht. Trotz geringer Volumenströme in der Plattenmitte war die Kraftverteilung über die Plattenbreite akzeptabel (siehe BILD 25). Da alle Löcher noch nicht im Sperrzustand (Strömungsgeschwindigkeit = Mach 1) betrieben wurden, sind bei Anschluss leistungsfähigerer Gebläse sogar noch höhere Haltekräfte zu erwarten.

Somit konnte gezeigt werden, dass das Prinzip der Vakuumabsaugung in der vorliegenden Umsetzung brauchbar ist, um sowohl thermoplastische UD- als auch Gewebematerialien hinreichend prozesssicher im Tooling zu fixieren.

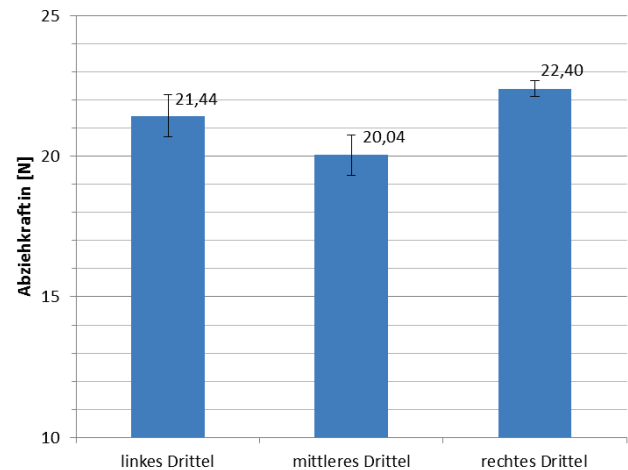
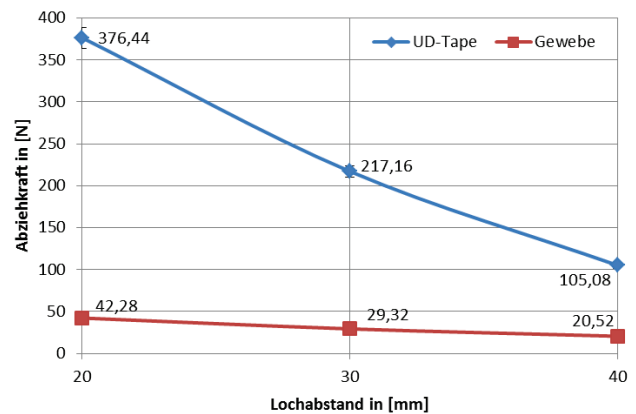


BILD 25: Maximale Abziehkkräfte für UD-Tape und Gewebe unter Verwendung der drei Lochblech-Raster bei vollständig bedeckter Vakuumplatte (oben) und maximale Abziehkkräfte über Breite der Vakuumplatte für 20cm breiten UD-Tape Zuschnitt und 20mm Rasterung (unten) [12].



## 5. AUSBLICK

Im Folgenden soll ein kurzer Ausblick über noch anstehende Forschungen und Optimierungen des Prozesses gegeben werden.

### 5.1. Faserwinkelmessung

Um die IST-Faserverläufe der abgelegten und fixierten Zuschnitte mit den SOLL-Faserverläufen der Drapiersimulation zu vergleichen, besteht am DLR-ZLP Augsburg die Möglichkeit, mittels eines optischen Faserwinkelsensors der Fa. Profactor Faserwinkelmessungen durchzuführen. Sowohl an CF/PEEK UD-Tapes als auch an konsolidierten Bauteilen konnte dies für die oberste Lage bereits durchgeführt und jeweils eindeutige Faserorientierungen bestimmt werden (siehe eindeutiger Peak = Faserwinkel in BILD 26) [13] [14]:

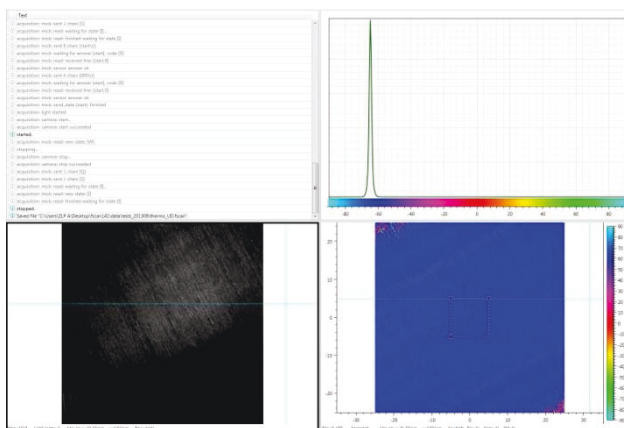


BILD 26: Screenshot der Profactor Auswerte-Software bei der Faserwinkelmessung eines CF/PEEK UD-Tapes der Fa. TenCate [14].

Der logisch nächste Schritt wäre nun eine automatisierte Faserwinkelmessung an ersten automatisiert abgelegten Hautfeldern. Diese Messergebnisse müssen auf das Bauteil gemappt werden, um einen späteren Vergleich mit den jeweiligen Rechenergebnissen aus Drapier- oder Umformsimulationen vergleichen zu können. Hierzu wurde am DLR-ZLP Augsburg bereits ein robotischer Endeffektor entwickelt, der den oben genannten Sensor aufnehmen kann, um automatisierte Messungen der obersten Lage während oder nach dem Ablegeprozess durchzuführen (siehe BILD 27) [15].

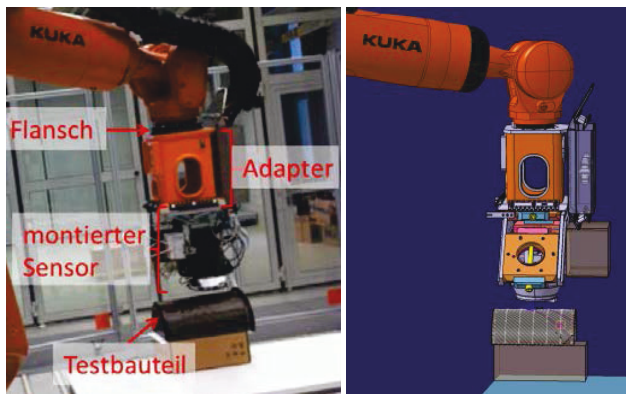


BILD 27: Faserwinkelsensor an Roboter (links) und Offline-Programmierung des Prüfprozesses (rechts) [15].

Da das System Offline-programmierbar ist, kann der gesamte Messprozess vorher im CAD geplant werden und muss nicht am Robotersystem mühsam eingeteacht werden

### 5.2. Integration in Gesamt-Prozesskette

Ab Anfang 2015 steht dem DLR-ZLP Augsburg ein Cutterzentrum mit automatisierter Materialzuführung, Zuschnittserstellung und Absortierung zur Verfügung, welches für die Versorgung der einzelnen Verarbeitungszellen mit Carbonfaser-Halbzeugen zuständig sein wird. Dieses besteht aus folgenden Komponenten:

- Rollenspeicher mit automatisierter Materialzuführung
- Cutter mit automatisierter Absortierung
- Palettiersystem mit
  - Schubladen für Zuschnitte bis zu 2,5x1,5m
  - Aufrollmechanik für Zuschnitte bis zu 16x2m

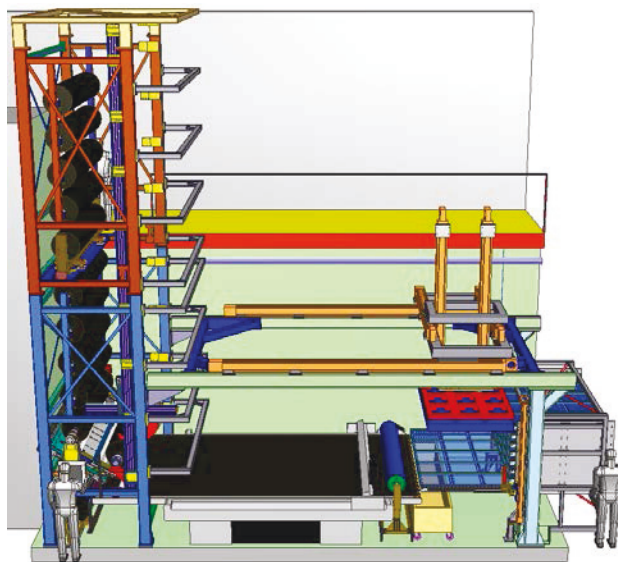


BILD 28: CAD-Ansicht des neuen Cutterzentrums des DLR-ZLP Augsburg (Bildquelle: Parker Hannifin).

Die Palettiersysteme des Cutterzentrums können sodann an die Verarbeitungsbereiche des DLR-ZLP Augsburg gebracht werden, wo die Zuschnitte in der richtigen Reihenfolge den jeweiligen Verarbeitungsbereichen automatisiert bereitgestellt werden können.

Für den Thermoplastischen Preforming-Prozess ist dies die Thermoplastische Roboterzelle (TPZ, siehe BILD 29). Bereits heute ist dort der in Absatz 3 erwähnte 6-Achs-Industrieroboter auf einer Linearachse sowie ein Vorheizfeld mit automatisierter Pressenzuführung installiert. Ab Anfang 2015 wird dieses Ensemble durch eine Heißpresse der Fa. Wickert ergänzt.

Unter Zusammenwirkung aller Prozessbausteine vom Cutterzentrum über den in diesem Paper erläuterten Preforming-Prozess, einer prozessintegrierten, automatisierten Qualitätssicherung bis zur flexiblen, automatisierten Endbearbeitung und Fügen zu einer Baugruppe kann somit eine durchgehende Prozesskette dargestellt werden, innerhalb derer die Automatisierung einzelner Prozessschritte (wo sinnvoll) sowie deren Zusammenspiel erforscht werden kann. Das Thermoplastische Preforming stellt darin einen zentralen Baustein dar.

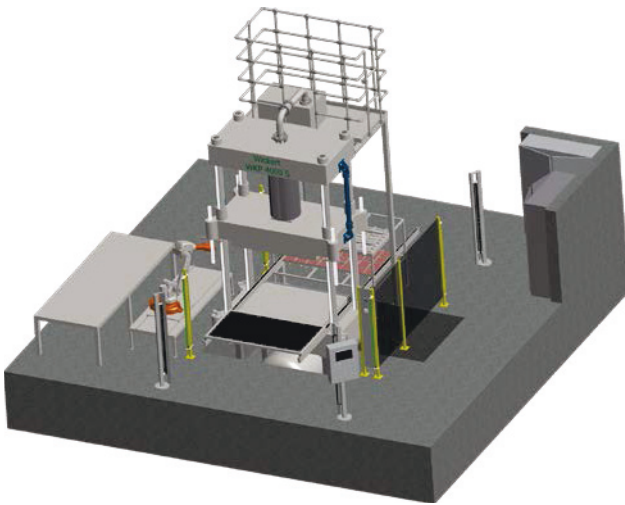


BILD 29: CAD-Ansicht der TPZ des DLR-ZLP Augsburg mit installierter Heißpresse (Roboter und Linearrachse nicht maßstabsgerecht, Bildquelle: Fa. Wickert).

### 5.3. Prozessbewertung

Abschließend soll für den gesamten Preforming-Prozess eine Bewertung hinsichtlich benötigter Prozesszeiten und Energieverbräuche der Einzelprozesse sowie des Materialeinsatzes bewertet werden. Für die Ablage und Fixierung eines Zuschnitts wurde dies anhand der Prozesszeit beispielhaft bereits durchgeführt (siehe hierzu BILD 30). Somit soll eine Datenbasis für weitere Prozessbewertungen und -optimierungen geschaffen werden, um das Thermoplastische Preforming hin zu einem ressourcenoptimierten, robusten und industrietauglichen Prozess weiterzuentwickeln.

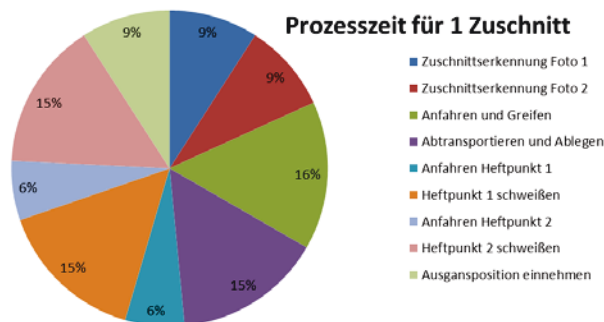


BILD 30: Qualitative Bewertung der Prozesszeit für die Ablage und das Fixieren eines Zuschnitts [12].

## 6. LITERATUR

- [1] Breuer, U.: *Beitrag zur Umformtechnik Gewebeverstärkter Thermoplaste*, S. 1, Kaiserslautern, 1997
- [2] Ermanni, P.: *Composites Technologien*, Vorlesungsskript, ETH Zürich, 2007
- [3] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden* (2. Ausg.), S. 640, Berlin, Springer-Verlag, 2009.
- [4] Schuster, A.: *Bildverarbeitungsgestützte Herstellung von Faserverbundbauteilen*, DLR-interner Bericht DLR-IB 435-2013/59, 2013
- [5] Rudolf, R., Mitschang, P., Neitzel, M. und Rückert, C.: *Welding of High-Performance Thermoplastic Composites*, *Polymer and Polymer Composites*, 7(5): 309–315, 1999.
- [6] Dorsch, J., Kühnel, M., Fischer, F.: *Experimentelle Ermittlung der Prozessparameter zum automatisierten Ultraschall-Heften von Carbonfaserverstärkten Thermoplast-Lagen*, DLR-interner Bericht DLR-IB 435–2013/32, 2013.
- [7] Massinger, M., Kühnel, M.: *Methodenentwicklung zur Behebung des Erstlagenproblems beim Preforming faserverstärkter Thermoplaste*, DLR-interner Bericht DLR-IB 435-2014/17, 2014.
- [8] Emonts, M.: *Handhabung biegeschlaffer FVK-Halbzeuge*, Fraunhofer IPT Broschüre, 2013
- [9] Monkman, G.: *Electroadhesive microgrippers*, *Industrial Robot*, S. 326–330, 04-2003
- [10] Kühnel, M.: *MAI Plast 2. Zwischenbericht*, DLR-interner Bericht DLR-IB 435-2013/94, 2013
- [11] Kühnel, M.: *MAI Plast 3. Zwischenbericht*, DLR-interner Bericht DLR-IB 435-2014/10, 2014
- [12] Kühnel, M.: *MAI Plast 4. Zwischenbericht*, DLR-interner Bericht DLR-IB 435-2014/15, 2014
- [13] Kießig, M., Kühnel, M.: *MAI Design 2. Zwischenbericht*, DLR-interner Bericht DLR-IB 435-2013/92, 2013.
- [14] Kießig, M., Kühnel, M.: *MAI Design 3. Zwischenbericht*, DLR-interner Bericht DLR-IB 435-2014/11, 2014.
- [15] Kießig, M., Kühnel, M.: *MAI Design 4. Zwischenbericht*, DLR-interner Bericht DLR-IB 435-2014/16, 2014.