

# ROBUSTE CFK-GESAMTPROZESSKETTE (ROCK-ZLP)

ABSCHLUSSBERICHT DES VERBUNDVORHABES IM RAHMEN VON  
LUFOIV-4

MARCIN MALECHA, ROBERT KAPS

LAUFZEIT: 01.01.2012 - 31.12.2015

FÖRDERKENNZEICHEN: 20W1110H

Augsburg, 01.07.2016





## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Aufgabenstellung . . . . .	5
1.1.1	Teilprojekt 1 - Große Schalenstrukturen (Blitzschutablage) . . . . .	5
1.1.2	Teilprojekt 2 - Verstärkungs-Strukturen . . . . .	6
1.1.3	Teilprojekt 4 - Prozessbegleitende Qualitätssicherung . . . . .	6
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde . . . . .	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabensbeginn</b>	<b>9</b>
2.1	Stand der Technik bei Antragsstellung . . . . .	9
2.2	Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte . . . . .	10
2.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse</b>	<b>11</b>
3.1	Verwendung der Zuwendung . . . . .	11
3.2	Vorgegebene Ziele . . . . .	11
3.3	Einzelergebnisse und Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen . . . . .	12
3.4	Nicht erreichte Projektziele . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Eingehende Darstellung der Einzeltechnologien</b>	<b>16</b>
4.1	Teilprojekt 1 - Große Schalenstrukturen . . . . .	16
4.1.1	Zielsetzung . . . . .	16
4.1.2	Übersicht der durchgeführten Arbeiten . . . . .	18
4.1.3	Zusammenfassung . . . . .	36
4.2	Teilprojekt 2 - Verstärkungs-Strukturen . . . . .	38
4.2.1	Zielsetzung . . . . .	38
4.2.2	Übersicht der durchgeführten Arbeiten . . . . .	39
4.2.3	Zusammenfassung . . . . .	69
4.3	Teilprojekt 4 - Prozessbegleitende Qualitätssicherung . . . . .	70
4.3.1	Zielsetzung . . . . .	70
4.3.2	Übersicht der durchgeführten Arbeiten . . . . .	71
4.3.3	Zusammenfassung . . . . .	100
<b>5</b>	<b>Veröffentlichungen und Vorträge</b>	<b>101</b>
5.1	Veröffentlichungen . . . . .	101
5.2	Vorträge . . . . .	102
5.3	Patente . . . . .	103
<b>6</b>	<b>Ausblick auf den voraussichtlichen Nutzen und Anschlussfähigkeit</b>	<b>103</b>
6.1	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Nutzung . . . . .	103
6.1.1	Teilprojekt 1 - Große Schalenstrukturen . . . . .	103
6.1.2	Teilprojekt 2 - Verstärkungs-Strukturen . . . . .	104
6.1.3	Teilprojekt 4 - Prozessbegleitende Qualitätssicherung . . . . .	104



6.2	Anschlussfähigkeit . . . . .	105
6.2.1	Teilprojekt 1 - Große Schalenstrukturen . . . . .	105
6.2.2	Teilprojekt 2 - Verstärkungs-Strukturen . . . . .	105
6.2.3	Teilprojekt 4 - Prozessbegleitende Qualitätssicherung . . . . .	105

## 1 Einleitung

Der steigende Anteil der Faserverbundwerkstoffe im Gesamtgewicht der modernen Verkehrsflugzeuge stellt eine wettbewerbsfähige Fertigung vor neuen Herausforderungen. Die fertigungsspezifische Charakteristik des neuartigen Werkstoffs verlangt sehr oft nach einem Umdenken bei den bisherigen, sehr gut beherrschbaren, Prozessen der Bauteilfertigung aus metallischen Werkstoffen. Daher erfolgt ein sehr großer Prozentsatz der Fertigungsprozesse manuell. Dieses Vorgehen bringt einen hohen Personaleinsatz mit sich, der sich negativ in der Kosteneffizienz, der Reproduzierbarkeit und der Qualitätssicherheit niederschlägt.

Um die neuen Werkstoffe wettbewerbsfähig zu gestalten und die hohen Materialkosten auszugleichen, müssen die Bearbeitungsprozesse automatisiert werden und im gleichen Maße wie die herkömmliche Metallbearbeitung beherrschbar sein. Vor allem die Robustheit der Prozesse trägt zu einer Vertrauenssteigerung und damit zu einem steigenden Einsatz der Faserverbundstoffe in der Zukunft. Die Robustheit soll hierbei durch die hohe Technologiereife der automatisierten Prozesse erreicht werden. Diese Überlegungen führten zum Start des Verbundvorhabens Robuste CFK-Gesamtprozesskette (RoCk).

### 1.1 Aufgabenstellung

Die Steigerung der Robustheit der Prozesse ist der vorrangige Ziel des Verbundvorhabens. Sich daraus ableitende Ziele umfassen die Kostensenkung sowie die Qualitätssteigerung der untersuchten Prozesse. Die beteiligten Industrieunternehmen sollen dadurch einen Wettbewerbsvorteil erhalten, der ihnen die Sicherung bzw. den Ausbau der Marktposition ermöglicht. Für die einzelnen, im Unterkapitel 1.3 dargestellten, Arbeitspakete ergeben sich folgende Ziele und daraus abgeleitete Aufgaben:

#### 1.1.1 Teilprojekt 1 - Große Schalenstrukturen (Blitzschutablage)

Das übergeordnete Ziel ist die Entwicklung einer Automatisierungslösung für die Ablage des Standard-Blitzschutzmaterials auf doppelt gekrümmten Rumpfoberflächen eines *single aisle*-Flugzeugs. Diese soll in einen robusten fertigungsnahen Gesamtprozess eingebunden werden und die gleiche Qualität erreichen wie der aktuelle manuelle Prozess. Dabei wird der im Projekt AZUR entwickelter und vom Projektpartner Emil Bucher GmbH & Co. KG (im Projekt AZUR) gebauter Endeffektor in einer Roboterzelle in Betrieb genommen und validiert. Die einzelnen Zwischenziele sind:

- Bestimmung der entscheidenden Prozessparameter
- Vollständige Validierung des Blitzschutz-Ablegeendeffektors
- Abschätzung des Industrialisierungspotenzials
- Handlungsempfehlungen für den Einsatz des Ablegeendeffektors an großen Schalenstrukturen des A350

### 1.1.2 Teilprojekt 2 - Verstärkungs-Strukturen

Der Fokus der Arbeiten lag an der Steigerung der Robustheit des Prozesses beim Preformen von komplexen NCF-Bauteilen. Als Use Case wurde ein Spant der Türumgebungsstruktur ausgewählt. Die Robustheit sollte dadurch erhöht werden, indem im Bereich der Bearbeitung der manuelle Prozess durch geeignete Vorrichtungen ersetzt bzw. unterstützt wird. Des Weiteren soll eine geeignete Sensorik entwickelt werden um den Einfluss der technologischen Randbedingungen auf die Abweichung der Faserausrichtungen und deren Streuung im Gesamtprozess untersuchen zu können. Die einzelnen Zwischenschritte sind:

- Bewertung von Drapiervarianten für NCF-Preforms an Spanten im Bereich der Türumgebung bezüglich ihrer Auswirkung auf Reproduzierbarkeit und Parameterrelevanz.
- Konzepte zur Reproduktion von Faserwinkelabweichungen und zur Vermeidung von Streuungen im Gesamtpreformprozess.
- Validierung der Konzepte zur Einhaltung der Geometrie- und Faserwinkelabweichungen mittels statistischer Methoden.

### 1.1.3 Teilprojekt 4 - Prozessbegleitende Qualitätssicherung

Das zu erreichende Ziel ist der Aufbau einer Qualitätssicherungskette für den Prozess der Stringerintegration und die Entwicklung einer Sensorik für prozessbegleitende Prüfung. Die Einzelziele laut dem Antrag lauten:

- Verbessertes Prozessverständnis für den Fertigungsschritt „Setzen von Stringern“
- Ermittlung relevanter Prozessparameter
- Anforderungsdefinition an die QS
- Auswahl und Integration von geeigneten zerstörungsfreien Prüfmethode
- Validierung der Methodik am realen Bauteil (A350 stringerversteifte Schale)

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundprojekt RoCk setzt die Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Premium Aerotec GmbH fort und dient neben der Erreichung von wissenschaftlichen Ergebnissen einer stärkeren Vernetzung des DLR im lokalen Umfeld der Luftfahrtindustrie. Die im Projekt ausgewählte Themen stellen die aktuellen Problemfelder der CFK-Fertigung dar und orientieren sich an dem allgemeinen Bedarf der Luftfahrtindustrie. Mit den drei ausgewählten Themenfeldern werden unter dem Oberbegriff „robuste Fertigungsprozesse“ Fertigungsbereiche Prepreg, *Non Crimp Fabric* (NCF) und Qualitätssicherung abgedeckt. Die enge Zusammenarbeit mit dem Industriepartner erlaubt einen Abgleich der Arbeiten an den aktuellen Stand der Technik und die Berücksichtigung der Fertigungsentwicklung und der sich daraus ergebenden neuen Fragestellungen. Dank dieser engen Kooperation

## Beteiligungen der DLR-Standorte

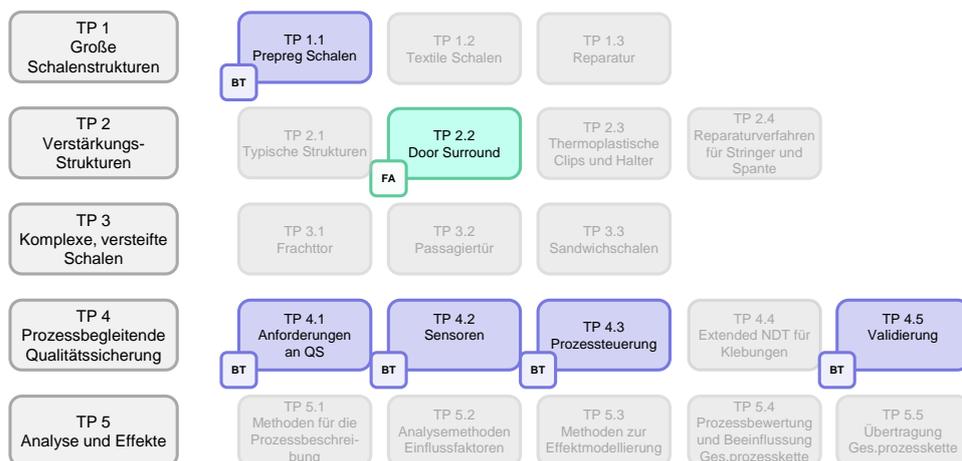


Abbildung 1: Beteiligung der DLR-Standorte an den einzelnen Arbeitspaketen im Projekt RoCk

wurde ein Mehrbedarf im TP 1 identifiziert, nachdem die Schalenfertigung beim Verbundführer von der Male- auf Femalegeometrie umgestellt wurde. Durch die veränderten Voraussetzungen wurde eine Aufstockung und Projektlaufzeitverlängerung beim Projektträger beantragt und bewilligt.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde unter der Führung von Premium Aerotec GmbH am 01.01.2012 gestartet mit einer beantragten Laufzeit bis zum 31.3.2015. Aufgrund der veränderten Voraussetzungen, siehe Unterkapitel 1.2, wurde eine Projektverlängerung beantragt und bewilligt, sodass die Projektlaufzeit bis zum 31.12.2015 verlängert wurde. In Abbildung 1 ist die Einbindung des DLR in die Projektstruktur dargestellt.

Die an den Inhalten des Projektes beteiligte Projektpartner waren:

- Premium Aerotec GmbH, 86179 Augsburg als Verbundführer
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 51147 Köln mit den Standorten

- Institut Bauweisen und Strukturtechnologie, Abteilung Automatisierung und Qualitätssicherung i.d. Produktionstechnologie, 86159 Augsburg als Projektleiter auf der Seite des DLR
- Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 38108 Braunschweig
- Institut Bauweisen und Strukturtechnologie, Abteilung Keramische Verbundstrukturen, 70569 Stuttgart

### **Teilprojekt 1**

Im Teilprojekt 1 (Große Schalenstrukturen) wurden Arbeiten am automatisierten Blitzschutzableger im TP 1.1 (Prepreg Schalen) vorgesehen. Diese beinhalteten die Übernahme des Endeffektorprototypes aus dem Projekt AZUR und seine Inbetriebnahme in einer Roboterzelle. Des Weiteren sollte der Prozess unter dem Fokus einer robusten, durchgängigen Prozesskette validiert werden und eine anhand der Ergebnisse erarbeitete Handlungsempfehlung für den Einsatz des Endeffektors in der Fertigung ausgesprochen werden. Im Rahmen der Projektaufstockung- und verlängerung wurden die für den Prozess auf konkaven Formen erarbeitete Lösungen auf konvexe Formen übertragen. Die für die veränderte Zielgeometrie notwendige Modifizierung des Endeffektors wurde bei der Firma Emil Bucher GmbH & Co. KG als Unterauftrag durchgeführt, ebenso die Erweiterung der Steuerungsleitungen der Multifunktionszelle durch die KUKA Systems GmbH. Die Arbeiten wurden durch das DLR am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie am Standort Augsburg durchgeführt.

### **Teilprojekt 2**

Im Teilprojekt 2 wurde ausgehend von der Arbeiten im Projekt AZIMUT das Umformverfahren von bi- und triaxialen Gelegen weiter entwickelt. Ziel war hier die Entwicklung eines einstufigen Umformverfahrens. Die ersten Schritte befassten sich mit der Untersuchung des Verhaltens des Materials im Bereich der komplexen Umformgrade. Dabei wurde das Material vor der Drapierung im Flanschbereich fixiert. Nachdem eine Steigerung der Drapierqualität festgestellt wurde, sollte ein Konzept für eine Vorrichtung erarbeitet werden. Das Konzept sah ein Werkzeug vor, das aus vielen Einzelementen bestand die miteinander verbunden waren. Das Element sollte neben dem Materialfesthalten und dem aktiven Drapieren auch noch die Aktivierung des Binders bewerkstelligen. Um die Auslegung der Kinematik zu ermöglichen sollte eine Versuchsreihe durchgeführt werden um den Verschiebewiderstand des Materials zu bestimmen. In Zusammenarbeit mit dem Verbundführer wurde eine Verlagerung des Schwerpunkts der Arbeiten zu der Dokumentation der Verteilung der Faserwinkel beim Preformprozess beschlossen, sodass nur ein fertiges Konzept als Ergebnis vorliegt.

Die Arbeiten an der Sensorik für vollflächige Faserwinkeldokumentation wurden zunächst durch eine rein manuelle und auf Auswertung von angefertigten Fotos basierende Methode begonnen. Mit dieser Erfahrung aus der Faserwinkelverteilung an einem realen Bauteil wurde eine Marktrecherche durchgeführt und das passende Messgerät ausgesucht und beschafft. Die Entscheidung basierte auf dem Vergleich von Messungen am realen Bauteil.

Für ein Messsystem, dass in der unmittelbaren Fertigungsumgebung eingesetzt werden soll, wurden zusammen mit dem Verbundführer Randbedingungen festgelegt anhand deren das Konzept für das zu entwickelnde System erarbeitet wurde. Das Konzept wurde an einem kleinen Bauteil getestet und anschließend an einem realen Bauteil im laufenden Preformingprozess an zwei Lagen validiert. Eine Auswertung der Messungen schloss die Arbeiten ab.

#### **Teilprojekt 4**

Im Teilprojekt 4 wurde zunächst in Zusammenarbeit mit dem Verbundführer das Thema geschärft und spezifiziert. Man hat sich darauf verständigt das Teilprozess des Aushärtens im Autoklav zu bearbeiten, da in diesem Bereich die größten fertigungstechnischen Unsicherheiten auftreten. Es wurde eine Roadmap erarbeitet, die die vier Teilprojekte Anforderungen an QS (TP 4.1), Sensoren (TP 4.2), Prozessteuerung (TP4.3) und Validierung (TP4.5) umfasst. Der Fokus wurde hier auf das Prozessverständnis und die Entwicklung einer geeigneten Sensorik für die Messung der Stringerposition im Autoklavprozess mit dem Ziel einer prozessparameterabhängigen Untersuchung der Stringerbeugung. Aufgrund der starken Auslastung des Fertigungsautoklavs beim Verbundführer wurde eine Validierung und Implementierung in den Autoklav sowie die Validierung an einem Fertigungsbauteil verworfen. Stattdessen sollte die Validierung der Sensorik sowie die Untersuchung von ausgewählten Prozessparametern in einer kleinen Versuchsreihe an Testplatten durchgeführt werden. Da für die Arbeiten ein Autoklav notwendig war, wurde um die Hilfe und Zusammenarbeit bei der Abteilung Keramische Verbundstrukturen des Instituts für Bauweisen und Strukturtechnologie gebeten. Daher haben einige Arbeitspakete in Stuttgart statt gefunden, der Großteil der Arbeiten erfolgte jedoch am Standort Augsburg.

Die Arbeiten wurden in enger Absprache mit dem Verbundführer geplant und durchgeführt. Diese erfolgte durch Regeltermine in den jeweiligen Teilprojekten mit der an den Arbeiten beteiligten Mitarbeitern auf beiden Seiten. Für die Koordination der Arbeiten zwischen den Instituten BT und FA wurde ein telefonischer Regeltermin eingeführt. Die Präsentation der Zwischenergebnisse erfolgte jährlich in einem von Verbundführer organisierten Review-Projektpartnertreffen unter Beteiligung der Vertretung des Projektträgers.

## **2 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabensbeginn**

### **2.1 Stand der Technik bei Antragsstellung**

Um die notwendige Erhöhung der Außenhautleitfähigkeit bei Flugzeugen mit einem hohen Anteil an Faserverbundstoffen im Rumpf zu erreichen können mehrere Strategien angewandt werden. Die häufigste verwendet metallische (Aluminium oder Kupfer) Gitter oder Folien die auf der Außenseite angebracht werden. Beim Verbundführer Premium

Aerotec wird eine zum Gitter geschlitzte dünne Kupferfolie, die in der identischen Kunststoffmatrix eingebettet ist wie die Kohlefaser der übrigen Rumpfschichten, verwendet. Diese wird vom Lieferanten auf Rollen mit 90 cm Breite und ca. 66 m Gesamtlänge bezogen. Zum Zeitpunkt der Antragsstellung wird das Material in einem manuellen Prozess von mehreren Werkern an einer Turningstation, die die fast fertige Außenschale dreht, mit der Hand anhand einer Laserprojektion drapiert. Die zu legenden Zuschnitte orientieren sich an Ebenenschnitten des Rumpfes senkrecht zur Flugachse. Die Abwicklung der Zuschnitte an den doppelgekrümmten Sektionen von 3D in 2D ergibt auf dem Ausgangsmaterial Bahnen die in Form einer Banane gekrümmt sind. Je nach Krümmung der Oberflächen beträgt die Breite einer Bahn zum Teil nur weniger mehr als die Breite der Ausgangsrolle. Das Material wird im vorhergehenden Schnitt von einem Vorkonfektierer in die entsprechende Form zugeschnitten was unter der Einhaltung der Kühlkette erfolgen muss. Zum Zeitpunkt der Antragsstellung wurde die Fertigung der Schalen im Male-Verfahren (Blitzschutz als letzte Schicht, konvexe Formgeometrie) bewerkstelligt. Im Projekt AZUR wurde in Zusammenarbeit mit Premium Aerotec ein Konzept für eine durchgängige Automatisierungslösung entwickelt. Dabei wurde das manuelle Prozess eingehend analysiert und Vorversuche für die Materialrandbedingungen durchgeführt. Daraus wurde ein Materialführungskonzept erarbeitet und ein Testwagen konstruiert und gebaut mit dem die ersten Ablegeversuche auf doppelgekrümmten Oberflächen durchgeführt wurden. Die so gewonnen Erfahrungen sind in die Konstruktion des Endeffektors durch die Firma Emil Bucher GmbH & Co. KG eingeflossen. Dieser sollte zum Start des Projektes RoCk an das DLR für die geplanten Arbeiten geliefert werden (1, 2).

Die Verstärkungselemente im Türbereich wurden zum Zeitpunkt der Antragsstellung hauptsächlich aus integral gefrästen metallischen Einzelementen hergestellt. Eine alternative Faserverbundbauweise wurde zu diesem Zeitpunkt in den Anfangsstadien untersucht. Während im Projekt AZIMUT die Produktionskette im Vordergrund stand (3), wurde der Fokus im Projekt RoCk auf die Robustheit des Prozesses, im Speziellen auf die Reproduzierbarkeit der Faserwinkel beim Preforming der Türumgebungsspanne. Die Bestimmung der Faserwinkel erfolgte üblicherweise auf optischem Wege. Für diese Herangehensweise stand zum Zeitpunkt des Projektes noch keine entsprechende Messinstrumente, eine Recherche wurde jedoch durchgeführt und die Entscheidung stand kurz bevor.

Im Bereich der Stringerintegration wurden beim Verbundführer für jede gefertigte Schale Positionsmessungen der Stringer auf der Schale vor und nach der Aushärtung durchgeführt. Nach dem Integrationsprozess ergab sich eine gewisse Abweichung beider Positionen, die jedoch innerhalb der Bauteiltoleranzen lagen. Eine Erklärung für das sog. „Stringerschwimmen“ konnte bis dahin nicht eindeutig geliefert werden.

## 2.2 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Im Teilprojekt 1 wurde von der Firma Emil Bucher GmbH & Co. KG der Prototyp des Blitzschutzablegers gebaut und dem DLR für die weiteren Versuche überlassen.

## 2.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Projekt wurde die Firma Emil Bucher GmbH & Co. KG für den Umbau des Endeffektors auf die Female-Geometrie beauftragt. Firma KUKA wurde mit der Beschaffung des zusätzlichen *Extended Schrank*s und der Erweiterung der Motorleitungen an der MFZ beauftragt. Des Weiteren wurde sie mit der Durchführung eines 3-tägigen Workshops zum Thema *Extended Motion* beauftragt.

# 3 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

## 3.1 Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendung wurde gemäß der im Antrag dargelegten Arbeiten für die Erreichung der Projektziele verwendet. Dabei wurden die Mittel für das Teilprojekt 2 dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik zur eigenständigen Verwaltung zur Verfügung gestellt.

Die in der Projektaufstockung bewilligten Mittel wurden ausschließlich für das Teilprojekt 1 verwendet um die automatisierte Blitzschutzablage für den Female-Prozess auf konkaven Formen zu übertragen. Die dafür notwendige Unterbeauftragung von Emil Bucher GmbH & Co. KG für die Anpassung des Endeffektors wurde mit den beantragten Mitteln für FE Fremdleistungen (POS 0823) anhand eines Angebotes der Unterauftragnehmer beglichen. Ebenfalls aus den Mitteln der FE Fremdleistungen erfolgte die Erweiterung der MFZ um zusätzliche Roboterleitungen durch KUKA Systems GmbH.

## 3.2 Vorgegebene Ziele

Die sich aus dem Antrag gebenden Ziele sind im Einzelnen:

- Teilprojekt 1 - Große Schalenstrukturen (Male-Prozess, ab 01.04.2015 auch Female-Prozess)
  - Bestimmung der entscheidenden Prozessparameter (Kräfte, Momente, ...)
  - Vollständige Validierung des Blitzschutzablegers
  - Abschätzung des Industriepotenzials
  - Handlungsempfehlungen für den Einsatz des Ablegeendeffektors an großen Schalenstrukturen des A350
- Teilprojekt 2 - Verstärkungs-Strukturen
  - Bewertung von Drapiervarianten für NCF-Preforms an Spanten im Bereich der Türumgebung bezüglich ihrer Auswirkung auf Reproduzierbarkeit und Parameterrelevanz.
  - Konzepte zur Reproduktion von Faserwinkelabweichungen und zur Vermeidung von Streuungen im Gesamtpreformprozess.

- Validierung der Konzepte zur Einhaltung der Geometrie- und Faserwinkelabweichungen mittels statistischer Methoden.
- Prozessbegleitende Qualitätssicherung
  - Verbessertes Prozessverständnis für den Fertigungsschritt „Setzen von Stringern“
  - Anforderungsdefinition an die QS
  - Auswahl und Integration geeigneter Zerstörungsfreier Prüfmethoden
  - Validierung der Methodik am realen Bauteil (A350 strigerversteifte Schale)

### **3.3 Einzelergebnisse und Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen**

Die im Antrag enthaltene Ziele werden im Folgenden den im Verlauf des Projektes erreichten Einzelergebnissen in jeweiligen Teilprojekten gegenübergestellt. Für das erste Teilprojekt (TP 1) wurden folgende Ziele erreicht:

Projektziel	Erreichte Einzelergebnisse
Bestimmung der entscheidenden Prozessparameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Auftretende Kräfte und Drehmomente abgeschätzt</li> <li>* Roboter- und Prozessgeschwindigkeiten abgeschätzt</li> <li>* Anforderungen an Schnittqualität abgeschätzt</li> <li>* Zulässige/notwendige Spannung im Material abgeschätzt</li> <li>* Anforderungen an Bahn-/Roboter Genauigkeit abgeschätzt</li> </ul>
Vollständige Validierung des Blitzschutzablegers	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Antriebs- und Sensorikkonzept erstellt</li> <li>* Sensoren implementiert</li> <li>* Anforderungen an Schnittqualität abgeschätzt</li> <li>* Steuerung der Materialantriebe implementiert</li> <li>* Workflow und die benötigten Tools für Bahnplanung und -erzeugung entwickelt</li> <li>* Programme für 2 (optimierte) Bahnen auf Male-Geometrie und 3 Bahnen auf Female-Geometrie erzeugt</li> <li>* Endeffektor in die MFZ integriert: Leitungen erweitert, Software aktualisiert</li> <li>* Einflussfaktoren der Ablagequalität identifiziert und untersucht: Materialspannung, Schnittqualität, Richtung und Winkel der Bahn, Andrücktiefe der Anpressrolle, Parallelität der Walzen, Geschwindigkeit des Endeffektors, Form des Bahnanfangs</li> <li>* Parameterbereiche für gute Ablage abgeschätzt</li> <li>* Automatisierte Ablage in guter Qualität mit zwei überlappenden Bahnen auf Male-Geometrie und drei Bahnen (davon jeweils zwei überlappend) auf Female-Geometrie</li> <li>* Notwendige Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessstabilität mit dem Ablegeendeffektor identifiziert</li> <li>* Notwendige Konstruktive Änderungen identifiziert</li> </ul>
Abschätzung des Industrialisierungspotenzials	Potenzial anhand der Fertigungsvorgaben und der Ergebnisse der Validierung abgeschätzt und Verbundführer vorgestellt
Handlungsempfehlungen für den Einsatz des Ablegeendeffektors an großen Schalestrukturen des A350	Wurden dem Verbundführer vorgestellt

Für das Teilprojekt 2 konnten folgende Ergebnisse erreicht werden:

Projektziel	Erreichte Einzelergebnisse
Bewertung von Drapiervarianten für NCF-Preforms an Spanten im Bereich der Türumgebung bezüglich ihrer Auswirkung auf Reproduzierbarkeit und Parameterrelevanz	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Methoden zur automatischen, faltenfreien Drapierung von rechteckigen Faserzuschnitten auf komplex geformte C-Spant-Querschnitte vervollständigt</li> <li>* Modularer und integraler Drapieraktuator entworfen und konstruiert</li> </ul>
Erstellung der Konzepte zur Reproduktion von Faserwinkelabweichungen und zur Vermeidung von Streuungen im Gesamtpreformprozess	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Messgenauigkeit von optischen Faserwinkelsensoren evaluiert</li> <li>* Ein Referenzierungssystem zur manuell geführten Detektion von Faserwinkelverteilungen auf einem Türspantdemonstrator in Fertigungsumgebung entwickelt und erprobt</li> <li>* Exporttool für die Messwerte entwickelt</li> </ul>
Validierung der Konzepte zur Einhaltung der Geometrie- und Faserwinkelabweichungen mittels statistischer Methoden	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Messgenauigkeit einer manuellgeführten Faserwinkeldetektion abgeschätzt</li> <li>* Streuung der manuellen Drapierung von Faserlagen eines DS-Spantdemonstrators (C74) abgeschätzt</li> <li>* Robotergeführte Messung durchgeführt</li> <li>* Messungen ausgewertet und verglichen</li> </ul>

Im Teilprojekt 4 konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

Projektziel	Erreichte Einzelergebnisse
Verbessertes Prozessverständnis für den Fertigungsschritt „Setzen von Stringern“	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Besondere Anforderungen des untersuchten Fertigungsprozesses identifiziert</li> <li>* Fertigungstoleranzen und potenzielle/relevante Abweichungen identifiziert</li> <li>* Konzepte für zur Erkennung der Positionsabweichungen und der Fehlerauswertung erarbeitet</li> </ul>
Ermittlung relevanter Prozessparameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Relevante Prozessparameter anhand der Daten und des Prozess-Know-how identifiziert</li> </ul>
Definition des Anforderungen an prozessbegleitende Qualitätssicherung im untersuchen Prozess	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Die Anforderungen wurden in Zusammenarbeit mit Premium Aerotec definiert</li> </ul>
Auswahl und Integration geeigneter zerstörungsfreier Prüfmethode	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Marktrecherche durchgeführt</li> <li>* Sensorik festgelegt und beschafft, einschließlich des Aufbaus im Autoklav (Kühlkammer, Tooling)</li> <li>* Datenverarbeitungs- und Auswertungskonzept erstellt</li> <li>* Automatisierungstool für die Auswertung erstellt</li> </ul>
Validierung der Methodik am realen Bauteil	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 1 Probeplatte im fertigungsnahen Prozess hergestellt und die Bewegung der Stringer prozessbegleitend gemessen</li> <li>* Tracking einiger Punkte auf dem Stringer während dem Prozess</li> </ul>

### 3.4 Nicht erreichte Projektziele

Nicht alle Ziele aus dem Projektantrag konnten erreicht werden. Größtenteils resultiert das aus der zum Zeitpunkt der Antragsstellung ungenügenden Abschätzung der Komplexität des zu bearbeitenden Themas. Im Einzelnen wurden folgende Ziele verfehlt.

#### Teilprojekt 1: Sensorbasierte Regelung

Das Ziel war eine über das *RSI*-Interface in die Robotersteuerung implementierte Regelung der Bahn des Endeffektors. Diese sollte anhand der Daten aus den Sensoren eine entsprechende Korrektur der Bahn realisieren, die z. B. durch das seitliche „Weglaufen“ des Materials notwendig wäre um die einprogrammierte Bahnpositionierung dennoch zu erreichen. Die Versuche an der Male-Geometrie zeigte jedoch, dass das Material sehr stabil im Endeffektor gefördert wird und somit das befürchtete seitliche „Weglaufen“ des

Materials nicht zu beobachten war. Durch die Umstellung von den Bananen- zu den krümmungsoptimierten Bahnen wurden noch zusätzliche seitlichen Kräfte beseitigt, die für ein „Weglaufen“ verantwortlich sein könnten. Die Roboterbahn hat sich als sehr präzise und hoch reproduzierbar erwiesen, sodass auch die Abweichung der Bahn keiner Korrektur bedürfte. Die Versuche zeigten auch eindrucksvoll, dass eine Veränderung der optimalen Bahnen (Versatz oder Kippung/Drehung um das TCP) selbst seitliche Kräfte einbringt und damit unweigerlich zum Faltenwurf führt. Aus diesem Grund wurde keine *RSI*-basierte Regelung notwendig und der Arbeitspaket wurde mit einer sehr niedrigen Priorisierung versehen und aus Ressourcen/Zeitgründen nicht mehr bearbeitet.

#### **Teilprojekt 4: Ermittlung der Steuerungsparameter im Prozess**

Da die Validierung der Sensorik nicht wie im Projektantrag enthalten im Autoklav der Fertigung des Verbundführers und die Versuchsreihe nur an einer Probestplatte durchgeführt wurde, konnten keine Steuerungsparameter des echten Prozesses ermittelt werden. Es wurden jedoch aufgrund der durchgeführten Prozessanalyse prozesskritische Parameter ermittelt, die in eine zum späteren Zeitpunkt noch zu konzeptionierende Prozesssteuerung einfließen könnten.

#### **Teilprojekt 4: Integration der Prozessüberwachung an Roboterzelle**

Da erst im Laufe des Projektes der Fokus auf das „Stringerschwimmen“ gelegt wurde und dieser Prozessschritt im Autoklav stattfindet, ist das Ziel obsolet. Stattdessen wurde die Sensorik in den Forschungsautoklav des Institutes BT in Stuttgart integriert.

#### **Teilprojekt 4: Validierung am Realbauteil bei PAG**

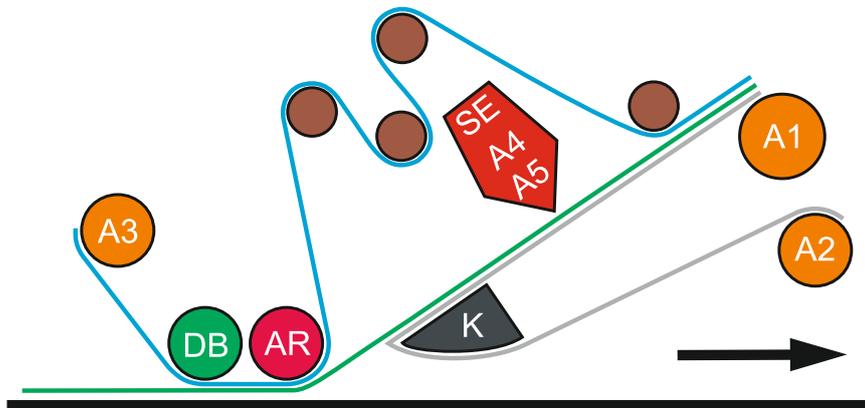
Nachdem der Fokus des Projektinhaltes auf das „Stringerschwimmen“ gelegt wurde, wurde seitens des Verbundführers beschlossen, dass keine Messung am Realteil stattfinden kann.

## **4 Eingehende Darstellung der Einzeltechnologien**

### **4.1 Teilprojekt 1 - Große Schalenstrukturen**

#### **4.1.1 Zielsetzung**

Teilprojekt 1 setzt inhaltlich die im Projekt AZUR begonnen Arbeiten fort. Das Ziel ist eine automatisierte Ablage vom Standard-Blitzschutzmaterial auf doppelgekrümmten Schalen des hinteren Rumpfes eines *Single-Aisle*-Passagierflugzeugs direkt von der Rolle mit einem positionsgenauen Materialzuschnitt.



- (a) Schematische Darstellung des Materialweges. Das Eingangsmaterial (Standardrolle) wird auf der Materialachse A1 eingelegt. Das dreischichtige Material - Schutzfolie (blau), Kupfernetz in Matrix (grün), Trägerpapier (grau) - wird aufgetrennt. Die Schutzfolie wird zum Folien-speicher geführt, während das Prepreg-Material mit Trägerpapier durch die Schneideeinheit (SE) geführt wird. Am Keil (K) wird Prepreg vom Trägerpapier gelöst, das Papier wird auf A2 aufgesammelt. Das Prepreg wird unter Zuführung der Schutzfolie an der Anpressrolle (AR) auf die Oberfläche (schwarze Linie) gedrückt und durch Drapierbürste DB andrapiert. Auf A3 wird die Schutzfolie aufgesammelt. Der Endeffektor bewegt sich in die Pfeilrichtung.



- (b) Testwagen auf Schienensystem mit durchgeführtem Testmaterial. An den äußeren Profilen werden die Gewichte für den Antrieb der Rollen aufgehängt (nicht im Bild). Nicht enthalten ist auch die Schneideeinheit.

Abbildung 2: Entwicklung des Endeffektor-Prototypes im Projekt AZUR.

Im Projekt AZUR wurde anhand der Analyse der bisherigen manuellen Prozesse ein Konzept für die Automatisierung erstellt und notwendige Vortests für die Bestimmung der zulässigen Prozessparameter, im Speziellen die Kenndaten für das Materialhandling, durchgeführt. Für die Konzeptvalidierung wurde ein Versuchswagen gebaut, mit dem der Materialtransport im Wagen abgebildet wurde. Durch die Schrittweise Integration einzelner Systemkomponenten (Anpressrolle, Drapiereinheit, Folienspeicher, Antriebe, Schneideeinheit) wurde diese getestet und bei Bedarf optimiert. Die ersten Ablagetests wurden mit Hilfe einer Seilwinde für die Vorwärtsbewegung auf einem Schienensystem und Gewichten, die für nötige Drehmomente der Materialachsen gesorgt haben, durchgeführt. Die Entwicklung und die Tests des Wagens wird in der Abbildung 2 dargestellt. Anhand der Erfahrung mit dem Versuchswagen wurde vom Projektpartner Emil Bucher GmbH & Co. KG der Ablageprototyp gebaut und sollte zum Projektstart dem DLR zur Verfügung gestellt werden (1, 2).

Zum Beginn des Projektes sollte der Endeffektor aus dem Projekt AZUR übernommen werden. Eine an die Prozessanforderungen angepasste Sensorik sowie Aktorik sollte in den Endeffektor mechanisch, elektrisch und Regelungstechnisch implementiert werden. Anschließend sollte der Endeffektor in eine Roboterzelle integriert werden und mit Hilfe geeigneter Versuche unter den prozesstechnischen Gesichtspunkten an einer *Full-Size*-Geometrie validiert werden. Daraus sollten notwendige Umbaumaßnahmen sowie Empfehlungen für den Einsatz in der Fertigung abgeleitet werden.

#### 4.1.2 Übersicht der durchgeführten Arbeiten

##### Konzept und Implementierung der Sensorik

Der Endeffektor sollte mit einer ganzen Breite an Sensoren ausgestattet werden um den Betrieb zu überwachen und eventuell auftretende Abweichungen mittels geeigneter Regelungsszenarien zu korrigieren. Ein entsprechendes Konzept der Sensorik wird in der Abbildung 3 dargestellt, die dazugehörigen Sensoren in der Tabelle 1 erläutert.

Die Sensoren wurden an einen *EtherCAT*-Bus angeschlossen der über *TwinCAT 3* an die Robotersteuerung übergeben. Mit Hilfe von *Work Visual* konnten die Zustände der Sensoren durch die *KUKA Robot Language (KRL)* verarbeitet werden.

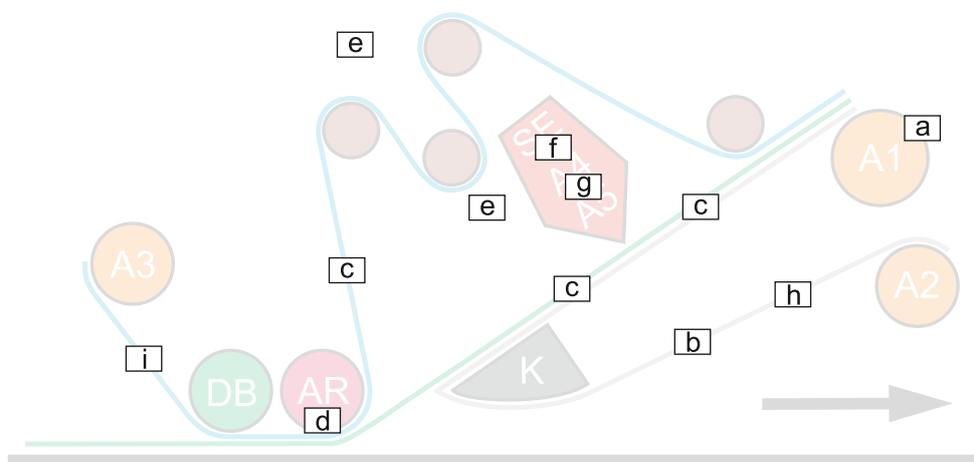


Abbildung 3: Sensorikkonzept des Blitzschutzendeffektors. Die Positionen [a] bis [i] sind in der Tabelle 1 erklärt.

Tabelle 1: In den Blitzschutzendeffektor integrierte Sensoren

Pos.	Bezeichnung	Funktion
a	ODSL9 50111171	Füllstandüberwachung der Materialrolle
b	RM6102	Drehgeber für die abgespulte Materialmenge
c	GS754B 501115803	je 2 Gabelsensoren für die Position der Bahnkanten der Schutzfolie und des Prepregs mit Trägerpapier vor und nach der Schneideeinheit
d	NBN4-12GM50-E0-V1	2 Näherungsschalter für den Anpressweg der Anpressrolle
e	NBN4-12GM50-E0-V1	je 2 Näherungsschalter für den max.- und min.-Zustand des Folienspeichers
f	NBB2-V3-E2-V3	je 2 Näherungsschalter zur Kollisionsdetektion der Messerschlitzen
g	NBB1-4GM22-E2	4 Näherungsschalter für die Detektion der Stellung der Messerdrehung
h	GS04M/N-30-S8	Gabelschranke für die Risskontrolle des Trägerpapiers
i	GS04M/N-30-S8	Gabelschranke für die Risskontrolle der Schutzfolie

### **Aufbau der Versuchsumgebung**

Für die Ablageversuche wurde dem DLR vom Verbundführer eine Schale der hinteren Rumpfsktion als Ablageform zur Verfügung gestellt. Diese wurde mit Hilfe der Offlineprogrammierung auf die Erreichbarkeit in der Thermoplastzelle (TPZ) untersucht und ein entsprechendes Gerüst, der Sollgeometrie entsprechend, konstruiert und gebaut. Die Form wurde am vorgesehenen Platz in der TPZ aufgestellt, mittels Lasertracker flächig vermessen und mit Hilfe von einstellbaren Auflagepunkten in mehreren Iterationsschritten an die reale Geometrie eingestellt. Ab einer durchschnittlichen Abweichung von 1 mm der gemessenen zur realen Geometrie wurde die Form final vermessen und eine Fläche für weitere Offlineprogrammierung erzeugt.

Der Roboter (KUKA Quantec 210) wurde um die notwendigen Motorleitungen für die Zusatzachsen des Endeffektors erweitert. Ebenfalls wurde eine Aufnahme für Netzteil und Ultraschallgeneratoren auf der Achse 3 konstruiert und angebracht. Die Zusatzsoftware (*Extended Motion*) wurde installiert und die Steuerungsprogramme importiert.

### **Regelung der Materialachsen**

Das Konzept für den Materialtransport während der Ablage basiert auf dem „statischen Gleichgewicht“ des Materials. Dabei werden die Achsen - die Materialachse A1 (s. Abbildung 2a) und die Sammelachsen A2 und A3 halten das Material auf Spannung und das Material ist in Ruhe. Befindet sich das Material über die Anpressrolle im Kontakt und rollt diese über eine Unterlage, werden dank der Reibung zusätzliche Kräfte in das Material übertragen. Diese Kraft bringt das Material aus dem Gleichgewicht und zieht entsprechend der Rollgeschwindigkeit Material von der Materialrolle. Dies stellt sicher, dass die Ablegegeschwindigkeit und die Geschwindigkeit des Roboters auf der Ablegeform identisch sind und sorgt für perfekte Synchronisierung. Bei einem Unterschied beider Geschwindigkeiten würde ein Überschuss (Faltenbildung) oder Mangel (Materialverzug) des Materials auftreten, beides kritisch für die Ablagequalität.

Das „statische Gleichgewicht“ sollte unabhängig der übrigen Achsen verwirklicht werden, die Möglichkeit einer direkten Kopplung an die Robotersteuerung sollte jedoch aus Flexibilitätsgründen beibehalten werden. Mit den beiden Antrieben für die Messerbewegung ergeben sich daher neben der sechs Roboterachsen und der Linearachse weitere fünf Antriebe die in der Robotersteuerung implementiert werden sollten. Das kann nur mit dem Zusatzpaket von KUKA *Extended Motion* bewerkstelligt werden. Da ZLP in Augsburg über die Quantec Roboter in der KR C4-Version verfügt, wurde auch entsprechende Version der *Extended Motion*-Software beschafft. Diese befand sich zu diesem Zeitpunkt in Entwicklung und verfügte über eingeschränkte Leistung im Vergleich zur KR C2-Software. Unter anderem war der Softwarebaustein, mit dem eine Momentenregelung der Antriebe bewerkstelligt werden konnte, nicht implementiert und im Lieferumfang nicht enthalten. Daher musste die Regelung in Eigenregie geschrieben und implementiert werden.

Um eine zügige Implementierung des Endeffektors in die Roboterzelle und die Entwicklung der Antriebssteuerung unabhängig von einer Roboteranlage (zu diesem Zeitpunkt im Aufbau bzw. belegt) zu erlauben, wurde ein Steuerschrank für KR C4-Steuerung beschafft, der die Endeffektorantriebe steuern konnte bei gleichzeitiger Simulation der Ro-

boterachsen. Dadurch konnte die teure Roboterzeit auf ein Minimum reduziert werden. Durch die Notwendigkeit der Steuerungsentwicklung musste ein erheblicher Mehraufwand bei der Implementierung der Steuerung aufgewandt werden. Das Ergebnis war eine rudimentäre Regelung für die drei Achsen um das „statische Gleichgewicht“ im Material zu erzeugen und das Material beim Einfädeln einer neuen Rolle zu befördern.

### **Inbetriebnahme des Endeffektors auf der Thermoplastzelle**

Der Endeffektor wurde zunächst auf der Thermoplastzelle (TPZ) an einem Qunatec Roboter von KUKA integriert. Nachdem die mechanischen und elektrischen Verbindungen hergestellt wurden und die aktuellste Software einschließlich des *Extended Motion*-Paketes installiert wurde, begannen die Test für die Inbetriebnahme. Zunächst musste die entwickelte Regelung der Endeffektorachsen für die Materialförderung getestet und optimiert werden. Diese Tests wurden mit Material und auf einer ebenen Aluminiumplatte durchgeführt. Die Bewegung des Roboters wurde eingeteacht. Dabei wurden folgende Beobachtungen gemacht:

- Für eine faltenfreie Ablage muss die Anpressrolle perfekt senkrecht zur Bewegungsrichtung des Endeffektors stehen. Die durch eine Schrägstellung auftretenden seitlichen Kräfte erzeugen kritische Umklappfalten.
- Die Parameter der entwickelten Regelung mussten um die Eigendrehmomente bei der Drehung der Achsen erweitert werden. Diese sind drehzahlabhängig und wurden experimentell bestimmt.
- Die Regelung der Materialachsen reagiert sehr träge. Der Zusammenspiel der Materialachse A1 und der Sammelachse für das Trägerpapier A2 bestimmt die Regelung.
- Die Folieammelachse kann langsamer aufwickeln als die zwei übrigen Achsen (Folie hängt durch) ohne einen Einfluss auf die Ablagequalität
- Eine faltenfreie Ablage auf der ebenen Aluminiumplatte ist möglich.

### **Die ersten Ablegeversuche auf Male-Geometrie**

Nachdem die Regelung nachgebessert wurde, sollten die ersten Bananen-Bahnen auf der eingemessenen doppelgekrümmten Form erfolgen. Die Bahnen wurden mit Hilfe auf der Form angebrachten Markierungen eingeteacht, die mit einem Laser projiziert wurden. Die Skizze der ersten Bananen-Bahn ist in der Abbildung 4 zu sehen.

Bei der Ablage der ersten Bananen-Bahn, die in mehreren Iterationsschritten zunehmend genauer an die Ablageform angepasst wurde, stellte sich heraus, dass eine Drapierung mit der vorhandenen Konfiguration der Anpressrolle und Drapierbürste nicht möglich ist. Das Verhalten des Materials bei der Ablage ist in der Abbildung 5 dokumentiert.

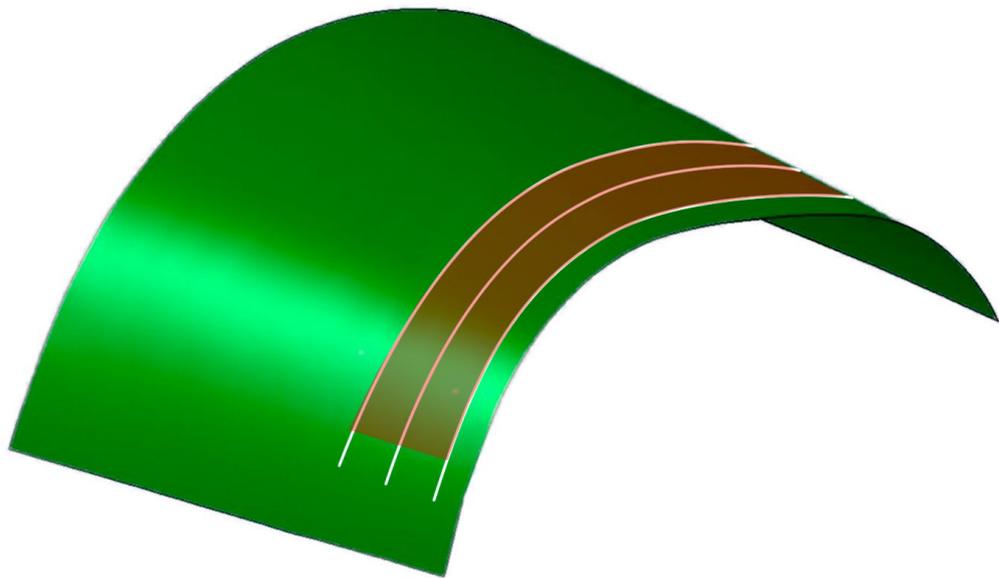
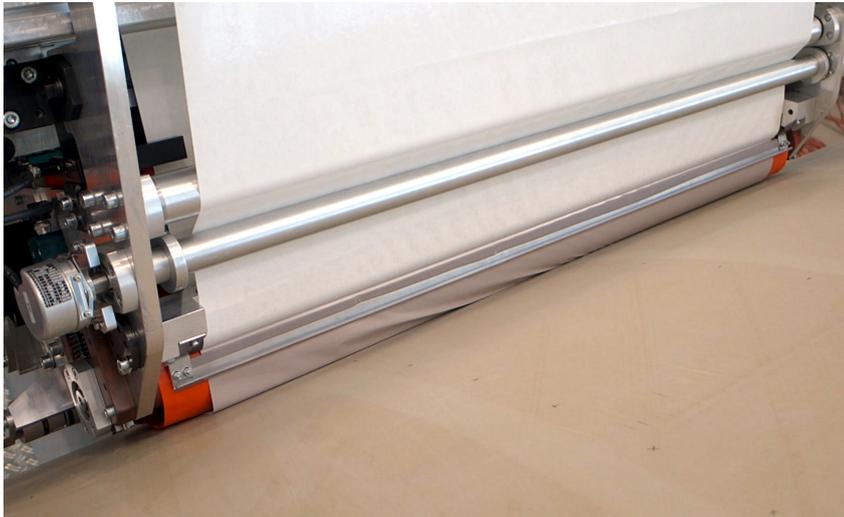
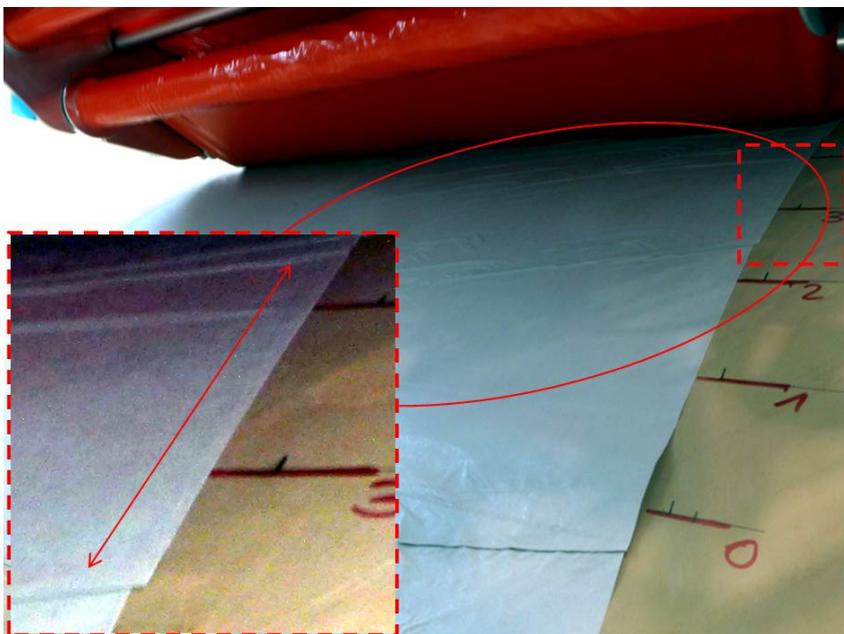


Abbildung 4: Skizze der Bananen-Bahn. Der rot eingefärbte Bereich entspricht dem Verlauf der ersten Bahn, der mit Strichlinien markierte Bereich stellt den tatsächlich abgelegten Bahnabschnitt dar. Der Pfeil zeigt die Ablegerichtung.



- (a) Screenshot eines Videos zur Dokumentation der Ablageversuche. Die Anpressrolle drückt das Blitzschutzmaterial (hier grau) auf der kompletten Rollenbreite an. Das Material ist auf der rechten Seite (Innenseite der Form) platt angedrückt, während von der Mitte aus Falten bereits auf der Anpressrolle entstehen und zur linken Seite hin (Außenseite der Form) transportiert werden. An der Materialkante (linke Seite) entsteht durch die Falten ein Materialüberschuss der durch Stauchen des Materials aufgelöst wird. Daraus entstehen die Umklappfalten, siehe Bild unten.



- (b) Die Bei der Ablage der ersten Bananen-Bahn entstandene Umklappfalten. Diese werden durch den Materialüberschuss auf der äußeren Kante des Endeffektors erzeugt und werden durch Stauchen in regelmäßigen Abständen beseitigt. Daher stammt auch das äquidistante Faltenbild (Pfeil in der Vergrößerung).

Abbildung 5: Ablage der ersten Bananen-Bahn auf Male-Ablageform.

Im Verlauf der Ablageprozesses wurde die Anpressrolle beobachtet und in Rahmen der Versuchsdokumentation gefilmt. Dadurch war es möglich die Mechanik der Entstehung der Falten zu klären: Auf der Anpressrolle waren eindeutig zwei Bereiche auszumachen in denen sich das Material unterschiedlich verhalten hat - auf der (entgegen der Ablagerichtung) rechten Seite lag das Material sehr straff auf der Anpressrolle an, auf der linken Seite bildete sich Materialüberschuss, der von der Mitte der Rolle aus in Form von großen Materialfalten zur Materialkante hin transportiert wurde, siehe Abbildung 5a. Der so entstandene Materialüberschuss wurde in regelmäßigen Abständen ausgeglichen, indem das Material zusammengeklappt wurde um anschließend von der Anpressrolle auf der Form angepresst zu werden. Das führt zu einem charakteristischen Faltenbild mit Umklappfalten in regelmäßigen Abständen auf der rechten Seite (in Ablegerichtung), siehe Abbildung 5b. Das Verhalten war reproduzierbar und auch eine Veränderung des Anstellwinkels der Anpressrolle zur Ablagerichtung zur Straffung des Materials auf der rechten Seite (in Ablagerichtung) konnte das Verhalten nicht wesentlich beeinflusst werden. Dank der Beobachtung des Materials auf der Rolle, noch bevor das Material auf die Unterlage angepresst wurde, konnte eine Erklärung für das Materialverhalten geliefert werden. Durch die Krümmung der Form ist der Weg der linken Materialkante (in Ablegerichtung) länger als der der rechten Materialkante, was leicht aus den Radien der entsprechenden Ebenenschnitte zu sehen und auch an der Abwicklung der Bananen-Bahn in 2D erkennbar ist. Um das Verhalten zu verifizieren, wurde eine Bahn eingeteacht, die sich an der Krümmung der Form orientiert und auf welcher beide Materialkanten möglichst identische Wege zurücklegen. Eine Skizze des Bahnverlauf ist in der Abbildung 6 zu sehen. Bei der Ablage der Bahn wurden beide Ultraschallmesser ca. 5 cm von der Materialkante für die gesamte Bahnlänge positioniert. Damit wurde eine Gesamtbreite von 80 cm abgelegt. Die Ablagequalität war sehr gut und kann der Abbildung 7 entnommen werden. Die wenigen Falten, die bei der Ablage entstanden sind resultierten wahrscheinlich aus der Ungenauigkeit der nach Augenmaß eingeteachten Bahn (Verlauf, Stellung und Eindringtiefe der Anpressrolle).

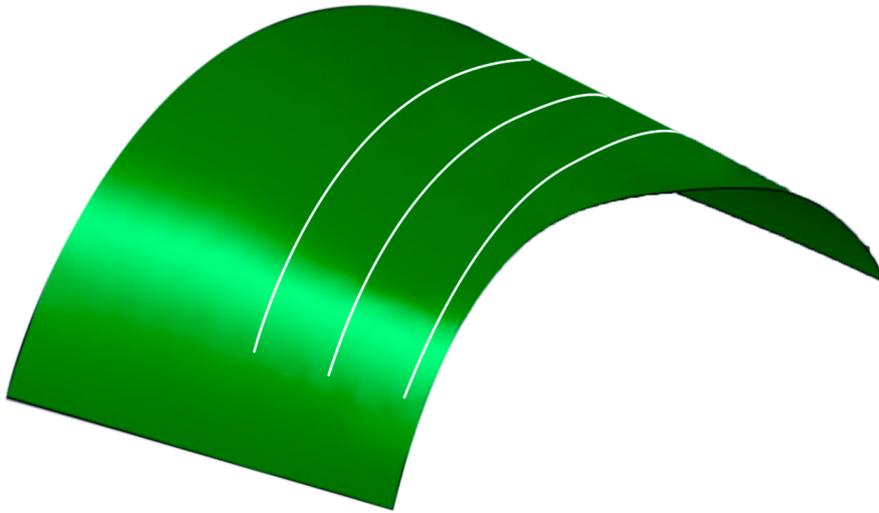


Abbildung 6: Die untersuchte alternative Bahn bei der beide Kantenlängen der Bahn identisch sind. Dadurch entsteht kein Unterschied in der Materialmenge die Drapiert werden und durch Falten ausgeglichen werden muss.

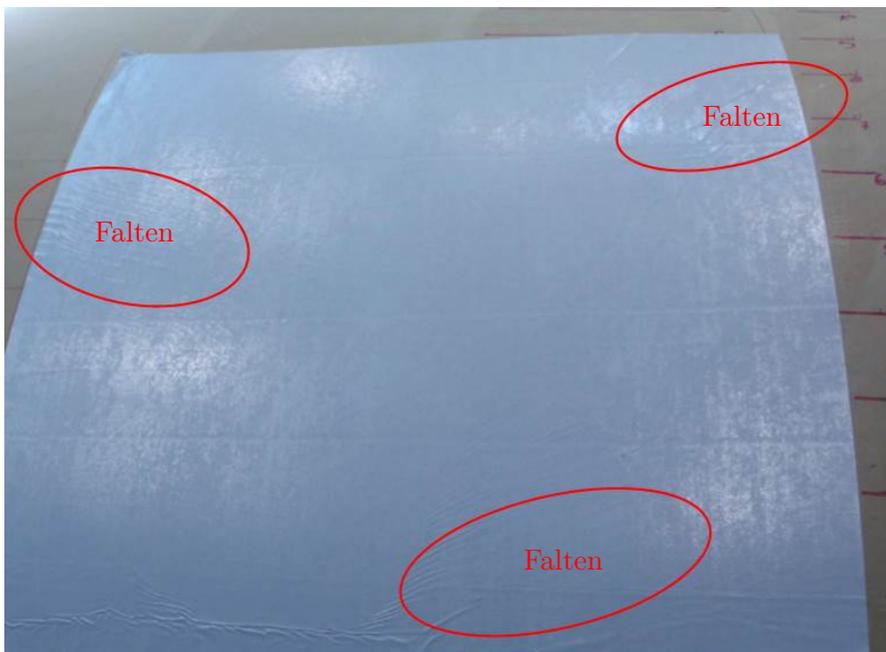


Abbildung 7: Das Ergebnis der Ablage der alternativen Bahn mit identischen Bahnkanten. Die entstandenen Falten resultieren höchstwahrscheinlich von der Ungenauigkeit der eingeteachten Bahn.

## Bahnplanung und Bahnoptimierung

Das Ergebnis der Ablage auf Male-Form zeigte die Grenzen der Genauigkeit einer nur auf Augenmaß eingeteachten Bahn, die nicht parallel zur Formkante (Bananen-Bahn) verläuft, da die großen Krümmungsradien und deren kaum sichtbarer Verlauf mit bloßem Auge nicht mehr auflösbar sind. Auch eine nur auf visueller Kontrolle basierte Einstellung der Anpresstiefe der Rolle ist nicht möglich. Aus diesem Grund hatten weitere Arbeiten das Ziel ein Workflow zu entwickeln um sowohl die Bahngenerierung wie auch die Erstellung des Roboterprogramms mit Hilfe von Offline-Programmierungssoftware abzuwickeln. Die Aufgabe wurde in drei Bereiche geteilt: Bahnoptimierung, Bahnerzeugung (OLP) und Roboterprogrammerstellung.

### 1. Bahnoptimierung

Dieses Thema wurde im Rahmen einer Masterarbeit bearbeitet. Das Ziel war dabei anhand der realen Geometrie der Ablageform die Ablagebahn so zu konstruieren, dass beide Seitenkanten der Bahn identische Längen aufweisen. Dabei wird ein Startpunkt, eine Startrichtung und die Breite der Bahn vorgegeben. Anhand eines iterativen Algorithmus wird in festen Abständen der nachfolgende Bahnabschnitt auf der gegebenen Fläche konstruiert bis die Gesamtlänge erreicht ist, siehe Abbildung 8. Dadurch wird auch die Krümmung der Bahn in die Konstruktion einbezogen und die Bahn an diese angepasst. Für mehrere Bahnen die nebeneinander (mit vorgegebenem Überlapp) liegen, kann auch noch nach weiteren Prozessparametern optimiert werden, z. B. der optimalen Breite der Bahnen und damit nach dem Materialverschnitt.

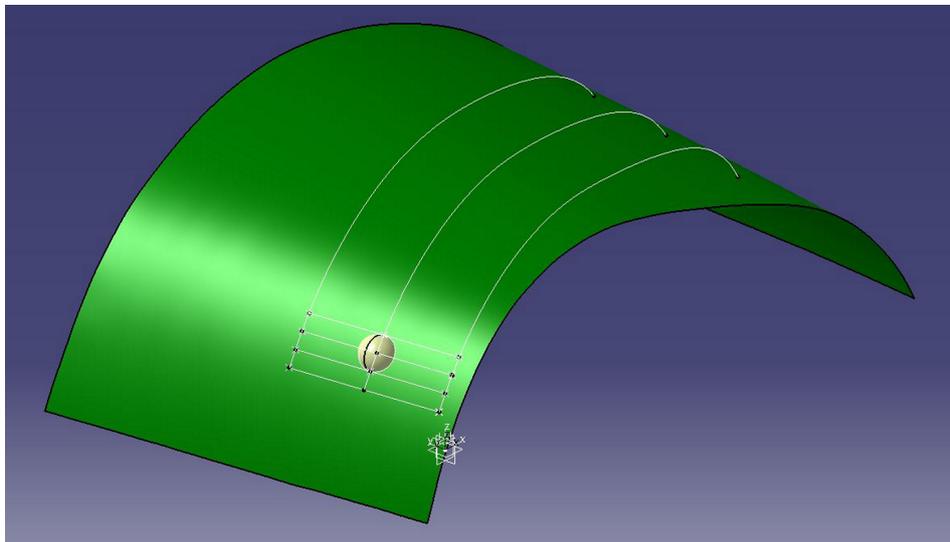


Abbildung 8: Bei dem Optimierungsalgorithmus wird aus einem Startpunkt und einer Richtung iterativ ein nachfolgender Abschnitt mit identischen Seitenlängen generiert.

## 2. Bahngenerierung (OLP)

Die aus der Bahnoptimierung gewonnen Bahndaten werden mit Hilfe von CATIA und FAST SURF Roboterbahnen generiert. Diese beinhalten die einzelnen Punkte des TCP des Endeffektors, der im Andrückpunkt der Anpressrolle liegt, sowie die seitliche Kanten der Messerpositionen rechts und links der einzelnen Punkte. Als Ergebnis liegt ein Roboterprogramm, der die Bewegung des Roboters über die Ablegeform beschreibt sowie die Projektion beider Messerbewegungen auf die Oberfläche.

## 3. Programmerstellung

Die Daten aus der OLP werden noch um weitere Prozessschritte erweitert. Diese sind u. a. die Vor- und Endpositionen des Endeffektors, die Bewegung des Roboters bis zum Kontakt auf der Form, das Vorfördern und Zuschneiden der Anfangskante der Bahn, das Schneiden des Bahnendes und die Endablage, die Beaufschlagung der Messerachsen mit den Schnittpositionen. Das Tool kann die Lage der kompletten Bahn (mit Anfang und Ende) visualisieren und in der Form darstellen, einschließlich der *Engineering Edge of Part, EEOP* und *Manufacturing Edge Of Part, MEOP*. Das finale Programm kann direkt in die Robotersteuerung eingespeist werden und die Ablage kann unmittelbar beginnen.

### **Ablage auf Male-Form mit OLP - Vergleich der Bananen- mit Alternativbahn**

Mit Hilfe der entwickelten Offlineprogrammierung konnte ein Vergleich beider Bahnarten unter systematischen Randbedingungen vollzogen werden. Zum einen wurde die Bananen-Bahn aus dem manuellen Prozess, einschließlich des seitlichen Beschnitts, offline erzeugt. Zum anderen wurde mit Hilfe des Optimierungsalgorithmus eine Bahn mit identischem Startpunkt und Startrichtung berechnet und mit identischen Parametern der OLP erzeugt. Hierbei wurde eine vollständige Bahnbreite des Materials von 90 cm untersucht.

Im direkten Vergleich wurde die Vermutung bestätigt, dass eine Bananen-Bahn mit der Anpressrolle durch die unterschiedliche Materialmenge an den Außenkanten nicht in ausreichender Qualität drapiert werden kann. Breite Umklappfalten, die schon auf der Anpressrolle erzeugt werden, sind in regelmäßigen Abständen zu sehen, siehe Abbildung 9.

Die alternative Bahn, deren Breite von 90 cm deutlich größer ist, als der Bananen-Bahn mit ca. 60 cm, besitzt keine Materialunterschiede an den Bahnkanten und orientiert sich an der Krümmung der Ablageform. Die Ablage liefert durchgehend sehr gute Ergebnisse mit leichten Wellen an den Kanten, die jedoch im Gegensatz zu den nicht beobachteten Umklappfalten, unter dem fertigungstechnischen Blickwinkel nicht kritisch sind. Die Ablage der Alternativbahn ist in der Abbildung 10 dargestellt.

Der direkte Vergleich zeigt, dass die Ablage der Alternativbahn deutlich besseres Ergebnis bezüglich der Ablagequalität liefert. Ein Grund hierfür ist auch ganz sicher, dass Aufgrund der Berücksichtigung der Krümmung der Ablage das Material weniger drapiert werden muss. Dadurch erfährt das Material auch geringere Prozesskräfte, was das Material in seiner Struktur schont. Ein weiterer Vorteil ist die bessere Ausnutzung der des Materials, da auch eine volle Breite des Materials auf der Rolle abgelegt werden kann.

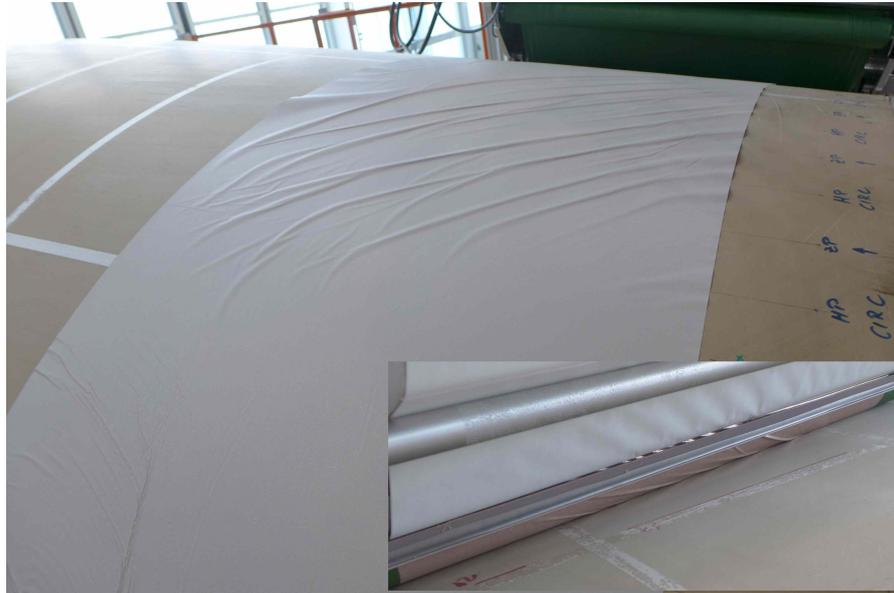


Abbildung 9: Ablageergebnis für Bananen-Bahn mit seitlichem Beschnitt und OLP-erzeugten Bahn. Die Falten sind durch den Materialunterschied entstanden. Im Inset sind die bereits entstandenen Falten auf der Anpressrolle zu sehen, die im weiteren Verlauf auf die Ablagefläche angepresst werden und zu typischen Umklappfalten werden.



Abbildung 10: Ablageergebnis für neue Bahn ohne seitlichen Beschnitt. Markierter Bereich weist auf das Bahnanfangsproblem hin.

### **Anfangsproblem**

In der Abbildung 10 ist der Anfangsbereich der Bahn rot markiert. In diesem Bereich finden sich verstärkt Falten. Diese waren bei beiden Bahnarten in vergleichbarer Menge und Qualität zu beobachten. Deren Ursprung liegt begründet in den Problemen beim Einregeln einer stabilen Spannung im Material beim Anfahren des Prozesses und einer nicht idealen Fixierung des Bahnanfangs mit einem Klebeband. Dies war notwendig, da zum Zeitpunkt der Ablageversuche auf Male-Form der Prozessschritt „Bahnanfang“ noch nicht abgearbeitet wurde. Ein typisches Verhalten der Bahn am Anfang ist in der Abbildung 10 innerhalb der roten Markierung dargestellt.

Die Lösung für das Problem wurde erst mit der Ablage auf Female-Form beseitigt indem dieser Prozessschritt vollständig automatisiert wurde. Dabei wird ein spitzer Keil am Anfang der Bahn zugeschnitten, sodass nur eine schmale Materialfront die erste Berührung mit der Ablageform erfährt und von da aus schnell auf die Sollbreite der Bahn ansteigt. Dadurch lassen sich viele Fixpunkte des Materials mit Ablageform vermeiden, was unweigerlich zur Faltenbildung führen würde. Das Material wird dann ohne Krafteinwirkung bis zum Anpresspunkt gut gefördert, was jeglichen Verzug im Material beseitigt. Somit wird beim ersten Kontakt des Materials mit der Ablage nur eine kleine Materialfläche verzugsfrei angeklebt.

### **Ablage auf Male-Form mit OLP - zwei überlappende Bahnen**

Das ursprüngliche Projektziel war die faltenfreie Ablage von mindestens zwei Bahnen, die mit einem definierten Überlapp eine elektrische Anbindung untereinander aufweisen. Mit Hilfe des entwickelten OLP-Workflows, wie oben beschrieben, wurden zwei neben einander liegende Bahnen konstruiert und entsprechende Roboterprogramme erzeugt. Das Ergebnis der Ablage ist in der Abbildung 11 zu sehen. Der Überlapp zwischen beiden Bahnen ist ausreichend und die Ablagequalität genügen den Fertigungsvorgaben. In diesem Entwicklungsstadium wurde das Anfangsproblem weitestgehend gelöst durch eine Automatisierung des Prozessschrittes „Bahnanfang“. Lediglich der Tack der vorderen Bahnkante wurde mit einem Klebestreifen verstärkt.



Abbildung 11: Ablageergebnis für zwei nebeneinander liegende Bahnen auf Male-Geometrie. Der Überlapp liegt zwar innerhalb der Fertigungsspezifikation, kann aber noch deutlich verkleinert werden. Durch die fast vollständige Automatisierung der Ablage des Bahnanfangs wurde auch das Anfangsproblem weitestgehend gelöst, nur der Tack der Anfangskante wurde mit einem Klebestreifen erhöht. Beide Bahnen weisen nur wenige unkritische Falten auf.

### **Ablage auf Female-Form - Vorversuche und Umbau**

Mit der Umstellung des Fertigungsprozesses der Blitzschutzablage beim Verbundführer von Male- auf Female-Geometrie sollte eine mögliche Modifikation des Endeffektors für automatisierte Ablage auf Female-Strukturen untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde eine Form der hinteren Sektion, die eine Doppelkrümmung aufweist, vom Verbundführer zur Verfügung gestellt. Die Vorversuche umfassten die angepasste Bahngenerierung, eine Modifikation der Materialführung, da das Material für Male/Female-Prozesse im Aufbau gespiegelt ist, und die Ausgestaltung und Beschaffung der Anpressrolle. Eine Gegenüberstellung beider Ablageformen ist in der Abbildung 12 zu sehen.

Im Verlauf der Vorversuche wurde das Verständnis für die Drapiermechanik gesteigert. So konnte ein Zusammenhang zwischen der Ablagequalität, der Entstehung unterschiedlichen Faltenarten und der Abdruckform der Anpressrolle sowie deren geometrischen Beschaffung ausgemacht werden. Auch konstruktive Verbesserungen des Endeffektors, im Speziellen der Schneideeinheit, wurden im Zuge der Ablageversuche ausgearbeitet. Anhand der Versuche konnte ein Umbaukonzept für die Female-Ablage erstellt. Die Firma Emil Bucher GmbH & Co. KG wurde mit der Konstruktion und dem Umbau beauftragt.

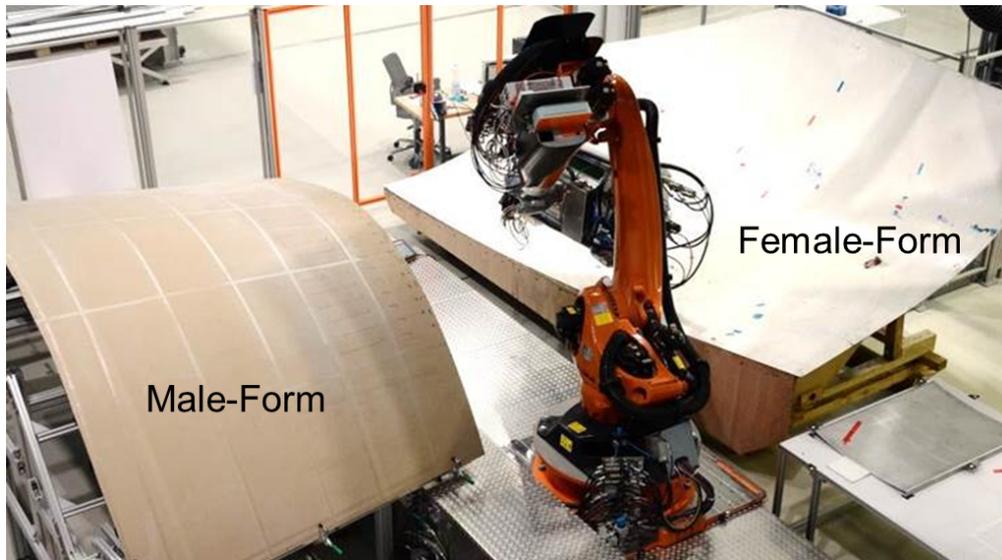


Abbildung 12: Gegenüberstellung beider verwendeten Formen: Male und Female. Beide Formen bilden ähnliche Krümmungen ab. Die Female-Form wurde benutzt um eine Machbarkeitsstudie bzgl. der Femaleablage durchzuführen und die notwendigen konstruktiven Änderungen des Endeffektors herauszufinden.

### **Ablage auf Female-Form - Versuchsvorbereitung**

Für die Ablageversuche wurde eine Female-Form, zur Verfügung gestellt vom Verbundführer, verwendet die aus zwei Schalenteilen besteht und Versuche im *Full-Size*-Maßstab erlaubt. Die Abbildung 12 zeigt nur die eine Hälfte der finalen Ablagefläche. Die Form musste für die Versuche aufgearbeitet (versteiftes Gestell, Ausbessern der Oberfläche) und mit Hilfe eines Lasertrackers vollflächig vermessen werden. Um die gesamte Fläche ausnutzen zu können wurde für die Versuche auf die Multifunktionale Zelle (MFZ) ausgewichen, da hier durch die kopfüber montierten Roboter (KUKA Quantec 270, KR C4) eine viel größere Erreichbarkeit als in der Thermoplastzelle gegeben ist. Hierfür musste die aktuelle Steuerungssoftware einschließlich des Paketes *Extended Motion* installiert werden sowie die benötigten zusätzlichen Motorleitungen für die Zusatzachsen des Endeffektors verlegt werden.

### **Ablage auf Female-Form - Validierung**

Für die Validierung wurden folgende, mit den Projektzielen deckungsgleiche, Zwischenziele festgelegt:

- faltenfreie Ablage, kein Bridging im *EEOP*-Bereich
- Validierung des Workflows für die Bahngenerierung und Offlineprogrammierung

- vollautomatisierte Ablage einzelner Bahnen
- Überlapp zwischen den Bahnen im Bereich 20 mm bis 30 mm
- flächige Überdeckung festgelegter Bereiche mit der größten Krümmung der Ablage
- kein Material außerhalb der *MEOP*
- Abweichung der Ablagerichtung zur Parallelen der Formkanten kleiner als 10°

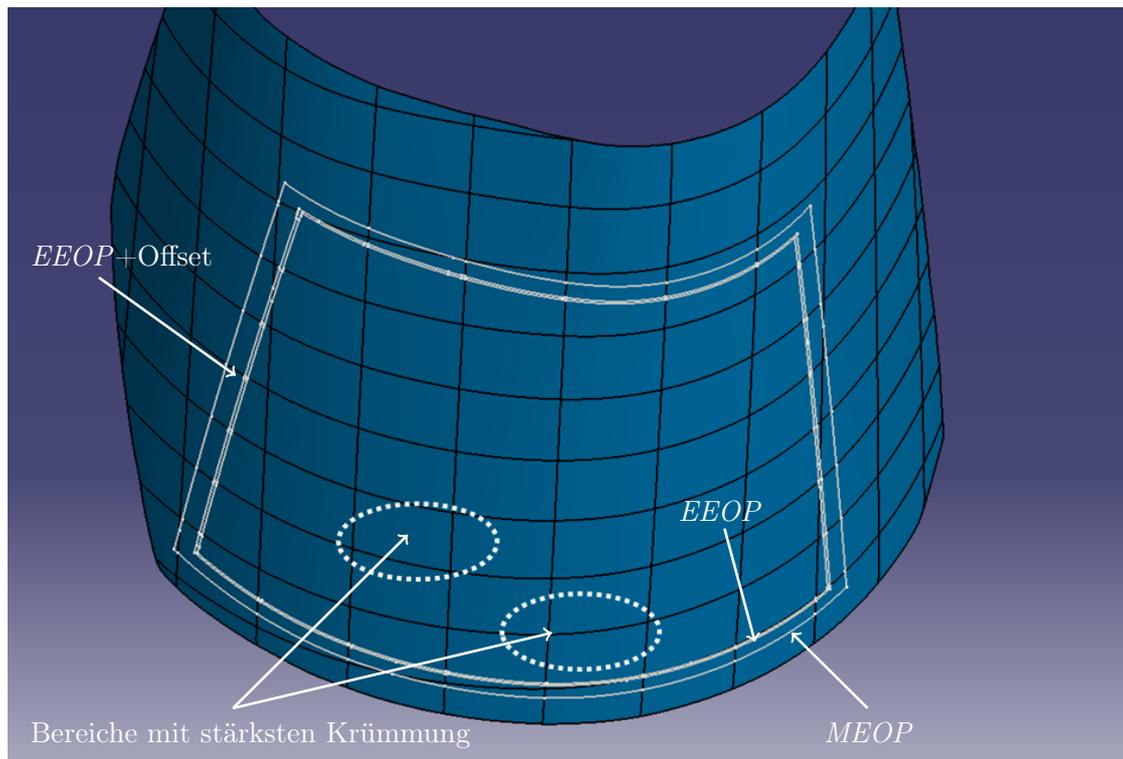


Abbildung 13: Darstellung der Flächenbegrenzungen für die Validierung auf der Female-Geometrie.

Zunächst wurde auf der vermessenen Oberfläche eine *MEOP*-Fläche innerhalb der eine *EEOP* definiert, deren Abstand 15 cm betrug, definiert. Die Fläche enthielt die Stellen der Form mit der größten Krümmung und sollten aus Prozesssicht die kritischsten Stellen der Ablage darstellen, siehe Abbildung 13. Innerhalb der definierten Fläche wurden drei Bahnen mit Hilfe des Optimierungsalgorithmus konstruiert und daraus ein vollständiges KR C4-Programm für einzelne Bahnen erzeugt wie in der Abbildung 14 dargestellt. Zunächst wurde jede der drei Bahnen einzeln abgelegt. Um eine faltenfreie Ablage zu erreichen wurden mehrere Ablageversuche mit iterativer Optimierung der Prozessparameter, vor allem Einstellungen am Endeffektor bezüglich der Durchbiegung und der Eindringtiefe der Anpressrolle durchgeführt. Die Einstellungen, die zu einer guten Ablage geführt



haben wurden festgehalten denn für die drei untersuchten Bahnen ergaben sich leicht unterschiedliche Werte. Bei einer Weiterentwicklung des Endeffektors können die entsprechenden Freiheitsgrade ebenfalls mit Aktoren angetrieben werden, sodass für die einzelnen Bahnen die Einstellungen anhand einer Wertematrix vor der Ablage automatisch eingestellt werden können. Die Ablage der kompletten Bahn 1 ist in der Abbildung 15 zu sehen. Wichtig festzuhalten ist, dass die Bahn genau innerhalb der Begrenzung der *EEOP* und *MEOP*-Bereiche liegt. Somit entspricht die Anlage der gängigen Fertigungsweisen der CFK-Bauteile, die in der Nacharbeitung auf die *EEOP* besäumt werden. Die Bahnen 2 und 3 wurden in ähnlicher Weise und in guter Qualität unter der Findung passender Parameter abgelegt. Die Lösung des Anfangsproblems wurde hier ebenfalls erfolgreich validiert.

Im nächsten Schritt wurden zwei Bahnen (Bahn 1 und Bahn 2) direkt hintereinander abgelegt, sodass ein Einfluss der bereits liegenden Bahn und die Präzision des Überlapps untersucht werden kann. Zwischen den Bahnen wurden die ermittelten Parameter für die Rolle (Durchbiegung, Eindringtiefe) am Greifer manuell eingestellt bevor die Bahn 2 abgelegt wurde. Das Ergebnis der Ablage beider Bahnen ist in der Abbildung 17 dargestellt. Die Position der Bahnen sowie der Überlapp sind sehr präzise. Der Überlapp unterscheidet niemals den Mindestwert und überschreitet ihn um maximal 5 mm, was eine große Genauigkeitsverbesserung gegenüber dem manuellen Prozess darstellt. Eine weitere wichtige Beobachtung war die Bahntreue des Materials, die eine Regelung im Falle einer Materialverschiebung innerhalb des Endeffektors obsolet macht.

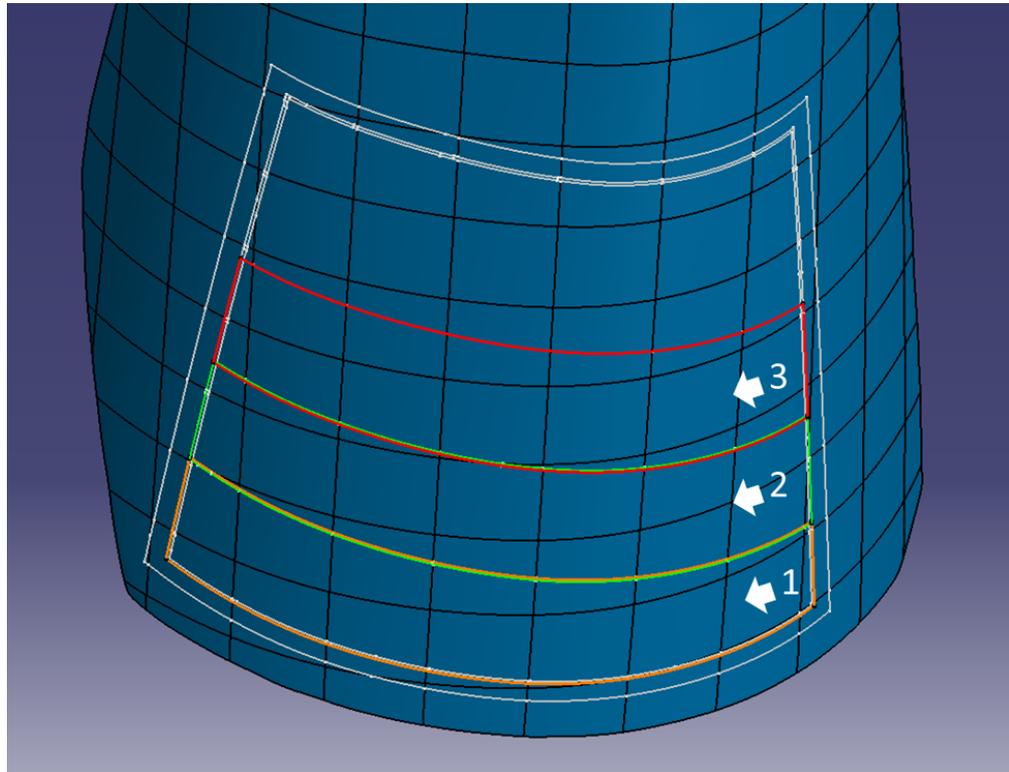


Abbildung 14: Darstellung der Flächenaußengrenzen und der Positionierung der ersten drei (1, 2, 3) Ablagebahnen

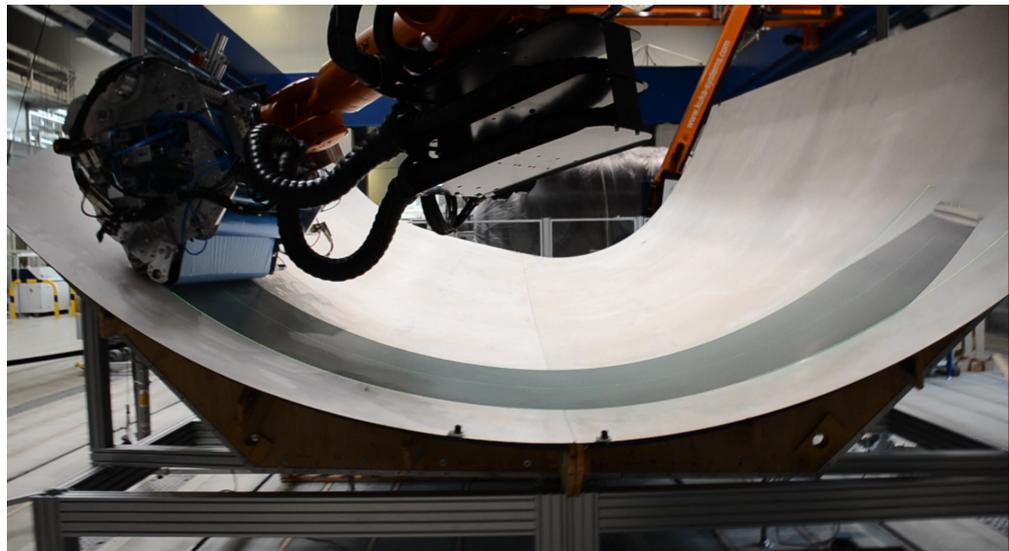


Abbildung 15: Abbildung des Endeffektors am Ende der Ablage der Bahn 1 mit sehr gutem Drapierergebnis

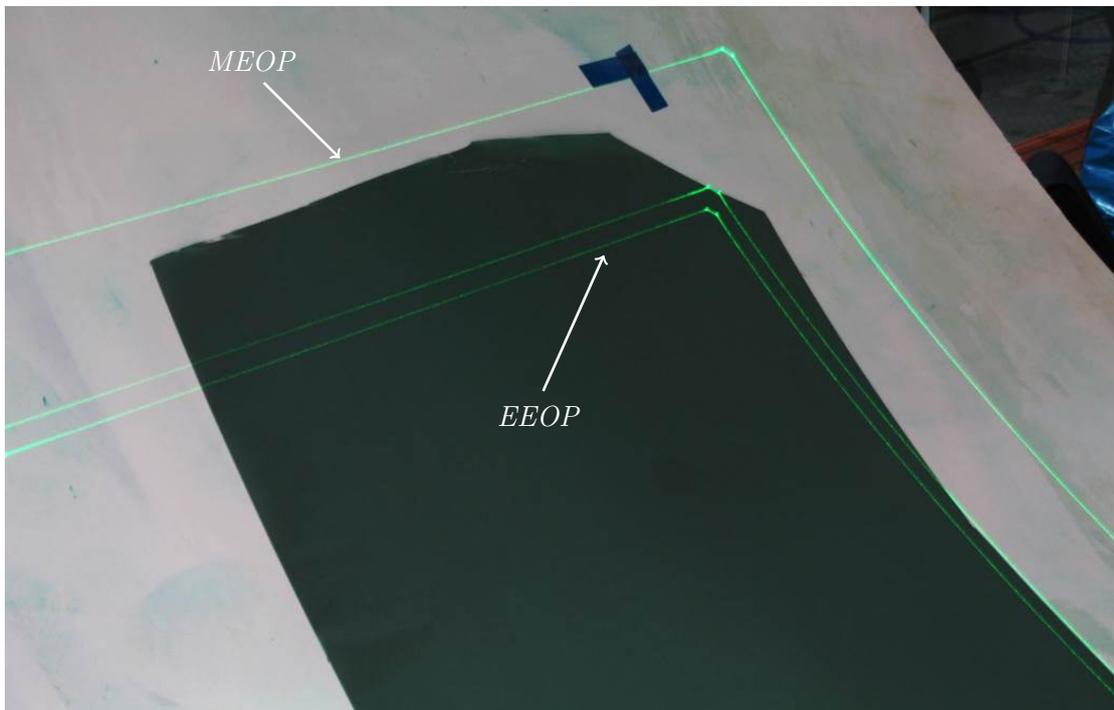


Abbildung 16: Darstellung der Flächenbegrenzungen für einer Ablagebahn, hier Bahn 1.



Abbildung 17: Großansicht der Ablagebahnen 1 und 2

### **Abschätzung des Industrialisierungspotenzials**

Für einen Einsatz des Endeffektors in der Fertigung der Schalenstrukturen müsste dieser eine Reihe von konstruktiven Verbesserungen erfahren bzw. neu konstruiert werden. Dadurch würden die in der Validierungsphase erkannte Unzulänglichkeiten beseitigt. Zudem könnte der Endeffektor an die am Einsatzort vorhandene/geplante Anlage angepasst werden. Neben dem mechanischen Umbau muss die Regelung neu entwickelt werden, da der im Projekt verwendete Workaround für Fertigung nicht ausreichend präzise und stabil ist. Diese könnte ebenfalls an die entsprechende Anlage zugeschnitten werden.

Für einen durchgängigen Einsatz müsste der Endeffektor um eine Wechsellösung für die Materialrolle und die Sammelrollen erweitert werden. Zudem müsste für die betroffenen Schalen eine optimierte Bahnplanung stattfinden sowie die Prozessparameter für jede einzelne Bahn ermittelt werden. Damit kann eine Datenbank der Bahnen aufgebaut werden, aus der die Daten für die zu legende Bahn entnommen werden können. Dadurch kann ein unterbrechungsfreier Prozess für jede Schale aufgebaut werden.

Die in den Validierungsversuchen verwendete Ablegegeschwindigkeit betrug ca. 0,7 m/min, kann jedoch im stabilen automatisierten Prozess drastisch gesteigert werden. Durch die durchgängige Automatisierung des Prozesses würde sich der manuelle Einsatz auf das Bestücken bzw. nur die Bereitstellung des Materials beschränken.

Da der Endeffektor sowohl an Male- wie auch Female-Geometrien validiert wurde und für die Femaleablage eine veränderbare Anpressrolle notwendig ist, kann der Endeffektor für fast alle Prozesse (male, female, doppelgekrümmt, zylindrisch) eingesetzt werden. Für die beiden Ablagearten müsste jedoch der gespiegelte Materialaufbau in der Konstruktion vorgesehen werden.

Eine auf dem Endeffektor angebrachte Qualitätssicherung ist ebenfalls denkbar. Eine Bildanalysesoftware könnte für die Überwachung der Qualität der Ablage oder mit Hilfe von Referenzpunkten auch eine Positionsüberwachung in den Prozess eingebunden werden.

Die aufgeführten Inhalte wurden im Rahmen eines Treffens mit dem Verbundführer und dem Unterauftragsnehmer/Partner aus dem Projekt AZUR vorgestellt.

### **Handlungsempfehlungen für den Einsatz des Ablegeendeffektors an großen Schalenstrukturen des A350**

Die Empfehlungen ergaben sich größtenteils aus den Inhalten der durchgeführten Abschätzung des Industrialisierungspotenzials (s.o.) und wurden in dem dort erwähnten Treffen ausgesprochen. Eine genauere Ausarbeitung der Konzepte muss jedoch unter Beteiligung von Industriepartnern stattfinden, die entsprechende Hardware und Software einschließlich der Serviceleistungen anbieten können.

#### **4.1.3 Zusammenfassung**

Die im Teilprojekt 1 bearbeiteten Inhalte stellen die logische Fortführung der Entwicklung einer vollautomatischen Lösung zur Ablage von Blitzschutzmaterial auf doppelgekrümmte Rumpfschalen eines modernen *Single Aisle*-Flugzeugs dar. Mit der Übernahme des Endeffektors aus dem Projekt AZUR sollte der Prototyp in einer Industrieroboterzelle

und unter fertigungsnahen Bedingungen inbetriebgenommen und im Hinblick auf seine Industrietauglichkeit validiert werden.

Nach der Übernahme des Prototyps wurde dieser um die Aktorik und Sensorik erweitert. Aufgrund von Lieferverzögerungen musste die konzipierte Regelung des Materialflusses in Eigenarbeit entwickelt werden. Hierfür wurde - um die Roboterzelle nicht über längeren Zeitraum belegen zu müssen - ein sekundärer Steuerungsschrank beschafft mit dessen Hilfe die Entwicklung unabhängig von der Zellenverfügbarkeit stattfinden konnte. Parallel wurde die Roboterzelle soweit verfügbar, hier zunächst die Thermoplastzelle, auf die Inbetriebnahme vorbereitet. Dafür wurden die benötigten zusätzlichen Motorleitungen verlegt, das Softwarepaket *Extended Motion* installiert sowie die Anbindung Endeffektor-Roboter vorbereitet. Für die Validierung wurde eine konvexe Ablageform aus CFK auf einem eigens konstruierten Gestell windungsfrei montiert und im Bezug zum Roboter vermessen.

Die ersten Versuche dienten der Optimierung der Regelung des Materialflusses bevor die erste Bahn auf der vorbereiteten Ablageform appliziert werden konnte. Die Bahn wurde mit Hilfe von einigen Stützpunkten durch Einteachen erzeugt. Die Versuche eine Originalbahn aus der Fertigung, sogenannte Bananen-Bahn die senkrecht zur Flugachse des Flugzeugs verläuft, waren nicht zufriedenstellend, da in allen Versuchen sehr viele kritische Falten auf der schmalen Seite der Form entstanden sind. Im Verlauf der Versuchsreihe wurden die unterschiedlichen Kantenlängen einer Bananen-Bahn als der Grund ausgemacht. Eine nochmalige Ablage, diesmal ohne seitlichen Beschnitt, dafür aber mit einer zur breiteren Kante der Form gerichteten Bahn lieferten vielversprechende, da faltenfreie Ergebnisse und zwar in der vollen Breite der Materialrolle. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde die Entscheidung getroffen, die Ablage von Bananen-Bahnen nicht mehr zu verfolgen. Die alternative Herangehensweise bringt eine Vielzahl an Vorteilen mit sich: die bessere Ausnutzung des Materials, kleinere Anzahl an Bahnen und dadurch weniger Überlappungen und damit einhergehende Gewichtsersparnis, schonender Umgang mit Material und bessere Drapierung. Als Nachteil steht dem eine aufwändigere Bahnplanung, die eine präzise Offlineprogrammierung verlangt.

Deswegen wurde im weiteren Projektverlauf ein starker Fokus auf die Offlineprogrammierung gelegt. Dabei wurde ein Workflow zusammen mit dazugehörigen Software entwickelt. Dieser geht von einer Form aus, deren Oberfläche (vermessen oder aus den CAD-Daten) und Position in der Roboterzelle sehr genau bekannt ist. Mit Hilfe eines selbst entwickelten Algorithmus kann die Lage und Verlauf der Bahnen unter bestimmten Optimierungsfunktionen (im Projekt Kantenlänge und Überlappung) automatisch berechnet werden. Aus dem Ergebnis kann mit dem gängigen Softwarepaketen CATIA und FAST SURF/DELMIA ein Roboterprogramm erzeugt werden. Um die Messerbahnen und die einzelnen Prozessschritte und -bedingungen in das Roboterprogramm zu implementieren wird eine eigens entwickelte Software eingesetzt die ein komplettes und einsatzbereites Roboterprogramm für jede einzelne Bahn liefert.

Die Validierung der Ablage auf Male-Geometrie wurde - noch nicht im komplett durchgängigen Prozess - an zwei überlappenden Bahnen gezeigt. Diese genügten den in der realen Fertigung gängigen Qualitätsstandards. Da eine Weiterentwicklung für Female-Geometrie im Rahmen einer Mittelaufstockung und Projektverlängerung beschlossen wurde, wurde

die Prozessentwicklung (Bahnbeginn, Bahnende) und die konstruktive Optimierung des Endeffektors für die Validierung der Female-Geometrie geplant. Damit waren die Arbeiten an der Male-Geometrie abgeschlossen

Um den Endeffektor an die Female-Geometrie anzupassen wurden Vorversuche an einer Halbschale der hinteren Sektion des A350 durchgeführt. Das Ziel war dabei eine Anpress- und Drapiereinheit zu finden, die den Anforderungen der Ablage auf einer konkaven Oberfläche genügt. Aufgrund der, zu der vorherigen Ablage auf der konvexen Form, völlig unterschiedlichen Drapiermechanik, wurde eine durchgebogene Anpressrolle entwickelt. Mit diesen Rollengeometrie wurde sicher gestellt, dass eine faltenfreie Ablage ohne Bridging möglich war. Zudem wurden weitere konstruktive Optimierungen am Endeffektor angeregt. Das Konzept wurde zusammen mit der Firma Emil Bucher GmbH & Co. KG erarbeitet und diese wurde auch mit dem Umbau beauftragt. Parallel zum Umbau liefen Vorbereitungen für die finalen Validierungsversuche. Dafür wurde die Multifunktionale Zelle um benötigte Motorleitungen und Aufnahmevorrichtungen für den Endeffektor erweitert und die komplette Ablageform auf einem Gestell in der Zelle fixiert und vermessen.

Zunächst wurde der Prozess, einschließlich der Offlineprogrammierung, zu einem Gesamtprozess entwickelt. Die Prozessparameter, die deutlich kritischer sind als bei der Male-Ablage, wurden bei einer Vielzahl von Ablagetest untersucht. Für die Validierung wurden innerhalb einer vorher festgelegten Fläche zwischen *MEOP* und *EEOP* drei überlappende Bahnen konstruiert. Zunächst wurde der Fokus auf eine faltenfreie und positionsgenaue Ablage der einzelnen Bahnen gelegt. Dabei konnten die optimalen Bereiche der Prozessparameter für die jeweilige Bahn herausgefunden werden. Nachdem alle drei eine sehr gute Ablagequalität erreicht haben, konnte die flächige Ablage validiert werden. Hier wurde die Bahn 1 und Bahn 2 gewählt, da sie die Stelle mit der größten Krümmung der Ablagefläche bedecken und somit auf am schwierigsten faltenfrei abzulegen sind. Beide Bahnen wurde direkt hintereinander abgelegt. Das Ergebnis war eine faltenfreie Ablage ohne Bridging und mit einem sehr genau definierten Überlapp. Die Abweichung der Ablagerichtung von der Bananen-Bahn betrug weniger als  $10^\circ$  und war damit innerhalb der vorgegebenen Fertigungsspezifikationen. Der Prozess war von Initialschnitt bis zum Abheben des Endeffektors von der Ablagefläche automatisiert und konnte unterbrechungsfrei und ohne manuelle Eingriffe durchgeführt werden. Damit wurden die Ziele des Projektes sowohl für Male- wie auch Femaleablage erreicht.

## 4.2 Teilprojekt 2 - Verstärkungs-Strukturen

### 4.2.1 Zielsetzung

Im Teilprojekt 2 sollte eine kontinuierliche Abalge von NCF-Material auf einem einzelnen Preformkern bezüglich der Umsetzung untersucht werden und ein entsprechendes Konzept entwickelt werden. Das Umgehen der bisher praktizierten zweistufigen Umformung sollte den Prefomingprozess viel robuster bezüglich der Qualität der Drapierung, insbesondere der Ablagegenauigkeit und der Streuung der entstehenden Faserwinkel, machen.

Die Arbeiten sollten sich am Zielbauteil eines Spantes im Bereich der Türumgebung orientieren.

Ein entsprechendes Konzept zur Reproduktion der Faserwinkelabweichungen und der Vermeidung von Faserwinkelstreuungen im Preformprozess sollte zusammen mit der geeigneten Sensorik entwickelt und Konzipiert werden.

Im Verlauf des Projektes wurde der Fokus auf die Entwicklung der Sensorik gelegt, die unter Fertigungsbedingungen zur vollflächigen Dokumentation eingesetzt werden kann um die oben genannte Ziele am realen Bauteil erreichen zu können.

#### 4.2.2 Übersicht der durchgeführten Arbeiten

Im Projekt AZIMUT wurde ein zweistufiges Umformverfahren von bi- und triaxialen Gelegen zur Umformung einer gebogenen Spantform mit komplexen Webhöhenunterschieden erfolgreich angewandt. Die Fortführung der Arbeiten hatte zum Ziel den Prozess mit nur einer Umformbewegung zu erreichen, da der Wegfall des Transportes und auch die Repositionierung des Preforms auf einem neuen Tool prinzipielle Fehlerquellen darstellen. Die im Projekt AZIMUT durchgeführten Vorarbeiten zeigten, dass das Umformen mit einem starren Drapierschwert nicht möglich war.

In den ersten im Projekt RoCk durchgeführten Untersuchungen wurde im Bereich der komplexen Umformgrade vor der Schwertdrapierung eine Vorspannung in das Fasermaterial im Flanschbereich eingebracht. Um das zu erreichen wurde das Fasermaterial in die Kontur des Stufe-I-Werkzeugs (TRL3-Preformwerkzeug aus dem Projekt AZIMUT) eingespannt, siehe Abbildung 18. Danach wurden die Stempel aktiviert, die den Prefom



Abbildung 18: Triaxialgelege in der Stufe-1-Kontur eingespannt an ein Stufe-2-Preformwerkzeug

an die endgültige Werkzeugkontur gepresst und eingespannt haben. Dies ist in der Abbildung 19 zu sehen. Danach wurde das Preforming abgeschlossen, indem das Material mit

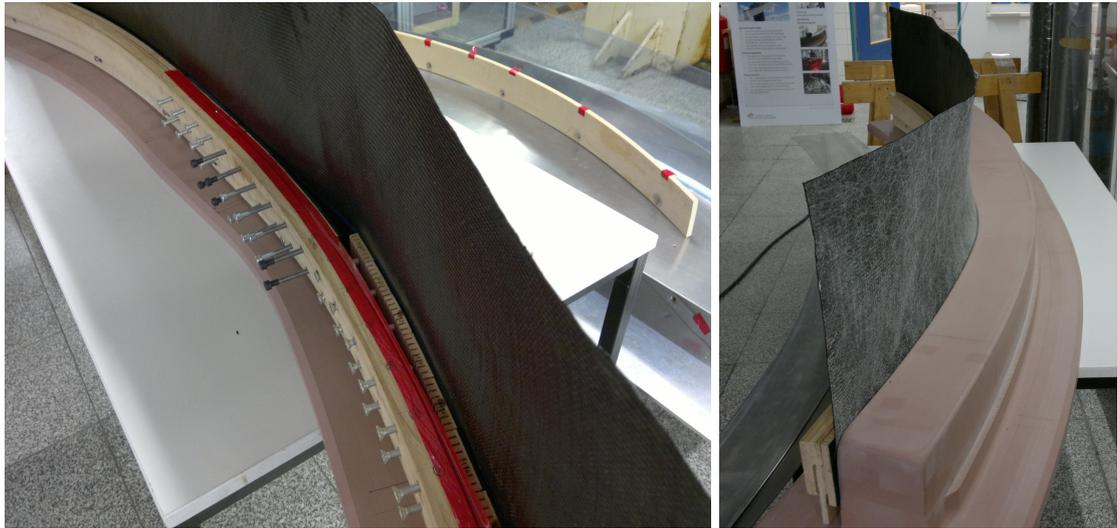


Abbildung 19: Triaxialgelege von der Stufe-1-Kontur durch Andruckelemente in die Kontur des Stufe-2-Preformwerkzeugs gepresst

einer an den Innenflansch angepassten Schwertkontur umgeformt wurde.

Der Vergleich zu den Ergebnissen mit einem nicht vorgespanntem Faserhalbzeug ergab, dass das Festhalten des Materials die Faltenbildung im Übergang der Webhöhen beseitigt. Zudem ergab sich ein wesentlich geringeres Maß an Stauchungserscheinungen an den Rovings des Halbzeugs, wie in der Abbildung 20 zu sehen. Damit ließ sich eindeutig ein positiver Effekt der Vorstreckung des Flanschbereichs bei der Spantdrapierung nachweisen.

Das Basiskonzept in RoCk für die Minimierung der Streuung der Faserwinkel bei der Herstellung gebogener Spantpreformen war die Ablage aller Faserlagen in einem Schritt auf ein einziges Preformwerkzeug. Damit sollte jede ungewollte Veränderung oder Ablage von Faserausrichtungen durch Transport vermieden werden. Gleichzeitig stellte sich daraus die Konsequenz der Handhabung der Drapierung eines Faserpreforms von einer S-Schlagkontur in eine stetig gebogene Kontur und die Handhabung des Stauchungsbereichs im Web im Bereich der Webbreitenänderung. Als Lösung des Problems wurde eine Vorrichtung untersucht, die aus beliebig vielen, gleichartig konstruierten Elementen besteht. Diese Elemente wurden an einer Drehachse miteinander verbunden, so dass eine formvariable Vorrichtung entstanden ist. Die Konstruktion konzentrierte sich daher nur auf ein Einzelement, das in Zusammenarbeit mit den Nachbarelementen die Funktion der Gesamteinheit sicherstellen sollte. Das Einzelement sollte laut Konzept über folgende Fähigkeiten verfügen:

- Ansaugen des unverformten Fasermaterials
- Verschiebung (Drapierung) der Faserlage von der Innen- zur Aussenflanschkontur



Abbildung 20: Vergleich der Ergebnisse einer Schwertumformung eines nicht-vorgespannten (links) und eines vorgespannten Traxialgeleges (rechts)

- Binderaktivierung an den Radienbereichen von Innen- und Aussenflansch

Als Beispiel ist ein Konstruktionsentwurf in Abbildung 21 dargestellt, allerdings ohne die Funktion der Binderaktivierung und des Antriebs. Die in den Drehachsen gekoppelten Elemente werden zunächst gerade ausgerichtet und zueinander fixiert, um beispielsweise das auf einem Tisch liegende Fasermaterial aufzunehmen. Danach wird die Vorrichtung mit dem Fasermaterial durch Anlegen an die Innenkontur des Preformwerkzeugs in Form gebracht und der Flanschbereich des Fasermaterials an der Innenkontur eingeklemmt. Danach erfolgt die Drapierung des Webbereichs und die Binderfixierung. In AP 2.2.3 wurden Konstruktionen untersucht und erprobt, um dieses Konzept in eine automatisierte, von Hand geführte Vorrichtung zu überführen.

Zunächst wurde ein Konzept verfolgt, welches auf jedem Element einen Schieber mit Linearantrieb vorsah. Durch eine Einstellung verschiedener konstanter, lokaler Geschwindigkeiten sollte im Verlauf des Drapiervorgangs eine Anpassung der S-Schlagkontur in die nahezu stetige Außenkontur stattfinden. Die Verteilung der Geschwindigkeiten ist in Abbildung 22 dargestellt. Entsprechend der Abbildung 21 war auch eine Kniehebelanordnung denkbar, bei der die Hebelkinematik in die Geschwindigkeitsberechnung Eingang hätte finden müssen.

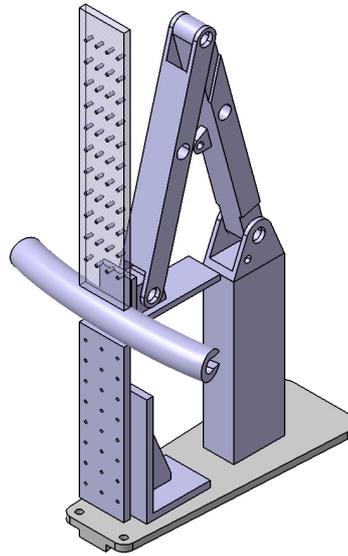


Abbildung 21: Entwurfskonstruktion eines Drapierelementes

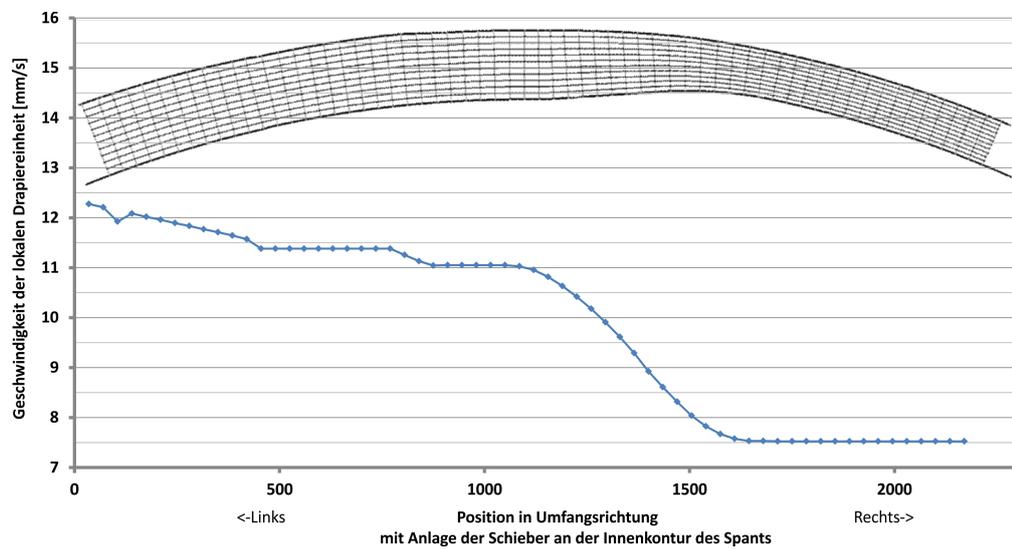


Abbildung 22: Darstellung der lokalen Schiebergeschwindigkeiten bei gegebener Drapierzeit

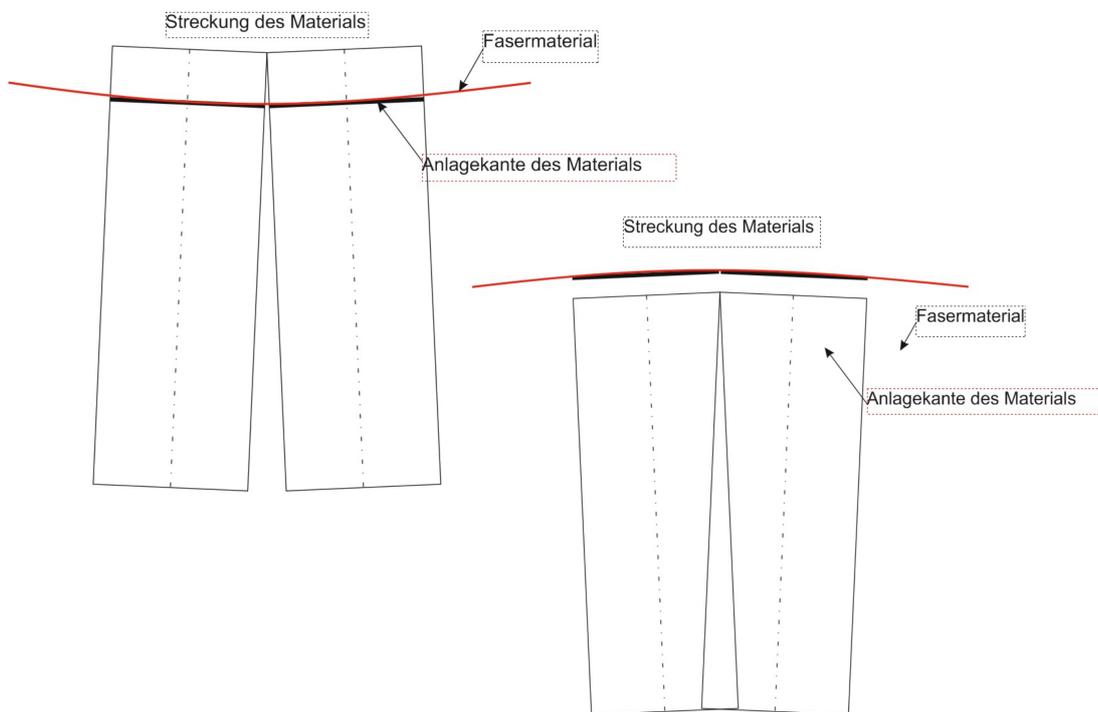


Abbildung 23: Prinzip der Streckung von Fasermaterial in Abhängigkeit vom relativen Abstand zur neutralen Linie (Verbindungsline der Kopplungspunkte)

### Induzierte Streckung

Die Einzelelemente des formvariablen Werkzeugs bestehen aus den Bodenplatten, die durch die Verbindung untereinander die Gruppierung des Gesamtwerkzeugs herstellen und den Effektorelementen, die das Fasermaterial aufnehmen, halten und umformen. Diese beiden Elemente sind zueinander verschiebbar. Wird die Ebene der Faseraufnahme in die neutrale Linie der Verbindungspunkte gelegt, so wird das Fasermaterial auch bei der Erzeugung beliebiger Konturen durch das Gesamtwerkzeug nicht verändert. Durch gezielte Veränderung des Abstands von Faserebene und neutraler Verbindungslinie kann nach Abbildung 23 eine Streckung des Fasermaterials erzielt werden. Dieser Effekt sollte genutzt werden um lokale Streckungen in den Flanschbereich des Fasermaterials einzubringen. Abbildung 24 zeigt das Ergebnis verschiedener Abstandsverläufe. Das Ergebnis ist ein sehr ungleichmäßiger Verlauf der Dehnungen. In Abbildung 25 ist qualitativ ein Hinweis für die Ursache der Ungleichförmigkeit der Verläufe dargestellt. Da vorzugsweise das Fasermaterial selbst an die Zielkontur angepasst werden sollte, ergeben sich bei jeder Änderung des Abstands von Faserebene und der neutralen Verbindungslinie durch die endliche Breite der Elemente und der Kopplung untereinander ein Überschwinger in den Ausrichtungen der Elemente. Das System ist praktisch instabil. Eine Lösung sah vor die Nutzung einer separaten Anlagekante, an der die Bodenplatten angelegt werden. Diese Anlagekante wäre in der Kontur so zu wählen, dass das Fasermaterial die gewünschte Kontur des Drapierwerkzeugs einnimmt. Auch hier haben sich Limitierungen ergeben, welche die nutzbare Dehnung begrenzen. Daher wurde entschieden, vorerst auf die Integration der Vorstreckung zu verzichten und zu prüfen, ob durch eine Formvariabilität während des Drapierprozesses die Faltenproblematik ausreichend gemildert werden kann.

Bei den anschließenden Arbeiten wurden verschiedene Faserhalbzeuge auf ihre Gegenkraft untersucht, die sie beim Umformen der Umformvorrichtung als Verschiebewiderstand entgegensetzen um so die Auslegung der Linearaktuatoren zu ermöglichen. Für die Versuche wurden drei verschiedene Arten von Materialien getestet. Es handelte sich dabei um Multiaxialgelege  $45^\circ/135^\circ$ (Bi-ax),  $45^\circ/90^\circ/135^\circ$ (Tri-ax) und ein Gewebe  $0^\circ/90^\circ$ (G0926, bebindert).

Der Versuchsaufbau (s. Abb. 26) bestand aus einem Uriol-Kern, einer Klemmvorrichtung aus Holz mit kleinen variablen Platten und einem Drapierschwert mit zwei Aufnahmen für Kraftmessdosen. Diese dienen gleichzeitig zur Krafteinbringung in das Material. Im Versuch wurden die Gelege und Gewebe zwischen Uriol und einer anpassbaren Klemmvorrichtung eingelegt. Die Klemmvorrichtung hielt das Material am Innenflansch fest, damit das restliche Material über das Web drapiert werden konnte. Die Vorrichtung kann sich flächig an den gesamten Innenflansch anlegen um das Material zu fixieren, siehe Abbildung 27.

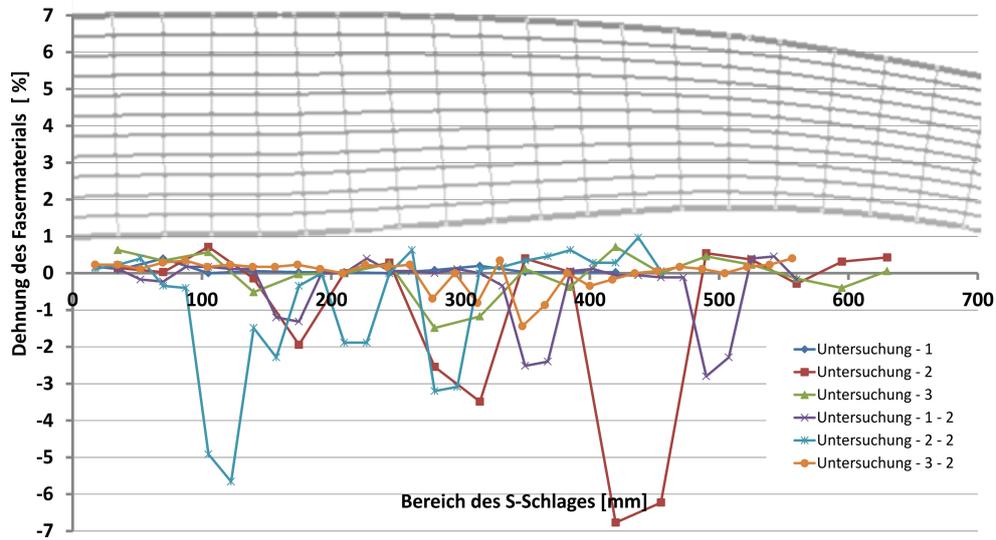


Abbildung 24: Rechnerische Dehnung des Fasermaterials aufgrund verschiedener Verteilungen der Abstände von Fasermaterial und neutraler Linie

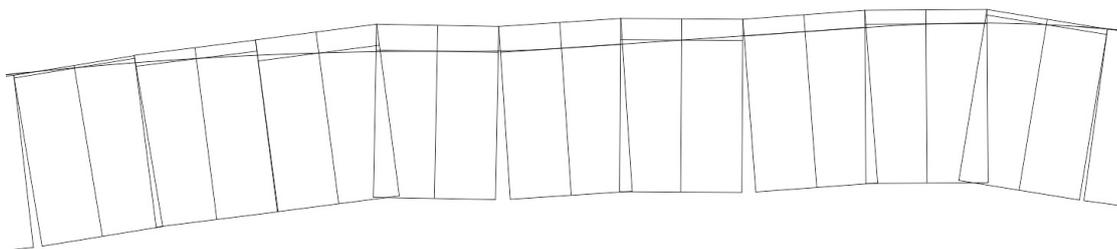


Abbildung 25: Koppelung der Elemente als Ursache der ungleichmäßigen Verteilung der Dehnungen

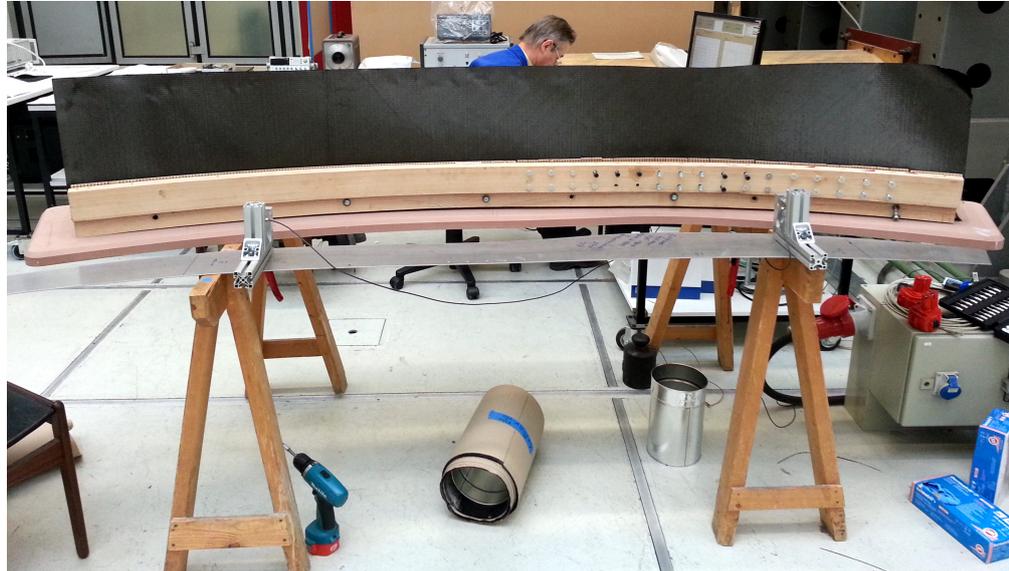


Abbildung 26: Versuchsaufbau mit eingeklemmten Gelege

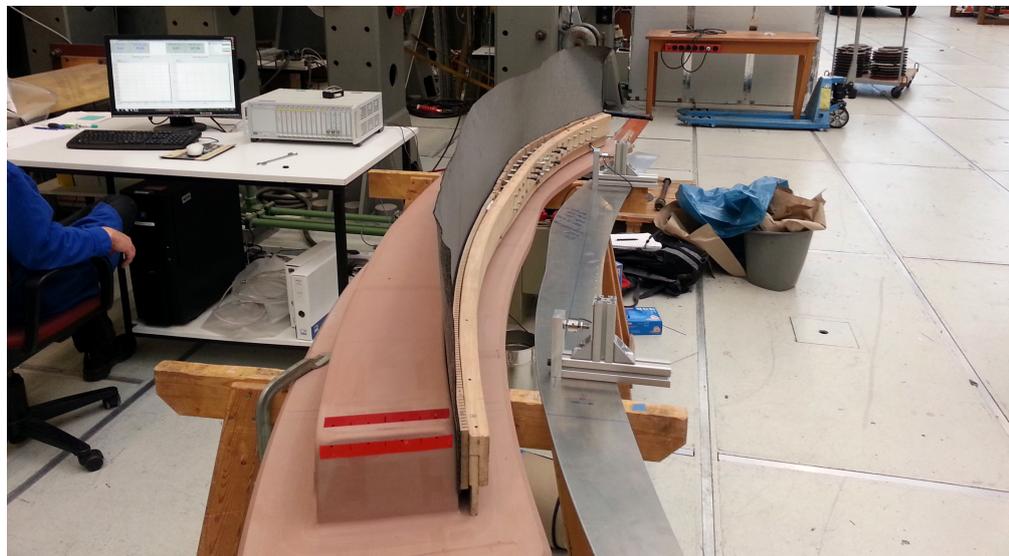


Abbildung 27: Fixiertes Gelege im Versuchsaufbau

Das Drapierschwert wurde auf die Klemmvorrichtung aufgelegt und an das Fasermaterial angelegt. Für die Versuchsdurchführung wurde das Drapierschwert nur an den dafür vorgesehenen Stellen – Aufnahmestellen für die Kraftmessdosen – festgehalten, damit der Kraftfluss über die Kraftmessdosen verläuft. Das Fasermaterial wurde anschließend über den Webbereich drapiert, während die Kraftmessdosen die nötigen Kräfte aufzeichneten.



Abbildung 28: Drapierschwert

An beiden Enden auf dem Webbereich wurden Markierungen angebracht, die als Haltestellen dienten. Das Schwert wurde von Punkt zu Strich bzw. von Strich zu Punkt bewegt, mit jeweils einer Pause an jeden Punkt bzw. Strich. Das Material wurde über das gesamte Web drapiert. Gestoppt wurde die Messung bei Erreichen des äußeren Flansches, anschließend wurde das Material über den äußeren Flanscbereich umgelegt. Es wurden jeweils fünf Versuche mit den Gelegen und drei mit dem Gewebe durchgeführt. Anhand der Messdaten aus den Versuchen ist es ersichtlich, dass die größten Kräfte beim Drapiervorgang vom Triax-Gelege auftreten. Die Kräfte liegen beim Triax um die 210 N, beim Biax 140 N und beim G0926 um 85 N und ergeben sich aus dem Mittelwert der aufsummierten gemessenen Werte. Hier zeigt sich, dass das Gewebe den geringsten Widerstand gegen das Drapieren ausübt. Bei den beiden Gelegen zeigt sich das größere Kräfte aufgebracht werden müssen.

Im Verlauf der Arbeiten wurde DLR seitens des Verbundführers Premium Aerotec darauf hingewiesen, dass die Fertigung der NCF-Türumgebungsspante weitestgehend als

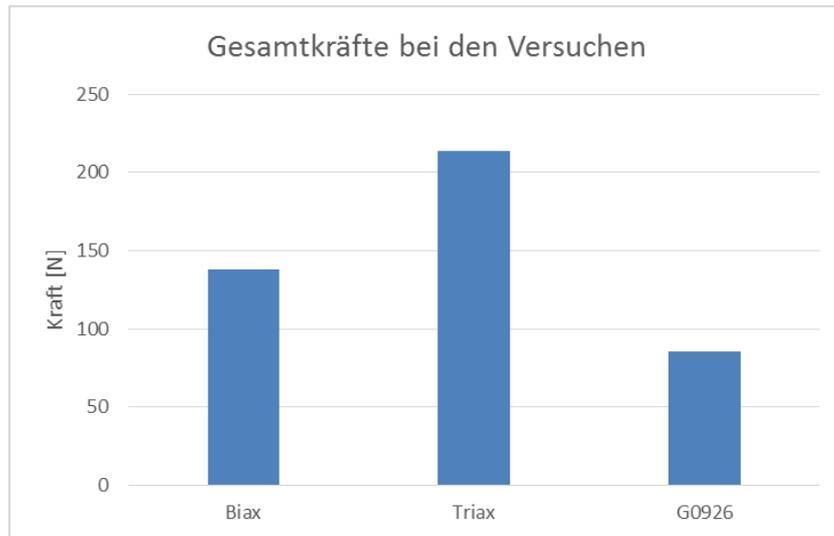


Abbildung 29: Gegenüberstellung der benötigten Kräfte

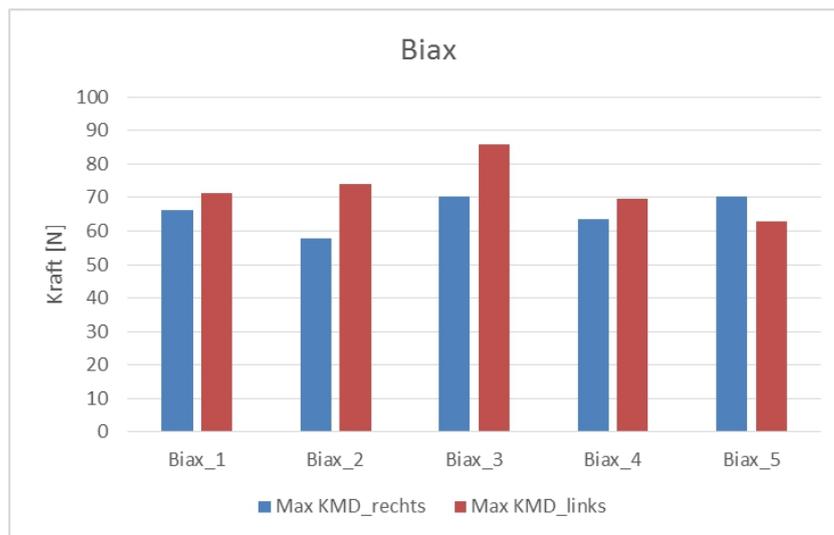


Abbildung 30: Biaxversuche

manueller Prozess fortgeführt wird. Da für eine Darstellung des TRL4-Reifegrades eine vollständige Dokumentation des manuellen Herstellungsprozesses notwendig war, wurde beschlossen den Fokus der Arbeiten auf die Entwicklung fertigungsnaher Sensorik zur vollflächigen Dokumentation der Faserwinkel am realen Bauteil zu legen. Durch die neue Gewichtung der Arbeiten ergab sich die Möglichkeit, den bereits im Laufe des Projektes validierten Sensor unter Verwendung eines geeigneten Verfahrens und einer geeigneten Vorrichtung unter realen Fertigungsbedingungen zu testen und gleichzeitig die Datenbasis für einen Vergleich der Reproduzierbarkeit zu späteren automatisierteren Vorrichtungen

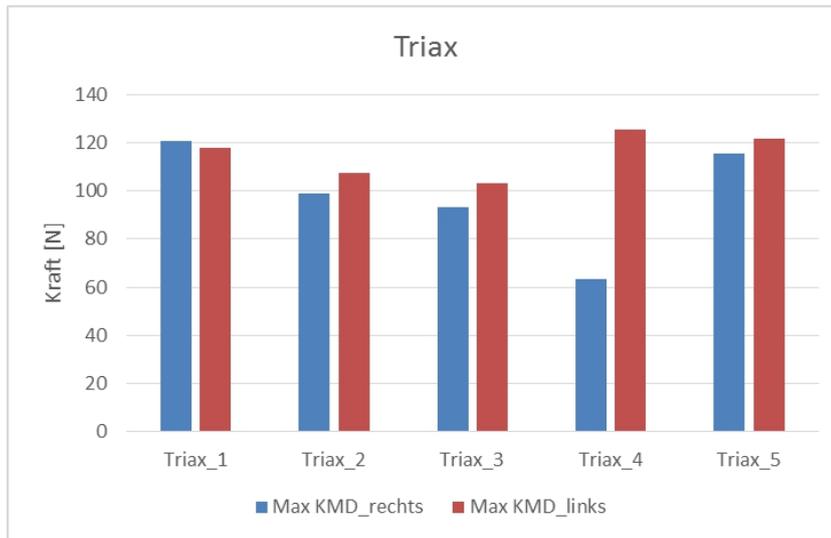


Abbildung 31: Triaxversuche

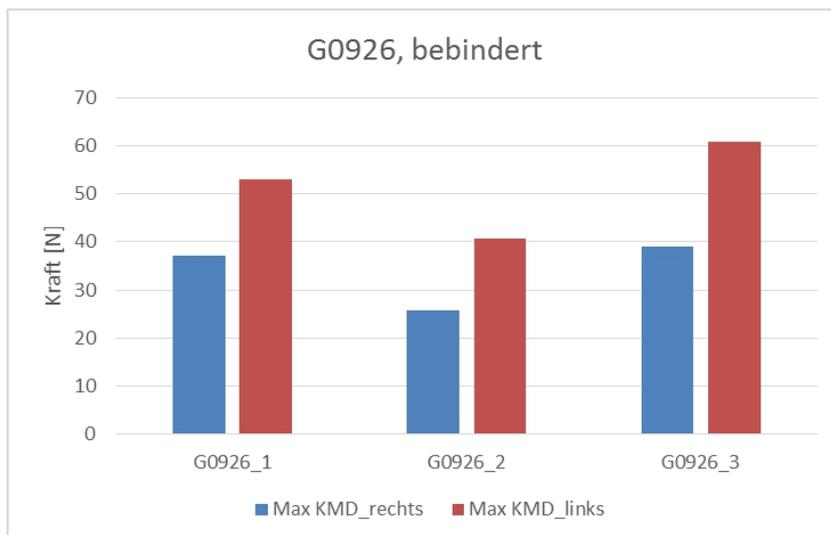


Abbildung 32: Versuche mit G0926, bebindert

zu generieren. Die Aufgabenstellung des Arbeitspaketes ist somit konform mit den Zielstellungen des DLR-FA-Antrags im Projekt RoCk.

### Sensorik zur Faserwinkelbestimmung

Um die durch die Vorverstreckung verursachten Änderungen der Drapiervorgänge auch quantitativ beurteilen zu können, wurden Faserwinkel in unterschiedlichen Bereichen verglichen. Da zum Zeitpunkt der Versuche noch keine zur Faserrichtungsbestimmung

geeigneten Detektoren zur Verfügung standen, wurden vor Verwendung der Halbzeugzuschnitte die Faserhauptrichtungen von  $45^\circ$  mit Hilfe von weißen Farbstiften markiert. Eine anschließende fotografische Dokumentierung ermöglichte die Auswertung der Richtungsänderungen. Diese wurden bezüglich von Referenzlinien bestimmt, die auf das aus Plexiglas bestehende Drapierschwert graviert wurden. Diese Referenzlinien markieren Radiale in Richtung des Mittelpunkts des äußeren Konturbogens des Preformwerkzeugs.

In Abbildung 33 sind die Faserwinkel in der Mitte des Webs eines nicht-vorgespannten und eines vorgespannten Preform in einem Diagramm dargestellt. Die  $x$ -Achse des Diagramms beschreibt die Länge des Spantpreforms auf den Fotos von links nach rechts. Die Stelle „Null“ markiert den Beginn des Vorstreckungsbereichs bzw. den Bereich des roten Tapes in Abbildung 19. Im Diagramm ist zu erkennen, dass der Verlauf der Faserwinkel durch die Vorstreckung im Vorstreckungsbereich um ca.  $2^\circ$  in Richtung höherer Faserwinkel verschoben war. Dies bedeutet, dass die Faserwinkel flacher geworden sind. Dadurch wurden die durch die Konturänderung im Web verursachten maximalen Faserwinkelabweichungen etwas entschärft.

Das hier dargestellte Messverfahren über Analyse von aufgenommenen Fotografien ist sehr zeitaufwändig und wird durch die besondere Beschaffenheit des verwendeten multiaxialen Gelegetyps erschwert. Da die Einstiche der Gelegevernähtung nicht einheitlich entlang der Kanten der Rovings erfolgen, wird die manuelle Schätzung der Faserrichtung durch die Überlagerung des Einstichmusters oft fehlgeleitet. Aus diesem Grund sollte eine Anlage beschafft werden, die durch berührungslose und nicht-zerstörende Analyse, die Faserrichtung und die Faserwinkel einer Preform- und wenn möglich sogar einer Laminaoberfläche, bestimmen kann. Für die Anschaffung kamen im Wesentlichen zwei Anlagen in Frage: ein Detektor der Fa. Profaktor und eine Anlage vom WZL der RWTH Aachen. Für beide Systeme lagen allerdings bisher keine Validierungsuntersuchungen bezüglich der Genauigkeit der ermittelten Faserrichtungen vor. Es gab lediglich Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der ermittelten Faserrichtungen. Als Hauptkriterium zur Auswahl eines Herstellers sollte die Genauigkeit der detektierten Faserrichtung verwendet werden. Dazu wurde ein multiaxiales Fasergelege verwendet, bei dem selbst bei manueller Analyse die Bestimmung der Faserrichtung nicht trivial ist. Für die Bestimmung der Referenzfaserrichtung der obersten Lage einer Gelegeprobe wurde ein zerstörendes Verfahren entwickelt, das auf der Entnahme einzelner Filamentbündel basiert.

Es wurden insgesamt acht unverscherte Gelegeproben mit unterschiedlichen Winkelausrichtungen der obersten Lage hergestellt und jeweils auf einem Aluminiumblech fixiert. Alle Proben wurden den beiden Sensorherstellern zur Winkeldetektion vorgelegt. Die Winkelmessung erfolgte jeweils relativ zum unteren Rand eines auf jedem Probenblech befestigten und reproduzierbar herunterklappbaren Passepartouts mit 100 mm Kantenlänge.

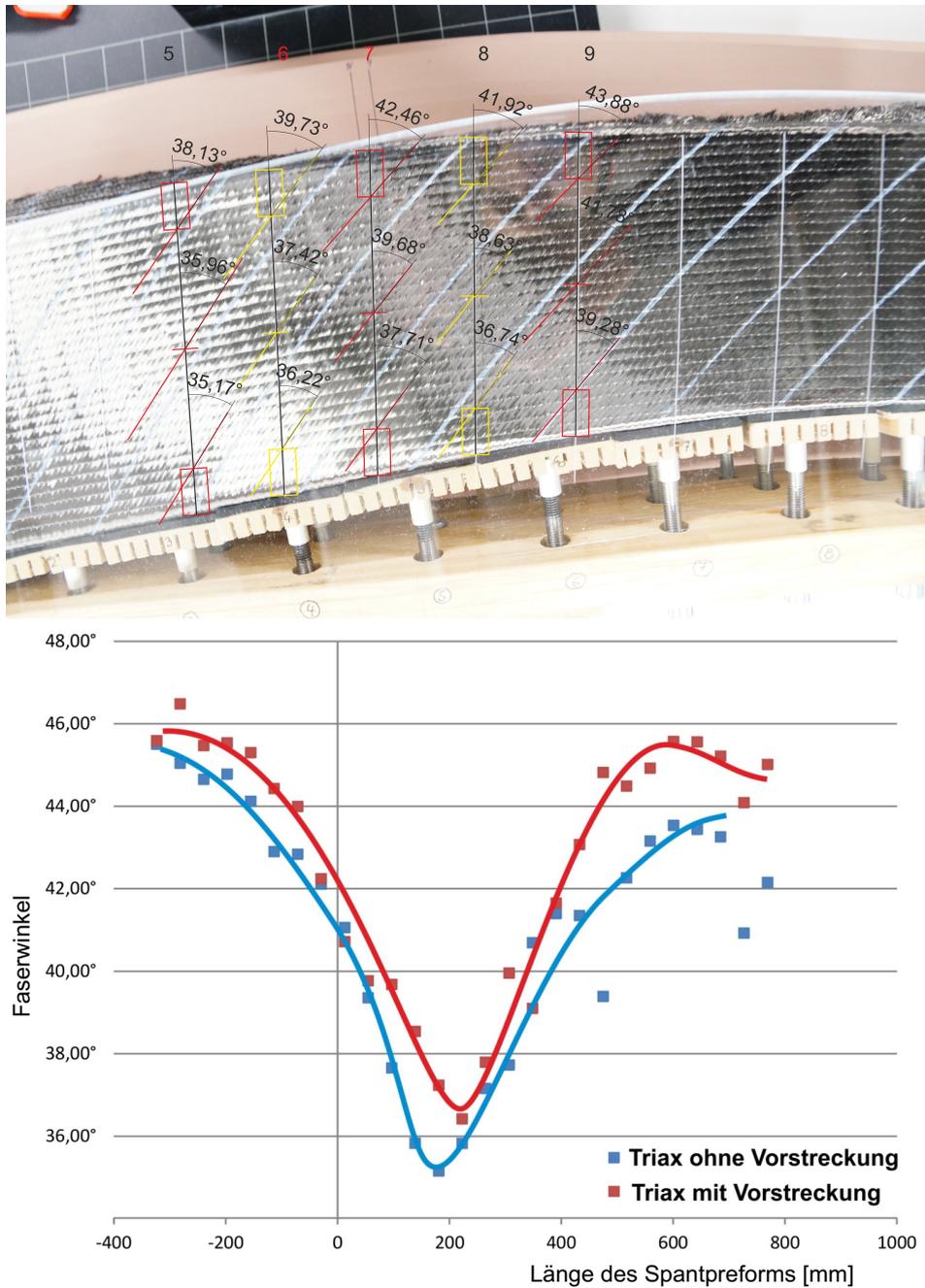


Abbildung 33: Vergleich der Umformergebnisse bezüglich der Faserwinkel mittig des Webs mit und ohne Vorspannung (manuelle Fotoauswertung). Die  $x$ -Achse des Diagramms beschreibt die Länge des Spantpreforms auf dem oberen Foto von links nach rechts

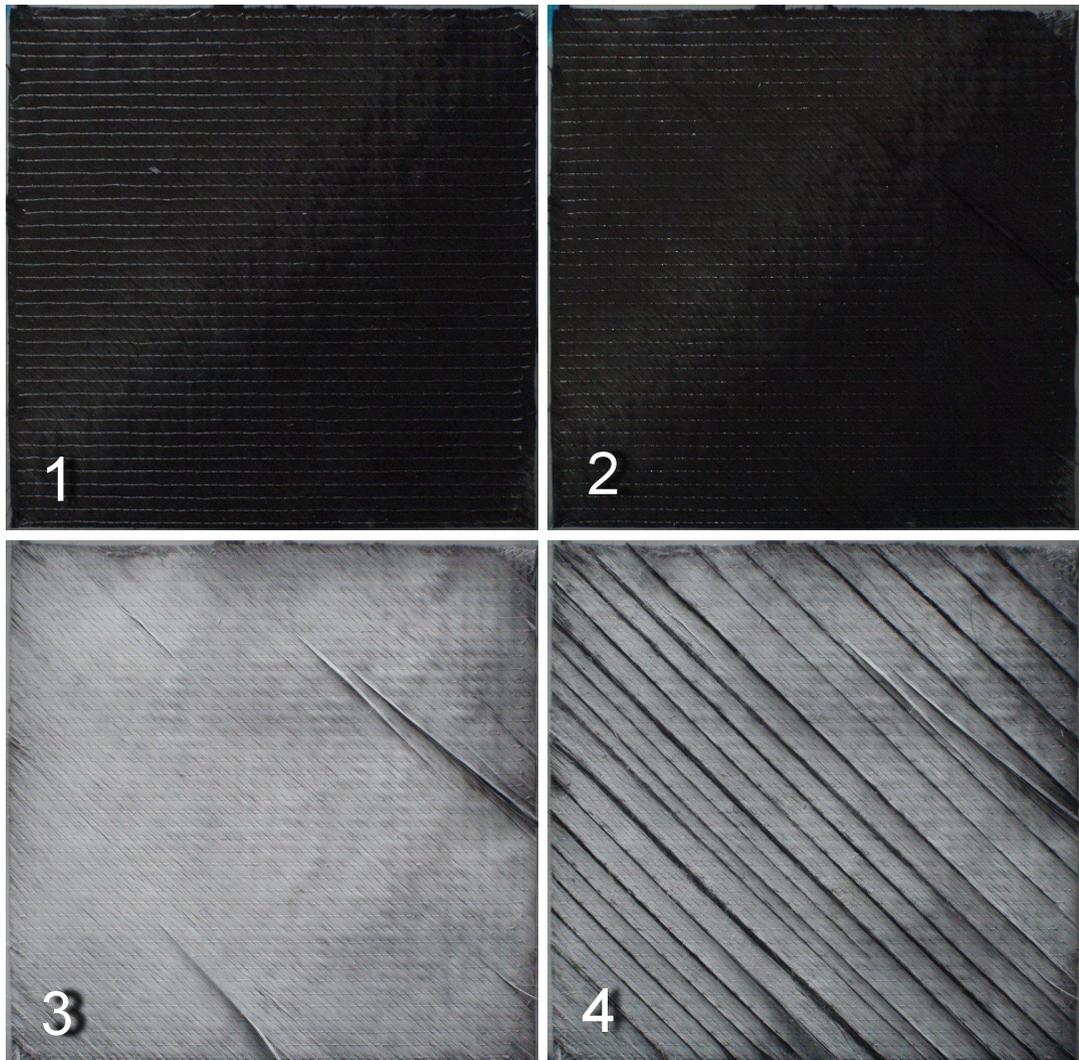


Abbildung 34: Präparation von Gelegeproben zur Ermittlung der Faserrichtungen der obersten Faserlagen unverscherter Multiaxialgelege. (1) Ausgangsprobe, (2) thermische Zerstörung der Nähfäden mit Heißluftfön, (3) Einfärbung, (4) Entnahme kleiner Bündel Faserfilamente

Nach der sensorgestützten Analyse erfolgte die zerstörende Analyse beim DLR. In Abbildung 34 sind die Arbeitsschritte zur Probenpräparation dargestellt. Sie umfassen die thermische Zerstörung der Nähfäden mit Hilfe eines Heißluftföhns (2), die Einfärbung der Gelegeoberflächen mit einem Pulver auf Aluminiumoxyd-Basis (3) und der anschließenden Entnahme kleiner Bündel von Faserfilamenten. Durch die fehlenden Filamente und dem so entstandenen Kontrast zu den darunter liegenden Schichten, konnten die Faserwinkel durch eine fotografische Auswertung bestimmt werden, siehe Abbildung 35. Beide untersuchten Systeme zeigten eine relativ hohe Übereinstimmung der Messergebnisse mit den Ergebnissen der manuell zerstörenden Faserwinkelbestimmungen. Einen leichten Vorteil in der Genauigkeit konnte das System Profaktor für sich verbuchen. Gegenüber den manuellen Messungen hatte das System Profaktor eine mittlere Abweichung bei allen Proben von  $-0,94^{\circ}/0,02^{\circ}$  und das System WZL eine mittlere Abweichung von  $-1,33^{\circ}/0,24^{\circ}$ . Aufgrund dieser Analysen und des höheren Reifegrads der Anlage und der Software fiel die Wahl auf das System Profaktor.

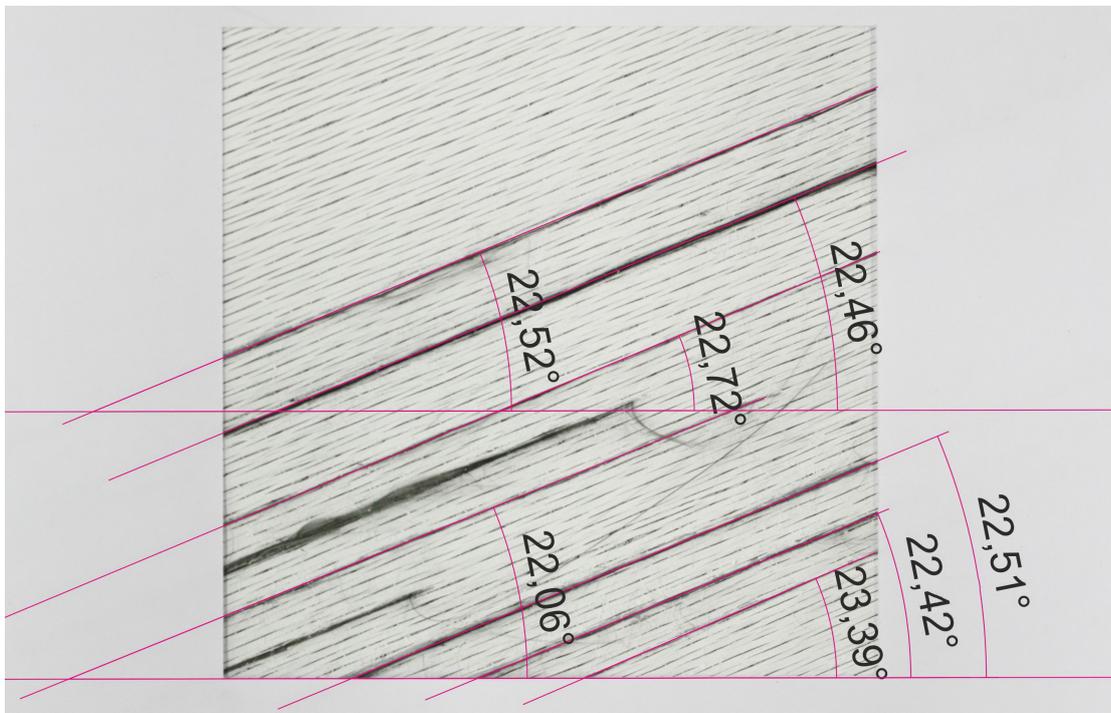


Abbildung 35: Fotografische Auswertung der präparierten Probenoberfläche mit geeigneten Graphik-Tools am Computer (Probe Nr. 5)

Die in Zusammenarbeit mit dem Verbundführer erarbeiteten Randbedingungen für das Arbeitspaket waren:

- Komplette Dokumentation der Faserwinkel auf der Preformoberfläche nach jeder abgelegten Faserlage
- Engmaschige Aufnahme der Faserwinkel in einem Raster mit Kantenlänge (ma-

ximalen) 40 x 40 mm für eine der ganzflächigen Fasersorten (UD, Biaxial- oder Triaxialgelege)

- Möglichkeit der anlagenunabhängigen Position- und Ausrichtungbestimmung nur mit den Hilfsmitteln der Preformvorrichtung
- Auslesen und Verarbeitung der punktuell zugeordneten Faserwinkel in einer Ausgabedatei

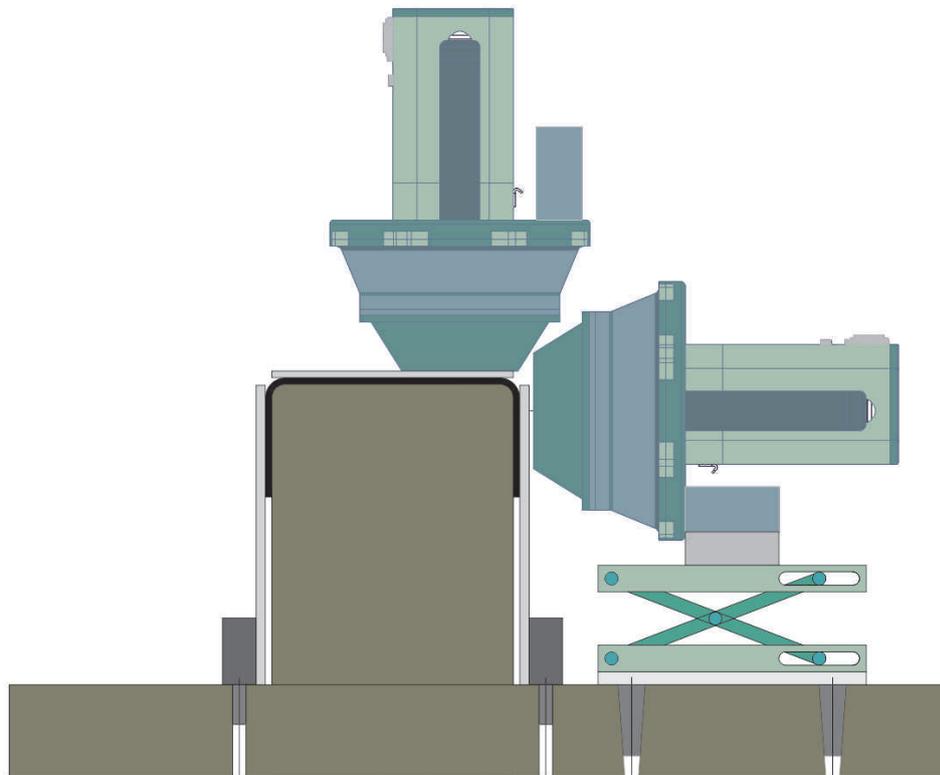


Abbildung 36: Konzeptskizze für die Positionsführung des Sensors zur Dokumentation der Faserwinkel auf dem Web und den Flanschen der Preformlagen.

Abbildung 36 zeigt eine Prinzipskizze für die Führung und Anordnung des Faserwinkelsensors. Zur Referenzierung der gemessenen Winkel bzw. zur Ausrichtung der Sensorkamera sollten transparente Kunststoffplatten angefertigt werden, die auf der Preform positioniert werden. Die Ausrichtung sollte über Referenzbohrungen im Preformwerkzeug erfolgen.

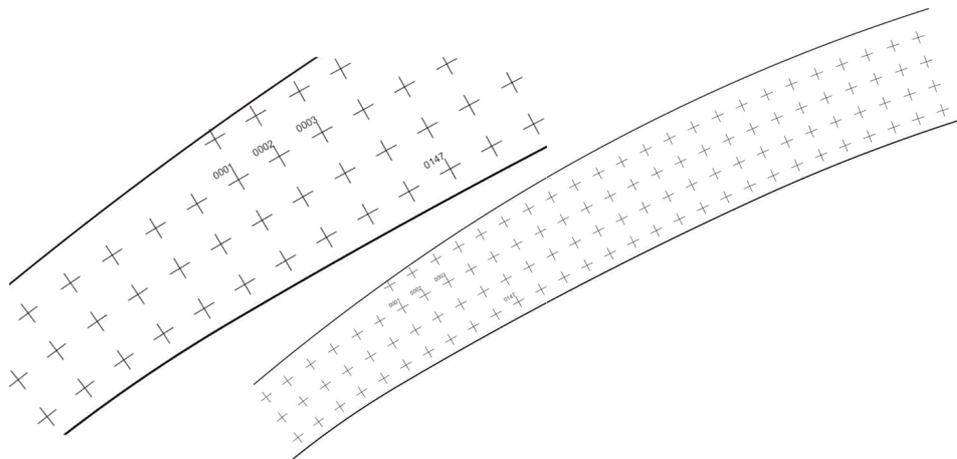


Abbildung 37: Beispielfähige Verteilung von Koordinatenkreuzen als Referenzmarkierung für die zu messenden Faserwinkel auf Makrolon-Platten.

Eine mögliche Verteilung von Referenzkreuzen mit dem angestrebten minimalen Abstand von 40 mm ist in Abbildung 37 dargestellt. Die Zuordnung von Messwert und Ort sollte über die gleichzeitig zur Messung erfolgende fotografische Dokumentation der Oberfläche und der Referenznummer der Messstelle sichergestellt werden.

Die auf Seite 53 vorgestellten Randbedingungen wurden in einem Versuchsaufbau getestet, der in Anlehnung an die erarbeiteten Konzepte entstanden ist. Das ausgewählte Konzept, siehe Abbildung 38 entstand in Anlehnung an die Schablonenvariante, denn diese stellte sich als pragmatisch im Umgang und Umsetzung heraus und stellte eine hohe Flexibilität im Einsatz in der Fertigung. Die Einfachheit der Schablonenvariante zeichnete sich durch die Umsetzbarkeit aus, denn es werden keine zusätzlichen Steuerungen bzw. Roboter benötigt. Zusätzliche Antriebseinheiten und größere mechanische Apparaturen sind vermieden worden und damit größere Anschaffungskosten, ohne in der Präzision bei der Detektion der Faserwinkel Abstriche machen zu müssen.

Die Konstruktion gliedert sich in unterschiedliche Bauteile: die zweigeteilte Stegschablone, zwei Schablonen für die Gurtseiten und einer Adapterplatte für die Positionierung auf den Gurtschablonen. Eine Übersicht der Bauteile ist in Abbildung 39 zu sehen. Dabei wurde während der Versuche darauf geachtet, dass die Konstruktion den Messablauf oder die Positionierung der Kamera nicht behindert. Die Versuche beim Verbundführer am TRL3-Werkzeug dienten zum Erkennen von konstruktiven Fehler und zur Abschätzung des zeitlichen Aufwandes einer Messung.

Die Stegschablone hat ein über den gesamten Stegbereich abdeckendes Referenzsystem mit Kreuzen erhalten mit dem jeder Messwert einem Ort zugewiesen werden kann. Damit eine lesbare Beschriftung erfolgen kann mussten Versuche durchgeführt werden

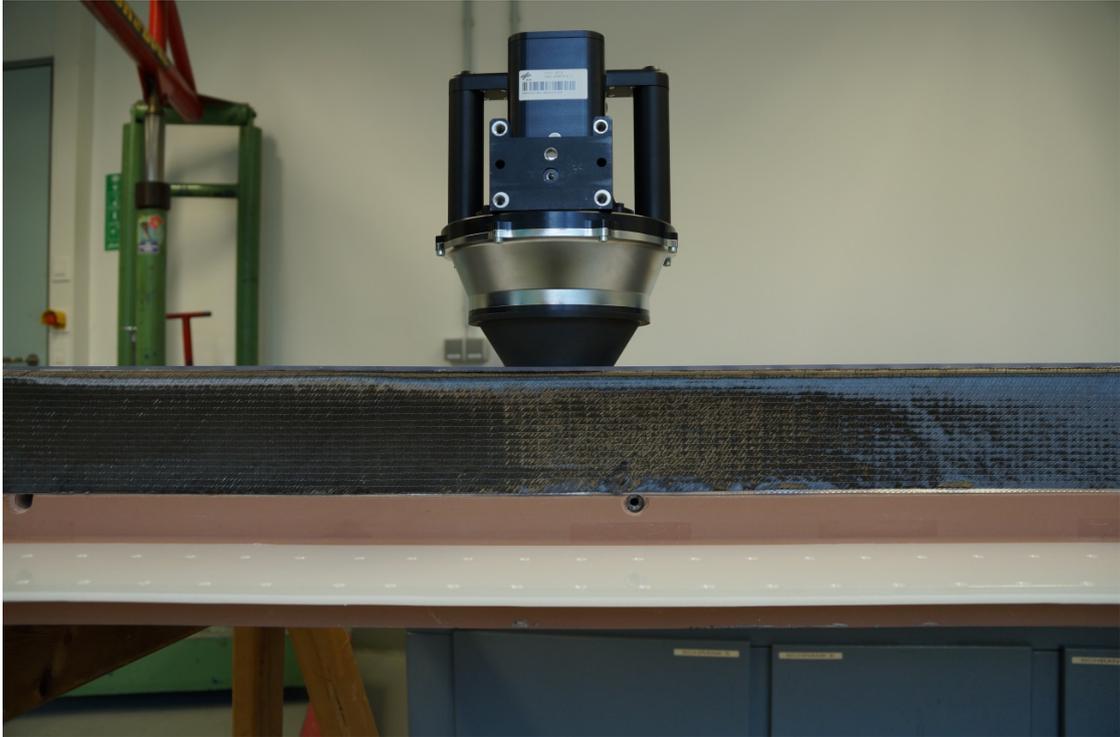


Abbildung 38: Versuchsaufbau mit Webschablone und aufgesetztem Scanner

um die optimale Schriftgröße zu ermitteln. In der Abbildung 40 ist die Qualität einer Aufnahme der Zahlenbeschriftungen durch die Kamera zu sehen. Während der Versuche wurde ersichtlich, dass die Zahlen, die direkt auf der Oberfläche des Kunststoffes graviert wurden, einen Schattenwurf zur Folge hatten. Der Schattenwurf führte zu unleserlichen Zahlen. Durch Änderung der Gravurebene auf die untere Ebene die direkten Kontakt zum Material hat, konnte der Schattenwurf umgangen werden. Die Zahlen wurden spiegelverkehrt graviert damit die Anordnungen der Zahlen von oben betrachtet in richtiger Reihenfolge auf dem Kamerabild erscheinen. Die Zuordnung der Orte basierte auf den Daten des TRL3-Werkzeuges und bezog sich auf den Nullpunkt des Rumpfs. Die Schablone wurde für den Versuchsaufbau in zwei Teile getrennt, damit die Handhabbarkeit und Transportfähigkeit nicht eingeschränkt wird.

Die beiden Schablonenteile standen auf Abstützungen, die an den jeweiligen Enden mit dem Werkzeug verbunden wurden. Durch die Verbindung der Portale zum Werkzeug wurde die Lage fixiert. Die Verbindung der beiden Schablonen zu einander erfolgte auf dem Steg. Als Verbindungselemente dienten zwei Bleche in denen Stifte eingepresst waren. Diese Verbindung war von besonderer Bedeutung, weil die Messreihen auf dem Steg von einer Schablone auf die andere überlaufen sollten. Die beiden Bleche sollten das Abgleiten verhindern. Dadurch ergab sich eine fixe Positionierung der beiden Schablonen. Die Steg-schablonen hatten 228 Messstellen, die mit Kreuzen und Positionsnummern markiert

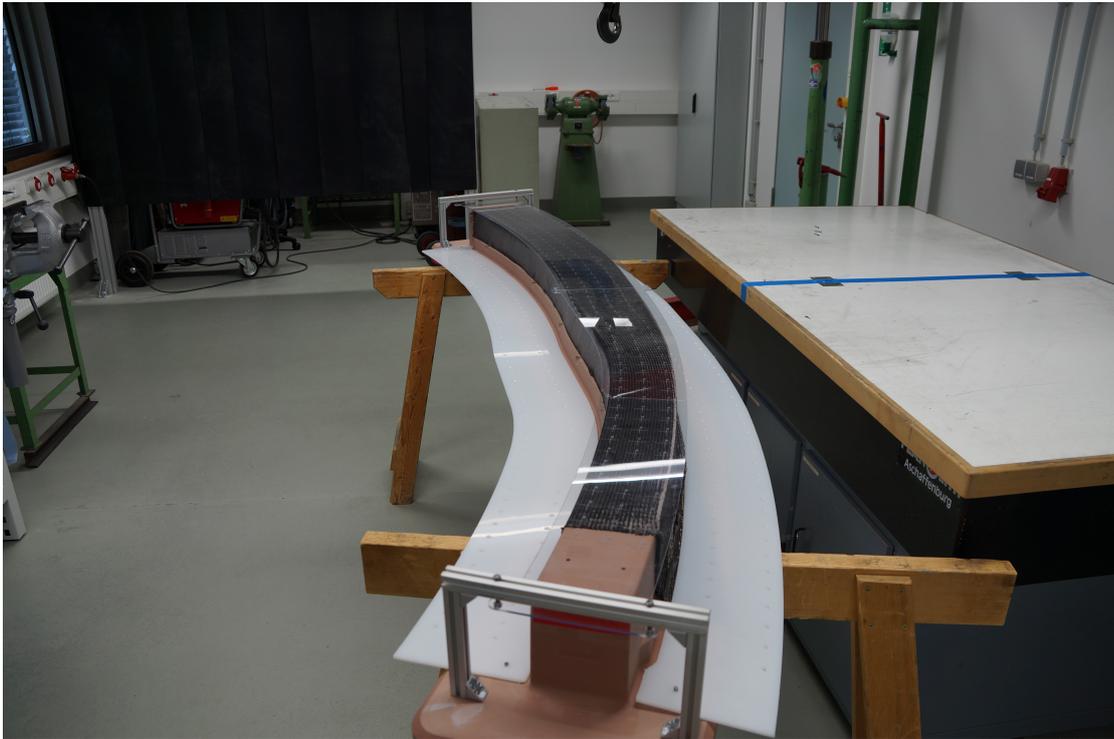


Abbildung 39: Übersicht der Bauteile

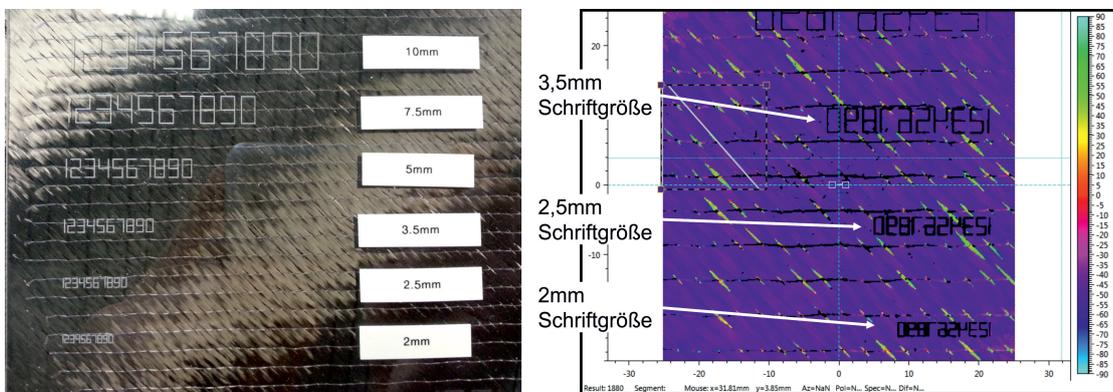


Abbildung 40: Schriftgrößenauswahl und Validierung der Gravurmethode zur optimalen Sichtbarkeit im Scan.

waren. Des Weiteren wurde geplant die Stegschablonen um Laschen an den seitlichen Rändern zu erweitern. Die Laschen dienten dazu Folien aufzunehmen und diese in Position zu halten. Die Folien wiesen aufgedruckte Positionsnummer auf, damit auch an diesen Positionen der Messwert einem Ort zugewiesen werden konnte. Die Gurte hatten im inneren Gurt 52 und im äußeren Gurt 55 Messpunkte (für das TRL3 Werkzeug). Der Ablauf einer Messung wurde durch die Anordnung der Positionsnummer vorgegeben. Die

Zählung fing auf der Stegschablone links unten, mit 001, an und endete oben rechts mit 228. Die Gurte wurden jeweils von links nach rechts abgescannet. Der Nummernverlauf gab vor zunächst den inneren Gurt, später den äußeren Gurt abzuscannen.

Die Gurtbereiche wurden mit Hilfe einer Bohrschablone gescannt, wie in Abbildung 41 zu sehen ist. Die Schablone erstreckte sich über die gesamte Gurtlänge und ermöglichte eine durchgängige Positionierung entlang der Gurte. Auch in den Gurtbereichen hatten die Messpunkte definierte Positionen. Der Unterschied lag darin, dass in den Gurtbereichen keine Kreuze zur Ausrichtung der Kamera verwendet wurden. Die Positionen wurden über die Bohrungsschablone in der horizontalen Richtung und mit der Adapterplatte in der vertikalen Richtung bestimmt. Die Adapterplatte wurde an den Faserwinkelsensor montiert. Mit der Adapterplatte wurde der Sensor an der Bohrungsschablone ausgerichtet und positioniert. Die Schablone besaß zwei Bohrungen für jede einzelne Position, der Sensor wurde durch die beiden Bohrungen senkrecht zu den Tangenten ausgerichtet. Die senkrechte Ausrichtung des Sensors auf das Gelege ist wichtig, denn durch einen eventuellen Winkelfehler würde es zu Abweichungen in den Messergebnissen kommen.

Position des Kamera in der Flanschschablone zur Aufnahme der Flansche



Höhenverstellung+Positionierungshilfe

Flanschschablone

Abbildung 41: Prinzip der Faserwinkelmessung an den Flanschen des Testspants.

Mit Hilfe der Schablonen war es möglich den gesamten Gurtbereich zu scannen. Um die komplette Höhe der Gurte scannen zu können wurde eine zweite Adapterplatte benötigt, mit einer abweichenden Höhe zur Anpassung an die Höhe des Gurtes. Resultierend aus der maximalen Messhöhe von 80 mm und dem Messfenster von 40 mm x 40 mm des Sensors, ergab sich ein Höhenunterschied von 40 mm zwischen den beiden Adapterplatten.

Das an einem Testaufbau validierte Konzept wurde anschließend reales Preformwerkzeug adaptiert. Dabei handelt es sich um einen sogenannten C74-Testspant aus der Türumgebung des A350. Zur Entwicklung der Fertigungstechnologie zur Herstellung dieses Spants im Infusionsverfahren sollte die Ablage jeder Einzellage parallel zur Fertigung des Preforms bezüglich der drapierten Faserwinkel dokumentiert werden. Zusammen mit dem Partner PAG konnten verschiedene Randbedingungen für die Dokumentation festgelegt werden:

- Erfassung jeder Einzellage (Bi- oder Triaxial oder UD-Lage) mit einem Rasterabstand der Messpunkte in Umfangsrichtung von maximal 300 mm, je nach Komplexität des Umformgrades, und 40 mm in radialer Richtung.
- Erfassung jedes Lagentyps je einmal komplett mit einem Rasterabstand von genau 40 x 40 mm sowohl in radialer Richtung und in Umfangsrichtung (je eine Bi- oder Triaxial oder UD-Lage).
- Ausrichtung des lokalen Koordinatensystems jedes Messpunktes nach der Tangente einer Center-Line jeweils an der lotrecht projizierten Stelle der Center-Line vom Messpunkt aus.
- Generierung der Center-Line als halbierende Kurve aus der Kontur zwischen Gurt-Innenkontur und Gurt-Außenkontur
- Erfassung der Messwerte in Form von Excel-Tabellen aus Messpunktnummer und Winkel zur 45°-Richtung im lokalem Messpunkt-KOS

Parallel zu den willkürlich nach geometrischen Konturen des Bauteils orientierten KOS wurde ein Konzept zur Ausrichtung der KOS nach einem einzigen globalen KOS, siehe Abbildung 42, entwickelt. Lokale Referenzrichtungen konnten so leichter nachträglich eingerechnet werden. Mögliche Quellen für Referenzrichtungen zur Bewertung der örtlichen Faserrichtungen können z. B. die Ergebnisse von Drapiersimulationen sein. In Abstimmung mit dem Verbundführer PAG wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt. In der Abbildung 43 ist die endgültige Konstruktion abgebildet. Im Gegensatz zur früheren Version lag die Steg-Schablone direkt auf dem Preform auf und war in der Stegebene durch jeweils zwei kleine Pfosten positioniert. Der Bereich des Stegs wurde in drei sich überdeckende Schablonenbereiche unterteilt. Das Preformwerkzeug besaß Referenzierungsbohrungen über die eine Grundplatte des Messaufbaus fixiert und referenziert wurde (Abbildung 43, blaue Platten mit Bohrungen). Diese Grundplatte diente sowohl der Positionierung der Pfosten als auch zur Positionierung des Sensors für die Detektion der Gurtfaserwinkel. Die Ausrichtung des Sensors zur Detektion der Gurtfaserwinkel erfolgte in horizontaler Richtung parallel zur Steg-Ebene des Spantwerkzeugs. Über eine an den Stegschablonen angehängte Folie und aufgedruckten Nummern erfolgte die Zuordnung von Messpunktnummer und gemessenem Winkel. Als Vorbereitung zur Auswahl eines Preformingverfahrens zur Herstellung eines C74-Demospantens seitens des Partners PAG wurden dort Drapierversuche an dem TRL3-Demo-Spantwerkzeugs durchgeführt.

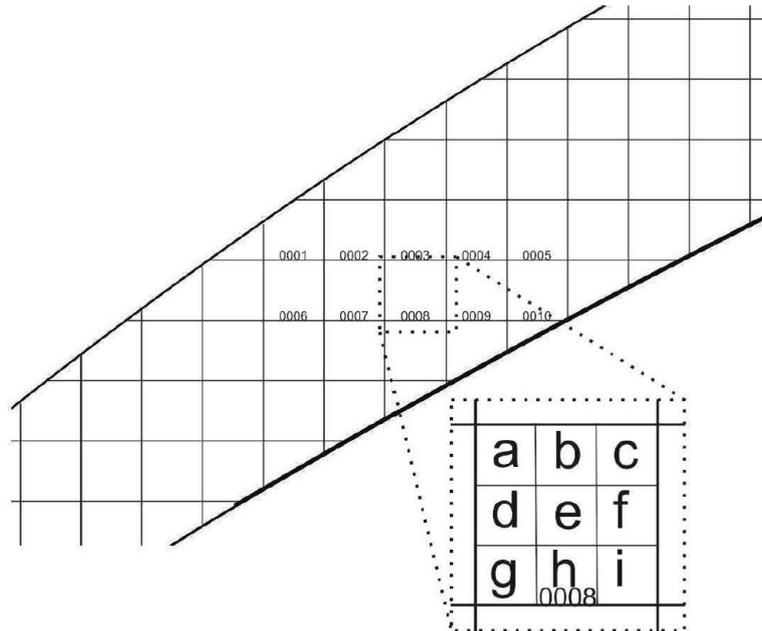


Abbildung 42: Organisation der lokalen Messpunkte und Referenzrichtungen nach einem einzigen global ausgerichteten Raster.

Zum Vergleich der bei PAG angewendeten Verfahren zum Verfahren beim DLR und zur Demonstration des Messverfahrens wurden bei PAG Faserwinkel mit Hilfe der entwickelten Vorrichtung und dem Sensor (Profaktor) aufgenommen. Die unterschiedlichen Strategien zur Umformung einer Biaxial-Faserlage ( $\pm 45^\circ$ ) sind in Abbildung 44 zu sehen.

In Abbildung 45 ist das Ergebnis beispielhaft anhand von Messpunkten entlang der Mittellinie des Stegbereichs und Ausrichtung der KOS zur Tangente dieser Linie dargestellt (grüne Mittellinie). Zu sehen ist, dass sich die unterschiedlichen Drapierstrategien in bis zu  $9^\circ$  unterschiedlichen Faserwinkeln bemerkbar machen.

Anschließend wurde im laufenden Herstellungsprozess eines Spantes die Dokumentation einer kompletten Lage mit dem an die neue Spantgeometrie angepassten System durchgeführt. Die Schablonen für die Winkelmessung im Web wurden mit 456 Messpunkten versehen. Für die Aufnahme der Faserwinkel der Flanschbereiche wurden auf der Innen- und Außenseite insgesamt 428 Messpunkte vorgesehen und gescannt. Der Aufbau mit den transparenten Schablonen und den Fixierungsdomen sind in Abbildung 46 dargestellt. In Abbildung 47 ist der Messvorgang zu sehen. Im linken Bild wird der Sensor auf der fixierten Makrolon-Schablone positioniert und online über die Beobachtung der Kamerabilder auf dem Monitor manuell so justiert, dass das Koordinatenkreuz der Kamera (welches als feste Linie im Kamerabild sichtbar ist) mit dem von der Schablone aufgenommenen Kamerabild in Deckung liegt. Auf der rechten Seite der Abbildung 47 wird die Kamera durch Stifte in ihrem Sockel und dazu passende Positionsbohrungen

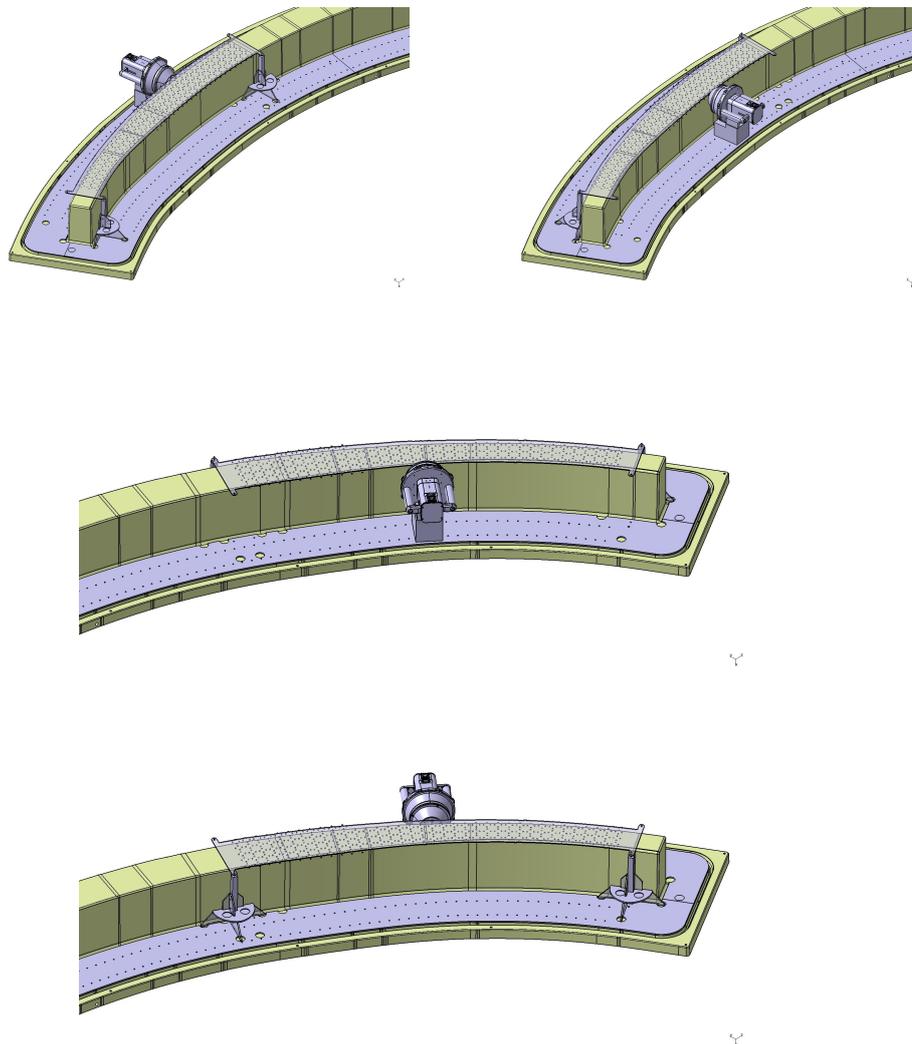


Abbildung 43: Adaptierte Konstruktion zur Dokumentation von Faserwinkeln auf dem C74-Drapierwerkzeug (unterschiedliche Ansichten).

in der Makrolon-Schablone positioniert. Die Kunststofffolien auf dem Flansch dienen lediglich zur Herstellung einer Positionsnummer im aufgenommenen Bild. Die  $x$ -Achse der Winkelmessung entspricht der Horizontalen bzw. der Ausrichtung der Web-Ebene der *Outer-Mould-Line (OML)* des Spants. Auf dem Werkzeug befand sich eine drapierte biaxiale Halbzeuglage aus schlagzähmodifiziertem Multiaxialgelege.

Es wurden 884 Messpunkte angefahren und aufgenommen. Die Auswertung des Verfahrens ergab, dass für die Aufnahme der Faserwinkel im Flanschbereich pro Messung 5,1 bis 6,8 Sekunden benötigt werden (weniger mit steigender Erfahrung; 42,7 Minuten netto für alle Flansch-Messungen). Dazu ist die Umrüstzeit von ca. 4,5 Minuten pro

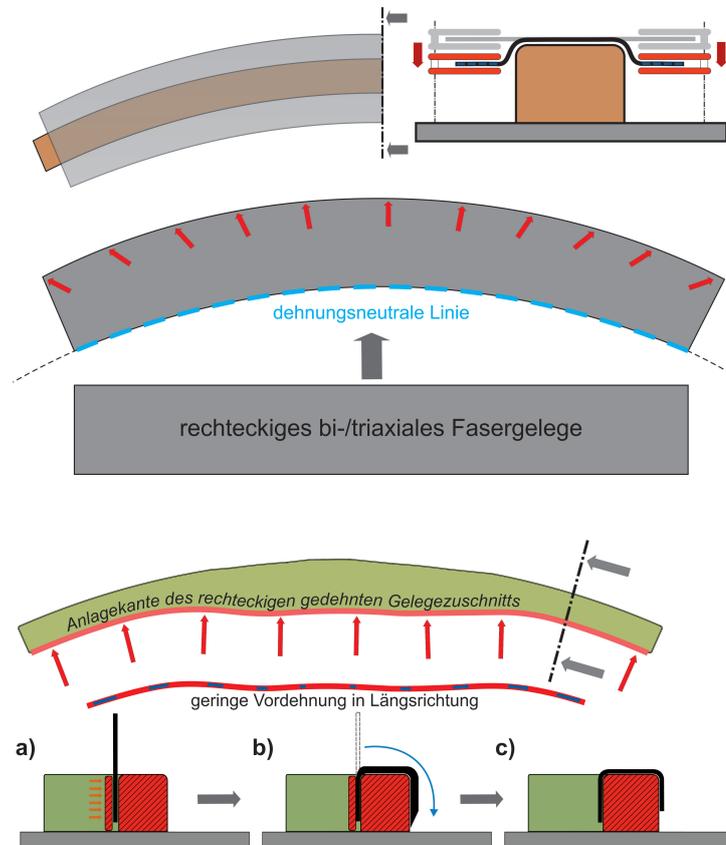


Abbildung 44: Varianten der Drapierstrategien: oben PAG, unten DLR

Schablonenwechsel zu rechnen. Auf dem Web wurde pro Messung aufgrund der manuellen Ausrichtung der Kamera pro Messung eine längere Zeit benötigt. So wurden pro Messung im Schnitt 17,8 Sekunden verwendet, so dass für alle 456 Messungen des Webs 2 Stunden und 15 Minuten Nettozeit aufgewendet wurden. Pro Umrüstung der Schablonen mussten 6 bis 10 Minuten eingerechnet werden. Die Gesamt-Arbeitszeit für die Vermessung eines Spants mit 884 Messstellen auf Flansch und Web beträgt demnach ca. 227 Minuten (ohne Einrechnung von Pausen). Diese Werte beziehen sich auf die Messung der zweiten Lage, nachdem das Verfahren bereits eingefahren und ein gewisser Trainingsstand erreicht wurde. Insgesamt wurden zwei unterschiedliche Faserlagen komplett gescannt, die während des Preformaufbaus bei dem Verbundführer Premium Aerotec abgelegt worden waren.

Bei den Validierungsmessungen am C-74 Spant während des Herstellungsprozesses beim Verbundführer Premium Aerotec bot sich die Gelegenheit für einen Vergleich der im Projekt AZIMUT erarbeiteten automatisierten Faserwinkelmessung mit einem Roboter zum im Projekt RoCk entwickelten mobilen Messverfahren. Zu diesem Zweck wurde das Werkzeug nach dem Drapieren der ersten Biax-Lage zum ZLP Augsburg transportiert und in der IQZ-Zelle aufgestellt. Im Vorfeld wurde anhand der CAD-Daten eine

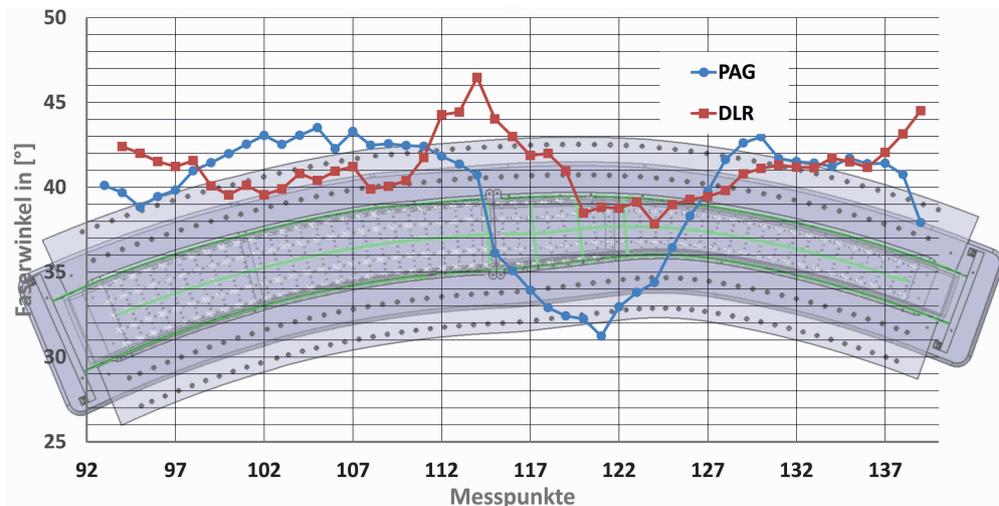


Abbildung 45: Vergleich der mit dem System Profaktor+Schablone gemessenen Faserwinkel aus den unterschiedlichen Drapierstrategien.

Offlineprogrammierung für das Abfahren des inneren Flansches und des Webs (der Außenflansch war für den Roboter nicht ohne größere Umbaumaßnahmen erreichbar) erstellt. Leider wurde das Werkzeug nicht aus Ureol sondern aus Glasfaser erstellt und war nicht verwindungsfest. Daher war ein exaktes Aufstellen entsprechend der CAD-Daten nicht möglich ohne spezielle Werkzeuge beschaffen zu müssen. Aus dem Grund ergab sich beim Einmessen des Werkzeugs in der Roboterzelle eine Ungenauigkeit von ca. 1 mm. Die im Offlineprogramm erzeugten Messpunkte orientierten sich an den Messpunkten auf den Schablonen der mobilen Messeinrichtung, sodass ein direkter Vergleich der Messwerte möglich sein sollte. Das Erzeugen des Offlineprogramms und das Einmessen des Werkzeugs hat einmalig einen halben Tag in Anspruch genommen.

Das Vermessen eines Punktes, inklusive Anfahrtweg sowie einer Ausschwingzeit des Roboterarmes, dauert ca. 2 s, sodass ein komplettes Vermessen einer Seite (Flansch/Web) in der Größenordnung einer halben Stunde liegt. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit des Roboterarmes zum mehr als 4 m langen Werkzeug mussten vereinzelt Messpunkte am Rand ausgelassen werden. In Abbildung 48 ist die Versuchsdurchführung dargestellt.



Abbildung 46: Messung auf der ersten Biax-Faserlage des C-74-Spantpreforms.

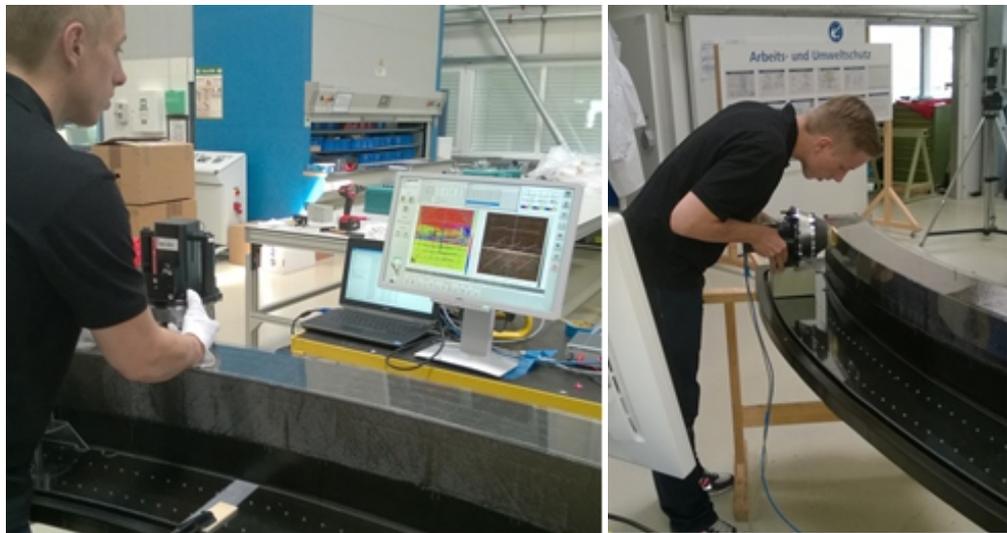


Abbildung 47: Durchführung der Messung auf der ersten Biax-Faserlage des C-74-Spantpreforms (links - Messung der Winkel auf dem Web; rechts - Messung der Innenflanschwinkel)



Abbildung 48: Vergleichsmessung zur mobilen Messeinrichtung mit baugleicher Kamera auf einem Roboter beim ZLP Augsburg.

Im weiteren Rahmen des Projektes wurde ein Konvertierungsprogramm geschrieben, das die Messung und die Bearbeitung der anfallenden Daten ermöglicht und vereinfacht. Die ausgelesenen Daten sollen aus einer `xml`-Datei in eine von Excel lesbare Datei geschrieben, `csv` oder `xls`, siehe Abbildung 49. Für einen Messversuch wurde eine vorher erstellte Messdatei, `measurlist.csv`, erstellt, welches das Messprogramm einlesen kann. Anhand dieser Messdatei, welche den Ablauf der Messung bestimmte bzw. die Reihenfolge in welchem Ablauf gescannt wird vorgab. Diese Liste wird in das Programm übernommen und die gescannten Werte werden direkt in diese Liste eingetragen. Die Ausgabedatei ist weiterhin eine `xml`-Datei die weiter verarbeitet werden muss. Die `xml`-Datei ist eine Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdateien und dient selbst zum Datenaustausch.

Mit Voreinstellung des Messprogramms von ProFactor werden können Filter eingestellt mit dem das Bild, welches der Sensor aufnimmt, beeinflusst wird. Die Filter modifizieren den sichtbaren Bereich auf den Bildern, z. B. blenden Nähfäden und Fehler im Gelege aus. Des Weiteren lassen sich andere Einstellungen vornehmen, die den auszuwertenden Bereich in Spalten und Zeilen aufteilen. Die Auswertung der einzelnen Zellen erfolgt dadurch einzeln und gesamt. Die Ergebnisse werden auch in der `xml`-Datei separat geschrieben. Die `xml`-Datei dient zum Datenaustausch, ist jedoch durch die Fülle an Informationen unübersichtlich. Die Datei enthält alle Einstellungen der Kamera, die jedoch für die Beurteilung der Faserwinkel nicht von Bedeutung sind. Mit dem Konvertierungsprogramm werden die wichtigen Messdaten aus der Datei gelesen und speichern diese in einem Format, der eine weitere Auswertung erleichtert. Die so aufbereitete Daten können weiter verwendet werden, z. B. für eine graphische Darstellung des Verlaufes der Faserwinkel über bestimmte Bereiche. Die Abbildung 49 stellt den Konvertierungsprozess skizzenhaft dar.

Die aufgenommenen Messwerte der Faserwinkel am C74-Spant mit Hilfe eines manuell geführten Sensors wurden mit den Ergebnissen einer Roboter geführten Messungen verglichen. Ziel war es, eine Abschätzung der Abweichungen beider Messungen voneinander und der Streuung der manuellen Ausrichtung des Sensors zu bekommen. Letzteres gilt unter der Annahme, dass die Positionierung des Sensors durch einen Roboterarm eine hohe Reproduzierbarkeit besitzt.

Zur Auswertung der großen Anzahl von Messpunkten und unterschiedlicher Aufzeichnungsmethoden musste die im früheren Projektverlauf erstellte Export-Software angepasst werden, um die Ergebnisse auf Basis von Excel-Tabellen auswerten zu können.

Die Roboter geführte Messung erhält die Positionen und Koordinatensystem(KOS)-Ausrichtung aus der Konstruktion der manuell geführten Messung. Als Voraussetzung für ein präzises Anfahren des Sensor-KOS auf die Messpunkte des Preformwerkzeugs muss eine genaue Vermessung und Ausrichtung des Sensorgehäuses zu den Befestigungspunkten erfolgen, inklusive der Überprüfung der Ausrichtung des CCD-Chips innerhalb des Gehäuses. Weitere Voraussetzung für präzise Positionierungen des Sensors zum Preform ist die reproduzierbare Ausrichtung des Preformwerkzeugs zum Roboter-KOS.

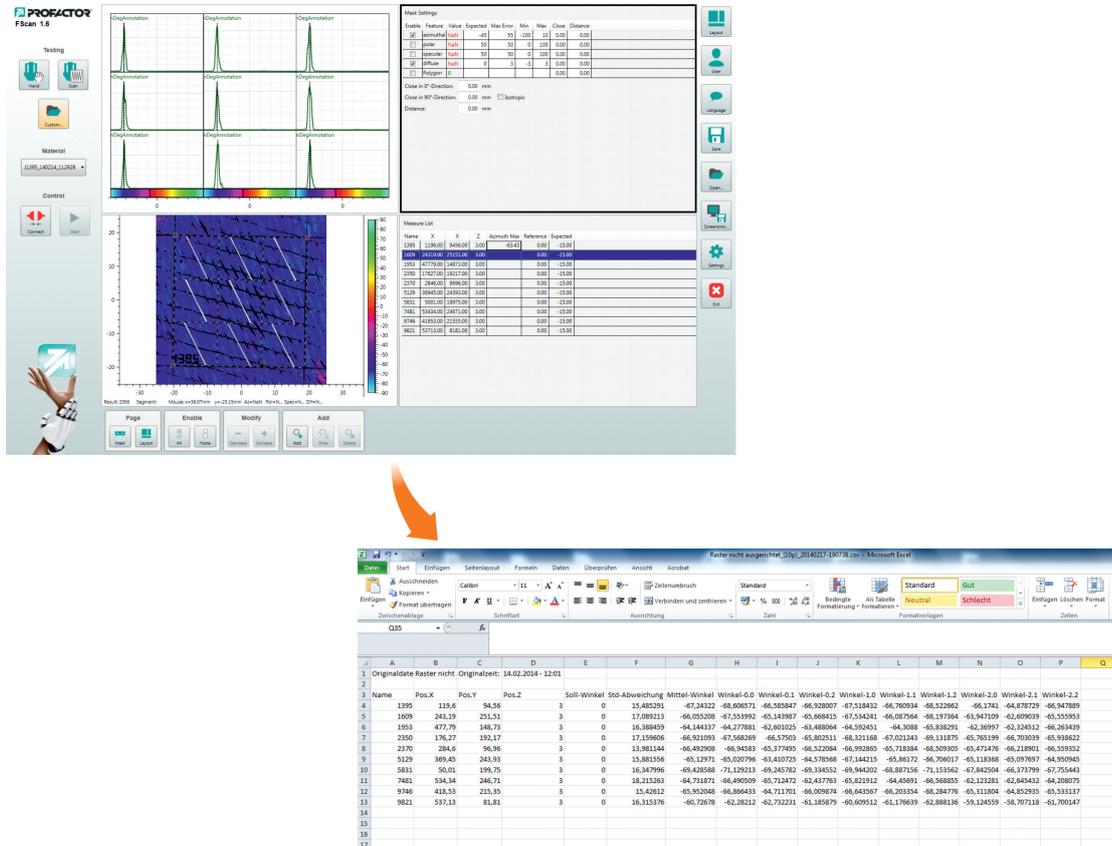


Abbildung 49: Export der Messdaten in ein Excel-Format über ein Konvertierungsprogramm.

Der erste Vergleich der Messungen und der Auswertebilder der einzelnen Messpunkte ergab eine leichte Abweichung in der Position der Messpunkte. In Abbildung 50 ist der Punkt 008 sowohl aus der manuellen als auch der Roboter geführten Messung abgebildet. Neben unterschiedlichen Einstellungen fällt beim Vergleich einzelner Bilddetails im Fasergelege eine Verschiebung um ca. 3 mm in senkrechter und 5 mm in horizontaler Richtung auf.

Dieses ist vermutlich auf eine nicht ausreichend genaue Ausrichtung des Preformwerkzeugs gegenüber dem Roboter-KOS zurückzuführen, da dieser Offset in allen Messpunkten wiederzufinden ist. Ursache war das Fehlen von maschinell eingebrachten Referenzpunkten auf dem Preformwerkzeug, welche die genaue Positionierung erschwerte. Eine weitere Fehlerquelle für die präzise Einmessung des Preformwerkzeugs war seine Tendenz sich zu Verwinden, begründet im glasfaserverstärkten Kunststoff als Werkzeugmaterial. Aus Zeit- und Budgetgründen war es leider nicht möglich eine angepasste Aufnahmevorrichtung zu beschaffen.

Da die Abstimmung der manuellen und Roboter geführten Kampagnen ungenügend und die Auswahl an Speichermetoden des Profactor-Sensors vielfältig sind, mussten

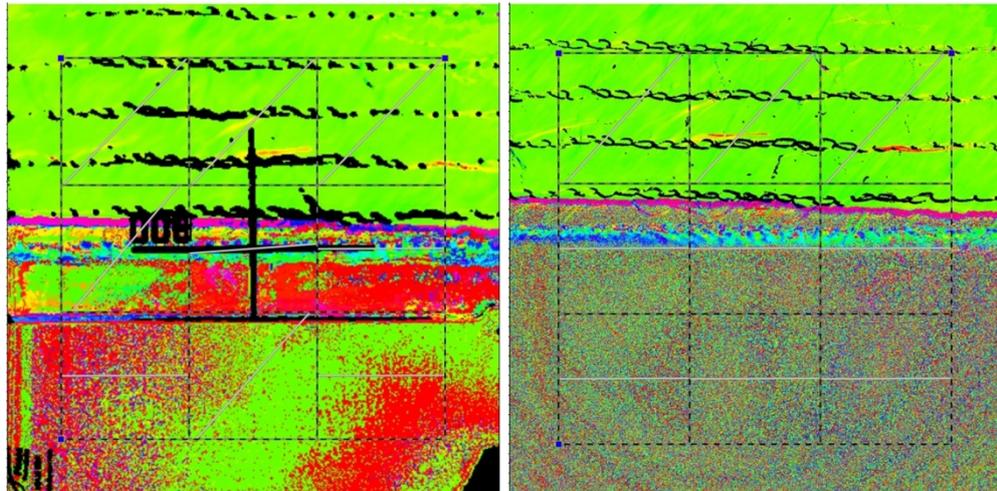


Abbildung 50: Vergleich des Ergebnisbilds von manuell (links) und Roboter (rechts) geführten Messung des gleichen Messpunktes, hier 008.

für einen direkten Vergleich der Messwerte einheitliche Kriterien für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse eines jeden Punkts festgelegt werden. Durch die Tatsache, dass bei der manuellen Sensorführung bei jedem Messpunkt ein Auswertegitter von 9 Feldern mit jeweils einem individuellen Messwert verwendet wurde, bei der Roboter geführten aber nur ein einziger gemittelter Messwert pro Messpunkt mussten viele Punkte aus dem direkten Vergleich herausgenommen werden. Das betraf im Wesentlichen die Messpunkte mit Randbereichen ohne Winkelinformationen in Bereichen des Messfensters. In diesem Fall hat sich das Auswerteverfahren mit 9 Feldern als vorteilhaft erwiesen, da nur entsprechende Teilbereiche in die Auswertung einbezogen werden konnten.

In Abbildung 51 sind die Verläufe der Faserwinkel am Innengurt im Vergleich der Messmethoden aufgeführt. Die qualitativen Verläufe scheinen nahezu deckungsgleich zu sein. Eine Verschiebung im Faserwinkel von ca.  $2^\circ$  zu beobachten, sowie eine geringere Verschiebung in Umfangsrichtung. Die mögliche Ursache für die Verschiebung in Umfangsrichtung ist zuvor beschrieben worden. Die Verschiebung im Winkel-Offset hat eine andere Ursache. Dieser Offset ist in nahezu allen Vergleichsmessungen beobachtbar. Verschiedenen Analysen in anderen Versuchen mit dem vom Roboter verwendeten Sensorkopf deuten darauf hin, dass ein Winkelversatz zwischen CCD-Chip und Sensorgehäuse für diesen Offset verantwortlich ist. Dieser Sachverhalt wird außerhalb des Projektes weiter verfolgt. Zur statistischen Analyse der unterschiedlichen Ergebnisse beider Messverfahren wurden für jeden Messpunkt die gemessenen Winkeldifferenzen von manueller- und robotergeführter Messung in Klassen aufgeteilt und deren Häufigkeit in einem Histogramm dargestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 52 zu sehen. Hier liegt die mittlere Winkeldifferenz bei  $1,89^\circ$ . Die weitere Streuung der Ergebnisse entspricht einer statistischen Normalverteilung, deren Glockenkurve entsprechend des Maximalwerts und der Standardabweichung

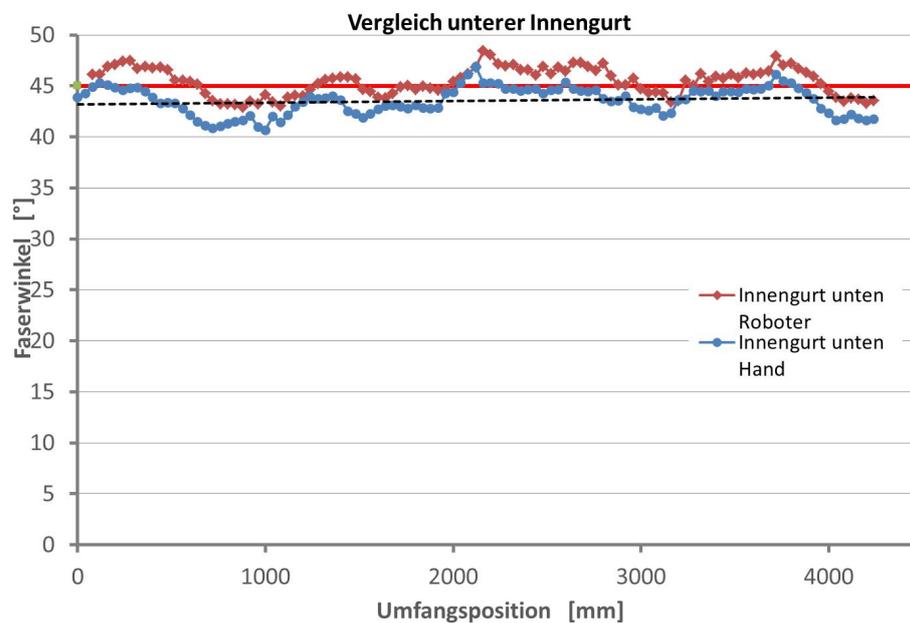


Abbildung 51: Vergleich der Faserwinkelverläufe vom unteren Innengurt (manuell und Roboter).

in das Diagramm eingetragen ist. Unter der Annahme, dass der akkumulierte Fehler des Roboters durch eine begrenzte Zahl von Referenzfahrten relativ zu den gemessenen Winkel gering ist und somit die Robotermessung als Referenz anzusehen wäre, kann eine Beurteilung der manuell geführten Messung durchgeführt werden. Danach lässt sich aus Abbildung 52 ableiten, dass die manuelle Führung und Ausrichtung des Sensors zu einer Standardabweichung von ca.  $0,5^\circ$  führt und normal verteilt ist. Im weiteren Verlauf der Arbeiten wurden alle miteinander vergleichbaren Messreihen ausgewertet, um eine Analyse über die statistische Streuung der manuellen Messung und eine Auflistung wichtiger Einflussfaktoren für zukünftige manuelle und Roboter geführten Messungen zu erhalten.

#### 4.2.3 Zusammenfassung

Die im Teilprojekt bearbeiteten Inhalte sollten den Prozess des Umformens von komplexen Türumgebungsstrukturen aus bi- und triaxialen Geweben robuster gestalten. Das Ziel sollte durch die Entwicklung eines einstufigen Prozesses anstelle des zweistufigen Prozesses erreicht werden, der zum Zeitpunkt der Antragsstellung die aktuelle Fertigungstechnologie darstellte. Die Vorteile eines einstufigen Umformprozesses lagen in der Beseitigung von möglichen Fehlerquellen beim Übertragen des Bauteils zwischen den Fertigungsschritten des zweistufigen Prozesses, was den Herstellungsprozess insgesamt stabiler machen würden. Der einstufige Prozess sollte mit Hilfe eines Werkzeugs abgebildet werden um auch hier die üblichen Fehlerquellen einer manuellen Fertigung zu minimieren. Für das Konzept wurden zunächst Vorversuche bezüglich einer eingebrachten Vorspannung in das

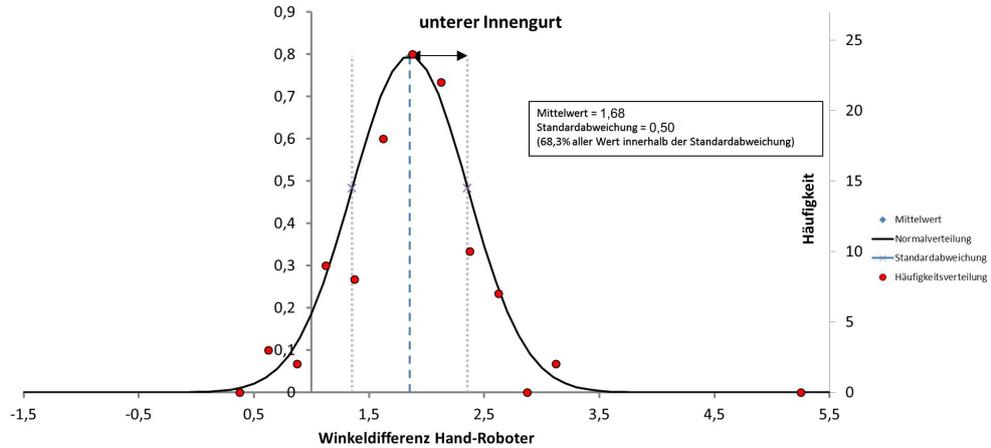


Abbildung 52: Statische Auswertung der Abweichungen von manueller und Roboter geführten Faserwinkelmessungen in Form einer Häufigkeitsverteilung um einen Mittelwert (Innen-Flansch unten).

Material vor der Drapierung durchgeführt indem man das Material an flanschseitig am Werkzeug fixiert hat. Nachdem ein positiver Effekt erreicht wurde, folgte ein Konzept für ein variables Drapierwerkzeug. Dessen kinematische Auslegung wurde anhand von Drapierversuchen am Werkzeug mit unterschiedlichen Materialien durchgeführt und damit die Konzeptphase abgeschlossen.

Für die Dokumentation der Faserwinkel im laufenden Fertigungsprozess wurde eine Sensorik anhand der realen Bedingung bzgl. des Zielbauteils und der Fertigung ausgesucht und beschafft. Die Faserwinkelkamera der Fa. Profactor wurde in Betrieb genommen und bezüglich der Messgenauigkeit mit der gängigen Methode der Auswertung anhand von aufgenommenen Fotografien verglichen. Für den Einsatz unter fertigungsnahen Bedingungen wurde ein System entwickelt, dass aus an das Bauteil angepassten und am Werkzeug befestigten Schablonen aus Plexiglas besteht. Die Schablonen geben der mit einem Adapter versehenen Kamera die festen und reproduzierbaren Messpositionen vor. Damit und mit der Hilfe einer eigens entwickelten Auswertesoftware ist es möglich bauteilbezogen sehr schnelle und sehr genaue Dokumentation einzelner Lagen des Preforms in laufenden Fertigungsprozess zu erstellen. Durch den relativ kostengünstigen und hochportablen Aufbau des Systems eignet sich das Konzept ideal für wiederkehrende Messungen zum Zwecke der Qualitätssicherung und Prozessüberwachung.

### 4.3 Teilprojekt 4 - Prozessbegleitende Qualitätssicherung

#### 4.3.1 Zielsetzung

Im Teilprojekt 4 sollte ein Teilprozess der Fertigung von großen Rumpfschalen eingehend untersucht werden um mit der Hilfe von QS-Methoden die Robustheit des Prozesses zu erhöhen. Als Zielprozess wurde zusammen mit dem Verbundführer Premium Aerotec die Integration der Stringer beschlossen. Dabei werden auf den Schalen bereits ausgehärtete

te, mehrere Meter lange, Stringer aufgeklebt. Dabei wird dem Werker die Sollposition durch eine Laserprojektion angezeigt. Nach dem Aufkleben und Aushärten in einem Autoklavprozess wird die Position der Stringer mit Hilfe eines Lasertrackers vermessen. Beide Positionen werden dann verglichen wobei oft eine positionsabhängige Diskrepanz der Werte festgestellt wird. Die Stringer erfahren daher während des Autoklavprozesses eine Bewegung, die auch als „Stringerschwimmen“ bezeichnet wird. Die Untersuchung dieses Phänomens, Entwicklung einer geeigneten Sensorik und Herausarbeitung einer Prozesssteuerung im realen Prozess anhand der Sensordaten waren das Ziel des Teilprojektes

#### 4.3.2 Übersicht der durchgeführten Arbeiten

##### Untersuchung des Prozesses - Phenomenologisch

Mit Hilfe von Fertigungsexperten des Verbundführers wurde eine Fehlerbaumanalyse des Prozesses durchgeführt. Dabei wurde der Prozess in Teilfaktoren unterteilt kritisch sein könnten und es wurde versucht deren Einfluss auf die Stringerbewegung abzuschätzen. Anhand des Fehlerbaums und der Datenauswertung wurden Effekte, die einen Einfluss auf das Stringerschwimmen während des Autoklavprozesses haben, festgemacht und bewertet. Dabei wurden für jeden Effekt die Faktoren, die einen Einfluss auf die Größe des Effektes haben, bestimmt. Anschließend erfolgte eine Bewertung *a priori* hinsichtlich des Einflusses des Effektes auf die Abweichung. Das Bewertungsergebnis „nicht sinnvoll“ wurde gewählt, wenn der geschätzte Einfluss des Effektes im Verhältnis zum abgeschätzten Aufwand für die Untersuchung gering ist, hier am Beispiel der Stringergeometrie. Eine Untersuchung des Einflusses des Stringerschwimmens bezüglich der Geometrie des Stringers wurde einen differenzierten Versuchsaufbau - hier im Speziellen das an die Stringerkrümmung angepasste Tooling - verlangen, welches die verfügbaren Mittel bei Weitem übersteigt. Obwohl der Effekt für den Prozess eine gewisse Rolle spielt, kann es im Rahmen des Teilprojektes nicht untersucht werden und somit wird der Fokus auf Effekte verlagert deren Untersuchung als weitaus erkenntnisreicher angesehen wird. Ein Auszug mit den wichtigsten Effekten beinhaltet die Tabelle 2.

##### Untersuchung des Prozesses - Datenauswertung

Vom Verbundführer Premium Aerotec wurden zur Auswertung Fertigungsdaten der ersten gefertigten Schalen der Sektion 13/14, *Lower Shell*, *Upper shell*, *Side Shell Left* und *Side Shell Right*, zu Analyse bereitgestellt. Diese 56 Datensätze mussten zunächst aufbereitet werden damit man die Zustände vor und nach dem Autoklavprozess für jede Schale vergleichen konnte. Als Auswerte- und Darstellungssoftware wurde *MatLab* verwendet, die hier die größte Flexibilität geboten hat.

Zunächst wurden die absoluten Abweichungen der Positionen vor/nach dem Prozess untersucht und dargestellt, siehe ein Beispiel in der Abbildung 53.

Tabelle 2: Auszug aus der Bewertung der Prozessparameter beim Stringersetzen. Dabei wird der Einfluss des Effekts auf die Abweichung der Stringerpositionen vor und nach dem Autoklav abgeschätzt. Die Spalte *Faktor* enthält die Einflussgröße auf den Effekt. Die letzte Spalte beinhaltet die Einschätzung über die Größe des Einflusses, gewonnen anhand der Messdaten oder als Erfahrungswerte.

Effekt	Faktor	Bewertung
Schwerkraft	Aushärtewinkel	wichtig
Spannung Stringer	verspannt/unverspannt	wichtig
Harzschrumpf	Lagenaufbau (richtung)	wichtig
Harzschrumpf	Lagenaufbau (Anzahl der Lagen)	mittel
Anheftung Klebefilm	Qualität der Klebefilmaufbringung	mittel
Anheftung Stringer	Prozessschritt des Anheftens	unwichtig
Prozessparameter	Zyklus ( $T, p$ )	unwichtig
Stringergeometrie	Krümmung	nicht sinnvoll

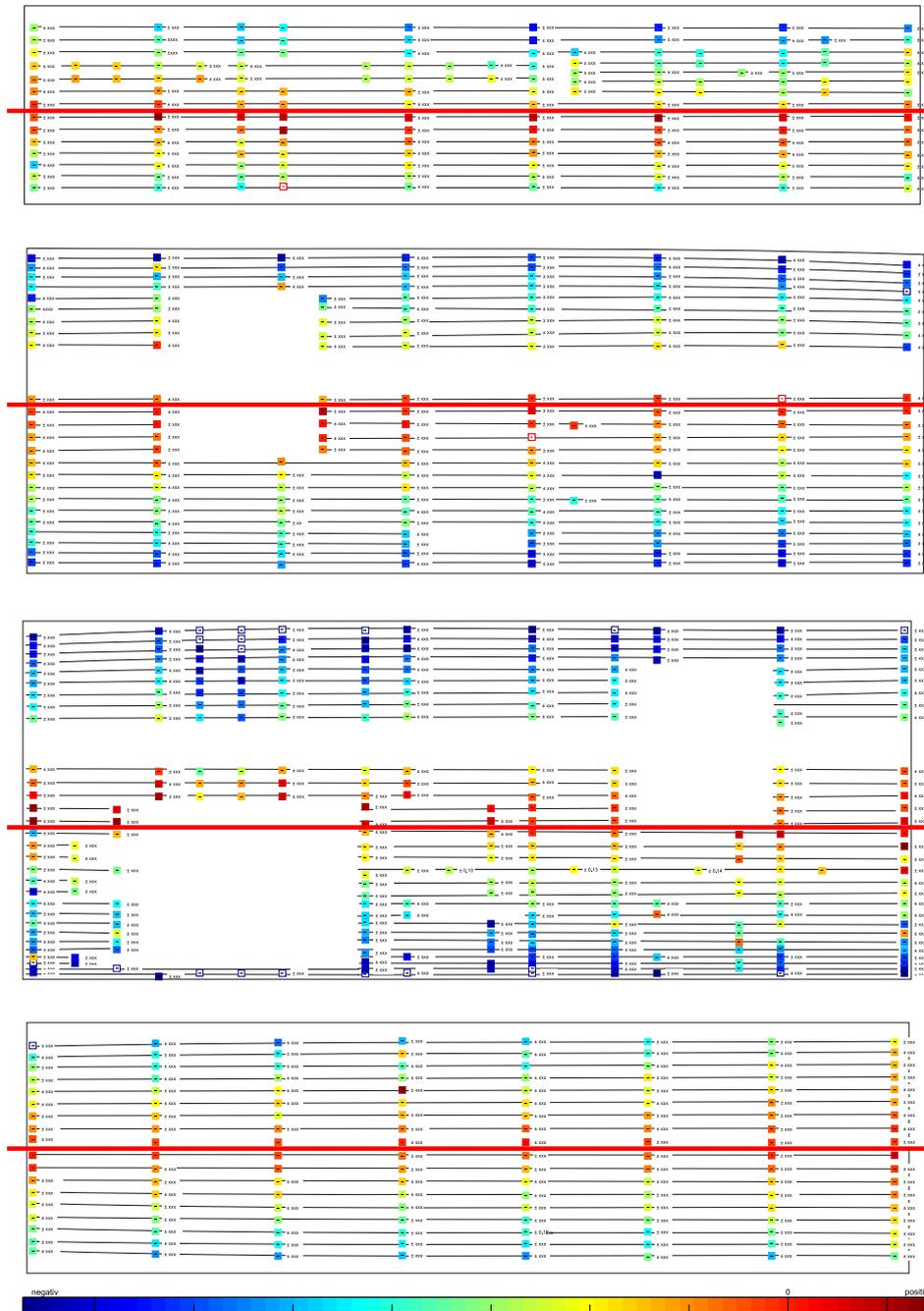


Abbildung 53: Darstellung der Abweichungen der Stringerpositionen nach dem Autoklavprozess. Die vier untersuchten Schalen sind (von oben nach unten): *Lower Shell*, *Side Shell Left*, *Side Shell Right* und *Upper Shell*. Der Verlauf der Stringer ist aus Geheimhaltungsgründen nur skizzenhaft angedeutet, der Betrag der Mittelwerte der Abweichungen am bestimmten Messpunkt farb-kodiert (s. Legende unten) und die dazugehörigen Standartabweichungen aus Geheimhaltungsgründen durch „xxx“ ersetzt. Die rote Linie symbolisiert den tiefsten Punkt der Schale beim Aushärten.

Dabei zeigte sich, dass die im vorherigen Bericht vorgeschlagene Darstellung zwar eine wichtige Funktion erfüllt, jedoch keine bezüglich der Fragestellung abschließende Darstellung sein kann. Auf den Schalenübersichten sieht man die lokale, positionsaufgelöste Darstellung der Abweichungen, kann jedoch aufgrund der großen Anzahl der Schalen und der Schwankung der Messwerte keine Aussage bezüglich der Tendenz der Stringerpositionabweichung in Abhängigkeit von Fertigungsparametern treffen. Auch eine Darstellung der Mittelwerte der Abweichungen je Messpunkt und den dazugehörigen Standardabweichungen, s. Abb. 53, schafft keinen Zugang zur quantitativen Analyse der Daten. Es lässt sich nur eine qualitative Aussage treffen: je weiter der Messpunkt vom tiefsten Punkt der Schale bei der Aushärtung im Autoklav liegt, desto größer erscheint die Abweichung und zwar abgesehen von wenigen Ausnahmen, stets in die Richtung der Schwerkraft. Da die Schalen eine gebogene Form aufweisen und die weiter von Tiefstpunkt (rote Linie) entfernten Messpunkte einen größeren Aushärtewinkel besitzen erscheint die Aussage bzgl. des Einflusses der Gravitationskraft gerechtfertigt. Unterstützt wird diese Aussage durch die Beobachtung, dass bei den kleineren Schalen (*Lower Shell und Upper Shell*) die Maximalwerte der Abweichung kleiner sind als die der größeren Schalen die auch über größere Aushärtewinkel verfügen. Eine, für die Erstellung der Versuchsmatrix, weitergehende Auswertung ist mit dieser Darstellung nicht möglich. Es wurde daher nach einer zugänglicheren Darstellungsform gesucht um die Abweichung in der Gesamtheit der Messwerte in der Abhängigkeit von den in Frage kommenden Faktoren darzustellen.

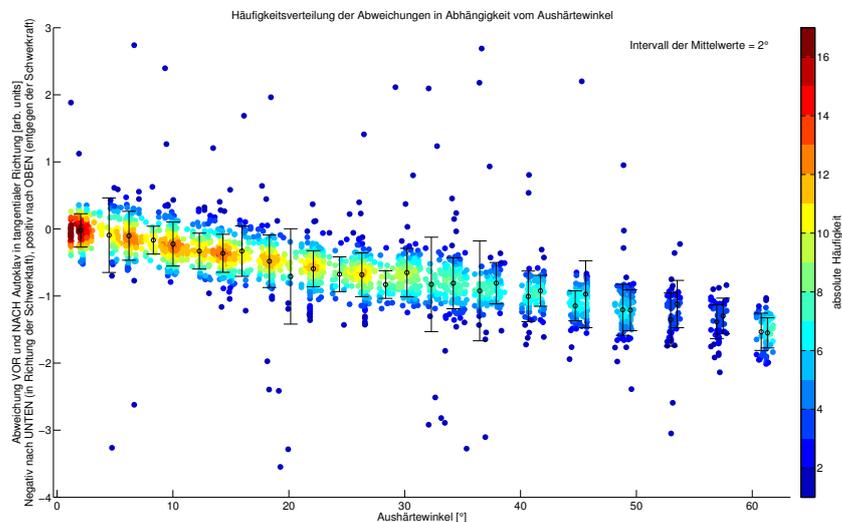


Abbildung 54: Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition vom Aushärtewinkel. Die Farbkodierung entspricht der Häufigkeit der Messwerte an der  $x - y$ -Position, der Balken zeigt die Standardabweichung der Messwerte für einen  $x$ -Wert bzw. ein  $x$ -Intervall.

Die Wahl fiel dabei auf die Darstellung mittels eines Streudiagramms mit dem zu untersuchenden Faktor als Abszisse und der tangentialen Abweichung der Stringerposition

als Ordinate. Zusätzlich wird die Häufigkeit der  $x - y$ -Wertepaare als Farbdiagramm dargestellt und die Standardabweichung der Werte für ein  $x$ -Wert (bzw. ein  $x$ -Intervall) eingezeichnet. Im Folgenden wird die tangentielle Positionsabweichung der Stringer in Abhängigkeit von ausgewählten Faktoren dargestellt.

- Aushärtewinkel

Das Diagramm (Abb. 54) zeigt sehr deutlich eine lineare Abhängigkeit des Betrages der Abweichung vom Aushärtewinkel. Diese Beobachtung bestätigt die Vermutung einer Abhängigkeit des Stringerschwimmens von der Gravitation.

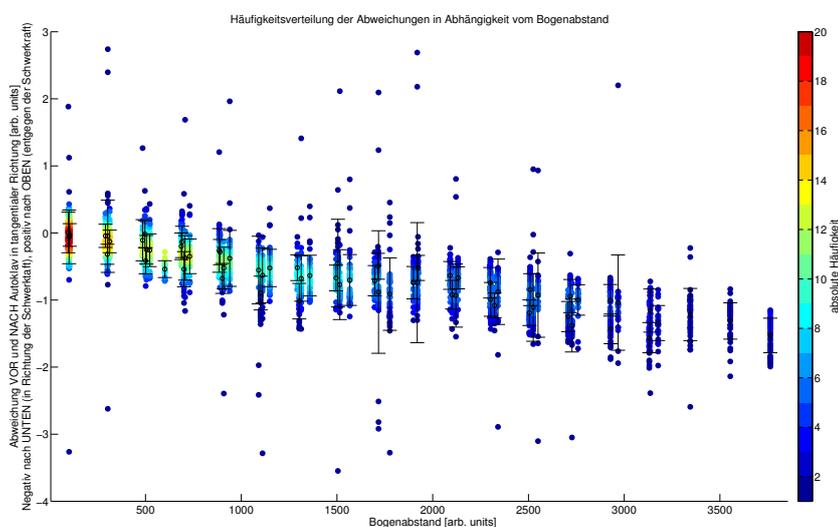


Abbildung 55: Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition vom Bogenabstand vom tiefsten Schalenpunkt. Die Farbkodierung entspricht der Häufigkeit der Messwerte an der  $x - y$ -Position, der Balken zeigt die Standardabweichung der Messwerte für einen  $x$ -Wert bzw. einen  $x$ -Intervall.

- Bogenabstand

Der hier zu untersuchende Faktor ist der Abstand des Stringers auf der Oberfläche der Schale vom tiefsten Punkt der Schale beim Aushärtprozess im Autoklav. Der hier zu Grunde liegende Gedanke ist, dass der auftretende Harzschrumpfung auf den Außenseiten des Bauteils stärker ist als in der Bauteilmitte. Auch hier (Abbildung 55), ähnlich zum Diagramm mit dem Aushärtewinkel, liegt eine (annähernd) lineare Abhängigkeit vor. Daher ist es zunächst nicht möglich zu sagen, ob die Schwerkraft oder der Harzschrumpfung der für das Stringerschwimmen stärker verantwortliche Faktor ist. Da die Variation des Schrumpfs experimentell mit größerem Aufwand verbunden ist, wird zunächst nur die reine Abhängigkeit vom Aushärtewinkel untersucht.

- Spantposition (C-Position)

Abbildung 56 zeigt die Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringer von der C-Position des Messwertes. Aus dem Diagramm ist keine Abhängigkeit auszumachen, die Verschiebung der Stringer ist gleichmäßig über die gesamte Länge der Schalen verteilt.

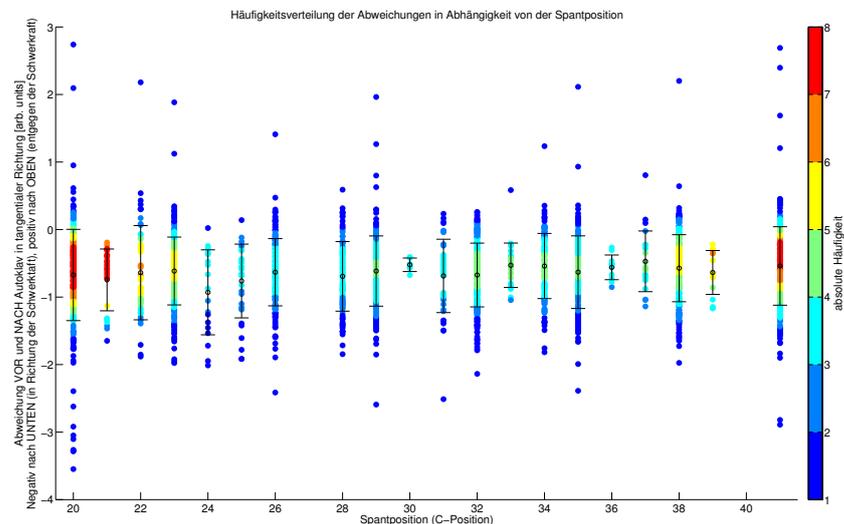


Abbildung 56: Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition von der C-Position des Messwertes. Die Farbkodierung entspricht der Häufigkeit der Messwerte an der  $x-y$ -Position, der Balken zeigt die Standardabweichung der Messwerte für einen  $x$ -Wert bzw. einen  $x$ -Intervall.

- Stringerposition (P-Position)

Abbildung 57 zeigt die Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringer von der P-Position des Messwertes. Da die P-Positionen auf dem Umfang der Schale liegen, zeigt sich ein oszillierendes Verhalten der Abweichung, mit den Minimalwerten um die Abweichung von 0 mm um den Tiefsten Punkt (markiert mit einer roten Linie) und den höchsten Abweichungen an den Rändern der Schalen. Man kann davon ausgehen, dass die P-Position nur über direkte Abhängigkeit von der aus dem Aushärtewinkel resultierenden Schwerkraft bzw. dem Entfernung des Punktes vom Tiefpunkt (Harzshrumpf) abhängt.

- Stringerlänge

Wie in Abbildung 58 zu sehen, erschließt sich kein einfacher Zusammenhang zwischen der tangentialen Abweichung der Stringerposition und der Stringerlänge. Während die kürzesten und längsten Stringer (1 bzw. 21 Spantsegmente) im Mittelwert eine fast identische Abweichung aufweisen, scheinen Stringer mit Zwischenlängen (4-6, 11 Spantsegmente) deutlich kleineren Positionsabweichungen zu unterliegen und das mit vergleichsweise geringen Standardabweichungen. Bei der genaueren Analyse stellt man jedoch fest, dass die Stringer mit dieser Länge meistens nah dem

tiefsten Punkt der Schale beim Aushärten liegen und der geringe Effekt den zuvor beschriebenen Faktoren (Aushärtewinkel und Harzschrumpf) geschuldet ist.

- Lagendicke (nur *Lower Shell*)

Die Auswertung wurde nur für *Lower Shell* durchgeführt, da die Lagendicke manuell aus den CAD-Daten für den Lagenaufbau für jeden Messpunkt zusammengetragen werden mussten. Durch den hohen Aufwand wurde von Premium Aerotec beschlossen, dass der erste Auswerterversuch sich auf nur eine Schale beschränken sollte. Die dazugehörige Abbildung 59 zeigt keine eindeutige Abhängigkeit.

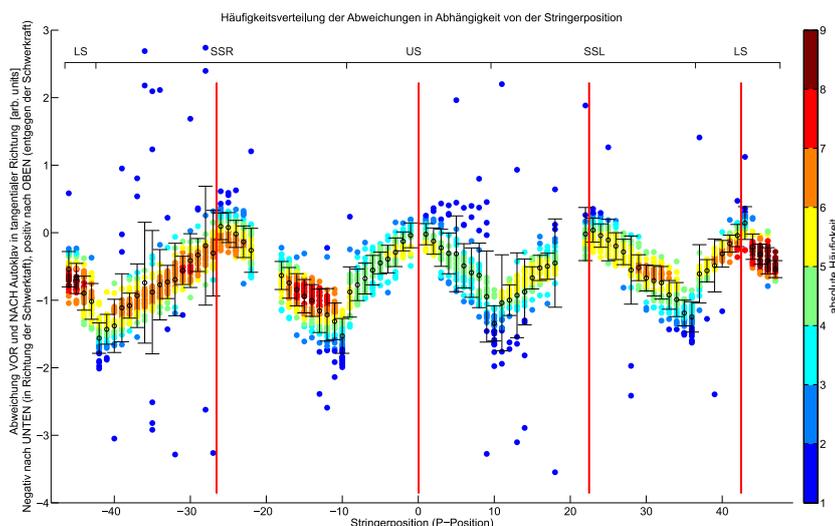


Abbildung 57: Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition von der P-Position des Messwertes. Die Farbkodierung entspricht der Häufigkeit der Messwerte an der  $x-y$ -Position, der Balken zeigt die Standardabweichung der Messwerte für einen  $x$ -Wert bzw. einen  $x$ -Intervall. Die rote Linie markiert den tiefsten Punkt der jeweiligen Schale beim Aushärteprozess.

- Faserorientierung (nur *Lower Shell*)

Ähnlich der Auswertung der Lagendicke, wurde hier die mittlere Faserorientierung an der Messposition manuell aus den Konstruktionszeichnungen abgelesen und zwar aufgrund des hohen Aufwands nur für die *Lower Shell*. Auch hier lässt sich kein eindeutiger Trend ausmachen, siehe Abb. 60.

Die vorgestellten Diagramme, die die untersuchte tangentiale Abweichung in Abhängigkeit von einem ausgewählten Parameter darstellen, zeigen nur in zwei Fällen (Abbildungen 54 und 55) eine erkennbare Abhängigkeit. Diese, Aushärtewinkel und Abstand zum tiefsten Punkt, sind nicht völlig unabhängig von einander, die Abweichung kann jedoch auf einem andern Mechanismus beruhen. Beim Aushärtewinkel steigt die Schwerkraft die am Stringer greift und diesen nach unten zieht. Bei der Bogenlänge steigt die Menge am Material (Harzmatrix) die beim Autoklavprozess schrumpfen kann und dadurch stieg

der absolute Schrumpf des Harzes der die Stringer mitzieht. Im Versuch sollte aufgrund der besseren Zugänglichkeit nur der Faktor Aushärtewinkel untersucht werden. Es sollten jedoch auch Marker auf dem Hautfeld angebracht werden, die den Harzschrumpf parallel zur Bewegung der Stringer anzeigen sollten.

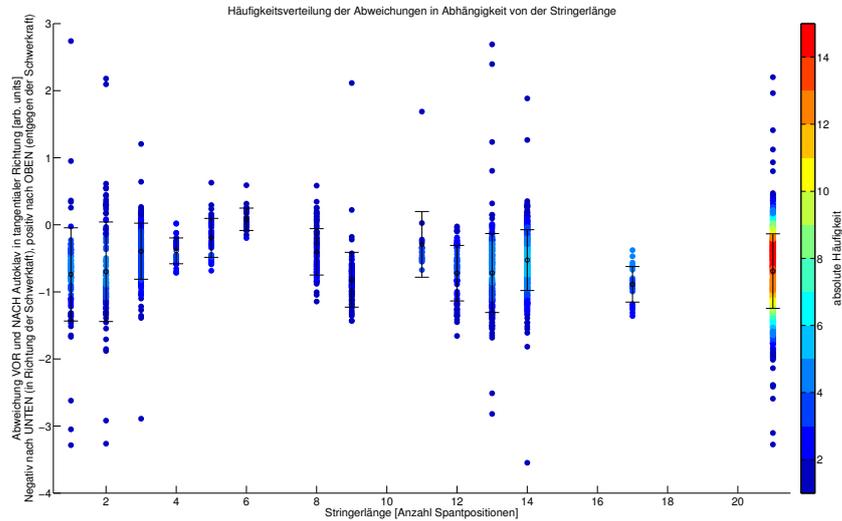


Abbildung 58: Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition von der Stringerlänge. Die Länge wird hier in der Anzahl der (äquidistanten) Spantsegmente die der Stringer verbindet angegeben. Die Farbkodierung entspricht der Häufigkeit der Messwerte an der  $x - y$ -Position, der Balken zeigt die Standardabweichung der Messwerte für einen  $x$ -Wert bzw. einen  $x$ -Intervall.

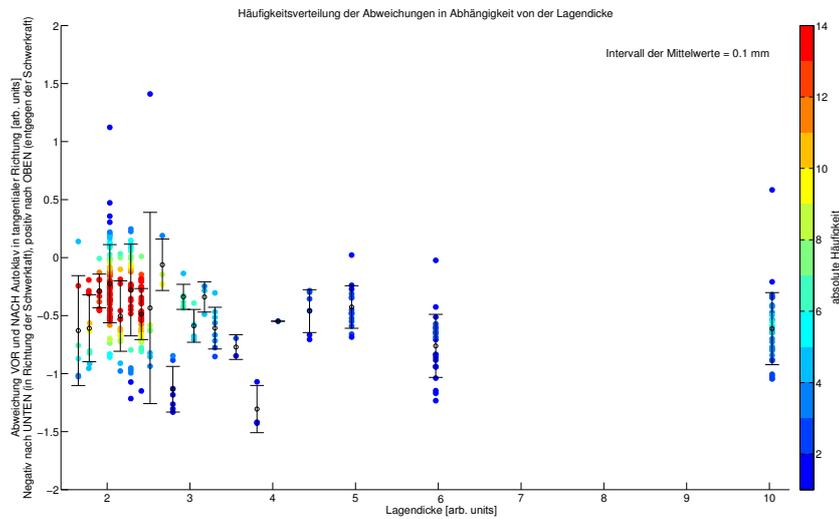


Abbildung 59: Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition von der Lagedicke am Messpunkt. Die Farbkodierung entspricht der Häufigkeit der Messwerte an der  $x - y$ -Position, der Balken zeigt die Standardabweichung der Messwerte für einen  $x$ -Wert bzw. einen  $x$ -Intervall.

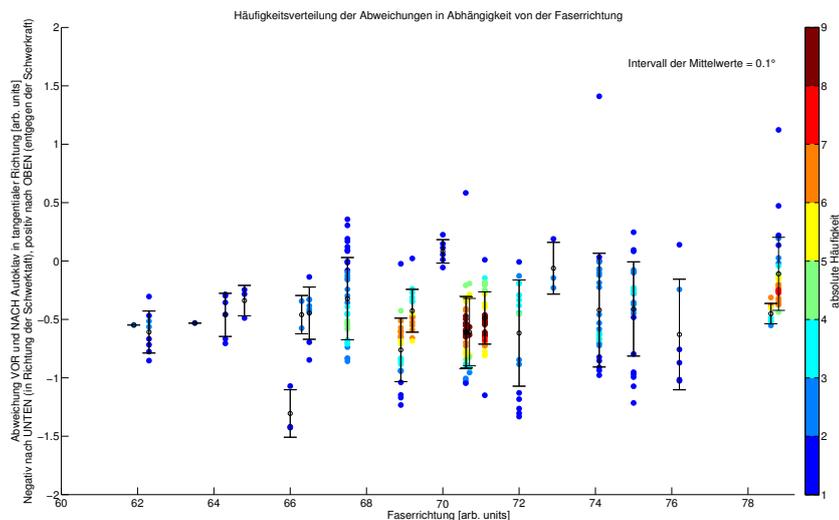


Abbildung 60: Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition von mittleren Faserorientierung am Messpunkt. Die Farbkodierung entspricht der Häufigkeit der Messwerte an der  $x - y$ -Position, der Balken zeigt die Standardabweichung der Messwerte für einen  $x$ -Wert bzw. einen  $x$ -Intervall.

### Versuchsplanung - Parameter

Der tatsächliche Einfluss der ausgearbeiteten kritischen Prozessparameter sollte in einer Versuchsreihe untersucht werden. Bei der Versuchsplanung wurde auf die statistische

Tabelle 3: Versuchsplanung Teilprojekt TP 4. Die drei Faktoren sollen in zwei Stufen variiert werden, die geplante Reihenfolge der Versuche ist ebenfalls zu entnehmen.

Versuchsnummer	Reihenfolge	Faktor 1 Aushärtewinkel [°]	Faktor 2 Lagenaufbau	Faktor 3 Spannung Stringer
Referenz	0	90	unidirektional	verspannt
8	1	90	unidirektional	verspannt
6	2	90	quasi-isotrop	verspannt
5	3	0	quasi-isotrop	verspannt
1	4	0	quasi-isotrop	unverspannt
3	5	0	unidirektional	unverspannt
2	6	90	quasi-isotrop	unverspannt
4	7	90	unidirektional	unverspannt
7	8	0	unidirektional	verspannt

Versuchsplanung *Design of Experiments, DoE*) zurückgegriffen. Diese Herangehensweise bietet eine wissenschaftliche Basis für statistisch abgesicherte Versuchsreihen, wie sie z. B. bei Prozessoptimierung verwendet werden. Aufgrund der begrenzten Mitteln wurde ein vollständiger faktorieller Versuchsplan mit drei Faktoren und je zwei Stufen ( $2^3$ ) entwickelt, mit dem eine Vollständige Analyse durchführbar ist und die auch eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren darstellbar macht. Die zwei Stufen sollen zwei Extremzustände des jeweiligen Faktors abbilden. Die für die Untersuchung, anhand der Ergebnisse der Daten- und Prozessanalyse, ausgewählten Faktoren waren die Schwerkraft, die Verspannung des Stringers beim Aufkleben und der Lagenaufbau des Hautfelds bezüglich der Faserrichtung. Die Reihenfolge der Versuche sollte variiert werden, um den Einfluss der zufälligen Fehler zu verkleinern. Die Versuchsplanung ist der Tabelle 3 zusammengefasst.

Vor dem Beginn der Versuchsreihe wird ein Referenzversuch durchgeführt, der dem Versuch Nr. 8 entspricht. Dies dient dem Test der Sensorik und als Referenz zum nachfolgenden Versuch mit gleichen Parametern. Der 10. Versuch wurde nicht festgelegt und sollte nach Bedarf (evtl. eine Wiederholung) durchgeführt werden.

### Versuchsplanung - Randbedingungen für den Versuchsaufbau

Da eine Versuchsreihe im Fertigungsautoklav des Verbundführers Premium Aerotec entgegen der Absicht im Projektantrag nicht möglich war, musste ein Autoklav für die Versuchszeit gesichert werden. Diese wurde für das Projekt von der Abteilung Verbundstrukturen des Institutes für Bauweisen und Strukturtechnologie in Stuttgart zur Verfügung gestellt. Die sich hervor ergebenden Vorteile waren die hohe Verfügbarkeit, niedrige Kosten sowie die Möglichkeit begrenzter Umbaumaßnahmen, was die Auswahl an geeigneter Sensorik erleichtert hat. Nachteilig war der geringe Innenraum, sodass eine Probeplatte von ma-

ximalen Abmaßen von 1 m auf 0,6 m möglich war. Eine Abschätzung der hier möglichen Bewegung aufgrund des *down scalings* der Probe im Vergleich zum realen Bauteil war leider nicht möglich. Der Innenraum hatte auch einen starken Einfluss auf die maximale Größe der einzusetzenden Sensorik und daher auch auf deren Auswahl, da aufgrund eines fehlenden Sichtfensters in das Innere ein System außerhalb des Autoklavs nicht möglich war.

### **Sensorik - Anforderungen und Marktrecherche**

Anhand der realen Daten und der Prozessparameter wurde eine Liste der Anforderungen, die an die Sensorik gelegt wurden, ausgearbeitet:

- Umgebungsparameter 8 bar und 200 °C
- berührungslos um keine Kräfte ins System einzubringen
- Detektion der Bewegung unter 1 mm
- geringe Abmaße der Sensorik
- Kühlung möglich
- Leitungen aus dem und in das Innere des Autoklavs möglich
- aufgrund der begrenzten Mitteln günstig

Eine Vielzahl von Systemen, die sich auch unterschiedlicher Wirkungsprinzipien bedient hatten, wurden recherchiert und verglichen, u. a. Wirbelstromsensoren, faseroptische Wegmessung, Laserentfernungsmesser, LVDT-Positionssensoren. Letztendlich wurde die Entscheidung zugunsten einer optischen Messung mit Hilfe einer Kamera und auf der Probeplatte und den Stringern angebrachten Markern getroffen.

### **Sensorik - Prüfkonzzept**

Das Konzept wird in der Abbildung 61 vorgestellt. Es besteht aus einem Tooling aus Stahl auf dem am Rand codierte Marker zum Aufspannen des Koordinatensystems aufgeklebt sind. In der Mitte wird das Hautfeld, bestehend aus mehreren Lagen, aufgelegt. Darauf werden mittig ein oder zwei Stringer parallel positioniert, auf denen die Marker für die Messpunkte angebracht werden. Über dem Toolingtisch befinden sich Kameras, die entweder am Autoklav oder Toolingtisch befestigt sind. Für die Auswertung wird die Software PhotoModeler verwendet. Diese kann anhand von mehreren Fotos aus unterschiedlichen Winkeln und aus unterschiedlichen Entfernungen die Position der codierten Markern in 3D bestimmt. Die Software liefert die Marker die beliebig bedruckt werden können sowie eine interne Kamerakalibrierung. Üblicherweise erreicht die Software eine Positionsgenauigkeit weit unterhalb 1 mm und erreicht damit die geforderte Genauigkeit.

Ein Aufbau mit zwei Kameras und zwei Kühlgehäusen wird jedoch als zu kostenintensiv erachtet. Ebenfalls scheint es unmöglich zu sein ausreichend Leitungen (Spannung, Daten, Kühlwasser) ins Innere des Autoklavs durchzuführen. Eine Konstruktion zur Bewegung

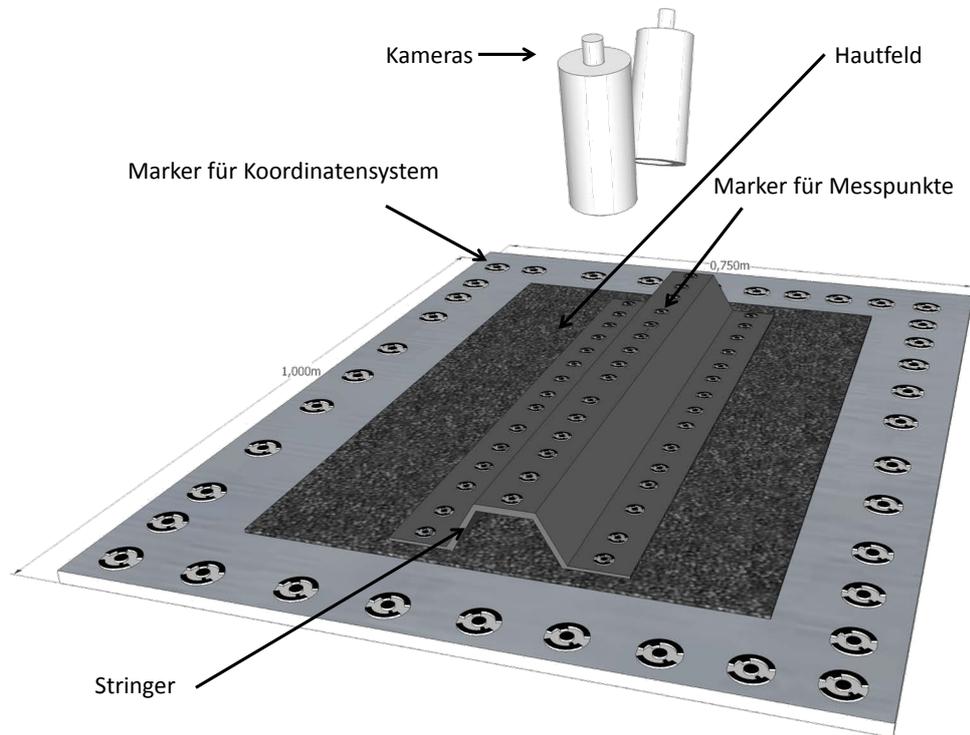


Abbildung 61: Konzept der fotometrischen Sensorik mit PhotoModeler. Das Tooling (Stahlplatte) mit Markern wird zur Festlegung des Koordinatensystem verwendet. Ein oder mehrere Stringer befinden sich auf dem Hautfeld, die Kameras darüber. Nicht im Bild enthalten ist der Vakuumaufbau und die Marker auf dem Hautfeld.

einer Kamera wurde aufgrund der erwarteten hohen Kosten verworfen. Eine Messung mit nur einer Kamera durchzuführen ist möglich, was allerdings zum Verlust der Information über eine der Dimensionen führt. Eine *single-photo*-Messung ist daher nur möglich, wenn alle Messpunkte in einer Ebene liegen, die mit Hilfe der Koordinatenmarkern aufgespannt wird. Eine Messung in nur einer Ebene, z. B. auf den Füßen oder dem Steg des Stringers wird als ausreichend erachtet um die Bewegung des Stringers auf dem Hautfeld zu verfolgen. Ein weiterer Vorteil der Messmethode ist die Möglichkeit anhand der Koordinatenmarker die Ausdehnung des Versuchsaufbaus aufgrund Veränderung der Versuchsumgebung (Temperatur/Druck) zu beobachten.

Der Versuchsaufbau anhand des Konzeptes sieht folgende fünf Systemkomponenten, die beschafft bzw. vorbereitet werden mussten, vor:

1. **Kamera:** Sie soll über möglichst große Pixelanzahl (Auflösung) verfügen, denn diese limitiert die Messgenauigkeit. Für ein Versuchsbauteil der Größe 1 m auf 0,75 m benötigt man für eine Auflösung von 1 mm eine Kamera mit 1000x750 Pixel, was einer 0,75 Megapixelkamera entspricht. Um das Rauschen zu verringern muss die

physikalische Pixelgröße möglichst groß sein, eine Ansteuerung über Ethernet ist wünschenswert. Die Optik, am besten mit einem frei wählbaren Objektiv, muss aller Voraussicht nach aus einem Weitwinkelobjektiv bestehen, da der Einbauraum der Kamera im Autoklav begrenzt ist und sie nah an das zu fotografierende Bauteil angebracht sein muss. Der Winkel darf nicht zu groß sein, da physikalisch bedingt ein kurzes Objektiv sehr starke, nichtlineare Verzeichnung (Fischaugen-Effekt) aufweist, die eine korrekte Messung unmöglich macht. Um die Verzeichnung zu kompensieren, kann eine Kamerakalibrierung durchgeführt werden, die je nach Größe des Objektivwinkels und der Qualität der Linse mehr oder weniger korrekt ist. Die Spannungsversorgung kann über eine externe Leitung bewerkstelligt werden.

Die Wahl fiel auf eine 10-Megapixel-Kamera der Firma Smartek (GC3851M) und ein hochauflösendes Weitwinkelobjektiv (GM10HR30518MCN) mit einer Brennweite von 5 mm. Die Kamera wurde mit Hilfe der Software PhotoModeler kalibriert und erreichte dabei eine Bildflächenabdeckung von 88% bei einem maximalen Fehler (*Maximum Residual*) von 0,64 Pixel. Die Kalibrierung wurde möglichst nah an den Versuchsbedingungen gehalten: Kamera im Kühlgehäuse, Kalibrierfläche hatte die ungefähre Größe des Toolings, Abstand zwischen Kamera und Kalibrierfläche angepasst an den verfügbaren Raum im Autoklav, ähnliche Beleuchtungsstärke wie im Autoklav. Die Medienversorgung besteht aus einem Ethernet-Kabel und einer Spannungsversorgung.

Mit dem kalibrierten System wurde eine Genauigkeitsabschätzung durchgeführt. Diese ergab eine sub-Millimeter Genauigkeit für eine Markerverschiebung im vorderen Drittel des Toolings in  $x$ - und  $y$ -Richtung. Im weiteren Feld des Toolings stieg der Fehler deutlich an und erreichte 3 mm in  $y$ -Richtung. Die Ursache hierfür liegt in dem geringen Winkel der Kamera zur Messebene und der sich daraus ergebenden starken perspektivischen Verzerrung. Deswegen wurde beschlossen die Marker nur im vorderen Drittel anzubringen und zu vermessen, was für eine Bewegungsdetektion der Stringer ausreichend sein sollte. Der Versuchsaufbau zur Genauigkeitsabschätzung ist in der Abbildung 62 zu sehen.

- 2. Kühlgehäuse:** Das Kühlgehäuse wird aktiv durch ein Medium (hier Wasser) von außerhalb des Autoklavs gekühlt. Das Gehäuse soll die Kamera aufnehmen, muss daher über ein Sichtfenster verfügen. Wünschenswert ist eine kompakte Baugröße, um die Kameraposition im Inneren des Autoklavs flexibel wählen zu können. Nach einer langen Recherche wurde die Firma SVA Industrie Fernseh GmbH mit der Lieferung beauftragt. Diese bietet Kühlgehäuse für Standardindustriekameras an im Einsatzbereich Hochofen. Das Kühlgehäuse sollte so modifiziert werden, dass es einem Außendruck von 8 bar standhält. Der Umbau musste in mehreren Schritten nachgebessert werden, was zu einer Projektverzögerung geführt hat. Die Skizze des Kühlgehäuses ist in der Abbildung 63 zu entnehmen.
- 3. Beleuchtung:** Da der Autoklav über kein Sichtfenster verfügt, muss eine Lichtquelle im Inneren des Autoklavs zur Verfügung gestellt werden. Denkbar sind Lichtquellen im Kühlgehäuse oder im Innenraum des Autoklavs.

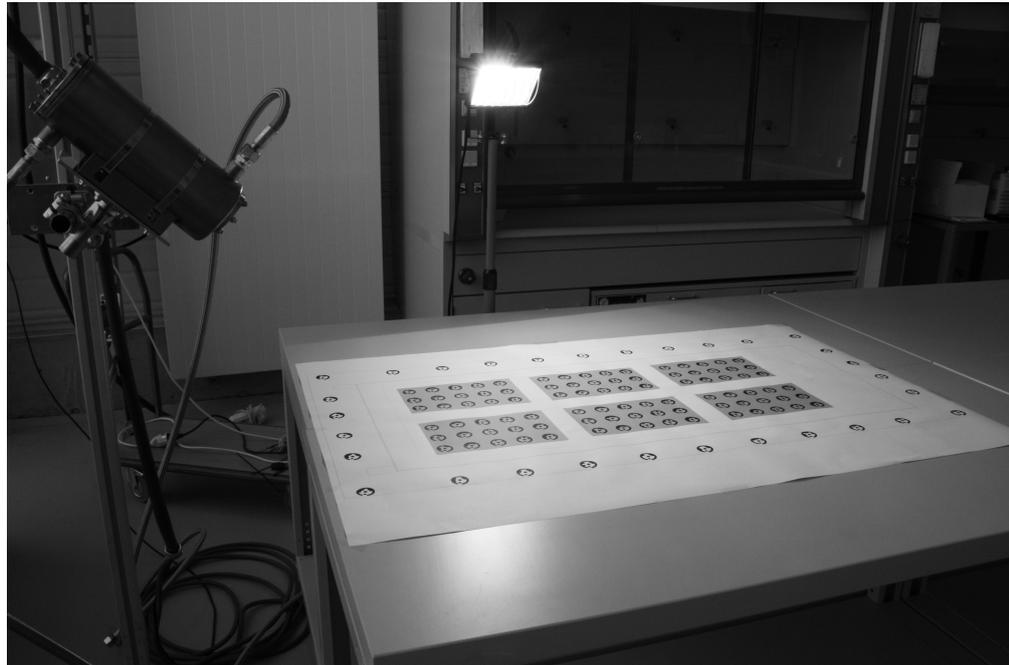


Abbildung 62: Aufbau des Versuches zur Bestimmung der Genauigkeit der Positionsbestimmung. Links im Bild ist das Kühlgehäuse mit Kamera angebracht, auf dem Tisch wurde ein Ausdruck des Toolings aufgeklebt. Der Versuchsaufbau bildet die Positionen des Toolings und der Kamera im Autoklav ab und wird von einem 500 W-Baustrahler beleuchtet.

Für die Versuche wurde eine Lampe mit 2x100 W-Leistung direkt oberhalb des Toolings befestigt. Diese wurde als Zubehör vom Autoklavhersteller bezogen.

4. **Durchführungen Autoklav:** Die Durchführungen bestanden aus zwei Ringwellenschläuchen, die den Autoklavdeckel mit dem Autoklavflansch verbunden haben. Durch diese wurden die Versorgungsleitungen der Kamera geführt. Identische Schläuche wurden auch für die Kühlwasserversorgung verwendet.
5. **Software:** Der gesamte Autoklavprozess wird aufgezeichnet. Da die Vorgänge im Autoklav sehr langsam sind, reicht es aus wenige Fotos, versehen mit einer Zeitmarke, aufzunehmen. Mit einem Foto pro Minute ergeben sich dennoch 600 Fotos für ein Autoklavzyklus. Diese Datenmenge kann unmöglich manuell ausgewertet werden, daher ist eine Programmierschnittstelle der Software notwendig. Die Wahl ist auf die proprietäre Software PhotoModeler gefallen, da eine Lizenz bereits verfügbar ist und es einen Erfahrungsschatz gibt auf den man zurückgreifen kann. Zudem verfügt die Software über eine *Visual Basic*-Schnittstelle.

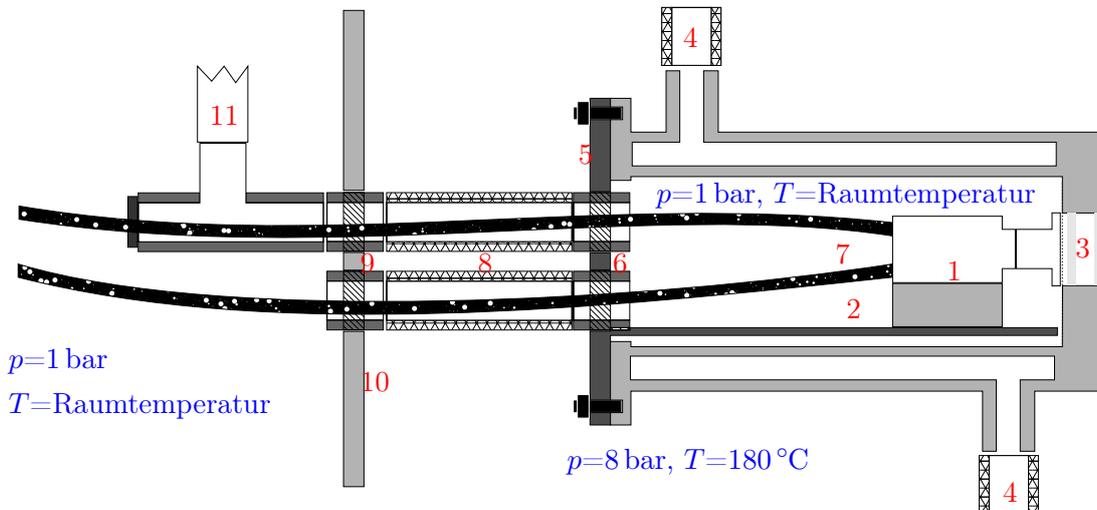


Abbildung 63: Aufbau des Kühlgehäuses. Die einzelnen Positionen sind: 1. Kamera, 2. Kühlgehäuse (Innenraum), 3. Sichtfenster, 4. Kühlwasser Zu- und Abfluss, 5. Deckel des Kühlgehäuses mit Zuleitungen, 7. Ethernet- und Spannungsversorgungsleitungen, 8. Druckschläuche mit Zuleitungen, 9. Durchführungen durch Autoklavwand, 10. Autoklavwand, 11. Zuleitung Druckluft

### Versuchsaufbau

Die Kamera wurde auf einem Gestell aus Edelstahlrohren am vorderen Ende des Autoklavs positioniert. Das Gestell erlaubt die Drehung der Kamera in drei Freiheitsgraden und ein Aufbau für beide Anstellwinkel des Toolings ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ). Das Tooling besteht aus einer Stahlplatte mit einer Gesamtfläche 1300 mm auf 600 mm. Eine Vakuumnut trennt einen Bereich von 1000 mm auf 400 mm im Inneren der Platte. Auf dem Außenrand befinden sich präzise positionierte Bohrungen mit Gewinde, die Markerplättchen aufnehmen sollen. Diese haben identische Höhe zu den Markern auf den Stringerfüßen und können damit eine Ebene aufspannen in der die zu messende Marker liegen. Die Skizze des Toolings mit dem Hautfeld und den zwei Stringern sind in der Abbildung 64 zu sehen. Das Tooling wird auf den Autoklavtisch direkt unter der Beleuchtung positioniert und mit Thermoelementen versehen. Das Gestell mit dem Kühlgehäuse montiert. Der Gesamtaufbau ist in der Abbildung 65 zu sehen.

### Versuchsdurchführung

Nach der erfolgreichen Montage und anschließenden Dichtigkeitstest des Kühlgehäuses, sowie der Installation der notwendigen Umbauten (Flansch, Gestell, Beleuchtung) wurde mit der Vorbereitung der Versuche begonnen. Aufgrund der Mehrarbeiten bei der Beschaffung des Kühlgehäuses und dem nahen Projektende, wurde zusammen mit dem Verbundführer beschlossen statt der geplanten Versuchsreihe einen Funktionstest der Sensorik durchzuführen. Dabei sollten der reale Prozess möglichst nah abgebildet wer-

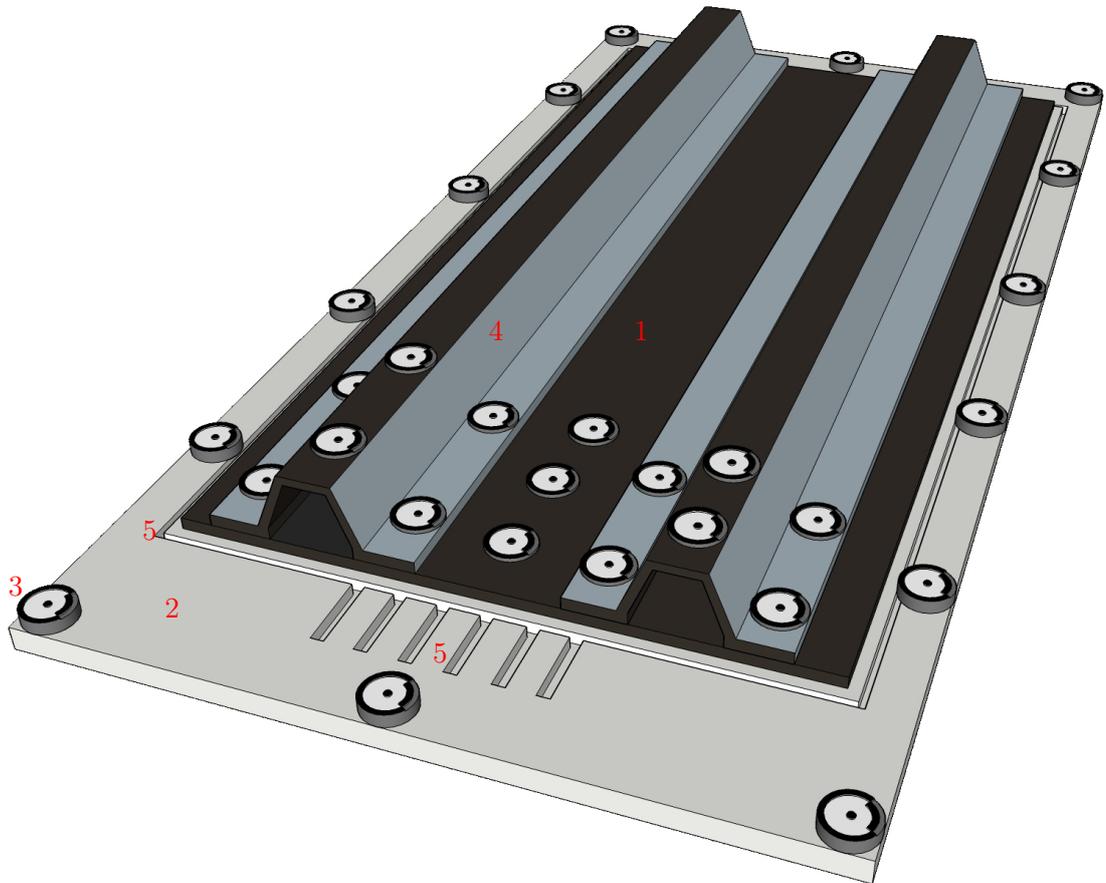


Abbildung 64: Aufbau der Probeplatte. Die markierten Positionen sind: 1. Hautfeld, 2. Tooling, 3. Markerplättchen, 4. Stringer, 5. Vakuumnut

den. Zunächst wurde die Probeplatte aufgebaut und die Stringer integriert. Anschließend wurde der Versuchsaufbau durchgeführt. Die einzelnen Schritte des Versuches sind in nachfolgenden chronologischen Aufzählung aufgelistet.

#### 1. Aufbau Hautfeld

##### a) Zuschneiden und Ablegen der 24 Einzellagen

- Material: M21E/34%/UD134/IMA-12K-6,4 der Firma Hexply
- Fläche: 1,0 m x 0,5 m
- 24 Lagen, unidirektional
- nach jeder dritten Lage unter Vakuumsack kompaktiert

#### 2. Aufbringen des Hautfelds auf das Tooling

- Fläche für das Hautfeld eingetrennt
- Fläche außerhalb der Vakuumnut mit Aceton gereinigt

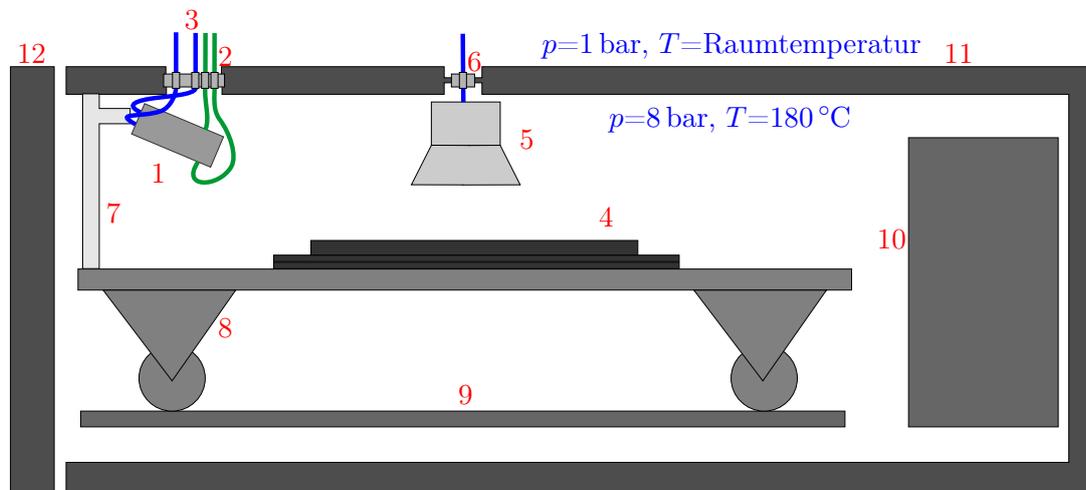


Abbildung 65: Versuchsaufbau im Autoklav. Die im Bild markierten Positionen sind: 1. Kühlgehäuse mit Kamera, 2. Durchführungen durch Autoklavflansch, 3. Versorgungsleitungen (blau: Ethernet, Spannungsversorgung; grün: Kühlwasser), 4. Tooling mit Hautfeld und Stringer, 5. Beleuchtung, 6. Durchführungen für die Spannungsversorgung der Lampen, 7. Gestell für das Kühlgehäuse, 8. Autoklavwagen, 9. Schienen für den Autoklavwagen, 10. Gebläse, 11. Autoklavwand, 12. Autoklavtür.

- Markerplättchen aufgeschraubt und mit Markern beklebt
- Breather und Trennfolie über der Vakuumnut gelegt

### 3. Integration Stringer

- Stringerfüsse mit Schleifpapier gereinigt
- Stringefüssen vollflächig mit Klebefilm versehen
- Klebefilm mit Bügeleisen aktiviert
- Passender Druckschlauch eingelegt und auf entsprechende Länge zugeschnitten
- Schutzfolie des Klebefilms abgezogen und Stringer ohne Verspannung auf das Hautfeld gepresst; dabei sollte der Druckschlauch nicht unter die Stringerfüsse kommen
- Enden der Druckschläuche mit Tackytape und Klebeband abgedichtet
- An einem Ende der Stringer wurde ein Plug mit einem Klebedonut eingesetzt
- An den Stirnseiten der Stringer wurde eine Schutzlage des Klebebands aufgeklebt
- Marker auf den Stringern und dem Hautfeld im vorderen Drittel aufgeklebt

#### 4. Vakuumaufbau

- Auf die Stringerfüsse und Hautfeld wurde Trennfolie und Breather gelegt
- im Breather wurden Aussparungen für die Marker geschnitten
- Tackytape wurde außerhalb der Vakuumnut gelegt
- Vakuumfolie wurde gelegt, Falten sollten möglichst außerhalb des Messbereiches gelegt werden
- Öffnungen für die Durchführungen der Plugs wurden gelegt und mit einem Donut abgedichtet
- Vakuumanschluss mit Schnellkupplung wurde über der Vakuumnut angebracht
- Dichtigkeitstest wurde durchgeführt

#### 5. Aufbau der Sensorik

- Kamera wurde scharfgestellt und in das Kühlgehäuse eingebaut
- Versorgungsleitungen wurden durchgeführt und durch das Kühlgehäuse und Autoklavwand geführt

#### 6. Aufbau Versuch

- Tooling auf dem Vakuumtisch platziert
- Thermoelement an das Tooling angebracht
- Gestell für 0° wurde aufgebaut
- Kühlwasserleitungen wurden auf Dichtigkeit geprüft
- Kühlgehäuse wurde am Gestell montiert
- Kamera wurde ausgerichtet um möglichst viele Marker im Bild zu haben
- Vakuumleitungen wurden an die Schnellkupplung angebracht und am Gestell fixiert

Der abgeschlossene Versuchsaufbau ist in der Abbildung 66 zu sehen, das Kamerabild in Abbildung 67. Das Hautfeld mit Vakuumaufbau wird vor dem Einbringen in den Autoklaven mit einer (PhotoModeler-)kalibrierten Spiegelreflexkamera Nikon D7000 mit einem 18 mm-Objektiv aus möglichst unterschiedlichen Winkeln und Entfernungen fotografiert um den VORHER-Zustand der Marker (vor dem Prozess) zu vermessen. Nachdem der Aufbau im Autoklav platziert wurde, fanden Vakuumtests statt. Diese verliefen zufriedenstellend, denn ein Druck von  $-0,8$  bar wurde über einen Zeitraum von mehreren Minuten gehalten werden können. Anschließend wurde der Autoklav verschlossen und mit einem Innendruck in Schritten von ca.  $0,5$  bar/min von  $7$  bar beaufschlagt. Nachdem der gewünschte Druck erreicht wurde, wurde mit der manuellen Aufheizphase begonnen mit einer Heizrate von ca.  $2$  °C/min. Dabei wurde die Kamera gestartet und eine automatische Bildaufnahme von  $60$  s eingestellt.

Der Sollprozess und der mit einem Sensor im Inneren des Kühlgehäuses, der Druck und Temperatur aufgezeichnet hatte, ist in der Abbildung 68 dargestellt.

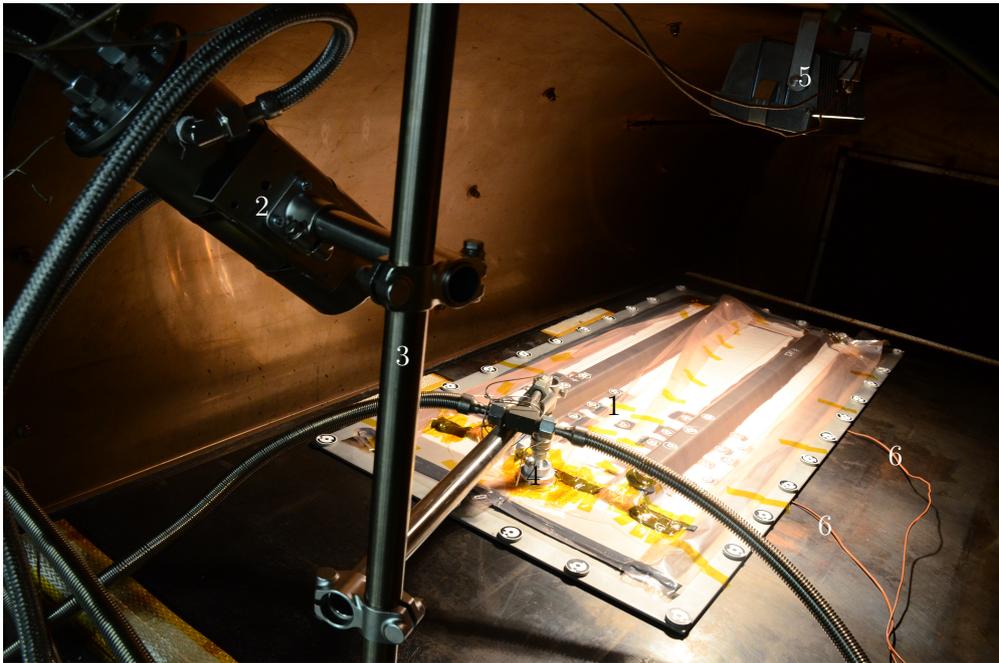


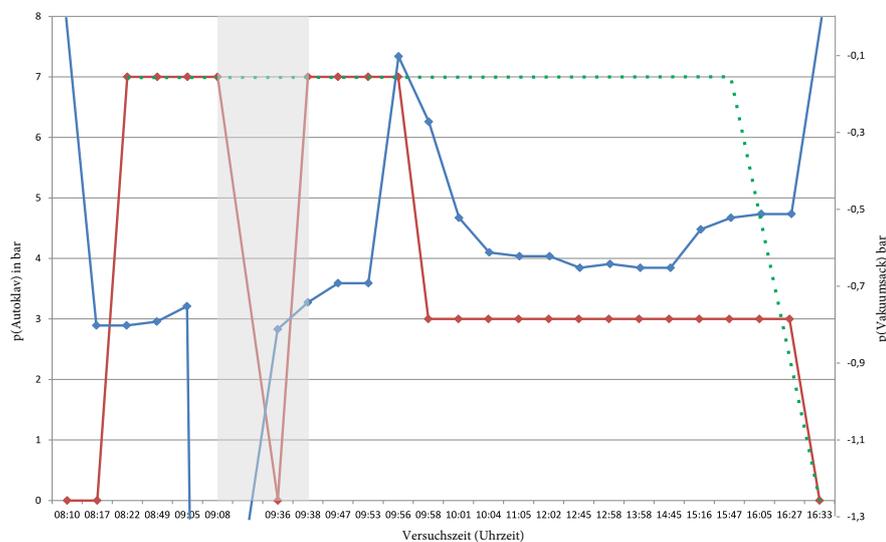
Abbildung 66: Versuchsaufbau im Autoklav. Die einzelnen Komponenten sind: 1. Tooling mit Probeplatte, 2. Stringern und Vakuumaufbau Kühlgehäuse mit Kamera, 3. Gerüst, 4. Vakuumananschluss mit Schnellkupplung, 5. Beleuchtung, 6. Thermoelemente.

In der vierzigsten Minute des Versuches wurde der Vakuumaufbau undicht. Der Prozess musste unterbrochen und der Vakuumsack auf undichte Stellen untersucht werden. Diese wurde direkt am Vakuumstutzen entdeckt, schnell abgedichtet und das Vakuum erneut aufgebaut. Der Zeitraum der Unterbrechung ist in der Abbildung 68 mit einem grauen Balken gekennzeichnet. Ungefähr eine Stunde nach der Wiederaufnahme der Versuches stieg der Druck im Vakuumaufbau auf ca.  $-0,1$  bar, sodass das Prozessvakuum nicht gehalten werden konnte. Als Ursache dafür, wurde das in die Vakuumleitung kriechende Tackytape vermutete, was nach dem Versuch bestätigt werden konnte. Als Gegenmaßnahme, um den Versuch nicht unterbrechen zu müssen, wurde der Autoklavdruck auf 3 bar gesenkt. Dadurch verringerte sich der Unterdruck auf  $-0,6$  bar und blieb bis zum Ende des Versuches stabil.

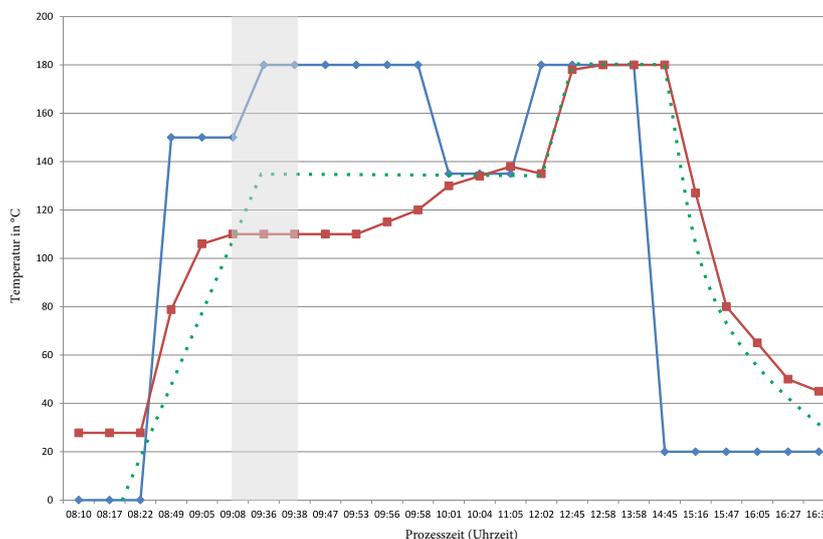
Nachdem das Ende des Prozesses erreicht wurde, wurden anschließend von der Probeplatte mit Vakuumaufbau nochmal Bilder mit der Spiegelreflexkamera aufgenommen um den NACHHER-Zustand zu dokumentieren.



Abbildung 67: Sicht der Kamera auf den Versuchsaufbau kurz vor dem Versuchsbeginn.



- (a) Prozessparameter Druck im Verlauf des Versuches. Rot (linke y-Achse) zeigt den Druck im Autoklav, blau (rechte y-Achse) den Unterdruck unter Vakuumsack. Die grüne gestrichelte Linie ist der angestrebte Autoklavdruck angelehnt an die Prozesse beim Verbundführer. Der ausgegraute Bereich zeigt den Versuchsabschnitt indem der Vakuumsack undicht geworden war (siehe Text). Vorsicht: y-Achse nicht linear.



- (b) Prozessparameter Temperatur im Verlauf des Versuches. Blau ist die an die Regelung vorgegebene Soll-Temperatur, rot die unter dem Tooling gemessene Temperatur (Mittelwert beider Thermoelemente). Die grüne gestrichelte Linie ist der angestrebte Temperaturverlauf angelehnt an die Prozesse beim Verbundführer. Der ausgegraute Bereich zeigt den Versuchsabschnitt indem der Vakuumsack undicht geworden war (siehe Text). Vorsicht: y-Achse nicht linear.

Abbildung 68: Prozessparameter des Versuches

## Versuchsdurchführung

Die Auswertung des Versuches fand in zwei Schritten statt:

### 1. VORHER-NACHHER

Je ein exemplarisches Bild der mit der Spiegelreflexkamera aufgenommenen Bilder von der Probeplatte und dem Vakuumaufbau vor- und nach dem Vakuumprozess sind in der Abbildung 69 dargestellt. Der jeweilige Bildersatz wird in die Software PhotoModeler eingelesen und die Position der einzelnen Marker automatisch bestimmt. Der Unterschied der Positionen der jeweiligen Marker sollte die Bewegung der Marker, und somit auch der Stringer, im Verlauf des gesamten Prozesses darstellen. Für die Bestimmung der Absolutposition der Marker, wurden die Positionen der Referenzmarker aus dem Konstruktionsblatt des Tooling übernommen, wobei aus der Erfahrung der Vorversuche die Referenzmarker 14, 17 und 19 (eingezeichnet rot in Abbildung 69), die unmittelbar in der Nähe der auf den Stringern angebrachten Markern eine Fläche umschließen verwendet wurden. Für die Positionen der Marker nach dem Prozess wurde identisch verfahren.

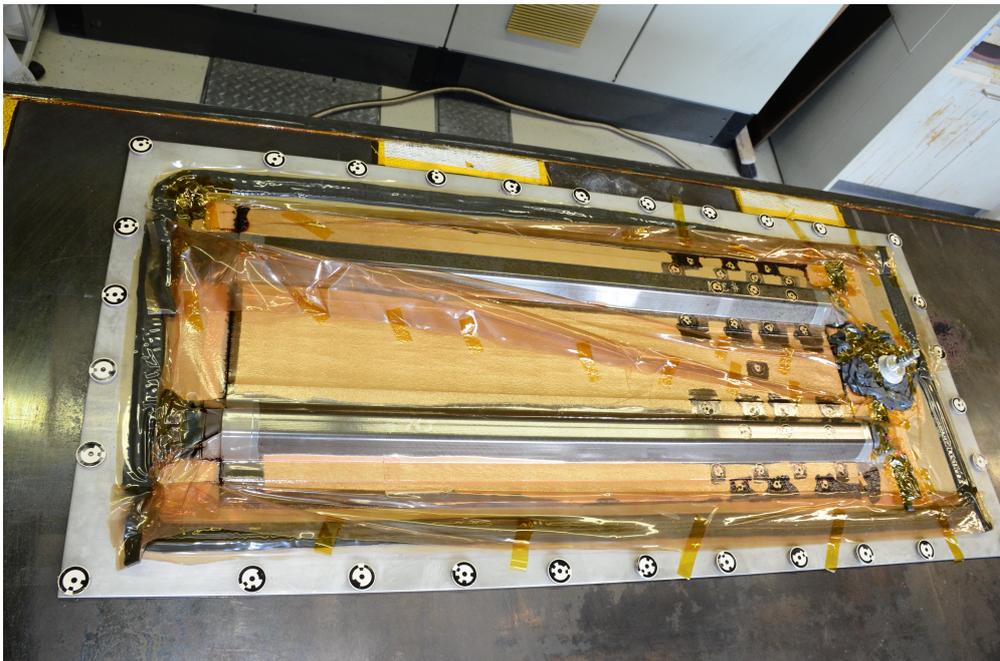
Leider ergaben sich für die Bestimmung der Positionen vor dem Prozess sehr große Abweichungen der gemessenen zu den Sollpositionen, die um ein Vielfaches größer war als erwartet. Trotz der mehrmaligen Überprüfung der Daten konnte keine Ursache für die große Abweichung bestimmt werden. Bei der Bestimmung der Positionen der Marker nach dem Prozess ergaben sich Messwerte in der erwarteten Genauigkeit. Daher wird vermutet, dass bei der Aufnahme der Fotos für den vorher-Zustand ein Fehler passiert sein muss. Trotz der sich aus der ersten Messung ergebenden sehr hohen Unsicherheit für die tatsächliche Bewegung der Stringer kann man aufgrund der Tatsache, dass die Detektion der Marker erfolgreich verlaufen ist und das Messprinzip für die Messung der Gesamtbewegung der Stringer mit Hilfe des Photomodeler verwendet werden kann. Leider fehlten bei der Auswertung für das Online-Tracking der Marker während des Prozesses die Vergleichswerte der Gesamtbewegung.

### 2. Tracking der Marker während des Prozesses

Während des Prozesses wurde (nach dem Abbruch und erneutem Start des Versuches) alle 30 Sekunden ein Bild aufgenommen, im jpg-Format gespeichert und der Name enthielt den Zeitstempel. Somit wurde bis zum Ende des Versuches ein Set aus 824 Bildern erzeugt die in regelmäßigen Abständen und aus der gleichen Position aufgenommen wurden. Ein Beispiel einer solchen Aufnahme ist in Abbildung 70 zu sehen. Mit einem eigens geschriebenen Tool wurden die Bilder einzeln in das Programm PhotoModeler eingelesen und mit einem automatischen Suchalgorithmus nach den RAD-Markern abgesucht. Die gefundenen Marker samt der Position in Pixeln (x und y) auf dem Bild wurden in eine csv-Datei mit dem Zeitstempel gespeichert. Als Ergebnis entstand eine Zusammenstellung der gefundenen Markern die nach der ID-Nummer der Marker und/oder dem Zeitpunkt sortiert werden kann. Wichtig ist an der Stelle zu verdeutlichen, dass die gefundene Position der Marker keine absolute Raumposition in 3D ist sondern nur die Position auf dem Bild. Da jedoch die Kameraposition fixiert ist, kann man anhand der Daten das Wandern des



(a) Probeplatte mit Vakuumaufbau vor dem Prozess. Markiert wurden die zur Aufspannung des Koordinatensystems verwendete Marker.



(b) Probeplatte mit Vakuumaufbau nach dem Prozess

Abbildung 69: Vorher-Nachher-Vergleich des Probekörpers

Markers auf dem Bild verfolgen um zunächst eine Bewegung zu detektieren und die Bilder auszusuchen ab der die Bewegung stattgefunden hat. Nimmt man noch den Zeitstempel als dritte Dimension, so lässt sich die Bewegung auch zeitlich einordnen. In der Abbildung 71 ist exemplarisch die Bewegung des Markers 2 (ID2) dargestellt.

In der Abbildung 72 wurde die Bewegung der automatisch detektierten Markern zusammengestellt. Die Marker 2 und 104 wurden viel häufiger erkannt als die übrigen Marker was sich in einer größeren Anzahl der geplotteten Punkte niederschlägt. Aus der Zusammenstellung kann man schlussfolgern, ob die detektierte Bewegung ihre Ursache in einem systematischen Fehler liegt, z. B. der Bewegung der Kamera aufgrund der thermischen Ausdehnung des Gestells oder einem Nachlassen der Fixierungen in den Gelenken des Gestells. Die Bewegung der Marker auf dem Stringerfuß (104, 109 und 115) zeigt sich sehr ähnlich, was aufgrund der direkten Nachbarschaft der Marker sinnvoll erscheint. Die Marker auf dem Tooling zeigen ebenfalls eine Bewegung deren Verlauf jedoch nicht ähnlich, eher gespiegelt, verläuft. Darin liegt ein Hinweis, dass die Bewegung der Marker nicht aus einem systembedingten Fehler, wie z. B. der Bewegung des gesamten Gehäuses hervorgeht, da in dem Fall alle Marker sich scheinbar in die gleiche Richtung bewegen müssten. Die Bewegung für den Marker 34 kann in der thermischen Ausdehnung des Toolings liegen und wäre mit dem Verlauf für Marker 2 konsistent (+x, +y). Der Marker 2 vorführt eine andere Bewegung (+x, -y) und die Bewegung in x-Richtung läuft der theoretischen thermischen Bewegung entgegen. Da die Position des Markers sehr nah an der Mittellinie der x-Achse liegt und die Bewegung relativ zu anderen Bewegungen gering (unter 2 mm) ausfällt, kann eine scheinbare Bewegung aufgrund der Messungenauigkeit nicht ausgeschlossen werden. Für das Tooling wurde anhand der Maße und des Wärmeausdehnungskoeffizienten für den Werkstoff (1.4301, X5CrNi18-10) von  $16,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  eine Gesamtausdehnung für die Breite (x-Achse) von ca. 1,5 mm und die Länge von 3,3 mm berechnet.

Die Bestimmung der Absolutposition der Marker wurde für die Validierung exemplarisch für sechs Marker (115, 100, 108, 134, 107 und 73) auf den Füßen des linken Stringers durchgeführt und zwar zwischen den Zeitstempeln 08:36:05 (Versuchsbeginn), 11:39:00 und 15:34:10 (Versuchsende). Vor allem zwischen den beiden letzten Bildern wurde der größte Effekt erwartet, da in dem Bereich die größte Bewegung des Stringers (hier anhand der Bewegung des Markers 104 auf dem Bild (Pixelkoordinaten)) stattgefunden hat und auch der Temperaturanstieg von 110 °C auf 180 °C vollzogen wurde. Die Abbildung 73 zeigt die Absolutbewegung der Marker. Die Bewegung wurde mit Hilfe der Software PhotoModeler mit der Single-Photo-Methode bestimmt. Bei dem Aufspannen des Koordinatensystem wurde die theoretische Ausdehnung des Toolings in die Rechnung aufgenommen. In der Abbildung sind die sechs Marker und die Bewegung zwischen den Zeitmarken 08:36:05 (43 °C) und 11:39:00 (110 °C) mit roten Pfeilen, zwischen 11:39:00 (110 °C) und 15:34:10 (180 °C) mit blauen Pfeilen eingezeichnet. Die Darstellung ist Maßstabgetreu, die



(a) Das Bild direkt aus der Kamera.



(b) Das Bild mit den automatisch erkannten Markern.

Abbildung 70: Beispiel eines Messbildes (08:37:36) aus dem Inneren des Autoklavs.

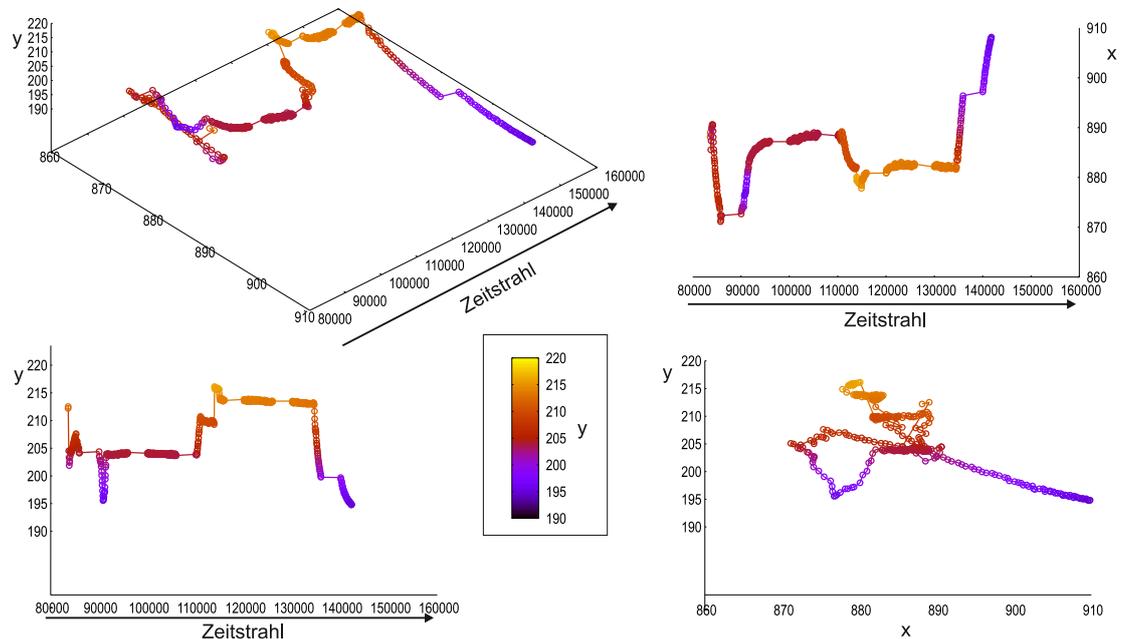


Abbildung 71: Darstellung der Bewegung an einem exemplarischen Marker (ID2) mit der x- un y-Position auf den Bildern des Sets, dabei wurde die y-Position zur besseren Übersicht als farbige Skala dargestellt. Als dritte „Dimension“ wird der Zeitstrahl in Form der Zeitstempel der Bilder verwendet um so einen Zeitstrahl zu konstruieren.

Bewegungsvektoren wurden hundertfach vergrößert. Die jeweiligen Verschiebungen in Millimeter sind in der Tabelle 4 eingetragen. Wie man sehen kann, ist die Verschiebung der Marker für den starken Temperaturanstieg auf 180 °C deutlich höher als bei den niedrigeren Temperaturen. Das deutet auf die Effekte, die aus dem Material (Harz) kommen, den in beiden Aufheizstufen ist der relative Temperaturzuwachs fast identisch (67 K bzw. 70 K). Wäre der Effekt auf die thermische Ausdehnung des Toolings oder des Gestells zurückzuführen, müsste der die Verschiebung bei beiden Aufheizphasen in der gleichen Größenordnung liegen.

Die in der Vorbereitungsphase durchgeführte Abschätzung der Genauigkeit der Methode lieferte eine Genauigkeit von unter einem Millimeter für Marker auf dem vorderen Drittel des Toolings: für X-Richtung jeweils  $(-0,4 \pm 0,3)$  mm bzw.  $(-0,1 \pm 0,2)$  mm und Y-Richtung jeweils  $(0,8 \pm 0,5)$  mm und  $(0,5 \pm 0,6)$  mm. Daher lag die bestimmte Verschiebung innerhalb der Größenordnung der abgeschätzten Genauigkeiten. Leider konnte kein sinnvoller Vergleich der Absolutbewegung aus der Vorher-/Nachher-Messung mit der Spiegelreflexkamera vollzogen werden, da bei der Vorher-Messung die Messung mit sehr hohen Ungenauigkeit behaftet war und keine verlässliche Werte für die Markerverschiebung zuließ. Auch die Tatsache, dass während dem Abkühlprozess bis zur Raumtemperatur keine Fotos im Inneren des Autoklavs ge-

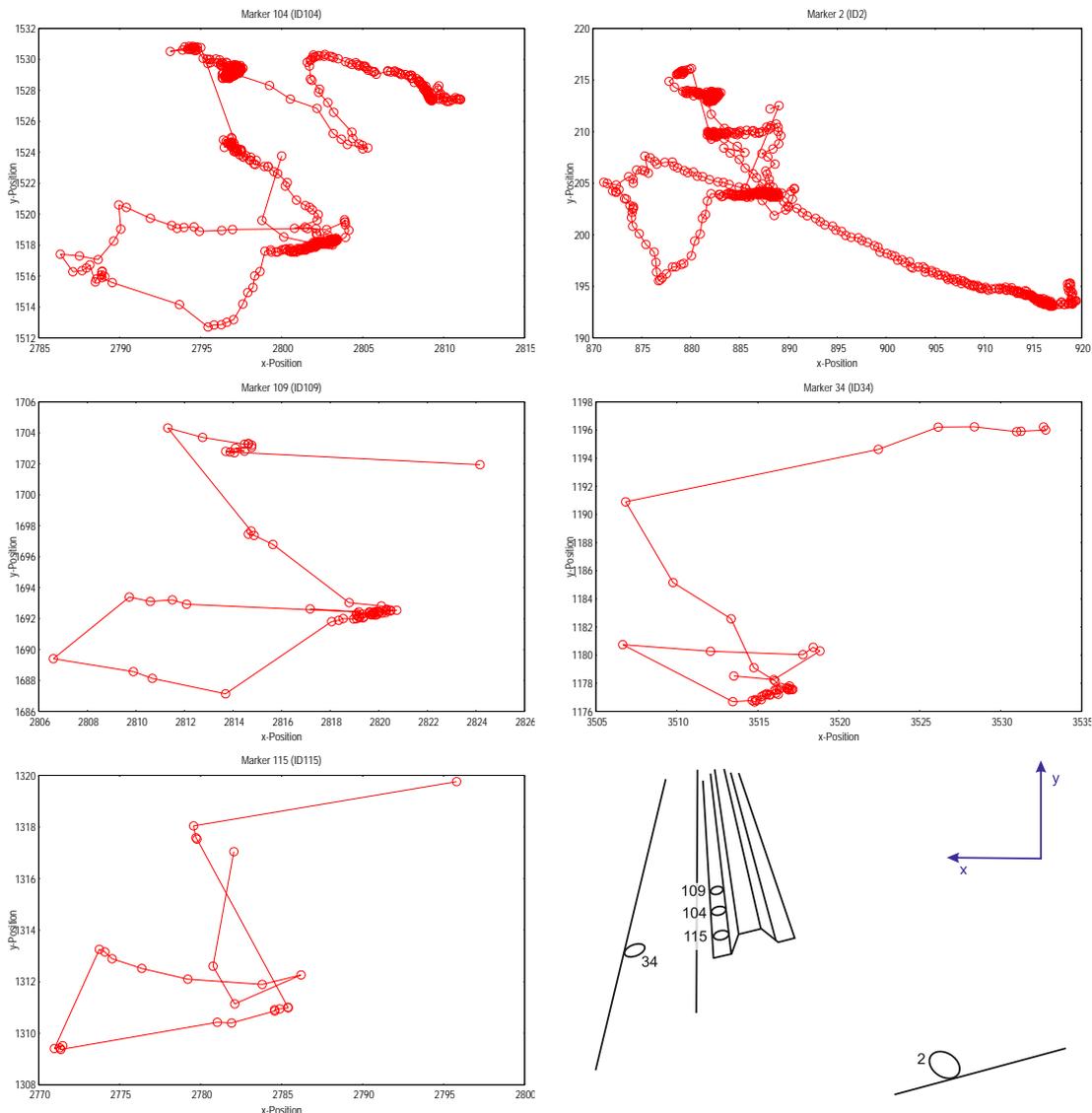


Abbildung 72: Bewegung der identifizierten Marker 2,34,104, 109 und 115 in der x-y-Ebene der Bilder. Rechts unten befindet sich eine Skizze (vgl. Abbildung 70) zur Lage der Marker und das Bild-Koordinatensystem. Die linke Seite des Bildes zeigt die Marker auf dem Stringerfuß (104, 109 und 115), die rechte Seite die Referenzmarker auf dem Tooling (2 und 34).

macht wurden erlaubt keinen Vergleich, da sich in dieser Phase die Marker ebenfalls bewegen könnten.

Nachdem die nötige Haltezeit erreicht wurde, wurde die Solltemperatur auf Raumtemperatur (20 °C) gesetzt und der Abkühlvorgang eingeleitet. Bei einer Temperatur unterhalb 50 °C wurde der Druck im Autoklav auf 1 bar zurückgesetzt und die Au-

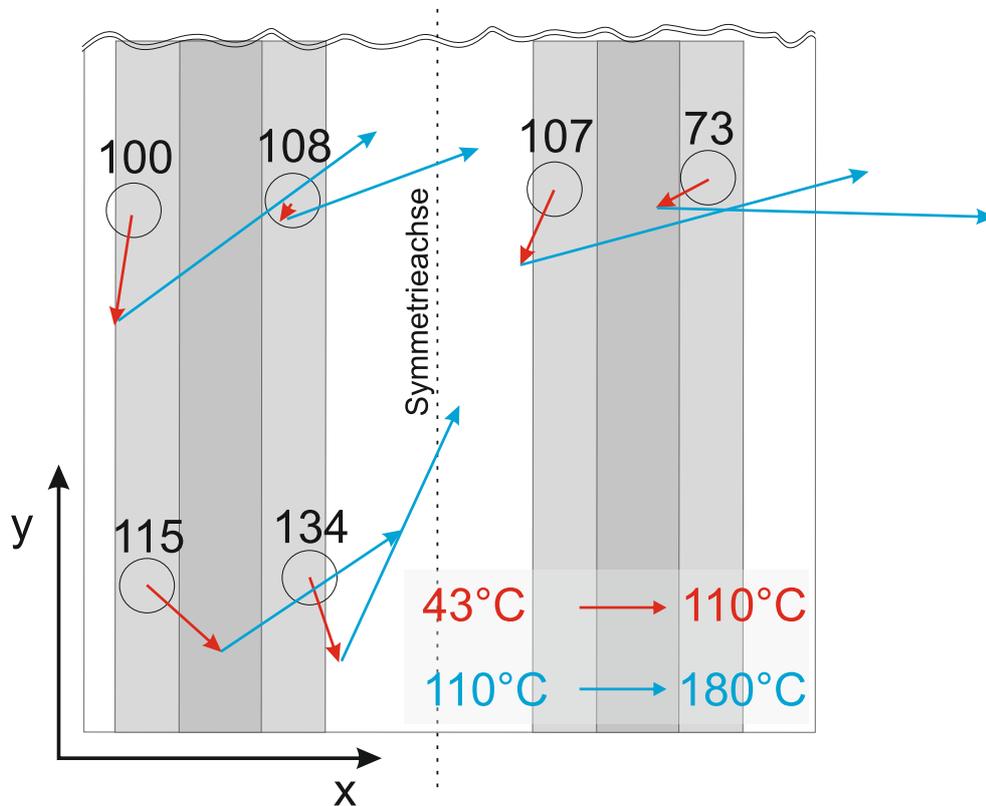


Abbildung 73: Bewegung der Marker in der x/y-Ebene detektiert mit Hilfe der Kamera in im Autoklav. Die Auswertung erfolgte mit Software Photomodeler. Die thermische Auswertung der Bezugsmarker auf dem Tooling wurde theoretisch berechnet. Die Pfeile zeigen die Bewegung der Marker: rot von 43 °C auf 110 °C, blau von 110 °C auf 180 °C. Die Länge der Vektorpfeile wurde um Faktor 100 vergrößert.

toklavitür geöffnet. Die vom Datenlogger aufgenommene Daten (Temperatur) im Inneren der Kühlkammer sind in Abbildung 74 zu sehen. Man kann vier Bereiche erkennen:

- 1 Versuch 1, der Aufgrund des undichten Vakuumaufbaus abgebrochen wurde. Die Temperatur stieg im Inneren der Kühlkammer auf ca. 73 °C
- 2 Abbruch des ersten Versuches und Nacharbeiten am Vakuumaufbau
- 3 Beginn Versuch 2, erste Aufheizphase und anschließende Haltezeit. Die Temperatur stieg hier zunächst auf ca. 76 °C und fiel während der Haltezeit auf knapp unter 60 °C.
- 4 zweite Aufheizphase mit Haltezeit und dem Ende des Versuchs

Anschließend erkennt man einen typische Abkühlverlauf. Die recht hohe Tempera-

Tabelle 4: Absolutverschiebung der Marker in Millimeter auf den Stringern zwischen 43 °C und 110 °C, 110 °C und 180 °C sowie die zwischen Gesamtverschiebung 43 °C und 180 °C in der x/y-Ebene.

ID	43 °C $\Rightarrow$ 110 °C		110 °C $\Rightarrow$ 180 °C		43 °C $\Rightarrow$ 180 °C	
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta X$	$\Delta Y$
115	0,41	-0,37	0,99	0,67	1,40	0,30
100	0,32	-0,94	1,29	2,82	1,61	1,88
108	-0,19	-1,22	2,83	2,09	2,64	0,87
134	-0,13	-0,2	2,18	0,78	1,97	0,58
111	-0,37	-0,83	3,81	1,03	3,44	0,20
73	-0,58	-0,31	3,7	-0,1	3,12	-0,41

tur im Inneren der Kühlkammer war untypisch, da dieser Effekt bei keinem der Vorversuche (die jedoch nicht die Länge eines Autoklavzyklus hatten) beobachtet wurde. Da die Kühlkammer mit einer für bisherige Versuche typischen Durchflussmenge von ca. 15 Liter pro Minute Kaltwasser aus der Hausleitung gespeist wurde und somit deutlich über der Spezifikation für das Kühlgehäuse in seinem natürlichen Anwendungsbereich lag (1300 °C), kann die Kühlleistung nicht zu gering gewesen sein. Der Grund lag vielmehr an den zwei Meter langen Zuleitungen für die Spannungsversorgung und Datenleitung. Diese haben die Kühlkammer mit der Außenseite des Autoklavs verbunden um eine einfachere Durchführung der benötigten Zuleitungen zu gewährleisten. Da es befürchtet wurde, dass die innen verlaufenden Leitungen, obwohl bis zur Soll-Temperatur von 180 °C ausgelegt, durch aufgestaute Wärme über längere Prozesszeit beschädigt werden, wurde bei der Auslegung beschlossen einen geringen Luftstrom aus der Druckluftleitung durch zu leiten um die Hitzespots zu beseitigen. Anscheinend führte das Durchleiten der Luft zu dem beobachteten Temperaturanstieg im Inneren der Kühlkammer. Die hohe Temperatur bis 80 °C führte nicht zu einer Beschädigung des Kamerasystems, brachte es aber weit außerhalb der spezifizierten Betriebstemperatur von 45 °C und der durchgeführten Kalibrierung von ca. 25 °C. Daher kann der Temperaturanstieg als eine weitere Fehler- bzw. Ungenauigkeitsquelle aufgeführt werden deren quantitative Auswirkung nicht abgeschätzt werden konnte.

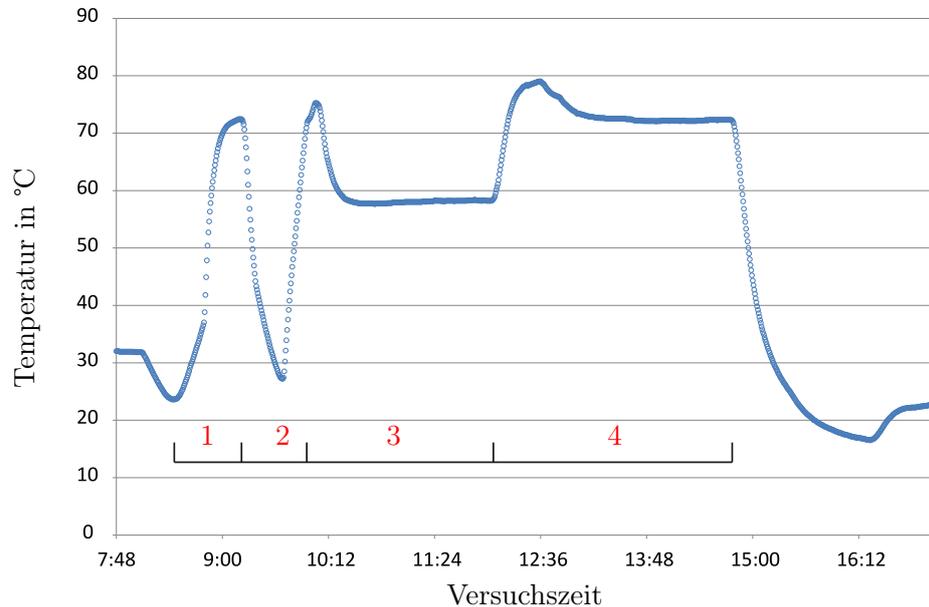


Abbildung 74: Temperatur innerhalb der Kühlkammer während des Versuchs aufgenommen mit dem Datenlogger. Folgende Bereiche können erkannt werden: **1** Versuch 1, **2** Unterbrechung, **3** erste Aufwärmphase (bis 110 °C), **4** zweite Aufwärmphase (bis 180 °C).

### 4.3.3 Zusammenfassung

Der Teilprozess „Stringersetzen“ in der Herstellung von CFK-Schalen wurde als Ziel der durchzuführenden Untersuchungen beschlossen. Der Effekt der Bewegung von aufgeklebten Stringern im Verlauf des Aushärtprozesses sollte sowohl phänomenologisch wie auch experimentell untersucht werden um die kritischen Prozessparameter zu bestimmen. Anhand dieser Parameter, die mit einer geeigneten und im Verlauf des Projektes zu entwickelten Sensorik sollte der Prozess robuster gemacht werden. Dies sollte anhand des Echtzeitmonitorings der Parameter und deren Steuerung erreicht werden.

Als erster Schritt wurde zusammen mit dem Verbundführer eine Analyse des aktuellen Fertigungsprozesses durchgeführt und mit Hilfe eines Fehlerbaundiagramms wurden vermeintlich kritische Parameter identifiziert. Anhand von in der Fertigung aufgenommenen Daten wurden dies noch zusätzlich auf ihren Einfluss untersucht. Dadurch wurden drei Parameter: Aushärtewinkel, Lagenaufbau des Hautfeldes und die Verspannung des Stringers beim Aufkleben als die zu untersuchenden Faktoren bestimmt. Diese sollten in einer Versuchsreihe auf ihren Einfluss untersucht werden wozu eine geeignete Sensorik entwickelt werden musste.

Die Vorgaben an die Sensorik wurden anhand der typischen Bewegungsweiten der Strin-

ger im Prozess sowie dem möglichen Versuchsaufbau festgelegt. Da es nach der Auskunft des Verbundführers nicht möglich war die Sensorik im Fertigungsautoklav am realen Bauteil zu validieren, wurde bei der Abteilung für keramische Verbundstrukturen des Institutes für Bauweisen und Strukturtechnologie ein Autoklav für die geplante Versuchsreihe gesichert.

Nach einer Marktrecherche mit dem Ziel eine geeignete Sensorik zu finden und einigen Voruntersuchungen, wurde ein Konzept entwickelt um die Bewegung der Stringer im Autoklav mit Hilfe einer Kamera und der Software Photomodeler bei realen Prozessbedingungen zu messen. Das Konzept basierte auf einer Kamera, die in einem Kühlgehäuse vor den extremen Bedingungen des Autoklaves (8 bar und 180 °C) geschützt werden musste. Zusätzlich musste auch der Autoklav um Durchführungen für das Kühlwasser und Versorgungsleitungen der Kamera erweitert werden. Eine spezielle Lichtquelle musste ebenfalls installiert werden.

Für die Versuchsreihe wurde ein vollständiger faktorieller Versuchsplan mit den drei kritischen Faktoren aufgestellt und umfasst einschließlich eines Vorversuches und einer möglichen Versuchswiederholung zehn Versuche mit einem Hautfeld von 1,0 m x 0,5 m Fläche mit zwei  $\Omega$ -Stringern auf denen die Marker für die Bewegungsdetektion angebracht wurden.

Die gekaufte Kühlkammer musste an die geforderten Umgebungsparameter angepasst werden, was unerwartet sehr viel Mehrarbeit und Mehrkosten beansprucht hat. Deswegen wurde in Abstimmung mit dem Verbundführer beschlossen, die Sensorik in nur einem Versuch zu validieren.

Der Versuch zeigte, dass eine Bewegung der Marker mit nur einer Kamera auch im Submillimeterbereich möglich ist. Leider konnte, hier ist die Ursache noch nicht abschließend geklärt, keine Absolutbewegung der Stringer im Verlauf des Autoklavprozesses bestimmt werden, da bei der Vorhermessung der Messfehler unerwartet hoch ist und eine genaue Positionsbestimmung der Vorherpositionen nicht möglich ist. Das Tracking der Marker bei Prozess hingegen hat sehr gut funktioniert, jedoch fehlt mit der Messung der Absolutbewegung ein Vergleich, sodass die Güte der Messung nicht abschließend bestimmt werden kann. Dies zu klären verlangt nach weiteren Versuchen, die jedoch aus Zeit- und Ressourcengründen im Projekt nicht mehr möglich waren.

Der Verbundführer wurde die Auswertung sowie Vorschläge zur Verbesserung und Implementierung der Sensorik in die Fertigung zur Verfügung gestellt.

## 5 Veröffentlichungen und Vorträge

Folgende Veröffentlichungen wurden bis zur Anfertigung des Schlussberichtes anhand der Ergebnisse des Projektes publiziert:

### 5.1 Veröffentlichungen

- MARCIN MALECHA, CLEMENS SCHMIDT-EISENLOHR, PATRICK KAUFMANN UND TOBIAS GERNGROSS: *Automatisiertes Ablegen eines Blitzschutzprepregs mit einem Roboterendeffektor*. in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*

2013, Stuttgart., Stuttgart, 2014. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., Bonn

- PATRICK KAUFMANN, CLEMENS SCHMIDT-EISENLOHR, FLORIAN KREBS UND MARCIN MALECHA: *Inbetriebnahme und Steuerung eines automatischen Blitzschutzablegers an einer Industrieroboterzelle.* in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014, Augsburg*, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., Bonn
- TOBIAS GERNGROSS: *Automatisiertes Aufbringen von Blitzschutz im Flugzeugbau.* in *Ingenieurspiegel*, 1/2016
- MARTIN SONNEBERG: *Optimierung der Ablegestrategie des Blitzschutzprepregs auf der Außenhülle eines Flugzeuges unter technologischen und wirtschaftlichen Aspekten.* Masterarbeit, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2015
- MARCIN MALECHA, CLEMENS SCHMIDT-EISENLOHR, PATRICK KAUFMANN UND CHRISTIAN RÄHTZ: *Automated application of lightning protection material on double curved fuselage panels of carbon fibre aircrafts - from the idea to the application.* Munich, 2016. 17th European Conference on Composite Materials. Manuscript submitted for publication
- TOBIAS GERNGROSS: *Besser als von Hand.* in *Carbon Composites Magazin* 1/2016
- NICOLE WAIBEL *Automatisch faltenfrei.* in *DLR Magazin Nr. 150 Juni 2016* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

## 5.2 Vorträge

Die Ergebnisse des Projektes wurden auf folgenden Konferenzen bzw. Ausstellungen vorgestellt:

- Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2013, Stuttgart, Referent: Marcin Malecha
- Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014, Augsburg, Referent: Patrick Kaufmann
- 3. Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium, 2015, Augsburg, Referent: Clemens Schmidt-Eisenlohr
- JEC World 2016, Paris, Aussteller
- (eingereicht) 17th European Conference on Composite Materials, 2016, Munich, Referent: Marcin Malecha
- (eingereicht) Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2016, Braunschweig, Referent: Patrick Kaufmann

### 5.3 Patente

- Bahnplanungsprozess zur optimierten Ablage von biegeschlaffen Materialien, Eingereicht am 13.05.2016

## 6 Ausblick auf den voraussichtlichen Nutzen und Anschlussfähigkeit

### 6.1 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Nutzung

#### 6.1.1 Teilprojekt 1 - Große Schalenstrukturen

Die im Projekt angewandte Ablagestrategien, zusammen mit der entwickelten Offlineprogrammierung, eignen sich hervorragend um breite Prepregbahnen, hier im Speziellen das Blitzschutzmaterial, auf doppelgekrümmten Oberflächen abzulegen.

Die systematische Untersuchung des Drapiervorgangs von nicht verscherbaren Materialien auf 3D-Oberflächen sowie die Bestimmung von kritischen Prozessparametern steigerte das Verständnis für die Drapiermechanik des Materials. Die eingesetzten Algorithmen für die Bahnplanung auf einer vermessenen doppelgekrümmten Oberfläche und die Bahngenerierung vergrößerten das Einsatzfeld der Offlineprogrammierung um rollende Ablageprozesse. Die Bahnerzeugung wurde dabei autonom anhand vorgegebener geometrischer Parameter bewerkstelligt und kann in der Zukunft unter verschiedenen Aspekten (prozesstechnisch, ökonomisch) optimiert werden.

Die Entwicklung des Endeffektors in den Projekten AZUR und RoCk stellt ein sehr gutes Beispiel einer systematischen Entwicklungskette für automatisierte Fertigungsprozesse mit einem bereits bestehenden manuellen Fertigungsprozess. Die Analyse des Prozesses, seine Beschreibung samt der kritischen Prozessparametern, die Untersuchung der Randbedingungen und die Voruntersuchungen der Systemeinkomponenten erlaubten eine schnelle Entwicklung und Konstruktion (AZUR) des Endeffektorprototyps. Die systematische Inbetriebnahme einschließlich der Entwicklung notwendiger Infrastruktur und Offlineprogrammierung trug wesentlich zu einem besseren Verständnis der Ablageproblematik. Dies erlaubte eine schnelle Umstellung auf den Female-Prozess, wie vom Verbundführer angefragt. Dadurch konnte ein wissenschaftlicher Mehrwert generiert werden.

Wirtschaftlich gesehen erlauben die Projektergebnisse die Umstellung von einer Vielzahl manueller Prozesse bei der Ablage von Prepregmaterialien auf ganzheitliche, robotergeführte Lösungen. Dies schlägt sich positiv in den Fertigungskosten und einer deutlichen Steigerung von Takraten nieder und macht somit die CFK-Fertigung kosteneffizienter. Weitere Kostensenkung ergibt sich aus der Steigerung der Reproduzierbarkeit und Qualität der automatisierten Prozesse. Aktuell werden zusammen mit der Firma Emil Bucher GmbH & Co. KG Gespräche bezüglich Implementierung der erarbeiteten Lösungen in Fertigung von Luft- und Raumfahrtkomponenten mit verschiedenen Industrieunternehmen geführt.

### 6.1.2 Teilprojekt 2 - Verstärkungs-Strukturen

Mit den Versuchen zur Vorstreckung von multiaxialen Faserhalbzeugen (MAG) bei der drapiertechnischen Abbildung komplexer Spantgeometrien konnte die Palette von Technologien zur Preformherstellung vervollständigt werden. Diese Palette von Technologien zeichnet sich durch eine vollständige Automatisierbarkeit unter Ausschluss jeglichen manuellen Eingriffs aus und maximiert somit die Reproduzierbarkeit der Drapierqualität. Durch die unterschiedliche Drapierreihenfolge ist in bestimmten Grenzen die gezielte Verlagerung von Verscherungswinkeln möglich. Dadurch wird die Berücksichtigung von strukturmechanischen Gesichtspunkten bei der Auslegung von Spantbauteilen möglich. Für die Umsetzung einer industriellen Lösung einer automatisierten Drapieranlage wurde ein Konzept eines zellular aufgebauten Drapieraktuators entwickelt und untersucht. Dieser Aktuator ermöglicht durch die beliebige Zahl gekoppelter, baugleicher Elemente auch die Umformung nahezu unbegrenzt langer Spantelemente. Dieses ist bei der rein transversalen Schiebertechnologie nicht möglich und begrenzt diese auf limitierte Umfangslängen. Die Entwicklung der unterschiedlichen Drapiertechnologien hat das Wissen um die Verscherungsfähigkeit und die Auswirkungen auf die Faserwinkelverteilung bei MAGs entscheidend erhöht. Durch die Validierung und Verwendung eines präzisen Sensorsystems zur Bestimmung von Faserausrichtungen ist es erstmals möglich, die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Streuung und Veränderung von Faserwinkeln einer drapierten Lage eines multiaxialen Faserhalbzeugs genau zu bestimmen. Als Folge werden in Zukunft die sehr pauschalen und aus Zeiten der reinen UD-Prepregablage stammenden Toleranzvorgaben bei der Faserablage angepasst werden müssen. Die getrennt zu betrachtende Verscherung der Faserlagen in Folge des Drapierprozesses benötigt bei zukünftigen Entwicklungen die engere, iterative Einbindung der strukturmechanischen Dimensionierungs- und Konstruktionsabteilungen. Mit der Entwicklung und Validierung der Schablonentechnologie in Verbindung mit dem verwendeten Sensorsystem steht für zukünftige wissenschaftliche, aber auch industrielle Projekte ein Verfahren zur Bestimmung der Faserwinkelverteilung auf Bauteilen zur Verfügung, das kein größere Infrastruktur benötigt, wie beispielsweise Roboter oder Portale.

### 6.1.3 Teilprojekt 4 - Prozessbegleitende Qualitätssicherung

Der Prozess des Stringersetzens wurde sowohl phänomenologisch als auch statistisch anhand Messwerte aus der Fertigung untersucht. Dabei wurden vermeintlich kritische Prozessparameter identifiziert. Die an den Prozess angepasste Sensorik wurde entwickelt und in Laborumgebung getestet. Das System erlaubt ein Echtzeittracking von (an Stringern) angebrachten Markern im Autoklav bei 180 °C und 8 bar Umgebungsbedingungen. Eingesetzt in der Fertigung könnte das System lokal und hochpräzise die Bewegung von Integralbauteilen verfolgen um das Verständnis von Prozessen bezüglich kritischer Parameter zu untersuchen bzw. überwachen und diese mit Hilfe der gewonnenen Daten zu optimieren. Dadurch können die Prozesse durch Veränderungen der Prozessparameter effizienter und kostengünstiger gestaltet werden. Zudem kann der Prozess an die Strukturen einer Industrie 4.0 besser angebunden werden.

Das Kamerasystem wurde auch erfolgreich beim Vorhaben PROTEC Demopanel eingesetzt um beim Infiltrationsprozess eines großen Bauteils im Ofen die Fließfront des Harzes zu überwachen und zu steuern.

## **6.2 Anschlussfähigkeit**

### **6.2.1 Teilprojekt 1 - Große Schalenstrukturen**

Weitere Arbeiten an dem Thema können u. a. eine an ein neues Anwendungsfall angepasste Neukonstruktion des Endeffektors, Verbesserung der Steuerung und/oder Implementierung der Bahnregelung beinhalten. Auch Einbindung von Qualitätssicherungsmethoden in den Prozess wäre wünschenswert.

Die Ergebnisse werden aktuell verwendet um eine rollende Ablage von Glaspregbahnen im Projekt Profi-Rumpf zu untersuchen und ggf. implementieren. Für die Endlosablage von trockenen CFK-Bahnen im Projekt PROTEC-NSR werden Ergebnisse aus der Offlineprogrammierung und der Steuerung der Antriebe eines Endlosablegers genutzt.

### **6.2.2 Teilprojekt 2 - Verstärkungs-Strukturen**

Zur Qualitätssicherung wurden vom DLR im LuFo Projekt RoCk die Grundlagen für eine Kontrolle der Faserwinkel als ein Qualitätsmerkmal der Preformqualität geschaffen. Dazu wurde das Messsystem FScan von Profactor eingesetzt, um großflächig Messwerte von Bauteilen aufzunehmen. Im Vorhaben EFFEKT im Rahmen von LuFoV-2 sollen Qualitätssicherungsmaßnahmen entwickelt werden, die eine effiziente Sicherstellung der Preformqualität von kontinuierlich hergestellten Preforms im Gesamtprozess ermöglichen. Ziel ist die Reduktion des Aufwandes bei der Vermessung und die Sicherstellung der Qualität trotz minimalen Messaufwands. Diese Arbeiten basieren auf die im Projekt RoCk gewonnenen Erfahrungen beim Drapierverhalten von multiaxialen Faserhalbzeugen auf sowie auf den erarbeiteten Technologien zur vollflächigen Erfassung von Faserwinkelverteilungen. Die Verwendung des Sensorsystems ist auch Grundlage für die Erlangung des TRL4 für zukünftige Spantstrukturen beim Partner PAG im Rahmen des LuFoV-2 Verbundvorhabens IMPULS.

### **6.2.3 Teilprojekt 4 - Prozessbegleitende Qualitätssicherung**

Die logische Fortführung des Projektes würde eine Implementierung der Sensorik in die Fertigungsprozesse darstellen unter der Berücksichtigung der im Projekt erarbeiteten Verbesserungen des Systems.

Das Kamerasystem soll auch im Projekt PROTEC NSR bei dem Bau des Demonstrators einer Druckkalotte im Originalmaßstab bei der Infiltration im Ofen eingesetzt werden.



## Abbildungsverzeichnis

1	Beteiligungen des DLR an Arbeitspaketen im Projekt RoCk . . . . .	7
2	Entwicklung des Endeffektor-Prototypes im Projekt AZUR. . . . .	17
3	Sensorikkonzept des Blitzschutzendeffektors . . . . .	19
4	Skizze der Bananen-Bahn . . . . .	22
5	Ablage der ersten Bananen-Bahn auf Male-Ablageform. . . . .	23
6	Alternativbahn mit identischen Kantenlängen . . . . .	25
7	Ablagequalität der Alternativbahn . . . . .	25
8	Optimierungsalgorithmus für eine Alternativbahn . . . . .	26
9	Ablageergebnis für Bananen-Bahn . . . . .	28
10	Ablageergebnis für die Alternativbahn . . . . .	28
11	Ablageergebnis für zwei Bahnen auf Male-Geometrie . . . . .	30
12	Gegenüberstellung der Male- zu Female-Form . . . . .	31
13	Darstellung der Flächenbegrenzungen für die Validerung . . . . .	32
14	Flächenaußengrenzen und die Positionierung der ersten drei Ablagebahnen	34
15	Sehr gutes Ablegeergebnis . . . . .	34
16	Darstellung der Flächenbegrenzungen einer Ablagebahn . . . . .	35
17	Großansicht der Ablagebahnen 1 und 2 . . . . .	35
18	Triaxialgelege in der Stufe-1-Kontur an einem Stufe-2-Preformwerkzeug . .	39
19	Triaxialgelege von der Stufe-1-Kontur durch Andruckelemente in die Kon- tur des Stufe-2-Preformwerkzeugs gepresst . . . . .	40
20	Vergleich der Ergebnisse einer Schwertumformung eines nicht-vorgespannten und eines vorgespannten Traxialgeleges . . . . .	41
21	Entwurfskonstruktion eines Drapierelementes . . . . .	42
22	Darstellung der lokalen Schiebergeschwindigkeiten bei gegebener Drapierzeit	42
23	Streckung von Fasermaterial in Abhängigkeit vom relativen Abstand zur neutralen Linie . . . . .	43
24	Theoretische Dehnung des Fasermaterials . . . . .	45
25	Koppelung der Elemente als Ursache der ungleichmäßigen Verteilung der Dehnungen . . . . .	45
26	Versuchsaufbau mit eingeklemmten Gelege . . . . .	46
27	Fixiertes Gelege im Versuchsaufbau . . . . .	46
28	Drapierschwert . . . . .	47
29	Gegenüberstellung der benötigten Kräfte . . . . .	48
30	Biaxversuche . . . . .	48
31	Triaxversuche . . . . .	49
32	Versuche mit G0926, bebindert . . . . .	49
33	Vergleich der Umformergebnisse bezüglich der Faserwinkel mittig des Webs mit und ohne Vorspannung . . . . .	51
34	Präparation von Gelegeproben zur Ermittlung der Faserrichtungen der obersten Faserlagen unverscherter Multiaxialgelege . . . . .	52
35	Fotografische Auswertung der präparierten Probenoberfläche . . . . .	53
36	Konzeptskizze zur Führung und Anordnung des Faserwinkelsensors . . . .	54

37	Beispiel zur Verteilung der Referenzmarkierungen . . . . .	55
38	Versuchsaufbau mit Webschablone und aufgesetztem Scanner . . . . .	56
39	Übersicht der Bauteile . . . . .	57
40	Schriftgrößenauswahl und Validierung der Gravurmethode zur optimalen Sichtbarkeit im Scan . . . . .	57
41	Prinzip der Faserwinkelmessung an den Flanschen des Testspants . . . . .	58
42	Lokale Messpunkte und Referenzrichtungen . . . . .	60
43	Konzept der Dokumentation der Faserwinkel am Beispiel C74-Spant . . . . .	61
44	Varianten der Drapierstrategien . . . . .	62
45	Vergleich der gemessenen Faserwinkel bzgl. Drapierstrategien . . . . .	63
46	Messung auf der ersten Biax-Faserlage des C-74-Spantpreforms . . . . .	64
47	Durchführung der Messung . . . . .	64
48	Robotergeführte Faserwinkelmessung . . . . .	65
49	Export der Messdaten in ein Excel-Format über ein Konvertierungspro- gramm . . . . .	67
50	Vergleich manuell- und robotergeführte Faserwinkelmessung . . . . .	68
51	Vergleich der Faserwinkelverläufe vom unteren Innengurt (manuell und Roboter) . . . . .	69
52	Statische Auswertung der Abweichungen von manueller und Roboter ge- führten Faserwinkelmessungen . . . . .	70
53	Abweichungen der Stringerpositionen nach dem Aushärten - schalenweise Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen . . . . .	73
54	Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition vom Aus- härtewinkel . . . . .	74
55	Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition vom Bo- genabstand . . . . .	75
56	Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition der C- Position (Spantposition) des Messwertes . . . . .	76
57	Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition der P- Position des Messwertes . . . . .	77
58	Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition von der Stringerlänge . . . . .	78
59	Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition von der Lagendicke am Messpunkt . . . . .	79
60	Abhängigkeit der tangentialen Abweichung der Stringerposition von der mittleren Faserorientierung am Messpunkt . . . . .	79
61	Konzept der fotometrischen Sensorik . . . . .	82
62	Aufbau des Versuches zur Bestimmung der Genauigkeit der Positionsbe- stimmung . . . . .	84
63	Aufbau des Kühlgehäuses . . . . .	85
64	Aufbau der Probeplatte . . . . .	86
65	Versuchsaufbau im Autoklav . . . . .	87
66	Aufbau der Sensorik im Autoklav . . . . .	89
67	Sicht der Kamera auf den Versuchsaufbau . . . . .	90



68	Prozessparameter des Versuches . . . . .	91
69	Vorher-Nachher-Vergleich des Probekörpers . . . . .	93
70	Beispiel eines Messbildes aus dem Autoklav . . . . .	95
71	Exemplarische Darstellung der Bewegung eines Markers . . . . .	96
72	Bewegung der identifizierten Marker in der x-y-Ebene der Bilder. . . . .	97
73	Bewegung der Marker in der x/y-Ebene . . . . .	98
74	Temperatur innerhalb der Kühlkammer während des Versuchs . . . . .	100

## Tabellenverzeichnis

1	In den Blitzschutzendeffektor integrierte Sensoren . . . . .	19
2	Bewertung der Prozessparameter beim Stringersetzen . . . . .	72
3	Versuchsplanung Teilprojekt TP 4 . . . . .	80
4	Absolutverschiebung der Marker auf den Stringern in der x/y-Ebene . . . . .	99

## Literatur

[1] GERNGROSS, T: Schlussbericht Projekt AZUR - Automatisierung zukünftiger Rumpfkonzepete im ZLP / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2012. – Forschungsbericht

[2] GERNGROSS, T: Erfolgskontrollbericht Projekt AZUR - Automatisierung zukünftiger Rumpfkonzepete im ZLP / DLR e.V. ZLP Augsburg. 2012. – Forschungsbericht

[3] NIEBERL, Dorothea: Automatisierung zukunftsweisender industrieller Methoden und Technologien für CFK-Rümpfe (AZIMUT-ZLP) / Abschlussbericht / DLR e.V. Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie. Stuttgart, 2015. – Forschungsbericht

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel  <b>Robuste CFK-Gesamtprozesskette (RoCk-ZLP)</b>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Malecha, Marcin; Kaps, Robert	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2015
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie  Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart	9. Ber. Nr. Durchführende Institution DLR-IB-BT-AU-2016-139
	10. Förderkennzeichen 20W1110H
	11. Seitenzahl 109
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 3
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 74
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung  Im Vorhaben RoCk sollten repräsentative Fertigungsprozesse von CFK-Bauteilen mit Hilfe von Automatisierungslösungen robuster gestaltet werden. Die ausgewählten Prozesse waren die Ablage vom Blitzschutzmaterial auf doppelgekrümmten Rumpfsektionen, Automatisierung von Umformprozessen an Türumgebungsstrukturen und Entwicklung einer passenden Sensorik zur vollflächigen Dokumentation der Faserwinkel des Preforms. Das dritte Teilprojekt beschäftigte sich mit der Analyse der Stringerintegration und einer zur Prozessüberwachung geeigneten Sensorik. Im Teilprojekt 1 wurde der im Projekt AZUR entwickelte und gebaute Endeffektor um Sensoren und Antriebe erweitert und in Betrieb genommen. Die ersten Versuche zeigten Schwächen bei der Drapierung der Materialbahnen aus dem Fertigungsprozess. Eine algorithmenbasierte Bahnerzeugung und Offlineprogrammierung erlaubte eine faltenfreie Ablage von breiten Materialbahnen in einem durchgängigen Ablageprozess sowohl für male-Geometrie, wie auch nach einer Ablegekopffmodifikation für female-Geometrie. Im Teilprojekt 2 wurde ein einstufiges Umformverfahren untersucht und ein Konzept für das entsprechende Werkzeug anhand von Drapierversuchen am Bauteil erstellt. Ein hochtransportables manuelles Sensorsystem für Dokumentation der Faserwinkel im laufenden Fertigungsprozess wurde konzipiert, gebaut und an einem Realbauteil validiert. Die Messung wurde mit einem Roboter-gestützten System abgeglichen. Im Teilprojekt 4 wurde der Prozess des Stringersetzens phänomenologisch und datenbasiert im Hinblick auf die prozesskritischen Parameter untersucht. Um die Parameter zu verifizieren wurde ein bildbasiertes Trackingsystem für den Autoklavprozess entwickelt und an einer Probenplatte validiert.	
19. Schlagwörter Blitzschutzablage, Drapieren, Automatisierung, Türumgebung, Faserwinkel, Prozesskette, OLP, QS, Sensorik, Stringersetzen	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title  <b>Robust process chain for CFRP parts (RoCk-ZLP)</b>	
4. author(s) (family name, first name(s))  Malecha, Marcin; Kaps, Robert	5. end of project 31.12.2015
	6. publication date
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address)  Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie  Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart	9. originator's report no. DLR-IB-BT-AU-2016-139
	10. reference no. 20W1110H
	11. no. of pages 109
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 11019 Berlin	13. no. of references 3
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 74
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract  In project RoCk representative manufacturing processes for CFRP parts should be made more robust by means of automation solutions. The chosen processes were the lay-up of Lightning Strike Protection (LSP) material onto doubled curved fuselage sections, automation of preforming of door surround structures and developing adequate sensors for documentation of fibre angles of the preform. The third part should analyse the process of stringer placement and develop proper sensors for process monitoring. In the project part 1 the lay-up head for the LSP material (developed and built in project AZUR) was enhanced with sensors and actuators and implemented into the robotic cell. The very first test showed flows while draping the original shaped cuts. A new approach with path generation which takes the curvature into account allowed a wrinkle free lay-up in almost full width of the material in continuous lay-up process on male geometry and with the modification of the lay-up head also on female geometry. In the part 2 a concept for a tool for single-stage preforming of door surround structures based on many tests was developed. A highly transportable manual sensor system for documentation of fibre angles during the manufacturing process was developed, built and verified on original part. A comparison with a robot driven system on the same part was also realised. In the project part 4 the process of stringer placement was analysed, phenomenologically and data based, and critical parameters of the process were identified. To validate this parameter an image based tracking system for the process within an autoclave was developed and tested on a test panel.	
19. keywords Lightning strike protection, Draping, Door frames, Process chain, Automation, OLP, Integrated quality assurance, Sensor , Stringer integration	
20. publisher	21. price