

**IB 131-2014/098**

**Entwicklung einer Vorrichtung zur  
Dokumentation der Ablage von  
Faserhalbzeugen zur Herstellung  
eines Full-Scale-Spantpreforms**

Niklas Windel, Robert Kaps



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
Braunschweig**



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtzgemeinschaft  
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

IB 131-2014/098

Entwicklung einer Vorrichtung zur  
Dokumentation der Ablage von  
Faserhalbzeugen zur Herstellung  
eines Full-Scale-Spantpreforms

Braunschweig, Januar, 2015

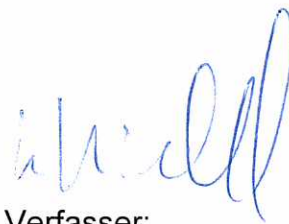
Der Bericht umfasst:

57 Seiten

Institutsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Verfasser:  
N. Windel



Leiter der Abteilung:  
Dr.-Ing. M. Kleineberg



Betreuer:  
Dr.-Ing. R. Kaps





# **Entwicklung einer Vorrichtung zur Dokumentation der Ablage von Faserhalbzeugen zur Herstellung eines Full-Scale-Spantpreforms**

## **Studienarbeit**

von

Niklas Windel

Matrikel-Nummer: 4236955

Studiengang: Master Maschinenbau

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing Wiedemann

Betreuer:

Dr.-Ing. Robert Kaps

## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken (dazu zählen auch Internetquellen) entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht

Braunschweig, den 05. Januar 2015

(Datum)

.....

(Niklas Windel)

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Zielsetzung.....	1
2	Stand der Technik.....	3
2.1	Faserverbund.....	3
2.2	Preformen.....	5
2.3	Auswirkungen von Faserwinkelabweichungen .....	6
2.4	Werkstoffprüfverfahren .....	6
2.4.1	Wirbelstrom.....	7
2.4.2	Ultraschallverfahren .....	8
2.4.3	Optisches Messverfahren.....	8
3	Konzepte zur Ausrichtung des Sensors .....	11
3.1	Konzeptentwurf .....	11
3.1.1	Parallelogrammarm .....	12
3.1.2	Parallelschienen .....	13
3.1.3	Schablone .....	14
3.1.4	Bahnschienen.....	16
3.1.5	Zentralarm .....	17
3.1.6	Roboter .....	18
3.2	Anforderungen und Bedarf .....	19
3.3	Auswahl eines Konzeptes .....	21
4	Versuche.....	23
4.1	Auswahl des Schablonenmaterials.....	23
4.2	Markierungen und Positionsnummern.....	23
4.3	Markierungen.....	26
4.4	Messversuche.....	26
4.4.1	Definition der Messverfahren .....	26
4.5	Zusammenfassung und Auswahl .....	29
5	Konstruktion der Bauteile.....	31
5.1	Stegschablonen .....	31
5.2	Folien .....	33
5.3	Gurtschablonen und Höhenadapter.....	34
5.4	Zusammenfassung der Konstruktion .....	36

6	Konvertierungsprogramm.....	37
7	Versuchsmessung .....	41
8	Zusammenfassung .....	47
9	Abkürzungsverzeichnis .....	49
10	Abbildungsverzeichnis .....	50
11	Tabellenverzeichnis .....	52
12	Literaturverzeichnis .....	53

# 1 Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Unterstützung eines Qualitätssicherungsverfahrens. Die Arbeit wurde im Rahmen des Projektes RoCK (Robuste CFK-Gesamtprozesskette) erstellt. Es ging um die Konstruktion einer Vorrichtung, die prozessbegleitend die Faserwinkel eines Spantes vermisst. Die Konstruktion der Vorrichtung sollte kosteneffizient und prozessbegleitend die Qualität sichern. Die Spanten werden in einem händischen Ablegeverfahren aus Non-Crimped-Fabric (NCF) Materialien hergestellt. Bei der Bauart des Spantes handelt es sich um einen Türumgebungsspannt. Diese werden momentan von der Firma Premium AEROTEC in einem AFP-Prozess (automated fibre placement) hergestellt. Es wird angestrebt, die Spante in Zukunft mit einem Ablegeverfahren herzustellen, in dem an Stelle der momentan verwendeten Prepregs (preimpregnated fibers) trockene Gelege verwendet werden. Gerade bei der hierfür benötigten händischen Ablage geht es darum, die Fasergelege möglichst genau und reproduzierbar abzulegen. Die händische Ablage bietet den größten Fehlerindikator für die Qualität von Bauteilen. Daher ist es wichtig, um die reproduzierbare gute Qualität von Faserwinkeln zu gewährleisten, die Messung der Faserwinkel mit einer einsatzfähigen Konstruktion zu unterstützen. Für die Vermessung der Faserwinkel wurde das Sensormesssystem der Firma PROFACTOR GmbH verwendet. Die Qualität wird mit Hilfe der Vorrichtung zwischen der Ablage von Einzellagen bewertet. Durch die Untersuchung der Faserwinkel bzw. Faserausrichtungen lassen sich Rückschlüsse auf die Reproduzierbarkeit der Faserablagequalität ziehen. Der Sensor misst die Faserwinkel mittels der Reflektion einer Lichtwelle, diese werden von der Oberfläche der ausgehärteten und getrockneten Bauteilen zurück auf den Sensor der Kamera geworfen.

## 1.1 Zielsetzung

Zunächst sollen die grundlegenden Kenntnisse von Methoden zur Faserwinkelerkennung mit Hilfe einer Literaturrecherche erworben werden. Ein Augenmerk soll bei der Literaturrecherche auf den aktuellen Methoden der Faserwinkelerkennung liegen. Der zentrale Punkt dieser Arbeit ist der Entwurf und die Auswahl einer Vorrichtung. Zur Auswahl sollen mehrere Konzepte erstellt werden. Das ausgewählte Konzept wird dann konstruktiv umgesetzt. Die Vorrichtung wird die Ausrichtung für das verwendete Kamerasystem PROFACTOR stellen. Die Vorrichtung stellt einen Bezug zwischen den gemessenen Faserrichtungen und dem globalen Koordinatensystem (KOS) her. Die Vorrichtung soll

durch lokale Bezugspunkte eine reproduzierbare Ausrichtung der Kamera gewährleisten. Die Konstruktion soll an einem Werkzeug eines Versuchsspanns getestet und optimiert werden. Dies bedeutet, dass das Konzept konstruktiv umgesetzt wird. Bei der konstruktiven Umsetzung muss darauf geachtet werden, dass der Preformprozess nicht durch die Vorrichtung gestört wird. Zudem soll die Vorrichtung möglichst kosteneffizient gestaltet werden.

Folgende Randbedingungen zur Sensorführung wurden als Randbedingungen mit dem Projektpartner PAG vereinbart:

- Stetige reproduzierbare Ausrichtung des Sensors entsprechend eines globalen KOS
- Reproduzierbare Ausrichtung des Sensors entsprechend lokaler KOS
- Reproduzierbare Erfassung der jeweiligen Position mit einer Genauigkeit  $< \pm 1\text{mm}$
- Scan der Steg- und der Gurtseiten des gebogenen C-Spanns (AI-Bezeichnung: Steg- und Gurtseiten)
- Art und Position der Vorrichtung darf die teils manuellen Preformingprozesse nicht behindern
- Kostengünstige Adaption für den Einsatz an einem Versuchspreform

## 2 Stand der Technik

Im Stand der Technik wird ein Überblick über relevanten theoretischen Hintergründe in Bezug auf die Thematik der vorliegenden Arbeit gegeben. Der Überblick erstreckt sich über die Grundlagen der Faserverbundkunststoffen (FVK) oder Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) bis hin zu den Methoden der Faserwinkelerkennung.

### 2.1 Faserverbund

Die Einsatzgebiete der Verbundwerkstoffe erstreckt sich über Luft- und Raumfahrt, Fahrzeugbau, Boots- und Schiffbau, Maschinenbau, Apparate- und Rohrleitungsbau, Elektrotechnik, Bauwesen bis hin zu Sportgeräten.

Die erste Patentanmeldung in der Luft- und Raumfahrt erfolgte von Robert Kemp (USA) im Jahr 1916 mit dem Vorhaben, ein komplettes Flugzeug aus FKV zu fertigen. In Deutschland verfolgte die Braunschweiger Akaflieg die Entwicklungen der FKV sehr intensiv, um die Leistung ihrer Segelflugzeuge zu steigern. [1]

Zurzeit werden im Fahrzeug vorrangig Verkleidungsteile in FKV hergestellt. In dem Bereich der Omnibusse werden selbsttragende FKV-Karosserien gefertigt, um große Gewichtseinsparungen zu erzielen. Im Rennsport sind FKV weit verbreitet. [1]

Im Boots- und Schiffsbau werden FKV in einem Umfang von 70% für den Bau von Yachten und Sportboote verwendet. In diesem Bereich wurden die Holzbauweisen durch FKV ersetzt. Hier hat der Verbundwerkstoff den Vorteil, eine gegenüber Korrosion beständig zu sein, sodass daraus eine Wartungsfreiheit resultiert. [1]

Im Maschinenbau wird darauf abgezielt Massen, welche schnell beschleunigt werden, durch FKV zu reduzieren z.B. bei Textilmaschinen und Robotern. Aber auch der Einsatz der FKV in den Bereichen von Werkzeugspindeln ist ein weiteres Ziel. [1]

Im Apparate- und Rohrleitungsbau haben die FKV durch ihre Chemikalienbeständigkeit Einzug gefunden. Kunststoffe könnten auch diese Beständigkeit bieten, nur die FKV können die benötigten Festigkeiten zusätzlichen erhöhen. [1]

Auch im Bauwesen halten die FKV Einzug, hier werden sie z.B. für Abspannkabel für Hänge- und Schrägseilbrücken genutzt. In diesem Bereich spielt sich auch die Korrosionsbeständigkeit wieder eine entscheidende Rolle. Zur Unterstützung kommen Säulen

und Pfeiler mit CFK-Lamellen, die diese ummanteln. Sie werden vor allem in Erdbebengebieten eingesetzt. [1]

In sportlichen Bereichen hielt auch der FKV Einzug, bildet dort ein großes Einsatzgebiet in der Herstellung von Angelruten, Skiern, Golf- und Tennisschläger usw. zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. [1]

Bei Faser-Kunststoff-Verbunden und faserverstärkte Kunststoffen handelt es sich um Untergruppen der Verbundwerkstoffe. Verbundwerkstoffe sind selbst eine Werkstoffkombination und bilden eine moderne Werkstoff-Klasse. Diese Werkstoffe werden, wie zuvor erwähnt, in der Luft- und Raumfahrt verwendet, und haben deshalb den Ruf als „High-Tech“-Werkstoffe. Die Faszination für diese Werkstoffklasse ist mit Sicherheit auch durch ihren vorseilenden Ruf begründet. Aber die Faszination hat auch Nachteile, denn es verleitet viele Nicht-Fachleute Konstruktionen mit FKV umzusetzen. Ein Resultat von fehlerhaften oder zu detailverliebten Konstruktionen ist vorzeitiges Versagen bzw. hohe Kosten. In Bezug auf die Kosten dürfen herkömmliche Konstruktionswerkstoffe nicht vernachlässigt werden, denn diese haben ebenso ihre Vorteile gegenüber FKV's. Für die meisten Konstruktionen stellen sich durch die Umsetzung in FKV monetäre Nachteile ein und daraus resultiert ein Wettbewerbsnachteil. Während der Konstruktion muss deshalb insbesondere der Kostenfaktor im Auge behalten werden, ansonsten kann die Verwendung von FKV die Bauteilkosten unnötig in die Höhe treiben. Andererseits kann die Verwendung von FKV aber auch die Belastung der übrigen Komponenten einer Konstruktion senken (Sekundärleichtbau). Durch den Sekundärleichtbau können die Gesamtkosten gehalten werden. [1]

### Faser-Kunststoff-Verbunde

Faser-Kunststoff-Verbunde sind Verbundkonstruktionen. In der Verbundkonstruktion werden durch den Verbund Materialeigenschaften eingestellt, welche die einzelnen Komponenten nicht erzielen werden könnten. Bei den FKV übernehmen die Fasern die mechanischen Lasten und übernimmt die Matrix die Fixierung der Fasern. [1]

### Die Matrix

Die Faser wird in der Matrix eingebettet und von ihr umgeben. Die Matrix ist ein Kunststoff der Gruppen Duromere und Plastomere. Die Matrix ist in den meisten Fällen der Schwachpunkt eines FKV's.

Die FVK haben anisotrope Eigenschaften. Der Werkstoff hat den Vorteil, dass die Eigenschaften zielgerichtet ausgelegt werden können für verschiedene Anwendungsfälle. Es gibt zugeschnittene Verarbeitungsverfahren für die jeweiligen Anwendungsfälle. Die Bauteile werden mit Verstärkungsfasern und Reaktionsharzen hergestellt. Die Kunststoffe werden mit Faser angereichert und dadurch kommt es unter anderem zur Anhebung des mechanischen Niveaus des Kunststoffes. Der Faser-Matrix-Verbund kann keine Biege- und Druckspannungen aufnehmen. Durch die Anbindung von Faser zu Kunststoff (Matrix) werden hoch belastbare Bauteile erzeugt.

Es gibt unterschiedliche Faserarten, von denen jede Faserart ihre eigenen Vorteile hat. Die verschiedenen Verstärkungsfasern sind Glas-, Kohlenstoff, Aramid- und Naturfasern. Durch die Verwendung der verschiedenen Fasern erhalten die Kunststoffe erhöhte Festigkeiten und Steifigkeiten. Die Fasern selbst haben eine geringe Dichte, wodurch sich ein hohes Leichtbaupotential ergibt. [2]

## 2.2 Preformen

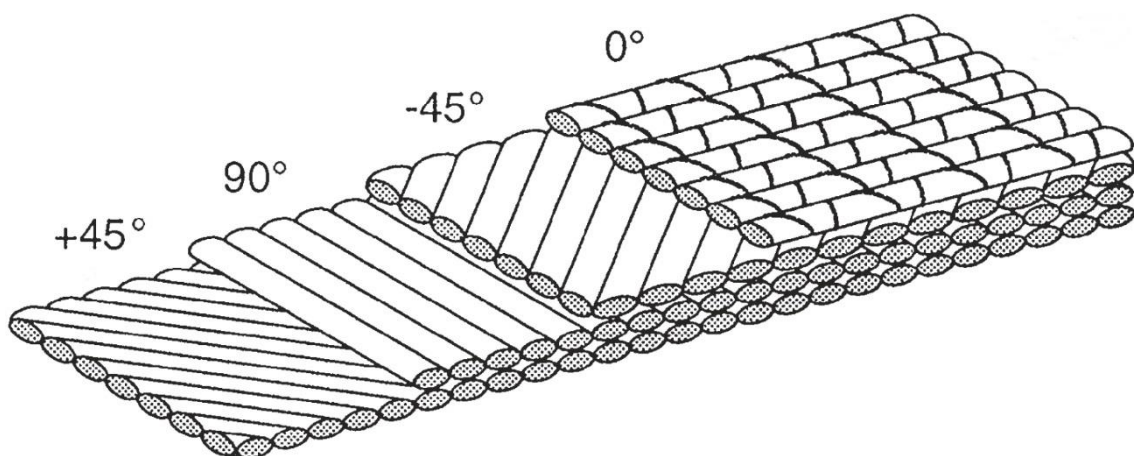


Abbildung 1: Darstellung eines Geleges [3]

Bei den in der Preformfertigung verwendeten Materialien handelt es sich um mehrlagige Gelege aus Kohlenstofffasern. Diese Gelege werden im englischsprachigen Raum als non-crimp fabrics bezeichnet. Der Begriff non-crimp fabrics bezieht sich auf die Art, wie

die einzelnen Faserbündel vorliegen, denn in einem Gewebe in welchem die Faserbündel im Querschnitt gewellt vorliegen, liegen die Faserbündel im Gelege gestreckt und nicht wellig vor. Durch die vorliegende gestreckte Faser können bessere mechanische Eigenschaften erreicht werden, denn es tritt keine weitere Strukturdehnung auf. Zudem kann das Gelege für spezielle Anwendungsfälle ausgelegt werden. [4]

Bei non-crimp fabrics handelt es sich um einen Verbund von verschiedenen Lagen mit voneinander unterschiedlichen Faserausrichtungen. Es existieren verschiedene Arten von Gelegen und diese gliedern sich in die Gruppen:

#### monoaxiale oder unidirektionale Gelege

Das Gelege hat nur eine Hauptausrichtung der Fasern z.B.  $0^\circ$  oder  $90^\circ$

#### biaxiale Gelege

Die Ausrichtung der Fasern ist zumeist in zwei  $90^\circ$  zu einander liegenden Achsen ausgeführt wie z.B.  $0^\circ/90^\circ$  oder  $+45^\circ/-45^\circ$

#### multiaxiale Gelege

Das multiaxiale Gelege hat Faserausrichtungen, die sich in alle Richtungen erstrecken können, die im ebenen Raum liegen, wie z.B.  $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ . Die Anzahl an verwendeten Richtungen innerhalb eines Geleges ist zumeist auf maximal drei Richtungen festgelegt, aber je nach Anwendungs- und Bedarfsfall können auch mehr als drei Lagen an Fasern in einem Gelege sein. [5]

### **2.3 Auswirkungen von Faserwinkelabweichungen**

Bei einer guten Ausrichtung der Fasern lassen sich die Eigenschaften des Werkstoffes optimal ausnutzen. Eine Abweichung der Faserwinkel von einem SOLL-Zustand hat einen Einfluss auf das Leistungsniveau bzw. auf die Lebensdauer eines Bauteiles. [6]

### **2.4 Werkstoffprüfverfahren**

In diesem Abschnitt werden die Prüfverfahren erläutert, welche zur Bestimmung von Faserrichtungen verwendet werden. Bei den Prüfverfahren handelt es sich um zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP), die zerstörenden Prüfverfahren werden hier nicht weiter erwähnt. Die ZfP nutzen physikalische Eigenschaften der Bauteile, um Aussagen über die Eigenschaften von FVK-Bauteilen zu erhalten, wie z.B. Bauteildicke, Faserorientierung, Fehlstellen und Defekte im Lagenaufbau.

Es werden ZfP benötigt, welche eine hohe Aussagesicherheit aufweisen, damit mit kleineren Fehlerbreiten geringere Folgekosten auftreten. Die Fehlerbreite hat einen Einfluss auf Sicherheitsfaktoren und somit auf die Auslegung von geometrischen Abmessungen, wie z.B. Wanddicken.

Prinzipiell wird bei ZfP das Antwortverhalten eines Bauteiles charakterisiert. Das Antwortverhalten wird durch eine Anregung erzeugt, z.B. durch eine Schwingung oder auch durch eine Welle. Die Anregung kann an einem oder an mehreren Punkten auf dem Bauteil erfolgen, an diesen Punkten werden die Messergebnisse als Bild dargestellt. Die Messwerte entstehen durch die Eigenschaft der Welle und ihren Wechselwirkungen mit dem Bauteil. Faserverbundkunststoffe haben viele Versagensarten, diese bieten ein breites Spektrum für die Anwendung von ZfP-Methoden. Nicht alle Methoden haben bereits die Entwicklungsreife erreicht, außerhalb von Laborbedingungen ausreichend getestet zu sein, deswegen werden hier drei Prüfverfahren vorgestellt, die bereits industriell eingesetzt werden. Bei den Verfahren handelt es sich um die Wirbelstromtechnik, Ultraschalltechnik und ein optisches Messverfahren. [7] Insbesondere sind die ZfP-Methoden danach ausgesucht wurden, welche Verfahren die Faserorientierung in FVK bestimmen können.

#### **2.4.1 Wirbelstrom**

Das Wirbelstromverfahren ist ein berührungsloses Verfahren und setzt eine elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffes voraus. Die Leitfähigkeit muss nicht die gleiche Höhe wie bei Metallen haben, es reicht schon die Leitfähigkeit von CFK-Fasern aus. Durch eine Spule wird ein Magnetfluss von außen in den Werkstoff eingebracht, dort entsteht ein Stromfluss, der Wirbelstrom, in Abhängigkeit der Werkstoffleitfähigkeit. Durch eine Leistungsaufnahme an der Spule ist der Stromfluss nachweisbar. Durch den Wirbelstrom lassen sich Fehler im Aufbau von Werkstoffen charakterisieren, denn diese verursachen Störungen in der Leitfähigkeit des Werkstoffes. Die Faserrichtungen von CFK-Bauteilen lassen sich mit rotierenden Wirbelstromsonden erkennen. Das Verfahren kann tief in die Bauteile eindringen, um Messwerte zu erhalten. Die Eindringtiefe wird nur durch den Skin-Effekt begrenzt. Das Verfahren bietet eine hohe Empfindlichkeit, was dazu führt, dass in Zukunft die derzeitige Begrenzung auf Metalle und CFK entfällt und dadurch Werkstoffe mit niedriger Leitfähigkeit untersucht werden können. [7]

Derzeit ist ein System mit dem Namen Eddycus auf dem Markt, das vom Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und System entwickelt wurde. Dieses System nutzt den Wirbelstrom zum Scannen von CFK-Strukturen. [8]

## 2.4.2 Ultraschallverfahren

### Ultraschalldoppelbrechung

Das Ultraschallverfahren ist ein berührendes Verfahren. Die Frequenzen liegen in dem Bereich von 0,4 bis 5 MHz. Piezoelektrische Sensoren erzeugen hochfrequenten mechanischen Schwingungen durch eine hochfrequente Wechselspannung. Die Auswertung der Echolaufzeit dient als Grundlage, deswegen werden ein Sender und ein Empfänger für das Verfahren benötigt. Wenn es bei FVK zu einer Vorzugsorientierung von Fasern kommt, entsteht eine akustische Anisotropie (Doppelbrechung). Die Anisotropie wird zur Ermittlung der Faserrichtungen verwendet. Dieses Verfahren ähnelt der Anisotropiemessung mit Mikrowellen und wird deshalb nicht weiter erläutert. Die Auflösung ist durch die Größe der Sensorköpfe begrenzt. Dieses Verfahren lässt sich auch bei elektrisch leitenden Fasern durchführen. Das Ultraschallverfahren ist sehr zeitaufwendig. [7]

## 2.4.3 Optisches Messverfahren

### FScan PROFACTOR

Das FScan PROFACTOR System ist ein Qualitätssensor, der eine Faserprüfung mit Richtungsbeleuchtung durchführt. Dabei handelt es sich um ein zerstörungsfreies und optisches Prüfverfahren, welches bei Karbonfaser- und Glasfasertextilien zum Einsatz kommt. Der Einsatz von optischen Messvorrichtungen ist bei komplexen Karbonfasertextilien erschwert, da bei der optischen Kontrolle einige Bildverarbeitungsprogramme an ihre Grenzen kommen, weil der zu prüfende Bereich im einem Farbspektrum von dunkel-grau zu schwarz variiert. Eine weiterer Grund, welcher die Auswertung beeinflusst sind die hochreflektierenden Oberflächen. Anhand dieser Problematik bei der Auswertung der Bilder entwickelte die Firma PROFACTOR ein Messsystem, welches mit mehreren Einzelaufnahmen und Richtungsbeleuchtung die Lagen und Ausrichtungen der Fasern sowie Nähfäden genau berechnen kann.

### Vorteile

Das Messsystem kann in einem Inline-Betrieb verwendet werden, was bedeutet, dass das Gelege an der Kamera vorbeifährt oder die Kamera über das Gelege. Die Kamera kann

bis zu einer Messgeschwindigkeit von 1 m/s ein Messfenster von 60 mmx60 mm scannen und auf Fehler überprüfen. Die Kamera ist in einem kompakten und robusten Gehäuse verbaut. Eine flexible Programmierung dient zur Faseranalyse und lässt dem Benutzer jede Möglichkeit, die Gelege individuell auf die gewünschten Anforderungen zu prüfen.

#### Einsatzgebiet

Das Einsatzgebiet erstreckt sich über Textilie, wie CFK/GFK-Matten und Bauteile, bis hin zu Riefen in anderen Materialien und Holzfasern.

#### Technische Daten

Die Kamera besteht aus einem CMOS-Sensor, mit einer Auflösung von 1000x1000 Pixeln mit einem Gesichtsfeld von 60 mmx60 mm und einer Auflösung von 60µm. Das Gelege wird von 96 Hochleistungs-LEDs beleuchtet. Des Weiteren ist es möglich, die Kamera an jedem Industrie-PC anzuschließen, um eine Auswertung durchzuführen. Die maximale Prüfgeschwindigkeit im Scanbetrieb liegt bei 1 m/s. Die Bildauswertungsgeschwindigkeit im Handbetrieb bei 100 ms. Die Abmessungen der Kamera sind ø200 mmx270 mm.

#### Zielgruppen

Die Kamera wird in den Branchen Automotive, Luft- und Raumfahrt, Leichtbau und Renn- und Segelsport eingesetzt.

#### Erläuterung zum Arbeitsprinzip des Sensors

Das Messsystem der Firma Profactor mit der dazugehörigen Kamera dient zur Qualitätskontrolle von Materialien. In der Kategorie werden verschiedene Fehlerindikatoren durch die Kamera aufgezeichnet, wie z.B. Faserausrichtungen, Lücken im Gelege und Nähfäden.

Der Sensor hat eine Beleuchtungseinheit, die um die Flächennormale des Fasergeleges läuft. Durch die Beleuchtungseinheit, welche eine Einheit aus LED's ist, die sich verteilt auf einem Durchmesser befinden, erhält man ein diffuses Bild. Als Grundlage für die Bestimmung der Faserrichtungen der Oberfläche dient das Reflexionsgesetz. Die umlaufende Lichtwelle trifft auf den Sensor und je nach Richtung der einfallenden Welle auf den Sensor kann der Faserwinkel von Rovings erkannt werden.

Durch die einfallende Lichtwelle wird die gesamte Oberfläche des Materials gescannt und mit der Messsoftware ausgewertet. Die Messsoftware wertet die Materialoberfläche

aus und wird durch eine Messmaske beeinflusst, welche voreingestellte Parameter zur Erkennung von speziellen Einflüssen beinhaltet, die nicht erwünscht sind. Diese Einflüsse können Fehlstellen (Gelege) sein. Es können alle reflektierenden Oberflächen gescannt und ausgewertet werden. Das Messsystem kann auch nur die Oberfläche abscannen. Es erkennt auch die unteren Lagen, sofern diese durch Lücken in der oberliegenden Lage durchscheinen, z.B. durch Fehler in dieser Lage. Diese können aber bei Bedarf über Maskeneinstellungen, die im System vorgenommen werden, ausgeblendet werden.

#### Maskeneinstellungen

Die Kamera bietet verschiedene Einstellmöglichkeiten, die es der Kamera erlaubt, in verschiedenen Messmodifikationen zu messen. Durch die Einstellungen in der Messsoftware können Fehler in dem Gelege ausgeblendet werden. Fehler sind unter anderem Nähfäden, die das Ergebnis beeinflussen können, aber auch zu große Lücken in der obersten Lage beeinflussen das Ergebnis des Faserwinkels. [9] [10]

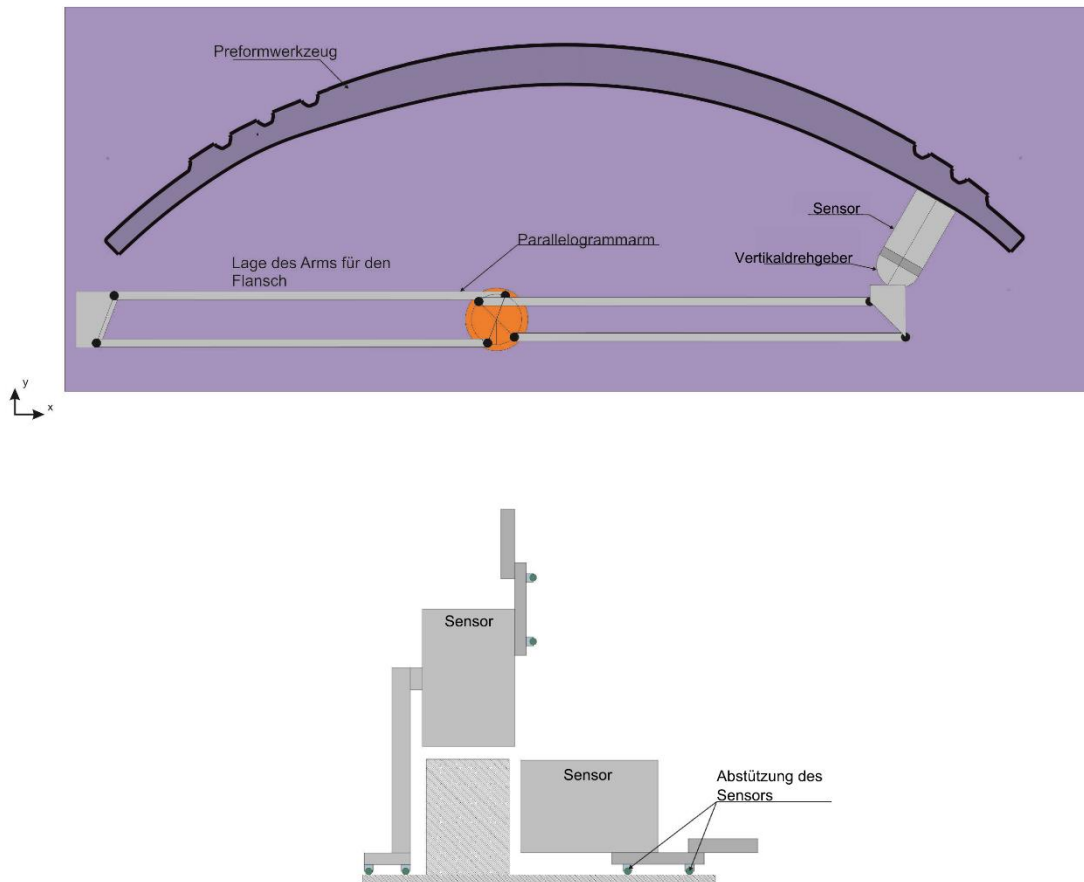
## **3 Konzepte zur Ausrichtung des Sensors**

### **3.1 Konzeptentwurf**

Im Verlauf des Entwicklungsprozesses wurden verschiedene Konzepte erstellt. Die entworfenen Konzepte wurden im Rahmen einer Diskussionsgruppe, bestehend aus internen Experten, vorgestellt. In dieser Diskussionsgruppe wurden die Konzepte beurteilt. Die Teilnehmer wurden zuvor nicht in die Thematik eingewiesen, um spontane Ideen zur Verbesserung der Konzepte zu erhalten. In dieser Diskussion wurden von jedem Teilnehmer Verbesserungsvorschläge eingebracht, um vorher nicht berücksichtigte Fehler in den Konzepten zu minimieren. Die Konzepte wurden dann im weiteren Verlauf der Arbeit um die Vorschläge erweitert bzw. verbessert. Anschließend wurden die Konzepte der Firma Premium Aerotec GmbH Augsburg (PAG) vorgestellt, da die Vermessungen der Full-Scale-Spanne im Rahmen einer Demonstratorfertigung bei PAG stattfinden soll. Das DLR wurde mit der Aufgabe betraut, eine Messunterstützung zum Vermessen der Ablage von Einzellagen bereit zu stellen.

Im folgenden Abschnitt werden die Konzepte mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt. Jedes Konzept wird einzeln vorgestellt und beschrieben.

### 3.1.1 Parallelogrammarm



**Abbildung 2: Konzept mit einem Parallelogrammarm**

Dieses Konzept besitzt einen Arm, auf dem der Sensor befestigt ist. Der Arm ist ein Parallelogramm und ist in Anlehnung an ein Zeichenbrett entstanden. Das Parallelogramm ermöglicht dem Sensor, in eine Ortsrichtung ausgerichtet zu sein. Der Sensor lässt sich zusätzlich mit einem Drehgeber exakt senkrecht zu den Gurtflächen ausrichten. An den Gurtflächen ist der Sensor frei bewegbar, sodass jede Stelle an den Gurten gescannt werden kann. Um den Steg scannen zu können, muss der Arm um  $90^\circ$  gedreht werden. Durch die Drehung steht der Sensor senkrecht auf dem Steg, damit der komplette Steg gescannt werden kann. In der Position zum Scannen des Steg muss die Kamera zusätzlich durch eine Abstützung gehalten werden. Die Abstützung hält den Sensor in einer festen Höhe über dem Steg. Die Toleranzen in den Lagern und die langen Arme führen zu Ungenau-

igkeiten bei der Ausrichtung des Sensors. Mit großen Aufwand könnte die Mechanik automatisiert werden, durch den Einsatz von Winkelsensoren und Linearantrieben bzw. im Zusammenspiel mit einer Steuerung

Vorteile:

- Eine mechanisch feste Ortsausrichtung

Nachteile:

- Die Positionierung in der x-y-Ebene ist ungenau
- Großer Aufwand für eine Teilautomatisierung der Vorrichtung
- Ein hoher Zeitaufwand durch Umbau des Armes und der Sensorausrichtung beim Wechsel von Gurt zu Steg (Winkel, Position in x-y-Richtung)

### 3.1.2 Parallelschienen

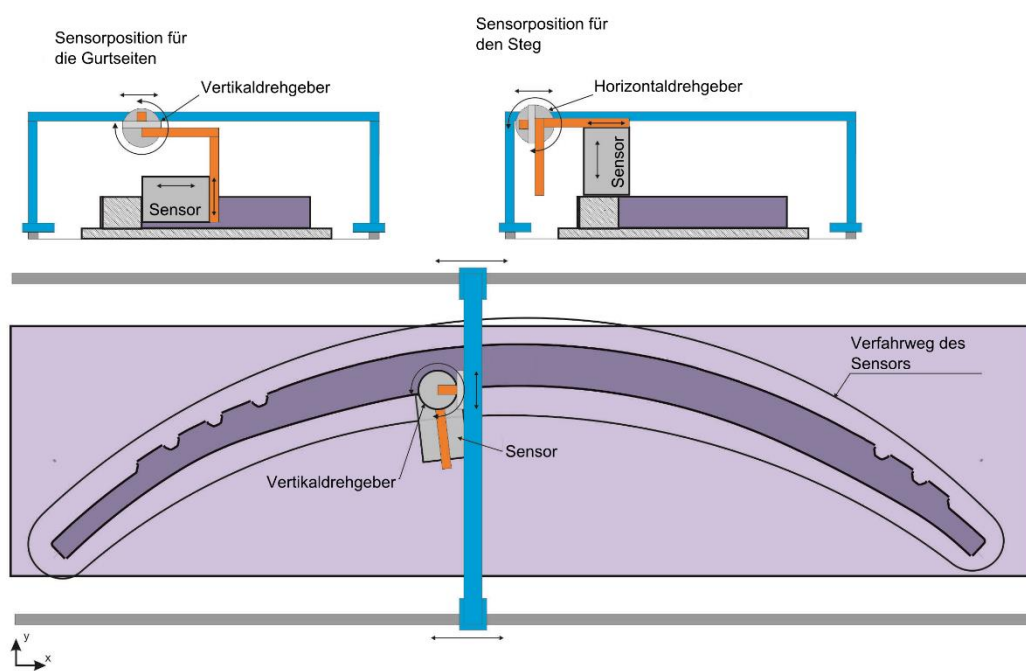


Abbildung 3: Parallelschienenkonzept

Das Konzept besteht aus zwei sich parallel gegenüberliegenden Schienen. Auf den Schienen lässt sich ein Portal verschieben, an diesem Portal ist der Sensor befestigt. Der Sensor ist mit einem horizontalen und einem vertikalen Drehgeber mit dem Portal verbunden. Mit dem Horizontaldrehgeber lässt sich die Kamera senkrecht zum Steg ausrichten, sodass der Sensor den Steg scannen kann. Durch den Vertikaldrehgeber kann der Sensor senkrecht zu den äußeren und inneren Gurtflächen ausgerichtet werden. Durch zusätzlich

verbaute Lineareinheiten würde das Portal und somit auch der Sensor die Möglichkeit erhalten, verfahren zu werden. Durch die Kombination von Horizontal- und Vertikaldrehgeber können in einer Position des Portals der Steg und beide Gurtflächen gescannt werden.

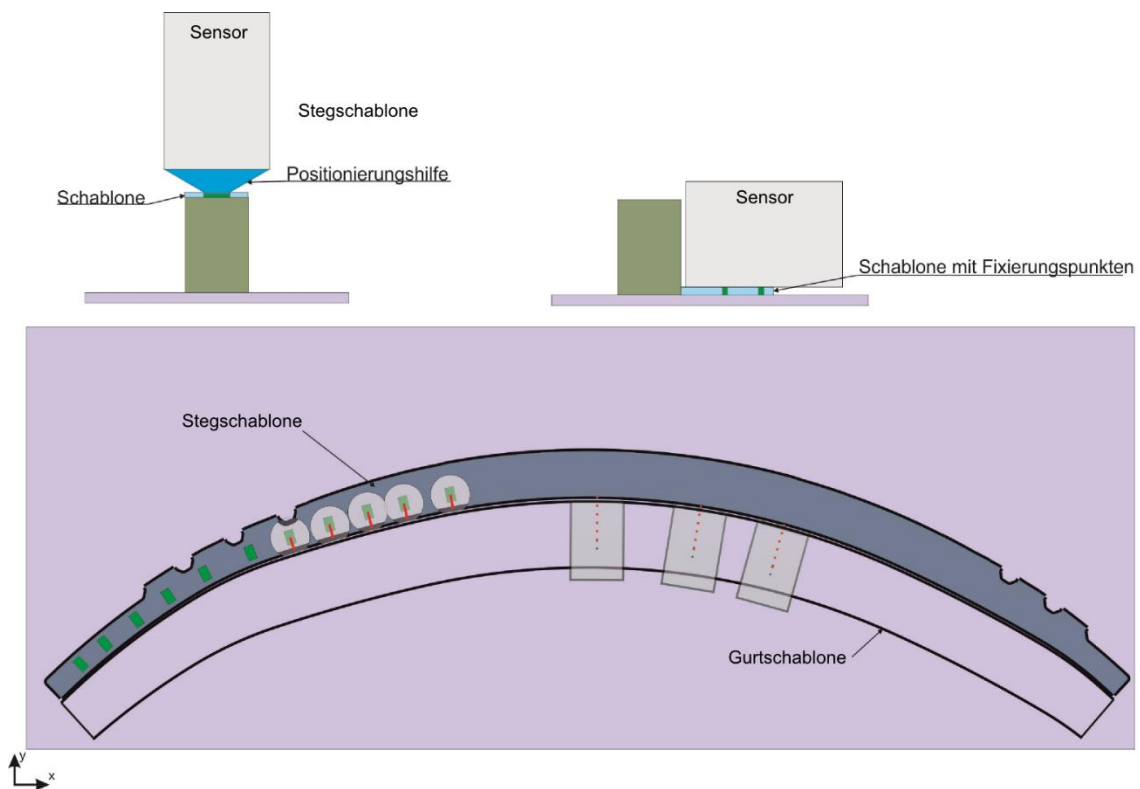
Vorteile:

- In einer Position des Sensor lassen sich Steg- und Gurtbereiche scannen
- Ausrichtung der Kamera auf dem Stegbereich in Richtung der y-Achse
- x- und y-Position unabhängig vom Winkel

Nachteile:

- Zusätzliche Winkelabweichung durch die Drehgeber
- Lineareinheiten und Steuerung

### 3.1.3 Schablone



**Abbildung 4: Schablonenkonzept**

Das Schablonenkonzept bedient sich der Verwendung von Schablonen zur festen Positionierung des Sensors. Zur Anwendung kommen drei Schablonen, eine Schablone für den

Stegbereich und zwei Schablonen für die Gurtbereiche. Die Schablonen haben Positionierungshilfen für den Sensor, damit der Sensor immer an dieselbe Position gebracht wird, unabhängig von der Anzahl der Lagen, die drapiert wurden. Die Stegschablone hat ausgefräste Taschen, diese sind an relevanten Stellen eingebracht, an denen Messungen durchgeführt werden sollen. Der Sensor wird in den Gurtbereichen mit Bohrungen positioniert, durch die Bohrungen wird der Sensor senkrecht zu den Flächen ausgerichtet.

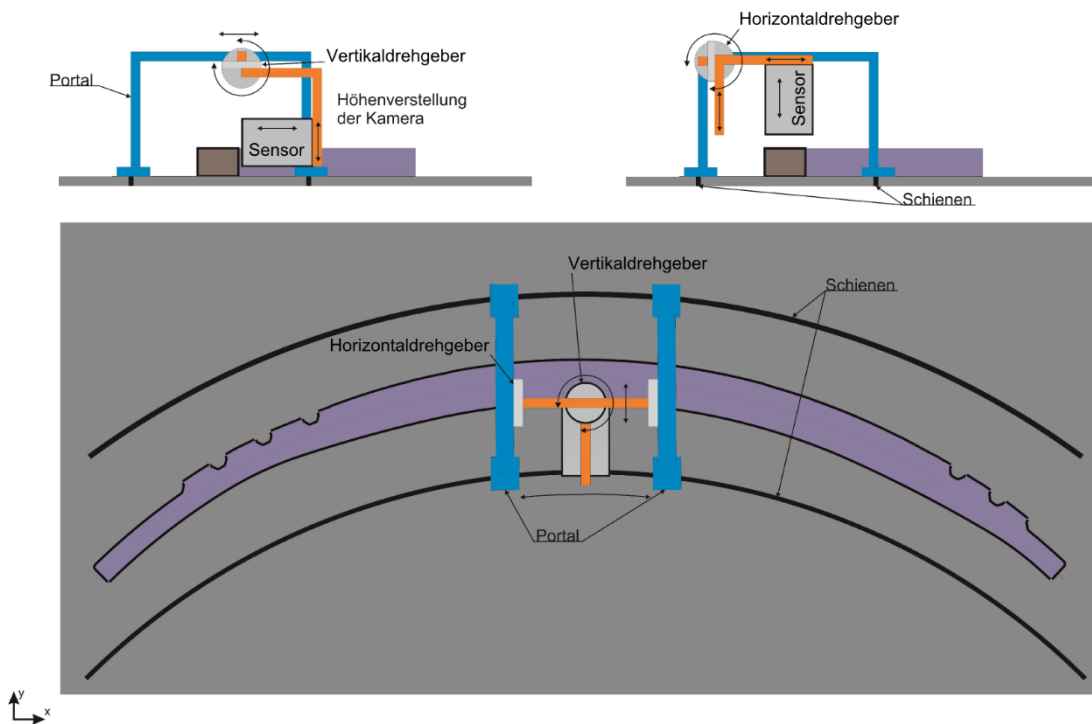
Vorteile:

- Einfache Konstruktion
- Kostengünstig durch die Verwendung von Serienteilen
- Ausrichtung, Winkel und x-y-Position der Kamera in die Schablone eingebracht, dadurch ein relativer Bezug zum Preformwerkzeug
- autark von externer Anlagentechnik
- hohe Reproduzierbarkeit durch gleichbleibende Positionen der Kamera

Nachteile:

- Unhandliche Vorrichtung, da drei Schablonen genutzt werden, die viel Platz benötigen, zwei für die Gurte und eine für den Steg
- Der Sensor muss von Messpunkt zu Messpunkt umgesteckt werden, dadurch entsteht ein großer zeitlicher Aufwand
- Die Detektionsstellen sind begrenzt durch die Anzahl der Taschen zur Positionierung auf der Stegschablone
- Schablonenanpassung an Preformhöhe/dicke

### 3.1.4 Bahnschienen



**Abbildung 5: Bahnschienenkonzept**

Wie in der Abbildung 5 zu sehen, hat dieses Konzept Ähnlichkeiten zu dem Konzept Parallelschienen. Der Unterschied zwischen den beiden Konzepten liegt in der Form der Schienen, bei dem Parallelschienenkonzept liegen die Schienen in gerader Form vor, im Gegensatz zu den gekrümmten Schienen. Die Krümmung orientiert sich an einer Bezugskurve, die durch die Mitte des Werkzeuges verläuft. Die Bezugslinie bzw. Bezugskurve kann beliebig innerhalb des Werkzeuges gewählt werden. Die Schienen können direkt in das Werkzeug integriert werden. Auf den beiden Schienen läuft die Sensorhalterung auf einer Kreisbahn. Hier wird der Sensor, genau wie in dem Konzept Parallelschienen, in einem Portal montiert. Die Kamera lässt sich über einen Vertikal- und Horizontaldrehgeber auf das Werkzeug ausrichten. Es können in einer Position Gurt und Steg gescannt werden.

Vorteile:

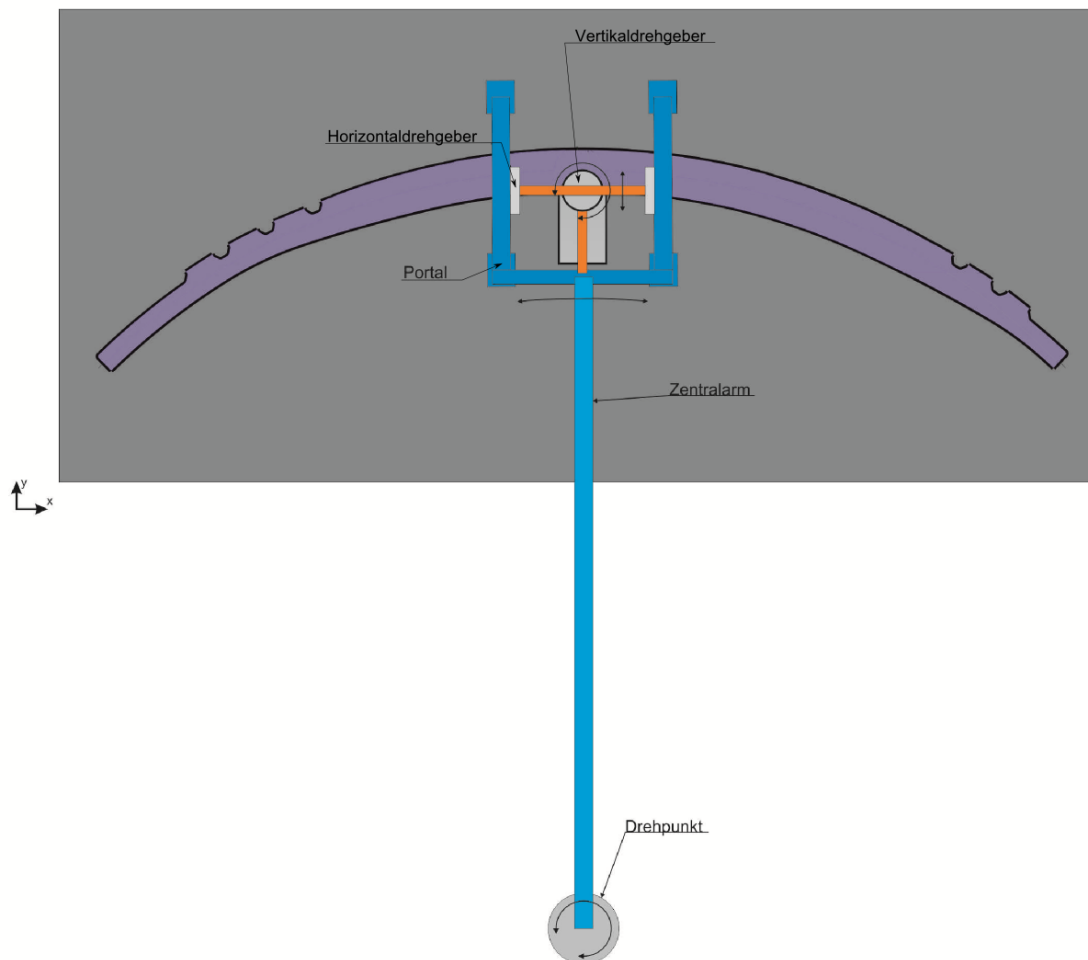
- In einer Stellung des Portals können Gurt und Steg in einer Position im Umfang detektiert werden
- Durch die Bahnkurve werden direkt verwertbare Faserrichtungen auf den Steg- und Gurtflächen gescannt

- Es können nahezu beliebige Bahnkurven genutzt werden

Nachteile:

- Der Antrieb/Steuerung können aufwendig werden
- Kosten durch Sonderanfertigungen der Bahnkurven

### 3.1.5 Zentralarm



**Abbildung 6: Zentralarm**

In dem Konzept Zentralarm, siehe Abbildung 6, dreht sich ein Portal um einen zentralen Punkt. An diesem Punkt ist ein Drehgelenk montiert. An diesem Gelenk befindet sich ein Ausleger, an dem der Sensor in einem Portal montiert ist. Die Position des Sensors wird über den Winkel und die Länge des Armes bestimmt. Der Drehpunkt liegt in einem Punkt, in dem sich die meisten Mittelpunkte der Radien des Spants vereinen. Das Portal ermöglicht dem Sensor, Messungen an den Steg- und Gurtflächen durchzuführen. Die Faserwinkel lassen sich direkt auswerten.

Vorteile:

- Einfacher Auf- und Abbau möglich, durch einen Ankerpunkt
- Relative Position zum Preformwerkzeug
- Scannen von Steg- und Gurtflächen in einer Position
- Direkt verwertbare Sensorposition für den Gurt und Steg

Nachteile:

- Der Drehpunkt muss fixiert zum Preformwerkzeug sein
- Großer Platzbedarf für den Zentralarm

### 3.1.6 Roboter

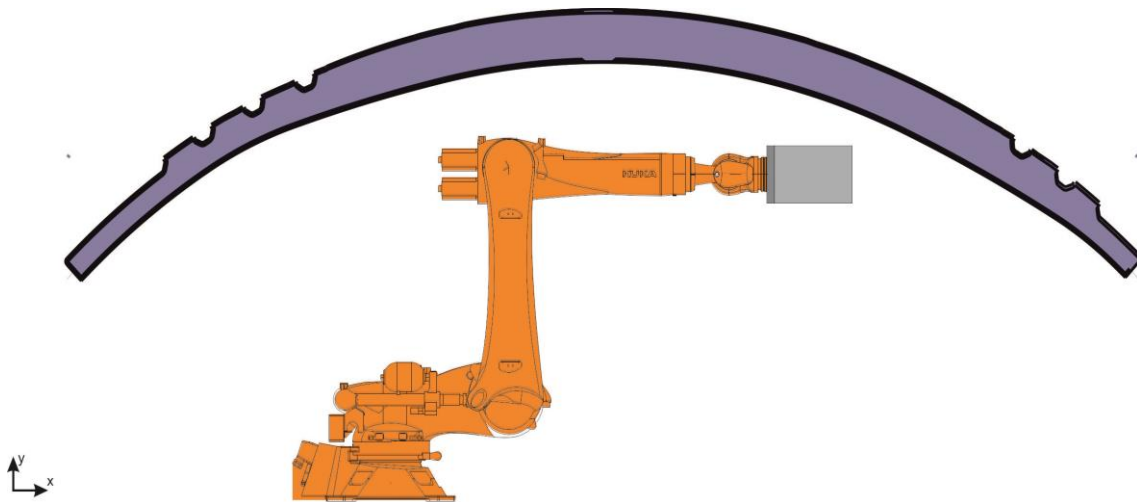


Abbildung 77: Spantscannen mit Hilfe eines Kuka-Roboters [11]

Der Sensor wird mit Hilfe eines Roboters geführt, wie in der Abbildung 77 exemplarisch gezeigt wird. Der Roboter ermöglicht eine hohe Wiederholgenauigkeit beim Anfahren der Messpunkte. Es kann ein komplett flächendeckender Scan durchgeführt werden, somit erhält dieses Konzept die maximale Anzahl an möglichen Messstellen. Durch einen nahezu vollständigen Scan wird jeder Faserwinkel aufgenommen, dadurch kann ein besserer Vergleich zu den Simulationsdaten erfolgen. Durch die Verwendung eines Roboters ist das System komplett losgelöst vom Werkzeug und zudem ermöglicht der Roboter große Zeitersparnisse, denn der Roboter muss sich nicht anhand von Markierungen über den Spant orientieren und der Roboter benötigt keine Haltepunkt während der Messung.

Vorteile:

- Einfacher Roboter mit verlängertem Arm
- hoher Automatisierungsgrad, da kein Stoppen für die Bildaufnahme benötigt wird, die Sensor arbeitet im Scanbetrieb
- hohe Wiederholgenauigkeit mit  $\pm 0,06$  mm

Nachteile:

- Hohe Anschaffungskosten, wenn kein Roboter oder Positioniereinheit vorhanden ist
- Programmieraufwand für eine Steuerung konnte zunächst nicht abgeschätzt werden

### **3.2 Anforderungen und Bedarf**

Die Anforderungen sind in der Zusammenarbeit einer kleinen Experten-Gruppe entstanden und lagen zur Bewertung der einzelnen Konzepte vor. Die Bewertung erfolgte nach dem Prinzip einer Ampel. Die Bewertung sollte zunächst Anhaltspunkte liefern, welches Konzept den größten Anreiz liefert:

“Grün” steht für den Vorteil eines Konzeptes

“Gelb” steht für einen neutralen Punkt

“Rot” steht für einen negativen Aspekt des Konzeptes

Konzepte Kriterien	1	2	3	4	5	6
x-y-Ausrichtung	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Green
Sensor-Ausrichtung	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green
Raumbedarf	Yellow	Yellow	Red	Red	Yellow	Yellow
Kosten	Yellow	Red	Green	Yellow	Green	!/? Red

Tabelle 1: Konzeptbewertung

In der Tabelle 1 werden die Kriterien bewertet.

1. Parallelogrammarm
2. Parallelschienen
3. Schablonenkonzept
4. Bahnschienen
5. Zentralarm
6. Roboter

### Erläuterung der Bewertungskriterien

Es existieren vier Kriterien, nach denen die Konzepte bewertet wurden. Diese vier Kriterien stellten sich als diejenigen heraus, die für die Umsetzung einer Konstruktion im Rahmen dieser Studienarbeit die größten Auswirkungen haben und zudem die qualitativ besten Messergebnisse liefert.

**x-y-Ausrichtung**

Bei der Bewertung dieses Kriteriums wird beurteilt, wie sich die Vorrichtung verhält, d.h. wie stabil sie ist und wie positionstreu sie sich nach Auf- und Abbau bzw. Montage und Demontage des Werkzeugs verhält. Je sicherer die Position gehalten werden kann, desto eher ist die Vorrichtung geeignet, eine maximale Präzision wird angestrebt.

**Sensor-Ausrichtung**

Anhand dieses Kriteriums sollte beurteilt werden mit welcher maximal größten Genauigkeit der Sensor ausgerichtet bzw. positioniert werden kann. Je genauer die Ausrichtung, desto kleiner ist die Streuung und die Abweichung zu den realen Werten verbessert sich. Da dieses Kriterium einen großen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Messungen hat, muss hier eine möglichst hohe Genauigkeit angestrebt werden.

**Raumbedarf**

Der Raum, den die Vorrichtung einnehmen sollte, soll möglichst klein sein, Vorzugsweise sollte die Vorrichtung losgelöst von größeren zusätzlichen Aufbauten installiert werden können. In diesem Zusammenhang spielt auch die Transportmöglichkeit eine ausschlaggebende Rolle und der damit verbundene Stauraum.

**Kosten**

Dieses Kriterium ist sehr wichtig, denn die Kosten sollten für die Vorrichtung möglichst gering gehalten werden. Zusätzliche Kosten durch Antriebe und Positionierungseinheiten sollten strikt vermieden werden.

**3.3 Auswahl eines Konzeptes**

Es musste sich für eins der Konzepte entschieden werden. Für die Konstruktion kam wegen der schnellen Umsetzbarkeit das Schablonenkonzept zur weiteren Verwendung. Dieses Konzept wurde zudem von dem Auftraggeber PAG favorisiert. Auf dieses Konzeptes wurden alle weiteren Schritte in der Konstruktion und in den Versuchen ausgerichtet. Das Konzept dient als Grundlage und wurde während der Konstruktionsphase weiter verändert. Die Veränderungen bezogen sich während der Konstruktion immer auf das Schablonenkonzept.

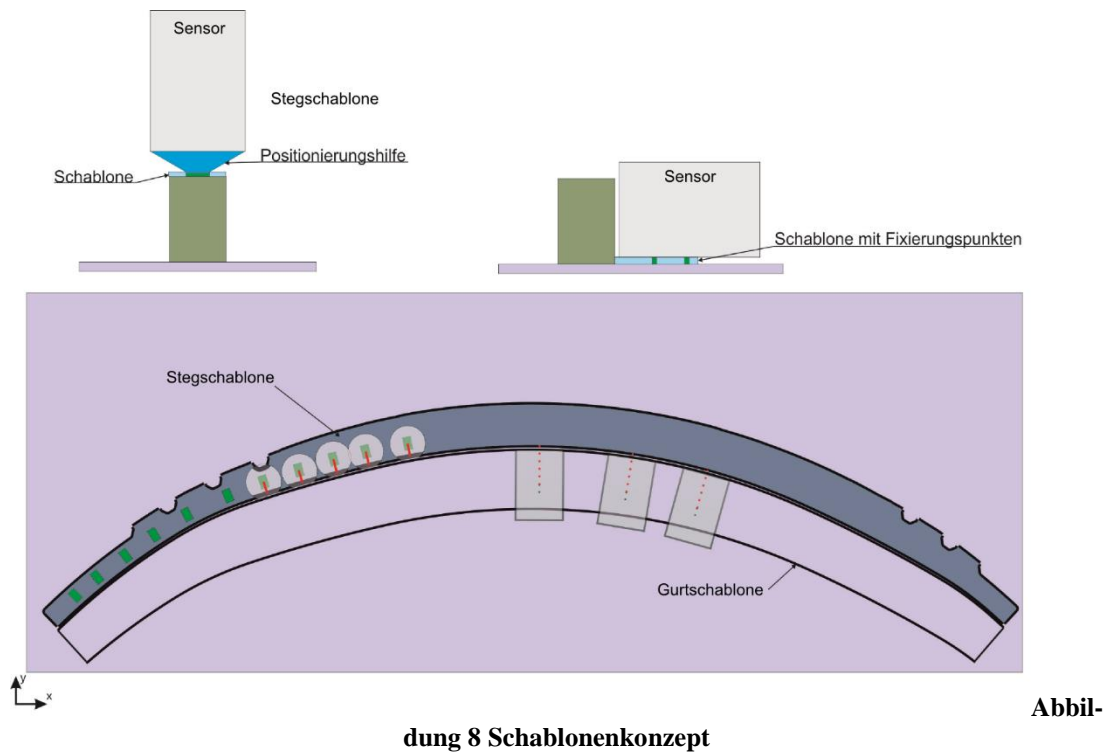


Abbildung 8 Schablonenkonzept

Abbil-

## 4 Versuche

In diesem Abschnitt wurden Randbedingungen für die Umsetzung der Konstruktion der Schablonen unter Hilfe von Versuchen erprobt. Zum einem ging es um die Materialbestimmung, Bestimmung von Markierungen, Bestimmung von Positionsnummern und zum anderen zur Erzeugung eines Bezugssystems zwischen dem globalen Koordinatensystem und den gemessenen Faserrichtungen.

### 4.1 Auswahl des Schablonenmaterials

Die Materialauswahl wurde durch die Auswahl des Konzeptes beeinflusst, sodass der Entschluss gefasst wurde, einen transparenten Kunststoff zu verwenden, wegen des geringen Gewichtes und der guten Bearbeitbarkeit. Die Auswahl der Kunststoffe fiel auf Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polycarbonat (PC). Beide Kunststoffe sind transparente thermoplastische Kunststoffe.

PMMA zeichnet sich durch seine gute Kratzbeständigkeit aus, aber bricht unter Belastung spröde. PC ist kratzempfindlicher, dafür aber verfügt PC über gute duktile Eigenschaften. Die beiden Kunststoffe lassen sich gut spanend bearbeiten, was zusätzlich für eine Bearbeitung der Oberfläche spricht. Mit den ausgewählten Kunststoffen wurden in den nächsten Abschnitten fertigungsbezogene Versuche durchgeführt. Die Kunststoffe wurden als Plattenhalbzeuge bestellt und für die Versuche weiter verarbeitet.

### 4.2 Markierungen und Positionsnummern

Für die Umsetzung einer dauerhaften Markierung wurde die Gravur festgelegt, wegen der Beständigkeit gegenüber Abnutzen durch Reibung zwischen Faserhalbzeugen und Kunststoff. Alle Versuche zur Fertigung wurden auf die Umsetzung einer Gravur ausgerichtet. Das Ziel der Versuche war die optimale Breite bzw. Tiefe einer Gravur zu erhalten. Für die Umsetzung der Positionsnummern standen verschiedene Strategien zur Auswahl.

An einem Textilcutter wurden die ersten Versuchsplatten, PMMA und PC Platten, angefertigt. Zunächst wurden mit Hilfe eines Ziehmessers Linien in die Versuchsplatten eingebracht. Das Ziehmesser stellte sich als nicht zielführend heraus, denn das Ziehmesser warf einen nicht gewollten Grad auf. Dieser Grad war schlecht zu entfernen und dadurch störend. Des Weiteren kamen Probleme mit dem Textilcutter hinzu, denn über längere

Distanzen konnte der Cutter keine gleichbleibende Bearbeitungstiefe einhalten, wegen dem Transportfließ und der Fräsunterlage.

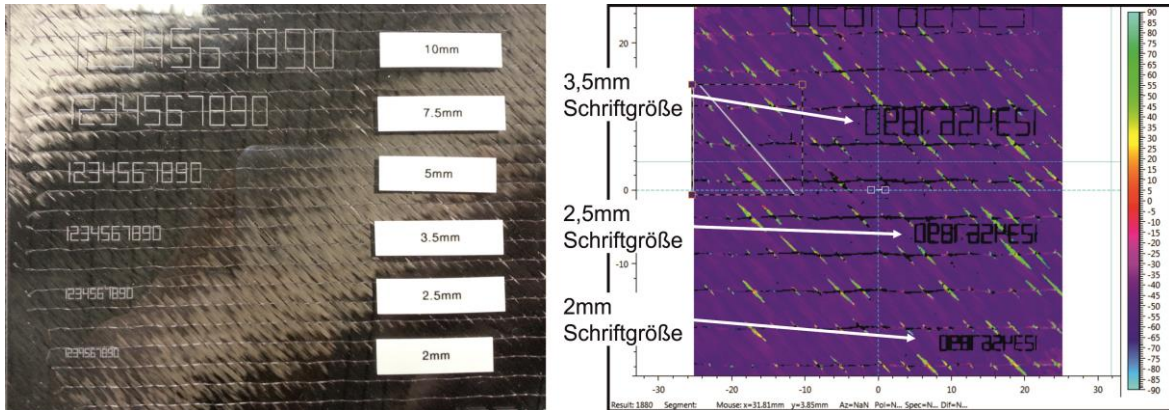
Die weiteren Versuche wurden dann an einer Fräs- und Graviermaschine vorgenommen. Die Neuwahl der Maschine hatte einen Einfluss auf die spätere Fertigung der Schablone, denn die bearbeitbare Länge wäre am Textilcutter größer gewesen. Durch die größere Bearbeitungslänge hätte die Schablone als ein Bauteil entstehen können. Die Gravuren wurden mit einem Gravierstichel mit einem Spitzenwinkel von  $60^\circ$  angefertigt. Zur Findung der optimalen Breite der Gravur wurden verschiedene Eintauchtiefen für den Stichel gewählt. Die Tiefen waren mit 0,05 mm Schritten unterteilt. Angefangen von einer Tiefe von 0,05 mm bis hin zu einer Tiefe von 0,3 mm. Das Ergebnis zeigte, dass die Tiefe von 0,1 mm sehr gut zu erkennen war. Damit war die Tiefe der Gravur mit 0,1 mm bestimmt, die daraus resultierende Breite der Gravur betrug 0,11 mm.

Die aufgenommenen Faserrichtungen müssen zur Dokumentation mit Positionsnummern versehen werden, dazu standen drei Strategien zur Auswahl. Bei den drei Möglichkeiten handelte es sich um das Aufkleben von QR-Codes, das Aufdrucken oder das Gravieren von Positionsnummer.

Mit den QR-Codes gäbe es die Möglichkeit mehrere Informationen anzugeben. Der QR-Code hätte die Messstellenummer und die Koordinaten direkt mit abspeichern können. Durch die Verwendung des QR-Codes wäre das Messsystem in der Lage gewesen, den Code selbstständig auszulesen und somit alle wichtigen Informationen, Positionsnummer etc., aufzuzeichnen. Das Messprogramm hätte selbstständig erkannt, welche Messwerte zu welchen Koordinaten gehört. Der QR-Code konnte nicht verwendet werden, weil das Lesen des QR-Codes noch nicht im Messsystem implementiert war.

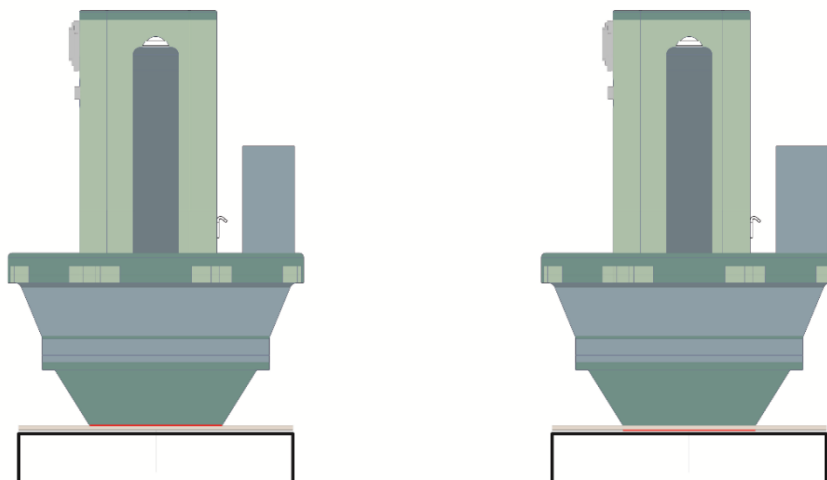
Zur weiteren Betrachtung kamen gedruckte und gravierte Positionsnummern. Die Positionsnummern. Die Wahl für die Gestaltung der Positionsnummer fiel auf die gravierten Positionsnummern. Sie haben den Vorteil, dass sie beständiger als die aufgedruckten Positionsnummern sind. Die aufgedruckten Nummern sind eine einfache Lösung, die an anderer Stelle gut verwendet werden können, aber für die Verwendung an den Stegschablonen ungeeignet sind. Die gedruckten Positionsnummern könnten für die Gurtschablonen gebraucht werden. Durch die Demontage bzw. Montage könnte es im Stegbereich zu Abnutzungen der Positionsnummern kommen.

Für die Bestimmung der optimalen Schriftgröße für die Positionsnummern wurden verschiedene Schriftgrößen erzeugt.



**Abbildung 9: Schriftgrößenauswahl und Validierung der Gravurmethode zur optimalen Sichtbarkeit im Scan**

Wie in der Abbildung 9 zu sehen ist wurden mehrere Schriftgrößen gefertigt. Die unterschiedlichen Schriftgrößen dienten dafür, die optimalen Größen der Positionsnummer zu ermitteln. In der rechten Bildhälfte der Abbildung 9 sind die Positionsnummern spiegelverkehrt dargestellt. Die ursprünglichen Positionsnummern wurden auf der Oberfläche gefertigt, welche dem Sensor zugewandt war, siehe linke Hälfte der Abbildung 10, die mit rot gekennzeichnete Linie beschreibt die Gravur. Die Position der Nummern hatte einen Schatten der Ziffern im Messprogramm zur Folge. Durch den erzeugten Schatten konnten die Positionsnummern nur sehr schwer identifiziert werden. Als Reaktion auf diesen Schatten wurden die Positionen der Nummern auf die Fläche verlegt, welche dem Sensor abgewandt ist, wie in der rechten Hälfte der Abbildung 10 zu sehen ist.



**Abbildung 10: Erklärung der Position der Gravur**

Die Oberfläche, auf denen sich die Positionsnummern befinden, ist die, die in Kontakt mit dem Fasergelegen kommt, siehe rechte Hälfte der Abbildung 10. Aus den gefertigten Positionsnummern stellte sich die 2,5 mm Schriftgröße als das Optimum heraus. Als Verbesserung wurde der Abstand zwischen den Positionsnummern geändert. Ein vergrößerter Abstand stellte eine Verbesserung der Erkennbarkeit dar. Der zuvor gefertigte Abstand wurde von 0,5 mm auf 1 mm vergrößert.

**4.3 Markierungen**

Das Ziel ist es, einen Bezug zwischen dem globalen Koordinatensystem und den gemessenen Faserrichtungen zu erzeugen. Die von der eingesetzten Sensorkamera gemessenen Faserwinkel werden gegenüber dem internen Koordinatensystem (KOS) gemessen, das mit seinen Achsen parallel zu den Bildkanten und damit zum Sensorgehäuse ausgerichtet ist. Die Faserrichtung wird von der unteren Bildkante ausgemessen, die horizontale Bildkante stellt die 0°-Faserrichtung. Das verwendete Messfenster hat eine Größe von 40 mm x 40 mm und ist in 9 Zellen unterteilt. Die Zellen sind in 3 Spalten und 3 Zeilen unterteilt. Das interne KOS muss mit einer Markierung auf den Schablonen ausgerichtet werden, damit ein Bezug zwischen globalem KOS und Faserrichtung erzeugt werden kann.

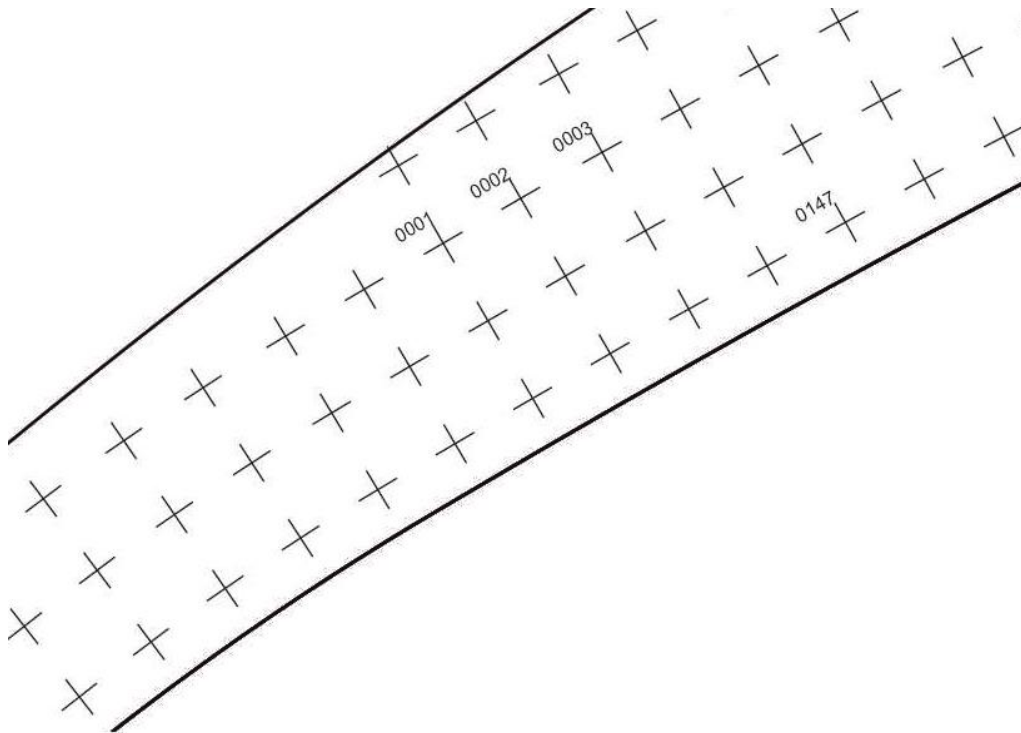
**4.4 Messversuche**

Für eine Messung wurden zwei verschiedene Strategien entwickelt, damit eine Ausrichtung des Sensors erfolgen kann.

**4.4.1 Definition der Messverfahren****Lokales Koordinatensystem**

Die erste Strategie definiert für jeden Messpunkt ein individuell, an der Geometrie des Bauteils orientiertes KOS für die Sensor-Ausrichtung. Damit wird angestrebt, mit dem Messwert gleich einen Bezug der gemessenen zur erwarteten Faserausrichtung herstellen zu können. Diese Strategie kann wegen den geometrischen Einflüssen aus der Kontur zu Fehlinterpretationen bei der Auswertung von Faserausrichtungen führen. Der Ausgangspunkt für jeden Messpunkt ist die Centre-Line, diese wird in späteren Abschnitt genauer erläutert. Die Messpunkte sind ein lokales KOS und sind definiert über einen Punkt und

eine Ausrichtung. Die Ausrichtungen entsprechen den angenommen Faserrichtungen, die aus der Konstruktion der Centre-Line entstanden sind. Eine genauere Ausrichtung der KOS müsste über eine Drapiersimulation erfolgen, die Ausrichtung der KOS würde dann ungefähr den vorliegenden Faserrichtungen entsprechen. Ein einzelnes Koordinatensystem hat die Größe von 12,5 mm x 12,5 mm und besitzt eine dreistellige Positionsnummer, siehe Abbildung 11. Die Abbildung 11 zeigt ein Beispiel, wie die Positionierung der orientierten KOS aussehen könnte.



**Abbildung 11: Messvariante lokales KOS**

Die lokalen KOS dienen als Bezug für die Sensorkamera, um die gemessene Faserrichtung mit der Soll-Faserrichtung zu vergleichen. Die Berechnung des  $\Delta$ -Winkel erfolgt mit dem SOLL-Winkel abzüglich dem IST-Winkel.

Vorteile:

- Direkt auswertbare Faserwinkel
- Zeitersparnisse in der Auswertung

Nachteil

- ungenaue Konstruktion der lokalen KOS, durch den Einfluss der geometrischen Gegebenheiten, diese können zu Fehlinterpretationen in der Auswertung führen
- Für die genaue Konstruktion wird eine Drapiersimulation benötigt

### Globales Flächengitter

Als zweite Strategie wurde ein Gitter entwickelt, dieses Gitter definiert sich durch die Ausrichtung am globalen KOS. Die Flächen, die entstehen, haben eine Größe von 40 mm x 40 mm, siehe Abbildung 12. In jeder Messfläche (Steg-Flächen, innerer Gurt und äußerer Gurt) ist je ein einziges KOS in der Mitte eines Kästchens definiert, an dessen Richtung die Sensorkamera ausgerichtet wird. Die Blickrichtung des Sensors ist immer senkrecht zur Fläche. Jede Fläche ist mit einer fortlaufenden dreistelligen Positionsnummer gekennzeichnet.

Die zweite Strategie definiert in jeder Messfläche (Web-Fläche, Inner-Flange-Fläche und Outer-Flange-Fläche)

Mit dem Gitter und der dadurch resultierenden größtmöglichen Flächenabdeckung, wäre diese Variante gut für die Erzeugung einer Gesamtdarstellung des Faserwinkelfeldes geeignet. Dazu würden die Einzelbilder zusammengeheftet, d.h. gestitcht, werden, aus den gestitchten Bildern würde sich ein Gesamtbild der Faserrichtungen ergeben. Dieses gestitchte Bild könnte in eine Drapiersimulation einfließen bzw. zum Vergleich mit einer Drapiersimulation dienen.

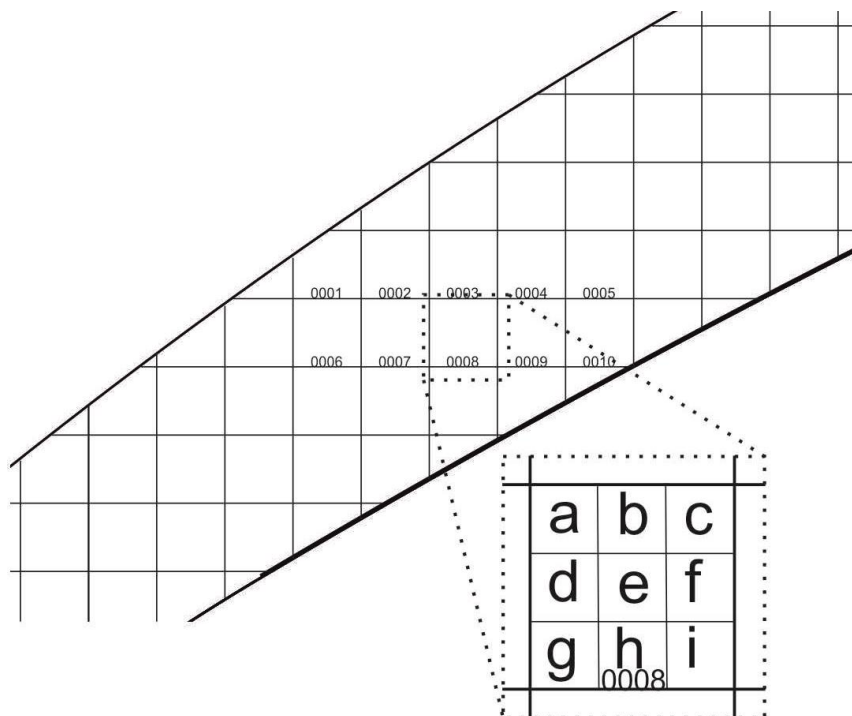


Abbildung 12: Gitter Variante für den Stegbereich

Vorteile:

- Einfache Konstruktion
- Möglichkeit zum stitchen der Bilder
- Größtmögliche Flächenabdeckung

Nachteile:

- Nachträgliche Berechnung des Winkels
- ...

#### 4.5 Zusammenfassung und Auswahl

Für die Auswahl der richtigen Messpunkte wurde ein weiterer Versuch durchgeführt. Dieser Versuch diente dem zeitlichen Vergleich der beiden Strategien und wurde mit zwei Testplatten durchgeführt, jeweils eine Platte mit lokalem KOS und einer Platte mit einem Gitter.

Die beiden Platten hatten jeweils 10 Messpunkte. Es wurde während der Versuche die benötigte Zeit gemessen, um diese zehn Messstellen zu messen. Die Versuche wurden mit zwei verschiedenen Herangehensweisen aufgezeichnet. Die beiden Methoden unterschieden sich in der Ausrichtung des Sensors zu den Messstellen. In der ersten Methode wurde der Sensor direkt auf die KOS bzw. Gitter ausgerichtet und die Referenzlinien in Deckung gebracht. In der zweiten Methode wurde der Sensor grob ausgerichtet, sodass der Messpunkt im angezeigten Bildausschnitt lag. Bei der nicht ausgerichteten Methode musste im Messprogramm des Sensors das Messfenster per Hand im Nachhinein ausgerichtet werden.

Lokales KOS	Ausgerichtet	Nicht ausgerichtet
Gelege 1	6:68 min	2:45 min
Gelege 2	3:22 min	1:43 min

**Tabelle 2: Zeitaufzeichnung für die Variante lokales KOS**

Gitter	Ausgerichtet	Nicht ausgerichtet
Gelege 1	8:48 min	6:47 min
Gelege 2	6:47 min	1:59 min

**Tabelle 3: Zeitaufzeichnung für die Variante Gitter**

Mit diesen Versuchen wurde bestimmt, welche Methode potentiell zur Verwendung kommen kann. Die Zeiten sollten als Indikatoren dafür dienen, welche Methode die schnellste Abarbeitung von Messpunkten ermöglicht. Einen Einfluss auf die Zeit haben die Anzahl an Messpunkten und die Eingewöhnung an den Sensor, z.B. Bedienung der Tasten zum Aufzeichnen der Bilder und deren Abspeichern. Die Eingewöhnung betrifft die Bedienung und das Gefühl für den Sensor, wie dieser gedreht und gewendet werden muss. Es zeigt sich in der Tabelle 2 und der Tabelle 3, dass selbst nach einer kurzen Eingewöhnungszeit bei der Variante lokales KOS ein größerer zeitlicher Vorteil entstand im Vergleich zum Gitter. Aus den zeitlichen Unterschieden zwischen den beiden Varianten lassen sich auch Rückschlüsse auf die Erkennbarkeit der lokalen KOS und des Gitters schließen. Die lokalen KOS konnten leichter zugeordnet werden und die Strategie wurde auf Wunsch des Projektpartners ausgewählt. Die Zuordnung der Positionsnummer zu dem jeweiligen lokalen KOS war eindeutig. Die lokalen KOS wurden dann in der weiteren Konstruktion für den Stegbereich verwendet, für den Gurtbereich kommt die Gitterstrategie zur Anwendung, denn hier ist die Position des Sensors durch die Bauteile definiert. Der Sensor ist in den Gurtbereichen in jeder Position senkrecht zur Fläche ausgerichtet.

## 5 Konstruktion der Bauteile

In diesem Kapitel wird die Konstruktion des Versuchsstandes dokumentiert. Das Konzept Schablone, siehe Kapitel 3.1.3, wurde als Grundlage für die Konstruktion verwendet. Das Ziel der Konstruktion war die Erstellung einer einsatzfähigen Versuchsvorrichtung für die Faserrichtungsmessung von Fasergelegen an einem Versuchswerkzeug. Wichtige Teilaspekte für die Umsetzung wurden im vorab mit Versuchen geklärt. Die Erkenntnisse aus der Versuchsvorrichtung sollen für eine spätere endgültige Vorrichtung zum Bau von realen Spanten dienen.

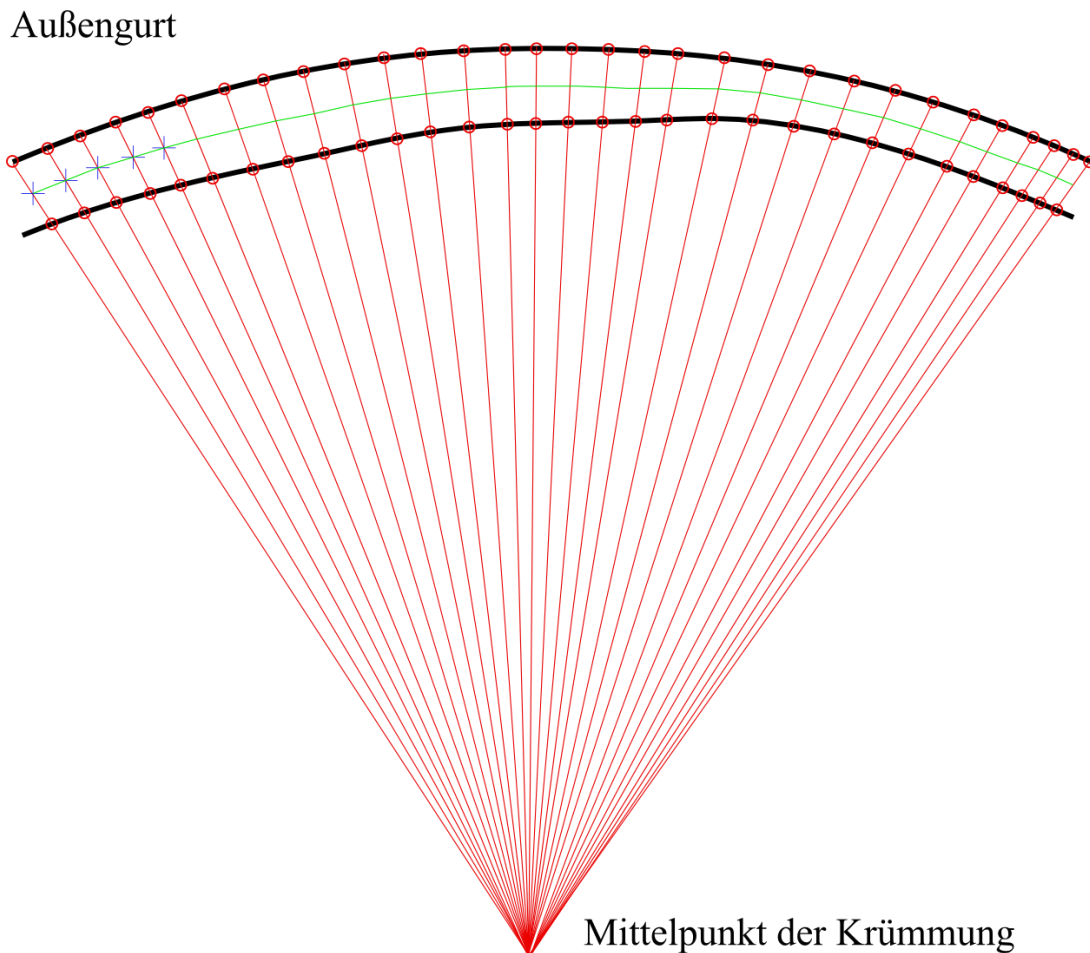
### 5.1 Stegschablonen

Die Stegschablone ist das Hauptbauteil der Vorrichtung und stellte den zentralen Punkt während der Konstruktion dar. Konstruktive Bestandteile der Stegschablone waren unter anderem die Kontur, die Messpunkte und die Verbindung zum Werkzeug.

Die Schablone ist ein zweigeteiltes Plattenbauteil aus 3 mm starkem transparenten Polycarbonat. Die beiden Bauteile zusammen erstrecken sich über das gesamte Werkzeug. Auf den Schablonen befinden sich die Messpunkte, dargestellt als lokale KOS mit Positionsnummer. Die Messpunkte liegen auf der Fläche, welche dem Material zugewandt ist, siehe Abbildung 10. Auf der Stegschablone wurden 228 Messpunkte erzeugt. Die Gravur wurde spiegelverkehrt gefertigt, um einen Schatten zu vermeiden, wie schon im vorherigen Kapitel 4 beschrieben.

#### Centre-Line

Die Centre-Line stellt einen wichtigen Aspekt bei der Erzeugung der Messpunkte für die Stegschablone dar. Alle auf der Schablone erzeugten Messpunkte wurden von der Centre-Line aus konstruiert bzw. positioniert. Zur Konstruktion der Centre-Line diente der Außengurtbereich des Werkzeuges, denn der Außengurt besitzt eine gleichmäßige Krümmung. Vom Krümmungsmittelpunkt aus wurde die Kontur des Außengurtes mit den Linien in gleichmäßige Abschnitte geteilt, siehe die Aufteilung in Abbildung 13. Die Linien erzeugen Schnittpunkte mit dem Außengurt und Innengurt. Die Hälfte der Strecke zwischen den Schnittpunkten wird in der Abbildung 13 mit den Kreuzen gekennzeichnet. Die Kreuze dienen zur Erzeugung der Centre-Line.



**Abbildung 13: Konstruktion der Centre-Line**

Ausgehend von der Centre-Line wurden alle 228 Messpunkte für die Stegschablone erzeugt.

Die äußere Kontur der Schablone folgte dem Verlauf des Werkzeuges. In die Kontur der Schablonen wurden schwalbenschwanz ähnliche Laschen konstruiert. An diesen Laschen soll eine Folie, mit der Nummerierung der Gurtpositionen, aufgehängt werden können. Die entsprechende Folie wird im nächsten Abschnitt beschrieben. Einen wichtigen Punkt stellt die Verbindung der Schablone zum Werkzeug dar. Diese Verbindung wurde für den Versuchsaufbau mit einer Traverse gelöst. Es war vorgesehen, dass die Schablone über die Traversen mit dem Werkzeug fest verbunden ist. Die Verbindung von Schablone zu Traverse erfolgte mit zwei Stiften je Seite. Durch die beiden Stifte wurde die Position gewahrt und diese beiden Stifte dienten zur vertikalen Führung der Schablonen.



**Abbildung 14: Stegschablone mit lok. KOS**

## **5.2 Folien**

Die Folien tragen die Positionsnummer für die Messpunkte, die auf den Gurtflächen des Spantes liegen. Das Material der Folien ist transparente PVC-Folie mit einer Breite von 0,25 mm. Die Folien mussten die gesamte Gurtlänge und eine minimale Höhe von 80 mm abdecken. Die Folien decken den inneren und äußeren Gurt ab. Auf den Folien sind für den inneren Gurt 52 Messpunkte und für den äußeren Gurt 56 Messpunkte markiert. Für die Versuchsvorrichtung konnten nur einreihig Positionsnummer auf die Folien aufgebracht werden. Die Positionsnummern wurden auf die Folien gedruckt. Ein Drucker, zur Beschriftung von Probenkörpern, wurde zur Erzeugung der Nummerierung auf den Gurtfolien verwendet.



**Abbildung 15: Aufhängung und Gurtfolie**

Damit die Folien mit an die Stegschablone befestigt bzw. aufgehängt werden konnten, mussten Taschen in die Folien eingebracht werden. Die Taschen sind in Abstimmung mit der Form der Schwalbenschwanzlaschen der Stegschablone entstanden. Die Folien können mit den Taschen an die Stegschablonen angehängt werden und haben dadurch eine sichere Position.

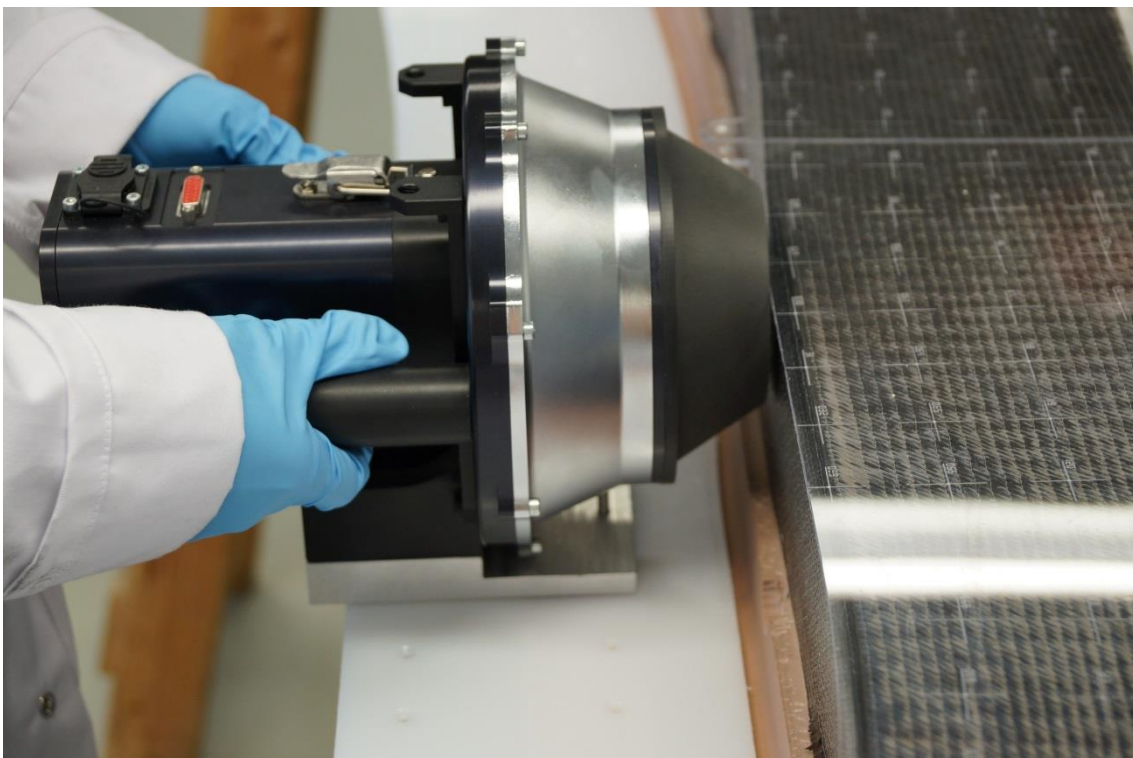
### **5.3 Gurtschablonen und Höhenadapter**

Die Gurtschablone übernimmt zusammen mit den Höhenadaptern die Ausrichtung des Sensors zu den Gurtbereichen. Die Gurtschablone liegt direkt auf dem Werkzeug, an der inneren bzw. äußeren Kontur, und ist mit dem Werkzeug über Stifte verbunden. Die Verbindung gewährt die reproduzierbare Ausrichtung des Sensors zu den Gurtflächen. In der Gurtschablone sind Positionsbohrungen für den Sensor eingebracht. Die Bohrungen richten den Sensor senkrecht zu den Gurtflächen aus. Jedes Bohrungspaar beschreibt durch seinen Ort und Ausrichtungen einen Messpunkt. In die Bohrungen der Schablone werden die Höhenadapter eingesteckt. Die Steckverbindung erfolgt mit Stiften, die im gleichen Abstand in den Höhenadaptern eingebracht sind.



**Abbildung 16: Gurtchablone mit Positionsbohrungen**

Die Höhenadapter bringen den Sensor auf unterschiedliche Höhen für die Messung der Gurtflächen. Zwei Adapter in unterschiedlichen Höhen lassen sich mit dem Sensor verschrauben. Der Höhenunterschied der beiden Adapter liegt bei 40 mm. Durch die beiden Adapter lassen sich die gesamten Gurtflächen scannen. Die Abbildung 17 zeigt das Zusammenwirken der Bauteile bei einer Messung. Die Abbildung zeigt exemplarisch, wie eine Messung aussehen kann, damit die Gurtflächen gescannt werden können.



**Abbildung 17: Scannen der Gurtflächen**

## 5.4 Zusammenfassung der Konstruktion



**Abbildung 18: Versuchsvorrichtung**

Wie in der Abbildung 18 zu sehen ist, ist die Versuchsvorrichtung an dem Werkzeug aufgebaut. Alle Bestandteile der Konstruktion, bis auf die Folien der Gurtflächen und die Höhenadapter, sind am Werkzeug montiert. Die Versuchsvorrichtung besteht aus zwei Stegshablonen mit Traverse, zwei Gurtschablonen und vier Folien, als Positionsträger der Gurtflächen und zwei Höhenadapter.

## 6 Konvertierungsprogramm

In diesem Kapitel wird die Verarbeitung und Speicherung der gescannten Faserrichtungen beschrieben.

### Messablauf:

Zunächst muss der Sensor in Betrieb genommen werden. Dazu werden die benötigte Spannungsversorgung und das Ethernetkabel mit dem Sensor und dem Messrechner verbunden. Danach folgt das Starten der Messsoftware und dem Verbinden des Sensors mit der Software, darauf folgen die Einstellungen bzgl. der Art der Benutzung, ob der Sensor im Handbetrieb oder im Scanbetrieb benutzt werden soll. Nach dem Einstellen der Verwendung werden die benötigten Fenster in der Software eingestellt und vorkonfiguriert, damit nur die wichtigen Werte und Informationen während der Messung visuell angezeigt werden. Die Abbildung 19 zeigt die Benutzeroberfläche des Programms.

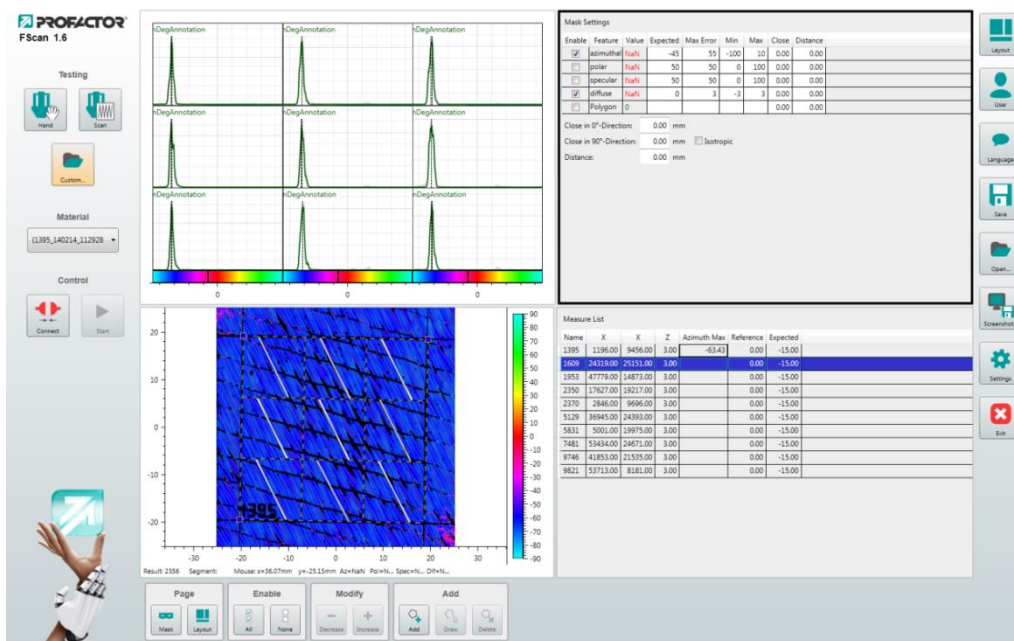


Abbildung 19: Benutzeroberfläche der Messsoftware

Die Benutzeroberfläche wurde in vier Fenster aufgeteilt, diese Fenster zeigen wichtige Informationen, die während einer Messung notwendig sind und mit diesen können Einstellungen getroffen werden. Das rechte obere Fenster zeigt die Einstellungen der Masken, diese Einstellungen betreffen die Auswertung der Faserrichtungen. Die Maskeneinstellungen, z.B. max. bzw. min. Abweichung einer angenommenen Faserausrichtung, beeinflussen das Live-Bild der Faserausrichtungen im linken unteren Fenster. Die Einstel-

lungen filtern störende Elemente bzw. Faserrichtungen, die nicht im Toleranzbereich liegen, aus der Berechnung der Faserrichtung. Das linke obere Fenster zeigt Histogramme mit der Häufigkeitsverteilung der Faserrichtungen der einzelnen Zellen. Die Anzahl der Zellen können mit Hilfe des Fensters eingestellt werden, die Einstellungen beeinflussen das linke untere Fenster, denn hier werden die Zellen grafisch dargestellt. Das linke untere Fenster beinhaltet das Live-Bild, welches der Sensor erzeugt. In diesem Fenster kann die Größe und die Position des auszuwertenden Bereiches im Bildausschnitt festgelegt werden, zudem können noch weitere Hilfslinien angezeigt werden, die bei der Ausrichtung des Sensors unterstützen. Im rechten unteren Fenster wird die measure list angezeigt, diese Liste beinhaltet alle Messstellen einer Messung und muss im Vorhinein angelegt werden. Die Liste kann zeilenmäßig abgearbeitet werden und in jeder Zeile wird ein Messwert, d.h. die Faserrichtung, abgespeichert bis alle Zeilen gefüllt sind. Das Messprogramm erzeugt nach der Messung eine Ergebnisdatei mit dem Format xml (Extensible Markup Language). Die xml-Datei ist ein hierarchisch strukturiertes Datenformat, das zum Austausch genutzt werden kann. Die Struktur der Datei führt dazu, dass die Messergebnisse sich in den unteren Ebenen der Datei befinden und diese nicht eindeutig einsichtig sind. Für die Weiterverarbeitung der Messdaten sollte Microsoft Office Excel benutzt werden. Excel verfügt nicht über die Möglichkeit, eine xml-Dateien einzulesen. Diese Umstände führten zur Entwicklung eines Konvertierungsprogramms, welches die xml-Datei zu einer .csv(Comma-separated value)- oder .xlsx(Excel Spreadsheet)-Datei konvertiert.

Das Konvertierungsprogramm wurde mit AutoIT programmiert. AutoIT ist eine frei erhältliche Programmiersprache zum Erstellen von .exe-Dateien, die .exe-Datei ist ohne jegliche Installation auf alle Windows Systemen verwendbar. Das Programm besitzt eine grafische Benutzeroberfläche (engl. GUI=graphical user interface) von der aus das Programm gesteuert wird.

#### Konvertierungsablauf:

Zuerst muss das Konvertierungsprogramm, siehe Abbildung 20, zusammen mit Excel aufgerufen werden. Nach dem Starten des Programms muss eine Ergebnisdatei bzw. Ausgabe-Datei erzeugt werden, diese muss das Format .csv oder .xlsx haben. Diese Datei enthält den Namen der Messung bzw. den Namen des Bauteiles, welches gemessen wurde. In dem nächsten Schritt wird die Eingabe-Datei ausgewählt, diese Datei ist die Ergebnis-Datei, xml-Datei, des Messprogramms der Firma PROFACTOR.

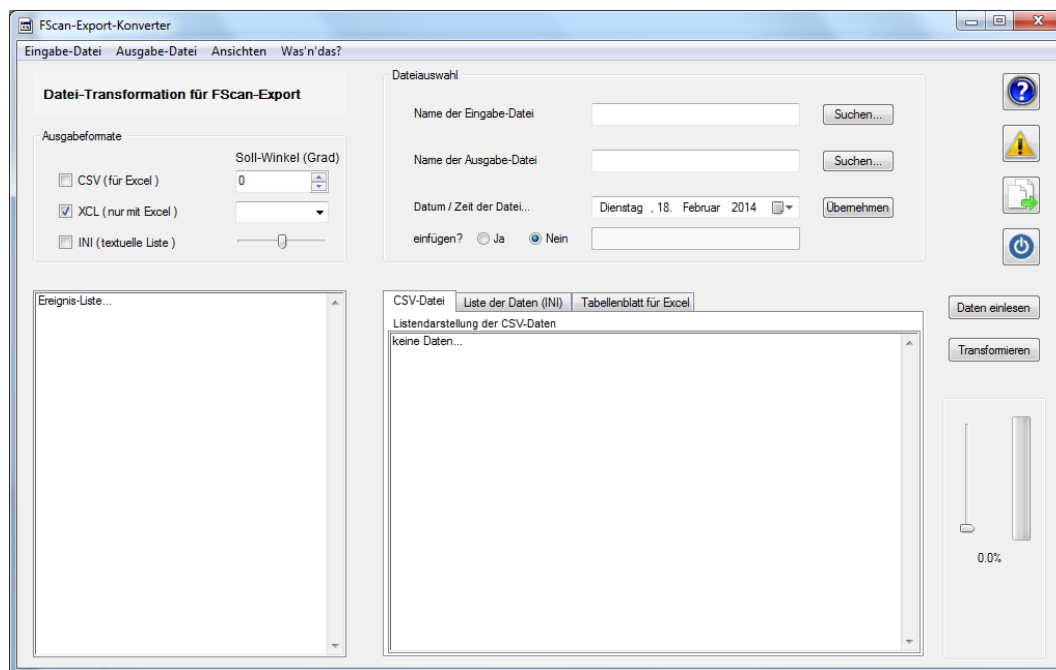



Abbildung 20: Benutzeroberfläche(GUI) FScan-Export-Konverter

Danach wird die Ausgabe-Datei ausgewählt, diese ist die csv- oder xlsx-Datei welche zuvor erstellt wurde. Als nächster Schritt kann der Name und das ursprüngliche Datum oder ein zufälliges Datum z.B. Tag der Konvertierung der Daten angegeben werden und anschließend wird die csv- oder xlsx-Datei in Excel geöffnet. Der darauf folgende Schritt ist das Ausführen des Einlesens der xml-Datei durch Anklicken des Buttons „Datei einlesen“. Den Fortschritt des Einlesens wird durch eine Fortschrittsanzeige am rechten Rand des Programms angezeigt. Nach der Beendigung des Einlesens werden die gemessenen Daten in dem zentralen Fenster gezeigt, die Daten können auf Vollständigkeit geprüft werden, bevor sie abgespeichert werden. Das Abspeichern bzw. das Übertragen der eingelesenen Daten in die Ausgabe-Datei erfolgt über den Button „Schreibe Excel-Tabelle“ () , zusätzlich besteht die Möglichkeit mehrere Messung bzw. Messdaten in einer Ausgabe-Datei als Tabellenblätter abzuspeichern. Als letzten Schritt kann das Programm geschlossen werden, durch das Schließen wird die Ausgabe-Datei gesichert und Excel geschlossen.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Originaldate	Raster nicht	Originalzeit:	14.02.2014 - 12:01													
3	Name	Pos.X	Pos.Y	Pos.Z	Soll-Winkel	Std-Abweichung	Mittel-Winkel	Winkel-0.0	Winkel-0.1	Winkel-0.2	Winkel-1.0	Winkel-1.1	Winkel-1.2	Winkel-2.0	Winkel-2.1	Winkel-2.2	
4	1395	119,6	94,56	3	0	15,485291	-67,24322	-68,606571	-66,585847	-66,928007	-67,518432	-66,760934	-68,522662	-66,1741	-64,878729	-66,947889	
5	1609	243,19	251,51	3	0	17,089213	-66,055208	-67,553992	-65,143987	-65,668415	-67,534241	-66,087564	-68,197364	-63,947109	-62,609039	-65,555953	
6	1953	477,79	148,73	3	0	16,388459	-64,144337	-64,277881	-62,601025	-63,488064	-64,592451	-64,3088	-65,838291	-62,36997	-62,324512	-66,263439	
7	2350	176,27	192,17	3	0	17,159606	-66,921093	-67,568269	-66,57503	-65,802511	-68,321168	-67,021243	-69,131875	-65,765199	-66,703039	-65,938622	
8	2370	284,6	96,96	3	0	13,981144	-66,492908	-66,94583	-65,377495	-66,522084	-66,992865	-65,718384	-68,509305	-65,471476	-66,218901	-66,559952	
9	5129	369,45	243,93	3	0	15,881556	-65,12971	-65,020796	-63,410725	-64,578568	-67,144215	-65,86172	-66,706017	-65,118368	-65,097697	-64,950945	
10	5831	50,01	199,75	3	0	16,347996	-69,428588	-71,129213	-69,245782	-69,334552	-69,944202	-68,887156	-71,153562	-67,842504	-66,373799	-67,755443	
11	7481	534,34	246,71	3	0	18,215263	-64,731871	-66,490509	-65,712472	-62,437763	-65,821912	-64,45691	-66,568855	-62,123281	-66,645432	-64,208075	
12	9746	418,53	215,35	3	0	15,42612	-65,952048	-66,866433	-64,711701	-66,009874	-66,643567	-66,203354	-68,284776	-65,311804	-64,852935	-65,533137	
13	9821	537,13	81,81	3	0	16,315376	-60,72678	-62,28212	-62,732231	-61,185879	-60,609512	-61,176639	-62,888136	-59,124559	-58,707118	-61,700147	

Abbildung 21: csv-Ausgabe-Datei

Die Abbildung 21 zeigt eine Ausgabe-Datei, mit den Inhalten, die aus der xml-Datei entnommen werden. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse zur Auswertung kann anhand des Formates einfach durchgeführt werden. Die Abbildung 22 zeigt einen Vergleich zwischen zwei durchgeführten Messungen.

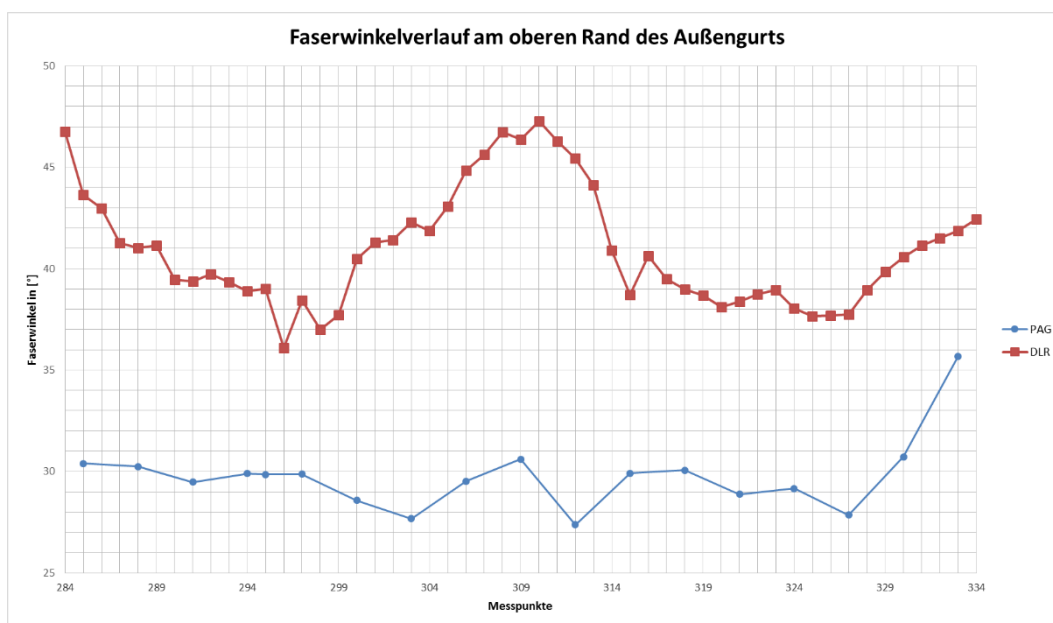


Abbildung 22: Bsp. einer grafischen Darstellung von Faserwinkel

## 7 Versuchsmessung

In diesem Kapitel wird eine Versuchsmessung vorgestellt, in der eine gesamte Einzellage gescannt wurde. Die Messung wurde durchgeführt, um die Schwachstellen der Konstruktion zu identifizieren. Des Weiteren wurde mit der Messung der zeitliche Umfang einer Messung aufgezeichnet, der für den Scan des Stegbereiches und der Gurtbereiche benötigt wurde.

### Messvorbereitung:

Für die Messung wurde ein triaxiales Gelege über ein Preformwerkzeug drapiert. Die Abbildung 23 zeigt den Ablauf der Drapierung des Geleges.

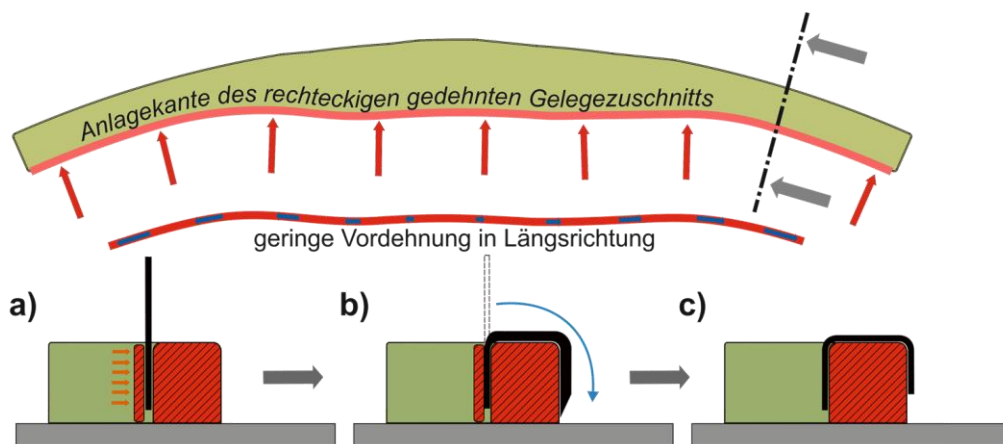


Abbildung 23: Gelege Drapierung [12]

Das Gelege wurde am inneren und äußeren Gurt mit doppelseitigem Klebeband fixiert, um ein Verrutschen des Geleges zu verhindern.

### Messung:

Für die Messung wurde die Vorrichtung auf dem Preformwerkzeug positioniert. Die Position der Vorrichtung auf dem Werkzeug wurde mit Passstiften gesichert. Die Messung mit der Vorrichtung wurde ohne Folien für die Gurtflächen, denn diese haben sich noch in der Anfertigung befunden, durchgeführt, für den Stegbereich wurde die Stegschablone genutzt. Es wurden insgesamt 336 Messwerte für eine Einzellage gescannt, die 336 Positionen verteilen sich über die Stegschablone und die beiden Gurtflächen.

### Stegmessung:

Auf der Stegfläche wurden 228 Positionen gemessen. Der Ablauf der Messung war von 0 bis 228. Der Sensor wurde an jedem lokalem KOS ausgerichtet und eine Messung durchgeführt. Die Messung auf dem Steg wurde in fünf Reihen aufgeteilt. Die Ergebnisse zeigen den Ablauf, siehe Abbildung 25 bis 29.

Der zeitliche Aufwand für die 228 Positionen betrug 90 min, das entspricht einer Zeit von 2,5 Pos/min (Positionen/Minute).

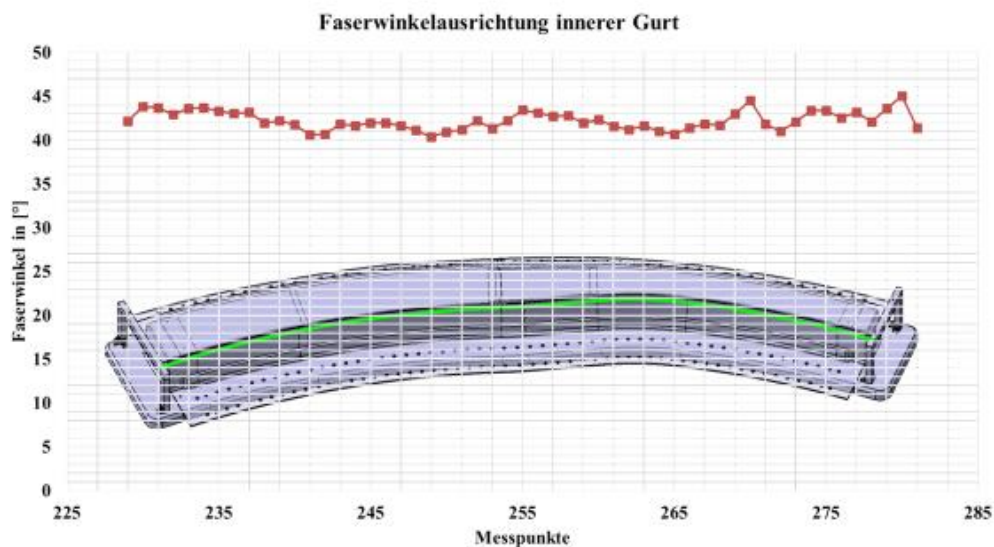
### Gurtmessung:

Am inneren Gurt wurden 52 Positionen und am äußeren Gurt 56 Positionen gemessen. Der Verlauf der Positionsnummer im inneren Gurt ist von links nach rechts und die Nummern starten bei 229 und enden bei 281. Die Nummer verlaufen am äußeren Gurt von 282 bis 336 ebenfalls von links nach rechts. Der Sensor wurde für die Messung mit dem Höhenadapter an den Bohrungen positioniert, die sich an den Gurtschablonen befinden.

Der zeitliche Aufwand für den inneren Gurt betrug 18 min, das entspricht 2,8 Pos/min, während der zeitliche Aufwand für den äußeren Gurt 12 min betrug, was 4,7 Pos/min entspricht.

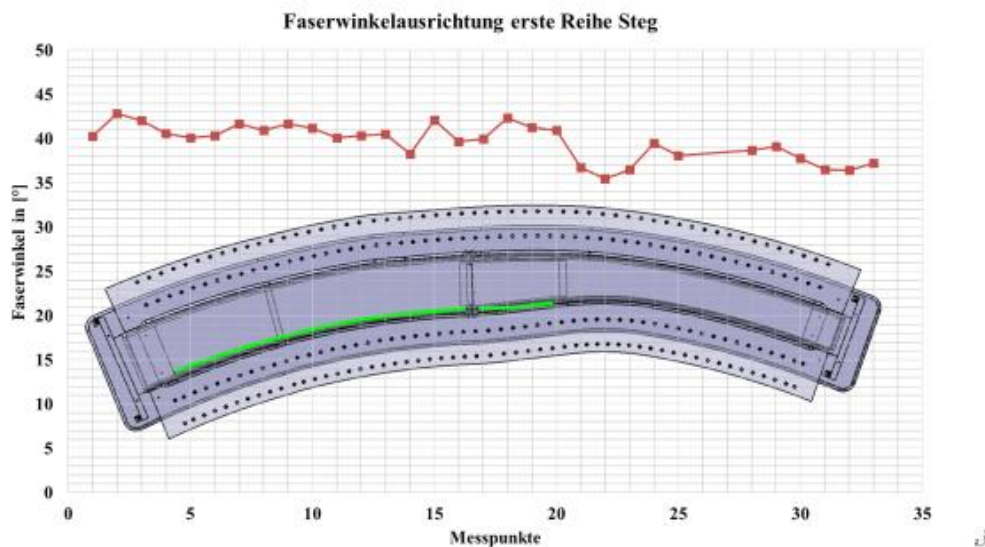
### Ergebnisse:

Die Auswertung der Messwerte erfolgt grafisch in der gleichen Reihenfolge, wie schon die Drapierung des Geleges erfolgt ist. Die Faserwinkelausrichtungen stehen in Abhängigkeit von der Drapierung.



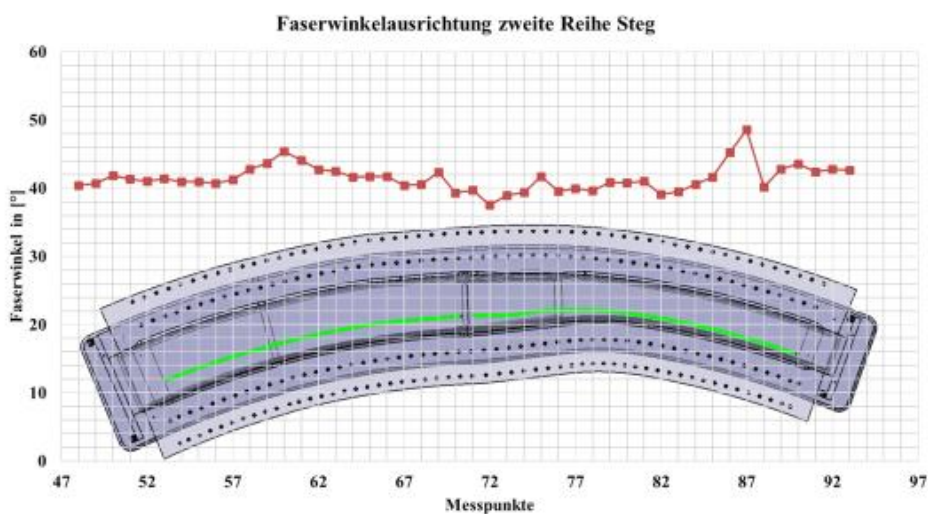
**Abbildung 24: Faserwinkelausrichtung innerer Gurt**

Im inneren Gurt wird davon ausgegangen, dass das Gelege den geringsten Verzug erfährt, die Messwerte bekräftigen diese Annahme. Die Ausrichtungen schwanken um einem Mittelwert von ca.  $42,2^\circ \pm 2,3^\circ$ .



**Abbildung 25: Faserwinkelausrichtung erste Reihe Steg**

In diesem Bereich erfährt das Gelege die ersten Verzerrungen durch die Drapierung. Die Verzerrung der Ausrichtungen machen sich durch die Abweichung von  $\pm 3,7^\circ$  bemerkbar, die um einen Mittelwert von ca.  $39,6^\circ$  schwankt.



**Abbildung 26: Faserwinkelausrichtung zweite Reihe Steg**

Die anfänglichen Verzerrungen, die durch die Drapierung in das Gelege einbracht wurden, gleichen sich zunehmend, bis auf einzelne Peaks, aus. Der Mittelwert in der zweiten Reihe auf dem Steg liegt bei ca.  $41,4^\circ$ , mit Abweichungen von  $\pm 5,5^\circ$ .

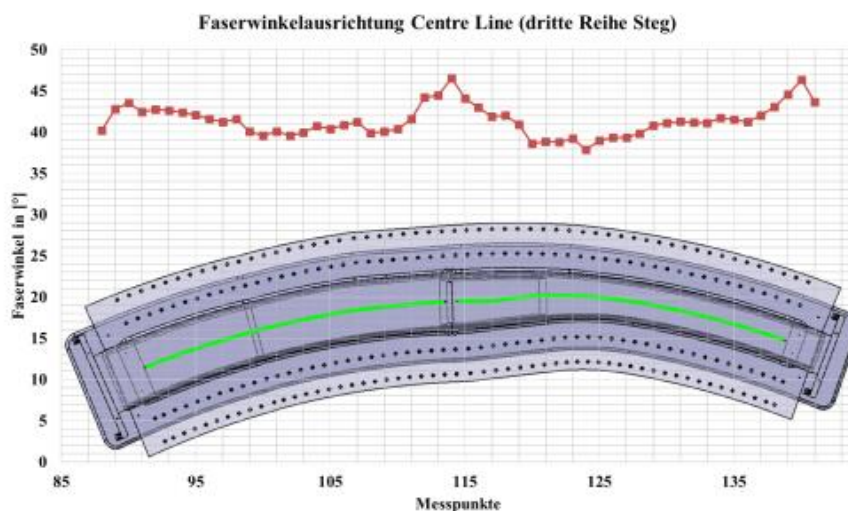


Abbildung 27: Faserwinkelausrichtung entlang der Centre Line

In dieser Reihe hat sich ein markanter Peak ausgeprägt, was in Bezug auf die vorherige Reihe sehr auffällig ist und gegen einen Verzug mittig über das Werkzeug in Richtung des äußeren Gurtes spricht. Der Mittelwert liegt bei ca.  $41,4^\circ$  und einer Abweichung von  $\pm 4,3^\circ$ .

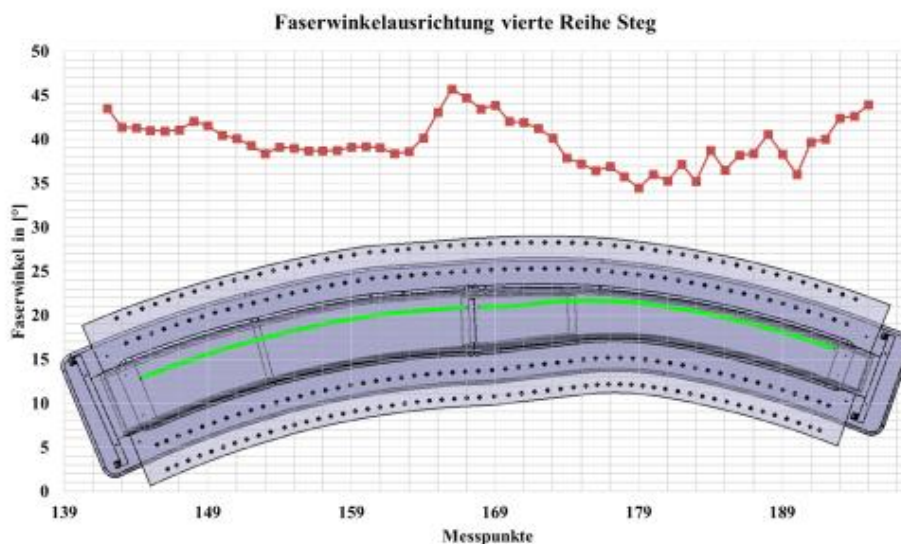


Abbildung 28: Faserwinkelausrichtung vierte Reihe Steg

Das Diagramm zeigt eine starke Verzerrung der Faserwinkel über die gesamte Länge des Preformwerkzeugs, ausgenommen der linken Hälfte. Der Mittelwert liegt bei ca. 39,7° mit einer Abweichung von +/-5,6°.

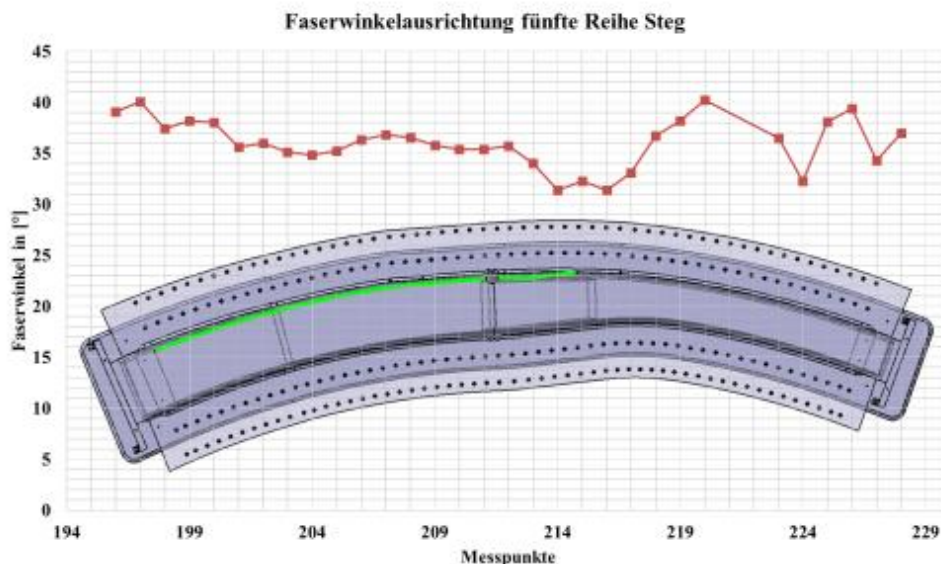


Abbildung 29: Faserwinkelausrichtung fünfte Reihe Steg

Durch einen Mittelwert von ca. 36° lässt sich eindeutig eine Verzerrung der Ausrichtung in Richtung des äußeren Gurtes feststellen, die Abweichungen liegen bei +/- 4,4°. Die Verzerrungen der Ausrichtungen sind punktuell stärker ausgeprägt.

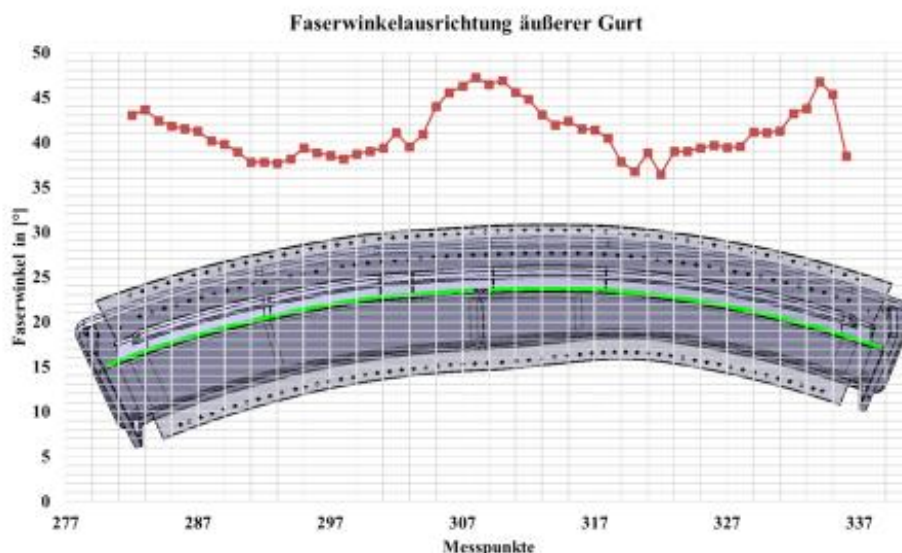


Abbildung 30: Faserwinkelausrichtung äußerer Gurt

Im äußeren Gurt sind ausgeprägte Schwankungen der Ausrichtungen festzustellen, die um einen gemittelten Wert von ca. 41° +/- 5,4° schwanken.

Auswertung:

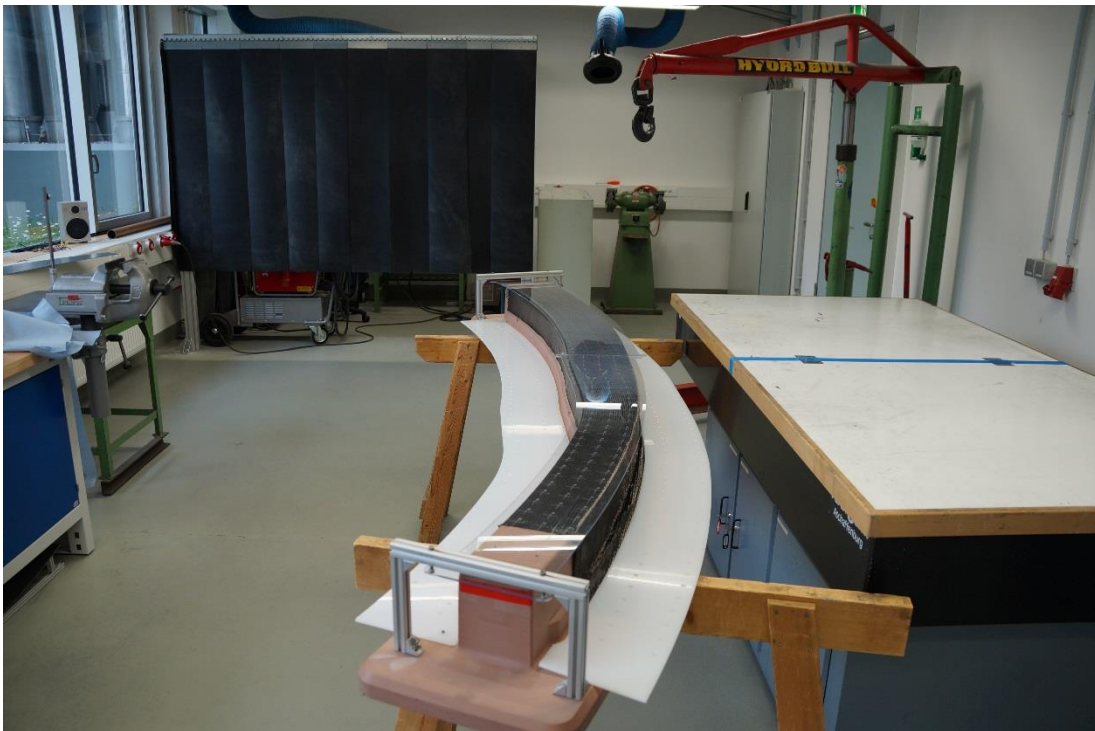
Durch die starken Schwankungen von teilweise mehr als  $5^\circ$  lässt sich ein Rückschluss auf die Strategie der Markierungen und deren Konstruktion ziehen. Der Konstruktion bzw. der Strategie der Markierungen hätte eine Drapiersimulation vorweg gehen müssen, um die Schwankungen am realen drapierten Gelege eventuell zu minimieren bzw. die Ausrichtung der lokalen KOS zu optimieren. Die momentanen Messwerte lassen eine globale Aussage zur Faserausrichtung zu, lokale Ausrichtungen schwanken aber sehr stark und können dadurch nur eingeschränkt bewertet werden.

## 8 Zusammenfassung

Das Ziel der Studienarbeit wurde dadurch erreicht, dass eine funktionsfähige Versuchsvorrichtung angefertigt und getestet wurde. Diese Versuchsvorrichtung diente als Konzept für eine reproduzierbare Aufnahme von Faserwinkeln während der Fertigung von CFK-Rumpfspanten unter Verwendung von NCF-Materialien. Es wurde eine Testvorrichtung gebaut, welche dem Schablonenkonzept entspricht. Es wurden während der Konstruktionsphase einige Versuche durchgeführt, um Varianten bestimmter Designdetails zu testen bzw. zu optimieren. Die Versuche erstreckten sich über Material- und Fertigungsversuche bis hin zur Erprobung der Messvorrichtung an einem Versuchswerkzeug der Stufe TRL 3 (Technology Readiness Level). Die Verbesserungen wurden zum Teil für die Versuchsvorrichtung umgesetzt und getestet. Die anderen Verbesserungen sollen in zukünftigen Versuchen in einer großen Vorrichtung umgesetzt werden. Als Resultat der Konstruktion des Konzeptes zählen vier Schablonen, die sowohl den Steg wie auch die Gurte abdecken. Die Schablonen dienen dem Sensor zur Ausrichtung, damit die Faserwinkel in Bezug auf das globale Koordinatensystem aufgezeichnet werden können.

Die Schablonen für den Stegbereich bieten zu einem die Referenz für die Kamera auf der Stegfläche, aber zum anderen halten sie auch die Referenzen für die Gurtseiten. Die Gurtschablonen sind an der Stegschablone aufgehängt und sind aus transparenter PVC-Folie. Für die Messung der Gurtseiten wird die Kamera mit Adapterplatten auf zwei verschiedene Höhenniveaus gebracht, damit die komplette Steghöhe gemessen werden kann. Die Kamera samt Adapterplatten wird mit Hilfe einer Gurtschablone, mit Passstiften in Positionsbohrungen, ausgerichtet. Die Referenzpunkte auf der Stegschablone sind eingraviert und auf der PVC-Folie aufgedruckt. Die Positionen der Referenzen auf der PVC-Folie orientieren sich an den Positionen der Referenz auf dem Steg. Des Weiteren wurde ein Konvertierungsprogramm entwickelt, welches die von der Kamera aufgezeichneten Faserwinkel in eine übersichtliche Struktur bringt. Die auf diesem Weg erzeugte Datei dient dann zur Weiterverarbeitung. Das Messprogramm erzeugt eine .xml Datei, welche durch das erstellte Programm zu einer .csv oder xls. Datei konvertiert wird. Die gemessenen Faserwinkel könnten dann direkt eine Simulation einfließen oder sie dienen als Aussage über die Qualität des gefertigten Bauteiles.

Die Messvorrichtung erfüllt ihren Zweck, somit kann die Anpassung der Vorrichtung an ein größeres Werkzeug erfolgen. Die gewählte Konstruktion erfüllt nicht alle in Kapitel 1.1 definierten Anforderungen in vollem Maße, bildet aber einen guten Kompromiss zwischen ausreichender Genauigkeit und einem vertretbaren Maß an Arbeits- und Materialaufwand. Ziel der Untersuchungen war ein Konzept, wie an die Messung von Faserwinkel heran gegangen werden kann und wie eine entsprechende Messvorrichtung aussehen kann, um qualitative Aussagen über das Bauteil treffen zu können. Die Vorrichtung hat die Eigenschaft ohne großen technischen Aufwand an beliebigen Standorten eingesetzt zu werden. Bei zukünftigen Anwendungen des Konzeptes müsste darauf geachtet werden, dass die Halterungen der Schablonen stabiler ausgelegt werden, damit die Fixierung der Schablonen in jedem Fall gesichert ist. Für die folgenden Arbeitsschritte innerhalb des Projektes, die jedoch außerhalb des Rahmens dieser Studienarbeit liegen, müssen die erkannten Möglichkeiten zur Verbesserungen an die größere Vorrichtung übertragen werden und bei der Fertigung berücksichtigt werden.



**Abbildung 31: Vorrichtung**

## 9 Abkürzungsverzeichnis

AFP	automated fibre placement
Bsp.	Beispiel
bzw.	beziehungsweise
CFK	carbonverstärkter Kunststoff
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FVK	Faserverbundkunststoff
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
KOS	Koordinatensystem
ncf	non-crimp fabrics
PAG	Premium Aerotec GmbH
PC	Polycarbonat
PMMA	Polymethylmethacrylat
RoCK	Robuste CFK-Gesamtprozesskette
TRL	Technology Readiness Level
z.B.	zum Beispiel
ZfP	Zerstörungsfrei Prüfmethoden

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung eines Geleges [3] .....	5
Abbildung 2: Konzept mit einem Parallelogrammarm .....	12
Abbildung 3: Parallelschienenkonzept.....	13
Abbildung 4: Schablonenkonzept .....	14
Abbildung 5: Bahnschienenkonzept .....	16
Abbildung 6: Zentralarm.....	17
Abbildung 77: Spantscannen mit Hilfe eines Kuka-Roboters [11].....	18
Abbildung 8 Schablonenkonzept .....	22
Abbildung 9: Schriftgrößenauswahl und Validierung der Gravurmethode zur optimalen Sichtbarkeit im Scan.....	25
Abbildung 10: Erklärung der Position der Gravur .....	26
Abbildung 11: Messvariante lokales KOS .....	27
Abbildung 12: Gitter Variante für den Stegbereich .....	28
Abbildung 13: Konstruktion der Centre-Line .....	32
Abbildung 14: Stegschablone mit lok. KOS .....	33
Abbildung 15: Aufhängung und Gurtfolie .....	34
Abbildung 16: Gurtschablone mit Positionsbohrungen .....	35
Abbildung 17: Scannen der Gurtflächen.....	35
Abbildung 18: Versuchsvorrichtung .....	36
Abbildung 19: Benutzeroberfläche der Messsoftware .....	37
Abbildung 20: Benutzeroberfläche(GUI) FScan-Export-Konverter .....	39
Abbildung 21: csv-Ausgabe-Datei .....	40
Abbildung 22: Bsp. einer grafischen Darstellung von Faserwinkel.....	40
Abbildung 23: Gelege Drapierung [12] .....	41
Abbildung 24: Faserwinkelausrichtung innerer Gurt.....	43
Abbildung 25: Faserwinkelausrichtung erste Reihe Steg .....	43
Abbildung 26: Faserwinkelausrichtung zweite Reihe Steg.....	43

---

Abbildung 27:Faserwinkelausrichtung entlang der Centre Line.....	44
Abbildung 28: Faserwinkelausrichtung vierte Reihe Steg .....	44
Abbildung 29: Faserwinkelausrichtung fünfte Reihe Steg .....	45
Abbildung 30: Faserwinkelausrichtung äußerer Gurt .....	45
Abbildung 31: Vorrichtung .....	48

## **11 Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Konzeptbewertung .....	20
Tabelle 2: Zeitaufzeichnung für die Variante lokales KOS .....	29
Tabelle 3: Zeitaufzeichnung für die Variante Gitter .....	30

## 12 Literaturverzeichnis

- [1] Schürmann, H.; Konstruieren mit Faser- Kunststoff-Verbunden; Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [2] AVK-Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe e.V.;Handbuch Faserverbundkunststoffe - Grundlagen, Verarbeitung, Anwendung; Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [3] Flemming, M.; Roth, S.; Faserverbundbauweisen Eigenschaften; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003
- [4] A. R. Horrocks, S. C. Annand (Hrsg.): Handbook of Technical Textiles. Woodhead Publishing, Cambridge 2000
- [5] Fabia Denninger; Lexikon Technische Textilien. Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main 2009
- [6] Armstrong, K.B., Bevan, L.G., Cole W.F.; Care and Repair of Advanced Composites; 2nd Edition; Warrendale 2005
- [7] Grellmann, Wolfgang, Seidler, Sabine; Kunststoffprüfung; Carl Hanser Verlag München Wien, 2005
- [8] <http://www.ikts.fraunhofer.de/de/messen/ila.html>; 04.01.2015
- [9] Datenblatt des Qualitätssensor, Fa. PROFACTOR
- [10] e-mail, Fa. PROFACTOR, Betreff: FVK Sensorik
- [11] <http://www.kuka-robotics.com/germany/de/>
- [12] AZUR Abschlussbericht