

Prozesskette zur robotergestützten Herstellung vernähter faserverstärkter Preforms

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Manuel Herkt
aus Erlangen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
Mitberichter: Prof. Dr. techn. Markus Vincze

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Dezember 2013

Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart

2014

Gewidmet meinem leider viel zu früh verstorbenen Vater

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand im EADS Corporate Research Center in Ottobrunn (heute; EADS Innovation Works) Abteilung Composite Technologies sowie während meiner aktuellen Tätigkeit als Projektingenieur bei der Premium AEROTEC GmbH in Varel. Große Teile dieser Arbeit wären ohne die finanzielle Zuwendung des BMBF auf deutscher und der FFG auf österreichischer Seite im österreichisch-deutschem Forschungsprojekt REDUX nicht möglich gewesen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf (Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart), der nach dem Wechsel von Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler an die TU München die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit als Erstberichter übernahm und Herrn Prof. Dr. techn. Markus Vincze (Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) der Technischen Universität Wien) für die freundliche Übernahme des Korreferats. Alle 3 Herren haben mich sehr bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt und mir in zahlreichen Fachdiskussionen wertvolle Tipps gegeben.

Besonderer Dank gilt auch meinem Mentor und Freund Herrn Prof. Horst Schmidt-Bischoffshausen (ehemals Head of Strategy, External Relations and Intellectual Property des EADS Corporate Research Centers Ottobrunn) für seine unermüdliche Unterstützung bei der Beantragung der Fördergelder für REDUX. Ohne ihn wäre das Projekt bei weitem nicht in dieser kurzen Zeit auf die Schiene gesetzt worden.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Projektpartnern von REDUX, die mir bei allen fachlichen Themen sehr geholfen haben. Besonders hervorheben möchte ich hierbei die Herren Dr.-Ing. Peter Schnauffer, Dipl.-Ing. Uwe Köber und Dipl.-Ing. Joachim Greiner (alle IFB) für Ihre grandiose Unterstützung.

Herrn Dr.-Ing. Hilmar Apmann von der Premium AEROTEC GmbH Varel gebührt ebenfalls mein besonderer Dank für seine Unterstützung und wertvollen Diskussionen bei der Fertigstellung dieser Arbeit.

Abschließend danke ich meiner Frau Heidi und meiner Mutter für Ihre Geduld und ihr Verständnis und meinen Töchtern Nora und Nina, denen es immer wieder gelingt, mich zum Lachen zu bringen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	8
Abstract	9
1 Einleitung	10
2 Ziele der vorliegenden Arbeit	12
2.1 Erzielte Ergebnisse	15
3 Stand der Wissenschaft und Technik	18
3.1 Grundlagen der Faserverbundwerkstoffe	18
3.2 Textiltechnische Grundlagen	19
3.2.1 Ebene zweidimensionale Flächengebilde	19
3.2.1.1 Gewebe	20
3.2.1.2 Matten	21
3.2.1.3 Gelege	22
3.2.1.4 Binder	23
3.3 Infiltrationsverfahren	24
3.3.1 RTM-Verfahren	24
3.3.2 VAP-Verfahren	27
3.3.3 VARI-Verfahren	32
3.4 Technologische Grundlagen der Prozesskette	33
3.4.1 Automatisierte Nähtechnik mit Robotern	35
3.4.1.1 Tufting	38
3.4.1.2 Blindstich	41
3.4.1.3 Alternative Einseitennähverfahren	43
3.4.1.4 Stand der Technik der Nahtverfolgungssensorik	45
3.5 Stand der Technik für Passagierfensterrahmen	47
4 Grundlagenuntersuchungen zur Sensorik	52
4.1. Grundlegende Untersuchungen zur taktilen Höhenregelung	52
4.2. Grundlagen der sensortechnischen Kantendetektion	59
4.2.1. Spektralanalyse an textilen Carbonhalbzeugen	62
4.2.2. Grundlegende Untersuchungen zur optischen Kantendetektion für den automatisierten Nähprozess	71
5 Entwicklung des Nähprozesses	76
6 Applikationsuntersuchungen am A350-Fensterrahmen	89
6.1. Grundlegende Untersuchungen zur Parameterermittlung für den automatisierten Nähprozess	89
6.2. Herstellung eines Prototypen einer A350-Fensterrahmenpreform	101
6.3. Definitionen für die automatisierte Vernähung der Fensterrahmenpreform	103
6.4. Experimentelle Voruntersuchungen und Test der Roboternähanlage für die automatisierte Vernähung der Fensterrahmenpreform	107

6.5. Untersuchungen zum automatisierten Handhaben von textilen Preforms	111
6.6. Automatisierte Vernähung der A350-Fensterrahmenpreform	119
6.7. Folgerungen für den Einsatz der Nähtechnik für Fügeprozesse bei der A350	121
6.8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	122
7 Zusammenfassung	134
8 Literaturverzeichnis	136

Abkürzungen und Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A/C		Flugzeug (vom englischen aircraft)
BMBF		Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD		Computer Aided Design
CFK		Carbonfaserkunststoff
DLR		Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
ePK		ereignisgesteuerte Prozesskette
ETH		Eidgenössische technische Hochschule
F		Spektralfunktion, Fouriertransformierte
F_1, F_2	N	Kräfte an den Seilenden
F_{Feder}	N	Federkraft
FFG		Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
F_{Ist}	N	Istkraft
F_{Soll}	N	Sollkraft
FTIR		Fourier Transform Infrared
FVK		Faserverbundkunststoff
FVW		Faserverbundwerkstoff
G		akkumulierter Gradient
g		Gradient
IFB		Institut für Flugzeugbau
n	m	Richtung der Längsachse
RTM		Resin Transfer Moulding
S		Summe
t, T	s	Zeit
tex	g / 1000m	Titer, Garnstärke
UD		unidirektional
v		Votingfunktion
VAP		Vacuum Assisted Process
VARI		Vacuum Assited Resin Infusion
α	rad	Umschlingungswinkel
μ_H		Haftreibungskoeffizient
φ_F	%	Faservolumengehalt

Kurzfassung

Faserverbundwerkstoffe insbesondere auf Basis von Kohlenstofffasern sind seit langem ein wichtiger Werkstoff im Flugzeugbau, da sie im Vergleich zu metallischen Werkstoffen eine signifikante Gewichtsersparnis für Bauteile bedeuten.

Ein großer Nachteil dieser Technologie sind allerdings die hohen Herstellkosten, da der Prozess bei dem häufig mit Harz vorgetränkte Faserhalbzeuge zum Einsatz kommen noch weitestgehend manuell abläuft.

Eine Alternative zu den vorgetränkten Fasern bietet die Preformtechnologie in Kombination mit Harzinjektionstechniken. Um textile Vorformlinge für Faserverbundbauteile herzustellen kommt häufig die Nähtechnik zum Einsatz. Textile Techniken und insbesondere Näh- gekoppelt mit Harzinjektionstechniken können wesentliche Beiträge zur Kostenreduktion liefern.

In dieser Arbeit wird eine Prozesskette entwickelt, mit der es möglich ist, textile Preforms automatisiert mit einem Roboter zu konfektionieren. Die entwickelte Prozesskette wird in Form einer sog. erweiterten ereignisgesteuerten Prozesskette dargestellt.

Es werden zunächst die Grundlagen für einen intelligenten Nähprozess mit einem Industrieroboter erörtert und in Grundlagenuntersuchungen validiert. Taktile Sensorik kommt ebenso wie berührungslose Sensorik zum Einsatz. Hierfür wurden insbesondere Untersuchungen zur Reflexion von Carbonfasern durchgeführt, um den Wellenlängenbereich zu ermitteln, in dem die Fasern am meisten Licht reflektieren. Auf dieser Basis wird eine Demonstratoranlage abgeleitet und an einem konkreten Bauteil aus der zivilen Luftfahrt, dem A350-Fensterrahmen, validiert und Parameter für eine industrielle Herstellung ermittelt. Diese Parameterermittlung dient als Grundlage für eine exemplarische Wirtschaftlichkeitsanalyse und mögliche Fabrikplanung für eine Serienherstellung des Fensterrahmens für die A350. Die Ergebnisse dieser Wirtschaftlichkeitsanalyse der robotergestützten Vernähung werden mit den Kosten der manuellen Herstellung des Fensterrahmens verglichen.

Abstract

For a very long time fiber reinforced composites especially made of carbon fibers have represented an important material in aircraft design, since they offer a significant reduction of weight compared to metallic structures.

A disadvantage of this technology is the high cost of production, since the process using preimpregnated fibers is performed manually to a very high degree.

An alternative is offered by preform technologies combined with resin injection techniques.

Sewing technology is often applied in order to manufacture textile preforms for fiber reinforced plastics.

Textile and sewing technologies together with resin injection in particular can make an essential contribution to cost reduction.

In this dissertation a process chain is developed, by means of which it is possible to tailor preforms automatically by a robot.

The developed process chain is presented by means of a so called extended event-driven process chain.

Therefore fundamentals for an intelligent sewing process are discussed and validated in fundamental tests.

Tactile sensor technology is applied as well as non-contacting sensor technology. Therefore experiments have been carried out in order to determine the reflection of light by carbon fibers. The results of those experiments showed the area in the optical spectrum in which the maximum of light is reflected by the carbon fibers.

On this basis a demonstrator is planned and tested on a concrete civil aircraft component, the A350 window frame and parameters for an industrial production are determined. This parameter determination serves as a basis for a profitability analysis and possible factory planning for a serial production of the A350 window frame.

The results of the profitability analysis of the robot assisted sewing process are compared to the cost of the manual manufacturing of the A350 window frame.

1 Einleitung

Faserverbundwerkstoffe (FVW) und insbesondere Kohlenstofffaserverbunde stellen eine der wichtigsten Werkstoffgruppen im modernen Flugzeugbau dar. Auch im Automobilbau gibt es starke Tendenzen in Richtung FVW-Einsatz, da die Elektromobilität und somit die Gewichtseinsparung eine immer größere Rolle spielt.

Einhergehend mit diesem erhöhten Einsatz der FVW ist eine größere Nachfrage nach kostengünstigen Faserverbundbauteilen. Der erste Schritt bei der Herstellung eines Faserverbundbauteils ist die Herstellung sogenannter Preforms¹ bestehend aus Multiaxialgelegen oder Geweben beispielsweise.

Die Luftfahrtindustrie stellt hohe Anforderungen an diese Faserstrukturen, die folgendermaßen zusammengefasst werden können [Neitzel et al. 2004]:

- Darstellung komplexer Geometrien,
- hohe Faservolumengehalte,
- kurze Taktzeiten, geringe Werkzeug- und somit geringe Stückkosten,
- hohe Qualität bei gleichzeitiger Reproduzierbarkeit,
- Einsatz der Fasern im Sinne optimierter Strukturmechanik.

Um diesen Anforderungen bei gleichzeitig günstigen Preisen gerecht zu werden, muss bereits beim Preformprozess an Automatisierungslösungen gedacht werden, da der Prozess der textilen Umformung und Konfektionierung in der Praxis derzeit noch mit einem hohen Anteil an manueller Arbeit verbunden ist.

Diese trockenen Preforms ergeben durch Harzinjektion und anschließende Aushärtung unter Temperatur (in der Luftfahrtindustrie meist bei 180 °C) in Formen das fertige Faserverbundbauteil. Alternativ dazu können die Preforms, welche meist aus mehreren Lagen von Faserhalbzeugen bestehen, auch mit Binder (siehe Kapitel 3.2.1.4) hergestellt werden. Durch das Aufbringen dieses Binders kann der textile Vorformling stabilisiert und somit das Handling in einem

¹ Preforms (engl.): textile Vorformlinge

industrialisierten Prozess vereinfacht werden. Als weitere vielversprechende Technologie für das Konfektionieren von trockenen Preforms stellt sich die Nähetechnik dar. Durch das Einbringen von Nähten können die Einzellagen miteinander verbunden werden ohne die Drapierbarkeit in dem Maße zu reduzieren, wie dies bei dem Einsatz von Binder der Fall ist. Eine weitere Alternative der Faserverbundbauteilherstellung bietet die Herstellung auf Basis von Prepregs². Diese Halbzeuge werden entweder als Rollenhalbzeug oder mithilfe einer sogenannten Fiber Placement Anlage aus einzelnen Faserbündeln abgelegt. Sowohl der Aufbau der Preform aus dem Rollenhalbzeug als auch durch die Fiber Placement Anlage ist mit einem hohen logistischen und kostenintensiven Aufwand verbunden. Da das bereits auf die Prepregs aufgebrachte Harzsystem bei Raumtemperatur zu vernetzen beginnt, müssen diese Halbzeuge bei -18 °C gelagert werden. Dies bedingt Investitionen für die Kühlanlage. Eine Automatisierbarkeit für komplexe Bauteile ist nur sehr bedingt möglich, so dass die heutige Anwendung von Fiber Placement Anlagen auf einfach gekrümmte Bauteile beschränkt ist

² Prepregs (engl.): „preimpregnated“ = vorimprägnierte Faserhalbzeuge

2 Ziele der vorliegenden Arbeit

Da gerade für das Konfektionieren von Preforms häufig die Nähtechnik eingesetzt wird, wird im Rahmen dieser Arbeit ein automatisiertes Verfahren vorgestellt, welches als Grundlage für eine industrielle Fertigung von Kohlenstoffaserverpreforms für Flugzeugbauteile gesehen werden kann.

Es werden zunächst die theoretischen Grundlagen einer automatisierten Fertigung von textilen Vorformlingen diskutiert und anhand des Stands der Technik der Entwicklungsbedarf abgeleitet. Als Untersuchungsobjekt dient der Fensterrahmen des A350, welcher in Textiltechnik hergestellt werden soll [Röhm 2006]. Um den hohen Anteil an manueller Arbeit zu reduzieren, wird eine Lösung erarbeitet, welche vom CAD-Modell des Fensterrahmens bis hin zur Konfektionierung desselben eine durchgängige Prozesskette darstellt. Das System zur Vernähung des Fensterrahmens besteht aus einem Industrieroboter der Firma KUKA und einem Nähkopf der Firma KSL. Da der Rahmen direkt im RTM-Werkzeug vernäht wird, werden zunächst Versuche gefahren, welche grundsätzlich die Integration von Sensorik in diesen Nähkopf zum Ziel haben. Mittels Grundlagenuntersuchungen wird die Machbarkeit der sensorischen Erkennung von Überlappungen in textilen Halbzeugen sichergestellt, da Preforms meist aus mehreren Komponenten aufgebaut sind, welche oft übereinandergestapelt werden. Da es während RTM-Prozessen teilweise zu „fiber washing“ –dem lokalen Verschieben von Fasern durch den Harzinjektionsdruck- kommen kann, müssen Preforms lokal fixiert werden, um diesem Effekt entgegenzuwirken. Diese lokale Faserfixierung erfolgt in dieser Arbeit mittels Blindstichnähtechnologie (siehe Kapitel 3.4.1.2).

In weiterführenden Versuchen werden die Prozessparameter für die automatisierte Vernähung des Fensterrahmens ermittelt.

Abschließend werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen und somit das Potenzial der Nähtechnologie für einen industriellen Einsatz zur Herstellung von Strukturbauteilen in modernen Flugzeugprogrammen dargestellt.

Die Abbildung 1 verdeutlicht nochmals die Prozesskette von der Konstruktion der Bauteile über die Prozesssimulation bis hin zum Nähprogramm und der automatisierten Vernähung.

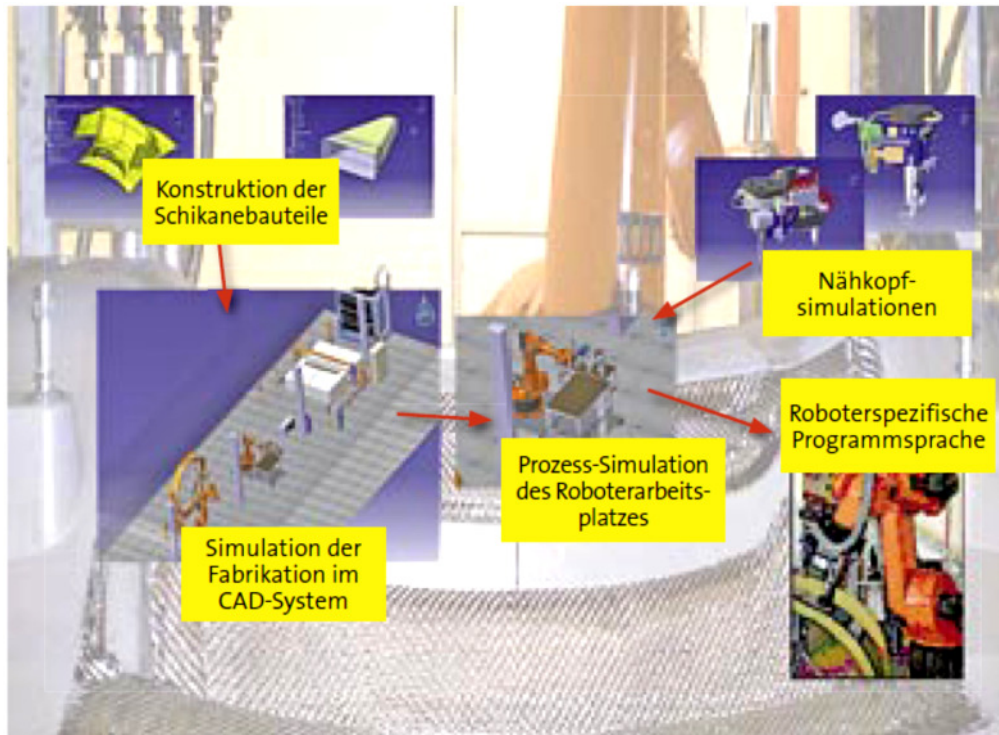


Abbildung 1: Die Prozesskette vom Bauteil bis zur automatisierten Vernähung [Herkt et al. 2007]

Die Arbeit hat zum Ziel, eine Prozesskette zur robotergestützten Herstellung vernähter faserverstärkter Preforms zu entwickeln.

Zusammenfassend dargestellt werden in der Arbeit folgende Teilziele verfolgt:

1. Zunächst wird der Wissensstand im Bereich der Textil- und Fügechnik für Faserhalbzeuge beleuchtet und daraus abgeleitet eine technologische Lösung zum Fügen der betrachteten Struktur dargestellt.
2. Um die Reproduzierbarkeit einer automatisierten Lösung zu gewährleisten, wird der Einsatz von Sensoren untersucht. Hierbei wird sowohl auf berührungslose wie auch taktile Sensorik eingegangen.

3. Ausgehend von der ausgewählten textiltechnischen Füge­technik werden die Parameter für das automatisierte Vernähen der Preform experimentell ermittelt.
4. Abgeleitet von den ermittelten Parametern werden Applikationsuntersuchungen an der Preform durchgeführt mit dem Ziel, die technische Machbarkeit darstellen zu können.
5. Ferner wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt und die Kosten für eine industrielle Fertigung der betrachteten Struktur unter Berücksichtigung der aktuell geplanten Kadenzen der A350 berechnet. Abschließend wird der präsentierte Lösungsansatz mit dem Stand der Technik zur Herstellung von Flugzeugfensterrahmen verglichen mit dem Ziel das Potenzial eines Einsatzes für die Serienfertigung abzuschätzen.

Das Ergebnis dieser anwendungsorientierten Arbeit ist eine Prozesskette, die die automatisierte Vernähung einer textilen Struktur vom CAD-Modell bis hin zur gefügten Preform abbildet. Die entwickelte Prozesskette wird in der Form einer erweiterten ereignisgesteuerten Prozesskette dargestellt.

Es handelt sich hierbei um eine Arbeit, die unterschiedliche ingenieurwissenschaftliche Disziplinen beinhaltet und sich als Synthese dieser Disziplinen versteht. Daher wird im Speziellen bei der Darstellung der Grundlagenuntersuchungen auch auf sensor- bzw. bildverarbeitungstechnische Grundlagen ebenso wie die für die Preformtechnik zwingend notwendigen werkstoffwissenschaftlichen Grundlagen eingegangen.

2.1 Erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst dargestellt.

1. Aus der Analyse des Stands der Technik wurde die Verwendung des Blindstiches als technische Möglichkeit des Fügens von textilen Halbzeugen abgeleitet.
2. Um die Reproduzierbarkeit einer automatisierten Lösung zu gewährleisten, wird der Einsatz von Sensoren untersucht. Im Kapitel 4 *Grundlagenuntersuchungen zur Sensorik* wird die Machbarkeit einer sensortechnischen Lösung an textilen Halbzeugen präsentiert. Hierbei wird sowohl auf berührungslose wie auch taktile Sensorik eingegangen. Ziel des Einsatzes von taktile Sensorik ist es hierbei während der Vernähung mit einer konstanten Kraft auf das textile Halbzeug einzuwirken. Die Grundlagenuntersuchungen erfolgten in Kooperation mit dem Institut für Robotik der Johannes Kepler Universität Linz. Der entwickelte Regelalgorithmus erlaubte es, dass der Roboter ein sprunghaftes Absetzen des Untergrundes um ca. 2mm in weniger als 1 Sekunde derart ausgleichen konnte, dass danach wieder eine Kraft von 2N auf die textile Unterlage wirkt.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) der Technischen Universität Wien wurden Untersuchungen zur berührungslosen Kantendetektion durchgeführt. Um den Farbbereich der optimalen Reflexion an den Fasern zu bestimmen, wurden unterschiedliche Carbonhalbzeuge mit Hilfe eines Michelson-Interferometers auf deren Reflexion getestet (siehe Kapitel 4.2.1. *Spektralanalyse an textilen Carbonhalbzeugen*). Es zeigte sich, dass der Bereich mit der maximalen Reflexion im Rotbereich des für den Menschen sichtbare Farbspektrum liegt.

3. Die Robustheit des Vernähens mittels Blindstich wurde in einem umfangreichen Probenprogramm getestet. Es konnte gezeigt werden, dass eine Naht auf Carbonhalbzeugen im Blindstich adaptiert auf die gewählte Preform durch gezielte mechanische Parameteradaption des Nähkopfes stabil und robust hergestellt werden kann (siehe Kapitel 5 *Entwicklung des Nähprozesses*).

4. Im Kapitel 6.1 *Grundlegende Untersuchungen zur Parameterermittlung für den automatisierten Nähprozess* wurden insbesondere Untersuchungen an Segmenten der zu vernähenden Subpreforms hinsichtlich der generellen Vernähbarkeit dieser durchgeführt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass ein Nähfaden aus Glas bei einer Stichlänge von 13mm das beste Nahtbild erzeugt.
Im Kapitel 6.2. *Herstellung eines Prototypen einer A350-Fensterrahmenpreform* wurde gezeigt, wie der A350-Fensterrahmen aus Carbon teilautomatisiert hergestellt werden kann.
Das Kapitel 6.3. *Definitionen für die automatisierte Vernähung der Fensterrahmenpreform* zeigt die gewählte Lage und Form der Nähte. Im Kapitel 6.4. *Experimentelle Voruntersuchungen und Test der Roboternähanlage* und dann im Kapitel 6.6. *Automatisierte Vernähung der A350-Fensterrahmenpreform* konnte gezeigt werden, dass die maximale Nähgeschwindigkeit bei 0,6 m/min liegt und dass die Roboternähanlage robust die Fensterrahmenpreform in einem RTM-Werkzeug vernähen kann. Außerdem konnten im Kapitel 6.5. *Untersuchungen zum automatisierten Handhaben von textilen Preforms* verschiedene Methoden dargestellt werden, um textile Preforms mit Hilfe eines Roboters und unterschiedlichen Greifern aufzunehmen und definiert zu positionieren [Herkt et al. 2009].

5. In einer Wirtschaftlichkeitsanalyse werden die Kosten der robotergestützten Lösung auch mit den Kosten einer manuellen Fertigung verglichen. Die ermittelten Zeiten der Herstellung der Preforms und der Vernähung dieser wurden den Kostenberechnungen zu Grunde

gelegt. Abschließend wird der präsentierte Lösungsansatz mit dem Stand der Technik zur Herstellung von Flugzeugfensterrahmen verglichen und das Potenzial eines Einsatzes für die Serienfertigung abgeschätzt.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Folgenden wird der Stand der Wissenschaft und Technik zunächst für Faserverbundwerkstoffe dargestellt. Textiltechnische Grundlagen für die Herstellung von Preforms für die Herstellung von FVK-Bauteilen bilden ebenfalls einen Schwerpunkt dieses Kapitels. Die Einseitennähtechniken und die Grundlagen der automatisierten Nähetechnik in industriellen Anwendungen und Forschungsprojekten bilden den Abschluss.

3.1 Grundlagen der Faserverbundwerkstoffe

Bei den Faserverbundwerkstoffen handelt es sich um einen Verbund aus Verstärkungsfasern und einem Matrixsystem. Die Fasern können in Form von Kurz- oder Endlosfasern, gerichtet oder ungerichtet, in das Matrixsystem eingebettet werden. Bei der Herstellung versucht man einen möglichst hohen Faservolumenanteil zu erzielen, da die Festigkeitseigenschaften der Faser, die des Harzes bei weitem übersteigen. In der Praxis wird ein Maximum von ungefähr 60% Faservolumengehalt ($\varphi_F=0,6$) angestrebt. Bei höheren Faservolumengehalten besteht die Gefahr, dass einzelne Fasern nicht ausreichend eingebettet sind und mit entsprechenden Eigenschaftsverschlechterungen zu rechnen ist.

Im Gegensatz zu den weit verbreiteten isotropen³ metallischen Werkstoffen muss bei Faserverbundwerkstoffen aufgrund ihrer anisotropen (Eigenschaften sind richtungsabhängig) Eigenschaften eine sehr sorgfältige Auslegung erfolgen. Durch die Anisotropie bieten FVW bei genauer Kenntnis der Bauteilbeanspruchung aber auch die Möglichkeit, eine auf die Belastung entsprechend beanspruchungsgerechte Auslegung der Bauteile und damit eine optimale Bauteilgeometrie zu finden.

Neben der Anisotropie und den guten mechanischen Eigenschaften sind vor allem die gewichtsspezifischen Eigenschaften der FVW, wie gewichtsspezifische Festigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung, denen der

³ Isotropie = die mechanischen Eigenschaften eines Körpers sind in allen Richtungen gleich, d.h. richtungsunabhängig

Metalle in vielen Bereichen überlegen und entsprechen somit der Charakteristik eines idealen Leichtbauwerkstoffs.

3.2 Textiltechnische Grundlagen

Wie bereits erwähnt, können für Faserverbundwerkstoffe Rovings oder Einzelfilamente als Verstärkungsfasern genutzt werden [Neitzel et al. 2004]. Ist die Zielsetzung des Einsatzes von FVW aber nicht eine präzise lokal abhängige Verstärkung zu erreichen, sondern flächige Bauteile zu generieren, so finden textile Flächengebilde Anwendung. Im Folgenden werden kurz die wichtigsten für die Herstellung von FVW textiltechnischen Grundlagen umrissen.

3.2.1 Ebene zweidimensionale Flächengebilde

Die für die Verstärkung von Kunststoffen benötigten textilen Halbzeuge werden klassischerweise aus Hochleistungsfasern (z.B. Aramid-, Glas- oder Kohlenstofffasern) hergestellt. Hierbei kann man auf eine hohe Automatisierung bei der Herstellung dieser Halbzeuge zurückgreifen, auf die im Einzelnen in diesem Kapitel noch ausführlich eingegangen wird. Eine sehr elegante Lösung zur lokalen Einbringung von verstärkenden Fasern stellt die Nähtechnik dar, welche im Kapitel 3.4.1 behandelt wird.

Ausgangspunkt aller Faserhalbzeuge ist ein Faserfilament in endloser oder geschnittener Form. Rovings sind parallel angeordnete, endlose Faserfilamente. Ihre Bezeichnung beruht auf ihrem Gewicht bezogen auf eine bestimmte Länge ($\text{tex} = \text{g}/1000\text{m}$) oder auf der Anzahl ihrer Filamente (K-Zahl). Sie werden mit einer Schlichte behandelt, um sie bei der Verarbeitung zu schützen und um eine bessere Matrixanbindung zu erhalten. Die Abbildung 2 zeigt einen derartigen Roving auf einer Spule. Rovings existieren auch in ummantelter Form. Bei diesen Hybriden ist der Roving mit einem Thermoplast umhüllt, der nach dem Aufschmelzen als Matrix dient. Parallel angeordnete Rovings die nur zur Fixierung mit dünnen Schussfäden versehen sind, sind als UD-Gelege bekannt. Rovings können aber auch zu anderen flächigen Halbzeugen wie Geweben, Geflechtem, Matten und Maschenwaren verarbeitet werden.



Abbildung 2: Roving auf einer Spule

3.2.1.1 Gewebe

Die zu den Flächengebilden zählenden Gewebe sind durch die Rechtwinkligkeit mindestens zweier Fadensysteme gekennzeichnet. Jedes einzelne Fadensystem kann aus mehreren Kett- bzw. Schussystemen bestehen. Die Art der Fadenkreuzung wird gemäß Abbildung 3 in Leinwand-, Körper- und Atlasbindung unterteilt.

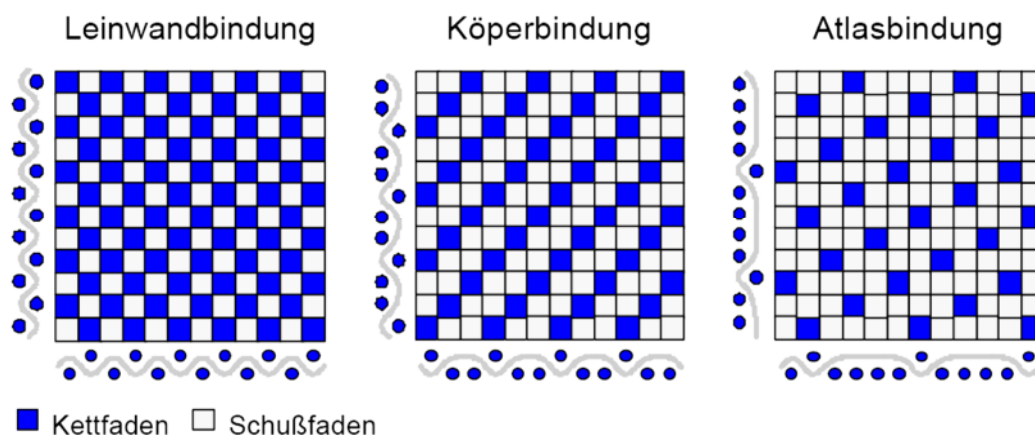


Abbildung 3: Bindungsarten von Geweben (in Anlehnung an [Neitzel et al. 2004], [Schürmann 2005])

Leinwandbindungen zeichnen sich durch eine gute Verwendbarkeit für flächige Lamine aus. Ihr Nachteil ist die eher schlechte Drapierbarkeit.

Körperbindungen dagegen sind sehr gut drapierbar und liefern steifere Laminat als solche, die aus Geflechtem mit Leinwandbindung aufgebaut sind.

Atlasbindungen sind sehr gut drapierbar und Laminat, die aus diesen Bindungen hergestellt sind sehr steif. Der Nachteil der Atlasbindungen besteht darin, dass Vorder- und Hinterseite des textilen Halbzeugs nicht identisch sind (Quelle: Gewebeinfo auf www.swiss-composites.ch).

3.2.1.2 Matten

Matten sind zweidimensionale Fasergebilde und weisen durch eine statistische Verteilung der Faserrichtungen ein quasiisotropes Verhalten auf. Sie zählen ebenso wie Gewebe und Gelege zu den üblichen Verstärkungskomponenten. Als Beispiel können hier Glasfasermatten oder das Material HexTOOL[®]M61 (siehe Abbildung 4) der Firma Hexcel genannt werden. Bei diesem Material sind die Kohlenstofffaserrovings statistisch verteilt angeordnet, wodurch quasiisotrope Werkstoffeigenschaften des CFK-Laminats erreicht werden können.



Abbildung 4: HexTOOL[®]M61 als Rollenware (links) und im ausgehärteten Zustand (rechts) (aus HexTool User Guide)

3.2.1.3 Gelege

Gelege zeichnen sich dadurch aus, dass jeweils eine Schicht innerhalb des Geleges eine bestimmte Orientierung aufweist. Bei Gelegen sind im Gegensatz zu Geweben die Fasern nicht durch Hebungen und Senkungen miteinander verschlungen. Dadurch werden die Rovings kaum onduliert und erreichen in der Regel bessere mechanische Eigenschaftswerte.

Eine Sonderform von Gelegen ist das sogenannte Multiaxialgelege. Es besteht aus einzelnen Faserlagen die unterschiedliche Orientierungen (Faserwinkel) aufweisen.

Daraus resultiert ein quasiisotropes Verhalten des Bauteils. Die oft manuelle Legearbeit kann bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen durch Einsatz von Multiaxialgelegen deutlich verkürzt und somit wirtschaftlicher gestaltet werden. Abbildung 5 zeigt einen möglichen Aufbau eines Multiaxialgeleges.

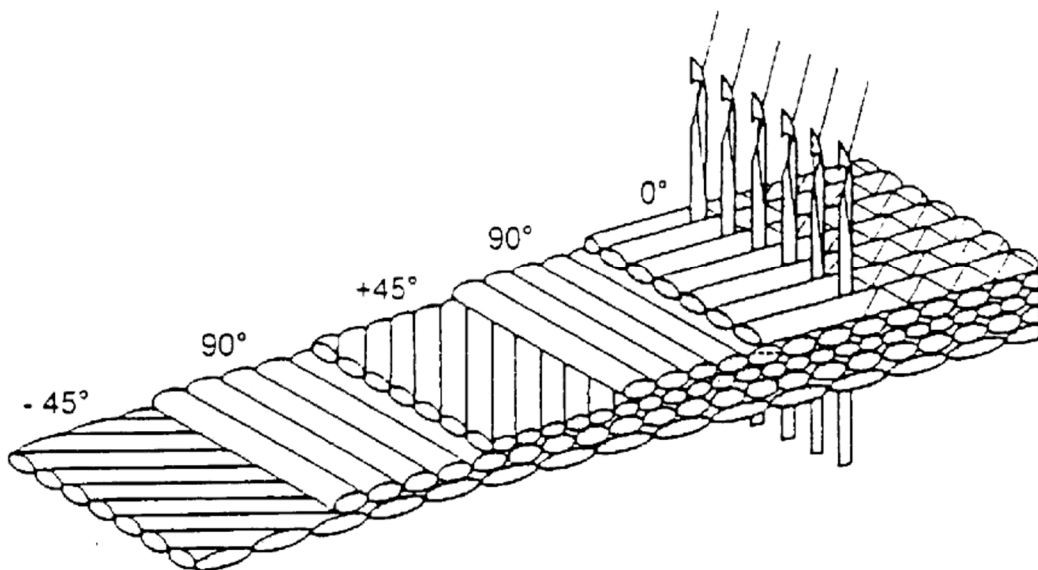


Abbildung 5: Gelege aus unidirektionalen Lagen gezielter Orientierung (nach [Schürmann 2005])

3.2.1.4 Binder

Mit Hilfe eines thermoplastischen Binders, welcher bereits bei der Herstellung von Gelegen appliziert werden kann, wird ein schichtweiser Aufbau von Preforms erleichtert. Der Binder kann thermisch aktiviert werden, schmilzt auf die textilen Halbzeuge auf und verbindet diese nach dem Erkühlen miteinander. Wird der Binder bereits bei der Herstellung der Halbzeuge aufgebracht, so kann dieser entweder als thermoplastisches Gitter auf die Oberfläche aufgebracht werden oder wie beispielsweise von der Firma Hexcel angeboten direkt hybrid gefertigt werden (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Gebündertes Multiaxialgelege (links) und hybrid gefertigtes Gelege (rechts)
[Körwien 2002]

Binder kann auch als Vlies oder Pulver nachträglich manuell auf Preforms aufgebracht werden.

Ein Vorteil dieser Technologie liegt darin, dass durch das Verbinden der einzelnen Lagen relativ einfach mehrlagige Schichtverbunde aufgebaut werden können. Nachteilig ist die verminderte Drapierbarkeit der Einzellagen durch den Binderauftrag, welche mit zunehmender verbundener Lagenanzahl stetig zunimmt. Des Weiteren wird durch den Einsatz von Binder das Tränkverhalten mit Harz des Vorformlings beeinträchtigt.

3.3 Infiltrationsverfahren

Um aus den verschiedenen textilen Halbzeugen ein Bauteil herstellen zu können müssen sie mit einem Matrixwerkstoff infiltriert und anschließend ausgehärtet werden. Dazu steht dem Anwender eine Reihe von verschiedenen Möglichkeiten zur Verfügung. Die Auswahl eines geeigneten Infiltrationsverfahrens richtet sich nach der Beschaffenheit der Halbzeugs, des eingesetzten Matrixsystems und nach der Seriengröße. Im Folgenden werden drei wichtige Infiltrationsverfahren kurz umrissen, da der Fokus dieser Arbeit nicht auf Infiltrationsprozessen liegt. Sie seien hier nur der Vollständigkeit wegen genannt.

3.3.1 RTM-Verfahren

Resin Transfer Moulding (RTM) ist eines der bedeutendsten Harzinjektionsverfahren. Zur Infiltration bedarf es eines zwei- oder mehrteiligen Formwerkzeugs (siehe Abbildung 7), üblicherweise aus Aluminium oder Stahl, mit einer polierten Oberfläche. Wenn besonders hohe Oberflächenqualitäten am Bauteil erreicht werden sollen, können die Werkzeugoberflächen zusätzlich mit sogenannten „gel-coats“ beschichtet werden.

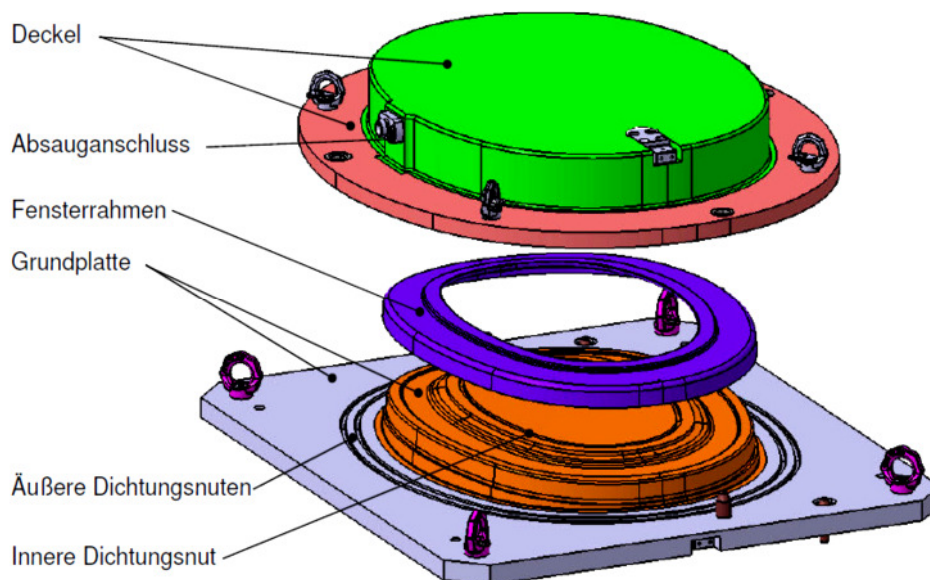


Abbildung 7: CAD-Darstellung eines RTM-Werkzeuges zur Herstellung eines CFK-Fensterrahmens (Quelle: Premium AEROTEC GmbH, Center Fertigungssysteme in Varel)

Zunächst wird das vorgeformte trockene textile Halbzeug in das offene Werkzeug eingelegt. Nach dem Schließen des Werkzeugs kann die Infiltration erfolgen. Das Werkzeug muss über mindestens zwei Öffnungen verfügen. Je nach Form und Geometrie können es auch mehr sein. Mindestens eine Öffnung um das flüssige Harz zuführen zu können und eine zweite um das System zu entlüften. Bei der Infiltration kann das Harz mit Überdruck in das vorgeheizte Werkzeug injiziert werden.

Alternativ dazu oder zusätzlich besteht die Möglichkeit die Kavität mit Hilfe einer Vakuumpumpe zu evakuieren und das Harz mittels Unterdruck einzusaugen. Nach der Infiltration erfolgt das Aushärten des Bauteils innerhalb der geschlossenen Form.

Dabei wird das Werkzeug durch Wärmezufuhr, welche in der Regel durch einen Ofen oder eine Heizpresse erfolgt, weiter aufgeheizt. Nach Abkühlen des Werkzeugs kann das fertige Bauteil entnommen und gegebenenfalls nachbearbeitet werden. Abbildung 8 zeigt schematisch den Ablauf des RTM-Verfahrens.

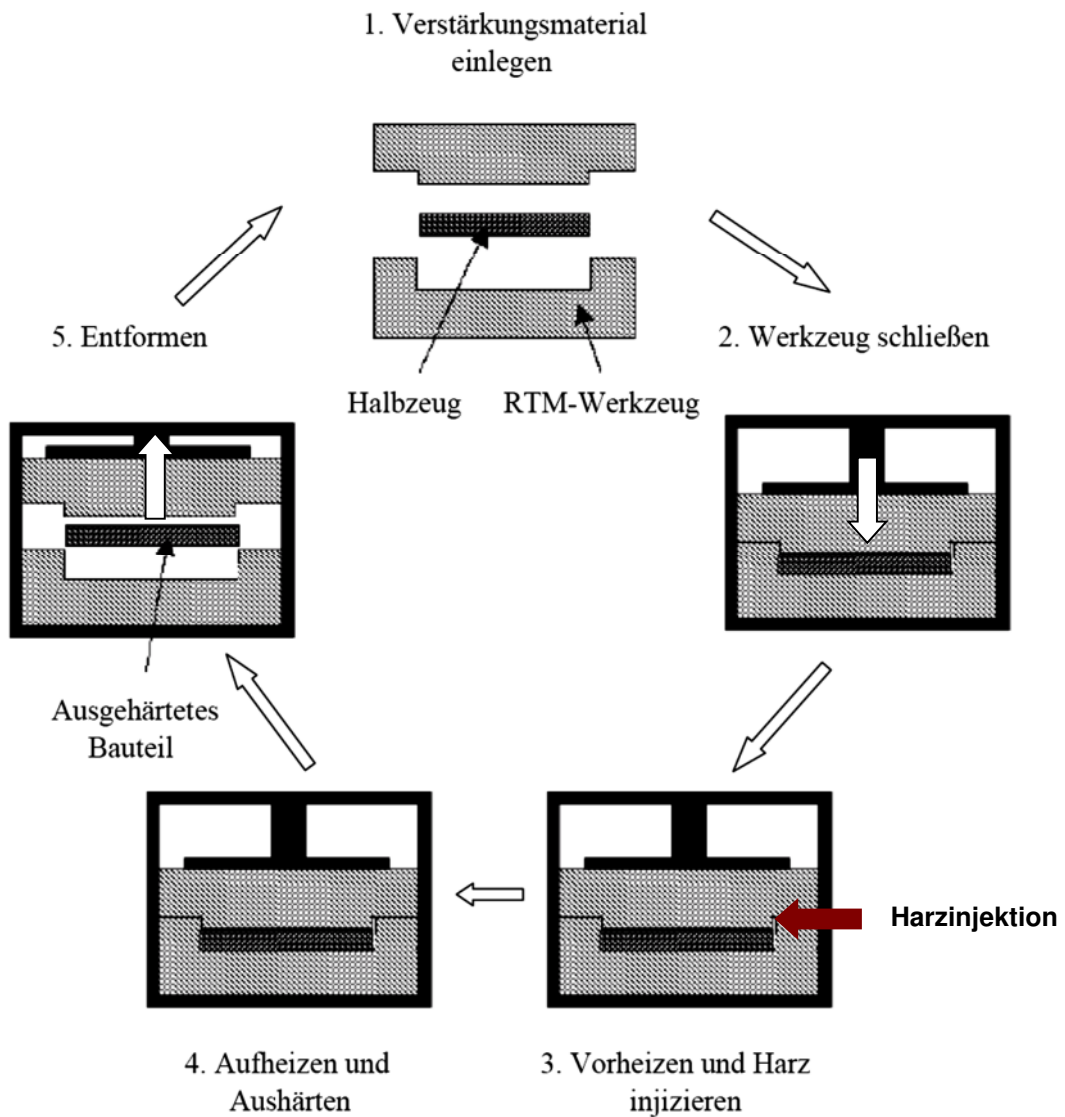


Abbildung 8: Schematische Darstellung des RTM-Verfahrens (nach [Neitzel 2004])

Das RTM-Verfahren ist teilautomatisierbar und zeichnet sich durch relativ kurze Taktzeiten aus. Allerdings steht diesem ein hoher Investitionsaufwand gegenüber, da hier teure zweiteilige Werkzeuge notwendig sind.

3.3.2 VAP-Verfahren

Da es sich beim Vacuum Assisted Process (VAP)- Verfahren um eine Methode handelt, mit der man auf sehr schnelle und einfache Art Probekörper oder auch Serienbauteile herstellen kann, wird dieses im Folgenden näher erläutert.

VAP ist ein Infiltrationsverfahren, bei dem flüssiges vorgewärmtes Harz mit Hilfe von Unterdruck und Temperatur in die Preform gesaugt und direkt im Anschluss ausgehärtet wird.

Der für das VAP-Verfahren in der Regel angewandte Vakuumaufbau ist in der Abbildung 9 schematisch dargestellt.

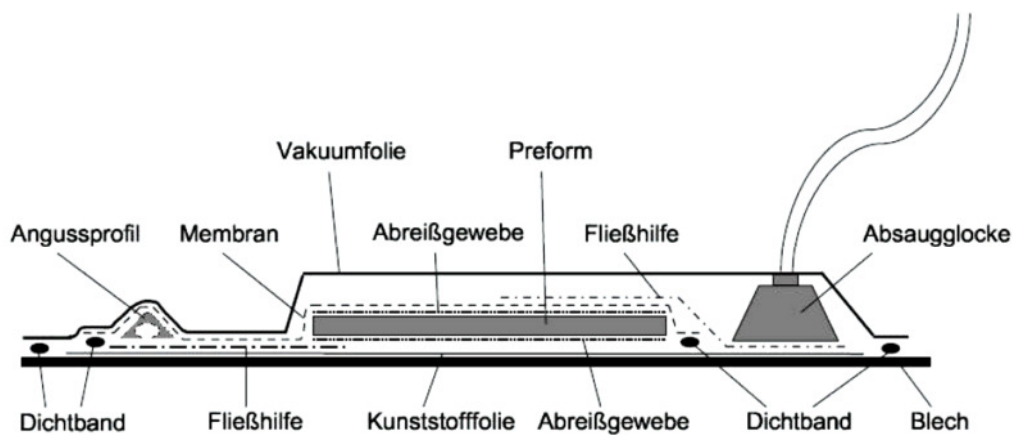


Abbildung 9: Schematischer Aufbau des VAP-Verfahrens (Quelle: EADS–IW Ottobrunn)

Er bildet zwei Kammern welche durch eine semipermeable Membran voneinander getrennt werden.

Die darüber liegende grobmaschige Fließhilfe (Kettengewirk) dient der schnellen Ausbreitung des injizierten Harzes. Im Vergleich zur Preform bietet die Fließhilfe dem Harz einen wesentlich geringeren Fließwiderstand.

Das Blech stellt die untere Werkzeugseite dar und verleiht dem Bauteil eine glatte plane Oberfläche. Eine hohe Oberflächengüte ist hier unbedingt erforderlich. Um ein Festkleben des infiltrierten Bauteils zu verhindern wird eine Folie auf dem Blech positioniert. Auf eine sorgfältige faltenfreie Auslegung der Folie ist besonders zu achten.

Das Bauteil selbst wird auf der Ober- und Unterseite mit einem Abreißgewebe

versehen. Es stellt eine raue homogen definierte Oberfläche sicher und verhindert zusätzlich, dass Fremdkörper, wie beispielsweise die Beschichtung der Membran, durch das Harz am Bauteil kleben bleiben.

Die darüber positionierte semipermeable Membran trennt die beiden Kammern des Vakuumaufbaus voneinander. Setzt man Harz unter Unterdruck und Temperatur, dann sondert es seine leicht flüchtigen Bestandteile in gasförmiger Form ab. Die Membran lässt die dadurch entstandenen Gase durch und hält gleichzeitig das flüssige Harz zurück. Dies ermöglicht eine großflächige Evakuierung und es kann damit auch bei komplexen Bauteilgeometrien zuverlässig verhindert werden, dass durch Restlufteinschlüsse trockene Stellen ohne Harz im Bauteil entstehen, welche das Bauteil in seinen mechanischen Eigenschaften stark beeinträchtigen würde. Die Membran wird mittels einer Dichtmasse luftdicht auf die Folie aufgeklebt. Diese Dichtmasse ist in Form von klebrigen Streifen gut zu verarbeiten. Darüber hinaus ist sie sehr dehnbar und für den erforderlichen Temperaturbereich beständig.

Durch den Angusskanal wird das Harz zugeführt. Es befindet sich in der inneren Kammer direkt auf der Fließhilfe. Sein Abstand zur Preform sollte ca. 10 cm betragen (siehe Abbildung 10). Beim Weg, den das Harz auf dieser Strecke zurücklegt, gelingt es der semipermeablen Membran dem Harz seine gasförmigen Bestandteile mit Hilfe des Vakuums zu entziehen. Die Membran bewirkt also eine Entlüftung des Harzes, welche unmittelbar vor dem Erreichen der Preform stattfindet.

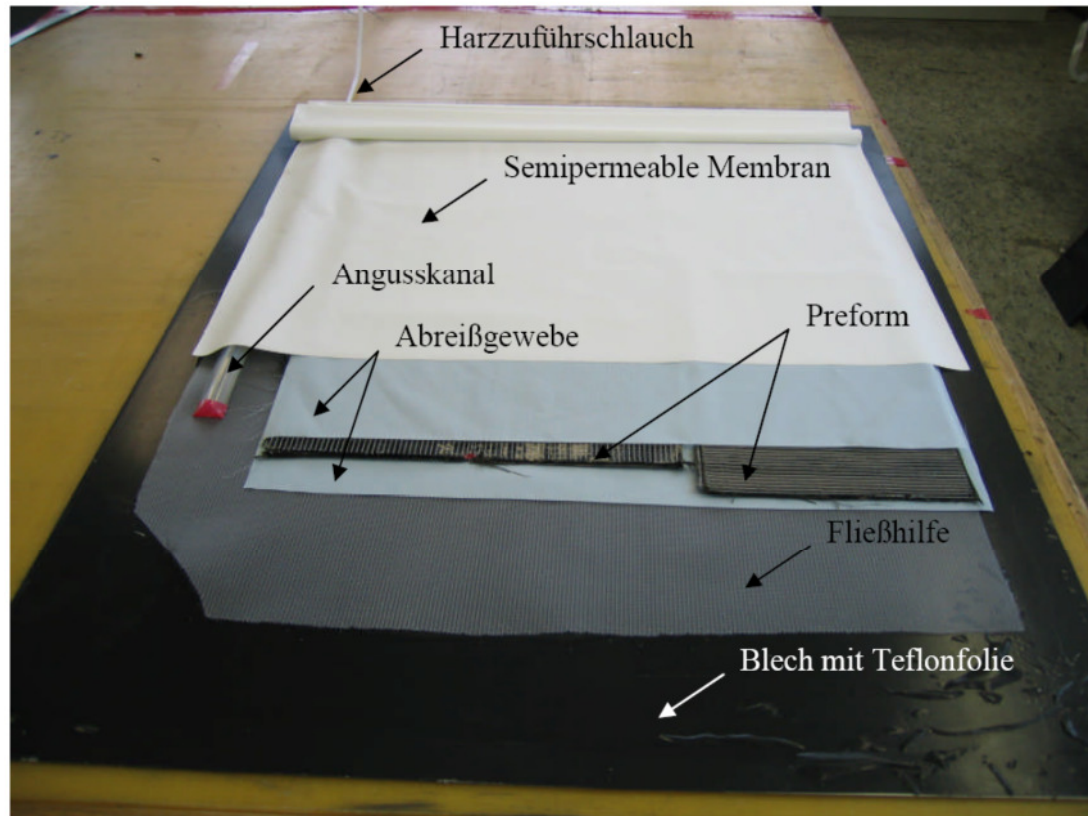


Abbildung 10: Der Vakuumaufbau für die Aushärtung textiler Halbzeuge im VAP-Verfahren

Über den so realisierten Aufbau kommt zuletzt die Vakuumfolie. Sie wird entsprechend der Membran mit der Dichtmasse auf das Blech geklebt. Sie bildet die zweite Kammer, in welcher sich die Absaugglocke befindet. Diese ist an eine Vakuumpumpe angeschlossen und sorgt für den nötigen Unterdruck.

Das Harz wird beim VAP-Verfahren im Gegensatz zu anderen Infiltrationstechniken, wie beispielsweise dem RTM-Verfahren, nicht durch Überdruck injiziert, sondern durch das an die Ansaugglocke angelegte Vakuum eingesaugt. Ein Autoklav ist dadurch nicht notwendig. Darüber hinaus sorgt das Vakuum auch für eine Kompaktierung des Bauteils und die bereits erwähnte Entlüftung des Aufbaus.

Zur Infiltration werden zwei separate Öfen benötigt (siehe Abbildung 11). In einen Ofen befindet sich der VAP-Aufbau mit der Preform, im anderen Ofen das Harz. Die beiden Öfen sind über den Harzzuführschlauch miteinander verbunden.



Abbildung 11: Der für den Aushärteprozess benötigte Ofen

Bevor das Harz infiltriert werden kann, muss es zunächst in einen günstigen Viskositätsbereich gebracht werden. Hierfür wird die zuvor genau berechnete Harzmenge auf 80 °C vorgewärmt.

Um ein Abkühlen des Harzes beim Eindringen in die Preform zu verhindern muss auch die Preform auf 100 °C vorgeheizt werden. Des Weiteren muss gewährleistet sein, dass ein stabiles Vakuum mit einem Unterdruck von 1 mbar anliegt. Ist dies gewährleistet kann mit einem temperaturbeständigen Schlauch das Harz aus dem Harzofen in die auszuhärtende Preform gesaugt werden. Im Anschluss an die Infiltration beginnt mit dem Aufheizen der Aushärtezyklus. Dazu wird die Temperatur auf 120 °C erhöht und 60 Minuten gehalten. Nach dieser Zeit wird zum endgültigen Aushärten des Harzes die Temperatur linear auf 180 °C aufgeheizt. Der Aushärtezyklus nimmt bei der Verwendung des luftfahrtspezifizierten Harzes RTM6 von Hexcel eine Zeit von 120 Minuten in Anspruch (siehe Abbildung 12).

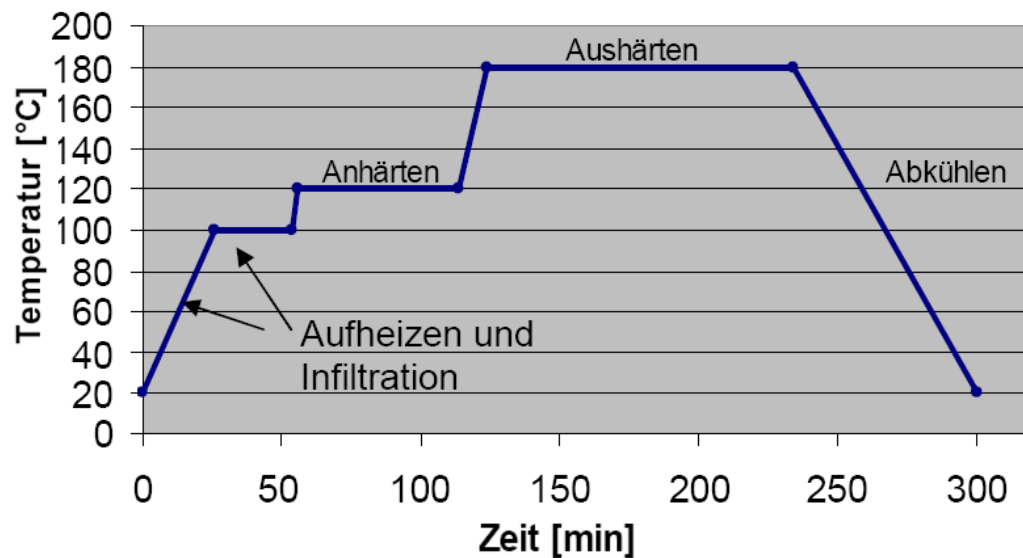


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs während des Aushärteprozesses im Ofen

Während dieser Zeit bleibt das Vakuum aufrecht gehalten und das Bauteil so lange komprimiert, bis das Harz völlig ausgehärtet ist.

Aufgrund der starken Luftzirkulation herrscht eine homogene Wärmeverteilung im Ofen.

Nach Beendigung des Aushärtezyklus erfolgt die Abkühlung des Bauteils auf Raumtemperatur. Hierbei ist das Vakuum nicht erforderlich.

Vorteile des VAP-Verfahrens:

- Hochwertiges Verfahren (hoher Faservolumenanteil, geringe Lärmbelastung, konstanter Harzanteil)
- Geringe Werkzeugkosten für große und komplexe Bauteilkomponenten
- Kein Autoklav notwendig
- Anwendbar für Honigwaben-Sandwichstrukturen

Eine einfachere Variante des VAP-Verfahrens stellt das sogenannte VARI-Verfahren dar, welches im folgenden Kapitel näher beleuchtet wird.

3.3.3 VARI-Verfahren

Bei dem Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI)- Verfahren wird auf die semi-permeable Membran verzichtet. Dieses Verfahren eignet sich sehr gut zum Herstellen einfacher Probplatten aus Multiaxialgelege. Bei größeren Bauteilen ist jedoch der Einsatz der semi-permeablen Membran zu empfehlen, da dadurch eine sehr geringe Porosität des Werkstoffes aufgrund von eingeschlossenen Luftbläschen gewährleistet werden kann. Die Abbildung 13 zeigt den Aufbau des VARI-Verfahrens schematisch. Der Harzverlauf ist an der Preformoberfläche (wo die Fließhilfe angebracht ist) schneller als an der Probenunterseite. Diese keilförmige Ausprägung der Harzfließfront ist ebenfalls in Abbildung 13 dargestellt.

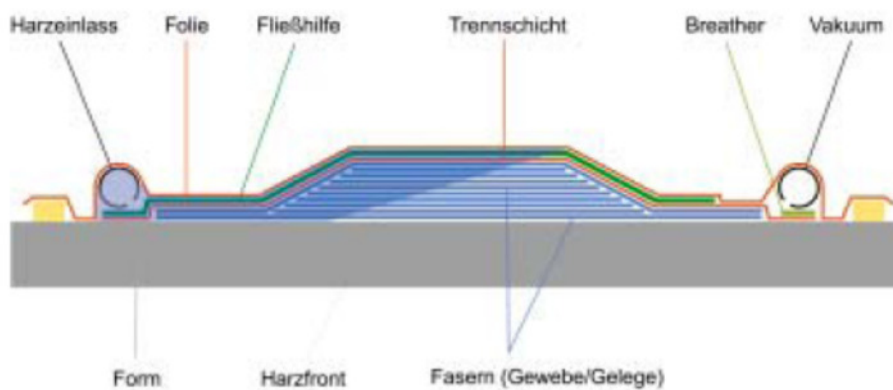


Abbildung 13: Schematische Darstellung des VARI-Verfahrens [Chatzigeorgiou et al. 2003]

Die Abbildung 14 zeigt den Harzfrontverlauf bei einer Glasfaserpreform, die im VARI-Verfahren infiltriert wird.

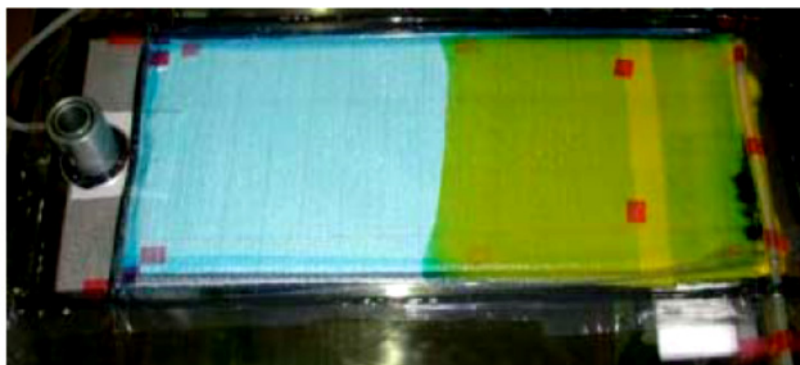


Abbildung 14: Harzfrontverlauf beim VARI-Verfahren gemessen auf einer Probe aus Glasfasermaterial [Chatzigeorgiou et al. 2003]

3.4 Technologische Grundlagen der Prozesskette

In der Literatur lassen sich diverse Projekte finden, welche die Entwicklung von Prozessketten zur Herstellung von Carbonpreforms zum Ziel haben. Im Verbundforschungsprojekt IMac-Pro, welches Ende 2012 beendet wurde, konnte eine Prozesskette zur Herstellung von Versteifungselementen für Flugzeugstrukturen dargestellt werden. Hauptsächlich zur Anwendung kam hierbei die Flechttechnologie.

Im Projekt CFK-Integral, welches vom Faserinstitut der Universität Bremen geleitet wurde, sind verschiedene Prozessketten zur Herstellung einer CFK-Landeklappe untersucht worden. Der Fokus lag hierbei u.a. auf der Temperierung von RTM-Werkzeugen, um die Fertigungszeiten bei der Herstellung dieses Carbonbauteils zu verkürzen.

Im Projekt CFK-TEX unter der Führung der TU München wurde eine Prozesskette zum automatisierten Aufnehmen von Carbonzuschnitten von einem Cuttertisch und das anschließende Drapieren in ein Werkzeug dargestellt. Hierbei wurden die bebinderten Preforms durch Erwärmen des Werkzeuges miteinander gefügt.

Im Projekt FLEXNAHT unter der Führung der Eurocopter GmbH wurde die Nähtechnologie verwendet, um die Subpreformanzahl eines Demonstratorbauteils (CFK-Türstruktur eines Flugzeuges) zu verringern. Hierbei kamen hauptsächlich Portalnähanlagen zum Einsatz.

Im Projekt AUTO-RTM, welches im Jahr 2009 beendet wurde, konnte das Composite Technology Center in Stade eine Prozesskette darstellen, welche die Prozesse vom Zuschnitt der Preforms bis hin zur RTM-Fertigung abdeckte. Das Fügen der Preforms wurde hierbei durch Einsatz von Mikrowellentechnik erreicht.

Die in dieser Arbeit entwickelte Prozesskette rückt die Weiterentwicklung der robotergestützten Nähtechnik in den Vordergrund. Ziel war es hierbei, Preforms mit einer Portalnähanlage nähetechnisch herzustellen, und diese Subpreforms

anschließend direkt im RTM-Werkzeug zu einer Gesamtpreform mit einem Roboter mit integriertem Nähkopf automatisiert zu vernähen. Des Weiteren wurden Ansätze gezeigt, mit denen die Subpreforms automatisiert mit einem Roboter in das RTM-Werkzeug drapiert werden können.

Das EADS-geführte Verbundprojekt REDUX, wovon Teile der Ergebnisse hier vorgestellt werden, befasste sich mit der Entwicklung einer Prozesskette zur Herstellung textiler Preforms. Hierbei wurde die Roboternähtechnik und insbesondere die Blindstichttechnologie durch Integration zusätzlicher Sensorik –sowohl taktil als auch berührungslos mittels Laser- weiterentwickelt.

.

3.4.1 Automatisierte Nähtechnik mit Robotern

Generell kann beim Einsatz von Nähtechnik zwischen Konfektionieren und strukturellem Nähen unterschieden werden. Beim Konfektionieren dient die Naht ausschließlich dem Aufbau der Preform, d.h. sie bildet das Verbindungselement zwischen den unterschiedlichen Faserhalbzeuglagen, die dann die Preform bilden.

Beim strukturellen Nähen hingegen hat das Einbringen des Nähfadens die gezielte Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des ausgehärteten Bauteils zum Ziel.

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik im Bereich der automatisierten Nähtechnik wiedergegeben. Da gerade im Bereich der Nähtechnik mit Robotern oftmals die Bekleidungsindustrie in der Literatur zitiert wird, wird zunächst auf die Entwicklungen in dieser Industriesparte eingegangen und dann Parallelen zum Leichtbau mit textilen Halbzeugen speziell im zivilen Flugzeugbau aufgezeigt.

Bereits 1984 wird die Problematik bei der Vollautomation einer Näherei aufgezeigt. Diese war zum damaligen Stand der Technik nicht möglich, da gerade auf dem Gebiet der Sensorik, die hierfür zum Einsatz kommen müsste, große Differenzierungen vorgenommen werden müssten. Die Lösung zur Vollautomation wird in der Verkettung von Halbautomaten gesehen, die die Prozessschritte Vereinzeln, Aufnehmen, Positionieren und Beschicken abdecken [Bäckmann 1984].

1985 werden wiederum Nähroboter erwähnt, die jedoch eher als Nähmaschinen zu bezeichnen sind. Diese übernehmen typische konfektionstechnische Aufgaben wie Verarbeiten von Taschenbeuteln oder Säumen. Als weiteren Entwicklungsbedarf sah Köhler die Erhöhung der Einsatzbreite der bisherigen Nähroboter und die Entwicklung von Beschickungsrobotern für mechanisierte Näharbeitsplätze [Köhler 1985].

Nestler erwähnt 1985 [Nestler 1985] den hohen Organisationsaufwand bei der Einführung von Nährobotern in der Konfektion. Auch er versteht unter dem Begriff des Nähroboters eher Automaten und die Verkettung dieser.

Ebenso im Jahre 1985 werden wichtige technologische Aspekte beim Einsatz von Nährobotern beschrieben. Hierbei wird wiederum eher von einem Automaten als von einem Industrieroboter gesprochen [Ochsenfahrt 1985].

Panajotov [Panajotov 1989] versteht 1989 ebenso eher einen Automaten als einen Industrieroboter unter dem Begriff „Nähroboter“.

Nestler et al. [Nestler et al. 1990] beschreiben 1990 erstmals den Einsatz eines Industrieroboters in der textilen Konfektion. Der verwendete 5-achsige Gelenkarmroboter trug die Bezeichnung ZIM 15 und konnte mittels Greifelementen zum Positionieren von Stoffstapeln genutzt werden. Die Programmierung erfolgte im „teach-in“-Modus.

Ebenfalls 1990 beschreiben Gebbert et al. [Gebbert et al. 1990] eines der Hauptprobleme bei der Automatisierung in der Bekleidungsmontage, die noch ungelösten Probleme im Bereich der Sensorik.

1997 erwähnen Gottschalk et al. [Gottschalk et al. 1997] ein Offline-Planungssystem, welches eine Nähbahn unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Materialeigenschaften wie auch spezifischer geometrischer Verhältnisse generieren kann. Die Versuche hierzu erfolgen auf einer Walzen-Nähmaschine ASEW.

1998 berichten Moll et al. [Moll et al. 1998] von der Entwicklung einer Nähmaschine mittels der es möglich ist, nur von einer Seite kommend mittels 2 Nadeln Fasergelege zu vernähen. Diese Technik taucht danach in der Literatur immer wieder als ITA-Nähtechnik auf.

Weck et al. [Weck et al. 1999] präsentieren 1999 ein integriertes 3D-Nähsystem. Hierbei wurde ein Nähkopf auf einem Industrieroboter montiert und es war möglich, ohne teach-in-Prozess aus importierten CAD-Daten auf einer Halterung technische Textilien zu vernähen. Es wird weiterhin auf die Notwendigkeit von Kameradaten eingegangen, die benötigt werden, um die Rohdaten aus dem CAD mit den Daten der Realität abzugleichen.

Ebenfalls 1999 beschreiben Dewing et al. [Dewing et al. 1999] einen Industrieroboter, der mittels eines Blindstichnähkopfes - d.h. dass der Nähfaden

mittels einer Bogennadel in das Nähgut eingebracht wird; beim Austritt dieser aus dem Nähgut kommt es zur Ausbildung einer Schlaufe, in die die Nadel beim nächsten Austritt wieder einsticht -, Multiaxialgelege aus Carbon vernähen kann. Der Nähkopf wurde unter der Bezeichnung „Blind stitching apparatus and composite material manufacturing methods“ von Bae plc, International Application PCT/GB95/00703 patentiert.

ALTIN [ALTIN 2000] beschreibt 2000 das „Zweinadel-Einseitennähen“ bei dem der Nähfaden mittels zweier Nadeln in das Nähgut eingebracht wird und auf dessen Unterseite vernäht wird.

Sickinger et al. [Sickinger et al. 2000] erwähnen 2000 zum ersten Mal einen Tufting-Nähkopf (einen Einseitennähkopf, der den Faden in das Nähgut einbringt und dieser nur aufgrund der Reibung in diesem haftet), der an einer konventionellen CNC-Anlage zum Vernähen von trockenen Carbonfaserhalbzeugen verwendet wird (siehe auch Kapitel 3.4.1). Es werden Experimente zur Evaluierung des Verfahrens und der Anwendungsmöglichkeiten z.B. zum Fügen von textilen Preformtechnologien wie Schub/Biegeträger-Sandwiches mit vernähten Schubstegen aufgezeigt.

Ebenfalls im Jahre 2000 unterstreichen Geßler et al. [Geßler et al. 2000] das große Potenzial der Einseitennähtechnik für die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen und zeigen Demonstratorbauteile aus dem Automobil- und Flugzeugbau auf.

Hermann et al. [Hermann et al. 2000] betonen 2000 die Bedeutung der strukturellen Nähtechnik bei der kostengünstigen Herstellung von Faserverbundstrukturen. Desweiteren wird ein Qualitätssicherungskonzept umrissen, bei dem ein Life-Data-Sheet (LDS), in dem alle Arbeitsschritte protokolliert sind, am Rechner entworfen werden kann. In dieses LDS werden alle Prozessparameter, die verwendeten Materialien und Hilfsstoffe vom Bearbeiter eingetragen und mit Soll-Werten abgeglichen. Auf dieser Basis ist dann eine lückenlose Qualitätssicherung möglich.

Wittig [Wittig 2001] nennt 2001 eine Strategie zur automatisierten Preform-Fertigung mittels robotergestütztem „Zweinadel-Einseitennähen“. Die vom CAD-System an den Roboter zu übergebenden Daten sind hier die Nähguthalter, die Nähte und die Nähköpfe.

Keilmann et al. [Keilmann et al. 2002] präsentieren 2002 den Blindstichnähkopf der Firma KSL, der an einen Industrieroboter angebracht werden kann (siehe auch Kapitel 5).

Wittig [Wittig 2002] stellt 2002 ein Offline-Programmiersystem vor, mittels dem der Anwender in der Lage ist, Kollisionsvermeidung und Simulation bei einem robotergestützten Nähprozess (hier mit dem ALTIN Zweinadel-Einseitennähkopf) für Preforms zu betreiben.

Brandt et al. [Brandt et al. 2002] geben 2002 einen Überblick über den derzeitigen Stand der Entwicklungen auf dem Gebiet der roboterunterstützten Preformherstellung und verweisen auf ein mittels Textiltechnik gefertigtes Demonstratorbauteil, ein Rumpfschalensegment für einen Eurofighter. Desweiteren wird hier auch die robotergestützte Flechttechnik angesprochen, die hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt sein soll.

Hogg et al. [Hogg et al. 2002] beschreiben die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen aus vernähten Preforms hinsichtlich der Impact-Eigenschaften.

Filsinger et al. [Filsinger et al. 2003] zeigen 2003 eine industrielle Anwendung der Blindstichtechnologie auf. Es handelt sich hierbei um eine Portalnähanlage, an der ein Blindstichnähkopf der Firma KSL angebracht ist, mittels derer Druckkalotten-Preforms für den A380 vernäht werden.

Als Beispiel für einen weiteren Schritt in Richtung Industrialisierung dieser Technologie sei hier zusätzlich das Forschungsprojekt Flexnaht unter der Führung der Eurocopter Deutschland GmbH in den Jahren 2005 bis 2008 genannt. Hierbei wurden Preforms ebenfalls mit Hilfe einer Portalnähanlage hergestellt. Durch den Einsatz der Nähtechnik konnte die Anzahl von Sub-Preforms eines Hubschrauberbauteils aus CFK von 133 auf 42 reduziert werden [Weimer et al. 2008].

3.4.1.1 Tufting

Das Tufting hat seine Wurzeln in der Teppichherstellung und ist ein bereits seit langem in der Textiltechnik bekanntes Nähverfahren. Hierbei wird ein Faden mit einer Nadel in das Textil eingebracht und verbleibt dort aufgrund von

Reibungskräften. Die Nadel bringt den Faden also in das Textil ein und der Fuß hält diesen darin zurück, bis die nächste Schlaufe eingebracht ist. Abbildung 15 zeigt dieses Verfahren schematisch.

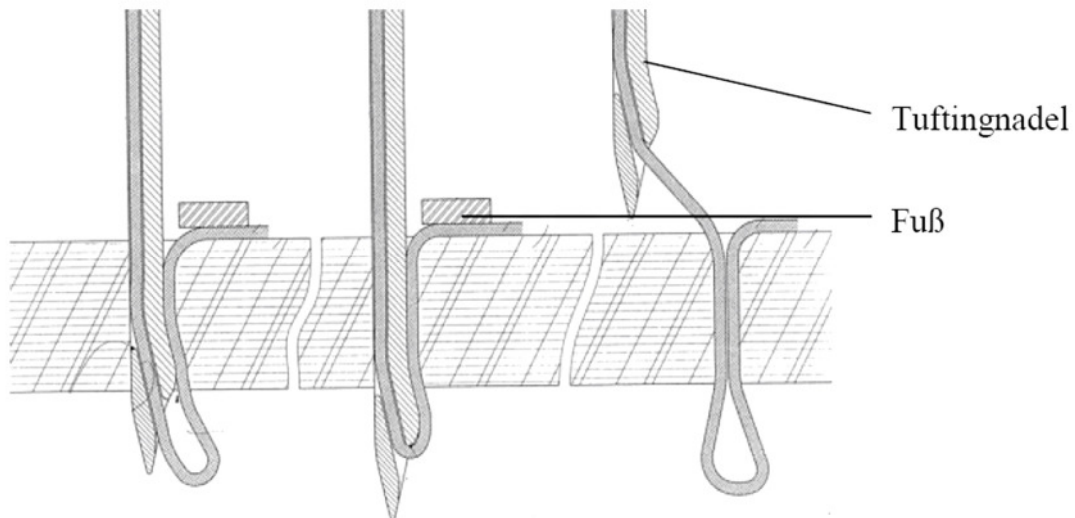


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Tuftingprozesses [Geßler et al. 2002]

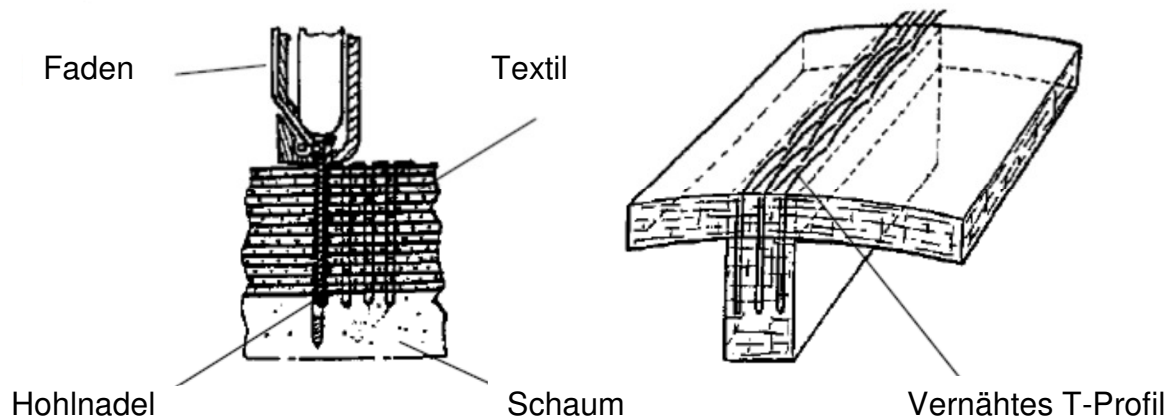


Abbildung 16: Prinzipdarstellung des Tuftings (links) und mit dieser Technologie hergestellte Preform (rechts) [Körwien 2002]

Der größte Vorteil des Verfahrens ist, dass auch Bauteile mit sehr eingeschränkter Zugänglichkeit gefügt werden können. Wie aus Abbildung 16 ersichtlich wird, können auch Stringer (hier abgebildet ist ein T-Stringer) direkt mit der trockenen Haut verbunden werden. Ein großer Nachteil dieser Technologie ist, dass die Nähte durch einfaches Herausziehen abhängig von

der Stärke des vernähten Materials wieder aufgetrennt werden können. Eine mögliche Anwendung dieser Technologie wurde 2002 von Geßler et al. [Geßler et al. 2002] dargestellt. Es handelte sich hierbei um eine Preform für eine KFZ-Unterbodengruppe aus Faserverbund. Bei der Herstellung dieser Preform kam auch das Tufting zum Einsatz (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17: Bodengruppenpreform vor dem Vernähen (links) und Tuften des Sitzträgeranschlusses an den Tunnel (rechts) [Geßler et al. 2002]

3.4.1.2 Blindstich

Ein weiteres Einseitnähverfahren ist das sog. Blindstichverfahren. Hierbei wird der Faden in das Nähgut mittels einer Bogennadel eingebracht und es entsteht ein wie in Abbildung 18 dargestelltes Nahtbild.

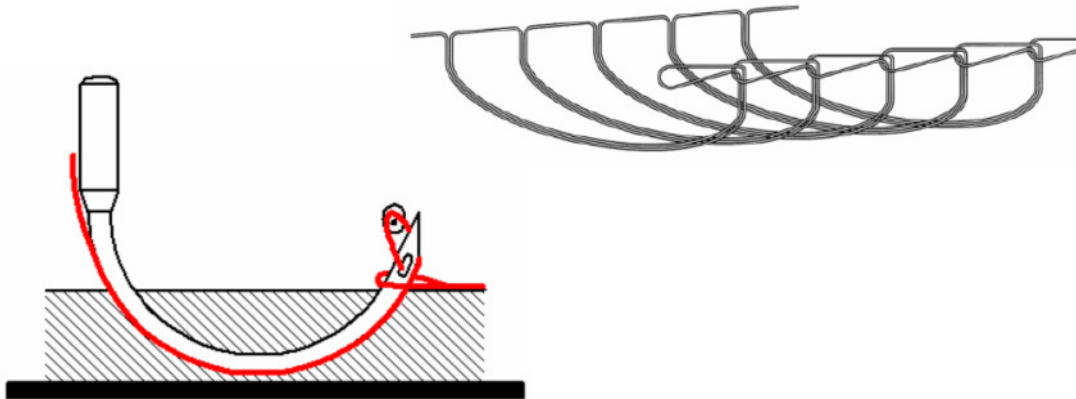


Abbildung 18: Stichprinzip des Blindstiches (links) und Nahtbildung (rechts oben) [Geßler et al. 2002]

Sobald der Faden in das Nähgut eingebracht ist und die Nadel aus dem Textil austritt, wird dieser von einem Greifer gehalten. Es kommt zu einer Schlaufenbildung. Diese Schlaufe wird solange von dem Greifer gehalten, bis die Nadel wiederum aus dem Gelege tritt und den nächsten Fadenabschnitt durch die Schlaufe führt. Eine der möglichen Applikationen dieser Technologie wurde von im Jahre 2002 dargestellt [Geßler et al. 2002] [Körwien 2002]. Als Testbauteil fungierte die Rumpfsseitenschale des Eurofighter-2000 (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Versteifungsprofile am Kampfflugzeug (links) und Rumpfsseitenschale (rechts) [Körwien 2002]

Hierbei wurden die Spante sowohl mit Hilfe der Blindstichttechnologie (siehe Abbildung 20) als auch im ALTIN-Nähverfahren (siehe Kapitel 3.4.1.3) mit der Rumpfschale vernäht.



Abbildung 20: Blindstichnaht an der Rumpfsseitenschale des Eurofighter-2000 [Geßler et al. 2002]

Bei der Vernähung der Rumpfsseitenschale des Eurofighter-2000 handelte es sich um ein Forschungsprojekt, um die generelle Machbarkeit zu demonstrieren. Industrialisiert wird die Blindstichttechnologie bei der Herstellung der Druckkalotte des A380 eingesetzt. Hierbei wird der Blindstichnähkopf allerdings nicht als Roboternähkopf verwendet, sondern dieser vernäht einzelne Bahnen des Trockengeleges auf einer Portalanlage (siehe Abbildung 21).



Abbildung 21: Portalanlage der Fa. Saertex zur Vernähung der Druckkalotte des A380 (rechts) und automatisiertes Drapieren der vernähten Preform auf dem Werkzeug (rechts) (nach Vortrag „Research project: Automated preform manufacturing in the process chain“ von Manuel Herkt, 4th EADS Advanced Technology Workshop 2005)

3.4.1.3 Alternative Einseitennähverfahren

Neben den bereits erwähnten Einseitennähverfahren Tufting und Blindstich, gibt es noch weitere Verfahren, die hier nur der Vollständigkeit halber Erwähnung finden. Bei dem Einseitennähverfahren der Firma ALTIN (siehe Abbildung 22) handelt es sich um eine Technik, bei der mittels einer Nadel und einem Fänger der Nähfaden in das Nähgut eingebracht wird. Der Fänger übernimmt die Schlaufe, welche von der Nadel erzeugt wurde und zieht diese von der Unterseite des Nähguts an dessen Oberseite. Die Verkettung entsteht hierbei an der Nähgutoberseite und es ergibt sich ein Stichbild, welches dem Stichtyp 108 der DIN 61 400 ähnlich ist.

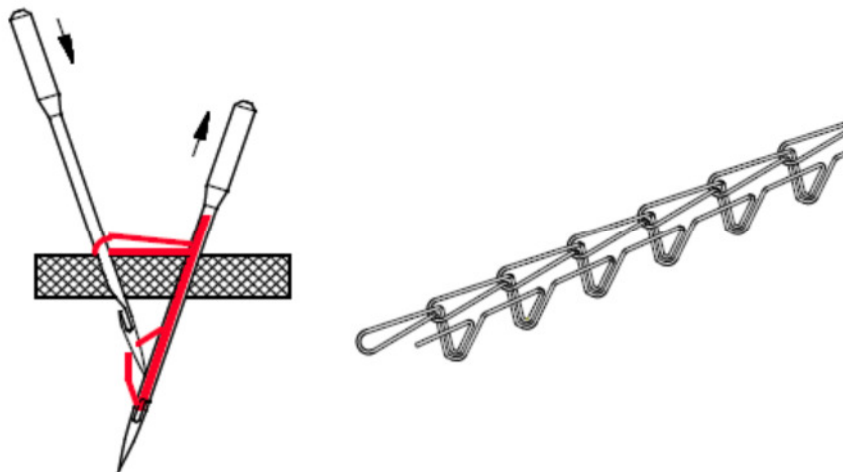


Abbildung 22: Nahtbildungsprozess (links) und Stichbild (rechts) des Prinzips der Firma ALTIN [Geßler et al. 2002]

Als Applikationsbeispiel lässt sich auch hier die Rumpfseitenschale des Eurofighter-2000 nennen. Hier wurden als Alternative zum Blindstich Spante auch im ALTIN-Nähverfahren auf die Haut aufgebracht (siehe Abbildung 23).



Abbildung 23: Vernähen der Spante auf der Rumpfseitenschale mit dem ALTIN-Nähkopf [Geßler et al. 2002]

Ein weiteres Verfahren ist das Einseitnähverfahren, welches am Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen entwickelt wurde (siehe Abbildung 24). Bei diesem Prinzip kommt es zur Bildung eines Zweifadenkettenstiches durch 2 Nadeln. Die Nadeln werden hierfür abwechselnd durch das Nähgut geführt. Die Nadeln passieren einander mit einem Abstand von 0,4 mm und eine von der einen Nadel gebildete Fadenschleife wird jeweils von der anderen übernommen. Der Einstichwinkel kann hierbei stufenweise von 15 ° bis 45 ° variiert werden.

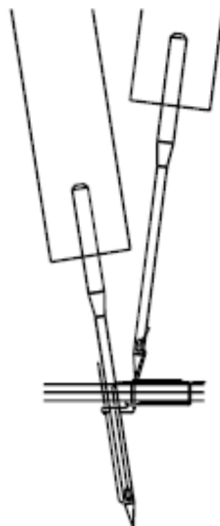


Abbildung 24: Nahtbildungsprozess des ITA-Verfahrens [Geßler et al. 2002]

Als Beispiel der Anwendbarkeit dieser Nähtechnologie lässt sich die Bodengruppenpreform für ein Automobil aus dem Forschungsprojekt INTEX nennen. Hier wurde der Boden der Preform mit 3 Nähten und der Längs- und Sitzquerträger mit jeweils einer Naht mit dem ITA-Nähkopf vernäht (siehe Abbildung 25).

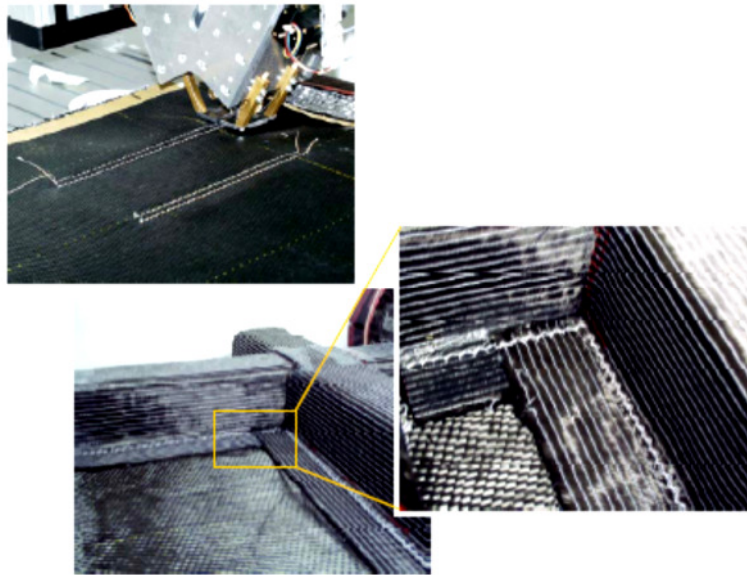


Abbildung 25: Vernähen des Bodens und der Querträger der KFZ-Preform [Geßler et al. 2002]

Diese beiden Nähverfahren –d.h. das ALTIN- und das ITA-Verfahren- benötigen jedoch beide einen Nadelauslauf unterhalb des Nähgutes, was in der Praxis zu Einschränkungen bezüglich deren Verwendbarkeit führt.

3.4.1.4 Stand der Technik der Nahtverfolgungssensorik

Bis dato wurden keine Literaturstellen gefunden, die von Sensoren berichten, mit denen es möglich ist, eine textile Naht -bestehend entweder aus Kohlenstoff- Glas- oder Aramidfasern- auf einem textilen Untergrund zu verfolgen.

Jedoch wurden seit den 80er Jahren starke Forschungsanstrengungen hinsichtlich der Entwicklung von Sensoren zur Nahterkennung bei Schweißvorgängen unternommen.

So berichten Vavreck et al. [Vavreck et al. 1989] im Jahre 1989 von einem auf einen Unimate 760 Sechs-Achsen-Roboter installiertem Sensorsystem,

welches in der Lage ist, eine Schweißnaht auf Aluminium zu erkennen. Der Sensor basiert auf dem Prinzip der Lasertriangulation mittels eines 5 mW Halbleiterlasers mit 780 nm Wellenlänge und einer Kamera, die den projizierten Laserpunkt auf der Oberfläche erkennt. Mittels eines Busses wird dann der Schweißbrenner robotergestützt über die Oberfläche geführt.

Bahlmann et al. [Bahlmann et al. 1999] beschreiben 1999 eine Methode zur automatischen Qualitätskontrolle von textilen Nähten. Hierbei wurde zur Datenerfassung das Textil aufgehängt, beleuchtet und mittels einer Kamera das Bild aufgenommen. Die Welligkeit des Textils galt hier als das Hauptkriterium der Qualität von Textilien.

Drews et al. [Drews et al. 2000] berichten 2000 von einem optischen Lasersystem zur 3D-Nahtverfolgung beim Laserschweißen. Hierbei kommt das sog. Lichtschnittverfahren mit Mehrstreifenprojektion zur Anwendung. Hierdurch wurde eine Online-Bahnkorrektur des Laserwerkzeuges am Werkstück realisiert.

2001 beschreiben Jeong et al. [Jeong et al. 2001] einen mit 3000 Umdrehungen pro Minute rotierenden Lichtbogensensor und einen Nahtverfolgungscontroller für Schweißroboter. Sein Prinzip beruht –wie generell bei allen Lichtbogensensoren– auf einer Stromstärkenänderung, die durch eine Widerstandsänderung der leitenden Strecke zwischen Kontaktrohr und Lichtbogenfußpunkt verursacht wird.

Schweinzer et al. [Schweinzer et al. 2001] berichten 2001 von einer Methode zur Führung eines Industrieroboters mit Hilfe eines Bilderkennungssystems. Der Roboter war in der Lage, einfache Gegenstände (wie z.B. einen Würfel mit Bohrungen) zu erkennen und auf händische Verschiebungen desselben zu reagieren.

Vincze et al. [Vincze et al. 2002] berichten 2002 von einer Methode zum automatischen Lackieren von unbekanntem Bauteilen. Unter Verwendung eines Lasertriangulationssensors und einer Kamera von IVP, Schweden. Mittels der Kamera wird eine Punktwolke bestehend aus äquidistanten Punkten im Abstand von 1,2 mm erzeugt. Über verschiedene Software-Tools wird dann die Bahn für das Lackieren generiert und mittels des off-line Programmiersystems RobotStudio von ABB direkt in ein Roboterprogramm umgeschrieben. Bei

diesem Ansatz ist also kein CAD-Modell des Bauteils erforderlich, da die Peripherie derart gestaltet ist, dass der Roboter eigenintelligent die Bauteile anhand von Sensordaten erkennt.

3.5 Stand der Technik für Passagierfensterrahmen

Bei Fensterrahmen stehen die Zwecke zur Strukturintegrität des Flugzeuges und die Wünsche der Passagiere in starkem Widerspruch. Aus struktureller Sicht sollten Fenster klein, von überschaubarer Anzahl und kreisrund sein; Passagiere hingegen möchten viele, große und möglichst rechteckige Fenster [Niu 1999]. Die Integration von Fensterrahmen in die Rumpfstruktur anhand von zwei Beispielen ist in Abbildung 26 dargestellt.

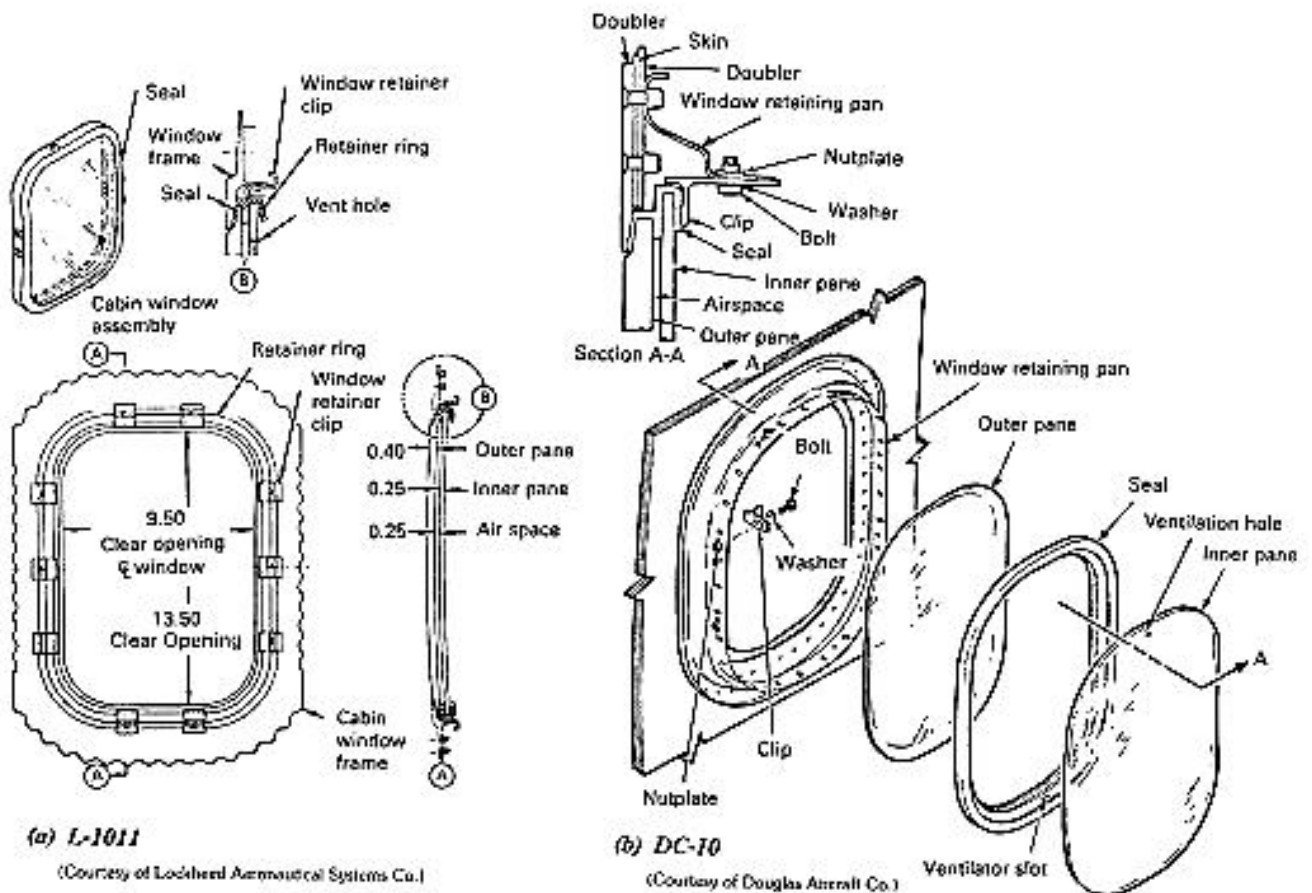


Abbildung 26: Darstellung der Installation von Passagierfensterrahmen im Flugzeug am Beispiel der L-1011 und der DC-10 [Niu 1999]

Herkömmliche Fensterrahmen werden überwiegend als Präzisionsschmiedeteil aus Aluminium gefertigt. Aufgrund der Materialkompatibilität zwischen dem Aluminiumfensterrahmen und dem herkömmlichen Flugzeugrumpf aus Aluminium ergeben sich bei dieser Paarung keine unerwünschten strukturmechanisch relevanten Spannungen infolge von unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Die Ausschnitte für die Fenster im Rumpf fallen in die Zone des Flugzeugrumpfes, in der die höchsten Spannungen induziert durch die Rumpfverformung auftreten. Zusätzlich wirken auf die Fensterausschnitte -und damit auch auf die Rahmen- Kräfte, welche durch den Kabineninnendruck hervorgerufen werden. Diese Kräfte rufen Tangentialspannungen in Richtung der Umlaufkoordinate hervor. Desweiteren treten Schubspannungen in den Bereichen $\pm 45^\circ$ zur Symmetrieachse des Fensterrahmens auf.

Die Abbildung 27 stellt die Belastungen an einem Flugzeugfensterrahmen nochmals schematisch dar.

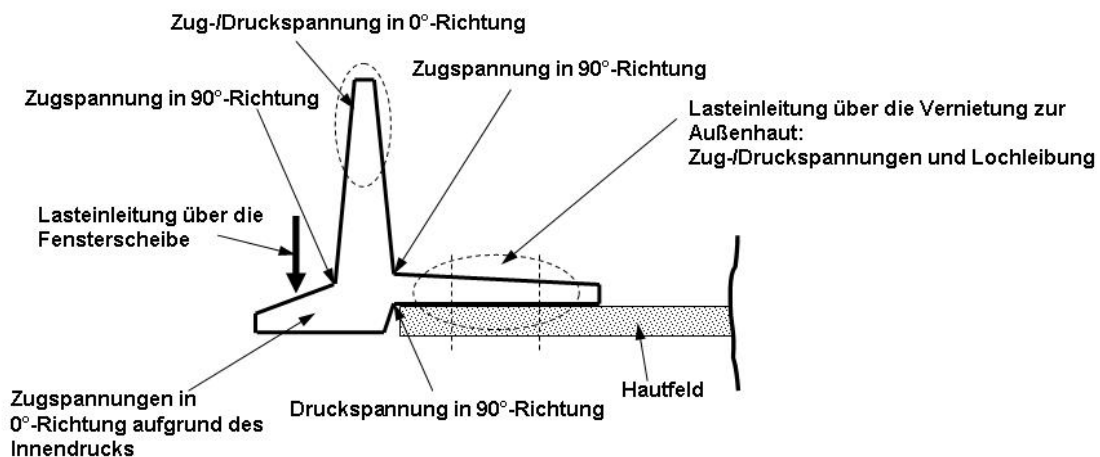


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Belastungen im Querschnitt eines Flugzeugfensterrahmens [Jörn 2003]

CFK als Werkstoff für den Fensterrahmen ist die logische Konsequenz, die sich aus der Forderung eines CFK-Rumpfes –wie bei der A350 vorgesehen- ergibt. Aus strukturmechanischer Sicht gibt es daher generell 2 Möglichkeiten, einen Fensterrahmen mit Hilfe der Textiltechnik aus CFK aufzubauen. Die erste Variante sieht einen quasiisotropen Aufbau mit Lagen in 0° , 90° und $\pm 45^\circ$ -Richtung vor. Variante 2 beinhaltet Lagen in 0° und $\pm 60^\circ$ [Airbus 2002a], [Airbus 2002b]. Eine exakte Faserorientierung nach den Hauptspannungen ist nicht

möglich, da die Spannungszustände zu komplex sind, als dass sie mit den verfügbaren Halbzeugen und Verarbeitungsprozessen abgebildet werden können [Jörn 2003].

Bereits Mitte der 70er Jahre gab es Bestrebungen einen CFK-Fensterrahmen für die A300 herzustellen. Hierzu wurde ein Wickelring vorausgehärtet hergestellt und mit den Decklagen ($\pm 45^\circ$ und $0/90^\circ$) verpresst. Das Harz wurde im Handlaminierverfahren nachträglich aufgebracht. Im Vergleich zum Aluminiumfensterrahmen konnte eine Gewichtseinsparung von 50 % erzielt werden [Jörn 2003].

Airbus führte in den 90er Jahren weitere Untersuchungen zur Herstellung eines CFK-Fensterrahmens durch. Es wurde ein Carbon-Wickelteil gefertigt, welches mit einem Flechtschlauch umstülpt wurde. Es wurde eine Gewichtsersparnis von 30% gegenüber der Aluminiumvariante erzielt [Jörn 2003].

Anders als bei den Untersuchungen zum A380-Fensterrahmen (siehe Abbildung 28), bei denen Trockengelege zum Einsatz kamen, wird beim A350-Fensterrahmen ein anderer Fertigungsansatz gewählt. Hier wurde 2003 eine Fertigungsstudie durchgeführt, um dieses Bauteil teilautomatisiert herstellen zu können. Es kam eine Kombination von Wickeln für den inneren Ring und Multiaxialgelegezuschnitten für den Steg des Fensterrahmens zum Einsatz. Die Motivation dahinter waren die Anzahl der Fensterrahmen im A380. Werden bei der A380-800 noch 220 Fensterrahmen verbaut, so sind es bei der A380-900 bereits 260 [Jörn 2003].

Anstatt die Fensterrahmenpreform zu bebindern, wird bei der A350 der Fensterrahmen auf einen Glasgrund gestickt. Außerdem wurde das Design im Vergleich zum Fensterrahmen der A380 derart abgeändert, dass bei dem A350-Fensterrahmen ein integraler Fertigungsansatz berücksichtigt werden kann. Für die Gewichtseinsparung kann aufgrund der Werte der untersuchten Fensterrahmen in anderen Flugzeugprogrammen von einer Gewichtseinsparung im Vergleich zur Aluminiumvariante von 30 % - 50 % ausgegangen werden.

Der Fensterrahmen der A380 ist außerdem mit einem inneren Ring aufgebaut, welcher beim A350-Fensterahmen wegfällt.



Abbildung 28: Prinzipielles Design des A380-Fensterrahmens (Quelle: Airbus)

Dadurch kann der Automatisierungsgrad drastisch erhöht werden.

Boeing verfolgt bei der B787 einen anderen Fertigungsansatz für deren Fensterrahmen. Anstatt eine Fertigungsroute in textiler Preformtechnologie zu beschreiten, wurde hierfür eine Fertigung mit dem Material HexMC[®] der Firma Hexcel gewählt [Feraboli et al. 2007b], [Feraboli et al. 2007b]. HexMC[®] ist ähnlich wie HexTOOL[®]M61 aus statistisch angeordneten vorgetränkten Rovings aufgebaut und ermöglicht damit im Verbundwerkstoff quasiisotrope Werkstoffeigenschaften einzustellen (vgl. Kapitel 3.2.2.2). Bei der Herstellung wird ein Werkzeug verwendet, in dem die Preform unter Druck und Temperatur ausgehärtet wird. Die Abbildung 29 zeigt den ausgehärteten und konturbearbeiteten Fensterrahmen der Boeing B787 aus HexMC[®]. Durch den Einsatz von Tapelegern kann der Automatisierungsgrad bei der Herstellung dieser Fensterrahmenpreform gesteigert werden. Boeing erwartet sich durch den Einsatz des CFK eine Gewichtseinsparung von ca. 50 % gegenüber dem Fensterrahmen aus Aluminium [Feraboli et al. 2007a].

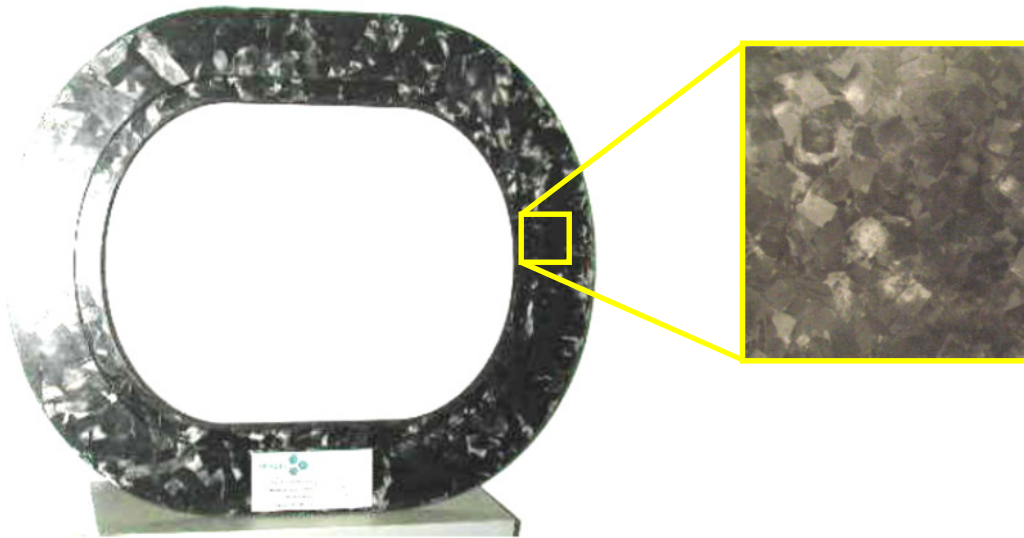


Abbildung 29: Der Fensterrahmen der Boeing B787 aus HexMC® (nach [Feraboli et al. 2007b])

Im Folgenden wird nun aufgezeigt, wie die Preform für den A350-Fensterrahmen aus Textiltechnik aufgebaut und wie diese durch Anwendung der neu entwickelten Methodik mit einem hohen Automatisierungsgrad hergestellt werden kann.

4 Grundlagenuntersuchungen zur Sensorik

Das folgende Kapitel beschreibt die durchgeführten Grundlagenuntersuchungen, deren Ergebnisse für die automatisierte Vernähung mit einem Industrieroboter unerlässlich sind. Es wurden sowohl auf Robotikseite als auch auf Werkstoffseite sensortechnische Experimente durchgeführt. Die besondere Herausforderung war hierbei, die sensortechnisch schwer zu detektierenden Carbonfasern zu erfassen.

Im Folgenden werden sowohl die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen zur berührenden (taktilen) als auch die zur berührungslosen Sensorik präsentiert.

4.1. Grundlegende Untersuchungen zur taktilen Höhenregelung

Bei der Blindstichvernähung von Kohlenstofffaserhalbzeugen ist es unerlässlich, dass der Nähfuß mit einer konstanten Kraft auf das Nähgut drückt, um dieses vorzukompaktieren und es zu einer Stichbildung kommt.

Zusammen mit dem Institut für Robotik der Johannes Kepler Universität Linz wurde ein Regelalgorithmus entwickelt, um den Roboter kraftgesteuert mit einer konstanten Kraft von 2N auf das Textil zu drücken. Diese Kraft wurde als ausreichend erachtet, um das Textil in Position zu halten und die Stichbildung zu gewährleisten. Die durchgeführten Untersuchungen erfolgten mit einem 5-Achsen-Roboter der Firma Quanser (siehe Abbildung 30). Bei diesem Roboter bietet sich die Möglichkeit, mit einer Einschubkarte in einem PC und einer Echtzeitsoftware über MATLAB/Simulink auf den Roboter zuzugreifen und direkt Regelalgorithmen zu implementieren.



Abbildung 30: 5-Achsen-Roboter der Firma Quanser am Institut für Robotik der Universität Linz [Resch 2005]

Um diese Aufgabe lösen zu können, wurden Versuche mit einem Linearpotentiometer gefahren, welches an die Roboterhand angebracht wurde. Abbildung 31 zeigt ein solches Linearpotentiometer schematisch.

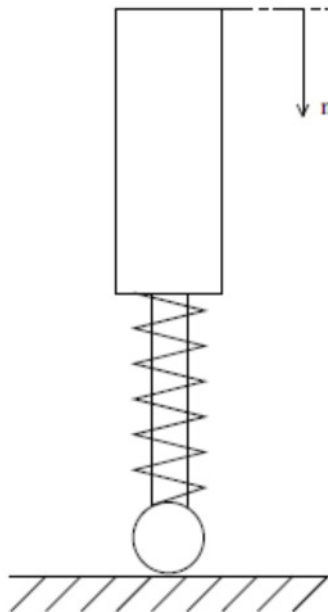


Abbildung 31: Schematische Darstellung eines Linearpotentiometers [Resch 2005]

Das Linearpotentiometer wurde an die Roboterhand befestigt wie es die Abbildung 32 verdeutlicht.

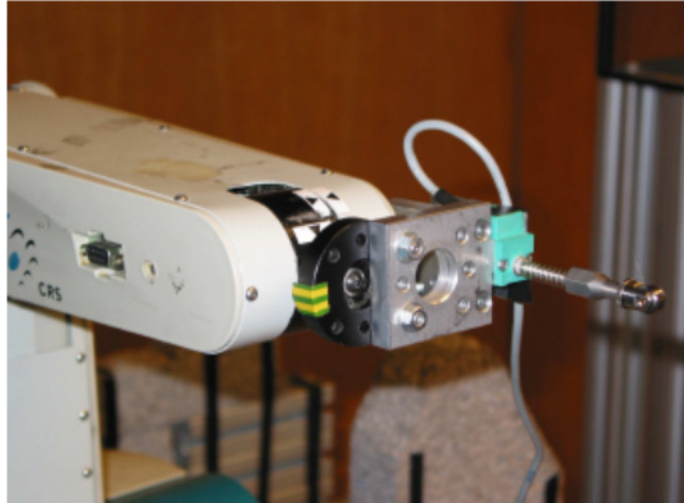


Abbildung 32: Linearpotentiometer an Roboterhand befestigt [Resch 2005]

Wenn der Roboter nun auf eine feste Unterlage verfährt wird somit das Potentiometer um eine Strecke s ausgelenkt. Über die Federkennlinie kann auf die Kraft, welche der Roboter damit auf die Unterlage ausübt zurückgerechnet werden.

Die Bestimmung der Federkonstanten ergab folgende Federkennlinie:

$$F_{Feder} = 1,186 + 56,2s \quad (4.1)$$

s steht hierbei für den Potentiometerweg in Federrichtung. Setzt man also in die Gleichung für $s=0$ ein, so erhält man den Wert für die Vorspannung der Feder. Es ergibt sich also, dass die Feder mit einer Kraft von 1,186 N vorgespannt ist. Die Federkonstante beträgt 56,2 N/m. Aufgrund der begrenzten Weglänge der Potentiometerfeder ist es möglich, Kräfte im Bereich von ca. 1,4 N bis 2,5N zu messen.

Ist die momentan auf das Nähgut ausgeübte Kraft F_{ist} kleiner als eine gewünschte Sollkraft F_{Soll} , so muss das Potentiometer in Richtung der Längsachse n verfahren. Dies kann mathematisch wie folgt beschrieben werden:

$$(F_{Soll} - F_{ist}) = d_{KR}\dot{n} \quad (4.2)$$

Aus Umformen folgt:

$$n = \int \left(\frac{F_{soll} - F_{ist}}{d_{KR}} \right) dt \tag{4.3}$$

Der Skalar d_{KR} stellt hierbei einen Designparameter des Reglers dar. Diese Regelung wird in der Literatur als Impedanz-Kraftregler bezeichnet und lässt sich als Blockdiagramm wie in Abbildung 33 gezeigt darstellen.

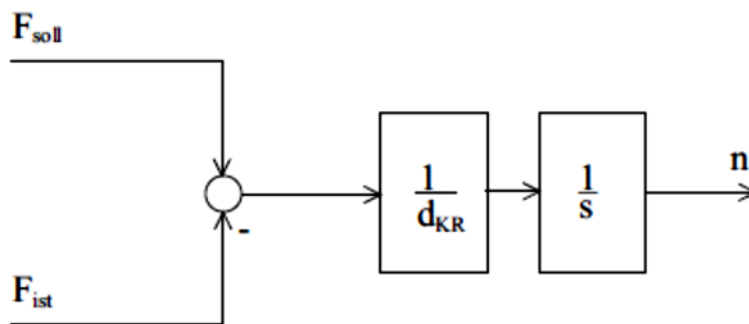


Abbildung 33: Blockdiagramm der Kraftregelung [Resch 2005]

Umgesetzt auf die Robotersteuerung ergibt sich das in Abbildung 34 dargestellte Blockschaltbild.

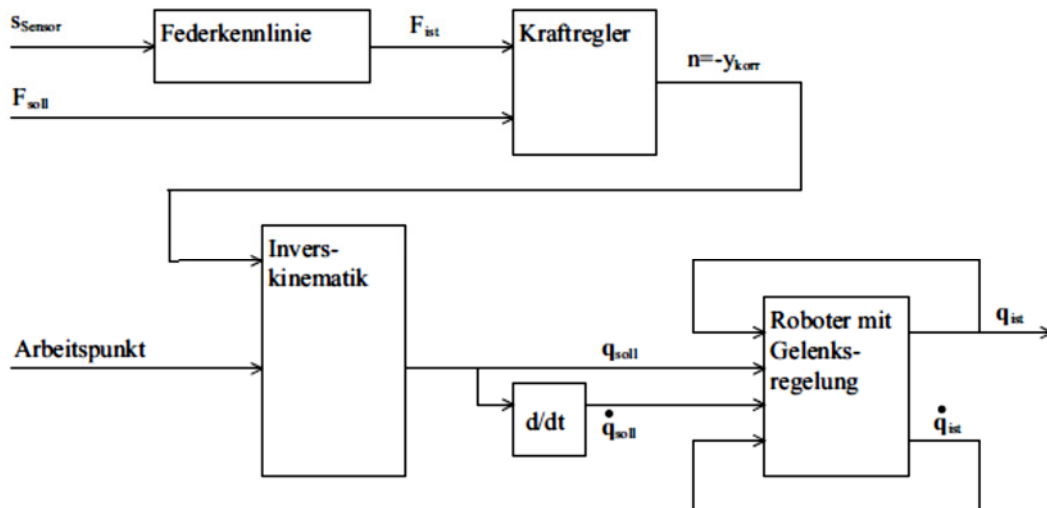


Abbildung 34: Grundstruktur des Kraftregelversuches [Resch 2005]

Es wird ein beliebiger Arbeitspunkt AP in der inertialen x-z-Ebene festgelegt. Aufgabe der Robotersteuerung ist es nun, die von der Kraftregelung geforderten Linearpotentiometerbewegungen umzusetzen. Da das Linearpotentiometer

senkrecht auf die x - z -Ebene positioniert wird, beschränken sich die Roboterbewegungen somit auf die inertielle y -Achse.

Der Designparameter d_{KR} wurde auf 10 gesetzt und folgender Versuch am Roboter gefahren: Der Roboter drückt senkrecht mit einer Kraft von 2N auf die Unterlage. Anschließend wird die Unterlage sprunghaft ca. 2mm nach unten verfahren und nach ca. 5s wieder sprunghaft in die Ausgangsposition angehoben. Abbildung 35 zeigt das Versuchsergebnis.

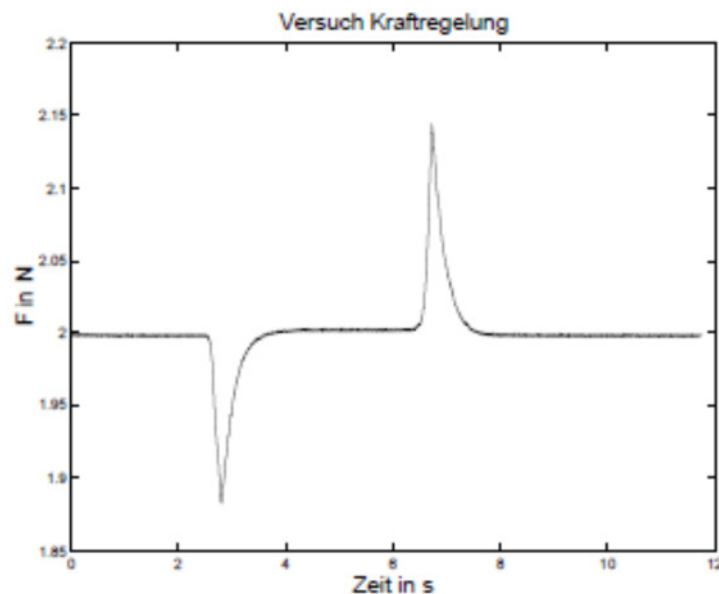


Abbildung 35: Versuchsergebnis der Kraftregelung [Resch 2005]

Es zeigt sich, dass der Roboter durch das Linearpotentiometer in diesem Versuch in weniger als einer Sekunde nach der sprunghaften Änderung der Gegebenheiten wieder mit der Sollkraft von 2N auf die Unterlage drückt. Es ist also möglich, den Roboter mit dem Linearpotentiometer punktförmig zu steuern, d.h. lenkt man den Roboter in der Ebene aus, so kann dieser nach sehr kurzer Zeit wieder die Sollkraft auf das Nähgut ausüben. In einem weiterführenden Versuch muss nun gezeigt werden, dass dies nicht nur für einen Nahtpunkt sondern auch für eine Nahtbahn möglich ist.

Abbildung 36 zeigt den an der Johannes Kepler Universität Linz realisierten Versuchsaufbau.



Abbildung 36: Versuchsaufbau zur Darstellung einer kraftregelten Bahnkurve [Resch 2005]

Der Kurvenverlauf sei durch x_{soll} in Weltkoordinaten gegeben. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die vom Kraftregler gemeldeten Verschiebungen immer in Potentiometerlängsachse gemessen werden, diese müssen nun entsprechend der bekannten Kurvennormalenrichtung in eine Korrektur der Weltkoordinaten x_{korr} umgerechnet werden. Das Strukturbild dieses Versuches ist in Abbildung 37 dargestellt.

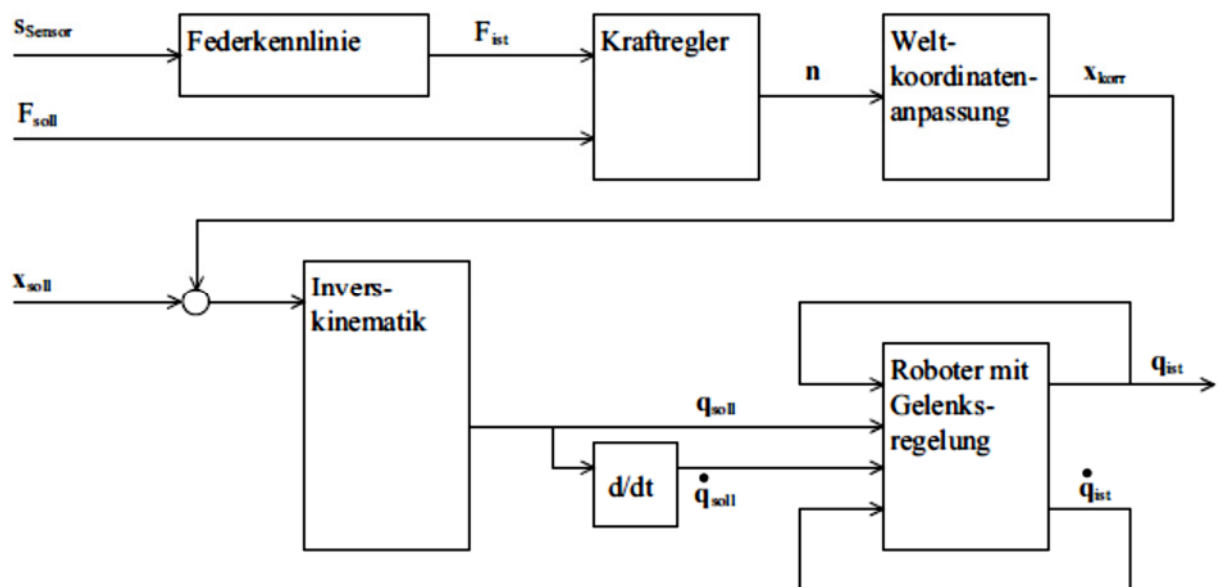


Abbildung 37: Blockdiagramm des Regelalgorithmus für eine Bahnkurve [Resch 2005]

In einem ersten Schritt wird die bekannte Bahn einprogrammiert und der Roboter verfährt diese ohne Kraftregelung. Das Ergebnis der Messung der hierbei erzielten Anpresskraft zeigt Abbildung 38.

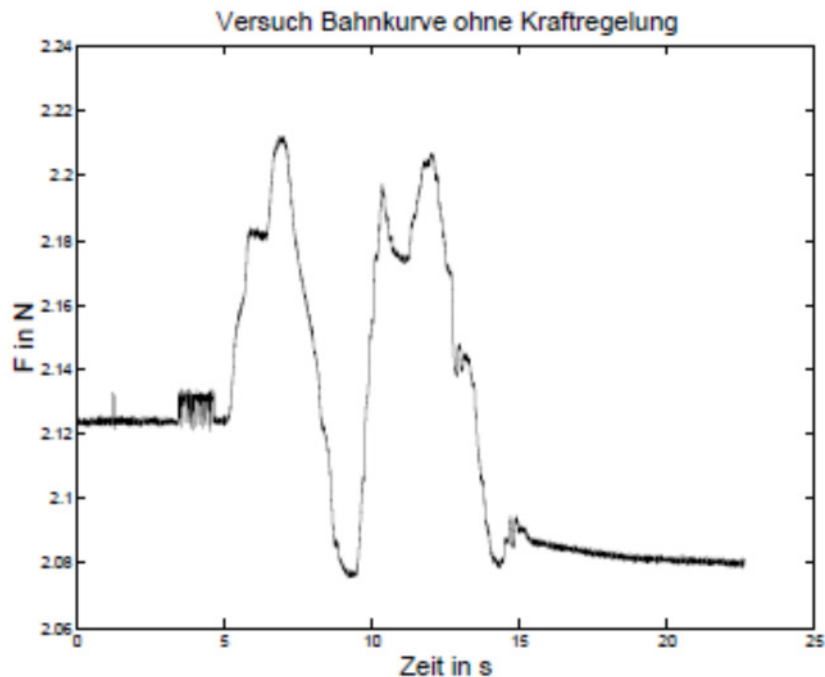


Abbildung 38: Anpresskraft ohne Kraftregelung [Resch 2005]

Es zeigt sich eine deutliche Abweichung von der geforderten Kraft von 2N. Betrachtet man das Maximum nach ca. 7 Sekunden, so kann man eine Abweichung von ca. 11% und bei dem Minimum nach ca. 9 Sekunden eine Abweichung von ca. 4% erkennen.

Verfährt man dieselbe Bahn nun kraftgeregelt, stellt sich das Ergebnis wie in Abbildung 39 gezeigt dar.

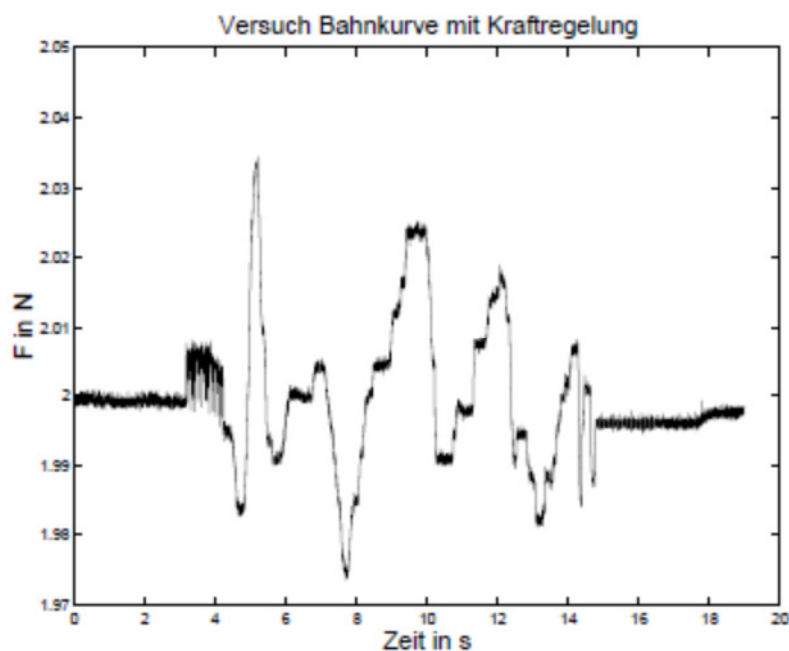


Abbildung 39: Anpresskraft mit Kraftregelung [Resch 2005]

Man sieht deutlich, dass hier die Abweichung zu der geforderten Anpresskraft von 2N wesentlich geringer ist als ohne Kraftregelung. Das Maximum nach 5 Sekunden weist eine Abweichung von lediglich 1,8% und das Minimum nach 7,9 Sekunden eine Abweichung von lediglich 1,4% auf.

4.2. Grundlagen der sensortechnischen Kantendetektion

Um eine reproduzierbare Kantendetektion zu gewährleisten ist es unerlässlich, dass die textile Kante eines Carbonhalbzeuges verlässlich und robust erkannt werden kann. Es wurden zunächst Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, um die technische Machbarkeit der Detektion reproduzierbar zu gewährleisten. Die im Folgenden verwendeten Methoden zur Kantendetektion werden in diesem Kapitel zunächst theoretisch beschrieben.

Es wird sich auf 3 Methoden beschränkt:

- a) die Methode des model-fittings (nach [Suetens et al. 1992])
- b) die Methode des local-weighted votings (nach [Parhami 1994]) und
- c) die Methode der Gradientenakkumulation (nach [Roberts 1965])

Die Methode des model-fittings bedient sich der Geometrie des Zielobjektes. Es sei $f(i)$ die Rohdaten eines Profilschans. Das verwendete Modell ist hierbei eine Sprungfunktion, d.h. die Kante zweier aufeinander liegender Carbonhalbzeuge wird hierbei als Sprungfunktion angenommen.

Die Höhe des Maximal- und Minimalpixels ist gegeben durch:

$$h(i, j) = \begin{cases} \min(f(i)), i < j \\ \max(f(i)), i \geq j \end{cases} \tag{4.4}$$

j repräsentiert hierbei die Position der Kante. Die Konzept der kleinsten Quadrate –in der Literatur auch als „least squares“ bekannt- beruht auf dem Finden des lokalen Minimums der quadrierten Abstände der Punkte des Modells zu den Punkten der Rohdaten. Die Summe der kleinsten Quadrate einer Kante ist damit:

$$S(j) = \sum_{i=1}^m d(i, j)^2 \quad (4.5)$$

wobei m die Länge der Profilstrecke und $d(i, j)$ die Abstandsfunktion

$$d(i, j) = f(i) - h(i, j) \quad (4.6)$$

ist.

Die Methode des local-weighted votings ist eine lokale Methode, die sich der Gewichtung jedes Pixels, welcher in der Nähe der Kante ist, bedient. Zunächst wird eine Vorauswahl potenzieller Kantenkandidaten getroffen. Dies geschieht durch Berechnung der absoluten Differenz benachbarter Punkte. Wenn eine rechtsorientierte Kante betrachtet wird so ergibt sich die Kantenhöhe jedes Kantenkandidaten zu:

$$w(j) = |\max(f(j+k)) - \min(f(j-k))|, 1 \leq k \leq 3 \quad (4.7)$$

Da gerade bei geschnittenen Carbonhalbzeugen die Kanten oftmals Einzelfilamente aufweisen, die als Störkontur fungieren und somit die Kantendetektion in ihrer Robustheit schwächen würden, wird der lokale Durchschnitt mit

$$a(j) = \frac{1}{2+n} \sum_{i=j-n}^{j+n} f(i) \quad (4.8)$$

berechnet. Somit kann die Votingfunktion beschrieben werden als:

$$v(i, j) = \begin{cases} j-i, (i < j) \wedge (f(i) < a(j)) \\ i-j, (i > j) \wedge (f(i) > a(j)) \\ 0, (i > j) \wedge (f(i) < a(j)) \\ 0, (i < j) \wedge (f(i) > a(j)) \end{cases} \quad (4.9)$$

Somit ist die gewichtete Votingsumme gegeben mit:

$$S(j) = w(j) \sum_{i=-n}^n |v(i, j)| \quad (4.10)$$

Und die Kante wird abschließend als Summe der Maxima der vorausgewählten Kandidaten berechnet als:

$$\max(S(j)) \tag{4.11}$$

Die Methode der Gradientenakkumulation beruht darauf, dass die erste Ableitung einer Sprungfunktion beim Sprung maximal ist. Nach [Roberts 1965] kann die Scanlinie als Höhenfunktion dargestellt werden. Daher ist die Größe des Gradienten gegeben durch

$$g(x) = \sqrt{\left(\frac{\mathcal{J}(x)}{\mathcal{J}}\right)^2} \tag{4.12}$$

Aufgrund der Pixelquantization des Profilschans muss der Gradient für diskrete Werte berechnet werden und kann somit approximiert werden durch

$$g(i) = |f(i - n) - f(i + n)| \tag{4.13}$$

wobei n die Kerngröße ist der Approximation ist; für gewöhnlich wird hier der Wert $n=1$ verwendet. Verwendet man nun den Filter der Gleichung ... für die verrauschten Rohdaten $f(i)$, so erhält man einen ebenso verrauschten Gradienten $g(i)$. Aufgrund der geringen Kantenhöhe im Vergleich zu dem Rauschen kann man keinen signifikanten Peak, welcher ein Indiz für die Kante wäre, entdecken. Mit dieser klassischen Herangehensweise erzeugen Ausreißer höhere Peaks als die Kante selbst und die Kantenerkennung wäre nicht erfolgreich. Daher wird eine neue Summierungsfunktion vorgeschlagen. Da in der Applikation eine globale Sprungfunktion gesucht wird, welche verrauscht ist, wird ein Aufsummieren der Gradientenfunktionen aller Pixel vorgeschlagen, wobei mit unterschiedlichen Kernlängen gearbeitet wird. Dies gewährleistet eine korrekte Kantenberechnung. Die modifizierte Funktion $G(i)$ berechnet die akkumulierten Gradienten mit steigender Kerngröße:

$$G(i) = \sum_{k=1}^n |f(i - k) - f(i + k)| \tag{4.14}$$

mit $\{i \in \mathbb{N} \mid n < i < (m - n)\}$

wobei m die Profillänge ist. Um die Kante zu berechnen muss das Maximum von $G(i)$ berechnet werden.

4.2.1. Spektralanalyse an textilen Carbonhalbzeugen

Hierfür wurden zunächst unterschiedliche Carbonhalbzeuge in einem Spektroskop auf ihren Reflexionsgrad untersucht. Das verwendete Spektroskop ist ein FTIR⁴-Spektrometer der Firma Perkin Elmer. Herkömmliche Infrarot-Spektrometer verfügen über einen dispersiven Spektralapparat. Das polychromatische Licht einer Infrarot-Quelle wird durch einen Monochromator (i.d.R. ein Gitter) räumlich aufgefächert. Das Gitter wird dabei gedreht und es werden nacheinander alle Transmissionen in Abhängigkeit von der Wellenlänge auf dem Detektor registriert; man erhält ein Infrarot-Spektrum. Bei der FTIR-Spektroskopie wird der dispersive Spektralapparat durch ein Interferometer ersetzt. Mit Hilfe des Interferometers werden die verschiedenen Wellenlängen einer polychromatischen Infrarot-Quelle moduliert und als Resultat erhält man ein sog. Interferogramm. Hierbei enthält jeder aufgenommene Punkt spektrale Informationen über alle Wellenlängen der Strahlungsquelle. Es wird hierbei also die Signalintensität in der Zeitdomäne dargestellt. Am häufigsten wird in der FTIR-Spektroskopie das sog. Michelson-Interferometer (siehe Abbildung 40).

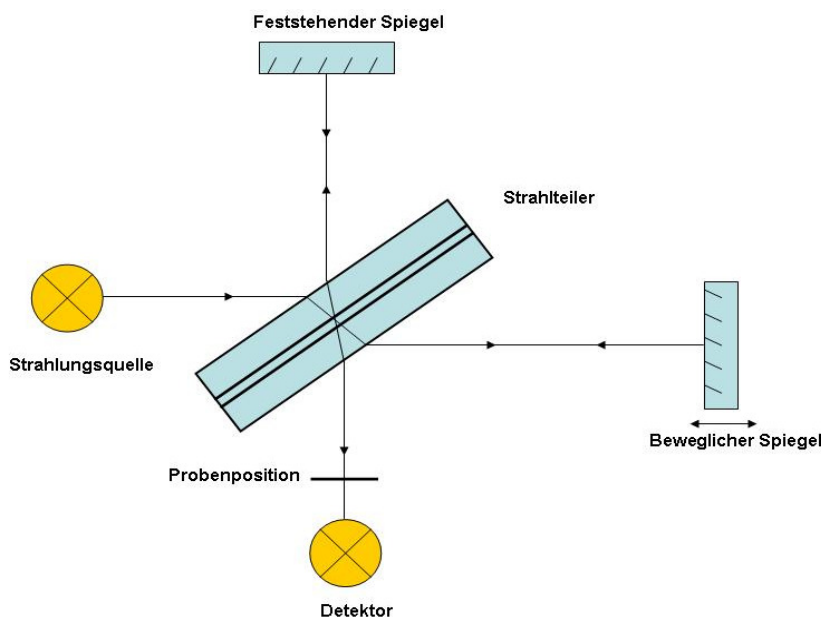


Abbildung 40: Das Michelson-Interferometer [Perkin 1994]

⁴ FTIR bedeutet Fourier-Transform-Infrared

Die wichtigsten Elemente des Interferometers sind hierbei der Strahlteiler, der feststehende und der bewegliche Spiegel. Der Strahlteiler besteht aus einem Kristall, der die auftreffende Strahlung zur Hälfte reflektiert und für die andere Hälfte durchlässig ist. Verfolgt man den Lichtweg im Interferometer, so kann die Funktion gut dargestellt werden: Die Strahlung der Infrarotstrahlungsquelle wird beim Auftreffen auf den halbdurchlässigen Strahlungsteiler in zwei Teile zerlegt. Ein Teil der Lichtstrahlen wird auf den feststehenden Spiegel reflektiert, der andere Teil passiert den Strahlteiler und trifft auf den beweglichen Spiegel. Beide Teilstrahlen werden an den Spiegeln erneut reflektiert und überlagern sich nach erneutem Durchdringen des Strahlteilers – es kommt zu einer Interferenz.

In Abhängigkeit von der Position des Spiegels kommt es zu konstruktiven oder destruktiven Interferenzen. Am Detektor wird die Signalintensität aufgezeichnet und man erhält das Interferenzmuster oder Interferogramm.

Um diese Informationen in ein Spektrum umzuformen, bedient man sich der Fourier-Transformation.

Periodische Funktionen mit

$$f(t + T) = f(t) \tag{4.15}$$

mit der Periode T lassen sich durch ein diskretes Spektrum exponentieller (trigonometrischer) Funktionen $\exp(jk * \frac{2\pi}{T})$ darstellen.

Es gilt gemäß Fourier:

$$F[f(\xi)] = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\xi + b_k \sin k\xi) \tag{4.16}$$

Die Koeffizienten a_k und b_k dieser Fourierreihe erhält man durch Multiplikation von (2) mit $\cos(k\xi)$ sowie $\sin(k\xi)$ und Integration im Intervall $-\pi \leq \xi \leq \pi$:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f d\xi, \quad a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f \cos k\xi d\xi, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f \sin k\xi d\xi \quad (4.17)$$

Mit der exponentiellen Darstellung der trigonometrischen erhält man mit den Gleichungen

$$\cos x = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2} \quad (4.18)$$

und

$$\sin x = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2} \quad (4.19)$$

eine einfachere Schreibweise mit

$$F[f(\xi)] = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\{(a_k - jb_k)e^{jk\xi} + (a_k + jb_k)e^{-jk\xi}\}}{2} \quad (4.20)$$

Diese Gleichung kann weiter vereinfacht werden zu:

$$F[f(\xi)] = \sum_{-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\xi} \quad \text{mit} \quad c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\xi) e^{-jk\xi} d\xi; \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4.21)$$

Weiterhin gilt:

$$2\pi = T\xi, \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (4.22)$$

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{T} c_k \exp\left(j \frac{2\pi}{T} kt\right) \quad (4.23)$$

$$c_k = \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \left[\exp\left(-j \frac{2\pi}{T} kt\right) \right] dt \quad (4.24)$$

Durch den Übergang von diskreten Werten k zum Kontinuum, welche durch Zuwächse

$$dk = (k+1) - k = 1 \quad (4.25)$$

beschrieben werden, gelangt man zu einer kontinuierlichen Spektraldarstellung in einem Parameter ω :

$$\omega = \frac{2\pi}{T}k, \quad d\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad d\omega \rightarrow 0 \text{ für } T \rightarrow \infty. \quad (4.26)$$

Die Spektralfunktion oder Fourier-Transformierte ist damit:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt = F[f(t)] \quad (4.27)$$

Herkömmlicherweise wird durch die FTIR-Spektroskopie die Transmission durch einen Körper bestimmt. In den Experimenten war jedoch das Ziel, die Reflexion an Carbonhalbzeugen zu bestimmen, um dadurch Rückschlüsse auf die am besten geeignete Wellenlänge bei der Auswahl des Laserschnittsensors ziehen zu können.

Da es sich bei den Carbonhalbzeugen um raue Festkörper handelt, muss mit einer diffusen Reflexion des auftreffenden Lichts gerechnet werden. Durch einen abgeänderten Versuchsaufbau mit Hilfe einer halbkugelförmig angeordneten Spiegelformation über der Probe kann die Reflexion zum Detektor geleitet werden und das Spektrum kann aufgezeichnet werden.

Die Abbildung 41 zeigt eine Carbonhalbzeugprobe in der Probenkammer.



Abbildung 41: Eine Carbonhalbzeugprobe (hier: Standard-±45-Grad-Gelege der Firma SAERTEX) in der Probenkammer

Die folgenden Abbildungen 42 bis 46 zeigen die Ergebnisse der Spektralanalyse an den Kohlenstofffaserhalbzeugen.

Die Reflexion wird wie folgt definiert:

Die Intensität des reflektierten Lichtes dividiert durch die Intensität des auf die Probe emittierten ergibt die Reflexion in Prozent.

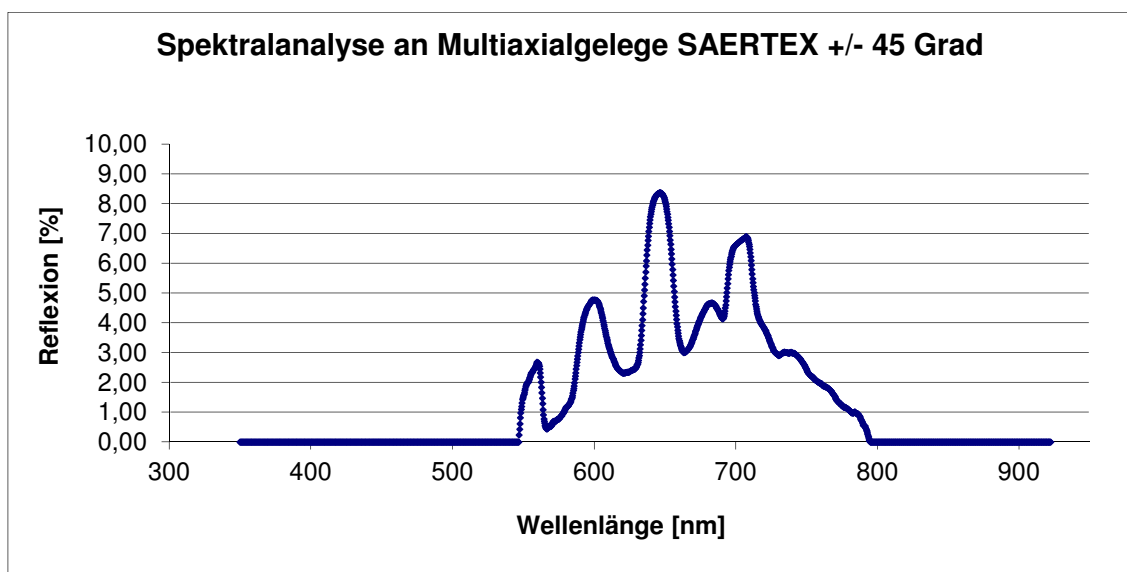


Abbildung 42: Spektralanalyse an Standardmultiaxialgelege der Firma SAERTEX mit der Winklorientierung +/- 45°

Abbildung 42 zeigt die Reflexionsmessung an Standardmultiaxialgelege der Firma SAERTEX mit der Winkelorientierung $\pm 45^\circ$. Das Maximum der Reflexion liegt bei 646 nm mit einem Wert von 8,37 %. Der zweitgrößte Peak ist bei 707 nm mit einer Intensität von 6,90 % zu sehen. Abbildung 43 zeigt die Reflexion an Standardmultiaxialgelege der Firma SAERTEX mit der Winkelorientierung $0^\circ/90^\circ$, wobei hier die 90° -Lage dem Lichtstrahl zugewandt war. Es zeigt sich auch hier wiederum zwei charakteristische Maxima, nämlich eines bei 647 nm mit einer Intensität von 2,53 % und eines bei 707 nm mit einer Intensität von 1,59 %.

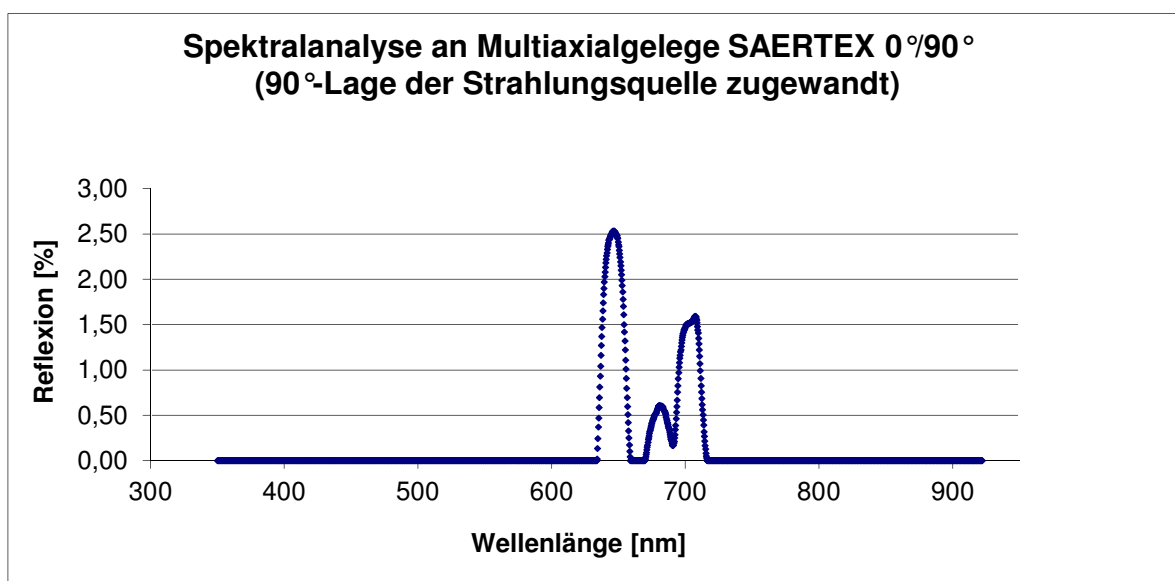


Abbildung 43: Spektralanalyse an Standardmultiaxialgelege der Firma SAERTEX mit der Winkelorientierung $0^\circ/90^\circ$ (hier: 90° -Lage der Strahlungsquelle zugewandt)

Die Abbildung 44 zeigt die Reflexionsmessung an Standardmultiaxialgelege der Firma SAERTEX mit der Winkelorientierung $0^\circ/90^\circ$, wobei hier die 0° -Lage dem Lichtstrahl zugewandt war. Es bilden sich wieder die beiden charakteristischen Maxima bei 647 nm mit einer Intensität von 7,73 % und bei 707 nm mit einer Intensität von 5,14 % aus.

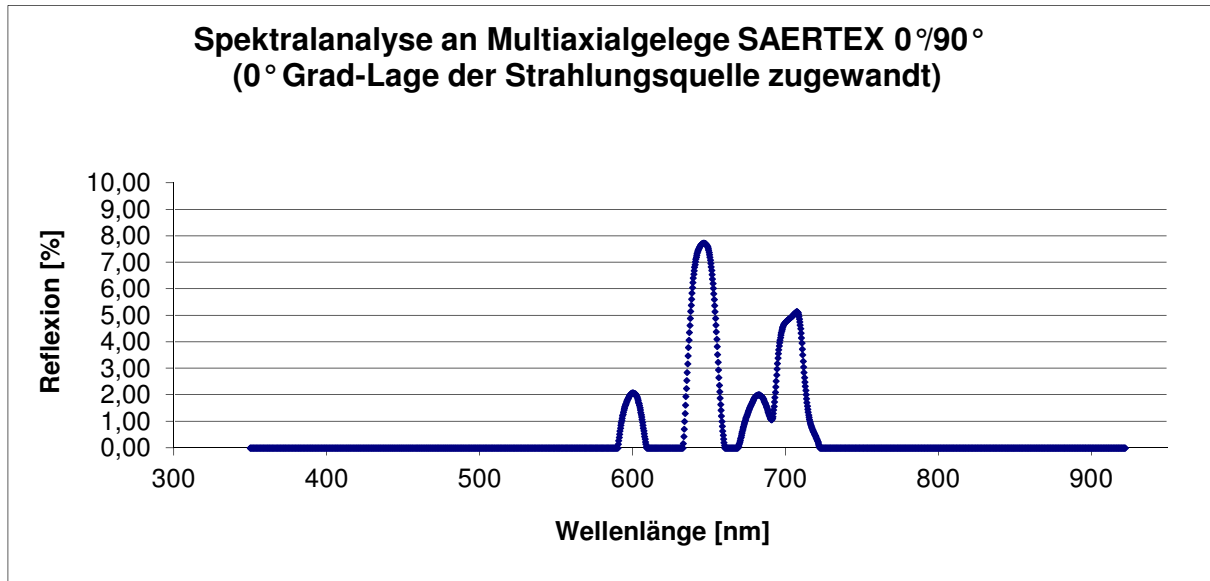


Abbildung 44: Spektralanalyse an Standardmultiaxialgelege der Firma SAERTEX mit der Winkelorientierung 0°/90° (hier: 0°-Lage der Strahlungsquelle zugewandt)

Vergleicht man diese Werte mit denen aus der Messung in Abbildung 43, so fällt auf, dass die Werte für das lokale erste Maximum bei 647 nm um 306 % und beim zweiten lokalen Maximum bei 707 nm um 323 % über den Maxima bei der Probe liegen, die die 90°-Lage dem Lichtstrahl zugewandt hatte. Dies ist vermutlich auf die unterschiedliche Faseranordnung zurückzuführen. Es wird vermutet, dass durch die Winkelanordnung und dadurch die Lage der Faser zu dem Lichtstrahl es bei der Probe, die die 90°-Lage dem Lichtstrahl zugewandt hatte, zu destruktiven Interferenzen des gebrochenen Lichtes kam.

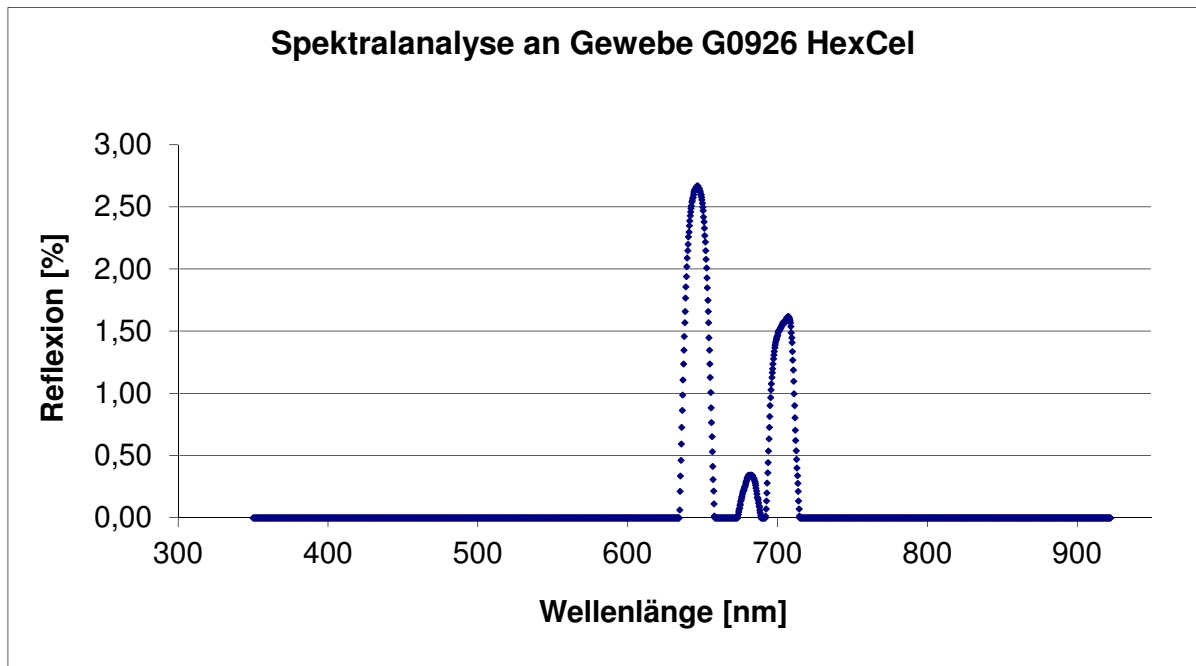


Abbildung 45: Spektralanalyse an Gewebe G0926 der Firma HexCel

Abbildung 45 zeigt die Reflexionsmessung an Gewebe G0926 der Firma HexCel. Auch hier kann man wieder die beiden charakteristischen Maxima bei 647 nm mit einer Intensität von 2,67 % und bei 707 nm mit einer Intensität von 1,62 % erkennen.

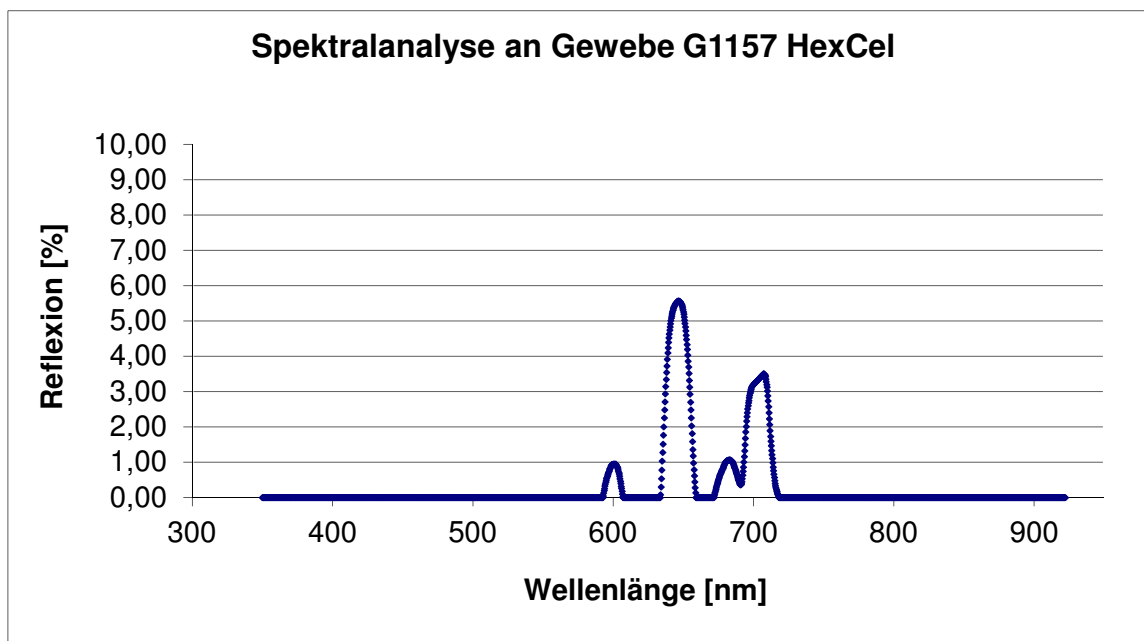


Abbildung 46: Spektralanalyse an Gewebe G1157 der Firma HexCel

Abbildung 46 zeigt die Reflexionsmessung an Gewebe G1157 der Firma HexCel. Es treten wiederum die beiden charakteristischen Maxima bei 647 nm mit einer Intensität von 5,56 % und bei 707 nm mit einer Intensität von 3,50 % auf.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle getesteten Carbonhalbzeuge 2 Hauptmaxima aufweisen, die im Rotbereich des Farbspektrums liegen (siehe Abbildung 47).

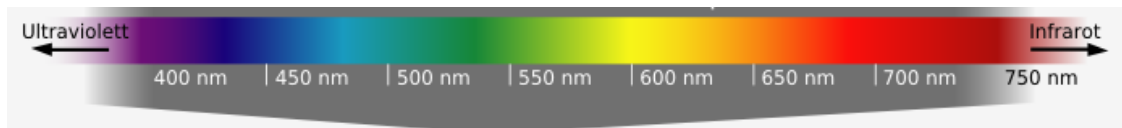


Abbildung 47: Das für den Menschen sichtbare Farbspektrum (nach der Quelle aus dem Internet <http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtspektrum>)

4.2.2. Grundlegende Untersuchungen zur optischen Kantendetektion für den automatisierten Nähprozess

Für die Grundlagenuntersuchungen zur automatisierten Kantenerkennung wurde der Aufbau gewählt, welcher in der Abbildung 50 dargestellt ist. Der verwendete Roboter ist ein KUKA IR 125/2 mit einer Maximalgeschwindigkeit von 2 m/s und einer maximalen Nähgeschwindigkeit von 2 m/min.

Der Laserschnittsensor ist auf dem Nähkopf derart montiert, dass er direkt vor der Bewegungsrichtung misst (siehe Abbildung 50). Die Nähprogramme werden mit über CAD direkt an die Robotersteuerung übermittelt. Da jedoch die theoretische Position der zu vernähenden Preform nie exakt mit dem CAD-Modell übereinstimmt, werden die vom Laserschnittsensor ermittelten Daten dazu verwendet, den Roboter on-line in seiner Bahn zu korrigieren und ihn dadurch in die Lage zu versetzen, die Naht autonom zu verfolgen. Der Sensor detektiert und sendet die aktuelle Kantenposition an den Controller, der wiederum die korrigierte Nahtbahn generiert (siehe Abbildung 48).

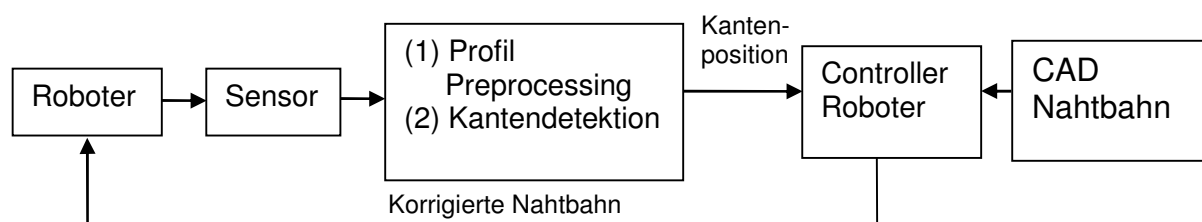


Abbildung 48: Blockschaltbild des gewählten Testaufbaus (nach [Biegelbauer et al. 2007])

Für die Kantendetektion wurde ein sog. BaseSensor der Firma Falldorf Sensor GmbH verwendet, um die Kante zu detektieren. Dieser ist ein Lichtschnittsensor, dessen Prinzip in der Abbildung 49 dargestellt ist.

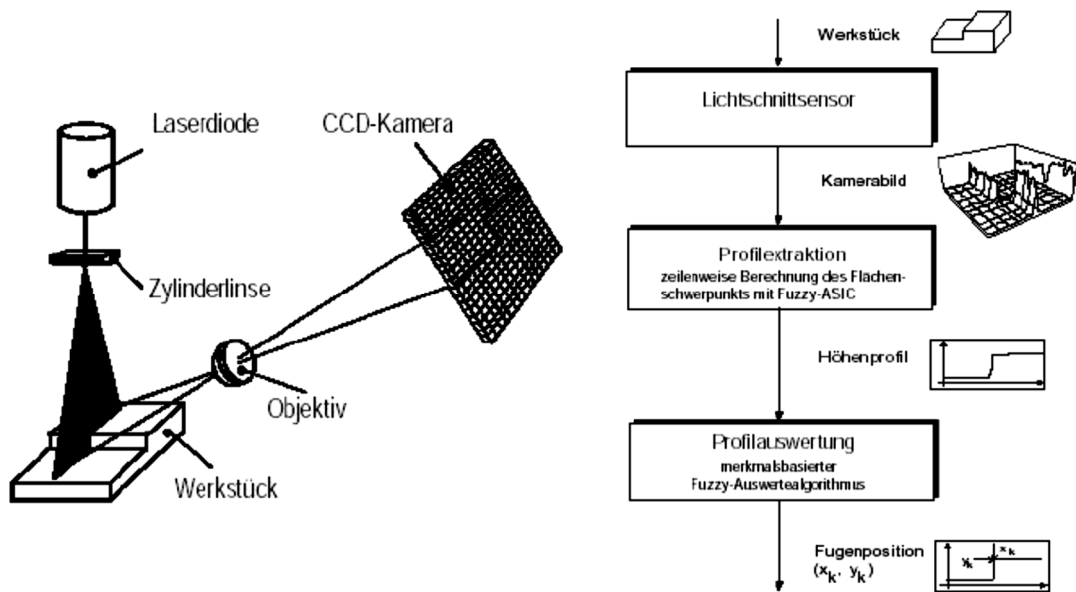


Abbildung 49: Prinzip eines Laserschnittsensors [Vincze et al. 2006]

Bei dem Laserschnittverfahren wird nicht ein Punkt sondern eine Gerade entweder durch zusätzliche Schwenkspiegel (Strahlableitung) oder durch optische Aufweitung des Laserstrahls erzeugt (siehe Abbildung 49). Dadurch kann eine Gerade (Linie) das Werkstück abtasten und zur Auswertung wird z.B. eine CCD-Kamera eingesetzt.

Mit Hilfe dieses Verfahrens lassen sich Nut-, Bohrungstiefen, Spaltbreiten ermitteln oder Kurvenlinien prüfen [Tränkler et al. 1998], [Xiaoyi et al. 1997].

Die Abbildung 50 zeigt den Prüfaufbau mit dem Laserschnittsensor links und dem Blindstichnähkopf rechts.

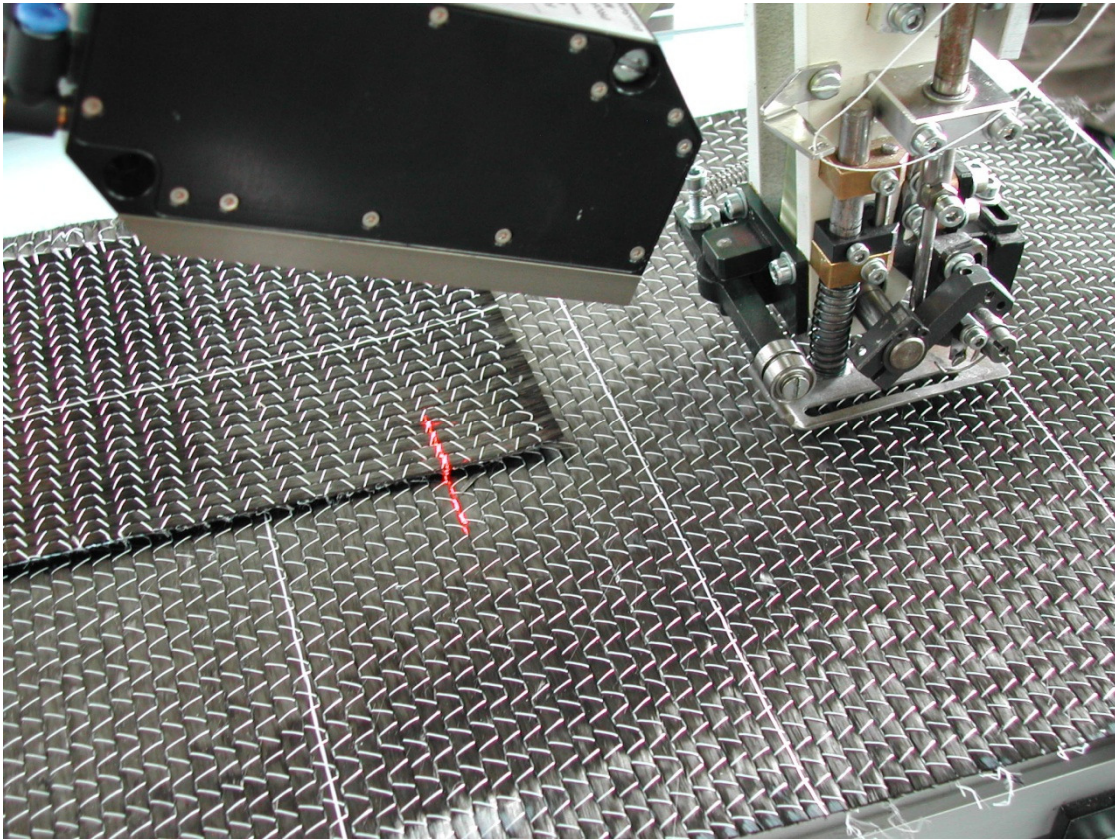


Abbildung 50: Prüfaufbau mit Laserschnittsensor, Laserlinie und Blindstichnähkopf

Alle Tests zur Kantenerkennung erfolgten auf einem AMD Athlon 64X2 Dual Core 4800+ Prozessor mit 2GB RAM. Im Folgenden werden die 3 beschriebenen Verfahren an textilen Carbonhalbzeugkanten hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und der Güte der Kantenerkennung untersucht.

Beim Drapierprozess von Carbonhalbzeugen kann es gerade an Kanten vorkommen, dass sich die Kohlenstofffasern verschieben und die daraus resultierende Kante wie eine Doppelkante aussieht.

Die Abbildung 51 zeigt, dass alle 3 Methoden die korrekte Kante erfassen, welche durch die vertikale Linie dargestellt ist. Die Methode des model fittings erkennt die korrekte Kante, da die Summe der Abstände minimal in dieser Position ist. Die Methode des local-weighted votings erkennt dieselbe Kante, da die Votingfaktoren die Wahrscheinlichkeit erhöhen diese Kante zu erkennen. Die Methode der Gradientenakkumulation erkennt ebenfalls die korrekte Kante, da diese das Maximum der Aufsummierung der ersten Ableitung des Profilverlaufes sucht (siehe Verlauf der Aufsummierung in Abbildung 51).

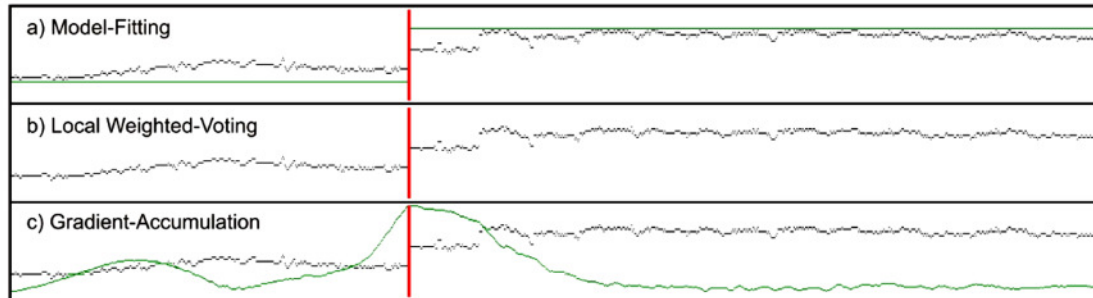


Abbildung 51: Alle 3 präsentierten Methoden auf Rohdaten einer Doppelkante angewendet und die detektierte Kante (vertikale Linie) [Biegelbauer et al. 2007]

Abbildung 52 zeigt ein weiteres Problem, welches bei der Kantendetektion auftreten kann. Es ist eine normalisierte Kante zu sehen, wobei alle 3 Methoden diese Kante richtig erkennen jedoch an unterschiedlichen Orten in der normalisierten Kante. Dies ist verständlich, wenn man berücksichtigt, dass alle 3 Methoden verschieden Kriterien für die Kantendetektion verwenden.

Um eine Kante robust zu erkennen wird -in Anlehnung an redundante Systeme in der Luftfahrt- eine Kante als erkannt definiert, wenn mindestens 2 der 3 Methoden dieselbe Kante erkennen. Im Gegensatz zu der Doppelkante, die alle 3 Methoden erkannten, konnten bei der normalisierten Kante nur die Methode des Model-Fittings und die der Gradientenakkumulation dieselbe Kantenposition erkennen (siehe Abbildung 52).

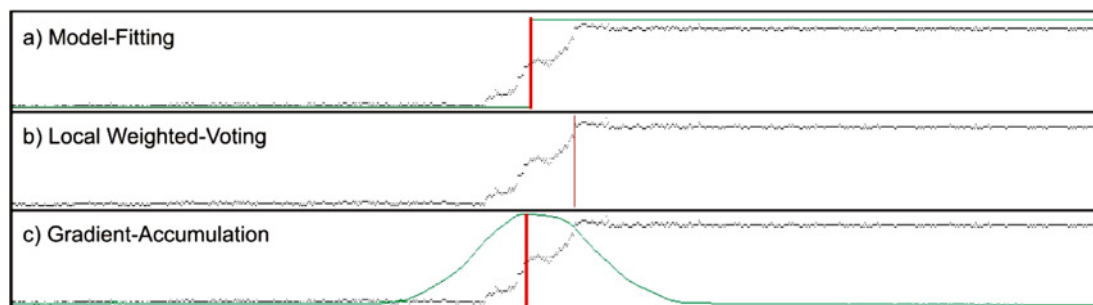


Abbildung 52: Alle 3 präsentierten Methoden auf Rohdaten einer normalisierten Kante angewendet und die detektierte Kante (vertikale Linie) [Biegelbauer et al. 2007]

Um die Ergebnisse in Echtzeit zu erhalten, müssen die Methoden inklusive des Preprocessings ausreichend schnell sein. Für den robotergestützten Nähprozess hängt die Echtzeit von der Frequenz des Sensors ab, welche wiederum von der Nähgeschwindigkeit des Roboters abhängig ist. Alle Tests wurden unter identischen Rahmenbedingungen gefahren, d.h. 1100

Laserschnittprofile wurden für eine statistische Analyse aufgenommen und es wurde eine Belichtungszeit von 12 ms gewählt. Die Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse. Verwendet man alle Methoden, so ermöglicht einem die schlechteste immer noch eine Operation bei 250Hz, was völlig ausreichend ist, um Echtzeitinformationen zu erhalten. Addiert man die Belichtungszeit, die benötigt wird, um ein Profil aufzunehmen, dann konnte eine effektive Scanrate von 62 s⁻¹ bei den Experimenten realisiert werden.

Methode	Minimum	Durchschnitt	Maximum
Profil Preprocessing	0,638 ms	0,679 ms	1,314 ms
Model-Fitting	0,129 ms	0,132 ms	0,397 ms
Local-Weigthed-Voting	0,208 ms	0,249 ms	0,502 ms
Gradientenakkumulation	0,375 ms	0,384 ms	1,744 ms
Summe inkl. Kantendetektion	1,445 ms	1,445 ms	3,957 ms

Tabelle 1: Benötigte Zeit für die getesteten Methoden (nach [Biegelbauer et al. 2007])

Danach wurde die Güte der Kantenerkennung evaluiert. Eine gute Kantendetektion wurde definiert als Erkennung innerhalb eines gewissen Pixelfensters bei der wahren Kante. Die Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse, die bei Tests mit den identischen Rahmenbedingungen wie davor gewonnen wurden. Eine Toleranz von 12 Pixeln entspricht hierbei lediglich eine Abweichung von 0,65 mm, was völlig ausreichend für die Nähaufgabe ist. Ebenso wichtig zu erwähnen ist, dass die normalisierte Kante einen Bereich von ca. 2 mm abdeckt und die Nahtabweichung um eine Dimension über diesem Wert liegen kann.

Methode	±3 Pixel	±10 Pixel	±12 Pixel
Model-Fitting	85,7 %	93,4 %	94,3 %
Local-Weigthed-Voting	81,5 %	84,4 %	86,7 %
Gradientenakkumulation	65,3 %	87,4 %	94,3 %
Positive Kantendetektionen bei Kombination der 3 Methoden	80,4 %	97,5 %	99,3 %

Tabelle 2: Güte der Kantenerkennung der 3 Methoden und bei Kombination derer (nach [Biegelbauer et al. 2007])

Es kann daher abschließend gefolgert werden, dass die Kombination der 3 verbliebenen Methoden eine gute Kantendetektion gewährleistet.

5 Entwicklung des Nähprozesses

Ein automatisierter Nähprozess bietet hohes Potenzial für die Anwendung in der Serienfertigung von CFK-Bauteilen sowohl in der Flugzeug- als auch in der Automobilindustrie.

Generell ist es z.B. mit dem Blindstich möglich, Versteifungselemente auf Hautfelder von Flugzeugteilen zu vernähen, wenn diese beiden Komponenten aus Faserverbunden hergestellt sind.

Eine mögliche Applikation wäre daher das Vernähen von Stringern auf das Hautfeld einer Druckkalotte (siehe Abbildung 53).



Abbildung 53: Eine Druckkalotte aus CFK (Quelle: Premium AEROTEC GmbH)

Für die Automobilindustrie ist die Nähtechnik für crashrelevante Bauteile interessant. Geßler et al. stellten im Jahre 2002 fest, dass CFK-Bauteile welche im Tuftingverfahren vernäht wurden ein verbessertes Crashverhalten aufweisen. Die Abbildung 54 zeigt den Vergleich des Crashverhaltens von einer unvernähten und einer getufteten CFK-Probe.

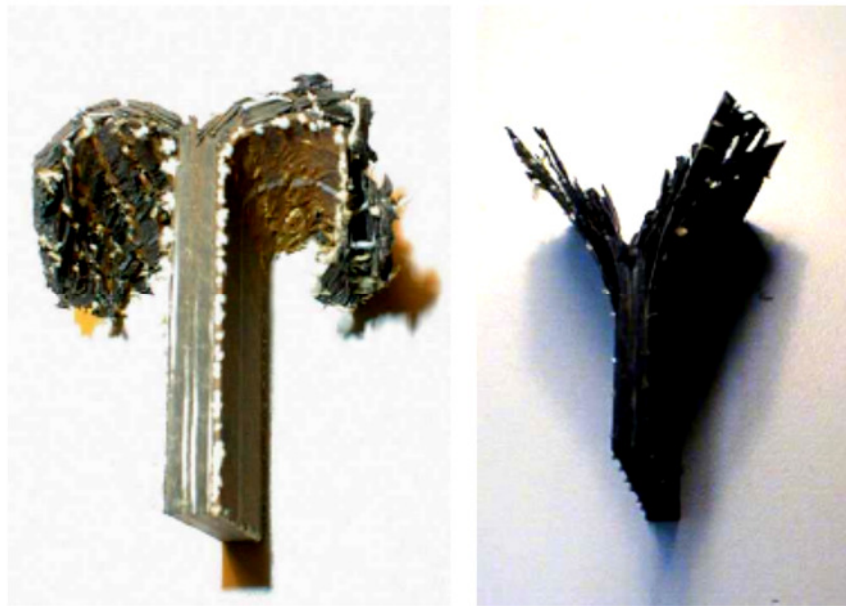


Abbildung 54: Vergleich des Crashverhaltens einer getufteten (links) und unvernähten CFK-Probe [Geßler et al. 2002]

Man sieht deutlich, dass bei der vernähten Probe der Rissfortschritt gestoppt wird –es also zu keiner vorausseilenden Delamination kommt- und bei der unvernähten Probe der Riss deutlich tiefer in den Probenkörper eindringt, als bei der vernähten. Dies kann bei crashrelevanten Bauteilen in der Automobilindustrie wie z.B. einer B-Säule eine signifikante Steigerung der Crashperformance des Bauteils zur Folge haben. Die Abbildung 55 zeigt eine solche B-Säule in einer Automobilkarosserie.

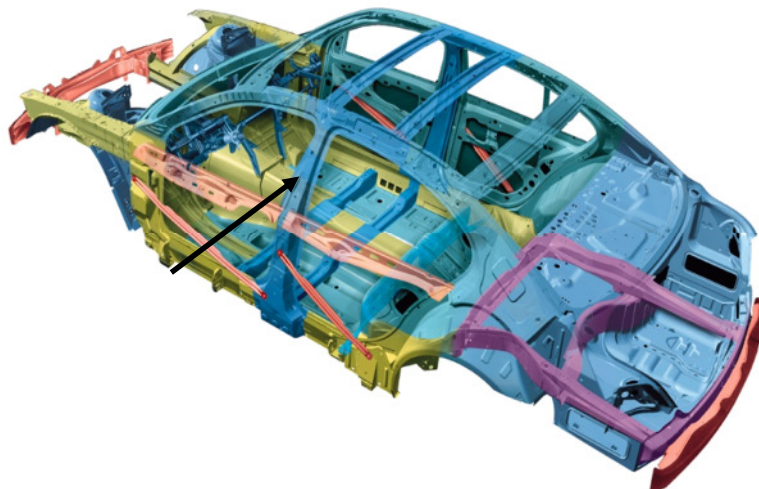


Abbildung 55: Eine B-Säule in einer Automobilkarosserie (nach Vortrag „Research project: Automated preform manufacturing in the process chain“ von Manuel Herkt, 4th EADS Advanced Technology Workshop 2005)

Die besonderen mechanischen Belastungen sind in Abbildung 56 dargestellt. Man kann sehen, dass die Anbindungsflächen an die Fahrzeugkarosserie Crashenergie absorbieren müssen und die Säule im Mittelteil eine hohe Festigkeit aufweisen muss.



Abbildung 56: Die mechanischen Anforderungen an eine B-Säule im Automobilbau

Im Folgenden wird eine mögliche Vorgehensweise für einen solchen automatisierten Prozess entwickelt und dargestellt. Als Beispielobjekt dient hierbei der Fensterrahmen der A350.

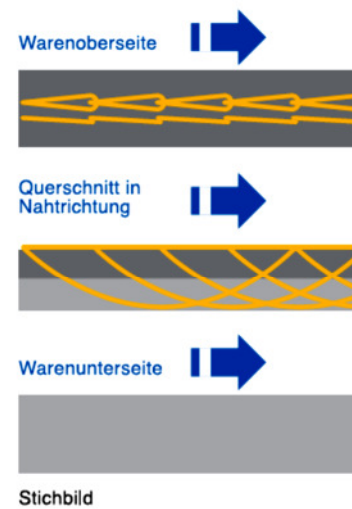
Um den Fensterrahmen optimiert vernähen zu können, müssen zunächst die Parameter des Nähprozesses adaptiert auf die spezielle Anwendung klar spezifiziert sein. Hierfür wurden zunächst an Multiaxialgelegeproben Nähversuche gefahren, um die Stabilität des Blindstichprozesses zu gewährleisten.

Es wird zunächst der Nähkopf näher erläutert und die Probleme, die beim Blindstichprozess auftreten können und wie diese gelöst wurden.

Die Abbildung 57 zeigt die Angaben zum Blindstichnähkopf des Herstellers KSL.



RS 510 Blindstich



Stichbild

Technische Daten:

Nadelanzahl	1 Bogennadel d= 50 mm
Naht-Oberseite	Fadenkette
Naht-Unterseite	Kettenstich mit doppeltem Faden
Stichtyp	Blindstich (KSL-Patent)
Stichlänge	4 - 15 mm (abhängig von Nähgutdicke)
Nähgutdicke	2 - 8 mm (abhängig von Stichlänge)
Einstechwinkel	90°
Nähunterlage	Keine Nut notwendig: Bsp. Aushärtewerkzeug
Nähgeschwindigkeit	200 Stiche/min (abhängig von der Stichlänge)

Abbildung 57: Technische Daten des Blindstichnähkopfes (Quelle: KSL)

Alle Versuche wurden mit einem Industrieroboter der Firma KUKA durchgeführt. Beim KUKA IR125/2 handelt es sich um einen 6-Achs-Knickarmroboter. Die Bezeichnungen der Achsen und deren mögliche Verfahrensarten sind in der Abbildung 58 dargestellt.

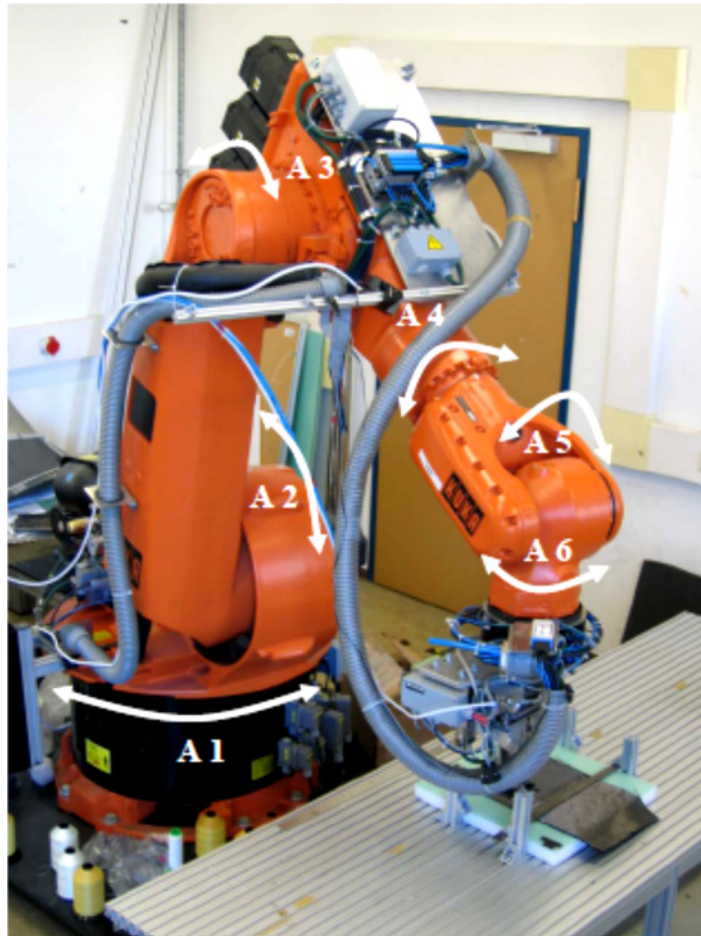


Abbildung 58: Achsen und Verfahrrarten der 6 Achsen des KUKA IR 125/2 [Steinhilber 2006]

Beim Prozess sticht die Bogennadel an der Materialoberseite ein und befördert den Faden entgegen der Nährichtung durch das Textil auf einem Kreisbogen bis zum Austritt auf der Materialoberseite. Nachdem die Nadel den oberen Todpunkt ihrer Bewegung erreicht hat, öffnet sich beim Zurückdrehen der Nadel ein sog. Fadendreieck, welches durch den Greifer und den Fadenspreizer aufgespannt wird. Nachdem die Bogennadel auf ihrer Rückbewegung durch das Material dieses wieder verlassen hat, startet der Vorschub des Nähkopfes relativ zum Textil respektive Nähgut. Hierbei wird das Fadendreieck am Greifer und Spreizer mitgeführt. Nach dem erneuten Einstechen der Bogennadel in das Textil an der Materialoberseite, verfährt die Spitze der Nadel nach dem Austritt aus dem Material in das Fadendreieck. Die Welle, an dessen Ende der Greifer angebracht ist, erfährt eine Rotationsbewegung und der Greifer gibt somit das Fadendreieck frei, es kommt zur ersten Stichbildung. Die Nadel verfährt danach wiederum entgegen zur Nährichtung durch das Textil, dabei wird wiederum ein

neues Fadendreieck aufgespannt, welches durch den Greifer durch eine erneute Rotationsbewegung der Welle zurück in Richtung Nähfaden aufgenommen wird und die Abläufe wiederholen sich wie soeben beschrieben. Damit die Nadel während ihres Durchlaufes durch das Textil keine Schädigungen daran vornimmt, darf sie relativ zum Nähgut keine Bewegung erfahren. Dies wird gewährleistet durch eine pendelförmige Ausgleichsbewegung des Nähkopfes.

Ein federnd gelagerter Nähfuß erlaubt es, Materialien unterschiedlicher Stärke zu vernähen. Bei der Vernähung muss gewährleistet sein, dass keine Spannungen im Nähfaden vor der Tellerbremse auftreten, da es sonst zu einem Reißen des Fadens kommen kann. Dies wird durch eine Fadenvorlegeeinheit, den sog. Eytelwein-Kompensator gewährleistet. Diese Einheit besteht aus 2 schnell rotierenden Scheiben, um die der Faden 2 bzw. 3mal geführt wird. Abbildung 59 zeigt den Prototypen eines Eytelwein-Kompensators.

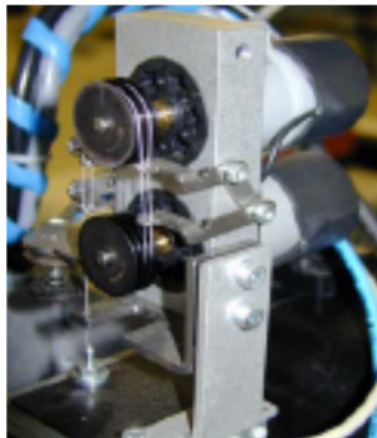


Abbildung 59: Eytelwein-Kompensator mit 2 Scheiben und Nähfaden [Geßler et al. 2002]

Im spannungsfreien Zustand stellt sich kein Reibschluss ein, es kommt zu keiner Fadenförderung. Baut sich nun während des Nähprozesses eine Fadenspannung hinter der Fadenvorlegeeinheit auf, so entsteht an den beiden rotierenden Scheiben ein Reibschluss und der Faden wird transportiert. Dieser Transport erfolgt solange, bis die Spannung abgebaut ist, es kommt dann zum Wegfall des Reibschlusses und der Transport endet. Durch den Eytelwein-Kompensator wird also gewährleistet, dass der Faden spannungsfrei an der Tellerbremse ankommt.

Das Prinzip wird in der technischen Mechanik mit der sog. Euler-Eytelwein-Formel beschrieben:

$$e^{-\mu_H \alpha} < \frac{F_1}{F_2} < e^{\mu_H \alpha} \quad (5.1)$$

mit F_1 resp. F_2 : Kräfte an den Seilenden, μ_H : Haftreibungskoeffizient und α : Umschlingungswinkel (im Bogenmaß)

Die Abbildung 60 verdeutlicht das Kräfteverhältnis eines Seiles, welches um einen runden Gegenstand geschlungen ist.

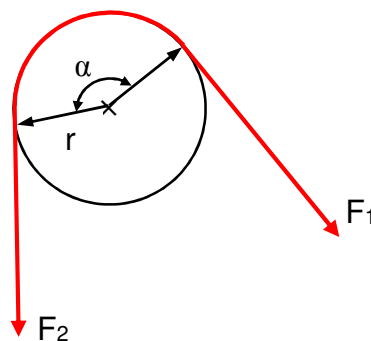


Abbildung 60: Kräfteverhältnis eines Seiles, welches um einen runden Gegenstand geschlungen ist (nach der Quelle aus dem Internet „<http://de.wikipedia.org/wiki/Euler-Eytelwein-Formel>“)

Wird dieser runde Körper nun sehr schnell rotiert, dann wird der Haftreibungskoeffizient nahezu Null. Aus der Euler-Eytelwein-Formel wird damit ersichtlich, dass die Kräfte F_1 und F_2 damit nahezu den gleichen Betrag haben. Im Falle des Eytelwein-Kompensators bedeutet dies, dass keine zusätzlichen Kräfte in den Nähfaden eingebracht werden; der Nähfaden ist nach Verlassen des Eytelwein-Kompensators nahezu spannungsfrei.

Die Abbildung 61 verdeutlicht die wichtigsten mechanischen Elemente am Blindstichnähkopf, die für das Verständnis der im Folgenden beschriebenen Prozesse von elementarer Wichtigkeit sind.

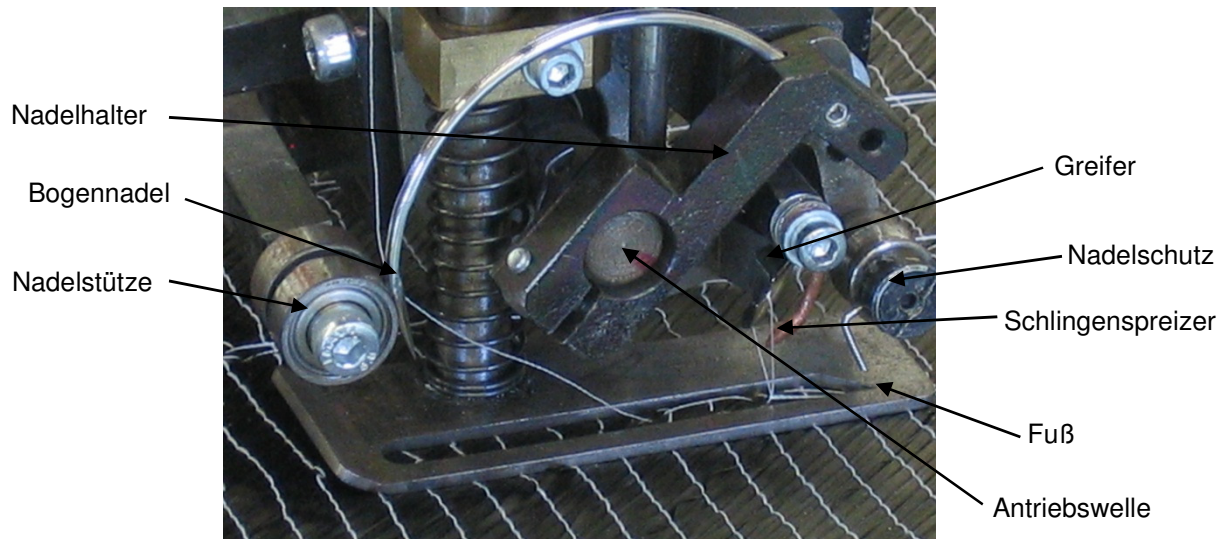


Abbildung 61: Mechanische Elemente am Blindstichnähkopf

Damit der Nähprozess stabil und reproduzierbar verläuft, ist es unumgänglich, dass die Bogennadel, das durch Greiferkehle und Spreizer aufgespannte Fadendreieck sicher trifft. Abbildung 62 zeigt, dieses Fadendreieck und die Bogennadel im Prozess.

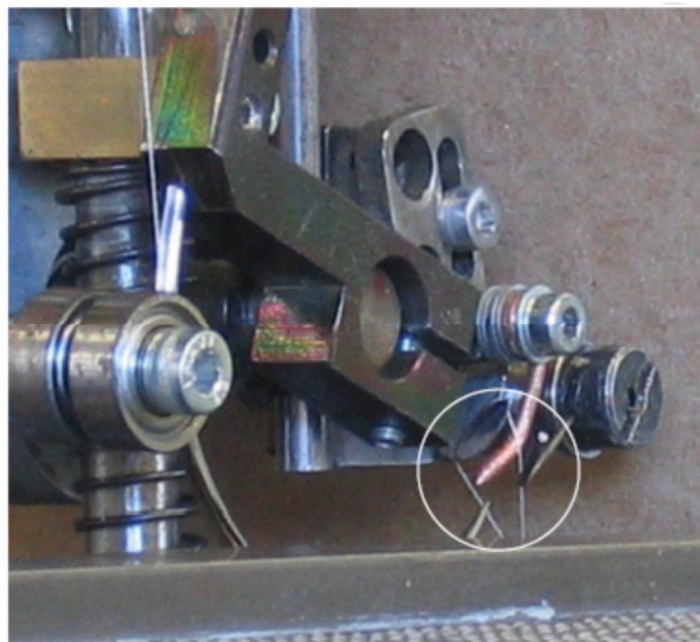


Abbildung 62: Fadendreieck mit Greifer, Spreizer und Bogennadel

Um die Prozesssicherheit zu gewährleisten wurden Nähversuche an Standardmultiaxialgelege der Firma SAERTEX gefahren. Zunächst wurde die Stichbildung für sehr starke Nähfäden untersucht. Es wurde ein Nähfaden aus Aramid mit einer Stärke von 120 tex verwendet (siehe Abbildung 63). Der

Nähprozess verlief stabil und es kam zu keinerlei Problemen bei der Nahtbildung. Das Fadendreieck wird von Greifer und Fadenspreizer optimal aufgespannt und die Nadel trifft dieses sicher.



Abbildung 63: Blindstichnaht auf Multiaxialgelege mit Nähfaden Aramid 120tex [Steinhilber 2006]

Um die Prozessstabilität aber nicht nur für sehr starke Garne zu gewährleisten, wurde für die Versuche zur Prozesssicherheit ein sehr feiner Nähfaden gewählt. Die Experimente wurden alle mit einem Polyesterfaden der Stärke 74 dtex durchgeführt.

Bei den Untersuchungen konnte beobachtet werden, dass es beim Nähprozess zu Fehlern in der Stichbildung kommen kann. Dies geschieht insbesondere dann, wenn der Nähfaden nicht exakt in der Greiferkehle liegt und es somit nicht zum Aufspannen des Fadendreiecks kommt. Die Schlaufe rutscht vom Greifer ab und wird verloren. Es kommt somit zu keiner Stichbildung.

Damit die Nadel bei ihrem Durchstechens des Nähgutes nicht dieses zerreisst, ist beim Blindstichnähhkopf eine Ausgleichsbewegung integriert. Der Fuß des Nähkopfes bewegt sich gegenläufig zur Nadelbewegung, so dass die Momentangeschwindigkeit dieser im Nähgut gleich 0 wird. In den Untersuchungen zeigte sich, dass der Winkel wie in Abbildung 64 dargestellt zwischen Schlaufe und Nähgut für die Prozesssicherheit ungünstig ist. Entgegen der Vorgabe des Herstellers die Ausgleichsbewegung so einzustellen, dass deren Wert einer halben Stichlänge entspricht, wurde dieser Wert für die Versuche um 16% erhöht.

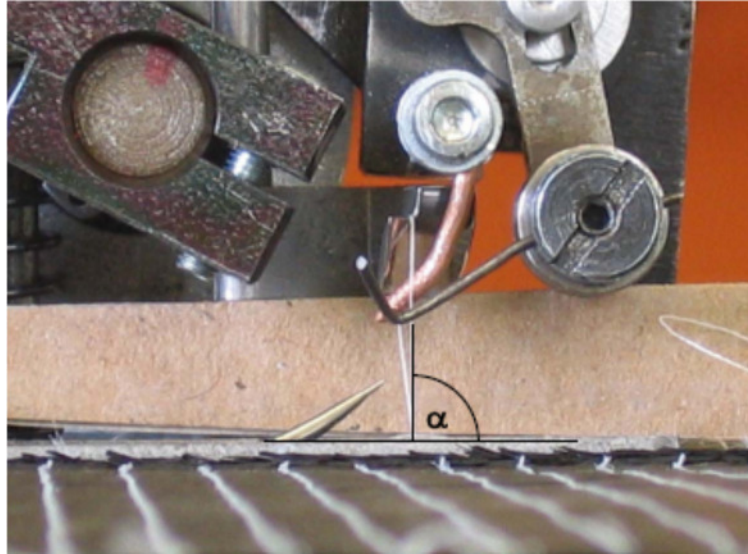


Abbildung 64: Ausrichtung der Fadenschleife zum Nähgut [Steinhilber 2006]

Durch diese Maßnahme konnte die Austrittsposition der Nadel in horizontaler Ebene ebenso wie die Position der Schleife zum Greifer hin verschoben werden. Die Schleife wies nun einen steileren Verlauf auf, was die Prozesssicherheit leicht erhöhte. Die Position des Greifers wurde ebenso verändert. Der Greifer schwenkt nun weit aus, so dass sich der Nähfaden gut in die Greiferkehle legt und somit prozesssicher fixiert wird. Dadurch wurde jedoch das örtliche und zeitliche Zusammenspiel von Greifer und Bogennadel sowie die Position des Schlingenspreizers zum Greifer geändert. Zunächst traf die Bogennadel die sicher in der Greiferkehle liegende Schleife nicht mehr. Durch die falsche Position des Spreizers kann darüber hinaus die Schleife nicht offen gehalten werden. Um die Prozesssicherheit zu gewährleisten wurde der Nadelhalter mit der Nadel in axialer Richtung nach vorne versetzt. Um das zeitliche Zusammenspiel sicherzustellen wurde der Nadelhalter gegenüber seiner Antriebswelle radial verdreht. Der Schlingenspreizer musste zur optimalen Positionierung nach vorne versetzt werden. Durch die neue Position der Nadel mussten Nadelstütze und Nadelschutz gleichermaßen nach vorne versetzt werden. Dies erfolgte durch Unterlegen von Distanzscheiben. Nachdem all diese Veränderungen durchgeführt wurden, konnte ein stabiler Nähprozess verzeichnet werden.

Dieser Nähprozess ist essenziell, um die Prozesskette darstellen zu können.

In der allgemeinen Betriebswirtschaftslehre und insbesondere in der Wirtschaftsinformatik werden häufig Pfeile für die Darstellung der einzelnen Prozesse in einer Prozesskette verwendet [Scheer et al. 2004], [Landon et al. 2010], [Zäpfel 2001]. So beschreibt Thome [Thome 2006] die Prozesskette als „Verknüpfung von Einzelleistungen mit dem Ziel, einen integrierten Ablauf der Gesamtaufgabe zu erreichen“.

Die in dieser Arbeit entwickelte Prozesskette ist in Abbildung 65 gezeigt und in ihrer Darstellung der Literatur angelehnt.

Die sogenannten Subpreforms wurden im TFP-Verfahren (siehe Kapitel 6.1.) hergestellt und anschließend im RTM-Werkzeug direkt mit einem Roboter zur Gesamtpreform vernäht. Ein automatisiertes Einlegen der Preforms als Zwischenschritt konnte auch dargestellt werden. Der anschließende RTM-Prozess wurde hierbei nicht betrachtet. Diese Prozesskette wird im Kapitel 6.5 für die Anwendung auf den A350-Fensterrahmen dargestellt und die Eingangs- und Ausgangsgrößen erläutert.



Abbildung 65: Die entwickelte Prozesskette zur Herstellung von Carbonpreforms und deren automatisiertes Fügen im RTM-Tool

Diese Darstellung in Form von Pfeilen kann weiter detailliert werden und in eine sog. ereignisgesteuerte Prozesskette (ePK) umgeformt werden. Diese Form der Darstellung wurde in den 1990er Jahren von Prof. Scheer an der Universität des Saarlandes in Zusammenarbeit mit der SAP AG entwickelt [Scheer et al. 2004], [Landon et al. 2010]. Die wesentlichen Elemente hierbei sind Ereignisse, Funktionen und Verknüpfungsoperatoren „exklusives oder“, „oder“ und „und“. Diese sind in Abbildung 66 dargestellt.



Abbildung 66: Die Basiselemente einer ereignisgesteuerten Prozesskette (ePK) (nach Scheer)

Ereignisgesteuerte Prozessketten beginnen und enden jeweils mit einem oder mehreren Ereignissen [Scheer et al. 2004].

Um Datenflüsse innerhalb einer ePK darstellen zu können, kann auf ein Element der sog. erweiterten ePK zurückgegriffen werden. Dieses Element wird als Informationsobjekt bezeichnet und interagiert mit Funktionen innerhalb einer ePK [Nüttgens et al. 1998]. Hierbei kann sowohl ein Informationsobjekt einzeln mit einer Funktion in Wechselwirkung treten oder eines liefert einen Input an eine Funktion und deren Output mündet in ein neues Informationsobjekt. Diese beiden Konfigurationen sind in Abbildung 67 dargestellt.

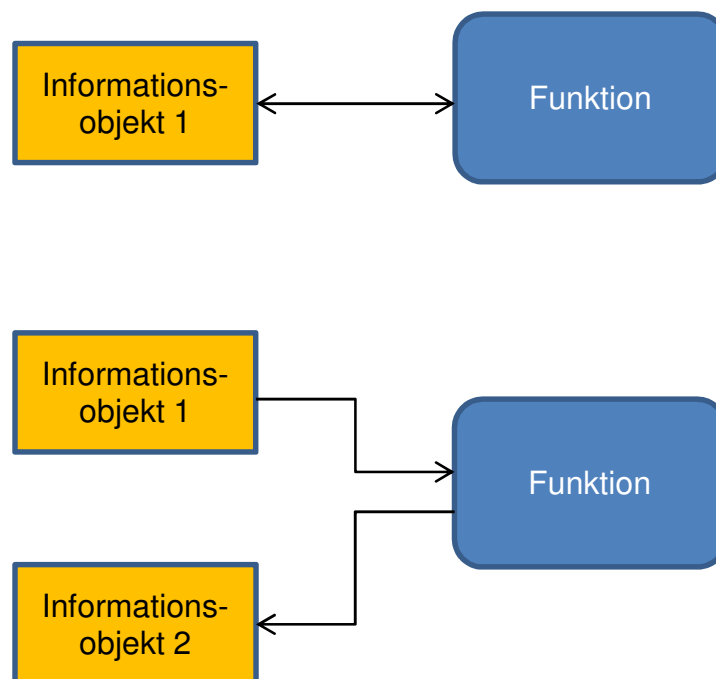


Abbildung 67: Interaktion eines Informationsobjektes mit einer Funktion (oben) und Input über ein Informationsobjekt 1 an die Funktion, deren Output in einem weiteren Informationsobjekt 2 mündet (unten) (vgl. [Nüttgens et al. 1998])

Mit diesen beschriebenen Elementen lässt sich die entwickelte Prozesskette -wie in Abbildung 65 dargestellt- zu einer erweiterten ePK weiterentwickeln (siehe Abbildung 68).

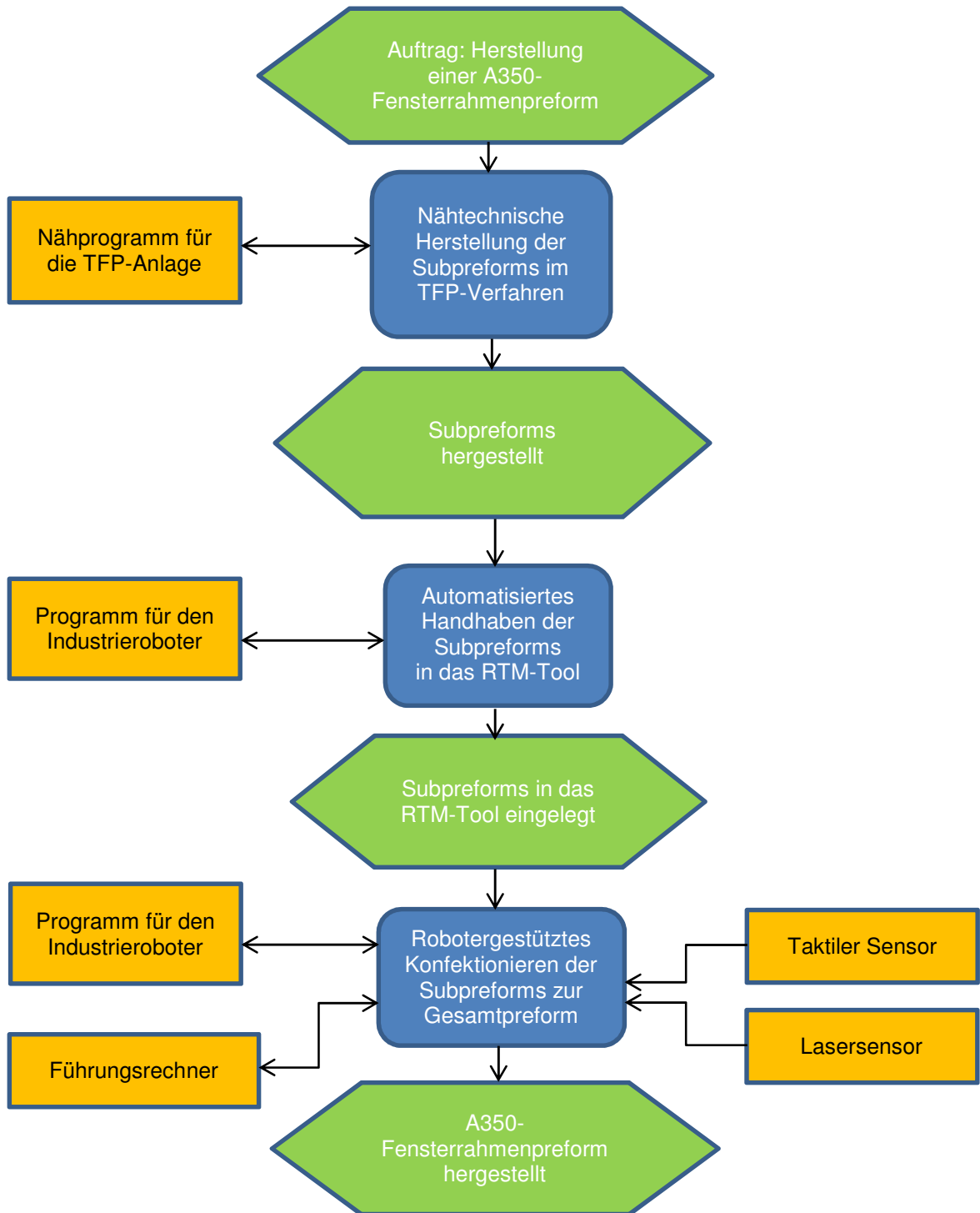


Abbildung 68: Die entwickelte Prozesskette in der Darstellung als erweiterte ePK

6 Applikationsuntersuchungen am A350-Fenster- rahmen

In diesem Kapitel wird die vorgestellte Prozesskette für die Anwendung auf den A350-Fensterrahmen näher detailliert und die einzelnen Prozessschritte als solche abschließend in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf deren möglichen industriellen Einsatz hin untersucht.

6.1. Grundlegende Untersuchungen zur Parameterermittlung für den automatisierten Nähprozess

Es wurden Nähversuche durchgeführt, um die Parameter für eine produktionstechnisch am besten geeignete Vernähung des Fensterrahmens zu bestimmen.

Die untersuchten Parameter waren insbesondere:

- Nähfaden
- Fadenspannung
- Nähgeschwindigkeit

Hierzu wurden Probensegmente mittels Tailored Fibre Placement gefertigt und anschließend im Blindstich geradlinig vernäht.

Beim Tailored Fiber Placement oder kurz TFP wird ein Roving auf einem Stickgrund abgelegt und mittels Zick-zack-Stich vernäht. Hierbei ist es sehr gut möglich, die Kohlenstofffasern kraftflussgerecht anzuordnen und somit kann der Materialverschnitt minimiert werden. Da bei den meisten Tailored Fibre Placement-Anlage lediglich ein Stickkopf verwendet wird, ist deren Produktivität im Vergleich zu Tapelegemaschinen als geringer einzustufen. Diese geringere Produktivität lässt sich aber durch den Einsatz von Mehrkopfsystemen kompensieren.

In Abbildung 69 ist das Prinzip des TFP schematisch dargestellt. Man kann den Niederhalter (4) erkennen, welcher den Roving auf das Grundmaterial (5)

positioniert, wonach dieser dann mit Sticknadel (1) und Stickfaden (2) mit einer einstellbaren Überstichbreite auf dem Stickgrund vernäht wird.

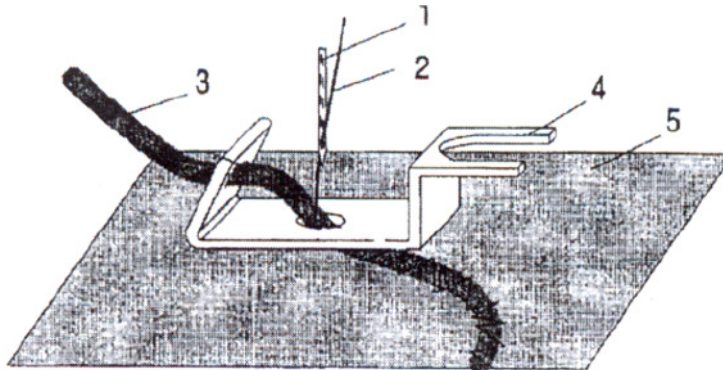


Abbildung 69: Prinzipdarstellung des Tailored Fibre Placements (TFP) [Körwien 2002]

Die Abbildung 70 zeigt das Zielbauteil der Untersuchungen, den A350-Fensterrahmen.

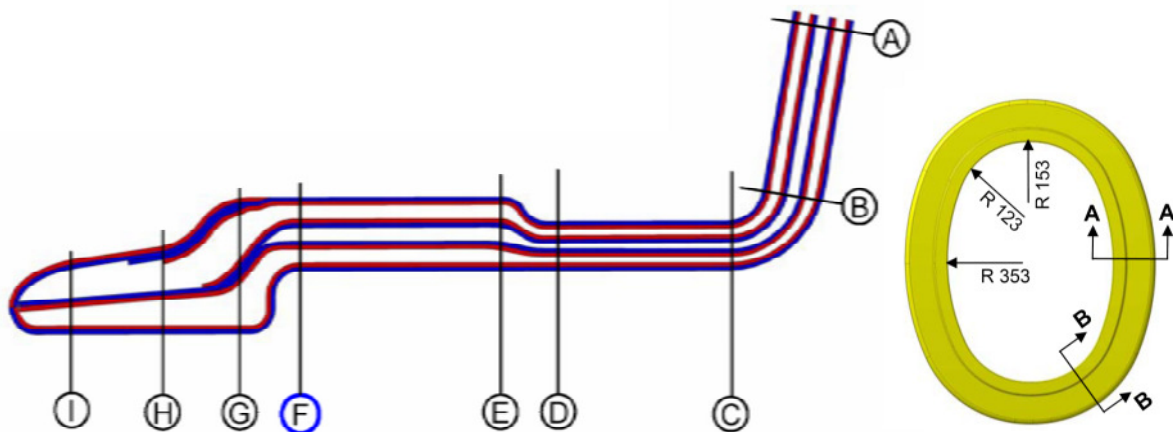


Abbildung 70: Querschnitt durch den Fensterrahmen (links) und Draufsicht (rechts)
(Quelle : Airbus)

Die Proben, welche mittels TFP in Kooperation mit dem Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart hergestellt wurden, bestehen aus 3 Ebenen; in allen diesen 3 Ebenen sind Rovings in 0° , $+60^\circ$ und -60° abgelegt.

Die Tabelle 3 zeigt den Aufbau der 3 Subpreforms mit den Lagenorientierungen.

Subpreform 1	Lage 1	Lage 2	Lage 3		
	60°	60°, gespiegelt (-60°)	0° und Ring		
Subpreform 2	Lage 1	Lage 2	Lage 3	Lage 4	Lage 5
	60°	60°, gespiegelt (-60°)	0°	60°	60°, gespiegelt (-60°)
Subpreform 3	Lage 1	Lage 2	Lage 3		
	60°, gespiegelt und gedreht	60° gedreht	0° und Ring		

Tabelle 3: Der Aufbau der 3 Subpreforms mit den Lagenorientierungen im speziellen

Die Abbildung 71 zeigt exemplarisch Subpreform 3 mit den einzelnen Aufdickungen und Lagenorientierungen.

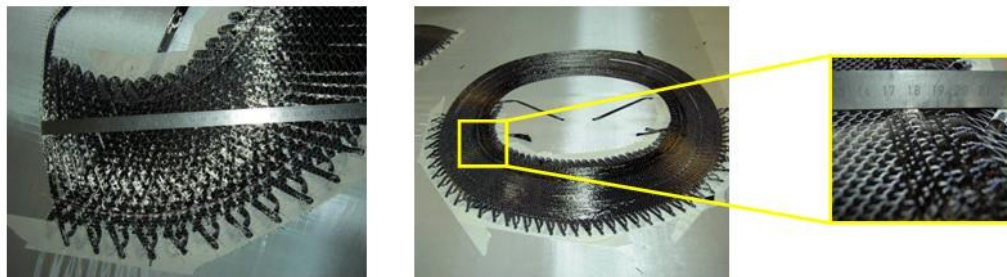


Abbildung 71: Der Aufbau der Subpreform 3

Die Gesamtpreform wurde durch Sticken mit einem 4-fach gefachten 12 k HTS Roving der Firma Toho Tenax gefertigt. Dabei liegen jeweils 2 Rovings neben- und übereinander. Als Nähgarn kam Serafil 200 zum Einsatz. Bei der Fertigung hat sich gezeigt, dass sich alle Lagen mit diesem Garn fertigen lassen. Ein Ausweichen auf Serafil 120 war nicht notwendig, könnte jedoch die Produktivität erhöhen, da eventuell höhere Stichzahlen möglich sind.

Das Abnähen der Preform (Schneidemarkierung, „theoretischer“ Rand) erfolgt mit farbigen Serafil 80. Der Stickgrund besteht aus Glasfaser-Filamentgewebe mit 106 g/m². Die Überstichbreite beträgt 9,3mm. Dies ist die maximale Überstichbreite der am IFB vorhandenen TFP-Anlage. Aus dieser Überstichbreite ergeben sich am äußeren Rand der Preform Lücken bis zu 6 mm Breite zwischen den abgelegten Rovings. Die Lücken lassen sich beinahe vollständig vermeiden, wenn 2 statt 4 Rovings gleichzeitig abgelegt werden.

Allerdings verdoppelt dies auch die Produktionszeit der Preforms. Aus Zeitgründen wurde die Ablage mit 4 Rovings beibehalten. Um eine übermäßige Welligkeit zu vermeiden, werden folgende, identische Lagen durch Drehung leicht versetzt. Der Drehwinkel betrug $1,0914^\circ$.

Durch die Rovingeinschnürung und die Wendepunkte ergibt sich ein Sticküberstand von knapp 45 mm am äußeren Rand der Preform und 25 mm am Innenrand. In der Abbildung 72 ist dies zu erkennen. Die Umkehrpunkte, welche produktionstechnisch beim Sticken bedingt sind, sind ebenfalls deutlich erkennbar.

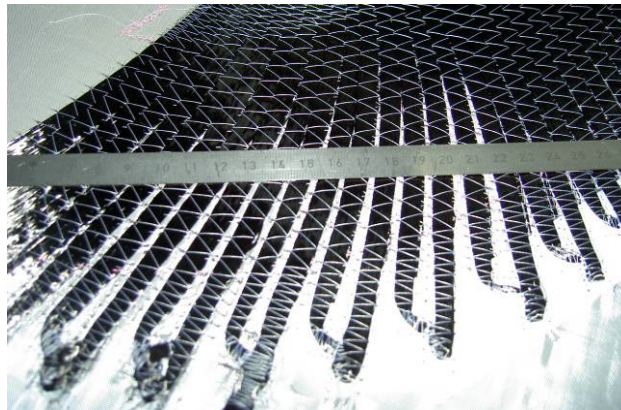


Abbildung 72: Gestick mit den produktionstechnisch bedingten Wendepunkten

Der Radius, welcher am Fensterrahmen nähtechnisch realisiert werden soll ist mit 353 mm gegeben (siehe Abbildung 70). Um die produktionstechnisch relevanten Parameter der Blindstichvernähung zu ermitteln, wurde eine geradlinige Vernähung gewählt. Bei diesem Probenprogramm lag der Fokus auf realisierbare Werkstoffpaarungen von Nähfaden und Stickgrund. Gerade bei der Blindstichvernähung kann eine ungünstige Paarung von Stickgrund und Nähfaden zu einem Abscheren des Nähfadens und damit zu nicht vernachlässigbaren Problemen bei der Stichbildung führen.

Es wurden zunächst Probensegmente der Fensterrahmenpreform im TFP-Verfahren auf einem Glasstickgrund hergestellt. Abbildung 73 zeigt die hergestellten Segmente auf dem Stickgrund und die Abbildung 74 zeigt eine Detaildarstellung eines dieser Probensegmente.

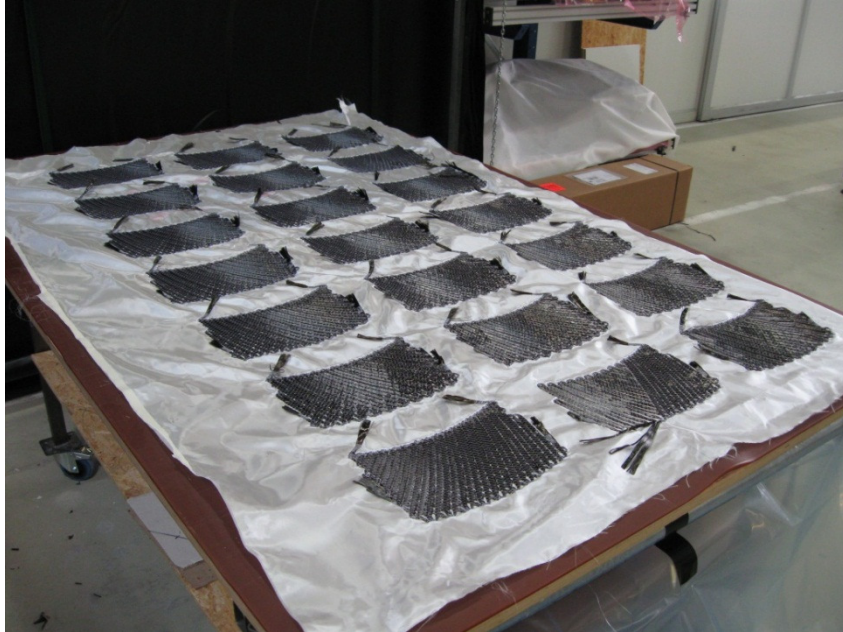


Abbildung 73: Probensegmente auf Glasstickgrund



Abbildung 74: Detaildarstellung eines Probensegments für die Ermittlung der Nähparameter

Zur Vernähung wurden die Proben auf einen Tisch gespannt, um sie danach mittels Roboter zu vernähen. Abbildung 75 zeigt den Versuchsaufbau mit Roboter (links) und die Probenhalterung (rechts).

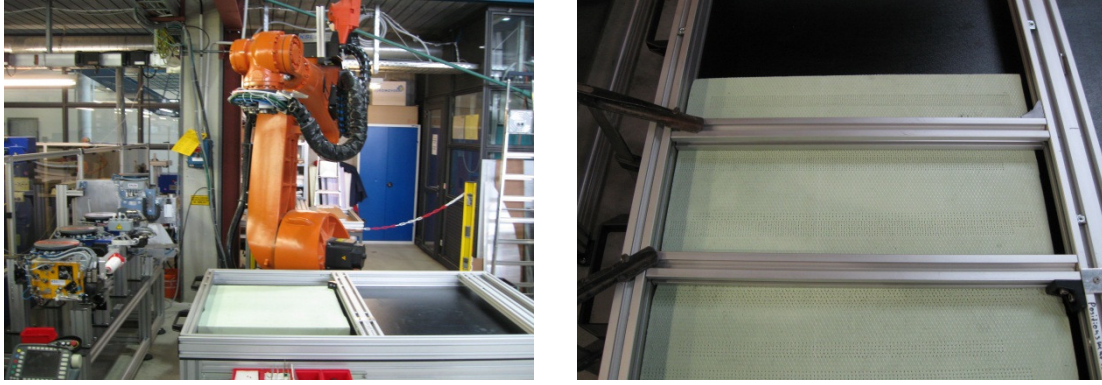


Abbildung 75: Versuchsstand mit Roboter (links) und Probenhalterung (rechts)

Die Proben wurden mittels eines Roboternähkopfes der Firma KSL in Blindstichttechnologie vernäht. Der Hersteller des Nähkopfes gibt die in Kapitel 5 bezifferten Parameter an. Da bei hoher Nähgutdicke lediglich eine geringe Stichlänge realisiert werden kann und bei geringer Stärke eine höhere, wurde eine Stichlänge von 13 mm gewählt. Dieser Parameter wurde zunächst invariabel gewählt.

Wie bereits beschrieben gibt der Hersteller des Blindstichnähkopfes KSL die einstellbare Stichlänge im Bereich von 4 mm bis 15 mm und die vernähbare Nähgutstärke im Intervall von 2 mm bis 8 mm an. Folgende Paarungen sind anzuwenden:

- je größer die Nähgutstärke desto kleiner die Stichlänge und reziprok
- je kleiner die Nähgutstärke desto größer die Stichlänge

Bei einer relativ geringen Nähgutstärke bildet sich das Fadendreieck –wie in Abbildung 76 dargestellt– gut aus und die Bogennadel trifft dieses sicher, was für eine reproduzierbare Stichbildung unerlässlich ist. Es muss dann eine große Stichlänge gewählt werden, damit das Zusammenspiel zwischen Nadel und dem Eintauchen in das Fadendreieck gewährleistet ist.

Ist die Nähgutstärke relativ groß, so bildet sich ein kleines Fadendreieck aus, das der meiste Nähfaden im Nähgut verbleibt. Hier ist dann eine kleine Stichlänge zu wählen, damit auch hier eine reproduzierbare Naht erstellt werden kann.

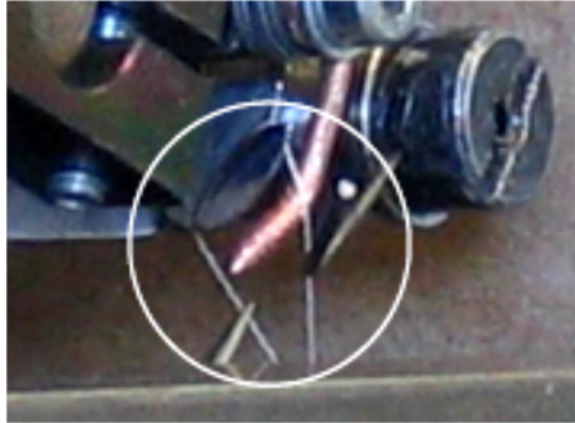


Abbildung 76: Das Fadendreieck beim Blindstich (hier bei relativ geringer Nähgutstärke und relativ großer Stichlänge)

Variiert wurden Nähfadenart, die Nähgeschwindigkeit und die Fadenspannung. Tabelle 4 zeigt das Probenprogramm.

Probennummer	Nähfaden	Nähgeschwindigkeit [m/s]	Stichlänge [mm]	Fadenspannung	Nahtqualität
1	Glas EC9 34x3	0,009	13	1 Umdrehung der Tellerbremse	Keine Vernähung möglich
2	Glas EC9 34x3	0,009	13	5 Umdrehungen der Tellerbremse	Nahtbildung sehr gut
3	Glas EC9 34x3	0,009	13	10 Umdrehungen der Tellerbremse	Nahtbildung sehr gut
4	Glas EC9 34x3	0,01	13	5 Umdrehungen der Tellerbremse	Nahtbildung 5 Stiche möglich, danach Abscheren des Fadens
5	Glas EC9 34x3	0,15	13	5 Umdrehungen der Tellerbremse	Keine kontinuierliche Vernähung möglich
6	Aramid 40tex 200x2	0,01	13	5 Umdrehungen der Tellerbremse	Nahtausbildung sehr gut
7	Aramid 40tex 200x2	0,01	13	1 Umdrehung der Tellerbremse	Nahtbildung erst nach mehreren Fehlstich möglich
8	Aramid 40tex 200x2	0,02	13	5 Umdrehungen der Tellerbremse	Nahtbildung nach einem Fehlstich möglich
9	Aramid 40tex 200x2	0,015	13	5 Umdrehungen der Tellerbremse	Nahtbildung nach 2 Fehlstichen möglich
10	Serafil 60	0,015	13	5 Umdrehungen der Tellerbremse	Lediglich die letzten beiden Stiche der Naht werden korrekt ausgebildet
11	Serafil 60	0,015	13	10 Umdrehungen der Tellerbremse	Lediglich die letzten beiden Stiche der Naht werden korrekt ausgebildet
12	Serafil 60	0,010	13	10 Umdrehungen der Tellerbremse	Lediglich der letzte Stich der Naht wird korrekt ausgebildet
13	Aramid 40tex 200x2	0,01	6	10 Umdrehungen der Tellerbremse	Keine Nahtbildung möglich
14	Aramid 40tex 200x2	0,01	10	10 Umdrehungen der Tellerbremse	Lediglich die letzten beiden Stiche der Naht werden korrekt ausgebildet

Tabelle 4: Versuchsprogramm zur Ermittlung der Nähparameter

Wie Tabelle 4 zu entnehmen ist, traten folgende Fehler auf:

- Keine Vernähung möglich (Probe 1,5 und 13)
- Nahtbildung erst nach einem oder mehreren Fehlstichen möglich (Probe 7,8,9,10,11,12 und 14)
- Abscheren des Fadens (Probe 4)

Aus den Versuchen wurde ersichtlich, dass Probe Nummer 6 die besten Ergebnisse lieferte. Bei einer Vernähung mit Aramid und den gewählten Parametern kann eine gute Nahtqualität bei gleichzeitiger niedriger Faserondulation gewährleistet werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse anhand von charakteristischen Proben des Prüfprogramms dargestellt und diskutiert.

Abbildung 77 zeigt die Vernähung von Probe 3. Hier wurde ein Glasfaden verwendet. Man kann ein sehr gutes Nahtbild bei gleichzeitig geringer Faserondulation erkennen.



Abbildung 77: Darstellung der Vernähung von Probe 3

Abbildung 78 stellt die Vernähung der Proben 13 und 14 dar. Hierbei konnte keine Stichbildung erfolgreich erzielt werden.

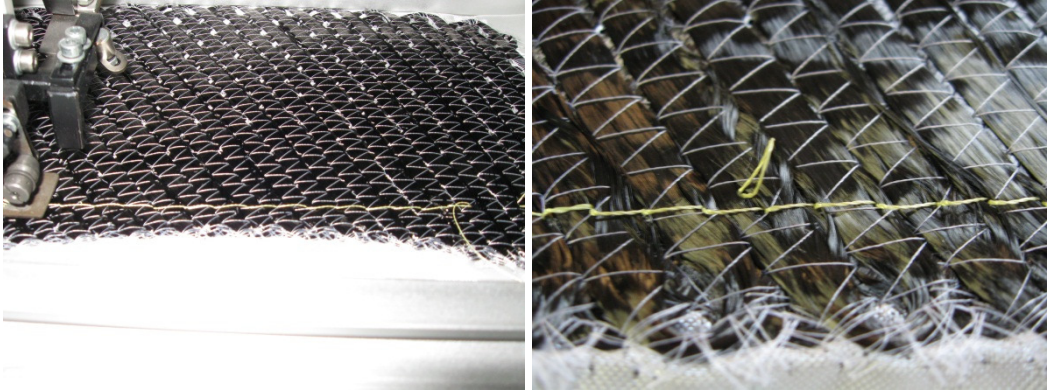


Abbildung 78: Darstellung der Vernähung von Probe 13 (links) und von Probe 14 (rechts)

In Abbildung 79 ist Probe 9 dargestellt. Man erkennt deutlich, dass zunächst 2 Fehlstiche ausgebildet wurden, danach die Vernähung jedoch erfolgreich durchgeführt werden konnte.



Abbildung 79: Darstellung der Vernähung von Probe 9; die 2 Fehlstiche und die korrekt ausgebildete anschließende Naht sind deutlich erkennbar

Abbildung 80 zeigt Probe 10, bei der ebenfalls keine Stichbildung erzielt werden konnte.

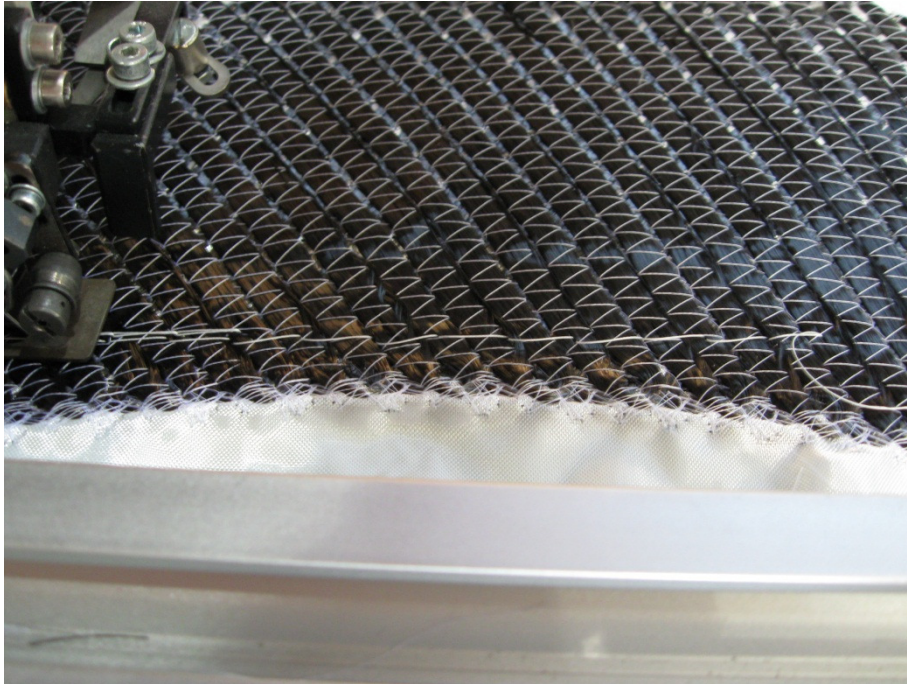


Abbildung 80: Darstellung der Vernähung von Probe 10

Abbildung 81 zeigt Probe 6. Hier konnten die besten Ergebnisse hinsichtlich Nahtbildung erzielt werden.

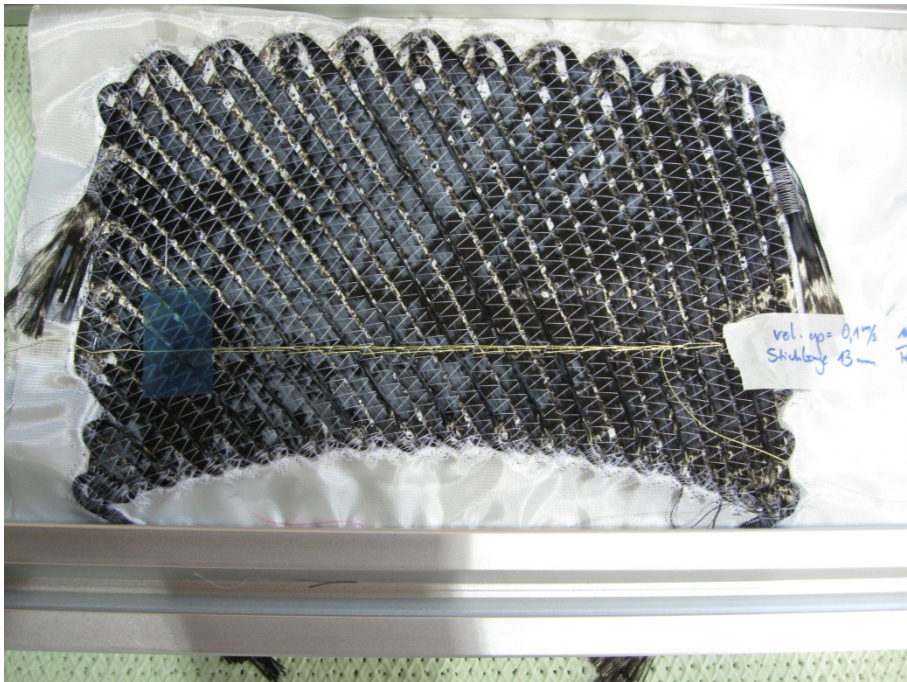


Abbildung 81: Darstellung der Vernähung von Probe 6

Die Abbildung 82 zeigt eine Detaildarstellung der Probe 6. Auf dieser Abbildung wird deutlich, dass es gerade bei einer Vernähung mit Aramid aufgrund der hohen Festigkeit des Nähfadens zu Faserondulationen des Gestickes im Bereich der Naht kommt. Diese Faserondulationen sind unerwünscht, da sie lokal die Festigkeit des Bauteils herabsetzen.



Abbildung 82: Detaildarstellung der Vernähung von Probe 6

Es konnte somit gezeigt werden, dass die Vernähung mit dem Nähfaden Glas EC9 34x3 noch besser geeignet ist, als die Vernähung mit Aramid 40tex 200x2. Für eine Vernähung mit einem Nähfaden aus Aramid würde die hohe Festigkeit des Nähfadens und damit der gebildeten Naht sprechen. Ein großer Nachteil einer Naht aus Aramid ist -wie bereits erwähnt- die hohe Tendenz zur Faserondulationsbildung und die Feuchtigkeitsaufnahme von Aramid. Damit geht eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften im späteren Bauteil einher [Verpoest et al. 1988], [Wan et al. 2006].

6.2. Herstellung eines Prototypen einer A350-Fensterrahmenpreform

Der Fensterrahmen wird als Preform aus 3 Subpreforms aufgebaut. Die Abbildung 83 zeigt die 3 Subpreforms auf dem Glasstickgrund.

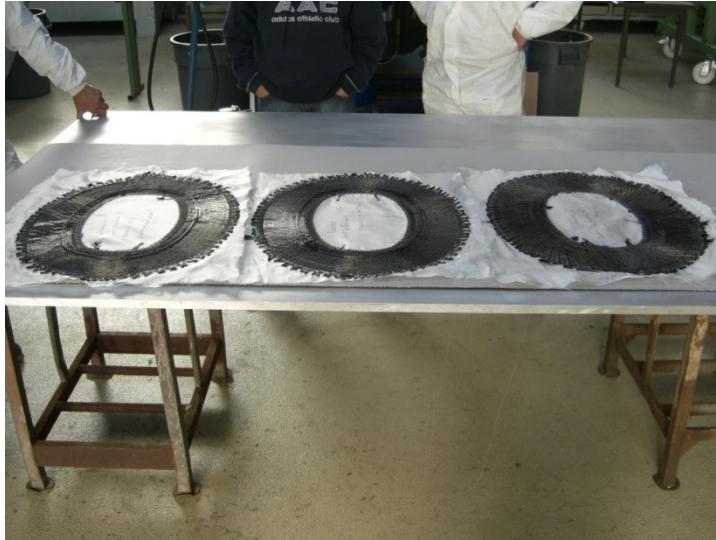


Abbildung 83: Die 3 Subpreforms für die Herstellung der Gesamtpreform des Fensterrahmens

In einem anschließenden Prozessschritt müssen die Preforms beschnitten werden, um sie zur Gesamtpreform zusammenfügen zu können. Aus diesem Grund wurde bereits bei der Herstellung der Subpreforms auf ein Markierungsfaden eingestickt. Entlang dieses Markierungsfadens werden die Subpreforms beschnitten. Die Abbildung 84 zeigt den Markierungsfaden und den Beschnitt.

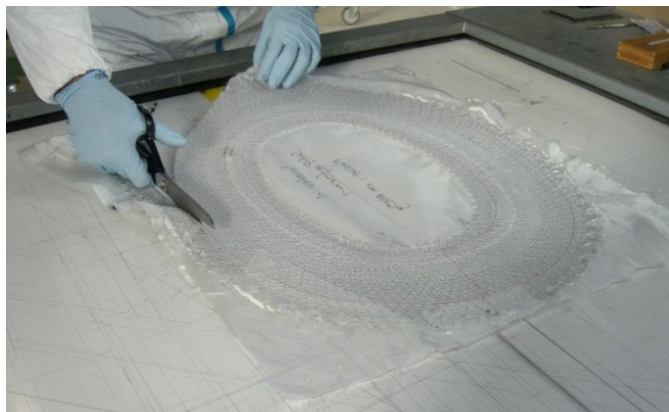


Abbildung 84: Eine der 3 Subpreforms wird am Markierungsfaden beschnitten

Anschließend werden die 3 zugeschnittenen Subpreforms in das Werkzeug drapiert. Die Abbildung 85 zeigt die Reihenfolge der Subpreforms (SP1 bis SP3) im Werkzeug und die Position des Stickgrundes schematisch.

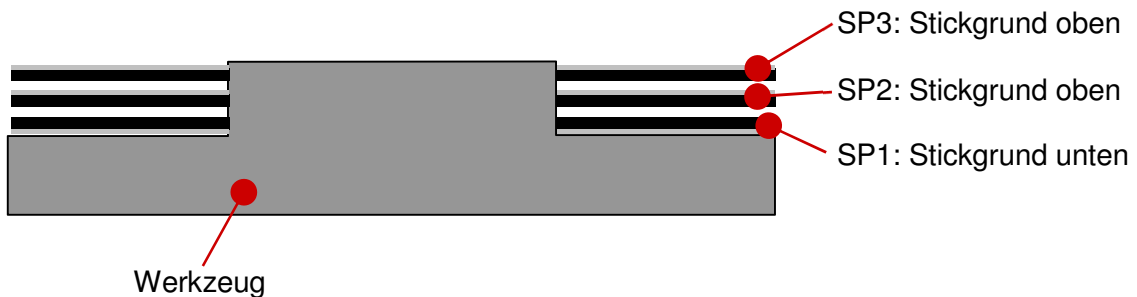


Abbildung 85: Schematische Darstellung der Position der Subpreforms im Werkzeug

Wie bereits beschrieben wurden die Subpreforms am Markierungsfaden beschnitten, damit diese in das Werkzeug drapiert werden können. Das Werkzeug verfügt über einen Absatz, an dem die Preforms exakt angelegt werden können (siehe Abbildung 86).

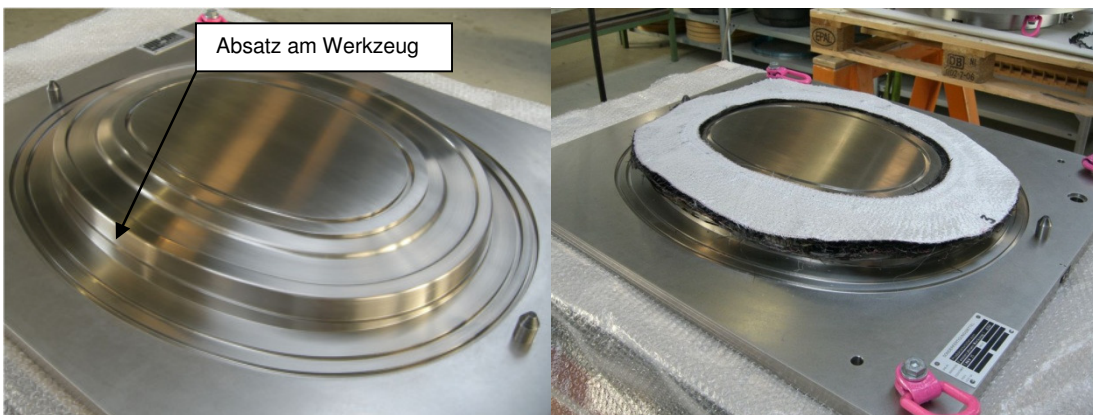


Abbildung 86: Das RTM-Werkzeug mit Absatz für das Anlegen der Preforms (links) und das bestückte RTM-Werkzeug (rechts)

6.3. Definitionen für die automatisierte Vernähung der Fensterrahmenpreform

Damit die Preforms für die Vernähung an der korrekten Position bleiben, wurde ein Preformrahmen konstruiert. Dieser Rahmen wird um das Werkzeug herum positioniert. Dadurch werden die 3 Subpreforms um die Werkzeugkante drapiert. Die Abbildung 87 zeigt diesen Preformrahmen und dessen Position im Werkzeug.

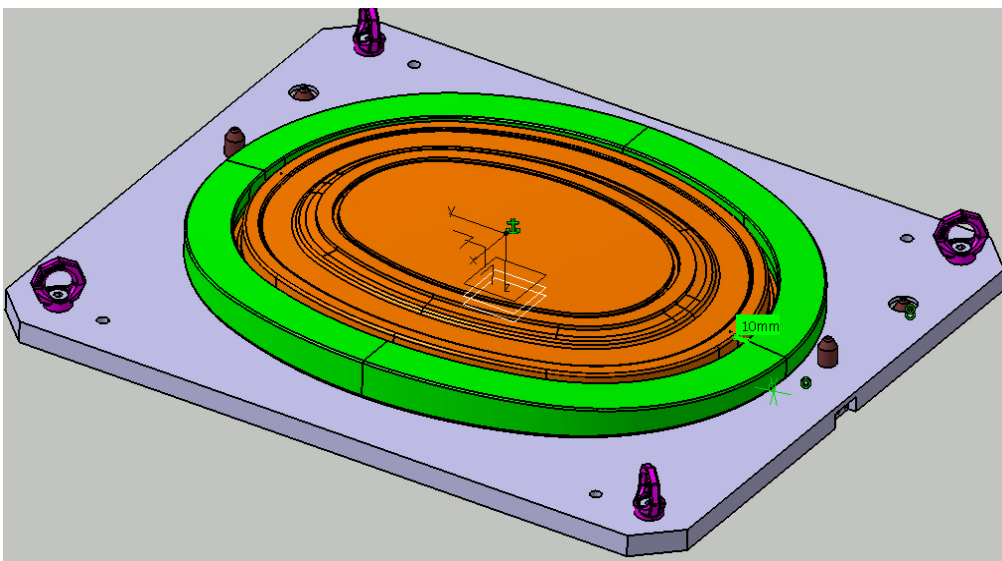


Abbildung 87: Das RTM-Werkzeug und der Preformrahmen (grün)

Um die 3 Subpreforms der Fensterrahmenpreform miteinander zu vernähen, wurden 2 Nahtpositionen gewählt. Diese Positionen wurden derart angeordnet, dass sie mit den erhabenen Regionen auf dem Fensterrahmentool übereinstimmen. Dies geschah aus 2 Gründen:

- 1.) um dem Nähkopf eine feste Unterlage für die Vernähung zu bieten
- 2.) damit es beim Injizieren des Harzes für den Produktionsprozess des Fensterrahmens nicht zu „fiber-washing“ kommt. Es wurde somit eine Position an den Rändern der Subpreforms gewählt.

Die Prozesskette für die Vernähung der 3 Subpreforms stellt sich folgendermaßen dar:

- a) Werkzeughalbschale positionieren
- b) Subpreforms P1 und P2 in Werkzeug einlegen
- c) Preformhalter positionieren
- d) Subpreforms P1 und P2 miteinander vernähen
- e) Preformhalter abnehmen
- f) Subpreform P3 in Werkzeug einlegen
- g) Preformhalter positionieren
- h) Subpreform P3 mit Subpreform P2 vernähen

Die Preforms P1 und P2 werden auf der inneren Nahtbahn vernäht. Die Abbildung 88 zeigt den Nahtverlauf der Naht 1.

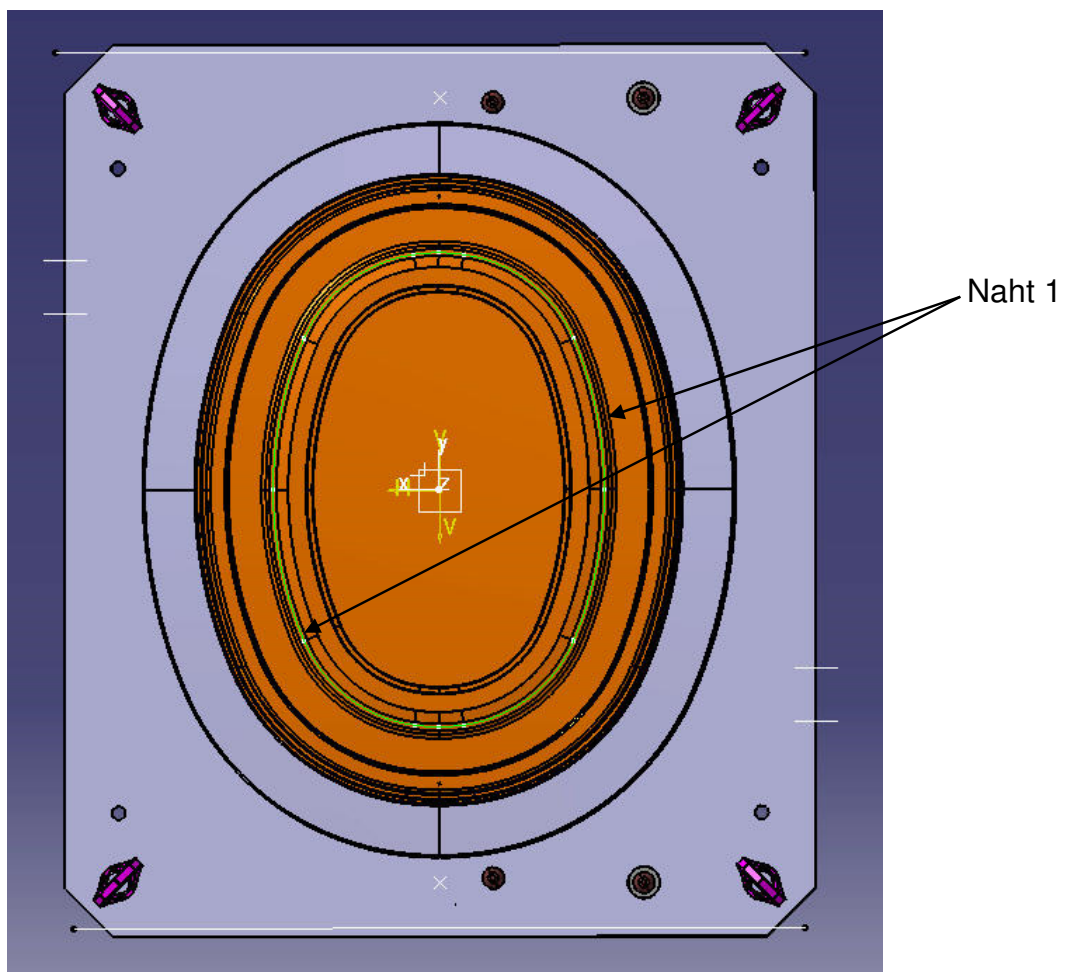


Abbildung 88: Der Nahtverlauf der Naht 1 für das Vernähen der Subpreforms P1 und P2

Anschließend werden die Subpreforms auf der äußeren Nahtbahn Naht 2 vernäht. Die Abbildung 89 zeigt diesen Nahtverlauf auf dem RTM-Werkzeug.

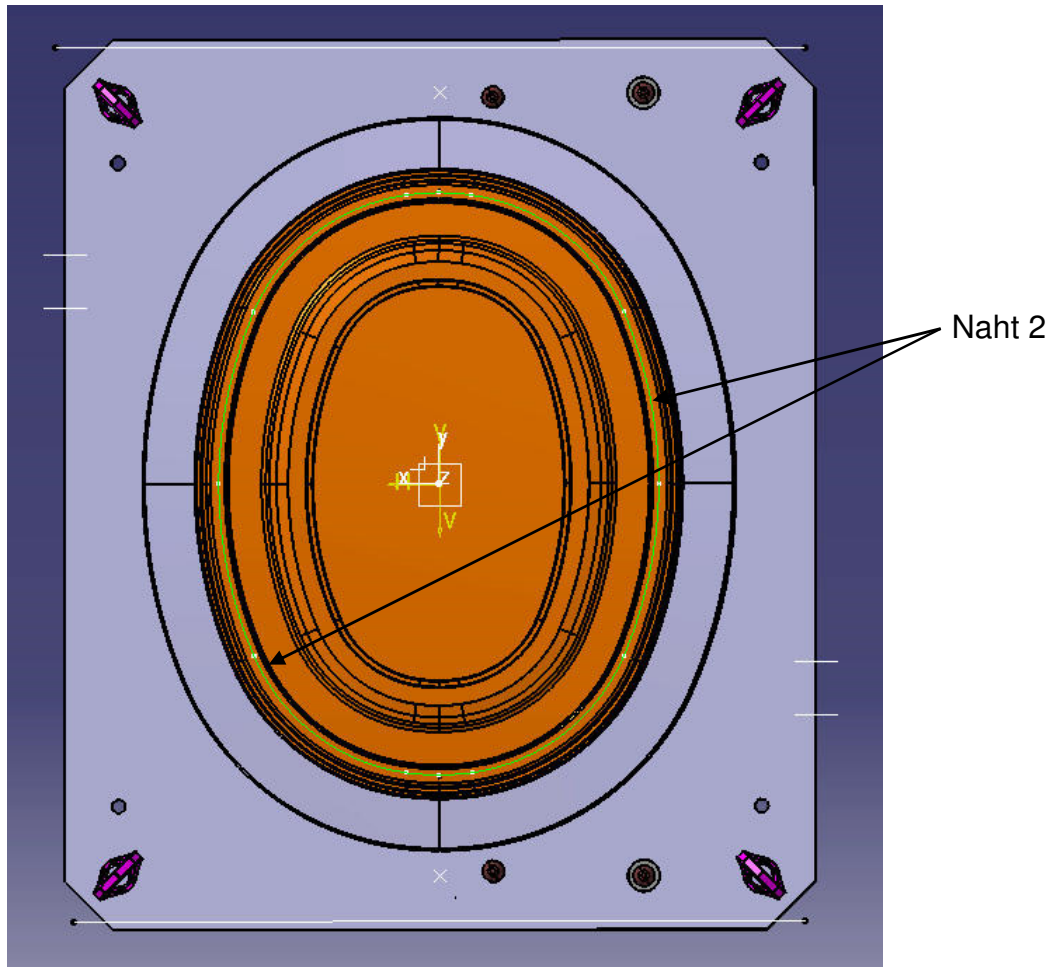


Abbildung 89: Der Nahtverlauf der Naht 2 für das Vernähen der Subpreforms P2 und P3

In der Abbildung 90 sind die Positionen der Nähte Naht 1 und Naht 2 auf dem RTM-Werkzeug nochmals dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung ist eine Draufsicht auf die Nähte gezeigt und auf der rechten Seite eine schematische Seitenansicht des Werkzeuges und der 3 Subpreforms inklusive der Position der Nähte.

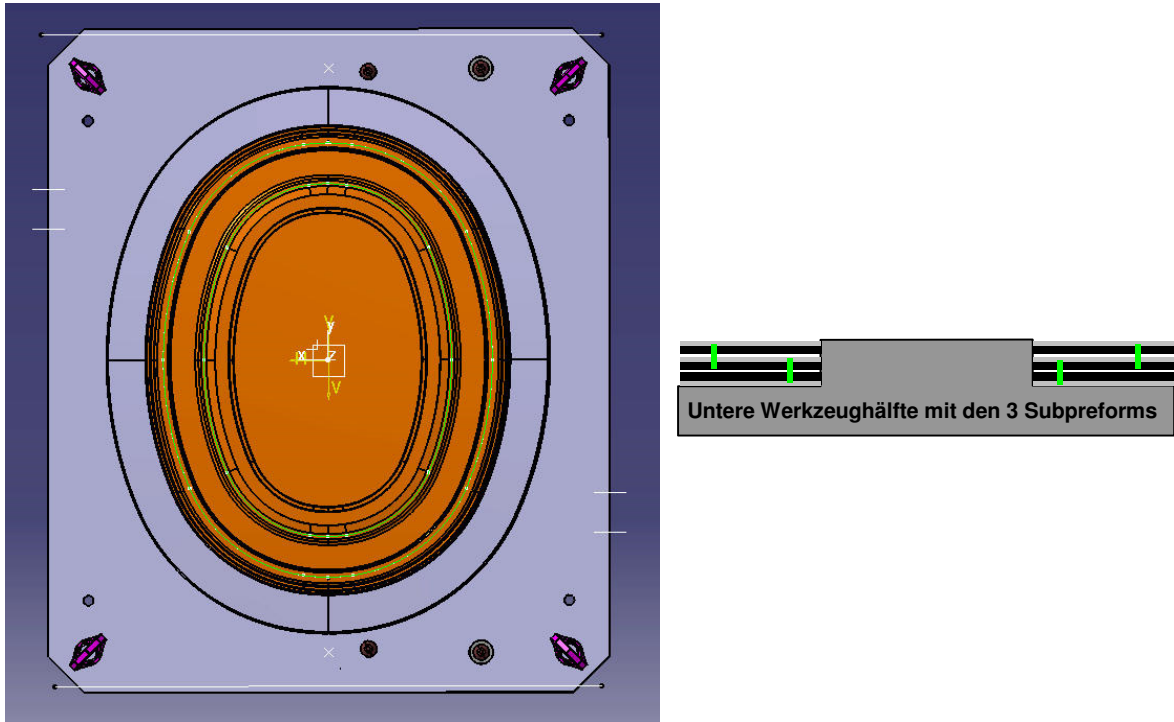


Abbildung 90: Der Nahtverlauf der Nähte Naht 1 und Naht 2 in der Draufsicht (rechts) und in der schematischen Seitenansicht (rechts)

Diese Nahtpositionen dienen als Grundlage für die anschließende Machbarkeitsstudie und den abschließenden finalen Testlauf mit der Roboternähanlage und dem Demonstratorbauteil.

6.4. Experimentelle Voruntersuchungen und Test der Roboter-nähanlage für die automatisierte Vernähung der Fensterrahmenpreform

Um eine reproduzierbare Vernähung der Fensterrahmenpreforms sicherzustellen, wurden zunächst Vorexperimente mit der Forschungs-nähanlage bei EADS-IW Abteilung LG-CT in Ottobrunn gefahren. Hierzu wurden zunächst die Subpreforms aus Standardmultiaxialgelege den originalen TFP-Gesticken in Stärke und Abmessungen nachempfunden. Die Roboternähanlage ist nach der in Abbildung 91 dargestellten Prozesskette aufgebaut. Der Lasersensor und der taktile Sensor kommunizieren mit dem Führungsrechner und liefern die Istpositionen des Roboters auf der Nahtbahn. Die Sollbahn wird von der Robotersteuerung generiert. Kommt es nun zu unvorhergesehenen Hindernissen auf der Nahtbahn wie z.B. Materialanhäufungen bedingt durch die Verfahrbewegung des Drückerfußes so meldet der taktile Sensor dies durch eine Erhöhung der auf ihn wirkenden Kraft und damit einem geänderten Outputsignal. Ebenso scannt der Lasersensor während der Nähbewegung des Roboters die Nahtbahn und meldet Abweichungen in der Umwelt der Nahtbahn, welche zu Problemen für die Nahtbildung führen könnten. Der Führungsrechner ist somit in der Lage über die gelieferten Daten der Sensoren die programmierte Nahtbahn des Roboters zu korrigieren, um eine sichere Vernähung zu gewährleisten.

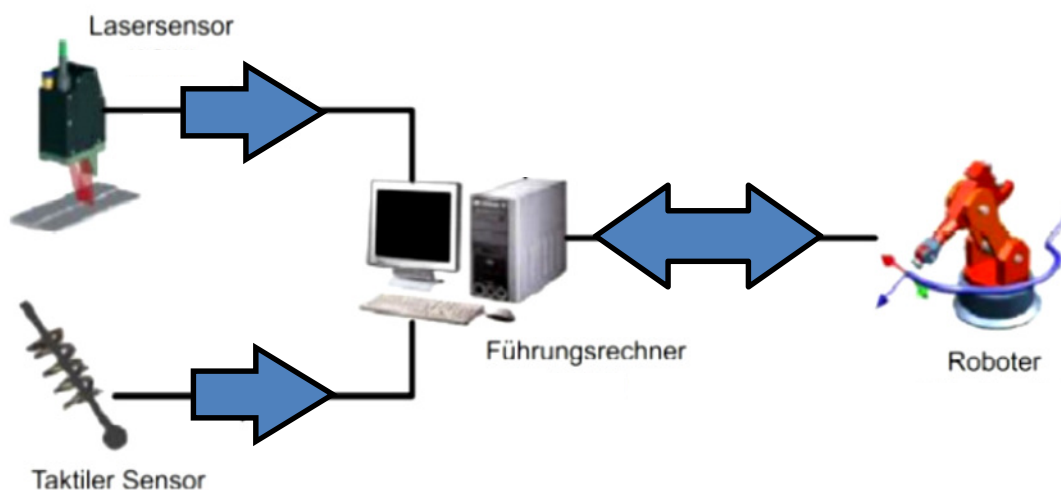


Abbildung 91: Das Konzept der automatisierten Roboternähanlage (nach 6. Zwischenbericht der Firma ISAM AG für das BMBF-Projekt REDUX)

Für eine robust funktionierende Vernähung wurden Prämissen für die Sensoren gewählt. So fungiert der Lasersensor als laterale Führungskomponente und der taktile Sensor als vertikale. Die Abbildung 92 verdeutlicht die getroffenen Definitionen für beide Sensoren, wobei die Eckdaten für den Lasersensor in der Abbildung links und die für den taktilen Sensor rechts dargestellt sind.

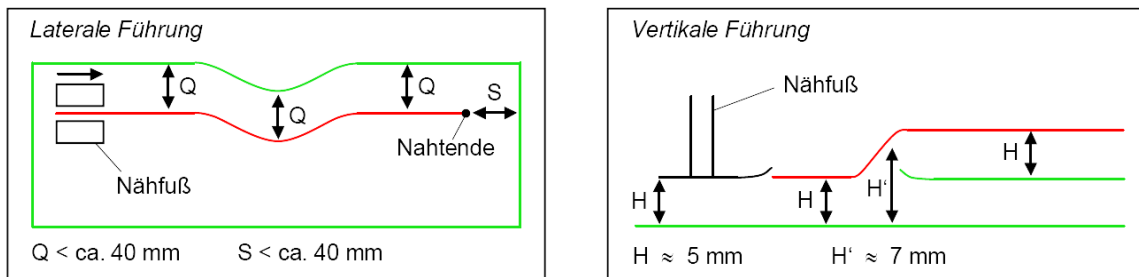


Abbildung 92: Die Eckdaten für den Lasersensor (links) zur lateralen Führung und für den taktilen Sensor (rechts) für die vertikale Führung (nach 3. Zwischenbericht der Firma ISAM AG für das BMBF-Projekt REDUX)

So ist das Maximum des Abstandes von der Nahtbahn zu einer Kante als 40 mm für die laterale Führung definiert worden. Für die vertikale Führung wurde das Maximum der zu regelnden Höhe auf 5 mm gesetzt.

Für die Vernähung der Fensterrahmenpreform wurden anschließend die bereits beschriebenen Nähte Naht 1 und Naht 2 durch äquidistante Punkte mit dem Abstand von 4 mm dargestellt. Dies wurde durch das Arc Welding Modul in CATIA V5 erreicht. Hierbei wurde jedem Punkt ein eigenes Koordinatensystem zugeteilt, so dass der Nähkopf bei der anschließenden Vernähung stets orthogonal zur Preformoberfläche stand.

Die Abbildung 93 zeigt diese äquidistanten Punkte dargestellt am Beispiel der Naht 1.

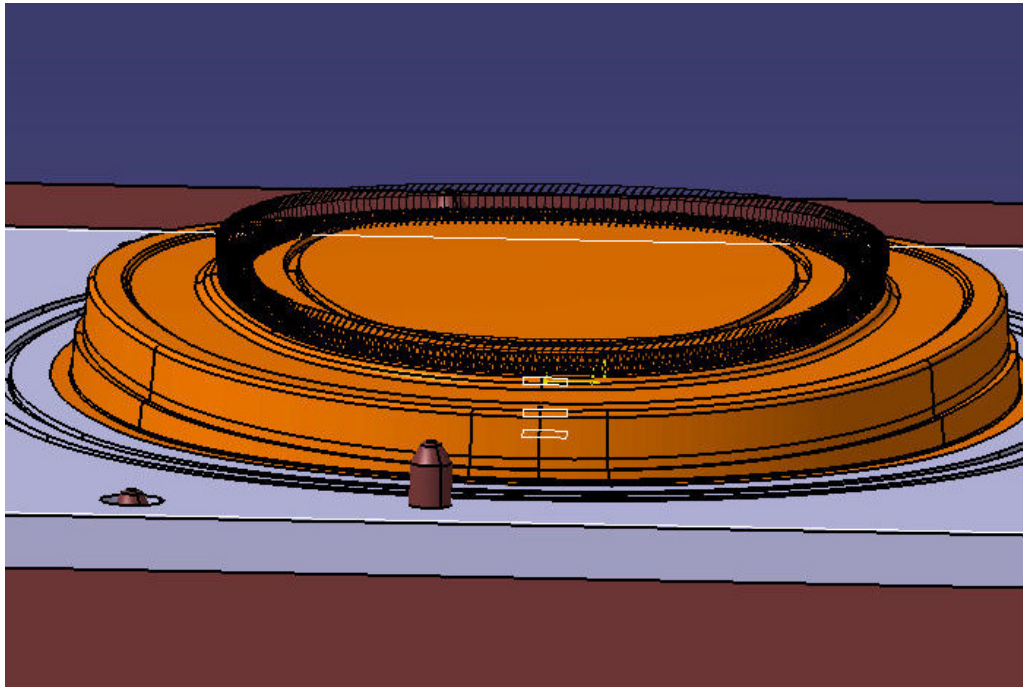


Abbildung 93: Die erzeugten Nahtpunkte auf der Naht 1

Über DELMIA IGRIP kann dann die Nahtbahn vom CAD-Modell direkt an die Nährobotersteuerung übergeben werden. Danach kann über eine Maske die Nähgeschwindigkeit und die Stichlänge eingestellt werden, mit der die Naht abgefahren bzw. vernäht werden soll. Die Abbildung 94 zeigt eine Draufsicht auf die Vernähung der Fensterrahmenpreform und eine Seitenansicht des Nähkopfs mit dem Lasersensor.

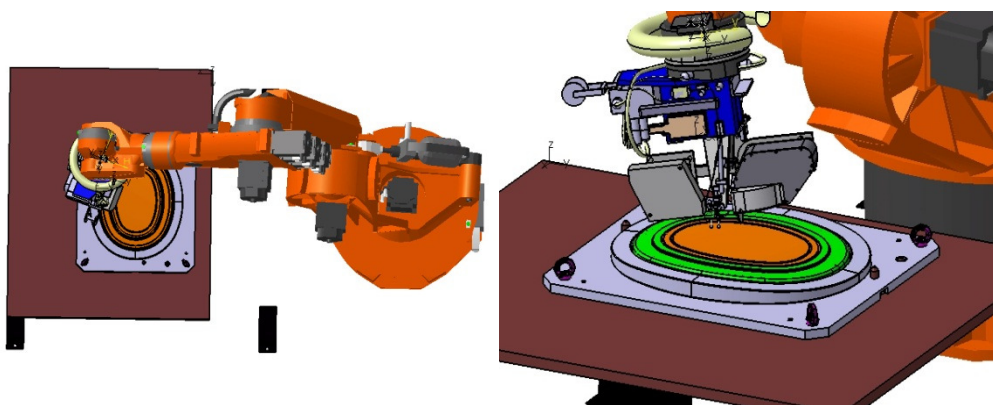


Abbildung 94: Die Vernähung der Fensterrahmenpreform in DELMIA-Umgebung in der Draufsicht (links) und der Seitenansicht (rechts)

Um die optimale Nähgeschwindigkeit für den Prozess zu bestimmen, wurden bei EADS-IW Abteilung LG-CT Nähtests gefahren. Hierbei wurde die maximale

Nähgeschwindigkeit mit den Sensoren in Abhängigkeit der zu vernähenden Lagenstärke bestimmt. Tabelle 5 zeigt diese Ergebnisse.

Nähgeschwindigkeit $V_{\text{näh}}$		Max. Lagenanzahl [Stück]	Max. Nähgutstärke [mm]
[m/s]	[m/min]		
0,01	0,6	8 à 0,57 mm	4,5
0,02	1,2	7 à 0,57 mm	4
0,025	1,5	6 à 0,57 mm	3,4

Tabelle 5: Die maximale Nähgeschwindigkeit des Blindstichnähkopfes in Abhängigkeit der Nähgutstärke

Es kann also gesagt werden, dass eine Nähgeschwindigkeit von 0,6 m/min reproduzierbare Nähte liefert.

Um die Nahtbildung auch an der Fensterrahmenpreform zu gewährleisten, wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt.

Hierfür wurden die im Kapitel 6.1 ermittelten Parameter zugrunde gelegt. Es wurde also mit einer Stichelänge von 12 mm und einem Nähgarn Glas EC 9 34x3 vernäht. Die Nähgeschwindigkeit war die eben erwähnte $V_{\text{Näh}} = 0,6$ m/min.

Da diese Studie zum Ziel hatte zu überprüfen, ob die gewählten Parameter auch in der Praxis anwendbar sind, wurde an den längeren Seiten der ellipsenförmigen Fensterrahmenpreform vernäht (siehe Abbildung 95).

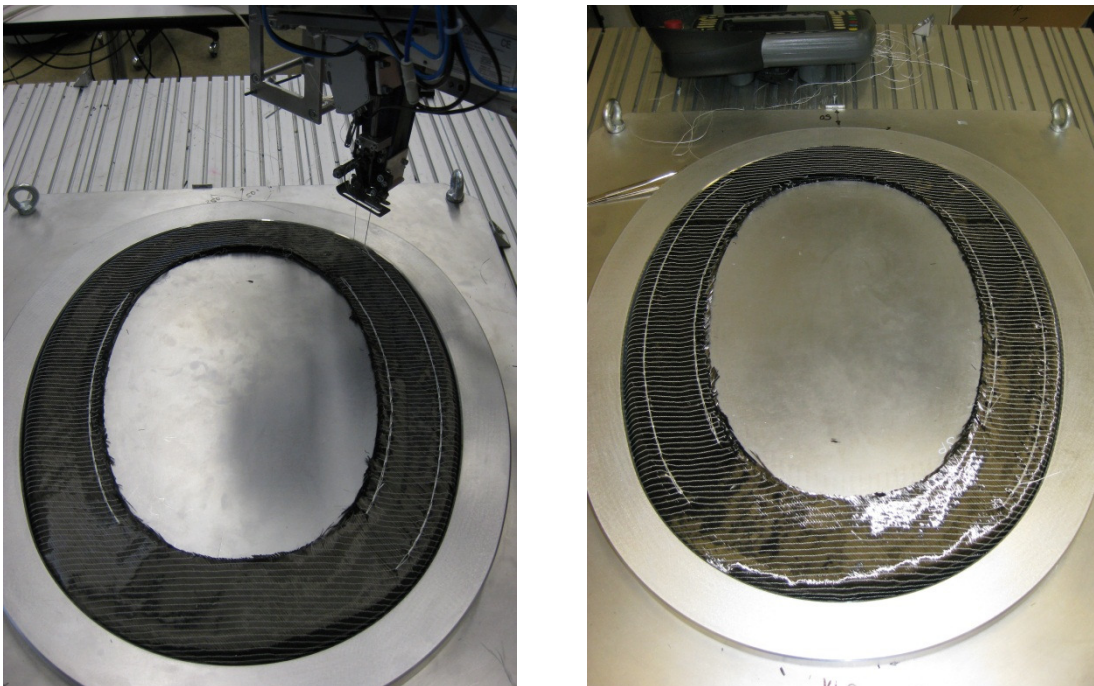


Abbildung 95: Machbarkeitsstudie zur Überprüfung der ermittelten Nähparameter am Demonstratorbauteil

Es konnte damit demonstriert werden, dass die ermittelten Parameter anwendbar sind und das Demonstratorbauteil in dem RTM-Werkzeug vernäht werden kann.

6.5. Untersuchungen zum automatisierten Handhaben von textilen Preforms

Ein weiterer Schritt in Richtung einer industrialisierten Herstellung von Luftfahrtbauteilen ist der Einsatz von Robotern bereits in der Preformfertigung. Ein entscheidendes Kriterium ist die Verwendung von Manipulatoren, die von Industrierobotern geführt werden können.

In der Literatur finden sich hierzu Beispiele. So beschreibt Reiff-Stephan 2005 die Wirkprinzipien von verschiedenen Greifsystemen zur Handhabung von Textilien.

Es kann dabei grundlegend zwischen 3 Wirkprinzipien unterschieden werden:

- dem Halten durch Kraftschluss
- dem Halten durch Stoffschluss und
- dem Halten durch Formschluss

Dem Prinzip des Haltens durch Kraftschluss kann das Klemmen, der Haftsauger, der Niederdruckflächensauger und der Greifer basierend auf dem Bernoulli-Prinzip zugeordnet werden.

Die Gefriergreifer und Adhäsionsfolien bilden die stoffschlüssigen Wirkprinzipien ab und die Nadel-, Kratzgreifer und Klettverschlüsse die formschlüssigen. Die Abbildung 96 fasst dies nochmals zusammen.

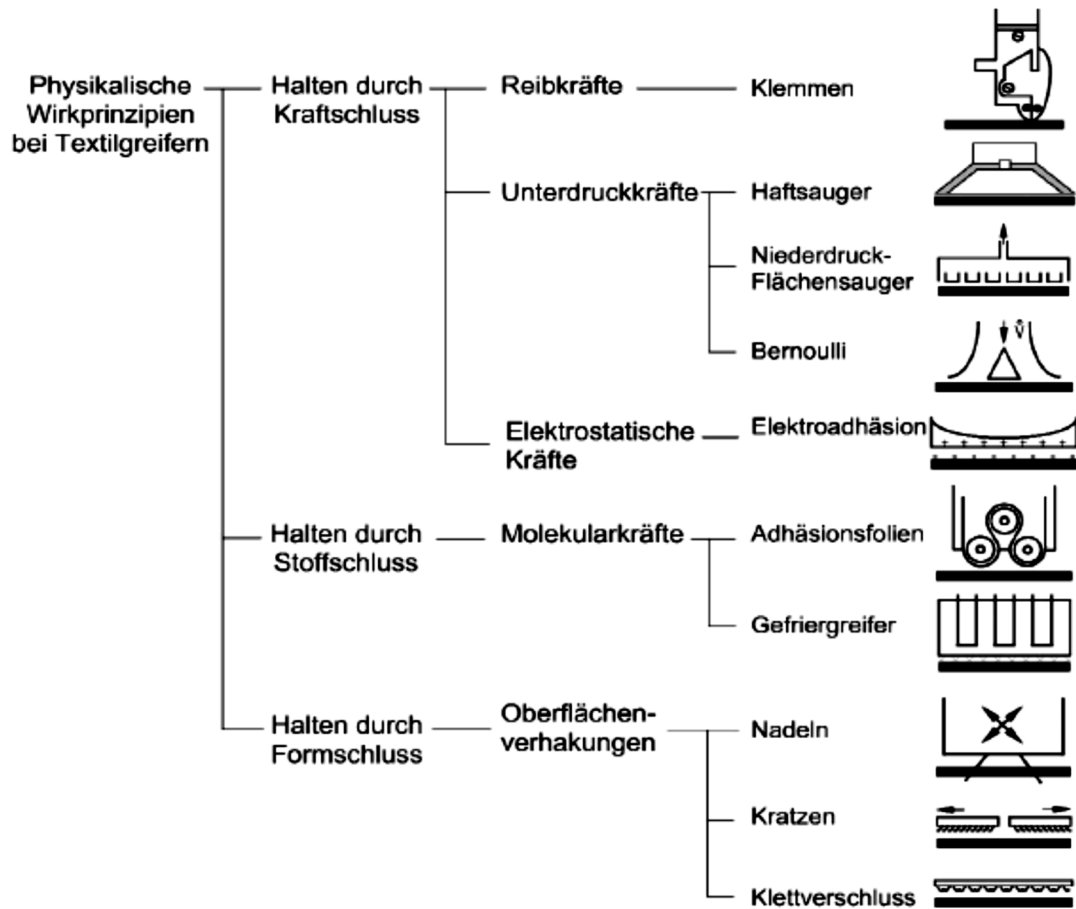


Abbildung 96: Physikalische Wirkprinzipien und Bauformen von Textilgreifern [Reiff-Stephan 2005]

Die Tabelle 6 zeigt eine Bewertung der wichtigsten Greifer für textile Halbzeuge. Diese Tabelle ist teilweise der Literatur entnommen und basiert speziell bei dem Beispiel des Bernoulligreifers auf Experimenten, die bei der Premium AEROTEC GmbH im Center Fertigungssysteme in Varel durchgeführt wurden.

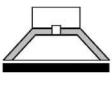

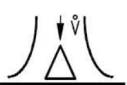

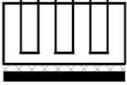
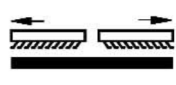
	 Sauggreifer	 Klemmgreifer	 Bernoulli	 Nadelgreifer	 Gefriergreifer	 Kratzengreifer
++ hoch + mittel o gering						
Materialflexibilität	+	+	++	o	o	o
Teileflexibilität	o	o	+	+	++	+
Haltekraft	++	++	++	+	++	+
Schnelligkeit	++	++	++	++	o	+
Robustheit	++	++	++	+	+	+
Unabhängigkeit von den Umgebungseinflüssen	++	++	++	++	+	++

Tabelle 6: Bewertung verschiedener Greifprinzipien

In den Experimenten konnte gezeigt werden, dass die automatisierte Handhabung von trockenen Carbongelegen mit einem Industrieroboter möglich ist. Als Roboter wurde ein KUKA KR150 verwendet.

Die Bernoulli-Elemente wurden kreisförmig auf einem Endeffektor aus WITTE-Profilen angeordnet (siehe Abbildung 97). Die 10 Bernoulli-Elemente haben eine Haltekraft von jeweils 4 N und einen Luftverbrauch von jeweils ca. 100 l / min. Das Carbongelege hatte die Abmessungen 350 mm x 160 mm und es wurden 4 Lagen aufeinander gelegt.

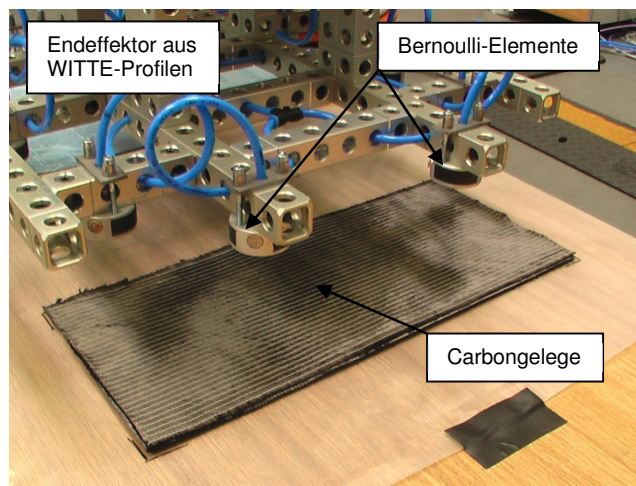


Abbildung 97: Der Endeffektor mit Bernoulli-Elementen und der Versuchsaufbau [Herkt et al. 2009]

Die Bewegung des Roboters wurde so programmiert, dass dieser den Endeffektor über den Gelegestapel verfährt und auf diesen absenkt. Anschließend werden die Bernoulli-Elemente mit Druckluft versorgt und die oberste Carbongelegelage kann vereinzelt werden (siehe Abbildung 98).

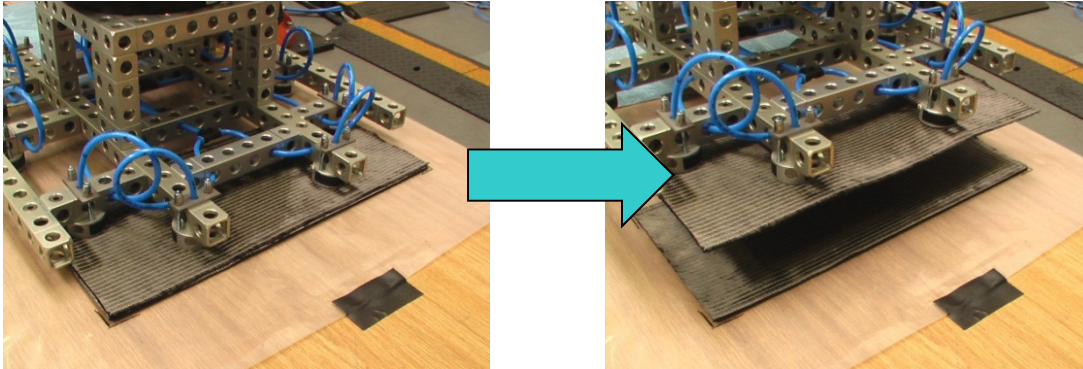


Abbildung 98: Die Aufnahme einer einzelnen Gelegelage durch den Endeffektor [Herkt et al. 2009]

Danach wird der Endeffektor um 180 ° rotiert, um die zweite Lage aufnehmen zu können. Die Experimente wurden mit einer Maximalverfahrensgeschwindigkeit des Roboters von 2 m/s durchgeführt, ohne dass das Gelege dabei zu Schaden kam oder durch den Endeffektor nicht mehr gehalten werden konnte. Für eine dauerhafte Anwendung in einer industrialisierten Fertigung wird allerdings eine Geschwindigkeit von 1 m/s empfohlen.

Die Abbildung 99 zeigt den Endeffektor mit 2 Einzellagen Carbon-Gelege beim Verfahren. Rechts dargestellt ist die Unterseite der einzelnen Gelegelage. Man erkennt sehr gut, dass beim Handhaben keine Schädigung des Carbon-Geleges noch Faserondulationen oder ähnliche unerwünschte Effekte auftreten.

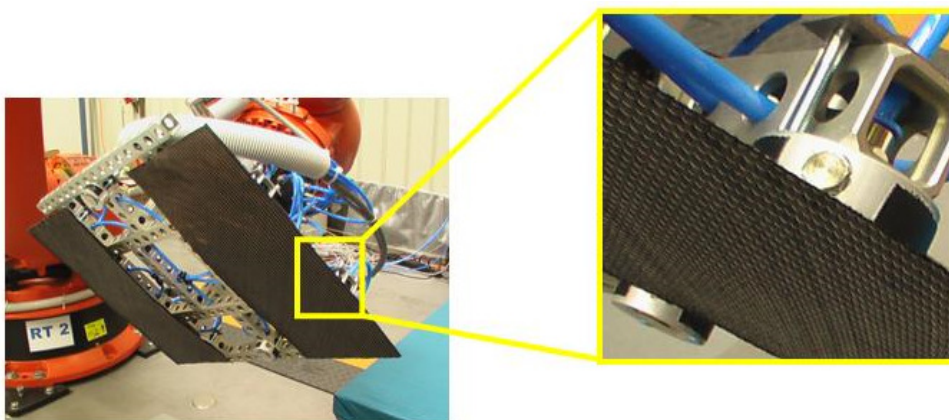


Abbildung 99: Automatisiertes Handhaben von Carbonmultiaxialgelegezuschnitten mit einem Endeffektor mit Bernoulli-Elementen [Herkt et al. 2009]

Durch eine leichte Abänderung des Endeffektors kann eine weitere Handhabungsapplikation realisiert werden. Die Bernoulli-Elemente wurden für eine weitere Experimentenreihe in eine Grundplatte mit Schaumstoffboden integriert (siehe Abbildung 100).

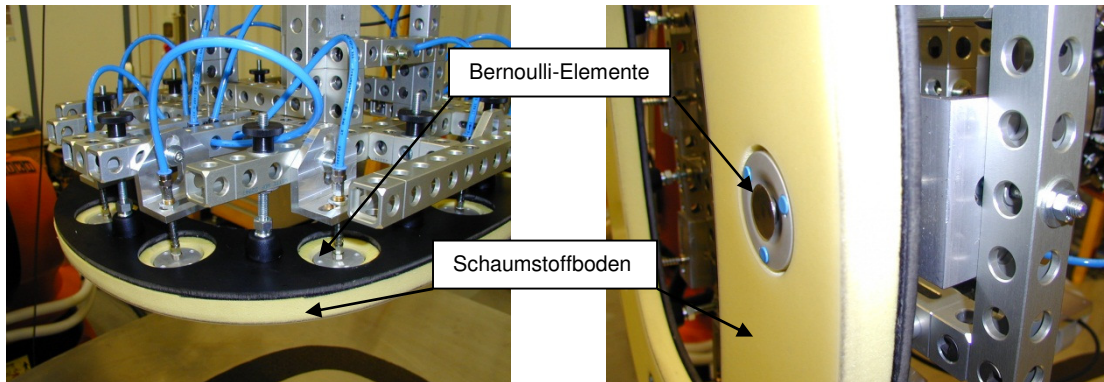


Abbildung 100: Der Endeffektor mit den Bernoulli-Elementen und dem Schaumstoffboden [Herkt et al. 2009]

Die Tests wurden mit einer Fensterrahmenverstärkungsstruktur aus unidirektional aufgebautem Carbonprepreg durchgeführt. Getestet wurden 2 Konfigurationen für die Grundplatte: eine konvex und eine konkav geformte Grundplatte. Mit der konkaven Konfiguration ist es möglich die Prepregpreform auf ebenfalls konkav gekrümmten Preformhaltern aufzunehmen. Bei der konvexen Ausführung kann durch Abänderung des Roboterprogrammes ein „rollendes“ Aufnehmen des Preform realisiert werden. Die Abbildung 101 und 102 zeigen diese beiden Endeffektorkonfigurationen.

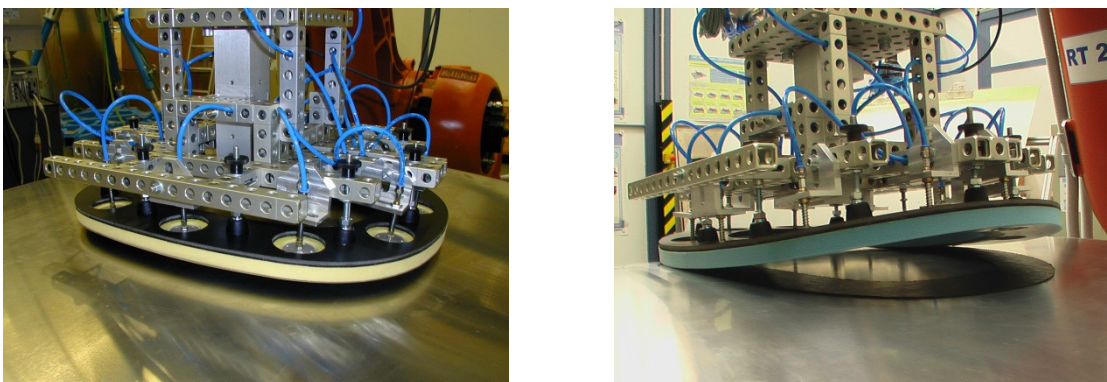


Abbildung 101: Die konkav (links) und konvex gekrümmte (rechts) Endeffektor [Herkt et al. 2009]

Die Tests wurden mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 2 m/s durchgeführt. Die durchschnittliche Verfahrensgeschwindigkeit betrug 0,4 m/s. Diese Geschwindigkeit ist damit die für einen industriellen Einsatz empfohlene.

Nach 100 durchgeführten Testzyklen wurden lediglich leichte Faserverschiebungen von maximal 1 mm bzw. 2° festgestellt.

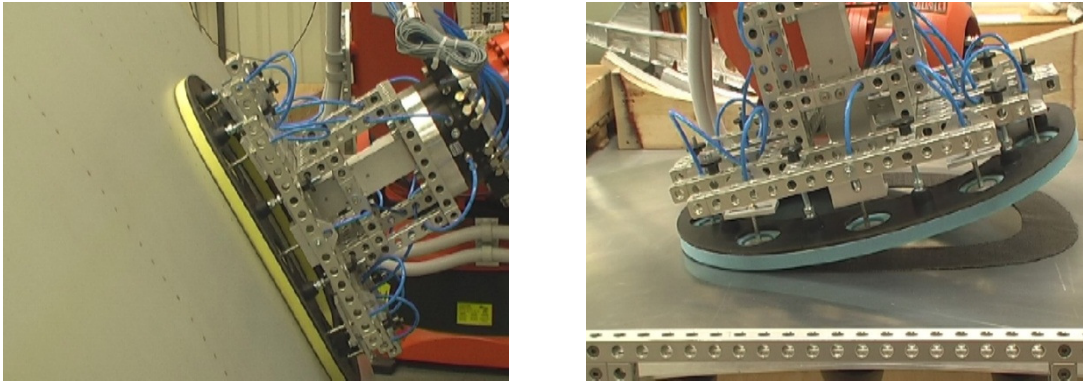


Abbildung 102: Die Ablage der Prepregpreform mit dem konkav (links) und dem konvex gekrümmten Endeffektor [Herkt et al. 2009]

In den Experimenten konnte die Automatisierbarkeit der Handhabung von trockenen Preforms und Prepregs auch für Fensterrahmensubpreforms gezeigt werden.

Aufgrund der erfolgreichen Tests gerade beim Trockengelege ist davon auszugehen, dass die Bernoulli-Elemente ebenfalls für die automatisierte Handhabung von Gesticken geeignet sind.

Mit diesen Ergebnissen kann nun die Prozesskette speziell für die automatisierte Herstellung des A350-Fensterrahmenpreforms -wie in Abbildung 103 gezeigt- dargestellt werden.

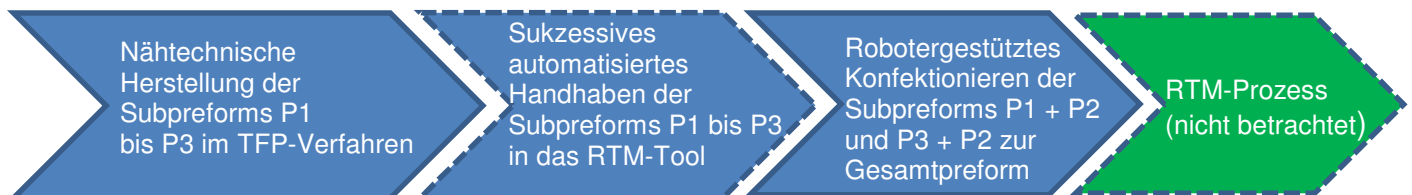


Abbildung 103: Die für die Herstellung des A350-Fensterrahmenpreforms entwickelte Prozesskette

Der erste Prozess in der Kette wird pro Bauteil dreimal durchlaufen, da der A350-Fensterrahmen aus 3 Subpreforms aufgebaut ist. Hierbei wurden die Subpreforms durch Erstellen eines Nähprogrammes auf einer TFP-Anlage

genäht. Diese Subpreforms als Halbzeuge sind Eingangsgröße für den folgenden Prozessschritt. Dieser Schritt ist gestrichelt dargestellt, da dieser zwar entwickelt wurde, aber hier als optional angesehen wird. In jedem Fall (d.h. sowohl bei manueller oder Roboterhandhabung) wird dieser Schritt ebenfalls dreimal ausgeführt. Hierbei kann die Position der einzelnen Preforms entweder fest programmiert werden oder durch den Einsatz einer Digitalkamera flexibel durch den Roboter erkannt werden. Auch die Ablage der Preforms kann entweder durch Bewegungsprogrammierung oder auch durch den Einsatz einer Kamera erfolgen. Im Falle des Kameraeinsatzes erfasst diese die Position der Preforms und die Positionierung des Handhabungskopfes wird dann automatisiert angepasst.

Danach folgt das Konfektionieren mittels Blindstich. Hierbei wurde der Nähprozess -wie in dieser Arbeit dargelegt- mit Sensorikeinsatz (taktile und berührungslos) automatisiert, so dass lediglich die Bahnparameter auf dem RTM-Tool mittels CATIA V5 an die Robotersteuerung übergeben wurden und der Nähprozess danach automatisiert ausgeführt wird. Dieser Schritt wird zweimal ausgeführt, da Subpreform P1 und P2 in einem ersten Schritt vernäht werden und danach Subpreform P3 und P2. Der nachfolgende RTM-Prozess wurde -wie bereits erwähnt- in dieser Arbeit nicht betrachtet. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass ein automatisiertes Einlegen der Preform in ein RTM-Werkzeug mit einem Roboter möglich ist. Die erweiterte ePK des entwickelten Prozesses lässt sich demnach -wie in Abbildung 104 gezeigt- darstellen.

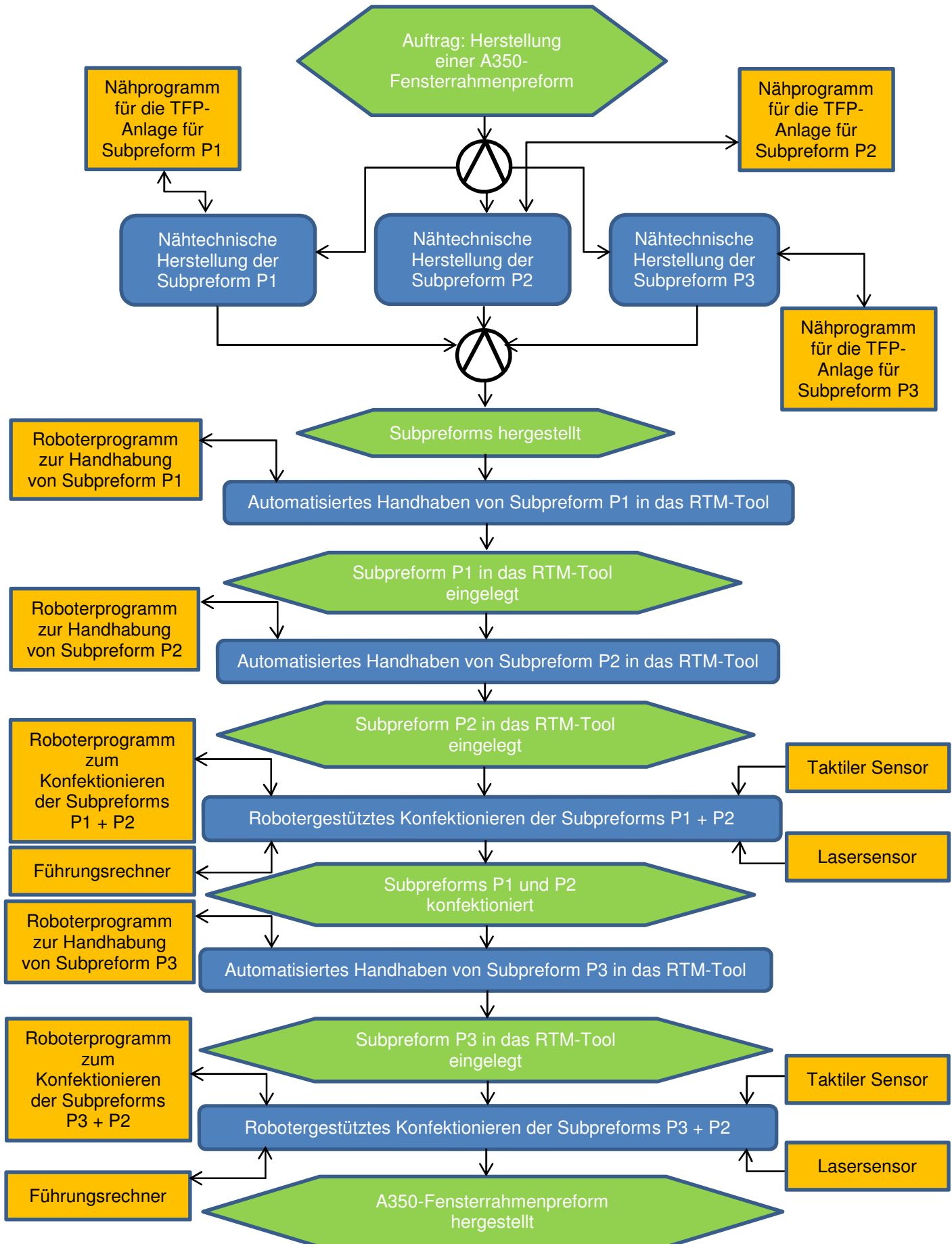


Abbildung 104: Die entwickelte Prozesskette zur Herstellung der A350-Fensterrahmenpreform in der Darstellung als erweiterte ePK

6.6. Automatisierte Vernähung der A350-Fensterrahmenpreform

Nachdem die Parameter verifiziert wurden, wurde ein finaler Testlauf mit der Roboternähanlage und dem Demonstratorbauteil durchgeführt (siehe Abbildung 105).

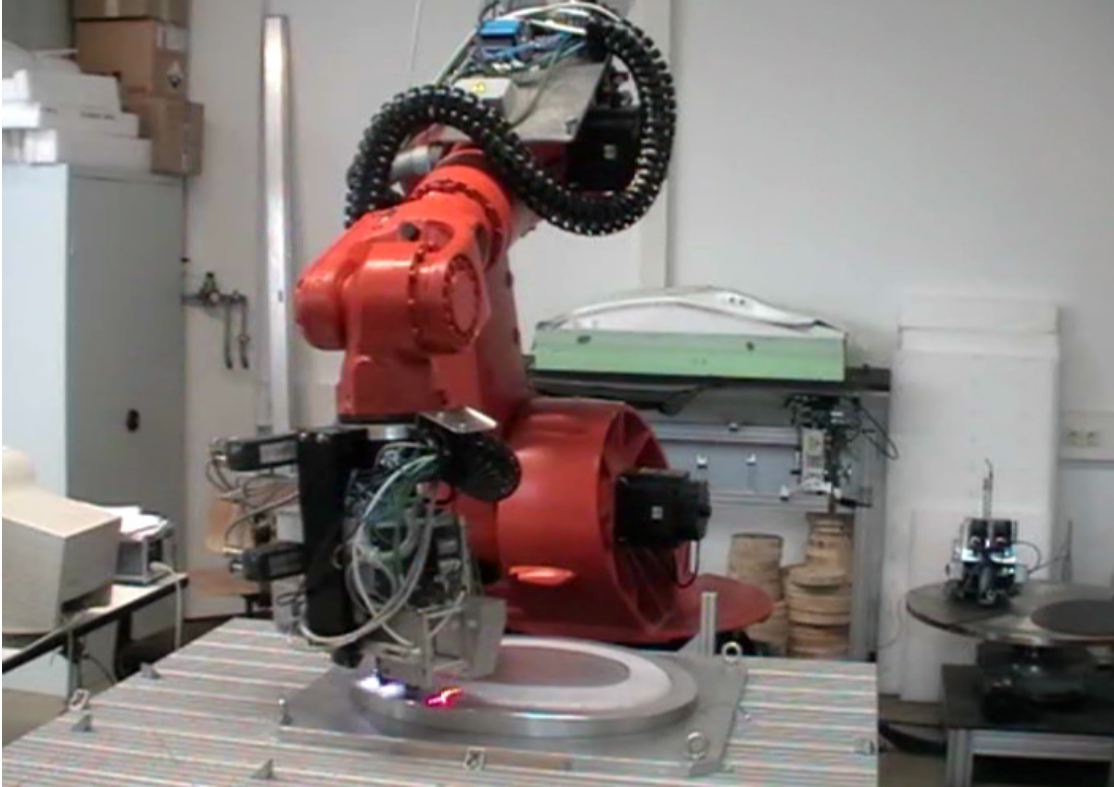


Abbildung 105: Die Roboternähanlage mit dem Demonstratorbauteil

Es wurde wie in den Vorversuchen eine Stichtlänge von 13 mm gewählt. Die Nähgeschwindigkeit betrug auf der gesamten Bahn der Nähte 1 und 2 jeweils 0,6 m/min.

Die Einstichtiefe konnte durch den taktilen Sensor konstant gehalten werden, so dass jeweils nur 2 Preforms miteinander vernäht wurden, ohne dass die jeweils dritte dabei durch die Nadel touchiert wurde. Da in dieser speziellen Applikation es keine Kante zwischen 2 Carbonhalbzeugen gab, konnte der Lasersensor keine Daten aufnehmen. Die Abbildungen 106 und 107 zeigen den Nähkopf bei der Vernähung. Auf Abbildung 106 ist deutlich der Laserscan des Lasersensors zu sehen. Es wird ebenfalls ersichtlich, dass der Sensor regelrecht zwischen der Preform und dem Preformhalter abtaucht und somit keine Kante detektieren kann.

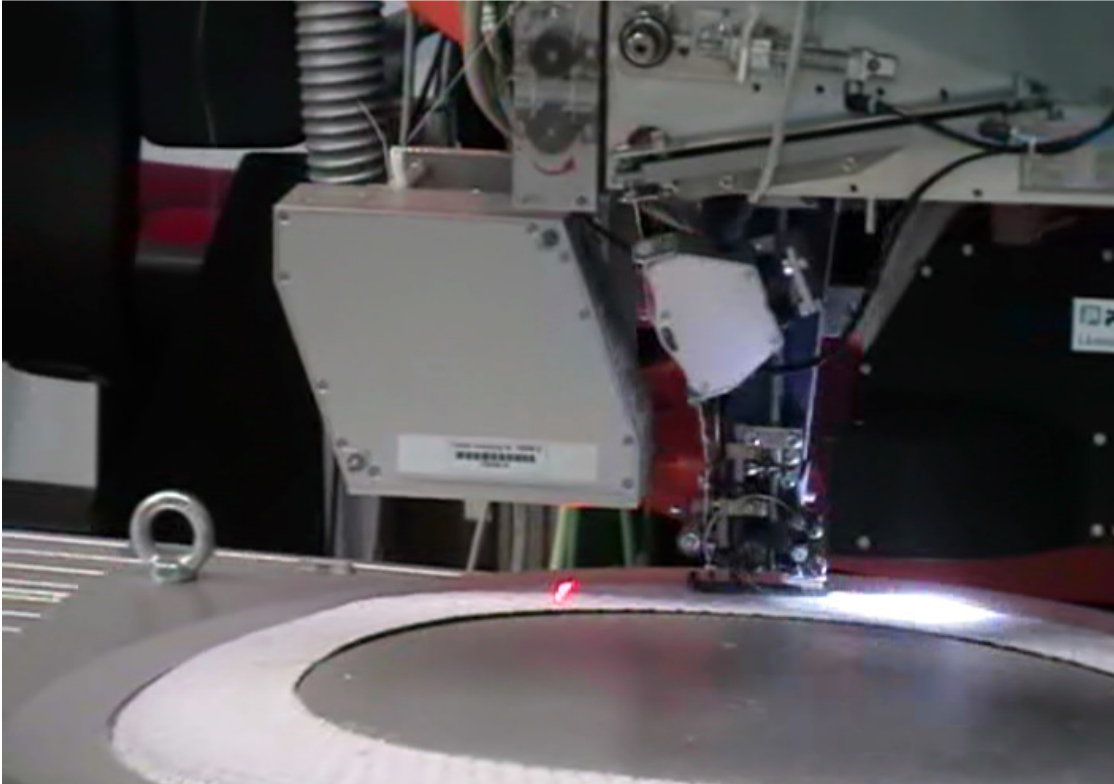


Abbildung 106: Praxistest der Roboternähanlage auf dem größeren Radius der Fensterellipse



Abbildung 107: Praxistest der Roboternähanlage auf dem kleineren Radius der Fensterellipse

Es konnte also gezeigt werden, dass für die Vernähung des A350-Fensterrahmenpreforms lediglich der taktile Sensor benötigt wird. Der

Laserscanner erkennt die Kante zwischen dem Preformhalter und der Preform nicht.

6.7. Folgerungen für den Einsatz der Nähtechnik für Fügeprozesse bei der A350

Bei den Nähtests konnte gezeigt werden, dass die Subpreforms sehr genau miteinander vernäht werden konnten. Die Programmierung des Roboters wurde so gewählt, dass die untere Lage der beiden zu vernähenden Preforms gerade noch von der Bogennadel durchstochen wird.

Dies gelang bei über 95 % der Stiche. Lediglich bei 5 % der Stiche war die unterste Lage nicht von der Bogennadel durchstochen worden.

Bei der lateralen Führung des Laserkopfes ergab sich eine Toleranz von 0,65 mm (siehe Kapitel 4.2.2.).

Airbus fordert bei der A350 eine Positioniergenauigkeit der Bauteile im Rumpf von $\pm 2,5$ mm absolut und $\pm 1,5$ mm relativ.

Daraus wird ersichtlich, dass die automatisierte Nähtechnik für eine industrielle Fertigung geeignet ist.

6.8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In diesem Kapitel wird in einer Fertigungsstudie der zeitliche Aufwand für die Herstellung der Fensterrahmenpreforms dargestellt. Dieser Studie werden die aktuell geplanten Fertigungszahlen für die A350 (siehe Abbildung 108) zugrunde gelegt. Desweiteren werden die Kosten für eine Fensterrahmenpreform daraus abgeleitet abgeschätzt.



Abbildung 108: Die A350 in Ihrer aktuellen Konfiguration (Quelle: Airbus)

Die Anzahl der Fensterrahmen beläuft sich auf 72 Stück pro A350. Bei einer planerischen Liefermenge von 6 Flugzeugen pro Monat ergibt sich eine Anzahl von 432 Fensterrahmen, welche pro Monat gefertigt werden müssen.

Weiterhin wird von in dieser Betrachtung von einem 3-Schicht-Betrieb und 24 Arbeitstagen pro Monat ausgegangen. Es wird außerdem eine Maschinenauslastung von 85 % angenommen.

Die zu fertigenden Fensterrahmen pro Arbeitstag lassen sich wie folgt berechnen:

$$\frac{\text{Fensterrahmen}}{\text{Arbeitstag}} = \frac{\frac{\text{Fensterrahmen}}{\text{Monat}}}{\frac{\text{Arbeitstage}}{\text{Monat}}} \quad (6.1)$$

Setzt man also in (6.1) die berechneten 432 Fensterrahmen pro Monat und 24 Arbeitstage pro Monat ein so erhält man eine Anzahl von 18 Fensterrahmen pro Arbeitstag. Da von einem 3-Schicht-Betrieb ausgegangen wird, erhält man pro Schicht ein Fertigungsvolumen von 6 Fensterrahmen.

Pro Schicht wird mit 8 Stunden gerechnet. Daraus folgt eine Fertigungszeit pro Fensterrahmenpreform von 1,33 h.

Legt man die planerische Liefermenge von 3 A/C pro Monat zu Grunde, so erhält man eine Fertigungszeit pro Fensterrahmen von 2,66 h.

Bei 27 zu fertigenden Fensterrahmen pro Tag beträgt die Fertigungszeit pro Rahmen 0,88 h und bei 39 Rahmen dementsprechend 0,62 h.

Zusammenfassend können die Ausgangsdaten daher wie folgt dargestellt werden:

Zielbauteil:	Fensterrahmenpreform für die A350
Fensterrahmen pro A/C:	72 Stück
Fensterrahmenvarianten pro A/C:	3 Familien zylindrischer Bereich beidseitig (52 Stück/Familie 1) sphärischer Bereich je Seite (10 Stück / Familie 2 oder 3)
Planerische Liefermenge:	3 A/C / Monat, 6 A/C / Monat, 9 A/C / Monat bzw. 13 A/C / Monat
Fensterrahmen pro Monat:	216 Stück, 432 Stück, 648 Stück bzw. 936 Stück
Arbeitstage:	24 Tage / 3 Schichten
Fensterrahmen pro Tag:	9 Stück, 18 Stück, 27 Stück bzw. 39 Stück

Bei einer konventionellen Kostenschätzung werden i.a. folgende Kostenarten berücksichtigt [Brand 2002]:

- Materialkosten
- Personalkosten für die Bauteilfertigung
- Werkzeugkosten
- Investitionskosten
 - Maschinenanschaffung
 - Einmalige Raumkosten
 - Personalschulung
- Materialqualifikation

Die Materialkosten für den verwendeten Carbon-Roving HTS 12k, 800 tex der Firma Tenax wird ein Preis von ca. 30 EUR pro kg veranschlagt.

Die Kosten für das Glasnähgarn EC 9 34 x 3 betragen nach Angaben der Firma Vitrexspa ca. 5 EUR pro kg.

Das Glasnähgarn hat einen Titer von 34 tex x 3. Daraus ergibt sich demnach ein Wert von 102 g / 1000m. Aus diesem Grunde werden diese Kosten in der weiteren Betrachtung vernachlässigt.

Der Glasstickgrund hat einen Preis von ca. 3,5 EUR pro m².

Die in dieser Arbeit durchgeführten Fertigungsversuche wurden mit einer TFP-Anlage der Firma KSL durchgeführt. Diese Anlage verfügt lediglich über einen Stickkopf, mit dem die Carbonrovings verstickt wurden. Die Anschaffungskosten einer solchen Anlage belaufen sich auf ca. 300.000 EUR. Sieht man sich die erzielten Fertigungszeiten für die 3 Subpreforms an, so wird folgendes deutlich:

Fertigungszeit für Subpreform 1: ca. 2h 10 min.

Fertigungszeit für Subpreform 2: ca. 16 h (!)

Fertigungszeit für Subpreform 3: ca. 1h 50 min.

Man sieht deutlich, dass der längste Fertigungszyklus für Subpreform 2 benötigt wird. Dies ist mit den hohen Rüstzeiten bei der Herstellung der Subpreform 2 zu erklären, da es hierbei oftmals zu Faden- oder Nadelbrüchen während der Vernähung kam.

Bedenkt man dabei, dass pro Fensterrahmenpreform ein Zeitfenster von 1,33 h vorgesehen ist, so würde dies eine nicht unerhebliche Investition bedeuten.

Eine interessante Alternative bietet hier die Firma Tajima. Bei der Mehrkopfanlage dieses Herstellers wird der Stickkopf nur wenig verfahren. Die Hauptverfahrbewegung wird vom Stickgrund durchgeführt.

Die Abbildung 109 zeigt eine solche Stickmaschine in der 2-Kopf-Ausführung. Diese Anlage würde ca. 180.000 EUR kosten.



Abbildung 109: Eine Stickmaschine der Firma Tajima in der 2-Kopf-Ausführung (Quelle: Tajima)

Tajima gibt an, dass pro Kopf ca. 1 kg Fasermaterial pro Stunde verarbeitet werden kann. Das Gewicht einer Fensterrahmenpreform beträgt 1420 g inklusive des Stickgrundes und der Nähfäden. Zieht man für den Stickgrund und die Nähfäden nochmals 200 g ab, so erhält man pro Preform ein Carbonegewicht von ca. 1220 g.

Das bedeutet also, dass alle 1,22 Stunden die 3 Subpreforms gefertigt sind. Geht man nun von einer Stickmaschine in 2-Kopf-Ausführung aus, so erhält man damit alle 1,22 Stunden Preforms für 2 komplette Fensterrahmen. Die Vernähung der Preforms durch die Roboternähanlage dauert bei einer

Nähgeschwindigkeit von 600 mm / min und einer Nahtlänge der Naht 1 von ca. 1210 mm und bei der Naht 2 von ca. 1530 mm ca. 2 min bzw. ca. 2,6 min.

Die Kosten der Robotiknähanlage belaufen sich bei Verwendung eines KUKA KR 150-2 (inklusive Werkzeugwechsler, Technologiepakete und Ventilinsel) auf ca. 70.000 EUR für den Roboter inklusive Steuerung. Der Blindstichnähkopf kostet ca. 30.000 EUR. Die Investition des Lasersensors muss in dieser speziellen Applikation nicht getätigt werden, wie in Kapitel 6.5 gezeigt wurde. Die Kosten für den taktilen Sensor sind zu vernachlässigen.

Die Kosten für die Preformstation inklusive Preformrahmen können berechnet werden, in dem die Preise für das benötigte Material und die Fertigung der Teile addiert werden.

Für die Preformstation ist ein Block mit den Abmessungen 700 mm x 830 mm x 100 mm und für den Preformrahmen ein Block mit den Abmessungen 690 mm x 560 mm x 40 mm nötig. Bei einer Fertigung dieser Teile aus Aluminium benötigt man insgesamt 197,37 kg Aluminium, wenn man mit einer Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ rechnet. Bei einem Preis von ca. 5 EUR / kg kostet das Material für einen Preformstation und einen Preformrahmen damit ca. 987 EUR. Nach Rücksprache mit der Fertigung im Premium AEROTEC Werk Varel Bereich Fertigungssysteme beträgt die Dauer für die Aktualisierung des Fräsprogrammes ca. 4 h und die Bearbeitung ca. 25 h. Legt man nun einen Stundensatz von ca. 65 EUR für die Programmierung und ca. 160 EUR für die Fräsmaschine zugrunde, so erhält man Kosten in Höhe von 4260 EUR für eine Preformstation und einen Preformrahmen. Diese Kosten sind aber aufgrund der hohen Investitionskosten für Anlagen und Gerätschaften zu vernachlässigen.

Wenn man nun eine Amortisationsdauer für die angeschafften Anlagen von ca. 3 Jahre ansetzt, dann müssen also die Kosten für die Stickeranlage und die Roboternähanlage von insgesamt 280.000 EUR auf 15.542 Fensterrahmenpreforms umgelegt werden. Dies entspricht einem Betrag von ca. 18 EUR der umgelegten Investitionskosten pro Fensterrahmenpreform.

Die anfallenden Arbeitskosten pro Arbeitstag betragen bei einem angenommenen Stundenlohn von ca. 80 EUR belaufen sich bei einem 3-Schicht-Betrieb auf ca.

2500 EUR pro Arbeitstag inklusive Nachtzulagen [Meyer 2008]. Damit erhält man also Arbeitskosten in Höhe von ca. 138 EUR pro Preform.

Die Materialkosten berechnen sich pro Fensterrahmenpreform aus den Kosten für die Carbonfasern addiert mit den Kosten des Stickgrundes. Die Abmessungen des Fensterrahmens sind in Abbildung 110 dargestellt. Für die 3 Subpreforms wird also eine Stickgrundfläche von ca. 0,75 m² benötigt. Es wird hierbei also mit 1 m² Glasstickgrund für eine komplette Fensterrahmenpreform gerechnet, um dem Verschnitt gerecht zu werden.

Für eine komplette Fensterrahmenpreform benötigt man ca. 1,22 kg Carbonfasermaterial. Es entstehen somit Materialkosten von ca. 40 EUR pro Fensterrahmenpreform.

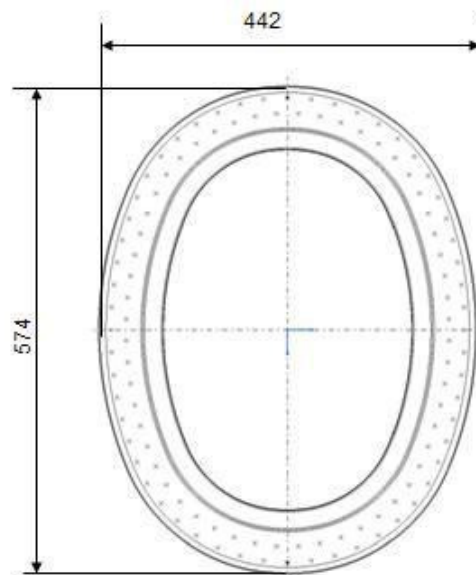


Abbildung 110: Die Abmessungen des A350 Fensterrahmens in mm

Die gesamten Kosten für einen Fensterrahmen belaufen sich demnach auf 197 EUR pro Fensterrahmenpreform. In der Abbildung **111** sind diese Gesamtkosten und die Einzelkosten dargestellt.

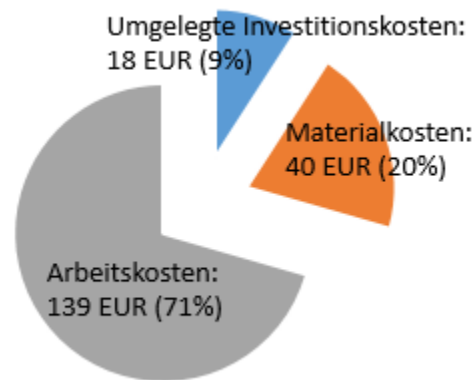


Abbildung 111: Die Gesamtkosten für eine Fensterrahmenpreform für eine angenommene Liefermenge von 6 A350 pro Monat

Es fällt auf, dass die Arbeitskosten mit 77 % der größte Kostentreiber für die Fensterrahmenpreforms sind.

Bei der Berechnung wurde allerdings angenommen, dass ein Mitarbeiter dauerhaft bei den Anlagen steht. Diese Kosten können deutlich verringert werden, wenn es gelingt Prozesse zu parallelisieren und den Mitarbeiter flexibel einzusetzen, da es sich bei den hier zugrunde liegenden Zeiten zum größten Teil um Überwachungszeiten handelt.

Betrachtet man nun den Fall von 3 A/C pro Monat, so müssen die Investitionskosten der Roboternähanlage und der Stickanlage auf 7771 Fensterrahmenpreforms umgelegt werden. Daraus ergibt sich ein umgelegter Invest von 36 EUR pro Fensterrahmen.

Die Kosten für das verbrauchte Material pro Fensterrahmenpreform bleiben gleich bei einem Satz von 40 EUR.

Die Arbeitskosten erhöhen sich auf 278 EUR pro Fensterahmen.

Es ergibt sich also bei einer planerischen Liefermenge von 3 A/C pro Monat ein Stückpreis pro Fensterrahmenpreform von 354 EUR pro Fensterrahmen.

Die Abbildung 112 fasst diese Ergebnisse zusammen.

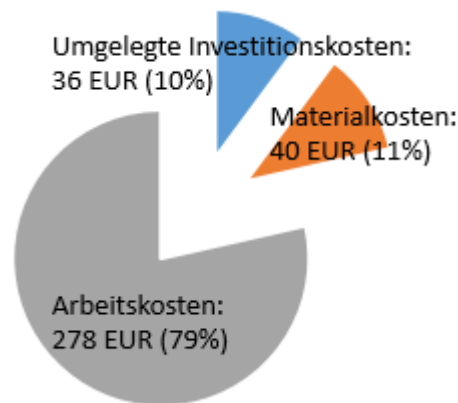


Abbildung 112: Die Gesamtkosten für eine Fensterrahmenpreform für eine angenommene Liefermenge von 3 A350 pro Monat

Bei einer Fertigung von 27 Fensterrahmen pro Tag (Fertigungszeit damit: 0,88 h pro Stück) sind die bisher angenommenen Investitionen ausreichend, da die Tajima-2-Kopfanlage alle 1,22 h 2 komplette Fensterrahmenpreforms liefert, d.h. die effektive Fertigungszeit pro Komplettpreform beträgt also 0,61 h. Es wurde bereits gezeigt, dass in diesem Falle alle 0,88 h eine komplette Fensterrahmenpreform fertig sein muss.

Die Materialkosten pro Rahmen sind mit 40 EUR gleich bleibend.

Die Investitionskosten müssen nun auf 23313 Fensterrahmenpreforms umgelegt werden. Damit ergibt sich ein umgelegter Invest von 12 EUR.

Die Arbeitskosten pro Rahmen sind dann ca. 93 EUR. Die Gesamtkosten pro Fensterrahmenpreform sind damit 145 EUR.

Die Abbildung 113 fasst diese Kosten zusammen.

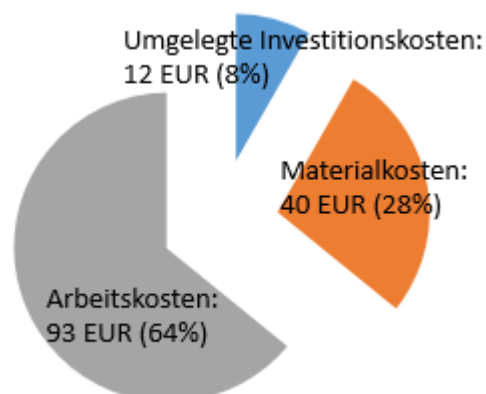


Abbildung 113: Die Gesamtkosten für eine Fensterrahmenpreform für eine angenommene Liefermenge von 9 A350 pro Monat

Bei der Fertigung von 39 Fensterrahmen pro Tag ergibt sich ein anderes Bild der Investitionsplanung. Da die Vorgabezeit pro Komplettpreform bei 0,61 h liegt, reicht eine Tajima-2-Kopf-Nähanlage nicht aus. Ebenso muss eine zweite Roboternähanlage beschafft werden. Die Gesamtinvestitionskosten belaufen sich demnach in diesem Falle auf 560.000 EUR. Die Kosten für die zusätzlichen Preformstationen werden wiederum vernachlässigt.

Legt man diesen Invest auf 33696 Fensterrahmen um, so erhält man einen Invest von ca. 17 EUR pro Fensterrahmen.

Die Materialkosten bleiben identisch auf 40 EUR pro Fensterrahmen.

Bei den Arbeitskosten muss hierbei aufgrund der Verdoppelung des Maschinenparks auch mit doppeltem Personaleinsatz gerechnet werden. Es ergeben sich demnach Arbeitskosten von ca. 128 EUR pro Fensterrahmen.

Die Herstellkosten pro Preform liegen damit bei 185 EUR.

Dies ist in Abbildung 114 nochmals zusammengefasst dargestellt.

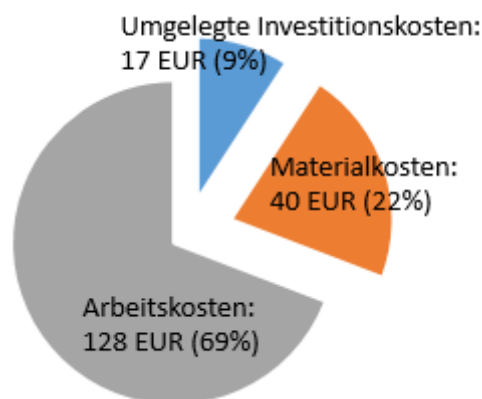


Abbildung 114: Die Gesamtkosten für eine Fensterrahmenpreform für eine angenommene Liefermenge von 13 A350 pro Monat

Abschließend können diese Kostenbetrachtungen nun mit der manuellen Fertigung des Fensterrahmens verglichen werden. Alternativ zur Vernähung der einzelnen Subpreforms könnten diese auch mit Hilfe von Bindervlies zur Gesamtpreform gefügt werden. Hierbei könnte z.B. ein auf Polyamidbasis hergestelltes Bindervlies verwendet werden. Dieses Bindervlies müsste dann 2mal zugeschnitten werden, um die Gesamtpreform aus den 3 Subpreforms durch 2 Fügeschritte herzustellen. Ein Zuschneiden des Bindervlieses auf die Geometrie der Subpreforms dauert ca. 10 min. Das Aktivieren des Binders (z.B. durch ein Industriebügeleisen, welches kostenmäßig vernachlässigt werden

kann) und das Fügen zweier Subpreforms kann ebenfalls mit ca. 10 min veranschlagt werden. Daraus ergibt sich eine Fertigungszeit für ein manuelles Fügen der Fensterrahmenpreform von ca. 40 min. Da bei der Analyse der Kosten für die robotergestützte Lösung der Hauptteil der Arbeiten überwachender Natur war, kann die manuelle Herstellung der Preform hauptzeitparallel zur Herstellung der Subpreforms erfolgen und somit entstehen keine weiteren Kosten. Die Vorgabezeit von 0,61 h für das Szenario von Fertigungsrate 13 A350 pro Monat liegt mit etwas über 36 min knapp unter der Fertigungszeit von ca. 40 min. Die Verwendung von pulverförmigem Binder könnte die Fertigungszeit dementsprechend verringern, da der zeitaufwändige Zuschnitt des Bindervlieses entfielen.

Betrachtet man nun die Kosten für die manuelle Fertigung, so entfällt die Anschaffung der Roboternähanlage in Höhe von ca. 100.000 EUR. Die Materialkosten pro Fensterrahmen bleiben denen bei der robotergestützten Lösung gleich. Auch die Arbeitskosten ändern sich nicht, da von einem hauptzeitparallelen Arbeiten ausgegangen werden kann.

Somit müssen also lediglich die Kosten für die Stickanlage in Höhe von ca. 180.000 EUR auf die Anzahl der Fensterrahmen im jeweiligen Liefermengenszenario umgelegt werden:

Für 3 A/C pro Monat (entspricht 7771 Fensterrahmen):	ca. 23 EUR
Für 6 A/C pro Monat (entspricht 15542 Fensterrahmen):	ca. 12 EUR
Für 9 A/C pro Monat (entspricht 23313 Fensterrahmen):	ca. 8 EUR
Für 13 A/C pro Monat (entspricht 33696 Fensterrahmen):	ca. 11 EUR

Damit ergeben sich für die 4 betrachteten Liefermengenszenarien Kosten in Höhe von 341 EUR bei 3 A/C pro Monat, von 191 EUR bei 6 A/C pro Monat, von 141 EUR bei 9 A/C pro Monat und von 179 EUR bei 13 A/C pro Monat.

Die Abbildung 115 stellt die Stückkosten nochmals in Abhängigkeit der Liefermengen an Flugzeugen dar.

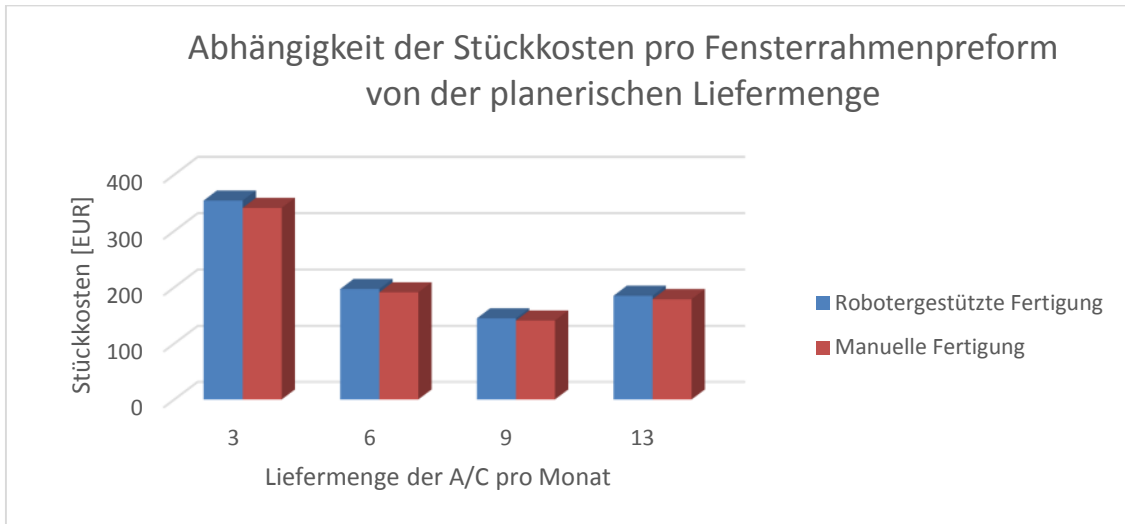


Abbildung 115: Darstellung der Stückkosten pro Fensterrahmenpreform in Abhängigkeit der monatlichen planerischen Liefermenge an Flugzeugen

Man sieht deutlich den Trend, dass mit steigender Flugzeugzahl von 3 über 6 nach 9 Flugzeugen pro Monat der Stückpreis sinkt. Dieser steigt bei 13 A350 pro Monat wieder leicht an, was mit den erhöhten Investitionskosten zusammenhängt. Es wird auch ersichtlich, dass die Kosten pro Fensterrahmen bei der manuellen Fertigung etwas niedriger als bei der robotergestützten sind. Dennoch ist der Einsatz der Roboternähanlage zu empfehlen, da bei den Kostenbetrachtungen keine Ausschussraten berücksichtigt wurden. Es ist zu erwarten, dass die Ausschussrate bei manueller Fertigung deutlich höher ist als bei der robotergestützten.

Diese Stückkosten können noch reduziert werden, da die Maschinen nicht voll ausgelastet sind.

Auch eine Beschleunigung der Fertigungszeit der Tajima-2-Kopf-Nähanlage würde den Invest und damit die Stückkosten senken.

Betrachtet man die entwickelten Prozessschritte der Kette einzeln und wertet deren Aufwand und Kosten, so stellt sich das Ergebnis wie folgt dar.

Der erste Prozessschritt „*Nähtechnische Herstellung der Subpreforms P1 bis P3 im TFP-Verfahren*“ hat eine reine Prozesszeit von 1,22 h, um die Subpreforms P1 bis P3 herzustellen. Selbst wenn angenommen wird, dass ein Mitarbeiter während der gesamten Zeit den Prozess überwacht, so ergeben sich bei einem Stundenlohn von 80 EUR Lohnkosten in Höhe von ca. 98 EUR pro Fensterrahmenpreform, wenn von einer Fertigung mit einer Stickmaschine in 1-

Kopf-Ausfertigung ausgegangen wird. Bei Verwendung einer doppelköpfigen Stickmaschine würden die Lohnkosten pro Fensterrahmenpreform auf ca. 49 EUR dementsprechend halbiert werden.

Der zweite Schritt „*Sukzessives automatisiertes Handhaben der Subpreforms P1 bis P3 in das RTM-Tool*“ kann kostentechnisch wie folgt abgeschätzt werden. In den experimentellen Untersuchungen zum Handhaben der Subpreforms mittels Industrieroboter wurde eine Verfahrgeschwindigkeit von 0,4 m/s ermittelt. Nimmt man nun an, dass die einzelnen Subpreforms vom Roboter aufgenommen und in das Tool eingelegt werden müssen, so ergibt sich eine Prozesszeit vom Aufnehmen der Preform bis zur Ablage im Tool von ca. 30 s pro Subpreform. Selbst unter der Annahme, dass ein Mitarbeiter beim manuellen Platzieren des Preformhalters ca. 2 min benötigt, ergibt sich für diesen Prozessschritt eine Prozesszeit von ca. 5,5 min (Handhabung von 3 Subpreforms à 30 s und zweimaliges Positionieren des Preformhalters durch einen Mitarbeiter). Die Arbeitskosten hierfür liegen dann bei ca. 7 EUR.

Im letzten Prozessschritt „*Robotergestütztes Konfektionieren der Subpreforms P1 + P2 und P3 + P2 zur Gesamtpreform*“ beträgt die Zeit, um Naht 1 und Naht 2 auszuführen ca. 4,6 min, was Lohnkosten in Höhe von ca. 6 EUR zur Folge hätte.

Damit konnte gezeigt werden, dass die höchsten Kosten -wie erwartet- bei der Herstellung der 3 Subpreforms anfallen.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein neuer Ansatz vorgestellt, mit dem es möglich ist, Preforms wirtschaftlich zu vernähen.

Hierzu waren diverse Zwischenschritte erforderlich. Durch die Ausstattung eines Industrieroboters mit einem Nähkopf konnte ein hoher Automatisierungsgrad erreicht werden. Damit ein Roboter eigenintelligent agieren kann, besteht eine Möglichkeit darin, diesen mit Sensorik auszustatten. In Grundlagenuntersuchungen wurde die Machbarkeit einer berührungslosen Kantendetektion an Carbonhalbzeugen dargestellt. Es zeigte sich, dass Kohlenstofffaserhalbzeuge ihre maximale Reflexion im roten Bereich des Farbspektrums aufweisen. Daher wurde der anschließend in der Demonstratoranlage verwendete Lasersensor in Kooperation mit der Technischen Universität Wien in diesem Farbbereich gefahren. Es wurden die Verfahren Model-Fitting, Local-Weighted-Voting und Gradientenakkumulation zur Erkennung der Kante zwischen 2 Carbonhalbzeugen miteinander kombiniert. Es konnte gezeigt werden, dass die Kante in 99,3 % der Fälle erkannt werden konnte, wenn die Abweichung 12 Pixeln entsprach, was einer Abweichung von 0,65 mm entspricht.

Außerdem wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Linz die Möglichkeit der taktilen Regelung des Nähkopfes untersucht. Hierbei wurde eine Anpresskraft auf das zu vernähende Textil von 2 N angenommen. Diese wurde über der gesamten Nahtbahn konstant gehalten, so dass der Roboter in der Lage war, selbst Hindernisse auf der Nahtbahn, wie z.B. Falten durch eine Korrektur der Bewegung in der Z-Richtung eigenintelligent auszugleichen.

Die Nähtests an den Fensterrahmenausschnitten zeigten deutlich, dass aus technologischer und ökonomischer Sicht eindeutig, dass das Glasnähgarn EC 9 34x3 das zu präferierende Garn darstellt.

Damit der Nähprozess robust und prozesssicher ablaufen kann, wurde der Blindstichnähkopf adaptiert. Von besonderer Bedeutung waren hierbei die Ausbildung des Fadendreiecks bei der Nahtbildung und das Zusammenspiel von Greifer und Nadel.

Des Weiteren konnte auch Verbesserungspotenzial in der Herstellung der Preforms dargestellt werden. So liefert die Umstellung von einer Ein-Kopf-Stickmaschine mit rotierendem Stickkopf auf eine Stickmaschine mit 2 Nähköpfen und mobilem Stickgrund eine Reduzierung der Fertigungszeit von ca. 20 h für eine Gesamtpreform auf ca. 1,22 h pro Nähkopf.

Abschließend wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Herstellung der Fensterrahmenpreforms auf Basis verschiedener Kadenzen der A350 durchgeführt.

Das vorgestellte Verfahren stellt einen Prozess dar, welcher ein hohes Potenzial für den Einsatz in der Serienfertigung besitzt. Betrachtet man als Vergleich die Fertigungsstudie des A380-Fensterrahmens, so konnte bei dem für den A350-Fensterrahmen der Anteil an manueller Arbeit deutlich reduziert werden. Es entfällt beispielsweise ein aufwendiges Einlegen der Stegpreform in das RTM-Werkzeug. Durch den Einsatz des Preformrahmens kann die Reproduzierbarkeit der Lagenaufbauten deutlich erhöht werden. Der Einsatz des Industrieroboters gewährleistet außerdem einen kontrollierbaren Prozess. Durch diese Arbeit konnte ein Beitrag für die automatisierte Preformherstellung geleistet und an einem Demonstratorbauteil aus der zivilen Luftfahrt verifiziert werden.

Ein Einsatz dieser Technologie in der industriellen Fertigung ist derzeit noch abhängig von dem Nachweis der technologischen Reife durch Vernähung von weiteren Luftfahrtbauteilen. Der erste Schritt in diese Richtung wurde mit dieser Arbeit getan. Der nächste Schritt stellt die Qualifizierung des Verfahrens für eine industrielle Serienfertigung dar.

Die Preforms wurden hier noch manuell zugeschnitten. In einer späteren industriellen Anwendung können diese Preforms auch mit einer Portalcutteranlage zugeschnitten werden. Der Roboter kann danach die Zuschnitte direkt vom Cuttertisch entnehmen und in das Werkzeug drapieren. Erste Ansätze zu einer automatisierten Handhabung mit Robotern konnten in dieser Arbeit ebenfalls aufgezeigt werden.

8 Literaturverzeichnis

- [Airbus 2002a] Airbus Deutschland GmbH: „Fiber Window Frame, Intermediate Design Review I“; März 2002
- [Airbus 2002b] Airbus Deutschland GmbH, Interner Bericht, ESGA, April 2002
- [Altin 2000] ALTIN Nähtechnik GmbH: „„Einseitennäh-technik für Vernähen von Preforms, Single-Side Technology for the sewing of preforms“; BW Technics, Mai 2000
- [Asada et al. 1986] Asada, Slotine: „Robot Analysis and Control“, John Wiley & Sons, 1986
- [Bäckmann 1984] Bäckmann, R.: „Roboter in der Näherei – Utopie und Wirklichkeit“; Melliand Textilberichte 11, 1984
- [Bahlmann et al. 1999] Bahlmann, C., Heidemann, G., Ritter, H.: „Artificial neural networks for automated quality control of textile seams“, Pattern Recognition, Volume 32, Number 6, June 1999
- [Biegelbauer et al. 2007] Biegelbauer, G., Richtsfeld, M., Wohlking, W., Vincze, M., Herkt, M.: „Optical Seam Following for Automated Robot Sewing“, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, 2007
- [Brand 2002] Brand, C.: „Beitrag zur Kostenanalyse für fortschrittliche Flugzeugstrukturen“ Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2002

-
- [Brandt et al. 2002] Brandt, J., Geßler, A., Filsinger, J. : „New approaches in textile and impregnation technologies for the cost effective manufacturing of CFRP aerospace components“, ICAS Congress, 2002
- [Bremer 1998] Bremer H.: „Dynamik und Regelung mechanischer Systeme“, Teubner Studienbücher, 1988
- [Bremer 2001] Bremer H.: „Technische Mechanik III“, Skriptum, Universität Linz 2001
- [Bremer 2004a] Bremer H.: „Robotik I“, Skriptum, Universität Linz 2004
- [Bremer 2004b] Bremer H.: „Robotik II“, Skriptum, Universität Linz 2004
- [Chatzigeorgiou et al. 2003] Chatzigeorgiou, L., Feiler, M.; Aoki, R.: „Machbarkeitsstudie zum Prozessmonitoring von Vakuuminfusionsverfahren mittels Lockin Thermografie“, Thermografie-Kolloquium, Stuttgart, 2003
- [Dewing et al. 1999] Dewing, A., Sarhadi, M., Mitchell, T.A., Davis, R.I., Eastham, J.: “Robotic tacking of high-quality composite performs” ; Proc Instn Mech Engrs Vol 213 Part G, 1999
- [Drechsler et al. 2007] Drechsler, K., Friedrich, H.: „Wege zur kostengünstigen Fertigung von Hochleistungsfaserverbundstrukturen in innovativen Fahrzeugkonzepten“, Werkstoffsymposium Fahrzeugtechnik – Technologien und Bauweisen- 1. Handelsblatt Tagung, Stuttgart, 2007

- [Drews et al. 2000] Drews, P., Pieper, S., Wilms, K.: „Optisches Sensorsystem für die 3D-Nahtverfolgung beim Laserstrahlschweißen“, Forschung im Ingenieurwesen 66, 2000
- [Ehrenstein 2006] Ehrenstein, G.: „Faserverbund-Kunststoffe – Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften“, Carl Hanser Verlag, 2006
- [Engell 1995] Engell S.: „Entwurf nichtlinearer Regelungen“, Oldenbourg, 1995
- [Feraboli et al. 2007a] Feraboli P., Peitso E., Graves M., Stickler P.: „Characterization of high performance short carbon fiber/ epoxy systems: effect of fiber length“, 7th SPE Automotive Composites Conference, Troy, MI, 2007
- [Feraboli et al. 2007b] Feraboli P., Peitso E., Deleo, F., Cleveland, T., Graves M., Stickler P.: „Characterization of Discontinuous Carbon Fiber/Epoxy Systems for Aerospace Applications: Part I“, Proceedings of the American Society for Composites - 22nd Technical Conference, 2007
- [Filsinger et al. 2003] Filsinger, J., Dittmann, R.-P., Bischoff, T.: „Nähen als textile Preform-Technik zur Herstellung von Faserverbundstrukturen für Luftfahrtanwendungen am Beispiel der A380 Druckkalotte“, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2003
- [Flemming et al. 1999] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: „Faserverbundbauweisen – Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix“, Springer-Verlag, 1999

- [Fuchs 2004] Fuchs, C: „Herstellung von CFK-Leichtbaukomponenten in Autoklav- und Injektionstechnik“, RaceTech, München, 2004
- [Gebbert et al. 1990] Gebbert, C.; Gebbert, V.: „Nähautomation zwischen Wunsch und Wirklichkeit“ ; Bekleidung + Wäsche 4, 1990
- [Geßler et al. 2000] Geßler, A., Drechsler, K.: „Single Side Stitching: An innovative textile preform integration technique for fiber reinforced plastics“; Materials Week, München 2000
- [Geßler et al. 2002] Geßler, A., Gliesche, K., Keilmann, R., Laourine, E., Kröber, J.; Pickett, A.: „Textile Integrationstechniken zur Herstellung vorkonfektionierter Verstärkungsstrukturen für FVK“ „INTEX“: BMBF-Projekt, Förderkennzeichen 03N3060. Schlussbericht. Ottobrunn: EADS.
- [Gottschalk et al. 1997] Gottschalk, T., Stephan, J.: „Die Nähmaschine wird lebendig“ ; Bekleidung und Fashion Technik, 1997
- [Herkt et al. 2007] Herkt, M., Schnauffer, P.: „Innovative Herstellung faserverstärkter Teile – Neuartige Textiltechniken machen Hoffnung“, Intelligenter produzieren 2007/3, VDMA Verlag Frankfurt am Main
- [Herkt et al. 2009] Herkt, M., Apmann, H., Lünemann, M.: „Automated Handling of Dry Carbon Fabric and Prepreg Material for Frame and Stringer Production“, EUCOMAS, Augsburg, Germany, 2009

- [Hermann et al. 2000] Hermann, A.S., Pabsch, A., Kleineberg, M.: „Kostengünstige Faserverbundstrukturen – eine Frage neuer Produktionsansätze“ ; 3. AVK-TV Tagung Baden-Baden, September 2000
- [Hogg et al. 2002] Hogg, P.J., Wittig, J.: „Robotic stitching technology for textile structural composites“, Proceedings of the 9th International Conference on Fibre Reinforced Composites FRC, 2002
- [Jeong et al. 2001] Jeong, S.-K., Lee, G.-Y., Lee, W.-K., Kom, S.-B. : „Development of high speed rotating arc sensor and seam tracking controller for welding robots“, ISIE, Pusan, KOREA, 2001
- [Jörn 2003] Jörn, P.: „Entwicklung eines Produktionskonzeptes für rahmenförmige CFK-Strukturen im Flugzeugbau“, Dissertation, Universität Bremen, 2003
- [Keilmann et al. 2002] Keilmann, R., Zöll, K.: „Fortschritte bei der Nähtechnik für Faserverbundwerkstoffe“ Allgemeiner Vliesstoff-Report 5, 2002
- [Köhler 1985] Köhler, E.: „Automatisierung der Prozesse in der Bekleidungsfertigung durch Nähroboter; Bekleidung und Maschenware 24, Heft 2, 1985
- [Körwien 2002] Körwien, T.: „Konfektionstechnisches Verfahren zur Herstellung von endkonturnahen textilen Vorformlingen zur Versteifung von Schalensegmenten“, Dissertation, Universität Bremen, 2002
- [Kugi 2003] Kugi A.: „Regelung nichtlinearer mechatronischer Systeme I“, Skriptum, Universität Linz 2003

-
- [Landon et al. 2010] Landon, K., Laudon, J., Schoder, D.
„Wirtschaftsinformatik: Eine Einführung“, Addison-Wesley Verlag, 2. Aktualisierte Auflage, 2010
- [Löffler 2003] Löffler K., Gienger M., Pfeiffer R.: „Sensors and Control Concept of Walking "Johnnie"“, The international journal of robotic research Vol.22, No.3-4, 2003
- [Meyer 2008] Meyer, O: „Kurzfaser-Preform-Technologie zur kraftflussgerechten Herstellung von Faserverbundbauteilen“, Dissertation, Universität Stuttgart, 2008
- [Moll et al. 1998] Moll, K.-U., Pickel, J., Wulfhorst B.: „Nähen mit einseitigem Nähgutzugriff“; Technische Textilien, Jahrgang 41, November 1998
- [Neitzel et al. 2004] Neitzel, M., Mitschang, P.: „Handbuch Verbundwerkstoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung“, Carl Hanser Verlag, 2004
- [Nestler 1985] Nestler, R.: „Einige technologische und organisatorische Aspekte bei der Einsatzvorbereitung von Industrierobotern in der Konfektion“; Bekleidung und Maschenware 24, Heft 2, 1985
- [Nestler et al. 1990] Nestler, R.; Schlegel, W.: „Aspekte zum Einsatz von Industrierobotern zur Lösung von Handhabeprozessen in der textilen Konfektion“ ; Textiltechnik 40, 8, 1990
- [Niu 1999] Niu, M. C.-Y.: „Airframe structural design: Practical design information and data on aircraft structures“; Conmilit Press Ltd., Hong Kong, 1999

- [Nüttgens et al. 1998] Nüttgens, M.; Zimmermann, V.: „Geschäftsprozessmodellierung mit der objektorientierten Ereignisgesteuerten Prozesskette (oEPK)“, in: Maicher, M.; Scheruhn, H.-J. (Hrsg.): Informationsmodellierung - Branchen, Software- und Vorgehensreferenzmodelle und Werkzeuge, Gabler-Verlag, Wiesbaden 1998, S. 23-36.
- [Ochsenfahrt 1985] Ochsenfahrt, H.-C.: „Technologische Aspekte beim Einsatz von Nährobotern“ ; Textiltechnik 35, 3, 1985
- [Panajotov 1989] Panajotov, I. N.: „Robotereinsatz für das flexible Nähen von Bekleidungsteilen“ ; Bekleidung und Maschenware 28, Heft 6, 1989
- [Parhami 1994] Parhami, B.: “Voting algorithms”; IEEE Transactions on Realibility, Vol. 43, No. 4, pp. 617-629, 1994
- [Perkin 1994] Perkin Elmer: „System 2000, FTIR-Spektrometer“, Benutzerhandbuch, 1994
- [Reiff-Stephan 2005] Reiff-Stephan, J.: „Greifer für biegeschlaffe Materialien“, A & D Produkte und Verfahren, Robotik und Handling, A & D Kompendium 2005/2006
- [Resch 2005] Resch, M: „Modellbildung und nichtlineare Modellbildung eines 5-Achsen Roboters“ unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Robotik, Johannes Kepler Universität Linz, 2005

- [Roberts 1965] Roberts, L.G.: "Machine perception of three-dimensional solids"; Optical and Electro-Optical Information Processing, pp. 159-197, Cambridge, 1965
- [Röhm 2006] Röhm, J.: „Konstruktion eines Kabinenfensterrahmens aus CFK für Verkehrsflugzeuge“, unveröffentlichte Diplomarbeit, Fachhochschule Esslingen, Hochschule für Technik, 2006
- [Scheer et al. 2004] Scheer, A.-W., Abolhassan, F., Krupke, H., Jost, W.: „Innovation durch Geschäftsprozessmanagement: Jahrbuch Business Process Excellence 2004/2005“, Springer Verlag, 2004
- [Schlacher 2000] Schlacher K.: „Automatisierungstechnik I“, Skriptum, Universität Linz 2000
- [Schlacher 2001] Schlacher K.: „Automatisierungstechnik II“, Skriptum, Universität Linz 2001
- [Schlacher 2003] Schlacher K.: „Prozessautomatisierung II“, Skriptum, Universität Linz 2003
- [Schürmann 2005] Schürmann, H.: „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“, Springer-Verlag, 2005
- [Schweinzer et al. 2001] Schweinzer, H., Ponweiser, W., Vincze, M., Mittermayer, C., Krammer, P.: „Führung eines Industrieroboters mit Hilfe eines Bilderkennungssystems“, Elektrotechnik und Informationstechnik (e&i), 118, 2001

- [Sickinger et al. 2000] Sickinger, C., Wilmes, H., Herbeck, L., Herrmann, A., Köhnke, B., Wockatz, R : „Strukturelles Nähen – Eine Maßnahme zur Realisierung von Hochleistungsfaserverbundstrukturen“; Jahrbuch 2000, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR), Leipzig, September 2000
- [Siegrist 2006] Siegrist, M.: „Wirtschaftliche RTM-Prozesstechnologien für die Herstellung von CFK-Motorradfelgen“ Diplomarbeit, ETH Zürich, 2006
- [Spong 1989] Spong M., Vidyasgar M.: „Robot Dynamics and Control“, John Wiley & Sons, 1989
- [Steinhilber 2006] Steinhilber, M.: „Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bewertung von Einflüssen nähtechnischer Parameter auf die mechanischen Eigenschaften konsolidierter CFK-Strukturen“, unveröffentlichte Diplomarbeit, Hochschule Reutlingen, 2006
- [Suetens et al. 1992] Suetens, P., Fua, P., Hanson, A.J.: “Computational Strategies for Object Recognition”; ACM Computing Surveys, Vol. 24, No. 1, pp. 5-61, 1992
- [Thome 2006] Thome, R.: „Grundzüge der Wirtschaftsinformatik: Integration der Informationsverarbeitung in die Organisation von Unternehmen“, Pearson, 2006
- [Tränkler et al. 1998] Tränkler, H.R., Obermeier, E.: „Sensortechnik Handbuch für Praxis und Wissenschaft“, Springer Verlag, 1998

-
- [Vavreck et al. 1989] Vavreck, A.N., Nayak, N., Bushway III, E.D., Ray, A.: „An adaptive seam tracker for welding heavy-section aluminium”, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 25, No.4, July/August 1989
- [Verpoest et al. 1988] Verpoest, I., Springer, G.: „Moisture absorption characteristics of Aramid-Epoxy composites”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 7-January 1988
- [Vincze et al. 2002] Vincze, M., Pichler, A., Biegelbauer, G., Häusler, K., Andersen, H., Madsen, O., Kristiansen, M. : „Automatic robotic spray-painting of low volume high variant parts“, Proceedings of the 33rd ISR (International Symposium on Robotics), October 7-11, 2002
- [Vincze et al. 2006] Vincze, M., Biegelbauer, G., Richtsfeld, M. : „Projekt REDUX AP3 Task 3.2.2 Sensorvergleich: OST versus Falldorf“ Endbericht 2006, ACIN
- [Wan et al. 2006] Wan, Y.Z., Wang, Y.L., Huang, Y., Luo, H.L., He, F., Chen, G.C.: „Moisture absorption in a three-dimensional braided carbon/Kevlar/epoxy hybrid composite for orthopaedic usage and its influence on mechanical performance”, Composites: Part A 37, pp. 1480-1484, 2006
- [Weimer et al. 2008] Weimer, C., Roser, T., Spanner, H., Buchs, W.: „FLEXNAHT – Flexible stitching technology for carbon fiber preforms“, CFK Convention, Stade, 2008

- [Weck et al. 1999] Weck, M., Gottschald, J.: „Integrated 3D-sewing system – Simulation based robot programming“ ; TechTextil Symposium, 13. April 1999
- [Wittig 2001] Wittig, J.: “Developments in robotic three-dimensional stitching technology for assembling composite preforms” ; Mat. Tech. & Adv. Perf. Mat. Vol. 16, 2001
- [Wittig 2002] Wittig, J.: „In-mold-reinforcement of preforms by 3-dimensional tufting“ Proceedings of the 47th International SAMPE Symposium, Vol. 47, 2002
- [Xiaoyi et al. 1997] Xiaoyi, J., Bunke, H.: „Dreidimensionales Computersehen – Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern“, Springer Verlag, 1997
- [Zäpfel 2001] Zäpfel, G.: „Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement“, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2001

Lebenslauf

Angaben zur Person

Name	Manuel Herkt
Anschrift	Krüskaamp 3, 26203 Wardenburg
Geburtsdatum	06.03.1979
Geburtsort	Erlangen
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	verheiratet, 2 Töchter



Schulbildung und Wehrdienst

1985 – 1989	Volksschule in Rosenheim
1989 – 1997:	Ignaz-Günther-Gymnasium in Rosenheim (Abschluss: Abitur)
Sept. 1997 – Juni 1998	Grundwehrdienst in der 5. Kompanie des Gebirgspionierbataillons 8 in Brannenburg

Hochschulausbildung

Okt. 1998 – Juni 2003	Studium der Feinwerk- und Mikrotechnik mit Schwerpunkt Produktion und Automatisierung an der FH München und der EPF Sceaux, Frankreich Abschluss Dipl.-Ing. (FH) und Ingenieur diplômé / Master of Science Thema der Diplomarbeit: Standardisierte Verfahren zur Verarbeitung von beschichteten Faserfilamenten (angefertigt bei MTU Aero Engines GmbH in München) Thema der Masterarbeit: Human tactile threshold measurements in terms of skin displacement, reaction force, and resulting power (angefertigt am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, USA)
-----------------------	--

Berufliche Tätigkeiten

Okt. 2003 – Sept. 2006	Doktorand bei EADS Corporate Research Center Germany in Ottobrunn
Okt. 2006 – Nov. 2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart
Dez. 2006 – Dez. 2008	Projektingenieur / CFK-Technologieentwickler bei Airbus Deutschland GmbH in Varel
Jan. 2009 – Sept. 2011	Projektingenieur / CFK-Technologieentwickler bei Premium AEROTECH GmbH in Varel
Okt. 2011 – Aug. 2012	Vertriebsingenieur (Application Engineering & Strategic Planning) bei Premium AEROTECH GmbH in Varel
Seit Sept. 2012	Supplier Development Manager bei Premium AEROTECH GmbH in Varel