

Technische Universität München
Lehrstuhl für Carbon Composites

**Beitrag zur Qualitätssicherung für die
serientaugliche Herstellung von textilen
Preformen**

Christoph Heß

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades
eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Univ. Prof. Dr. rer. nat. Sonja Berensmeier

Prüfer der Dissertation: 1. Univ. Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
2. Univ. Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl
Technische Universität Hamburg-Harburg

Die Dissertation wurde am 23.04.2015 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 27.11.2015
angenommen.

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, den textilen Preformfertigungsprozess des unidirektionalen (UD)-Flechtens im industrienahen Forschungsumfeld zu analysieren. Es werden anhand des eigens für die Analyse konzipierten Sensorsystems QuIS auf optischer Basis Qualitätsmerkmale, hier Faserwinkelorientierungen sowie sogenannte Gaps, beiderer UD-Lagen erfasst und ausgewertet. Mittels der statistischen Versuchsplanung werden die vom Sensorsystem QuIS ausgewerteten Qualitätsmerkmale weiterverarbeitet, um prozessinhärente Einflussparameter in ihrer Wirkung auf das UD-Geflecht zu identifizieren und zu quantifizieren. Anhand dieser Parameter kann ein deterministisches Prozessmodell entwickelt werden. Mithilfe des Modells kann im Produktionsbetrieb u.a. eine maschinenspezifische Prozessregelung, bspw. die der Produktionsgeschwindigkeit, zur Fehlerprävention konzipiert werden, um eine wirtschaftlichere Herstellung textiler Preformen mittels UD-Flechten zu erzielen.

Abstract

The aim of this work is to analyse the textile manufacturing process of unidirectional (UD)-braiding in the industry oriented research environment. The analysis is based on the specially designed sensor system QuIS to detect and evaluate quality characteristics such as fibre angles or gaps for UD-plyes with thermoplastic veil. The results hereof are further processed to identify and quantify process inherent influential parameters by means of the design of experiments method. From these factors a deterministic model under a given periphery can be generated. By assistance of this model a process forecast can be made or an error prevention can be realized in combination with a machine specific process control, i.e. for the regulation of the production speed. This finally leads to a cost-effective preform manufacturing based on UD-braiding.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	I
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	1
1.2 Vorgehensweise und Herausforderung der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1 Anwendungsbeispiel: Flugzeugspante	5
2.2 Faserverbundwerkstoffe und deren Besonderheiten	10
2.3 Fertigungsprozesse zur Spant-Preformherstellung	13
2.4 Darstellung der Defekte des UD-Geflechts	28
2.5 Qualitätssicherungssysteme für textile Preformen	32
2.6 Statistische Versuchsplanung und Methoden	53
2.7 Zusammenfassung und Darstellung des Bedarfs	61
3 Methodische Konzeption des Qualitätssicherungssystems QuIS	65
3.1 Anforderungen an das Qualitätssicherungssystem	65
3.2 Systemaufbau für die optische Analyse	79
3.2.1 Kamera	80
3.2.2 Objektiv	82
3.2.3 Mechanik und Sensorik	83
3.2.4 Beleuchtungsperipherie	85
3.2.5 Softwarearchitektur	100
3.3 Beschreibung des Messablaufs	112
3.4 Darstellung der Defekte mittels QuIS	114

3.5	Implementierung von QuIS für die UD-Geflechtlagenanalyse	118
4	Experimentelle Untersuchungen und Modellbildung	121
4.1	Herstellungseinflussfaktoren und Zielgrößen	122
4.2	Aufstellung des Versuchsplans	123
4.3	Versuchsdurchführung	126
4.4	Messergebnisse und statistische Auswertung	129
4.5	Modellbildung	137
4.5.1	Darstellung der Ergebnisse, Interpretation und Maßnahmen	140
4.5.2	Allgemeine Betrachtungen	140
4.5.3	Empfehlungen	146
5	Zusammenfassung und Ausblick	149
	Anhang	153
	Abbildungsverzeichnis	173
	Tabellenverzeichnis	177
	Literaturverzeichnis	179

Nomenklatur

Abkürzungen

AGI	Airbus Group Innovations
ANOM	Analysis of Means
ANOVA	Analysis Of Variance
ASFM	Automated Stiffener Forming Machine
ATK	Alliant Techsystems
BraF	Braided Frames
C	Kohlenstoff
CAD	Computer-Aided Design
CCD	Charged-Coupled Device
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CPC	Composite Preforming Cell
CTC	Composite Technology Center
CV	Computer Vision
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
EN	Europäische Norm
FVW	Faserverbundwerkstoff
Gen-I-Cam	Generic Interface for Cameras
GigE	Gigabit Ethernet
IAQG	International Aerospace Quality Group
ISO	International Organization for Standardization
IW	Innovation Works
JASSM	Joint Air-to-Surface Standoff Missile

Koaxialb.	Koaxialbeleuchtung
LED	Light-Emitting Diode
Lichtd.	Lichtdome
NH	North (Atlantic Treaty Organization) Helicopter
NLR	National Aerospace Laboratory
OoA	Out-of-Autoclave
QM	Qualitätsmanagement
QS	Qualitätssicherung
ROI	Region of Interest
SDK	Software Development Kit
SMD	Surface-Mount Device
SP	Strahlteilerplatte
SQL	Structured Query Language
UD	Unidirektional
USB	Universal Serial Bus
WZL	Werkzeugmaschinenlabor
XML	Extensible Markup Language
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

Formelzeichen: Lateinische Buchstaben

A	Kegelrundfläche
A_{Kamera}	Auflösung Kamera
A_{Ort}	Auflösung Ort
B	Bedeckungsgrad
B_m	Bestimmtheitsmaß
d	Kerndurchmesser
d_i	Residuum
Δ_{F-R}	Abstand Flechtring-Flechzebene

Δh	Kernflankenweite
E	Re-Normierung
E_{Faktor}	Faktoreinzeleffekt
E_v	Beleuchtungsstärke
F	Farbtiefe
F_i	F-Wert
F_N	Normalkraft am Roving
FT	Farbtiefe
f_e	Freiheitsgrad
fps_{max}	Kamerabiltrate
H	Bildhöhe
Hub_f	Hubfrequenz
I	Gesamtleuchtstärke
I_{Einzel}	LED Einzelleuchtstärke
k	Anzahl Einflussfaktoren
L	Leuchtdichte
m	Faktorstufenkombinationen
N	Versuchsumfang
n	Menge
$n_{\text{LED-Streifen}}$	Anzahl LED
n_{Pixel}	Pixelfaktor
R	Kameraauflösung
r	Kegelhöhe
SQ_m	Quadratische Mittelwertabweichung
SQ_{Gesamt}	Fehlerquadratsumme aller Abweichungen
SQ_{Faktoren}	Quadratsummen der Abweichungen aller Faktoren
$SQ_{A,B,\dots}$	Fehlerquadratsumme aller Faktoren
SQ_e	Wiederholbarkeitsfehler
s_{Merkmal}	Kleinste auflösendes Merkmal
s_{tu}	Vorschubweg

TR	Übertragungsrate
$t_{Vorschub}$	Vorschubzeit
U_{GigE}	Übertragungsrate der Schnittstelle
V_e	Fehlervarianz
V_i	Schätzvarianz
$v_{Produktion}$	Produktionsgeschwindigkeit
$v_{Lineareinheit}$	Linearmechnik Vorschubgeschwindigkeit
v_{tu}	Vorschubgeschwindigkeit
x	Normierung
y	Mittlere Faktorwirkung

Formelzeichen: Griechische Buchstaben

β	Rovingwinkel
β'	Verstärkungsfaktor
γ	Flechtwinkel
Θ	Abstrahlwinkel
μ_L	Mittelwert linke Kernseite
μ_R	Mittelwert rechte Kernseite
σ_{Mess}	Messunsicherheit
σ_{Tape}	Tapespannung
Φ_v	Lichtstrom
Ω	Raumwinkel
ω	Klöppelumlaufgeschwindigkeit

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Für Faserverbundwerkstoffe (FVW) bietet sich ein breites Anwendungsfeld. Es ist heutzutage möglich diese für Industrieanwendungen oder für Hochleistungsstrukturen, bspw. in der Luft- und Raumfahrttechnik, zu nutzen. Die im Vergleich zu Metallen sehr guten spezifisch-mechanischen Eigenschaften sind hierfür als Gründe zu nennen. Mit diesen Eigenschaften ist allerdings eine kostenintensive und technisch anspruchsvolle Fertigung verbunden. Um den steigenden Produktionskosten entschieden entgegenzutreten, geht der Trend, dieser im Vergleich zu Metallen jungen Werkstoff-Technologie, zur automatisierten Fertigung von FVW.

Die Fertigung von FVW hat eine besondere Bedeutung auf den Konstruktionswerkstoff. Bereits geringste Abweichungen, bspw. der globalen Faserwinkelorientierung einzelner Lagen relativ zu einem definierten Bezugssystem, verändern die strukturellen Eigenschaften des Endbauteils. Eingeführte Sicherheitsfaktoren können die Auswirkungen dieser strukturellen Ungleichheiten kompensieren, bedeuten allerdings auf der einen Seite zusätzliches Gewicht und auf der anderen Seite Mehrkosten infolge eines höheren Materialeinsatzes sowie eines gesteigerten Produktionsaufwands.

Als Konsequenz ist eine Strukturgewichtszunahme zu verzeichnen, die im Gegensatz zu der strikten Forderung hinsichtlich des ressourcenschonenden Umgangs mit fossilen Brennstoffen und gewünschter Emissionseinsparungen im Personen- und

Güterverkehr steht. Zielführend ist die bereits angesprochene automatisierte Fertigung von Faserverbundbauteilen. Einen hohen Automatisierungsgrad der Fertigung zeichnet bspw. die Automobilindustrie aus. Im Vergleich zur Automobilindustrie werden in der Luftfahrt eher großflächige Bauteile in geringer Stückzahl automatisiert produziert. Weit verbreitet ist die sogenannte Prepreg-Route. Hier werden bspw. mittels des Tapelegeverfahrens die Fasern reproduzierbar in gewünschter Faserwinkelorientierung abgelegt und anschließend ausgehärtet. Eine Alternative zur Prepreg-Route kann die Nutzung textiltechnischer Verfahren, wie bspw. das Flechten und die Flüssigharzinfusion, für bestimmte Bauteile darstellen.

Bei dem in dieser Arbeit betrachteten unidirektionalen (UD)-Flechtprozess kann das UD-Fasermaterial vom Hersteller nach einem Umspulvorgang direkt genutzt werden, um automatisiert Vorformlinge bzw. Preformen Lage für Lage zu generieren. Diese werden im anschließenden Produktionsschritt via Infusionstechnologie mit Harz getränkt und zum Bauteil ausgehärtet. Den Vorteilen der Fertigungs- und Materialkosten kann die Fertigungsgüte und die aufwendige Prozessregelung gegenüberstehen. Speziell bei der Fertigung gekrümmter Preformstrukturen durch die UD-Flechttechnologie und anschließenden Umformungsvorgängen sind Veränderungen des Flechtwinkelverlaufs bemerkbar, die außerhalb vorgegebener Toleranzen liegen können. Bei dieser Fertigung lassen sich Gaps, bzw. Lücken zwischen den Fasern, nicht gänzlich vermeiden. Um die Akzeptanz von textilen Fertigungsverfahren zu erhöhen, ist der Einsatz von qualitätsfördernden Systemen anzustreben.

Schwerpunkt im ersten Teil dieser Arbeit ist es, ein für den UD-Flechtprozess geeignetes Qualitätssicherungssystem (QS-System) zu konzipieren, welches für die Online-Inspektion, aber auch für Prozessanalysen genutzt werden kann. Mit dem QS-System soll es möglich sein, potenziellen Preformausschuss auf diese Weise frühzeitig aus dem Produktionsprozess zu entfernen oder ggf. mögliche Preformnachteile auf ein Minimum zu reduzieren, nach dem Grundsatz *“es ist wirtschaftlicher Fehler zu vermeiden, statt diese zu beseitigen“*. [87] Zusätzlich können die generierten Produktdaten für die Bauteilnachverfolgung genutzt werden, um einen Beitrag zur Bauteil- und Prozessqualifizierung zu leisten. Im Hinblick auf das

Product Lifecycle Management kann damit der Fertigungsprozess Preforming mit Hilfe einer Datenbank gesichert und nachverfolgt werden.

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden anhand der statistischen Versuchsplanung prozessinhärente Einflussfaktoren identifiziert und in ihrer Größe bestimmt. Daraus lassen sich Maßnahmen zur Prozesssicherheit und Optimierung ableiten. Der Fragestellung inwieweit Imperfektionen im Rahmen der Fertigung auftreten und bis zu einem gewissen Grad tolerierbar sind, kann damit Rechnung getragen werden. Neben der Vorstellung der Versuchsmethodik wird aus den Untersuchungsergebnissen ein Modell, speziell zur Vorhersagbarkeit potenzieller Gaps, abgeleitet werden. Hiermit soll zukünftig der Prozess des UD-Flechtens quantitativ besser abgebildet werden.

1.2 Vorgehensweise und Herausforderung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in einen theoretischen und einen experimentellen Teil. Das **Kapitel 2** beschäftigt sich mit den Grundlagen der Thematik, zeigt verwendete Wissensgebiete und die Problemstellung dieser Arbeit auf. Das **Kapitel 3** beschäftigt sich mit der Lösung der Problemstellung und beschreibt die methodische Konzeption des optischen Qualitätsinspektionssystems QuIS und dessen Verwendungspotenziale. In **Kapitel 4** wird experimentell mittels QuIS und statistischer Versuchsplanung die Quantifizierung von ausgewählten Einflussparametern des Preformfertigungsprozesses UD-Flechten durchgeführt und in einem Modell dargestellt. Das **Kapitel 5** führt die Kernpunkte der Arbeit zusammen und stellt zukünftige Anwendungs- und Forschungsthemen vor.

Die Herausforderung dieser Arbeit bestand in der Konzipierung eines geeigneten QS-Systems sowie der experimentellen Untersuchungen und Modellbildung des UD-Flechtprozesses.

Untersucht wurde die Flechtwinkelorientierung und Gapverteilung von Geflecht-einzellagen. Charakterisierend für unausgehärtete Kohlenstofffasern sind die Reflexionseigenschaften des Materials abhängig von Beleuchtungsart und -richtung.

Erschwerend kommt hinzu, dass auf dem zu untersuchenden Fasermaterial ein thermoplastischer Binder seitens des Materialherstellers aufgetragen wurde.

Für die Bilderfassung und -auswertung wurde speziell für den UD-Flechtprozess ein Beleuchtungssystem konzipiert, da vorhandene Systeme entweder nicht die geforderte Beleuchtungscharakteristik aufwiesen, nicht homogen bezüglich der Lichtintensitätsverteilung waren oder nicht dem zur Verfügung gestellten Bauraum entsprachen.

Die Gesamtentwicklung von QuIS wurde von der Erstellung aufgabenspezifischer Bildverarbeitungsalgorithmen zur Untersuchung von Gaps sowie Flechtwinkelorientierungen der Geflechtlage begleitet. Verfügbare Algorithmen, speziell für die Erfassung der Gaps haben gezeigt, dass eine Neukonzipierung notwendig wurde, um Anforderungen an die Genauigkeit zu erfüllen. Am Beispiel des entwickelten Gap-Algorithmus wird die Methodik der Auswertung schrittweise dargestellt.

Prozess- und Preformdaten wurden in einem hierfür erstellten Auswertungs- und Datenbankmanagementsystem im QuIS gespeichert und können für verschiedene Zwecke, bspw. einer erneuten Bildverarbeitung bei Parameteranpassungen, wiederverwendet werden.

Ziel der Untersuchungen war die Identifizierung der Haupteinflussparameter bzw. -faktoren des UD-Flechtprozesses sowie die Evaluierung einer Maschineneinstellung für die Herstellung einer Geflechtlage mit einer minimalen Gapverteilung. Darüber hinaus ist die Störungsanfälligkeit auf ein Minimum zu reduzieren, um einen robusten UD-Flechtprozess zu erzielen.

Abschließendes Ziel dieser Arbeit war es, Handlungsempfehlungen abzuleiten, um Fertigungsfehler frühzeitig zu identifizieren und zukünftig vermeiden zu können.

Kapitel 2

Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Anwendungsbeispiel: Flugzeugspante

Zentrales Element eines Flugzeugs ist der Rumpf. In diesem werden Passagiere, Ausrüstung sowie Nutzlast befördert und Flügel, Leitwerke und oftmals Triebwerke befestigt.[82, vgl. S.201]

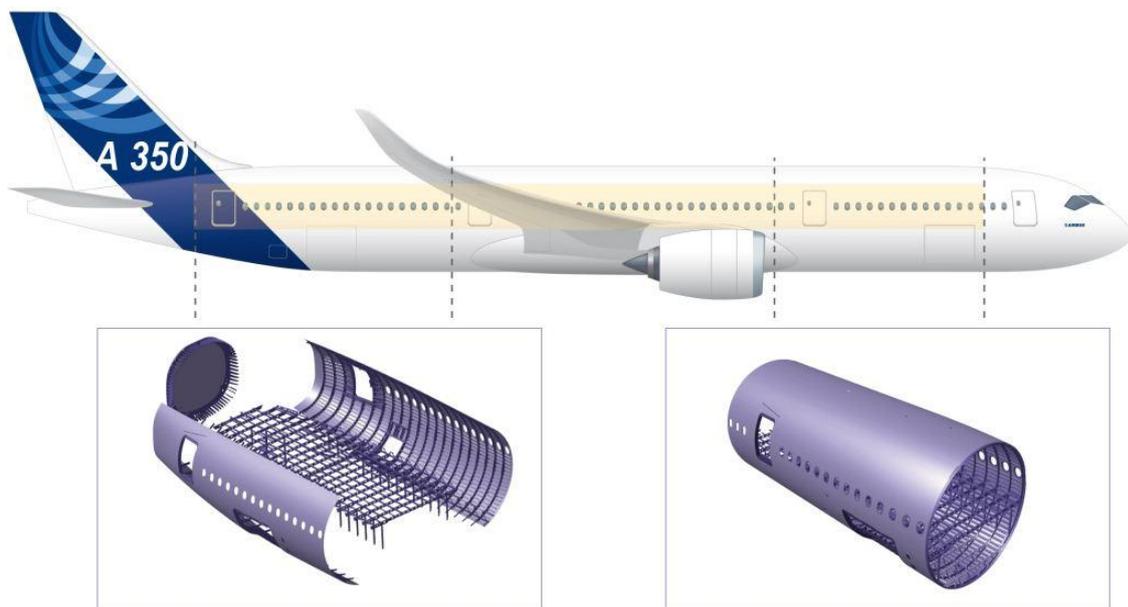


Abb. 2.1: Seitenansicht A350-900 mit Rumpf-Sektionen[76]

Die Konstruktionsgruppe Rumpf befindet sich in der Konstruktionshauptgruppe Flugwerk.[16, S.225] Der Rumpf ist in Sektionen unterteilt und am Beispiel des Airbus A350 dargestellt, siehe *Abbildung 2.1*. Die Rumpfform bezieht sich hauptsächlich auf den Einsatzzweck sowie der Nutzungsumgebung des Flugzeugs. Ein Kunstflugzeug unterscheidet sich grundlegend von einem Höhenforschungsflugzeug und dementsprechend sind Rumpfkontur und Versteifungselemente entworfen. Folgende Grundregeln sollten für die Auslegung des Rumpfes beachtet werden:[51, S.379]

- Gewicht
- Fertigung
- Ausrüstung
- Schalldämmung
- Blitzschutz

Gewicht und Fertigung werden durch die Materialauswahl und das Herstellungsverfahren maßgeblich beeinflusst, siehe *Kapitel 2.2* und *2.3*. Um Entscheidungen für die Auswahl beider Faktoren präzise treffen zu können, ist es wichtig, sich vorab mit den Belastungen interner und externer Art zu beschäftigen. Folgende Kräfte wirken auf den Rumpf:[82, S.203]

- Übertragungskräfte von angebrachten Baugruppen am Rumpf
- Trägheitskräfte von untergebrachten Gegenständen aller Art im Rumpf
- Massenkräfte aller Rumpfkonstruktionen
- Auf die Rumpfoberfläche wirkende Luftkräfte
- Differenzen zwischen Innen- und Außendruck
- Kräfte infolge starker Beschleunigungen, bspw. Vollbremsung

Kräfte, die in der vertikalen und horizontalen Symmetrieebene des Rumpfes wirken, biegen diesen.[82, vgl. S. 205] In der horizontalen Ebene kann das zum Beispiel die Korrektur einer Anstellwinkelveränderung aufgrund einer Böe mittels des Höhenleitwerks sein. Für das Beispiel in vertikaler Ebene würde ein Vorhalten des

Flugzeugs mittels Seitenruder gegen den Wind eine Biegung sowie eine Torsion des Rumpfes verursachen. Der Grund hierfür sind Kräfte, die auf das Seitenruder oberhalb der Symmetrieebene des Rumpfes wirken und diesen tordieren.

Die tragenden Elemente eines Rumpfes sind die ringförmigen Spante, die Stringer und die Behütung, die gesamtheitlich Schubfelder bilden. Weitere Elemente des Rumpfes sind Funktionsbauteile wie Brandschutzwände, Türen und Kabinenböden, die die Struktur ebenfalls lokal verstärken. Die Stringer nehmen das vertikale Biegemoment größtenteils auf, Schub- und Torsionsbelastungen werden durch die Behütung aufgenommen. Die Spanten und Stringer verstärken die Behütung, wobei deren Anzahl und Verteilung im Rumpf nach globalen Festigkeits- und Steifigkeitsgesichtspunkten erfolgt. Beispielsweise verfügt der A300 über 103 Hauptspante, die sich im Abstand von $0,53m$ vom vorderen Rumpfteil über den mittleren Teil bis zum Rumpfende diskret verteilen.[16, vgl. S.228]

Entsprechend kompliziert sind die zusammengefassten Strukturbetrachtungen, die in Bauteil- und anschließenden Strukturversuchen nachgewiesen werden müssen, um erforderliche Belastungsgrenzen zu demonstrieren. Ein endgültiger Nachweis der Belastungsgrenzen findet in einem Full-Scale Test, bei dem die Gesamtstruktur des Flugzeugs belastet wird, statt.[29, 67] Der Versuch gilt auch als Nachweis für die Berechnungen und dient damit der Validierung der Modellannahmen und der Konstruktion im Allgemeinen. Nachträgliche Versteifungen können mittels Simulations-Software weniger aufwendig dargestellt werden.[6]

In *Abbildung 2.2* ist die im Flugzeugbau oft verwendete Halb-Schalenbauweise aufgezeigt. Die Versteifungselemente (bspw. Spante) sind mit der Behütung verbunden. Die Halb-Schalenbauweise bietet neben der guten Materialausnutzung den zusätzlichen Vorteil Rumpfschalen-Strukturelemente, bspw. infolge einer Schädigung, austauschen zu können. Notwendige Trennstellen bedeuten allerdings zusätzliches Gewicht aufgrund von Überlappungen und erfordern Verbindungselemente, wie bspw. Nieten.

Der in dieser Arbeit gelegentlich verwendete Begriff Leichtbau bezeichnet die Entwicklung und Realisierung von Strukturen mit geringer Masse.[20, vgl. S.3]

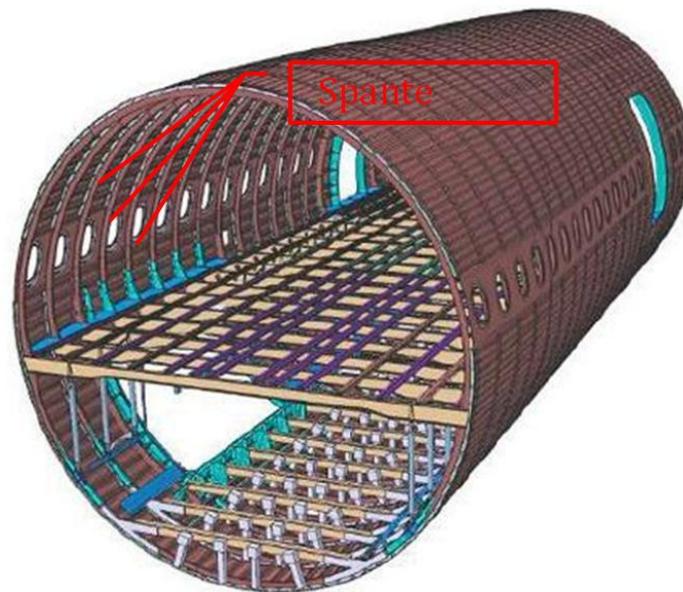


Abb. 2.2: Rumpfschnitt in Halb-Schalenbauweise mit Spanten[76]

Der Leichtbau beinhaltet Strategien, Prinzipien und Techniken.[68] Besonders bei der Leichtbaustrategie rückt der Werkstoff in den Fokus. In der kommerziellen Luftfahrt sind Rumpfwerke hauptsächlich aus dem metallischen Leichtbauwerkstoff Aluminium gefertigt. Mit Beginn der Ära der Boeing 787 sowie des A350 werden FVW in der Konstruktionsgruppe Rumpf bei Großraumflugzeugen nahezu vollständig verwendet.

Treibende Kraft für den Einsatz von FVW ist die Forderung leichte Strukturbauteile herzustellen, die metallischen Strukturen mindestens ebenbürtig oder gar überlegen sind.[1, vgl. S.5] Ein weiterer Aspekt ist der erhöhte Komfort für die Passagiere bei entsprechender Betriebssicherheit. Beides kann ebenfalls durch den Einsatz von Strukturkomponenten aus FVW realisiert werden.

Im Rumpf sind speziell die Spante nicht einheitlich gestaltet, was die Fertigungskomplexität erhöht. Bereiche in denen konzentriertere Anschlusskräfte wirken, bspw. im Bereich des Bugfahrwerks, des Flügels oder am Leitwerk, werden stärker belastet und müssen ausreichend dimensioniert werden.

Grundsätzlich haben die Spante die Funktion:

- die Behütung zu stützen
- als Rissstopper zu fungieren
- Lasten zu verteilen
- Formgebung

Spante aus Aluminium werden überwiegend als J-, Z- oder I-Träger gestaltet und entstanden als Press-,Fräs- oder Biegeprofile.[82, S.213] Spante aus FVW werden häufig als 1) C-, 2) Z-, 3) JF- oder 4) E-Träger ausgelegt, siehe *Abbildung 2.3*

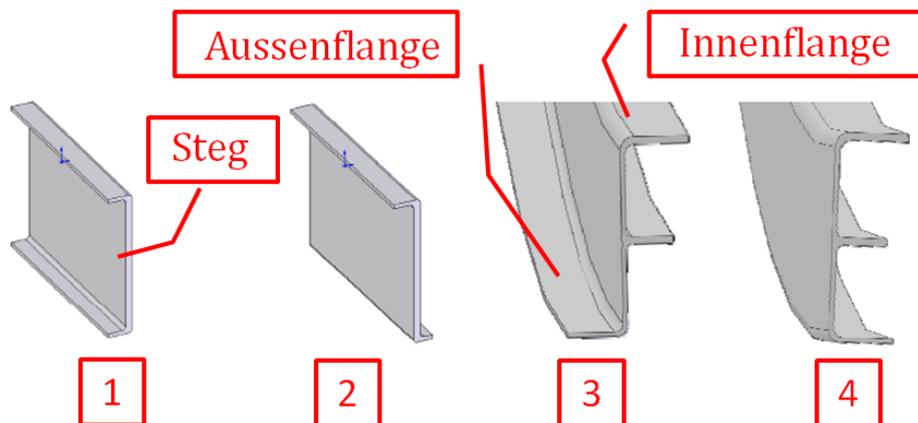


Abb. 2.3: Unterschiedliche Querschnitte von Spantprofilen[24, S.6]

Am Beispiel des Verkehrsflugzeugs Airbus A350 kann die Bogenlänge der Spante aus FVW bis zu 3500mm und der Radius des Aussenflanges bis zu 3000mm betragen. Die Breite der Flanges liegt im Bereich um 28mm. Die Dicke von Steg und Flanges kann je nach Bereich zwischen 2,5mm und 4,4mm betragen.[36, S.5] Um bei Einwirkung äußerer Belastungen werkstoffgerechtes Strukturverhalten des Bauteils zu erzielen, sind Lagenorientierungen von bspw. 0° , $\pm 30^\circ$ und 90° zu realisieren. Die *Abbildung 2.4* zeigt zwei Spantelemente aus FVW in der Boeing 787 auf. Im folgenden *Kapitel 2.2* werden FVW detaillierter vorgestellt.

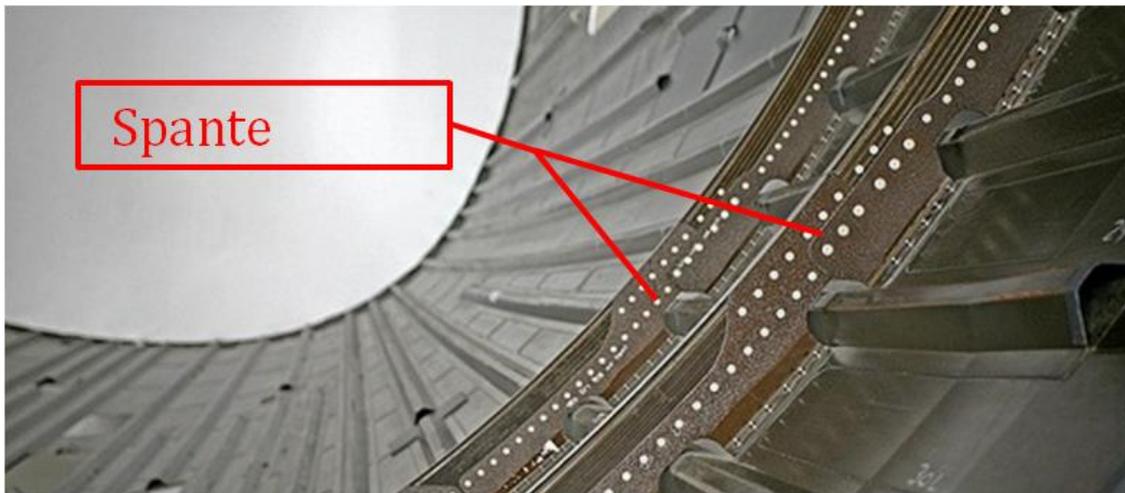


Abb. 2.4: Halb-Schalenbauweise aus FVW der Boeing 787 mit Spanten[66]

2.2 Faserverbundwerkstoffe und deren Besonderheiten

Strukturkomponenten aus FVW bieten im Vergleich zu Metallen ein höheres Leichtbaupotenzial sowie sehr gute Formgebungs- und Integrationsmöglichkeiten.[19, vgl. S.9] Bevor ein direkter Vergleich zwischen Metallen und FVW erfolgt, sei auf die Definition eines Verbundwerkstoffs hingewiesen.

Ein Verbundwerkstoff besteht aus mindestens zwei oder mehreren nicht gleichen Materialien. Verbundwerkstoffe sind die Oberkategorie von FVW, ein solcher kann bspw. ein Laminat¹ sein.[79, vgl. S.295]

Der FVW besteht grundsätzlich aus Fasern und einer Matrix, in die die Fasern eingebettet werden, vgl. *Abbildung 2.5*. [20, vgl. S.7] Preformen bestehen aus Fasermaterial ohne Matrix. Im Strukturverbund, vgl. *Abbildung 2.6*, tragen die Fasern die Hauptlast und die Matrix hat die Funktion, die Fasern formstabil zu halten und zu schützen, Kräfte einzuleiten und zu verteilen.[89] Die Fasern können hierbei aus Aramid, Glas oder Kohlenstoffschichten bestehen.

¹ lat.:lamina = Schicht

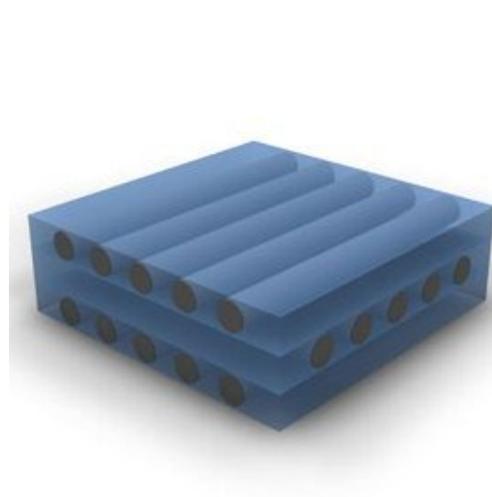


Abb. 2.5: Fasern mit flüssigem Harz[69] Abb. 2.6: Multidirektionales Laminat[69]

Als Matrix eignen sich Polyester-, Vinylester- sowie das im Flugzeugbau hauptsächlich verwendete Epoxidharz, welches ein duroplastischer Kunststoff ist. Darüber hinaus ist die Verwendung einer thermoplastischen Matrix ebenfalls möglich. Resultierend aus der Kombination von Fasern und Matrix sollen Synergieeffekte erzielt werden, die den Gesamtfaserverbund wesentlich in seinen Eigenschaften im Vergleich zu den Einzelkomponenten verbessern.[13, vgl. S.1]

In *Tabelle 2.1* wird eine grobe Einteilung der Vor- und Nachteile zwischen Metallen und FVW vorgenommen. Als metallischer Werkstoff soll Aluminium zum Vergleich herangezogen werden, da der relative Anteil von Aluminium im zivilen Flugzeugbau am höchsten ist.[16, vgl. S.75] Es werden die zahlreichen Legierungen, z.B. die für Spante oft verwendete AlCuMg₂ (2024), aufgrund der Vielfalt nicht im Detail verglichen.[16, vgl. S.85] Auch Sonderfälle wie Gießbarkeit oder Herstellungsenergien finden bei dieser Zusammenstellung keine Beachtung. Zur Herstellungsenergie sei auf die Arbeit von *M. Achternbosch et al.* verwiesen.[1]

Der kristalline metallische Werkstoff Aluminium hat als Hauptunterschied ein idealerweise isotropes, richtungsunabhängiges, mechanisches Verhalten. Grund hierfür ist, dass in Metallen die entsprechenden Achsen der Kristalle amorph vorliegen und Richtungsunterschiede sich aufheben[90, vgl. S.28] Wird der Grundwerkstoff Alu-

minium mit Legierungsmetallen wie Kupfer, Magnesium oder Zink versetzt, kann der Werkstoff für unterschiedliche Anwendungen verwendet werden.[16, vgl. S.85]

	Vorteile	Nachteile
Metalle	Isotropie plastische Verformung Zerspannbarkeit Leitungsvermögen Modellierung Temperaturbeständigkeit Schweißmöglichkeit	Dichte Klebbarkeit Korrosionsanfälligkeit Dauerfestigkeit Oberflächenbehandlung Rissempfindlichkeit Dämpfungsvermögen
FVW	spezifische Festigkeit spezifische Steifigkeit Formgebung Wärmedehnung Korrosionsbeständigkeit Anisotropie Harz-Matrix Kombinationen Hybridbauweisen	Werkstoffkosten Nachweisführung Herstellung Lasteinleitung Recycling Anisotropie Erdölbasis Nachweis Klebung

Tab. 2.1: Vor- und Nachteile von Metallen zu FVW[80, vgl. S.12ff]

FVW, speziell der Werkstoff bestehend aus technischer Kohlenstofffaser und Kunststoffmatrix (CFK) hat herausragende Kennwerte, die die Steifigkeit und Festigkeit gleichermaßen betreffen.[13, vgl. S.36],[19, vgl. S. 8] Kohlenstofffasern sind leichter als Aluminium, steifer und thermisch stabiler.

Die Kohlenstofffaser wird allerdings erst als solche bezeichnet, wenn die Faser aus einem Kohlenstoffanteil von mindestens 90 Gewichtsprozent besteht.[83, S.20] Die

erste kommerzielle Kohlenstofffaserproduktion begann im Jahr 1971 bei Toray in Japan.[2, S.139] Im Vergleich zu Aluminium kann die FVW-Werkstofftechnologie auf Basis von Kohlenstofffasern als relativ jung bezeichnet werden.

Aufgrund der positiv hervorgehobenen Formgebungsmöglichkeiten ist es bei FVW sinnvoll, die Faserrichtung in Belastungsrichtung zu orientieren und wie in der Natur vorkommend, Lastpfad gerechte Strukturen herzustellen. Das Gesamtgebilde kann sich daher anisotrop verhalten.[13, vgl. S.4] Aus der Natur ist der bekannteste FVW Holz zu nennen. Dieser wird bspw. in gering belasteten Bereichen bei Hochleistungssegelflugzeugen verwendet.[32, vgl. S.5]

Trotz der positiven Eigenschaften von FVW wurde in *Tabelle 2.1* die Herstellung als Nachteil benannt, da sich diese bei FVW im Flugzeugbau zum einen auf die hohen Materialkosten der Prepreg²-Ausgangsstoffe und dessen kostenintensive Anlagentechnologien beziehen, zum anderen aufgrund der teilweise durchgeführten manuellen Fertigung.[11, vgl. S.42] Die manuelle Fertigung ist allerdings fehleranfällig und es können Defekte im Bauteil entstehen. Für die Produktion bedeuten Defekte wie Porositäten oder Formungenauigkeiten häufig Ausschuss für das betreffende Bauteil, welches in diesem Fall erneut gefertigt werden muss.

Im Hinblick auf eine kostengünstige und fehlerunanfällige Realisierung von Strukturen aus FVW, müssen Ansätze mit automatisierten Fertigungsverfahren genutzt werden, um Bauteile wettbewerbsfähiger im Vergleich zu Aluminium herzustellen. Die Möglichkeiten einer automatisierten FVW-Fertigung soll am Beispiel des Flugzeugspantes im folgenden *Kapitel 2.3* dargestellt werden.

2.3 Fertigungsprozesse zur Spant-Preformherstellung

Derzeit stellen u.a. Alliant Techsystems (ATK) sowie Duqueine Flugzeugspante aus dem Werkstoff CFK für die Luftfahrtindustrie bereit.[70][63, vgl. S. 5] Diese Spanten werden auf Basis von Kohlenstofffaser-Prepreg automatisiert gefertigt. Das

² engl. pre-impregnated — vorimprägniert

Material kann durch die in *Abbildung 2.7* dargestellte 'Automated Stiffener Forming Machine' (ASFM) für weniger diffizile, aber reproduzierbare Bauteile verarbeitet werden. Die Maschine legt einzelne UD-Prepreg-Lagen schichtweise ab und kann diese in C-Profilquerschnittformen umformen.

Diese Art der Automatisierung verringert die Fertigungskosten und erhöht die Produktionseffizienz, erfordert aber entsprechende Anlagen- und Prozesssteuersysteme. Die Aushärtung des Prepreg-Schichtpakets findet im Autoklaven, siehe *Abbildung 2.8*, bei hohem Druck und Temperatur statt.[13, S.151] Bauteile aus Prepreg bieten dem Anwender hohe mechanische Eigenschaften und nutzen das Leichtbaupotenzial des Werkstoffs gut aus, denn in der innerhalb des Autoklaves geschaffenen Atmosphäre werden Lufteinschlüsse zwischen den Schichten nahezu vermieden und dadurch Laminatwelligkeiten minimiert.[84, vgl. S.148]

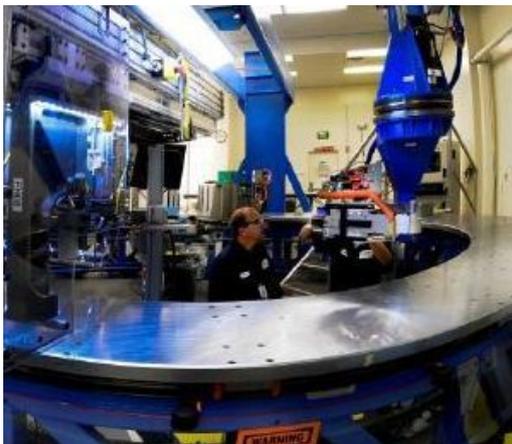


Abb. 2.7: Umformmaschine ASFM[70]



Abb. 2.8: Autoklave[10]

Bei UD-Prepreg sind die Fasern je Lage parallel angeordnet und in eine Matrix bereits eingebettet. Die Vorimprägnierung der Fasern mit Harz stellen besondere Anforderungen an die Lagerung, Vorbereitung und Fertigung.[84, S.147]

Trotz der angesprochenen Vorteile des Prepreg-Herstellungsverfahrens sind die Gesamtaufwendungen unter Berücksichtigung der Material-, Investitions- und Betriebskosten für die Produktion von Strukturen als hoch einzustufen. Zudem weist

das Material Prepreg spezielle Verarbeitungsrichtlinien auf und hat im Vergleich zu textilen Preformtechnologien einen höheren Anschaffungspreis.[13, vgl. 150ff.]

Ein alternativer Ansatz wäre die sogenannte Out-of-Autoclave (OoA) Technologie, die ressourcen- und kostenschonend Produkte für die Flugzeugbauindustrie bereitstellen kann.[27] Drei mögliche OoA CFK-Fertigungsverfahren für Spantstrukturen werden im Folgenden kurz vorgestellt. Als erstes die 'Composite Preforming Cell' (CPC), die die Fertigung von Preformen ermöglicht.[62] Bei diesem Verfahren wird trockenes Fasermaterial mittels Umlenkvorrichtungen umgeformt, besäimt und anschließend in einer Form mit Harz infundiert und ausgehärtet. Im Vergleich zur manuellen Fertigung sollen bis zu 30% der Kosten eingespart werden können.[43] Allerdings sind Änderungen des Profilquerschnitts nur aufwendig realisierbar und der Prozess eignet sich eher für konstante Profilgeometrien.

Als zweites OoA-Fertigungsverfahren wird eine Technologie vom National Aerospace Laboratory (NLR) vorgestellt. Bei diesem Verfahren wird kein trockenes Fasermaterial verwendet, sondern thermoplastische Tapes. Diese Kombination aus Material und Verfahren bietet kürzere Gesamtprozesszeiten im Vergleich zu Fertigungsverfahren mit duroplastischen Matrixsystemen, da die Aushärtung der Matrix entfällt.[31] Die thermoplastische Matrix wird über den Erweichungspunkt erwärmt, warmverformt und abgekühlt. Als Nachteile von thermoplastischen Matrix-Kunststoffen sind die geringe Formbeständigkeit bei Wärme sowie die hohen Materialkosten zu nennen.

Das aus der Textiltechnik stammende industrielle Flechtverfahren für Preformen zählt als Teilprozess zum letzten der OoA-Fertigungsverfahren. Die im anschließenden Prozessschritt durchgeführte Aushärtung des zuvor ins Preform infundierten Harzes erfordert keinen Autoklaven, sondern einen Ofen oder beheizte Formen. Als Vorteil gegenüber den bereits dargestellten Verfahren bietet die Flechttechnologie u.a. die Möglichkeit von lokalen Profilquerschnittsveränderungen bei der Preformfertigung. Darüber hinaus können die Preformprofile automatisiert sowie kostengünstig gefertigt werden. Im Folgenden wird eine Fertigungslinie zur Herstellung textiler Spant-Preformen auf Basis der Flechttechnologie konkreter vorgestellt.

Halbautomatische Spant-Preform Fertigungslinie

Um Spante aus FVW für die Flugzeugindustrie kostengünstig fertigen zu können, muss das technische und wirtschaftliche Potenzial für die Automatisierung dargestellt werden.

Folgende Voraussetzungen zeigen die Eignung zur automatisierten Fertigung von Preform-Spanten auf:

- Technologische Eignung des Rundflechtens: Spanten sind Profilstrukturen
- Hohe Reproduzierbarkeit: Spanten sind vielfach im Flugzeugumpf vorhanden
- Kosteneffiziente Fertigung: Fasermaterial kann direkt zur Lagen- bzw. Preformfertigung verwendet werden

Die Flechttechnologie eignet sich als Produktionsverfahren für die automatisierte Fertigung von Preform-Spanten. Allerdings kann das Flechtverfahren keine definierten 90° und 0° Lagen abbilden. Daher mussten zusätzliche Ablagesysteme entwickelt und zu einer Fertigungslinie zusammenschaltet werden, um den Spant-Preform gänzlich herstellen zu können.

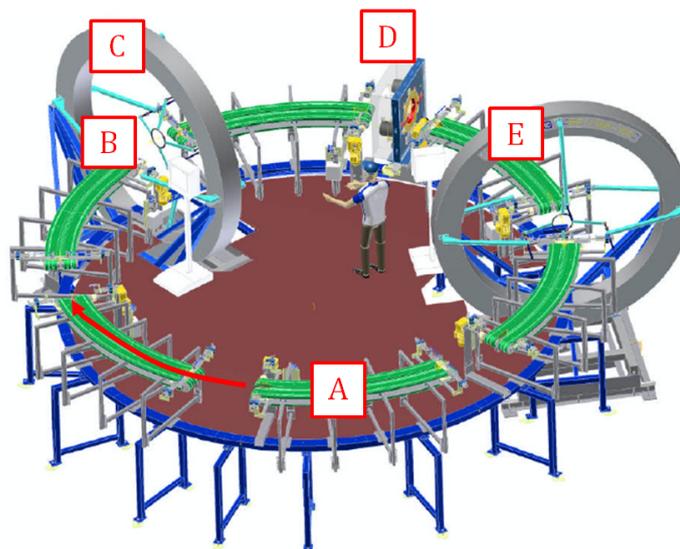


Abb. 2.9: Zeichnung der halbautomatischen Spant-Preform Fertigungslinie[23, S.11]

Die *Abbildung 2.9* stellt die halbautomatische Fertigungslinie für Spant-Preformen mit den Einzeltechnologien schematisch dar. Zusätzliche technologische Entwicklungen, speziell für die Ablage von 90° Lagen mittels Wickler, wurden im Forschungsprojekt IMac-Pro erstellt und in Anschlussprojekten BraF I und II umgesetzt. Die Spant-Preform Fertigungslinie stellt nur einen Teilprozess dar. Gesamtheitlich wird die Herstellung des Spantes in *Anhang A4* dargestellt.

Die technologische Umsetzung wurde an einem Demonstratorspant erprobt, der aus 12 Lagen besteht. Der mittlere Radius von diesem Spant beträgt 3000mm und bildet ungefähr den Rumpfquerschnitt des Verkehrsflugzeugs Airbus A350 ab.

Die *Tabelle 2.2* stellt den Lagenaufbau des Spantes sowie die zur Umsetzung verwendeten Technologien dar:

Lage	Technologie	Lagenorientierung	
		Steg	Flange
1	C - Flechter 1	$+30^\circ$	$+30^\circ$
2	D - Wickler	90°	90°
3	E - Flechter 2	-30°	-30°
4	B - Zuführsystem	-	0°
5	B - Zuführsystem	-	0°
6	C - Flechter 1	$+30^\circ$	$+30^\circ$
7	E - Flechter 2	-30°	-30°
8	B - Zuführsystem	-	0°
9	B - Zuführsystem	-	0°
10	C - Flechter 1	-30°	-30°
11	D - Wickler	90°	90°
12	E - Flechter 2	$+30^\circ$	$+30^\circ$

Tab. 2.2: Lagenaufbau des Spant-Demonstrators

Der Vorschub des Flechtkerns wird bei dieser Anordnung nicht von einem sonst üblich verwendeten Roboter durchgeführt, sondern von sechs Transportbändern [A]. Diese Bänder sind im Kreis angeordnet und unterstützen die kontinuierliche Ablage der Geflechtlagen. Um ein gleichmäßiges Lagenbild zu erhalten, wurde eine Hubvorrichtung während der Flechtvorgänge zugeschaltet.

Flechter 1 [C] und 2 [E] sowie der 90° Wickler [D] ermöglichen eine Faserablage von ca. 10° bis 90°. Die 0° konfektionierten Gelegelagen werden mittels Zuführsystem [B] auf dem Kern abgelegt. Zusammenfassend lässt sich damit jeglicher Lagenaufbau von Spanten auf Basis textiler Fertigungstechnologien realisieren. Pro Umlauf können bei dieser Maschinenkonfiguration vier Lagen abgebildet werden.

Das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten übernimmt eine Steuerung. Die Befehle werden über einen Berührungsbildschirm durch den Maschinenbediener an die Fertigungslinie übergeben. Das jeweilige Anflechten muss vom Maschinenbediener manuell durchgeführt werden. Das bedeutet, dass sowohl das C-Fasermaterial der Flechter, des Wicklers sowie des Zuführsystems mit dem Kern manuell verbunden werden müssen. Daher wird das Gesamtsystem als halbautomatisch bezeichnet.

Zusammenfassend die Potenziale der Halbautomatischen-Fertigungslinie:[25]

- Kontinuierliche Herstellung von Preformen mittels UD-Fertigungstechnologien
- Geringer Verschnitt von Fasermaterial
- Fertigungsrate von 50 Preformen pro Tag erzielbar³

Trotz der Potenziale zeigte das Anlagenkonzept auch, dass weitere Untersuchungen nötig sind. Das betrifft u.a. die Prozessführung und Prozessstabilität der Einzeltechnologien.[45]

Im Folgenden wird die Einzeltechnologie Flechten detaillierter betrachtet, speziell der Gegenstand der Prozessstabilität für die Fertigung von UD-Geflechtlagen.

³ Die Aussage bezieht sich auf drei Fertigungslinien mit einer Produktionsgeschwindigkeit von jeweils 1m/min im drei-Schichtbetrieb bei einer Preformlänge des Spantes von ca. 2500mm[23, S.8]

Beschreibung des Flechtprozesses

Die Idee, Flechten als industrietaugliches Fertigungsverfahren für trockene Faserpreformen hoher Stückzahl zu nutzen, wurde von McDonnell Douglas Ende der 1970er-Jahre untersucht.[49, vgl. S.69] Anfang der 1980er-Jahre wurden Rotorblatt-holme für Hubschrauber sowie Rotorblätter für Windturbinen mittels Flechten gefertigt.[44, vgl. S.1]

Flechtmaschinen eignen sich für die Fertigung von flächigen textilen Fasergebilden aus trockenen Kohlenstoff (C)-Faserbündel. Diese Fasergebilde sind orientiert und nicht maschenbildend. Die verwendeten C-Faserbündel sind spröde und stellen anfänglich eine Herausforderung für das industrielle Flechten dar. Die Verarbeitbarkeit von C-Faserbündel verbesserte sich stetig durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und ermöglichte die Fertigung komplexer Preformgeometrien durch die Kombination aus Flechtmaschine, optimierten Spulenhaltern bzw. Klöppel und robotergeführtem Kern, *Abbildung 2.10*.[9, vgl. S. 634.4]

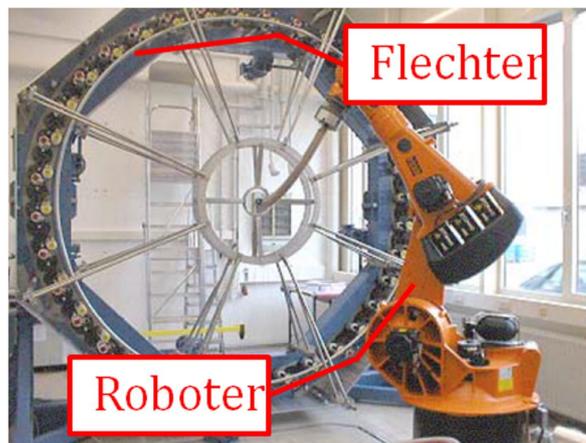


Abb. 2.10: Flechtmaschine und Roboter[9, vgl. S. 634.5]

Industrielle Flechtmaschinen, in dieser Arbeit oft als Flechter bezeichnet, weisen zwei sinusähnliche Gangbahnen auf, die eine gegenläufige Bewegungsrichtung der Klöppel (rot und gelb) erlauben, siehe *Abbildung 2.11*. Der Transport der Klöppel erfolgt über Flügelräder, die um ihre eigene Achse rotieren und nebenein-

ander kreisförmig am Flechter angeordnet sind. Bei jeder halben Rotation wird der Klöppel von einem Flügelrad auf das benachbarte übergeben. Die Klöppelbahnen sind nahezu sinusförmig und es sind keine Wendepunkte in der Klöppelführung vorhanden, weshalb diese Fertigungsart als Rundflechten bezeichnet wird.[78, vgl. S. 7] Die Anzahl der Klöppel ist abhängig von der Baugröße des Flechters. Bei der in *Abbildung 2.10* dargestellten Flechtmaschine beträgt der mittlere Durchmesser der Klöppelbahnen 3000mm und der Flechter kann bis zu 144 Klöppel aufnehmen.[5, S. 9] Die Klöppel sind axial bzw. horizontal auf der Maschine ausgerichtet, daher wird diese Maschinenart Flechter mit axialer Klöppelanordnung bzw. Horizontalflechter genannt. Auf den Klöppeln befinden sich die Spulen mit bevorrateten C-Faserbündel. Jeder Klöppel führt ein C-Faserbündel. Das C-Faserbündel muss aufgrund der horizontalen Klöppelanordnung nahezu orthogonal umgelenkt werden. Dies kann Faserschädigungen zur Folge haben. Als schonender für die Faserbündel hat sich die radiale Anordnung der Klöppel zur Flechtebene erwiesen, sodass Radialflechter bei Verarbeitung von C-Fasermaterial zu bevorzugen sind.

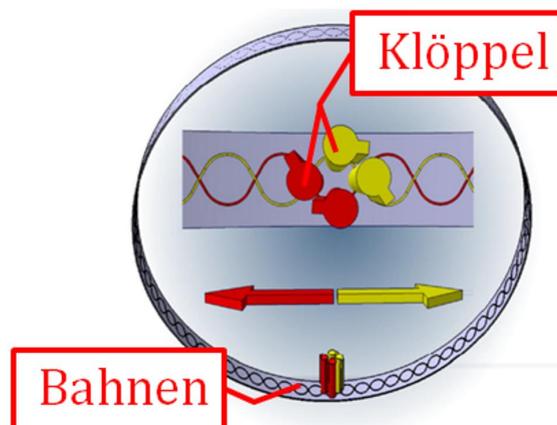


Abb. 2.11: Schematische Darstellung der Klöppel und sinusförmigen Gangbahnen eines Radialflechters[50, vgl. S.27]

Bewegen sich die Klöppel gegenläufig und konstant mit dem jeweiligen C-Faserbündel um einen Kern, der gleichzeitig durch das Zentrum des Flechters mit einer ebenfalls gleichförmigen Bewegung geführt wird, entsteht ein Rundgeflecht bzw. kurz Geflecht, schematisch in *Abbildung 2.12* dargestellt. Um auf allen Kernseiten ein

gleichartiges Geflecht zu erhalten, muss dieser ein geschlossenes Profil und ebene Oberflächen aufweisen. Zusätzlich muss der Kernquerschnitt zentrisch und orthogonal durch die Flechterebene geführt werden. Die Führung des Kerns kann mittels einseitiger Einspannung durch einen Roboter erfolgen, setzt allerdings eine hohe Kernsteifigkeit voraus. Bei einer zu geringen Kernsteifigkeit würde eine merkliche Durchbiegung infolge des Kerngewichts eintreten.

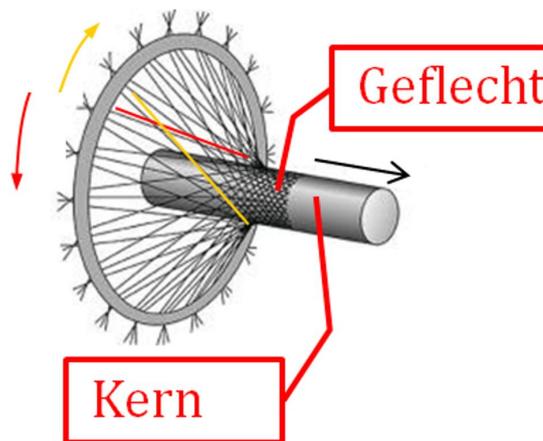


Abb. 2.12: Herstellung des Rundgeflechts[28]

Werden die Klöppel der roten und gelben Bahnen mit C-Faserbündel besetzt, so entsteht ein biaxiales (Biax)-Geflecht, welches in *Abbildung 2.13* dargestellt ist. Die Flechtwinkel γ_1 und γ_2 des Biax-Geflechts werden zwischen den C-Faserrichtungen und der Kernmittelachse in Führungsrichtung bestimmt. Die Faserwinkel sind abhängig von der Klöppelumlaufgeschwindigkeit am Flechter, dem Kernvorschub sowie Kernumfang.[73, S. 388] Bei exakter Einstellung der angesprochenen Parameter können für beide Faserrichtungen, gleiches Material vorausgesetzt, gleiche Ablagewinkel im Bereich von 10° bis 80° realisiert werden.[9, vgl. S. 634.4] Die mehrfachen Überkreuzungen des Fasermaterials erlauben die Fertigung komplexer Preformstrukturen aufgrund der vorhandenen Zwischenfaserreibungen. Dadurch können Faserablagen auf gekrümmten Kernflächen abweichend von der Geodäte⁴ realisiert werden.[13, vgl. S.177]

⁴ Die Geodäte ist die kürzeste Verbindung zweier Punkte auf einer gekrümmten Fläche

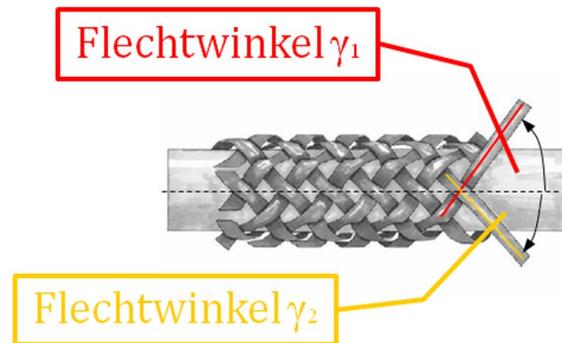


Abb. 2.13: Biax-Geflecht mit Flechtwinkeln[77, vgl. S.5]

Die Preformstrukturen werden Lage nach Lage mit jeweiligen Sollfaserwinkeln geflochten. Strukturen auf Basis von Biax-Geflechten eignen sich für Bauteile, die Schlagbelastungen widerstehen müssen, da die Überkreuzungen sowohl die Energieabsorption erhöhen als auch Delaminationen verringern.[78, S. 86] Delaminationen sind Ablösungen der ausgehärteten Geflechtlagen voneinander und können bei weiterer Belastung zu einem Bauteilversagen führen.

Die Entwicklung vom konventionellen Biax-Geflecht zum UD-Geflecht

Die Überkreuzungen des Fasermaterials haben jedoch indirekt zur Folge, dass die Festigkeits- und Steifigkeitswerte bei gleichem Lagenaufbau nicht an die Werte von ausgehärtetem UD-Prepreg heranreichen. An den Überkreuzungspunkten sind Ondulationen⁵ der Fasern beobachtbar. Werden, mit Bezug auf die *Abbildungen 2.10-2.13*, die C-Faserbündel der roten Klöppelbahn gegen sehr dünne thermoplastische Fäden getauscht, entsteht ein UD-Geflecht.[25] Die Fäden in *Abbildung 2.14* haben die Funktion die Geflechtlage zu stabilisieren und können bspw. mit einem Stützfaden/C-Faserverhältnis von 1 : 2 am Flechter bestückt werden. Die Faserbündel liegen in einer Lagenorientierung vor und die Ondulationen der Fasern sind nahezu nicht mehr vorhanden, wodurch die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu konventionellen Biax-Geflechten gesteigert werden konnten. Die

⁵ Welligkeiten

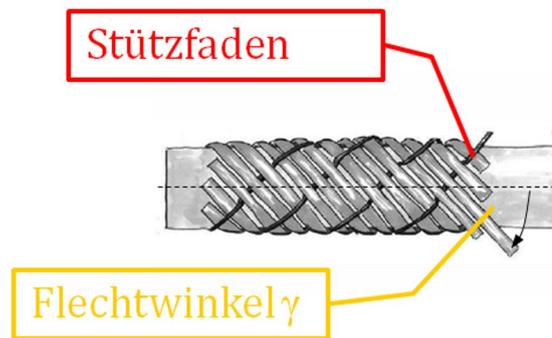


Abb. 2.14: UD-Geflecht mit einer Stützfaden- und C-Faserrichtung[77, vgl. S.5]

Geflechtlagendicke s im Vergleich zum Biax-Geflecht beträgt etwa die Hälfte.

Zusammenfassung der Charakterisierung einer UD-Geflechtlage:[78, vgl. S.55]

- Flechtwinkel γ
- Geflechtlagendicke s
- Ondulationsgrad $\Theta \approx 0$
- Bedeckungsgrad B

Als neue Größe wird der Bedeckungsgrad B eingeführt. B stellt das Verhältnis des Geflechtmaterials auf der Kernoberfläche zur Gesamtoberfläche dar.[78, S. 55] $B = 1$ bedeutet eine vollständige Bedeckung des Kerns mit C-Fasern. Die Stirnseiten des Kerns haben bei der Betrachtung keine Relevanz.

Ist $B < 1$ sind Gaps⁶ im Geflecht vorhanden und bedeuten eine Störung des homogenen Geflechtlagenaufbaus.

Mögliche Ursachen für $B < 1$:[78, S.56]

- Zu wenig mit C-Faserbündel bestückte Klöppel n
- Richtige Anzahl bestückter Klöppel n , aber zu schmale Faserbreite b
- Kerndurchmesser d zu groß
- Flechtwinkel γ abweichend vom Sollflechtwinkel

⁶ Lücken

Im Flugzeugbau sind Gaps zu vermeiden, da der Freiraum mit Harz ausgefüllt wird. In diesen Bereichen hat die Struktur wesentlich geringere mechanische Eigenschaften, da Fasern infolge einer Druckbelastung ausknicken können.[78, vgl. S.55] In anderen Anwendungsfeldern können Gaps in gewissen Bereichen tolerierbar sein, bspw. für Sportartikel oder in der Automobilindustrie.

Die Betrachtungen der angesprochenen Ursachen für $B < 1$ gelten für konstante Einstellparameter. Bei exakter Einstellung von γ , n , b und d kann $B = 1$ theoretisch realisiert werden. Die Parameter n , d sowie γ können als statische Werte während des Flechtprozesses betrachtet werden. Lediglich die Faserbreite b kann sich bei der Herstellung des Geflechts aufgrund mechanischer (u.a. Faserreibung) und dynamischer Einflüsse (u.a. variierende C-Faserbündelspannung infolge von Materialabzug am Klöppel) verändern. Das C-Faserbündel bzw. Roving kann durch die hohe Anzahl der Einzelfasern in der Breite b aufgespreizt werden. Der Querschnitt eines Rovings ist ellipsen- bzw. linsenförmig. Werden die Rovinge gespreizt, so ist eine Veränderung des linsenförmigen Querschnitts zu einem schmalen Rechteck möglich. Wird der flache Roving an den Oberflächen beidseitig mit einem thermoplastischen Material (Binder) benetzt und abgekühlt, so kann die Breite b als konstant angenommen werden. Es können im Vergleich zum unbedingten Roving konstantere Lagendicken und -flächengewichte gefertigt werden. Dies wirkt sich positiv auf die Bauteilsteifigkeit und -festigkeit aus. Rovinge mit konstanter Breite b und Binder werden als Tape bezeichnet.

Um den Abstand zwischen Klöppelebene und Flechtpunkt gering zu halten, wird Umlenkring 1 vor die Flechtebene montiert. Um die Scherbelastungen infolge des Stützgarnkontakts am Tape zu verringern, ist die Montage eines weiteren Umlenkrings 2 möglich, *siehe Abbildung 2.15*. Dieser kann Hubbewegungen periodisch ausführen und wird gesamtheitlich als Hubvorrichtung bezeichnet.[22] Eine weitere Möglichkeit die Scherbelastungen zu verringern, ist eine abgestimmte Wahl der Klöppelfederspannung für die Tapes und Stützfäden. Die Klöppelfedern haben die Funktion die Tapes und Stützfäden zu strecken bzw. vorzuspannen und ermöglichen die Ablage des Materials auf dem Kern.

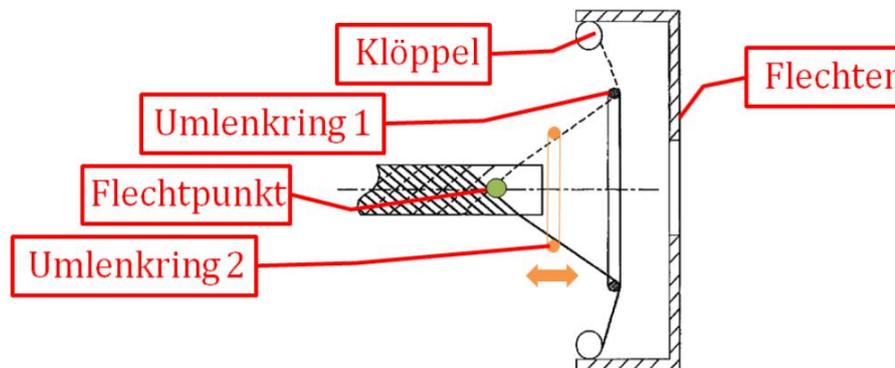


Abb. 2.15: Umlenkring 1, Umlenkring 2 und Flechtzentrum[25]

Zusammenfassend bietet das konventionelle Flechtverfahren folgende Potenziale:

- Realisierung endkonturnaher Bauteile[11, vgl. S.46]
- Ablage des Flechtwinkels im Bereich 10° bis 80° realisierbar[9, vgl. S. 634.4]
- Automatisierungspotenzial[11, vgl. S.46]
- Möglichkeit der strukturellen Integrität[11, vgl. S.46]
- Verschiedene Stützfäden und C-Faserbündel Materialpaarungen[17, vgl. 6-15]
- Kostengünstige Ausgangsmaterialien[17, vgl. S.6-15]
- Geringer Verschnitt und dadurch ressourcenschonend[23, vgl. S.8]
- Hohe Produktionsraten möglich[23, vgl. S.8]
- Geringere Herstellungskosten im Vergleich zur Prepreg-Technologie[23, vgl. S.8]
- UD-Geflecht: Höhere Festigkeits- und Steifigkeitswerte als beim Biax-Geflecht, C-Faserschädigung gering aufgrund marginaler Reibungskräfte (Stützfäden)

Folgende Randbedingungen sind allerdings zu beachten:[7, vgl. S.7]

- Konkave Kernquerschnitte können nicht umflochten werden
- Kerne mit Rechteckquerschnitt bedeuten Flechtwinkelabweichungen
- 90° Geflechtlagen nicht direkt umsetzbar
- Preformquerschnitt ist abhängig von der Flechtergröße[75, vgl. S.8]

- Querschnittsveränderungen des Kerns erfordern eine Prozessregelung
- Zentrischer und orthogonaler Kerneinschub durch die Flechtebene erforderlich
- Fehlerhafte Maschineneinstellungen führen zu Defekten im Geflecht

Die optimalen Einstellungen der Prozessparameter müssen durch Flechtversuche ermittelt werden, um die gewünschten Geflechteigenschaften zu erzielen und eine gute Prozessstabilität nachzuweisen.

Die bisherigen Erkenntnisse zu den Geflechteigenschaften und -modelldarstellungen werden im Folgenden zusammengefasst:

- Der Flechtwinkel γ und der Bedeckungsgrad B charakterisieren maßgeblich die Lagentopographie und stellen die Qualitätsmerkmale des UD-Geflechts dar.
- Abweichungen der Sollvorgaben von γ und $B < 1$ bedeuten Gaps. Gaps sind Strukturdefekte und können trotz richtiger analytischer Auslegung und Einstellung der Prozessparameter Kernvorschub v_{tu} und Klöppelumlaufgeschwindigkeit ω im Geflecht vorkommen. Voraussetzung: zentrischer und orthogonaler Kerneinschub durch die Flechtebene.
- Für die Berechnung von γ und B werden geometrische und kinematische Modelle verwendet.[78]

$$\gamma = \arctan \frac{d\omega}{2v_{tu}} \quad (2.1)$$

$$B = \frac{\pi d}{n} \quad (2.2)$$

- Der mögliche Einfluss von Zusatzapparaturen, z.B. der Hubvorrichtung, auf die Topographie des Geflechts wird in den Modellen nicht berücksichtigt.

Fazit: Die Modelle berücksichtigen ausschließlich geometrische und kinematische Zusammenhänge. Weitere physikalische Zusammenhänge, bspw. Klöppelfederspannungen und vorhandene Reibungskräfte zwischen Tapes und Stützfäden, werden **nicht** berücksichtigt.[73, S.388][7, S.21] Folglich können Defekte im Ablagebild des Geflechts entstehen, die in Kapitel 2.4 detaillierter betrachtet werden.

Beispielanwendungen für Geflechtstrukturen

Überblick von Strukturbauteilen im Luftfahrtbereich, die mittels Flechtverfahren gefertigt werden:

- Hauptfahrwerk des Transporthubschraubers NH90[7, vgl. S.8]
- Höhenleitwerksholm für Falcon Business Jets[45]
- Rumpf des Flugkörpers Joint Air-to-Surface Standoff Missile (JASSM)[59]
- Lufterlass des Militärflugzeugs F-35[58]
- Fan-Gehäuse für Triebwerke[30]



Abb. 2.16: Geflochtener JASSM-Flugkörper[47, 60]

Am Beispiel des Flugkörpers JASSM von Lockheed Martin konnte gezeigt werden, dass die OoA-Verfahren aus der Kombination von Flecht- und Harzinfusionstechnologie erfolgreich für die FVW-Herstellung eingesetzt werden konnten. Im direkten Vergleich zur Prepreg-/Autoklave-Technologie können Einsparungen von 19 Millionen Dollar über das gesamte Flugkörperprogramm realisiert werden. Der Faservolumengehalt lag bei den Geflechtlagen bei 58% und ist auch im Vergleich zu Prepreg-Faservolumengehalten von 60-65% als sehr gut einzustufen.[59] Der Faservolumengehalt ist der Quotient aus reinem Faseranteil zu ausgehärtetem faserverstärktem Kunststoff.

2.4 Darstellung der Defekte des UD-Geflechts

In *Kapitel 2.3* wurde bei C-Faserbündeln zwischen Roving und Tape unterschieden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verwendung von Tapes für die Fertigung von UD-Geflechten näher betrachtet. Die folgenden Darstellungen der potenziellen Defekte beziehen sich daher ausschließlich auf UD-Geflechte, die auf Basis von Tapes gefertigt werden:

- Stützfaden- und Taperiss: Um Defekten u.a. schon vor dem Herstellungsprozess vorzubeugen, muss das zu verwendende Material der Flechtmaschinenperipherie entsprechen. Sind bspw. die Klöppelfederkräfte zu stark, reißt der sehr dünne Stützfaden, vgl. *Abbildung 2.17* - innerhalb des roten Rechtecks, in dem ein Stützfaden fehlt.

Der Taperiss wird ebenfalls durch ein rotes Rechteck hervorgehoben und ist bei diffuser Beleuchtung sehr schwer zu erkennen, vgl. *Abbildung 2.18*.

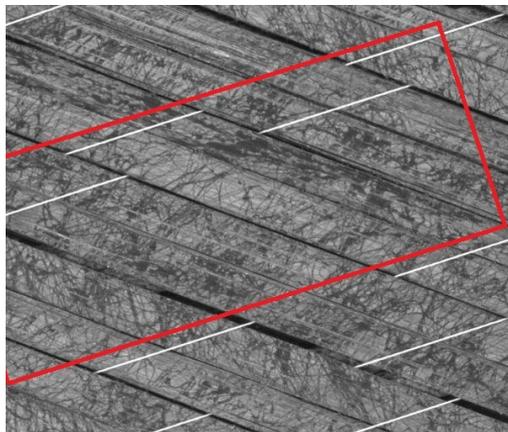


Abb. 2.17: Stützfadenriss

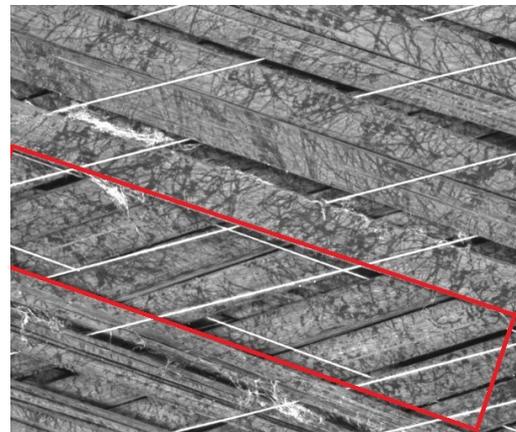


Abb. 2.18: Taperiss

- Fehlerhafter Binderanteil des Tapes: Ist der Anteil des Binders aufgrund fehlerhafter Herstellung ab Werk zu hoch, vgl. *Abbildung 2.19*, kann das negative Folgen für die Infusion der Kunststoffmatrix zwischen die Fasern bedeuten. Ein zu geringer Tape-Binderanteil ist in *Abbildung 2.20* dargestellt und kann zu einer nicht optimalen Fixierung der Fasern führen.

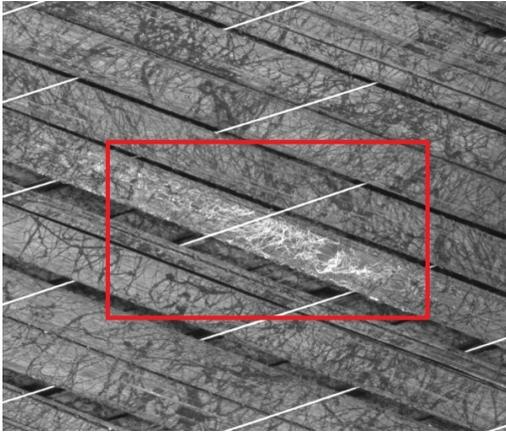


Abb. 2.19: Binderanteil zu hoch

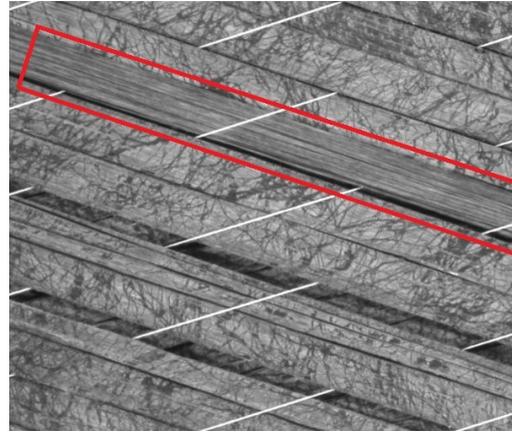


Abb. 2.20: Binderanteil zu niedrig

- Fremdkörper und Verunreinigungen: Fremdkörper, in *Abbildung 2.21* dargestellt durch ein rechteckiges Stück Papier, beeinflussen bspw. den Lagenaufbau negativ und damit u.a. die geometrischen Anforderungen des Preforms für nachfolgende Verarbeitungsschritte.

Verunreinigungen auf den Tapes, bspw. durch Schmutz exemplarisch in *Abbildung 2.22* als graue Fläche dargestellt, können infolge einer ungenügend reinen Produktionsumgebung auftreten und verringern eine optimale Grenzflächenhaftung zwischen Kunststoffmatrix und Fasern. Eine mangelhafte Verbindung zwischen Kunststoffmatrix und Fasern wirkt sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften des FVW aus.

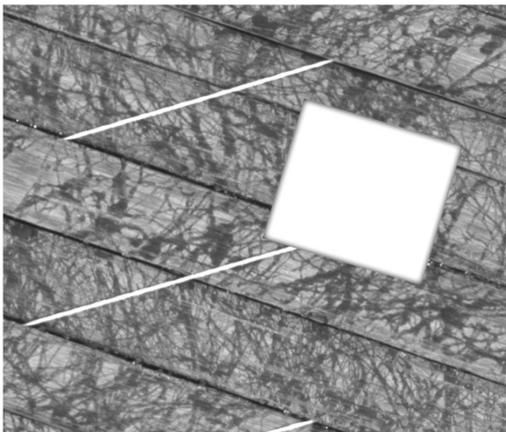


Abb. 2.21: Fremdkörper

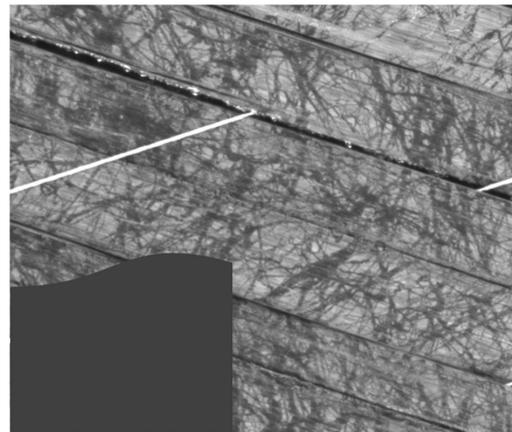


Abb. 2.22: Verunreinigungen

- Abweichungen Sollwinkel: Befinden sich die Flechtwinkel einer Einzellage außerhalb der jeweiligen Toleranzen, so kann die Einzellage im späteren FVW die erwarteten Belastungen nicht gerecht aufnehmen. Fertigungsabweichungen dieser Art können zu einem Bauteilversagen führen. Die grüne Linie repräsentiert den Sollwinkel, die rote Linie einen Flechtwinkel der nicht dem Fertigungssollwert entspricht, siehe exemplarisch in *Abbildung 2.23*.

Zusätzlich ist der sogenannte S-Schlag bzw. Z-Schlag der Tapes, wie in *Abbildung 2.24* dargestellt, konstruktiv und verfahrenstechnisch zu vermeiden. Konstruktiv, wenn möglich durch die Verwendung von runden Kernquerschnittsprofilen und verfahrenstechnisch durch eine zentrische Kernführung durch die Flechtebene.[78, vgl S.52]

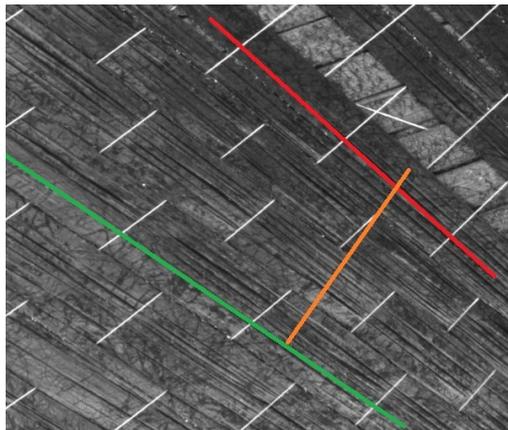


Abb. 2.23: Ungleiche Flechtwinkel

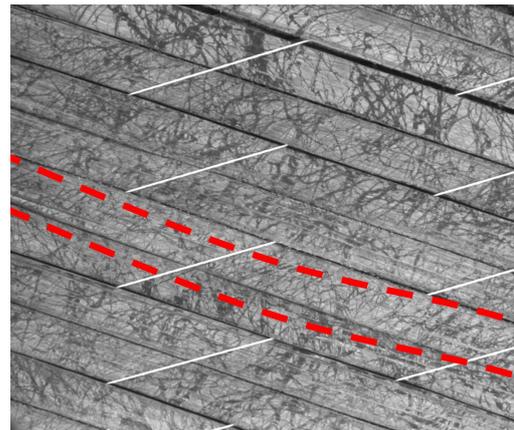


Abb. 2.24: S-Schlag exemplarisch

- Vermeidung von Gaps: Ist die Breite des Tapes zu schmal, entstehen im Abgebild des Geflechts Gaps, siehe dunklere Bereiche in *Abbildung 2.25*. Die Tapes können während des Flechtvorgangs infolge des Überkreuzens mit den Stützfäden in der Breite gestaucht werden, welches unter Verwendung u.a. einer Hubvorrichtung weitestgehend vermieden werden kann.

Ebenfalls kann eine Verdrehung des Tapes, siehe *Abbildung 2.26*, die Ausgangsbreite des Tapes stark verkleinern. Die Ursache liegt in einem fehlerhaften Umspulprozess von den Spulen ab Werk zu den kleineren Flechtspulen.

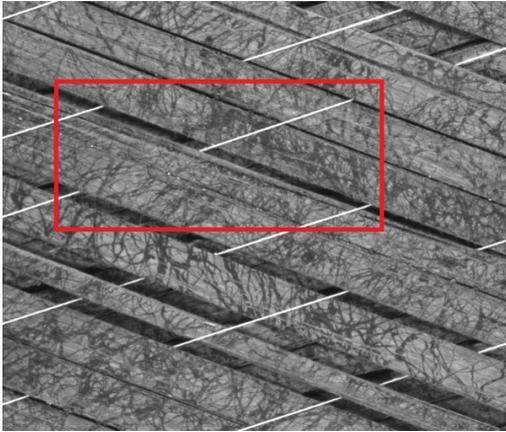


Abb. 2.25: Stauchung Tape

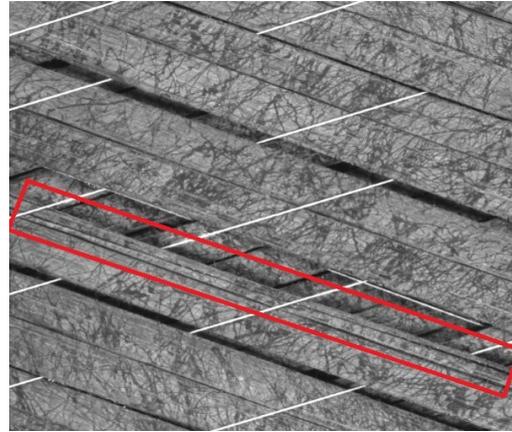


Abb. 2.26: Verdrehung Tape

Lassen sich Gaps aufgrund der geometrischen Komplexität bestimmter Bauteile nicht vermeiden, so ist die Breite und Häufigkeit der Gaps zu minimieren. In *Abbildung 2.27* sind beispielhaft vier schmale Gaps dargestellt.

Problematisch können allerdings zu große Abstände zwischen den Tapes werden, siehe *Abbildung 2.28*. Bei der Infusion werden die Gaps von der Kunststoffmatrix ausgefüllt und verbleiben nach Aushärtung im FVW. Entsprechende Belastungen werden dadurch nicht von den Fasern aufgenommen, sondern von der im Vergleich zu den Fasern schwachen Matrix. Dies beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des Bauteils negativ.

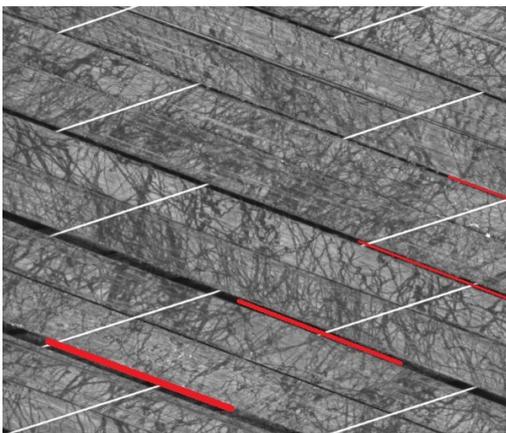


Abb. 2.27: Schmale Gaps

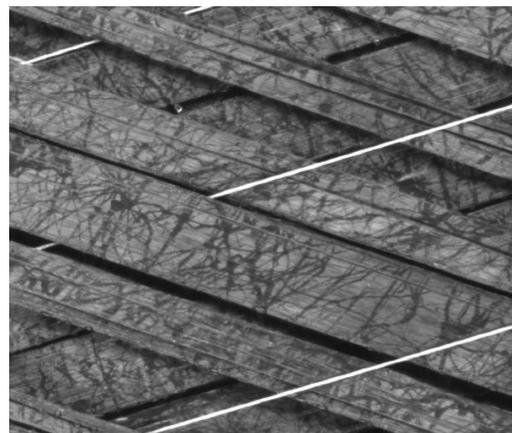


Abb. 2.28: Breite Gaps

2.5 Qualitätssicherungssysteme für textile Preformen

Falsche Konzipierung sowie mangelnde Bauteilqualität können katastrophale Folgen für den Betrieb eines Luftfahrzeugs bedeuten. Daher ist es unerlässlich, das Gesamtsystem Flugzeug qualitativ hochwertig herzustellen und die Produktion zu kontrollieren und zu dokumentieren. Normen helfen einen einheitlichen Standard für verschiedene Zertifizierungen festzulegen und hiermit Organisationen und Herstellungsbetriebe zu bewerten.[81, S.8] Entsprechende Normenreihen sind auf die speziellen Belange der Luft- und Raumfahrtindustrie ausgerichtet. Diese basieren heutzutage auf der ISO 9001 : 2008 und beinhalten neben der Norm für die Zertifizierung zusätzliche Anforderungen, die als EN 9100 bekannt sind.

Hervorzuheben ist, dass die EN 9100 nicht nur luftfahrttechnische Zertifizierungen beinhaltet, speziell was die Entwicklung und Herstellung betrifft. Grundsätzlich sind Tier-One-Systemlieferanten im europäischen Raum EN 9100 zertifiziert.[42] Die Norm wurde für die Luftfahrtindustrie seitens der *International Aerospace Quality Group (IAQG)* publiziert.[38, S.4]

Der prozess- bzw. produktorientierte Qualitätsmanagement (QM)-Kreislauf ist in *Abbildung 2.29* dargestellt und hat als Ziel die ständige Verbesserung des QM zum Vorteil des Kunden.[38, S.6]

Bei dem prozessorientierten QM-Kreislauf steht neben der Realisierung des Produktes auch die Messung und Analyse der Produkteigenschaften und eine mögliche Verbesserung des Produkts im Vordergrund. Das betrifft alle Prozesse der Produktherstellung inklusive der Teilprozesse und Arbeitsschritte, da die Produkte letztendlich für ein produzierendes Unternehmen wertschöpfend bzw. profitabel sein müssen.

Relevant kann ebenfalls die Forderung der Nachweispflicht sowie der Rückverfolgbarkeit eines Produktes sein. Das bedeutet, dass der gesamte Produktherstellungsprozess dokumentiert werden muss, bspw. mittels QS-System. QS-Systeme haben allerdings keinen direkten Anteil an der Wertschöpfung, sondern erfordern eine Prüfmittelinvestition sowie Auswahl und Schulung von Mitarbeitern.

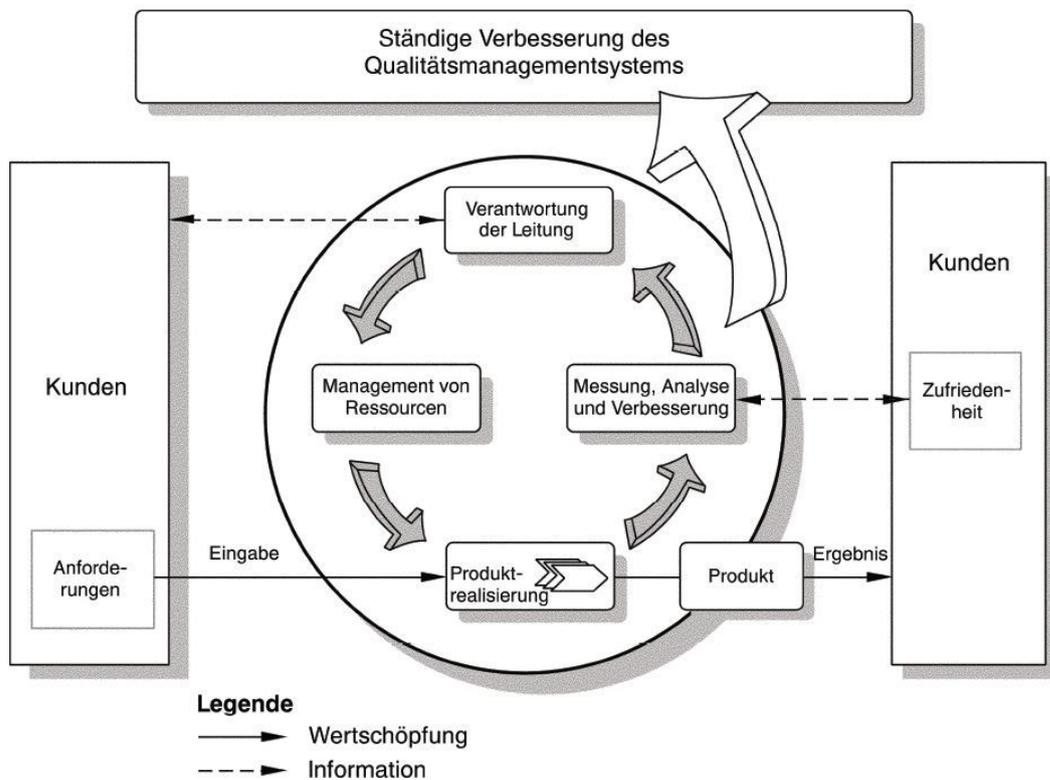


Abb. 2.29: Qualitätsmanagement-Kreislauf[38]

Bei Luftfahrtprodukten aus FVW erfolgt die Prüfung oft am Ende des Herstellungsprozesses mittels zerstörungsfreier Werkstoffprüfung (ZfP). Fehler bzw. Defekte die während der Herstellung auftreten, können daher unzureichend detektiert und identifiziert werden.

Für den in dieser Arbeit betrachteten UD-Flechtprozess bedeutet das, dass bspw. die für die strukturellen Eigenschaften des Bauteils relevanten Merkmale wie Sollflechtwinkel sowie potenziell vorhandene Gaps in den Geflechtlagen zu spät identifiziert werden.

Zielführend ist daher der Einsatz einer prozessbegleitenden Mess- und Analysetechnologie, d.h. die Durchführung einer Online-Inspektion bzw. in-situ Prüfung. Im Folgenden werden drei Prüfverfahren kurz vorgestellt, die die relevanten Merkmale Faserwinkel und Gaps für geflochtene Einzellagen detektieren können.

- Optisches Verfahren im sichtbaren Wellenlängenbereich

Systeme auf optischer Basis werden in der Industrie aufgrund des günstigen Preises und der Vielzahl am Markt erhältlichen optischen Komponenten bevorzugt eingesetzt. Die Systeme bestehen hauptsächlich aus Kamera und Rechner, Objektiv sowie Beleuchtung. In der Elektroindustrie werden bspw. zur Positionierung von Platinen sowie zur sogenannten Vollständigkeitsprüfung fertig bestückte Platinen mittels optischem System als Bild erfasst und mit einem korrekt bestückten Platinenbild verglichen. Hierdurch können in kurzen Taktzeiten viele Platinen geprüft werden.

Optische Systeme werden in der Industrie oft als Machine-Vision-Systeme bezeichnet und bieten über die Objekterkennung, der Lageerkennung bis hin zur Oberflächeninspektion verschiedene Anwendungsmöglichkeiten.[4, vgl. S.19] Diese Systeme sind zuverlässig und erlauben aufgrund der stetigen Weiterentwicklung der Software-Algorithmen sowie der immer leistungsstärkeren Hardware eine schnelle Bildaufnahme und -auswertung.[61]

- Optisches Verfahren im Infrarot-Wellenlängenbereich

Bei diesen Systemen wird zwischen aktiver und passiver Thermographie unterschieden. Aktive Systeme werden benutzt, um die Materialoberfläche thermisch zu aktivieren und anschließend auf Temperaturunterschiede zu untersuchen. Wichtige Parameter für die Untersuchung sind die Wärme- bzw. die Temperaturleitfähigkeit des jeweiligen Materials oder der Materialpaarung.[4, vgl. S.373]

Nach thermischer Anregung werden mit einem Infrarot-Thermographiekamerasystem Aufnahmen von dem Objekt erstellt. Die Anregung kann rückseitig oder frontseitig mittels Leuchtdioden-Panel, Blitzlampe oder Carbonstrahlern einmalig oder periodisch erfolgen.[46] Dieses Verfahren wird bspw. bei der Kontrolle für Photovoltaikmodulen verwendet und prüft die Module auf entsprechende Fehlstellen. Mittels der Fourier Transformation, die die Pixelinformationen aus der Zeit in den Frequenzbereich transformiert, besteht die

Möglichkeit, lokale Maxima zu detektieren und Rückschlüsse auf die Faserwinkelorientierung im dargestellten Bildbereich zu ziehen.[88]

- Elektrisch-magnetisches Verfahren Wirbelstrom

Das Wirkungsprinzip basiert auf induzierten Wirbelströmen in den Kohlenstofffasern. Angeregt werden die Wirbelströme durch Wechselspannung von einer Erregerspule bzw. vorhandenem Spulenarray, welches sich in einer maximalen Entfernung von 0,5mm zu den Fasern befindet. Aufgrund der dem ursprünglichen Wechselfeld teilweise entgegen gerichteten induzierten Magnetfelder, kommt es an der Prüfspule zu merklichen Impedanzänderungen.[34]

Gaps, aber auch lokale Mengenabweichungen von Fasermaterial verändern die kapazitiven Kopplungen und Leitfähigkeiten der Fasern zueinander und führen zu messbaren Effekten. Die Effekte können über Bilder dargestellt werden.[34] Eine Transformation der Bilddaten ermöglicht die Bestimmung der Faserwinkel von textilen Halbzeugen und FVW. Darüber hinaus bietet das Verfahren die Möglichkeit für nicht sichtbare Lagen die Qualitätsmerkmale Faserwinkel und Gaps zu untersuchen. Allerdings ist es verfahrenstechnisch nicht möglich identifizieren zu können, welche Lage das jeweilige Merkmal aufweist und erfordert eine Referenz zum Lagenaufbau.

Das Wirbelstromverfahren wird vor allem für die Schadenserkennung bei Flugzeugrümpfen aus Aluminium eingesetzt.

Zusammenfassung der vorgestellten Verfahren und weiteres Vorgehen:

- Die vorgestellte Auswahl der optischen bzw. elektrisch-magnetischen Verfahren kann die für diese Arbeit relevanten Merkmale Faserwinkel und Gaps des UD-Geflechts detektieren.
- Die industrielle Bildverarbeitung im sichtbaren Wellenlängenbereich bietet größeres Potenzial, Faserwinkel und Gaps während der Fertigung ohne erhebliche zeitliche Verzögerungen und daher in-situ zu prüfen. Im weiteren Vorgehen wird der Fokus auf industrielle Bildverarbeitungssysteme gelegt.

Industrielle Bildverarbeitung

Systeme auf optischer Basis sind oftmals unter dem Begriff Bildverarbeitungssysteme bekannt. Die Bildverarbeitung bzw. die digitale Bildverarbeitung ist hier ein umfassender Begriff, der eine Vielzahl von Prozessen mit hauptsächlichem Ziel der Gewinnung nützlicher Merkmale aus einem Bild oder einer Folge aus Bildern hat.[14, S.2]

Die industrielle Bildverarbeitung ist eine interdisziplinäre Aufgabe, da diese verschiedene Kompetenzbereiche beinhaltet. Hervorgehoben sei die Entwicklung geeigneter Software nach anwendungsbezogener Aufgabenstellung und Einbezug modernster Hardware. Für erste Anwendungen im Bereich der Bildverarbeitung eignen sich sogenannte Werkzeugkästen, bspw. in der Matlab-Programmumgebung. Für individuellere Anwendungen und unabhängige Softwareentwicklungen bietet sich die Verwendung der OpenCV Algorithmenbibliotheken an.

Neben der Software, die sich keinesfalls auf die Algorithmenentwicklung beschränkt, ist die Beleuchtungsumgebung ein ebenfalls nicht unbedeutender Aspekt. Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, sollten Beleuchtungs- und Bildauswertungsalgorithmen aufeinander abgestimmt werden. Zuvor muss geklärt werden, was genau Gegenstand der Objektuntersuchung sein soll, um die Anforderungen an das Bildverarbeitungssystem überhaupt festlegen zu können.

Zusammenfassend dargelegt, beinhaltet die industrielle Bildverarbeitung die Bereiche der Hard- und Softwareumgebung sowie Beleuchtung und ggf. weitere Peripheriegeräte. Im Folgenden wird eine kurze Einführung in bildverarbeitende Systeme vorgenommen, die sich hauptsächlich aus den beiden Funktionsbausteinen Bildaufnahme und -auswertung zusammensetzt.[4, S.22]

Bildaufnahme

Die Bildaufnahme eines Prüf- bzw. Messsystems bildet den ersten Schritt der Bildverarbeitung. Mittels geeigneter Auswahl der Peripherie-Komponenten ist es möglich

ein Bild entsprechend der jeweiligen Bedingungen aufzunehmen. Es wird bewusst von Bild und nicht Objekt gesprochen, da mit der Komponente Kamera nicht das Messobjekt aufgenommen wird, sondern dessen Wirkung auf die gegebene Beleuchtung.[3, S.14] In dem anschließenden *Kapitel 3* wird exemplarisch gezeigt, wie relevant die Beleuchtungstechnik auf die jeweilige Merkmalsextraktion des Bildes ist. Folgende Komponenten werden für die Bildaufnahme benötigt:[4, S.22]

- Kamera

Im Zeitalter der digitalen Bilderfassung erfolgt die optische Abbildung nicht mehr auf einem Film, sondern auf lichtempfindlichen Halbleiterelementen, den sogenannten Pixeln. Durch den inneren Photoeffekt werden Ladungsträger in der Sperrschicht der Photodioden getrennt und in sogenannte Ausleseregister übernommen und ausgewertet.[14, S.29ff] Hierbei gibt es verschiedene Wandler-Architekturen.

Die Auswahl des Halbleiterelements/Chips wird nach geforderter Aufnahmegeschwindigkeit bzw. Dynamik und gewünschter Auflösung getroffen. Am häufigsten werden Charged-Coupled Device (CCD) Chips in sogenannter Matrixform verwendet. Diese Art des Kamerasensortyps misst im Vergleich zu Infrarotkameras nicht die Wellenlänge bzw. Frequenz, sondern die Lichtintensität.[14, S.34ff] Der entsprechende digitalisierte Helligkeitswert wird Grauwert genannt.[14, S.47]

Industriekameras können mehr als 24.000.000 Pixel aufweisen. Die seitens des Herstellers angebotene Software ermöglicht verschiedene Einstellmöglichkeiten der Kamera. Beispielsweise können Gamma-Korrekturen und Shutter-Einstellungen vorgenommen werden, um die Kamera auf die jeweilige Umgebungssituation einzustellen. Die eingestellte Beleuchtungszeit ist stets ein Kompromiss aus vorhandener Beleuchtungsintensität sowie der Dynamik des gewählten Messobjekts.

Beachtet werden sollte, speziell im Hinblick auf die Auswertungsalgorithmen, das sogenannte Rauschen infolge unzureichender Beleuchtung bzw. Temperatur-

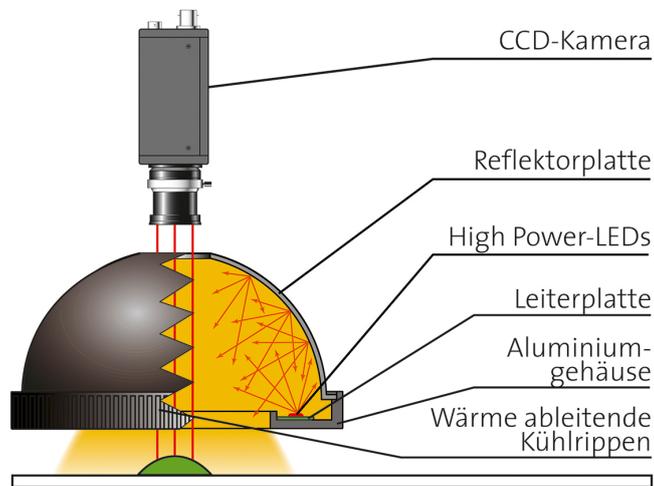
anfälligkeit der Kamera. Besonders bei sehr langen Nutzungszeiten kann die Temperatur der Kamera Werte von mehr als 40°C erreichen. Verrauschte Pixel können dann als Merkmalswert des Objekts interpretiert werden und nicht als Folge unzureichender Kühlung. Entsprechendes gilt es im Datenblatt der Kamera zu beachten. Abschließend werden die erfassten Sensordaten per Auswertungs elektronik auf dem internen Kamerachip, bspw. via Ethernet, an andere Komponenten weitergeleitet.[4, S.23]

- Beleuchtung

Die Beleuchtung hat großen Einfluss auf die Bildaufnahme und den Erfolg der anschließenden Auswertung. Eine dem Untersuchungsgegenstand angepasste Beleuchtung muss daher gewählt bzw. entwickelt werden, um nachgeschaltete Verarbeitungen seitens des Auswertungsalgorithmus zu vermeiden. Relevant und nutzbar ist hierbei der schmale Bereich des sichtbaren Lichts von 380 bis 780nm , wobei das Aufnahmespektrum der Bildsensoren im Bereich von 350 bis 1000nm liegt.[3, S.14]

Maß für die wahrgenommene Helligkeit ist die Leuchtdichte, die das Verhältnis aus Lichtstärke zu Abstrahlfläche in m^2 darstellt. Die Lichtstärke I wird bspw. bei der Leuchtmittelart Light-Emitting Diodes (LED) angegeben und kann für Berechnungen der Beleuchtungsstärke E_v über den Raumwinkel Ω gesamtheitlich dargestellt werden.[3, S.17] Über die Zeit lässt sich die entsprechende Belichtung integrieren.

Mit Bezug auf das zu untersuchende Kohlenstofffaser-Material wird deutlich, dass die Beleuchtungsrichtung erheblichen Einfluss auf das Reflexionsverhalten des Werkstoffs hat. Sinnvoll sind Beleuchtungssysteme, die eine ungerichtete bzw. diffuse Beleuchtung aufweisen. Diffuse Beleuchtungen können bspw. mittels Beleuchtungs dome realisiert werden. Das Licht, aus den im Ring angeordneten LEDs, wird an der halbkugelförmigen Innenfläche in unterschiedliche Richtungen reflektiert und trifft auf dem zu untersuchenden Gegenstand diffus auf.

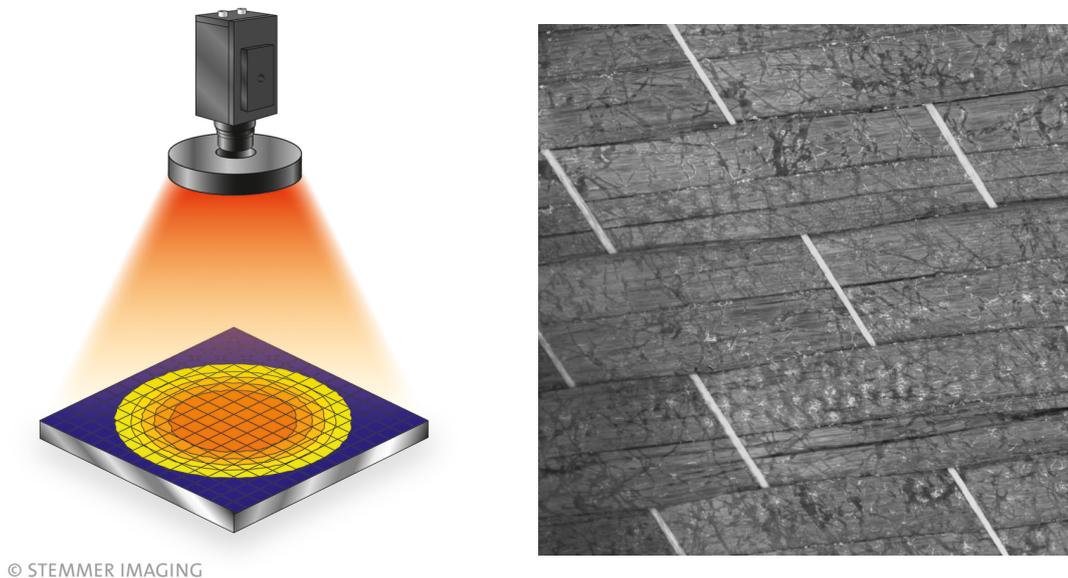


© STEMMER IMAGING

Abb. 2.30: Beleuchtungsart Lichtdome[54]

Die *Abbildung 2.30* stellt einen schematischen Aufbau aus Kamera und Beleuchtung dar. Die dargestellte Beleuchtungsart Lichtdome wird klassischerweise sehr nah am zu untersuchenden Objekt positioniert. Für ebene Strukturen eignet sich daher dieses Beleuchtungsverfahren gut. Ist die Untersuchung von gekrümmten Strukturen relevant, wie bspw. der in *Kapitel 2.2* angesprochene Flugzeugspant, kann es mit dieser Beleuchtungsart zu geometrischen Kollisionen zwischen Gehäuse und Struktur kommen. Dies ist aufgrund der angestrebten berührungslosen Untersuchungsart zu vermeiden, da physikalische Einwirkungen auf den Preform bzw. der zu untersuchenden Lage wahrscheinlich sind. Darüber hinaus sind die lateralen Abmessungen bei entsprechend großen Objektbereichen nicht zu vernachlässigen. Hier kann bspw. die Öffnung der Reflektorplatte für die Kamera 30mm betragen und respektive der Außendurchmesser des Lichtdomes 200mm .

Allerdings ist bei dieser Konfiguration eine direkte Sichtprüfung der LEDs auf Funktion nicht möglich, da dies eine entsprechende Demontage des Beleuchtungsdomes notwendig machen würde. Als High-Power LEDs können verschiedene Beleuchtungsfarben, bspw. kalt-weiß, eingesetzt werden.



© STEMMER IMAGING

Abb. 2.31: Helligkeitsverteilung schematisch und im realen Bild[54]

In *Abbildung 2.31* ist die schematische Verteilung der Helligkeits- bzw. Lichtintensität dargestellt. Die Lichtintensität ist im Zentrum am höchsten und nimmt nach außen hin ab, welches nicht optimal ausgeleuchtete Randregionen im Bild zur Folge hat, siehe gelbe (dunklere Bereiche) in der linken Abbildung.

Das Helligkeitsgefälle kann die für die Bildauswertung notwendigen Bildalgorithmen negativ beeinflussen und möglicherweise Fehlinterpretationen als Folge haben.

Vorteilhaft an dieser Beleuchtungsart ist, dass aufgrund der diffusen Ausleuchtung der Objektoberfläche der Flechtwinkel des Kohlenstoffasertapes keine Relevanz darstellt, siehe rechte Abbildung im realen Bild. Starke Reflexionen bei z.B. gerichteter Beleuchtung, die sich als überbelichtete weiße Pixel im Bild äußern, können vermieden werden.

Die Beleuchtungsart Lichtdome eignet sich für die Beleuchtung des Tapematerials. Flechtwinkel sowie Gaps können optisch erkannt werden. Den Einfluss der angesprochenen Helligkeitsverteilung gilt es allerdings zu berücksichtigen.

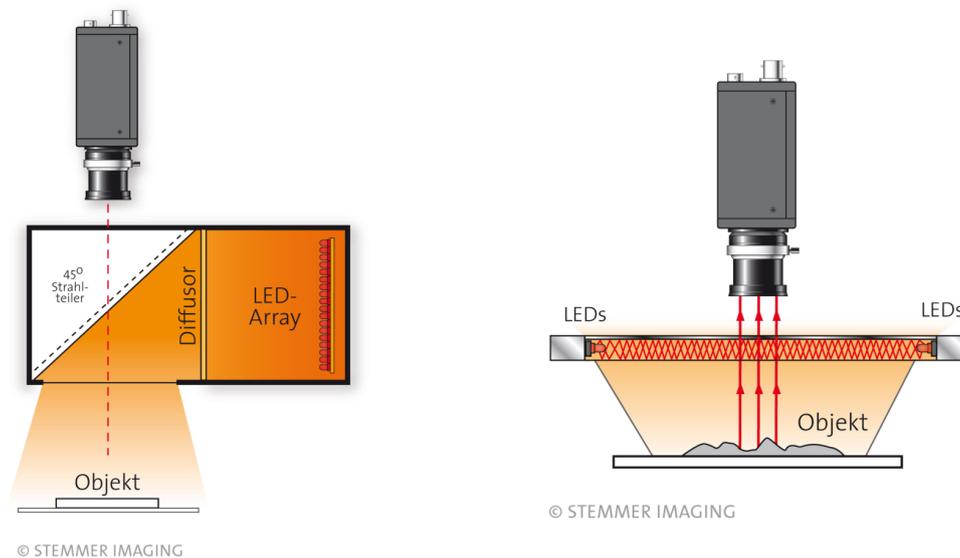


Abb. 2.32: Weitere Diffusbeleuchtungen: Koaxial- und Flatdome[54]

Die *Abbildung 2.32* stellt zwei weitere Möglichkeiten der Diffusbeleuchtung dar. Die Koaxialbeleuchtung wird bspw. für die Überprüfung von stark reflektierenden Oberflächen eingesetzt. Das Licht aus dem koaxial befestigten LED-Array wird am Diffusor gebeugt und erscheint ungerichtet bezüglich der Beleuchtungsrichtung. An der Strahlteilerplatte (SP) wird ein Teil des Lichtes, je nach Teilungsverhältnis, reflektiert und trifft auf das Objekt auf. Zu beachten ist, dass an der SP das Bild des Objekts ebenfalls gebeugt wird und nur Geräte für kleinere Objektsichtfelder verfügbar sind.

Für größere Objektsichtfelder kann der Flatdome geeignet sein. Das Licht aus den rundherum angebrachten LEDs wird im Acrylglas an den Oberflächen totalreflektiert, vgl. *Anhang A1*. An den aufgetragenen Dots auf der Oberseite des Glases wird das Licht gestreut, sodass diese Beleuchtungsart die Koaxial- mit der Domebeleuchtung kombiniert.[54, S.62] Der Vorteil ist eine homogene Lichtverteilung, wobei erwähnt werden muss, dass die Dots aufgrund der Durchsicht von der Kamera aufgenommen werden.

- Objektiv

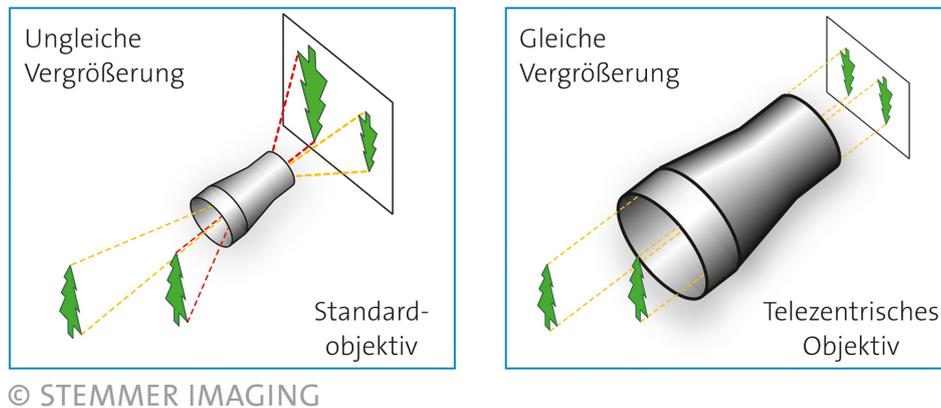


Abb. 2.33: Vergleich Standard- und telezentrisches Objektiv[54]

Durch das Objektiv wird das beleuchtete Untersuchungsobjekt auf dem Chip der Kamera abgebildet, oder wie in *Abbildung 2.33* dargestellt, auf einer Mattscheibe. Im linken Bild ist ersichtlich, dass das Objektiv die Abmessungen des Objekts bestimmt und erheblichen Einfluss auf das Auflösungsvermögen des Gesamtsystems hat.[4, vgl. S.23] Die Art des Objektivs ist somit für den Untersuchungserfolg entscheidend. Für Messaufgaben eignen sich daher telezentrische Objektive, da diese ebene bis leicht gekrümmte Strukturen verzerrungsfrei darstellen.

Auch unterschiedliche Objektabstände beeinträchtigen die Aufnahme in gewissen Bereichen nicht und können diese, im Vergleich zu Makro-Objektiven, nahezu vergrößerungs- bzw. verkleinerungsneutral darstellen. Telezentrische Objektive sind in verschiedenen Größen nutzbar und haben systembedingte Arbeitsabstände. Es muss jedoch aufgrund der parallel verlaufenden Objektstrahlen beachtet werden, dass die Frontlinse mindestens die Größe des zu untersuchenden Objekts aufweisen sollte.[54, vgl. S. 145] Dies erklärt auch meist die Größe und Schwere dieser Objektive, die neben dem Kameraanschluss bei

der Integration zu beachten sind. Objektiv und Kamera müssen aufeinander abgestimmt sein, daher sollte vorab der Untersuchungsgegenstand der Messaufgabe geklärt werden. Hier hat die angesprochene Auflösung eine besondere Bedeutung, die sich aus Kameraauflösung A_{Kamera} [Pixel] und Ortsauflösung A_{Ort} [mm/Pixel] über die Gegenstandsgröße G' zusammensetzt. Die Ortsauflösung ist das Verhältnis aus kleinstem noch aufzunehmenden Merkmal m [mm] zu der Anzahl der Pixel [-], auf die das Merkmal abgebildet werden soll.[3, vgl. S. 37] Dies hat zur Folge, dass Kenntnisse über die anzustrebenden Bildverarbeitungsalgorithmen vorliegen sollten, um treffende Aussagen zur geforderten Kameraauflösung tätigen zu können.

Berechnung der Kameraauflösung:[3, S. 38]

$$A_{\text{Kamera}} = G' \cdot \frac{n_{\text{Pixel}}}{m} \quad (2.3)$$

Der Faktor n_{Pixel} stellt das Verhältnis von 1 zum Subpixelfaktor dar. Dieser kann aus entsprechender Literatur für Bildverarbeitungssysteme entnommen werden, beispielhaft wird für die Segmentierung von Kanten ein Subpixelfaktorbereich von $0,3 - 1$ angegeben.[3, S. 38]

- Schnittstelle

Eine Schnittstelle bezeichnet hier die mögliche Verbindung zwischen Kamera und Rechner. Es gibt an dieser Stelle nicht nur topologische sowie schnittstelleseitige Unterschiede zu beachten, sondern auch die Übertragungsraten und maximal mögliche Kabellänge. Die Anzahl der Geräte ist bei aktuellen Betrachtungen nicht relevant. Die Datenübertragungsschnittstelle USB 3.0 ist für die Bildverarbeitung in Entwicklung, daher bietet die Gigabit-Ethernet im Vergleich zur USB 2.0 Schnittstelle bessere Eigenschaften.[33] Hier liegt die theoretische Übertragungsraten bei 1000 MBit/s mit einer möglichen Distanz von bis zu 100 m zwischen Kamera und Netzwerk bzw. Rechner built-in Schnittstelle. Darüber hinaus besteht keine Begrenzung bei der Anzahl der möglich einzusetzenden Kameras.[3, S. 54]

Berechnung des Bandbreitenbedarfs:[3, S. 58]

$$fps_{\max} = \frac{TR}{n_k \cdot R \cdot FT} \quad (2.4)$$

In *Gleichung 2.4* stellt TR die Übertragungsrate [Bit/s], n_k [-] die Anzahl der Kameras, R die Auflösung [Pixel] und FT [-] die Farbtiefe dar.

- Mechanik

In *Kapitel 2.3* wurde der Preformfertigungsprozess auf Basis des UD-Flechtens dargestellt. Ist das Ziel gekrümmte Strukturen zu untersuchen, wird eine Abstands Anpassung des Objektivs aufgrund von Krümmungs- aber auch Spantquerschnittsveränderungen notwendig. Der Radius des Spants ist nicht als konstant zu betrachten, sondern aufgrund der Querschnittsgeometrie des Flugzeugrumpfs eher eiförmig.

Deswegen müssen für die Integration des QS-Systems technische Vorkehrungen getroffen werden. Die o.e. Anpassung kann bspw. flexibel durch Industrieroboter erfolgen, oder bei statischer Positionierung auf einem Untergestell. Das System aus Kamera, Objektiv und Beleuchtung muss im Fall des angesprochenen Untergestells verfahrbar mittels motorisierter Lineareinheit sowie regelbar sein, um den Arbeitsabstand des Objektivs zu gewährleisten. Im direkten Vergleich mit Industrierobotersystemen ist die Linearführung hinsichtlich des einen Freiheitsgrads zwar eingeschränkter, die Positionier- und Wiederholgenauigkeit allerdings um einen hohen Faktor präziser.[71, 55]

Bildauswertung

Die Bildverarbeitung handelt von der digitalen Auswertung der gewonnenen Daten aus der Bildaufnahme.[4, S.22] Aus dem Bild werden relevante Merkmale erfasst und nach Vorgabe klassifiziert. Der Mensch erkennt vergleichsweise ein interessierendes Objekt bei guten optischen Bedingungen sofort und kann eine qualitative Zuordnung bzw. Einschätzung vornehmen. Bei der Bildverarbeitung wird zuerst

das Abbild des interessierenden Objekts auf dem Kamerasensor aufgenommen und in der Auswertungssoftware verarbeitet. Der verwendete Bildverarbeitungsalgorithmus muss dem jeweiligen Untersuchungsziel entsprechen und die spezifischen Parameter für die Verarbeitung eingestellt werden.

Die finale Auswertung kann hier mittels Bild erfolgen und unterstützt den Anwender bei der Ergebnisfindung, besonders wenn es um eine quantitative Charakterisierung von Merkmalen bzw. Defekten geht. Die Verarbeitung und Ergebnisdarstellung erfordert, je nach Datenmenge und Berechnungsintensität des Algorithmus, entsprechende Zeit.

Vorstellung optischer Systeme für die Defekterkennung

Im Folgenden wird der Stand der Technik von drei QS-Systemen auf optischer Basis im sichtbaren Wellenlängenbereich dargestellt. Mit Hilfe dieser Systeme sollen die in *Kapitel 2.4* angesprochenen Defekte des UD-Flechtverfahrens detektiert werden.

- IMac-Pro-Sensor der iSAM AG, Mühlheim an der Ruhr:

Dieses System wurde im Forschungsprojekt IMac-Pro entwickelt und wird im industriellen Forschungsumfeld zur Prüfung des Flechtwinkels seit Mitte 2010 verwendet.[35] Der Entwicklungszeitraum des QS-Systems betrug mehr als drei Jahre, wobei der Systemintegrator iSAM AG die Hardware, bestehend aus Kamera, Objektiv und Beleuchtung sowie Control-PC, zusammenstellte.

Der Control-PC hat ein Softwarepaket, bestehend aus Detektierungs-, Host- und Clientprogramm. Beispielsweise ermöglicht das Clientprogramm dem Anwender Einstellungen bezüglich der Verschlusszeit der Kamera oder der Beleuchtungszeit vorzunehmen. Gestartet wird der Bildauswertungsalgorithmus für die Flechtwinkelerkennung vom Hostprogramm. Dieser Algorithmus wurde seitens des Faserinstituts Bremen e.V. entwickelt und dem Forschungspartner Airbus Group Innovations (ehemals EADS IW) zur Verfügung gestellt.

Die *Abbildung 2.34* zeigt die Komponenten des Sensorkopfs auf. In dem blauen Träger befindet sich eine Linearführung, auf der die Kamera und an dieser das

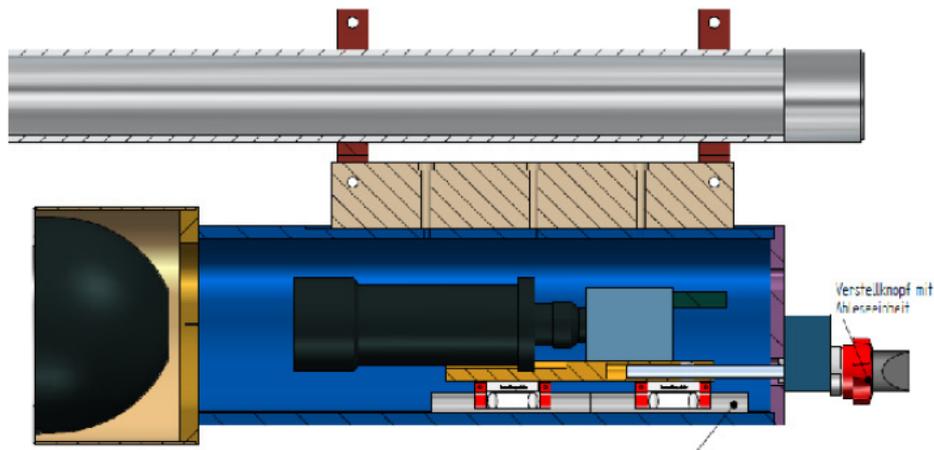


Abb. 2.34: Sensorkopf iSAM System[35, S.10]

Objektiv befestigt sind. Mittels Verstellknopf kann der Abstand von Objekt zu Objektiv manuell eingestellt werden. Hierbei ist ein maximaler Verstellbereich von $100,0\text{mm}$ möglich. Im linken Teil der *Abbildung 2.34* befindet sich im Träger die Beleuchtungseinheit, die sich aus einer LED-Ringleuchte zusammensetzt. Das Licht der LED trifft nach der Reflexion im kugelförmigen schwarzen Bereich (in der Realität weiß) diffus aus der Kuppel und trifft auf das zu untersuchende Objekt. Das graue Rohr im oberen Teil des Bildes dient der Montage des Sensorkopfs am Aufstellpunkt.

Der blaue Träger des Sensorkopfs hat einen Durchmesser von $170,0\text{mm}$ sowie eine Länge von ca. $640,0\text{mm}$. Das Bildfeld, bzw. der zu untersuchende Objektbereich, hat eine Fläche von $33,3\text{mm} \cdot 25,0\text{mm}$. Bei der im Projekt verwendeten Kamera - Objektiv Kombination bedeutet dies ein Verhältnis von ca. 41Pixel pro mm . [35, S.9] Die Verarbeitungszeit, bestehend aus Bildaufnahme, Analyse sowie Darstellung, beträgt ca. $1,0\text{s}$.

Der Control-PC mit all seinen Peripheriegeräten ist auf dieser Grafik nicht abgebildet. Das System liefert gute Auswertungsergebnisse des Faserwinkels für ebene und textile C-Faserhalbzeuge. In *Abbildung 2.35* ist der Sensorkopf hinter der Flechtmaschine montiert und planar zu dem darüber befindlichen C-Faserpreform in einem Abstand von ca. $10,0\text{mm}$ positioniert.



Abb. 2.35: Sensorkopf am UD-Flechter montiert

In *Abbildung 2.36* ist die Beleuchtung korrekt angepasst und das gewünschte Merkmal, hier der globale UD-Flechtwinkel, mittels Bildauswertungsalgorithmus darstellbar. Die weißen Linien bilden das Stützgarn ab.

Die rote Linie zeigt im verarbeiteten Bild die Winkelorientierung der Faserlage im Bildfeld an und dient der Veranschaulichung des UD-Flechtwinkels. Das System speichert das Originalbild mit Zeitstempel, das verarbeitete Bild mit roter Auswertungslinie sowie zugehöriger Auswertungsdaten in Textformat.

In der *Abbildung 2.37* wird das Clientprogramm aufgezeigt. Hier handelt es sich um das Anzeige- und Eingabeprogramm für den Anwender. Dieser kann dort den aktuellen Anzeigewert des Flechtwinkels betrachten. Damit der Wert auch sinnvoll ist, muss der Sensor entsprechend der Mittelachse zum Preform (lokal) bzw. Flechtkernsystem (global) kalibriert werden. Die Feinkalibrierung der Winkelreferenzierung erfolgt über das Clientprogramm.

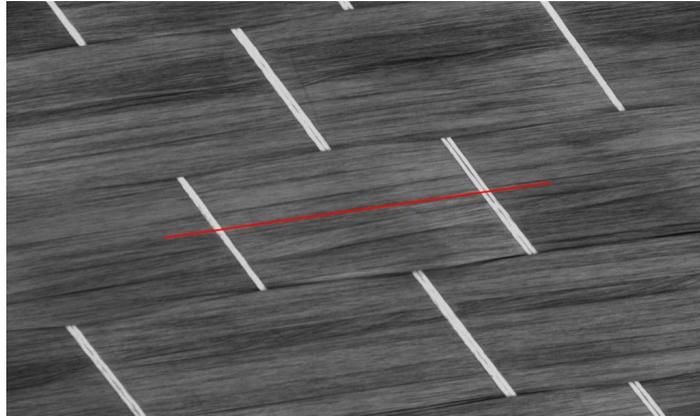


Abb. 2.36: Visualisierungshilfe des UD-Flechtwinkels

Die Edgepixels werden für die Flechtwinkelauswertung als Gütekriterium angezeigt. Hier wurde von den Entwicklern entschieden, anhand einer Prozentdarstellung den Anwender darüber zu informieren, ob die zur Verfügung stehende Anzahl der Pixel für eine hinreichende Auswertung genügt. Ein Wertebereich von 8 – 10% Edgepixels wird angegeben und gilt als vertrauenswürdig.[35, vgl. S.9]

Die seitens iSAM AG angegebene Messunsicherheit des Ausgabewerts für den Flechtwinkel der UD-Lagen beträgt $\pm 0,1^\circ$. [35, vgl. S.20]

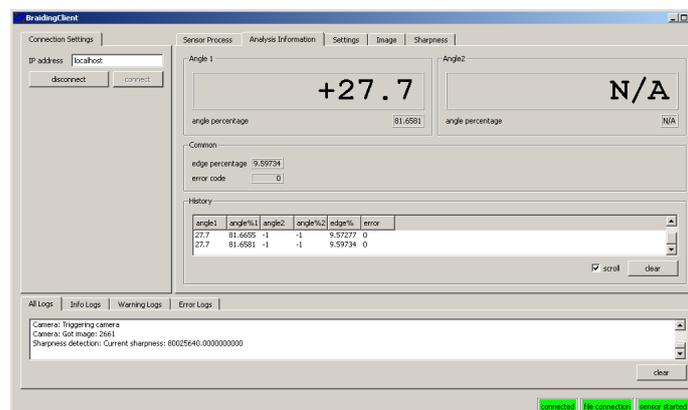


Abb. 2.37: Clientprogramm für die Darstellung am Bildschirm

- FALCON⁷ System des WZL, RWTH Aachen:

Das FALCON-Prüfkopfsystem wurde aus den Vorarbeiten des Pro-CFK Prosa Projekts entwickelt.[48, vgl. S.64] Mit diesem System lassen sich Faserorientierungen, Gaps sowie Höhenprofile an textilen C-Faserhalbzeugen erfassen. Das Forschungsinstitut WZL hat das System mit einer Vielzahl von Partnern, u. a. dem Kamerahersteller Basler AG und dem Faserinstitut Bremen e.V., entwickelt und beim Flugzeughersteller Airbus nahe gelegenen Technologiezentrum CTC GmbH zu Testzwecken eingesetzt. Das System kann u.a. an Portalroboter installiert werden. Dadurch können mit dem Prüfkopf flexibel Untersuchungen an großflächigen Bauteilen vorgenommen werden.

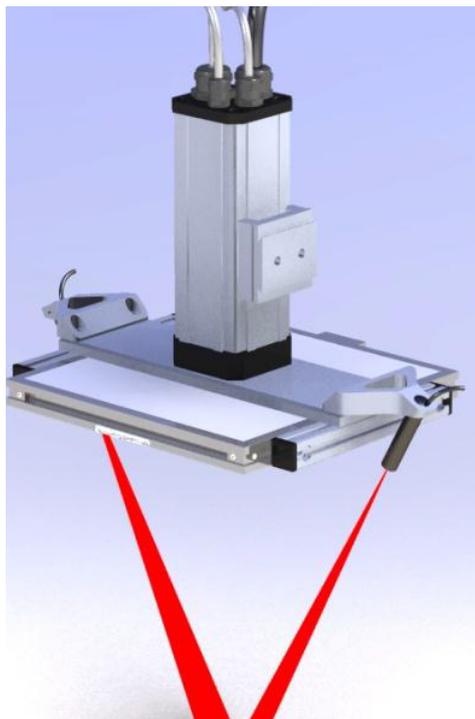


Abb. 2.38: Sensor-Fusion-Prüfkopf FALCON[12]

⁷ Fibre Automatic Live Control

Ebenfalls können mit diesem System Geometrieprüfungen aufgrund einer Fusion von Kamera und einem Laserschnittsensor durchgeführt werden.[21] Der mittlere Arbeitsabstand des Systems wird mit $40,0\text{mm}$ angegeben.[41] Als Beleuchtungen stehen zum einen die Kuppelbeleuchtung und zum anderen eine Flat-Domebeleuchtung zur Verfügung.

Der FALCON-Prüfkopf kann für flächige, ebene bis leicht gekrümmte Bauteile eingesetzt werden. Die Messfrequenz der Kamera beträgt ca. 1,0 Sekunde, wobei eine materialabhängige Messunsicherheit von $+/- 0,18^\circ$ angegeben wird.[41] Aufgrund des systemseitig gewählten Bauraums des Sensorkopfs wurde kein telezentrisches Objektiv verwendet, sondern ein Makro-Objektiv eingesetzt, vgl. *Abbildung 2.38*. Makro-Objektive haben eine feste Brennweite und reagieren sehr sensitiv auf Abstandsveränderungen zwischen Objektiv und Objekt. Das System wurde im Verlauf dieser Arbeit seitens des WZL weiterentwickelt und ist unter dem Namen Defect Defender bekannt.

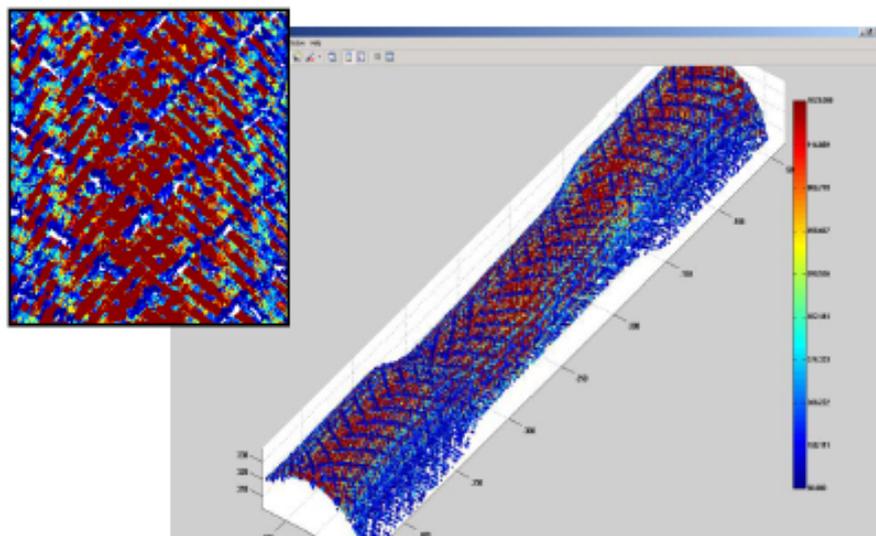


Abb. 2.39: Geometrieprüfung eines Textils[12]

- Qualitätssensor mit Richtungsbeleuchtung von Profactor GmbH, Steyr-Gleink: Mit dem Hand- bzw. Portalsensor des außeruniversitären Forschungsinstituts Profactor GmbH ist es möglich, unabhängig von der Ausrichtung der C-Faserlagen zum Sensor, textile Gelege und Gewebe zu analysieren.

Aufgrund der entwickelten Richtungsbeleuchtung und abgestimmter Bildaufnahmen des jeweiligen Objekts, können Nähfäden und C-Fasern eindeutig voneinander getrennt werden.[86] Darüber hinaus ist es speziell für Gewebe möglich, den Grad der Ondulationen der überkreuzenden C-Faserbündel zu bestimmen. Zusätzlich sollen für maximale Scan-Geschwindigkeiten von bis zu $1,0m/s$ ebenfalls C-Faserbündelbreiten und -abstände erfasst werden können.[15]



Abb. 2.40: Profactor Qualitätssensor mit Richtungsbeleuchtung[15]

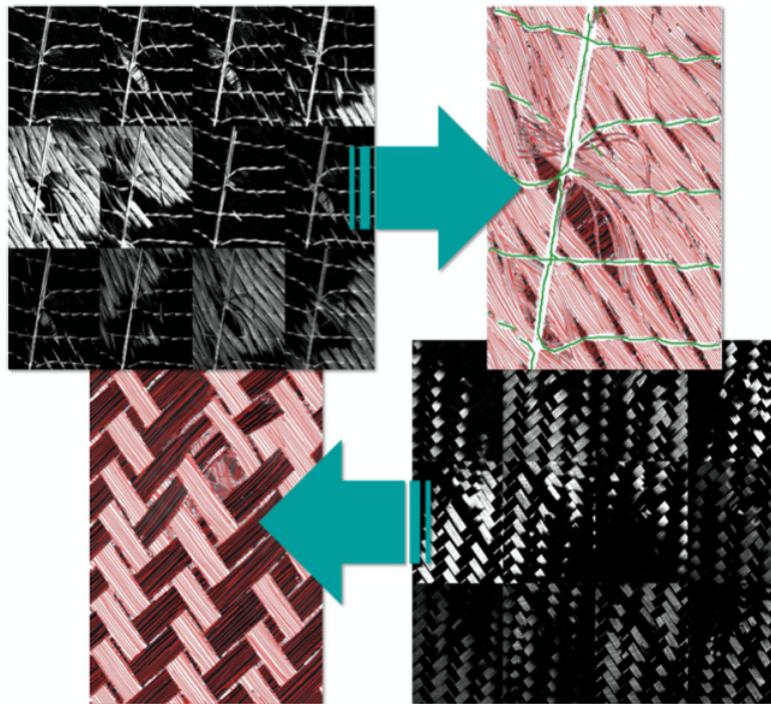


Abb. 2.41: Faserwinkelauswertungen für verschiedene Lagen[15]

Der Sensorkopf in *Abbildung 2.40* weist die Besonderheit auf, dass dieser im Handmodus oder an einem Portal betrieben werden kann. Im Handmodus kann die Aktivierung des Bildverarbeitungsprozesses, bei dem bis zu $10\text{Bilder}/s$ ausgewertet werden, über einen Taster erfolgen. Alternativ zum CCD-Sensor wurde für das System ein CMOS-Sensor mit $1000 \cdot 1000$ Pixel verwendet. Das bedeutet, dass für jedes Pixel lokal eine separate Konvertierung erfolgt und das Signal am Sensorausgang bereits digital vorliegt. Zusätzlich ist es mit diesem Sensortyp möglich, hohe Bildwiederholraten zu erzielen.[3, vgl. S.45f]

In *Abbildung 2.41* sind Einzelbilder einer C-Gelegelage (oben) sowie einer C-Gewebelage mit den entsprechenden Auswertungsergebnissen der Faserwinkel dargestellt. Zusätzlich ist in der Gelegelage die Naht (grün) ebenfalls erkannt und dargestellt. Eine fehlende oder fehlerhaft hergestellte Gelegenahrt würde daher mit diesem System detektiert werden können.

Techn. Daten System	IMac-Pro-Sensor	Defect Defender	Qualitätssensor
Genauigkeit Faserwinkel	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,18^\circ$	$\pm 0,1^\circ$
Genauigkeit Gap	nicht möglich	$\pm 0,1\text{mm}$	keine Angabe
Scan-Geschwindigkeit	33mm/s	120mm/s	$< 1\text{m/s}$
Bildfeld	$33 \cdot 25\text{mm}^2$	$100 \cdot 80\text{mm}^2$	$60 \cdot 60\text{mm}^2$
Abstand Objekt	$< 5\text{mm}$	40mm	$< 5\text{mm}$
Lichteinfluss Umwelt	gering	vorhanden	gering
Abmessungen	$180 \cdot 180 \cdot 640\text{mm}^3$	$250 \cdot 300 \cdot 500\text{mm}^3$	$200 \cdot 200 \cdot 270\text{mm}^3$
Sensorfusion	nein	3D-Lasersensor	nein
Preis	$> 90000\text{€}$	$> 60000\text{€}$	$> 60000\text{€}$

Tab. 2.3: Zusammenstellung der technischen Daten der vorgestellten QS-Systeme

2.6 Statistische Versuchsplanung und Methoden

Das Ziel der Versuchsplanung ist es, mittels methodischem Vorgehen das Systemverhalten eines Produkts bzw. Prozesses nach dem Ursache-Wirkungsprinzip zu ermitteln und hierdurch die Leistungsfähigkeit zu steigern.[39, vgl. S.7] Erste statistische Methoden wurden bereits 1930 von *Sir R.A. Fisher* entwickelt, um die Wirkung von Agrarprodukten auf Landwirtschaftsflächen nachzuweisen und zu vergleichen.[72] Bis zu unserer Zeit wurden die Methoden von Statistikern sowie Praktikern weiterentwickelt, um Produkte bzw. Prozesse zu generieren, die deterministisch vorausbestimmbar, fehlertolerant und robust sind.[72]

Mit Bezug auf die teilweise geringen Produktentwicklungszeiten, wie etwa in der Automobilindustrie, ist eine zielgerichtete Versuchsmethodik wettbewerbsentscheidend, um bei stetig wachsendem Funktionsumfang eine Senkung der finalen Produktgesamtkosten zu erreichen.[40, vgl. S. 1]

Die *Abbildung 2.42* stellt ein Modell zur Systembeschreibung dar. Die parameterabhängigen Stell- und Steuergrößen beeinflussen den Herstellungsprozess des Produkts maschinenseitig. Störgrößen, bekannte und unbekannte, haben ebenfalls einen direkten Einfluss auf das Ergebnis, schmälern aber die Leistungsfähigkeit des Prozesses bzw. Endprodukts und sind daher, wenn möglich, zu vermeiden.

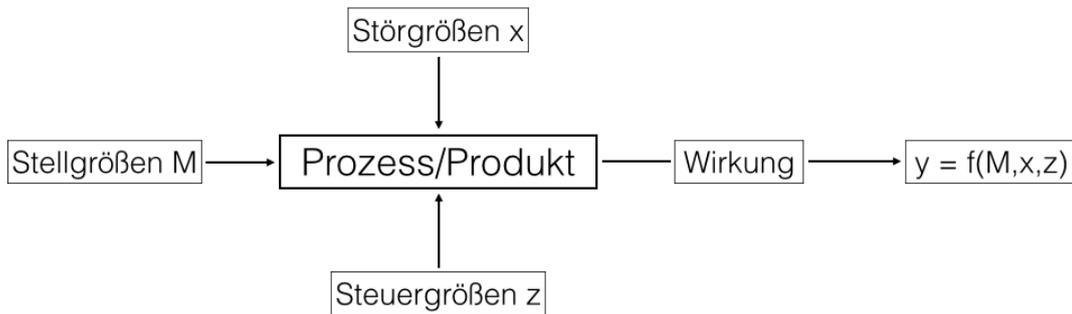


Abb. 2.42: Systemgrößen und Systemwirkung[39, vgl. S.30]

Am Anfang einer Prozessanalyse ist es herausfordernd alle Einflussgrößen richtig zu identifizieren, zuzuordnen und ggf. einzugrenzen.[39, vgl. S. 7] Ohne methodisches Vorgehen würde eine geplante Optimierung nicht zu gewünschten Ergebnissen führen, da nicht präzise evaluiert werden kann, welche Ursachen auf das System welche Wirkung hervorruft und welche Wechselwirkungen vorliegen.

Mit Bezug auf den Flechtprozess werden im industriellen Umfeld oftmals heuristische Methoden verwendet, die ein mögliches Optimum nicht funktional beschreiben. Im Forschungsumfeld liegen viele Betrachtungen auf der Simulation des Flechtverfahrens, um bspw. mechanische Kenngrößen der Gesamtstruktur ableiten zu können.[7, 73]

Die in *Kapitel 2.3* dargestellten Ausgangsvariablen Flechtwinkel γ sowie Bedeckungsgrad B berücksichtigen ausschließlich geometrische und kinematische Zusammenhänge und keine physikalischen Einwirkungen, wie bspw. Reibungen. Dieser Sachverhalt macht eine Vorhersage des realen Flechtwinkels oder von Gaps schwierig bis gar unmöglich. In der Fertigung kommt es daher auf die Erfahrungen des Maschinenbedieners an. Aus Sicht des Unternehmens kann diese Abhängigkeit nicht sinnvoll sein, da u.a. bei einem Personalwechsel eine notwendige Einlernzeit des neuen Bedieners beachtet werden muss. Eine Garantie, dass das vorherige Ergebnis erneut erzielt wird, gibt es nicht.

Ein möglicher Lösungsansatz wäre, Wirkungszusammenhänge mittels transparenter und systematischer Methoden zu bestimmen.[39, vgl. S. 8]

Definitionen für die Darstellung der Wirkungszusammenhänge:[85, S.4-15]

- Systemgrenze

Ein System ist ein Gebilde mit Elementen und klar definierten Grenzen. Das System setzt sich aus Eingabe, Effekt bzw. Wirkung und Ausgabe zusammen. Die Grenzen sind sinnvoll zu wählen, weil unter bestimmten Umständen wichtige Eingangsgrößen fehlen und das abschließende System nicht korrekt dargestellt bzw. modelliert wird.

- Merkmal

Jede Systemausgabe hat ein bestimmtes Ziel und muss relevante Merkmale aufweisen bzw. Eigenschaften erfüllen. Es gilt bspw. auch zu untersuchen, welche Merkmale miteinander in Korrelation stehen. Das kann besonders relevant sein, wenn bspw. bestimmte Motorendrehzahlen Resonanzverhalten an anderen Produktionselementen auslösen und eine Fehlfunktion an betroffenen Geräten hervorrufen.

- Stufen

Als Stufe wird die jeweilige Einstellung des Faktors bezeichnet. Das kann bspw. 0 oder 1 darstellen, oder einen numerischen Festwert. Sinnvoll sollte auch der jeweilige Stufenabstand gewählt werden. Eine zu kleine Schrittweite kann eventuell keine unmittelbaren Zusammenhänge erscheinen lassen und eine zu große, bestimmte Erscheinungen nicht eintreten lassen. Spätere Extrapolationen sind aufgrund von möglichen Nichtlinearitäten, bspw. sprunghaften Effekten, zu vermeiden.

- Effekt

Als Effekt wird die Wirkung eines Faktors auf ein System mit bspw. zwei Stufen bezeichnet. Der Effekt ist die Differenz aus den erfassten Mittelwerten der Ergebnisse von einer zur anderen Stufe. Mit Hilfe eines sogenannten Effekt-Diagramms erfolgt eine standardisierte Darstellung, in der verschiedene Faktoren unabhängig von ihrer physikalischen Einheit normiert dargestellt werden können und hieraus einen direkten und gesamtheitlichen Vergleich

ermöglichen. Als Prüfgröße für die Bedeutsamkeit bzw. Signifikanz eines Faktors in seiner Effektgröße wird der sogenannte F-Wert berechnet.

- Parameter und Faktoren

Als Parameter werden alle Einflussgrößen bzw. Hauptursachen des Systems bezeichnet. Als Faktoren, jene, die in die tatsächliche Versuchsführung mit einbezogen und gezielt beeinflusst werden.

Ziel der Versuchsplanung ist es hauptsächlich, mit minimalem Versuchsaufwand Einflussparameter eines Herstellungsprozesses gezielt zu ermitteln und relevante Faktoren quantitativ darzustellen. Die Versuche erfordern zwar Ressourcen und vorab Investitionen, aber mittels der verwendeten Methodik können Produktentwicklungszeiten um 40-75% verkürzt und die Gesamtkosten drastisch gesenkt werden.[40, vgl. S.5] Als Gesamtkosten werden hier die Aufwendungen für Entwicklung, Produktion sowie Gewährleistung bezeichnet.[39, vgl. S.1]

Die Anzahl der Einflussfaktoren beeinflusst den Versuchsumfang und ist stets ein Kompromiss zwischen Aufwand und Modellgenauigkeit. Ist darüber hinaus die Anzahl der Versuche zu gering, ist eine genaue Ergebnisanalyse und Zuordnung der Einflüsse auf das Prozessresultat ggf. gefährdet. Als Hilfsmittel dient an dieser Stelle die Statistik, denn die Wiederholbarkeit des Ergebnisses kann bei langfristig geplanten Versuchsreihen nicht hundertprozentig garantiert werden, da sich die Bedingungen, bspw. die Versuchsumgebung, oftmals verändern. Ebenfalls ist die Angabe eines Vertrauensbereichs vorteilhaft, um anzugeben mit welcher Wahrscheinlichkeit die Ereignisse aus den abgeleiteten Ergebnissen wieder eintreffen, d.h. reproduzierbar sind.[40, S.3]

Das Ergebnis der Versuchsplanung ist oftmals ein mathematisches Modell. Dieses Modell stellt den Zusammenhang zwischen Systemgrößen und -wirkungen dar, aus denen sich bspw. Empfehlungen für die Optimierung des UD-Flechtprozesses ableiten lassen. Die Darstellung kann neben einem mathematischen Modell zusätzlich mittels Grafik in einem bereits angesprochenen Effekt-Diagramm erfolgen. In diesem Diagramm ist es möglich, sowohl Verbesserungen als auch Verschlechterun-

gen verschiedener Faktoreinstellungen der Maschine direkt darzustellen. Die einzelnen Faktoreinstellungen können als Trend in Richtung Optimierung bzw. Verschlechterung gedeutet werden. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass keine exakten Endwerte bei Systemgrenzenüberschreitung bestimmt werden können. Dies ist bspw. der Fall, wenn ein Faktorwert überschritten wird. Weiterhin ist es in diesem Diagramm möglich, die Interaktion bzw. Wechselwirkungen der Faktoren darzulegen.[40, S.3]

Als Verfahren für die Versuchsauswertung sind die ANOM⁸ und ANOVA⁹ Methoden genannt. Die Auswirkungen der entsprechenden Faktoreinstellungen können für die jeweils normierten Werte mittels der ANOM bzw. Mittelwertanalyse grafisch dargestellt werden.[39, vgl. S.185] In dieser können dann direkt der Effektwert aus der Differenz der Stufenveränderung jedes Faktors abgelesen werden.

Die ANOVA Methode stellt dar, inwieweit die Faktoren wirklich einen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Diese wird im statistischen Sinne als Signifikanz bezeichnet und stellt eindeutig heraus, welche Faktoreinstellung den Prozess nachhaltig beeinflusst.[39, vgl. S.40]

Die Versuchsplanung beinhaltet u.a. folgende Methoden:

- Die klassische Methode wird verwendet, um Faktoren quantitativ im System zu beschreiben. Im 16. Jahrhundert wurde die 'ein-Faktor-Methode' entwickelt bei der jeweils ein Faktor verändert wurde, bis das optimale Endergebnis ermittelt wurde. Ungefähr 300 Jahre später wurde die 'vollständige Mehrfaktor-Methode' mit ergänzenden statistischen Auswertungsmethoden entwickelt, die bis heute verwendet bzw. weiterentwickelt wird.[39, vgl. S.140]
- Das Hauptziel der Taguchi Methode liegt in der robusten Prozessdarstellung, d.h. den Prozess weitestgehend von Abhängigkeiten seitens vorhandener Störgrößen zu befreien.[40, vgl. S.17] Die Taguchi Methode hat den Vorteil, nicht einen Faktor nacheinander verändern zu müssen, sondern meh-

⁸ Analysis of Means, Mittelwertanalyse

⁹ Analysis of Variance, Varianzanalyse

rere gleichzeitig verändern zu können. Dies hat einen kleineren Versuchsumfang als Folge. Hierbei ist zu beachten, dass entsprechende Einflussgrößen, die nicht untersuchungsrelevant sind, konstant gehalten und entsprechend erfasst werden müssen. Hierdurch werden die Prozessstreuungen minimiert.[40, vgl. S.25] Taguchi hat in seinen Untersuchungen herausgefunden, dass meistens nur wenige Störgrößen für einen bestimmten Bereich der Streuung ursächlich sind.[39, vgl. S.3]

- Das Hauptziel der Shainin Methode liegt in der Identifizierung der Faktoren, die Streuungen im Prozessergebnis hervorrufen.[39, vgl. S.3] Die Streuung ist aus der Statistik bekannt, bspw. aus der Gaußschen Normalverteilung, mit dem Maß der Standardabweichung. Die Relevanz der Standardabweichung bedeutet für den Prozess, dass Endprodukte Unterschiede aufweisen können, obwohl diese unter gleichen Bedingungen produziert wurden. Mit Verkleinerung der Standardabweichung wird u.a. die Produktqualität erhöht. Dies kann eine Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit für ein Unternehmen bedeuten.

Sind Interaktionen eines Prozesses nicht bekannt und auch die Auswirkungen auf den Prozess, eignet sich die klassische Versuchsführung. Oft ist auch nicht bekannt, welche Variationen von Faktoren im Anwendungsfall der Produktion die Günstigste bzw. Ungünstigste ist.

Bevor mit den Versuchen zur Untersuchung des Systemverhaltens begonnen werden kann, sollten grundsätzliche Fragestellungen geklärt werden:[40, vgl. S.14]

- Langfristige Zielsetzung?
- Welche Probleme sollen gelöst werden?
- Was ist über die bestehenden Probleme bekannt?
- Projektmanagement, z.B. Initiierung der Untersuchung
- Planung von Ressourcen, Personal und Kosten
- Aufstellung des Versuchsplans nach Methodenauswahl
- Durchführung der Experimente bzw. Versuche
- Auswertung der Versuche

Zusätzlich können für die Untersuchungen folgende Vorschläge berücksichtigt werden:[40, S.24]

- Möglichst gleicher Versuchsdurchführer
- Anlage vor Versuchen reinigen und ggf. warten
- Umgebungseinflussgrößen konstant halten
- Gleiche Materialcharge
- Versuche in möglichst kurzen Abständen durchführen
- Versuche mit gleichem Messgerät bzw. QS-System durchführen
- Abweichungen ggf. dokumentieren
- Anlage ggf. in Urzustand versetzen

Der Versuchsplan enthält, neben der Zeit- und Budgetplanung, die aus den Einflussgrößen ausgewählten Faktoren. Unter Berücksichtigung sogenannter Blockbildung und Randomisierung können Zufallsstreuungen minimiert und Verfälschungen vorgebeugt werden.[40, vgl. S.26f] Hierbei ist zu beachten, dass die Maschine oft neu eingestellt werden muss. Zeit, Kosten und sonstige Aufwände müssen seitens des Projektmanagements im gegebenen Versuchsumfeld abgeschätzt werden.

Alternativ zu beiden Ansätzen bleibt nur eine zeitsparende Durchführung sowie das Einhalten eines möglichst homogenen Gesamtversuchsumfelds. Ist für die Untersuchung nur ein kleines Zeitfenster vorhanden, weil u.a. die Maschinen aufgrund der Produktion stark ausgelastet sind, können die o.e. Vorschläge um Folgendes ergänzt werden:[40, vgl. S.27]

- Möglichst geringe Anzahl von Faktoren
- Verzicht auf Randomisierung
- Überschaubare Versuchsanzahl

Statistische Versuchsplanung 1. Ordnung

Die vollständigen 2^n Faktorenversuchspläne zählen zu den statistischen Versuchsplänen 1. Ordnung. Die Klassifizierung 1. Ordnung kommt aufgrund der Abbil-

dungsweise zweier Faktoreneinstellungen zustande. Die für das Versuchsergebnis relevanten Wechselwirkungen können aus kombinatorischer Überlagerung abgeleitet werden.[39, vgl. S.141] Wenn für die Darstellung der Faktoren weder ein quantitativer Zahlenwert noch ein qualitativer Wert vorliegt, sind hohe Startwerte einzustellen, um bei nachfolgenden Analysen kleinere Einstellwerte rund um die vermutete optimale Einstellung zu verwenden.[39, vgl. S.142]

Vollständige Faktorenversuchspläne haben allerdings zur Folge, dass bei großen Exponenten n die Kombinationsmöglichkeiten stark ansteigen. Bei kleineren Exponenten bzw. geringer Anzahl an Faktoren kann daher diese Methode noch praktikabel sein, bei bspw. 5 Faktoren sind bereits 32 Kombinationen zu berücksichtigen und auszuwerten. Mittels sogenannter Taguchi-Felder verringert sich der Aufwand drastisch. Im dargestellten Beispiel wären durch das sogenannte L_8 -Feld nur 8 statt 32 Versuche notwendig, allerdings ohne die Darstellung der Interaktionen.[39, S.292]

Für eine übersichtliche Systemdarstellung der Parameter bzw. Faktoren kann als Analysehilfsmittel das Ishikawa-Diagramm genutzt werden, siehe *Abbildung 2.43*. [39, vgl. S.58] Hiermit können Komponenten eines Prozesses als Hauptast und entsprechende Subeinflüsse als Nebenast dargestellt werden.

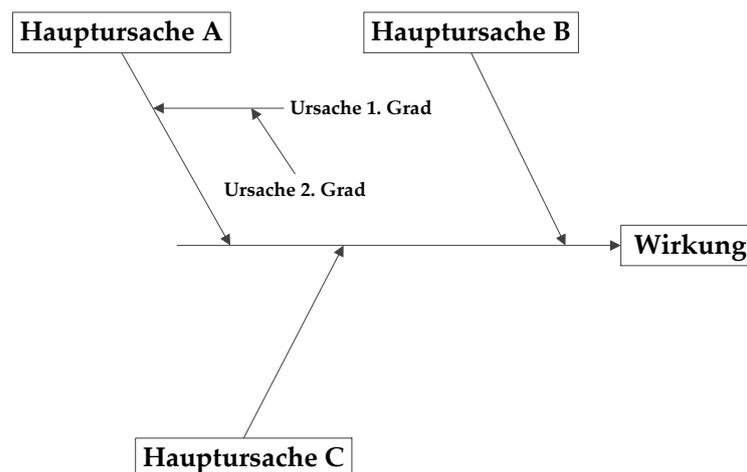


Abb. 2.43: Ursache-Wirkungsdiagramm nach Ishikawa [39, vgl. S.58]

2.7 Zusammenfassung und Darstellung des Bedarfs

Zusammenfassung der *Kapitel 2.1-2.6*:

- FVW eignen sich für die Herstellung von Flugzeugspanten, siehe *Kapitel 2.1-2.2*
- Preformen aus Kohlenstofffasern bzw. C-Fasern, die die strukturelle Basis für Spante aus FVW bilden, können automatisiert mittels des UD-Flechtens hergestellt werden, siehe *Kapitel 2.3*
- Die analytischen Gleichungen für die Darstellung des Flechtwinkels γ und des Bedeckungsgrads B des UD-Geflechts beinhalten ausschließlich geometrische und kinematische Parameter, siehe *Kapitel 2.3*
- Unter Verwendung der analytischen Gleichungen und der Berechnung von γ für $B = 1$ sind Defekte im UD-Geflecht möglich, siehe *Kapitel 2.4*
- Mittels vorgestellter QS-Systeme ist möglicherweise Potenzial vorhanden, die Defekte des UD-Geflechts zu detektieren, siehe *Kapitel 2.5*
- Die statistische Versuchsführung hat das Potenzial für das UD-Flechtverfahren die Ursache-Wirkungszusammenhänge mittels statistisch unterstützter Modelle darzustellen. Die Methode bietet ebenfalls die Möglichkeit, Einstellungen der Maschinenparameter in eine direkte Relation zu potenziellen Defekten und der Qualität des UD-Geflechts zu stellen, siehe *Kapitel 2.6*

Darstellung des Bedarfs:

- Die dargestellten Modellansätze zur Berechnung des Flechtwinkels γ und des Bedeckungsgrads B des UD-Geflechts beruhen auf geometrischen und kinematischen Zusammenhängen. Für den Einsatz im realen Umfeld reichen diese Ansätze oftmals nicht aus, sodass Abweichungen von den berechneten Sollwerten bzw. Defekte entstehen.

Nach *A. Pickett* ist eine zusätzliche Betrachtung der physikalischen Einflussgrößen, wie bspw. der Roving- bzw. Tapespannung am Flechtklöppel, notwendig, um qualitativ hochwertigere Aussagen über die charakteristischen Merkmale des Geflechts im Allgemeinen treffen zu können.[73, S.388]

- Unter Verwendung eines QS-Systems zur Detektion der Defekte des UD-Geflechts sowie Methoden der klassischen Versuchsführung für die Auswertung der physikalischen Einflussgrößen erscheint ein gesamtheitlicher Ansatz zur Darstellung des Flechtwinkels γ und des Bedeckungsgrades B möglich.
- Die Identifizierung der Haupteinflussparameter des UD-Flechtprozesses ist für die gegebene Maschinenkonfiguration ein wichtiges Ziel der Untersuchungen. Mit Kenntnis der Haupteinflussparameter ist u.a. eine quantitative Beurteilung der Einwirkungen auf das Prozessergebnis erst möglich.

Folgende Einflussfaktoren sind als Annahmen zu prüfen:

- Produktionsgeschwindigkeit: $v_{Produktion}$
Die Produktionsgeschwindigkeit repräsentiert den Kernvorschub und die Klöppelumlaufgeschwindigkeit als eine Größe. Die Wahl der Produktionsgeschwindigkeit als Einflussfaktor ist aus wirtschaftlichen Betrachtungen für den Anwender am interessantesten, bspw. mit welchen Parametereinstellungen die Fertigungstoleranzen am geringsten sind oder ab welcher Produktionsgeschwindigkeit nicht akzeptable Fertigungsimperfectionen im Geflecht entstehen.
 - Hubfrequenz der Hubvorrichtung: Hub_f
Darüber hinaus wird die Anwendung der Hubvorrichtung untersucht. Entsprechend ausgewertete Versuche können hier eine objektive Darstellung über das Potenzial dieser Vorrichtung geben.
 - Abstand Flechtring-Flechzebene: Δ_{F-R}
Einfluss des Flechtringabstands zur Flechzebene.
 - Tapespannung: σ_{Tape}
Als abschließender Faktor ist die Tapespannung aufgeführt, da keine quantitativen Prozessdaten bezüglich der Auswirkungen auf die Flechtqualität im Forschungsumfeld des UD-Flechtens vorlagen.
- Darüber hinaus würde sich für eine prozesswissensbasierte Herstellung der UD-Geflechtstrukturen ein QS-System mit entsprechender Datenbank eig-

nen. In dieser können Maschinenparameter zum einen sowie Geflechtmerkmale zum anderen dokumentiert werden.

- Weiterhin können Verarbeitungsprozeduren des QS-Systems eine Synthese aus der charakteristischen Geflechtdarstellung ermöglichen und in Prozessmodellen dargestellt werden. Das hätte den Vorteil, dass bei identischen Flechtmaschinenparameter und Randbedingungen eine Vorhersehbarkeit potenzieller Defekte abgeschätzt werden kann. Bei ausreichender Datenbasis wäre dann eine entsprechende Maschinenregelung des Flechters vorstellbar. Für Bereiche die besonders kritisch sind, bspw. aufgrund eines vorhandenen Defekts in der vorher gefertigten Geflechtlage oder geometrisch komplizierte Flechtkörper, kann das vorhandene Prozessmodell die Maschine entsprechend regeln, sodass u.a. mit einer Produktionsgeschwindigkeit verfahren wird, die die geringste Wahrscheinlichkeit eines Defekts aufweist. Durch diesen Ansatz könnte ein sonst potenzieller Ausschuss des Preforms vermieden werden.
- Abschließend soll anhand der Untersuchungsergebnisse die optimale Maschineneinstellung mit den geringsten Defekten ermittelt und verifiziert werden.

Um die dargestellten Bedarfe lösen zu können, müssen folgende Aufgaben erfüllt werden:

- Identifizierung eines geeigneten QS-Systems auf optischer Basis für die Detektion der charakteristischen Größen des UD-Geflechts.
- Anpassung des QS-Systems an die Randbedingungen des UD-Flechtprozesses unter besonderer Berücksichtigung des verwendeten C-Fasermaterials.
- Entwicklung einer Strategie für die Durchführung der Experimente, u.a. zur Aufnahme erwarteter Defekte bzw. Abweichungen von Sollvorgaben.
- Durchführung der Experimente.
- Auswertung der Ergebnisse der Experimente.
- Modellbildung und Erstellung eines Zusammenhangs, speziell für die Betrachtung von Gaps unter den Einflüssen der Maschinenparameter bzw. der potenziellen Einflussfaktoren, u.a. der Produktionsgeschwindigkeit.

In dem folgenden *Kapitel 3* wird die Evaluierung eines geeigneten optischen QS-Systems vorgenommen, um charakteristische Merkmale des UD-Geflechts wie Faserwinkorientierungen und Gaps erfassen und auswerten zu können.

In *Kapitel 4* wird der UD-Flechtprozess mittels der statistischen Versuchsplanung untersucht, um prozessinhärente Einflussparameter in ihrer Wirkung auf das UD-Geflecht zu identifizieren und zu quantifizieren. Anhand der ermittelten Prozessparameter wird ein Prozessmodell entwickelt, um eine maschinenspezifische Prozessregelung zu ermöglichen.

Kapitel 3

Methodische Konzeption des QS-Systems QuIS

3.1 Anforderungen an das Qualitätssicherungssystem

„Quality exists, when the price is long forgotten“.¹ Die Bedeutung der Qualitätssicherung für Firmen kann unter wettbewerbstechnischen Gesichtspunkten nicht groß genug sein. Unternehmen die nicht termingerecht liefern können oder keine wettbewerbsfähigen Produkte für den Markt anbieten, haben eine kurze Lebensdauer. Qualitätssicherung bedeutet daher, diesen Gesichtspunkten vorbeugend Rechnung zu tragen, um Zukunftssicherung für das eigene Unternehmen zu gewährleisten.

Das entwickelte Qualitätsinspektionssystem QuIS entstand aus der Motivation, dass Qualität, bezogen auf ein Produkt, erzeugt und nicht durch Prüfung selektiert werden muss. Das QS-System wurde speziell für den UD-Flechtprozess entwickelt. Nützlich ist in diesem Zusammenhang die Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Prozesses. Hierdurch lassen sich gewünschte Unternehmensziele ableiten und Ressourcen gezielt planen.[18, vgl. S.16] Dies wird ebenfalls für das Produkt durchgeführt, um die produktspezifischen Merkmale zu überprüfen und einzuhalten. Sinnvoll ist es, vorab den definierten Begriff Qualität nach DIN 55350/ISO 8402 wiederzugeben:

Qualität ist die Gesamtheit der Merkmale und Merkmalswerte eines Produktes oder einer Dienstleistung bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen.[8, S.1]

¹ Zitat seitens Henry Royce, englischer Unternehmer

Das bedeutet, dass die Qualität bzw. die Gesamtheit der Merkmale eines Produkts durch den Kunden beurteilt und bewertet wird. Die Merkmale bzw. Kundenansprüche an ein Produkt lassen sich zusammenfassen in:[8, vgl. S.1]

- Funktion
- Sicherheit
- Zuverlässigkeit
- Benutzerfreundlichkeit
- Umweltverträglichkeit
- Lieferzeiten
- Preis
- Beratung
- Unterstützung

Es ist zu beachten, dass Unternehmen aufgrund des hohen ökonomischen Aufwands nicht immer alle Gesamtaspekte der Qualitätssicherung berücksichtigen können. Hier muss das Management entsprechende Qualitätskriterien festlegen, die bei gewünschter Zertifizierung gemäß Vorgaben nachgewiesen werden müssen. Dieser Nachweis erfolgt in der Regel im Rahmen eines Audits.²

Geschichtlich gesehen wurden im Mittelalter Gilden gegründet, um die Handwerksbetriebe und deren Produkte zu überprüfen. Die Gilden vollzogen somit die ersten Audits.[26, vgl. S.1] In der heutigen Zeit, speziell im Luftfahrtproduktionsbetrieb, ist die Auditierung und die nachgewiesene Zertifizierung der Produktionsumgebung zwingend erforderlich, um Produkte für diese auf Sicherheit und Funktionszuverlässigkeit Wert legende Industrie anbieten zu können.[37, vgl. S.47]

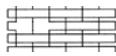
Bevor sich intensiver mit der Auswahl bzw. Entwicklung des Qualitätssicherungssystems beschäftigt wird, muss der Bedarf aus dem Stand der Forschung, siehe *Kapitel 2.7*, und den gestellten Anforderungen bewertet und diskutiert werden. Die Anforderungen werden im Folgenden näher dargestellt.

² Audit auch als *Anhörung*, aus dem Lateinischen übersetzt

Die Anforderungen berücksichtigen die Randbedingungen des UD-Flechtens, vgl. *Kapitel 2.3*:

- Fehlerhafte Maschineneinstellung führt zu Defekten im UD-Geflecht
- Eine optimale Maschineneinstellung kann mit den vorhandenen geometrischen und kinematischen Modellen nicht vollständig dargestellt werden

Der Anspruch an das QS-System muss die vollständige Detektion der Defekte bzw. Merkmale des UD-Geflechts sein. Anhand der potenziellen Defekte in *Kapitel 2.4* werden die Anforderungen an das QS-System konkreter formuliert.

Merkmals	Grafik	Auflösung	QS-System
Flechtwinkel		+/- 0,13°	Anforderung
Tape-Welligkeit		+/- 0,13°	Anforderung
Gaps		+/- 0,20mm	Anforderung
Lagentrennung		+/- 0,20mm	Anforderung
Tape-Overlap		+/- 0,20mm	Option

Tab. 3.1: Anforderungen: Erfassungsauflösung Hard-/Software QS-System

Es folgt eine Unterteilung in Erfassungs-, Konfigurations- und geometrischen Systemanforderungen. Die Anforderungen an die Erfassungsauflösung, siehe *Tabelle 3.1*, beziehen sich auf die zu detektierenden Merkmale und werden nachfolgend spezifiziert:

- Flechtwinkel

Der Flechtwinkel ist mitunter das wichtigste Eigenschaftsmerkmal einer Lage bzw. gesamtheitlich des Preforms. Die Toleranzabweichung für die Fertigung wird für die Einzellage mit $+/- 2^\circ$ festgelegt. Aufgrund der aus der Messtechnik für Untersuchungen häufig empfohlenen Messauflösung von

1 : 10 sowie eines zusätzlich gewählten Sicherheitsfaktors von 1,5 resultiert ein Auflösungswert von $\pm 0,13^\circ$ für das Messinstrument.[91]

- Tape-Welligkeit

Tapewelligkeiten sind gleichartig zu erfassen wie Geflechtwinkelabweichungen, nur beziehen diese sich auf eine feinere Segmentierung. Das bedeutet, dass das QS-System die Fähigkeit aufweisen muss, diese Winkelabweichungen für kleine Bereiche erfassen zu können. Bspw. kann dies für Bereiche gelten, in denen sich das Tape S-förmig auf dem Flecht kern ablegt. Der gewählte Auflösungswert entspricht der Flechtwinkelauflösung.

- Gaps

Eine weitere Anforderung stellt die Erfassung von Gaps dar. Treten Gaps im Geflechtbild auf, so ist die Bedeckung der Kernoberfläche mit Tapes nicht 100%, sondern weniger. Grundsätzlich sollte die Breite der Gaps sowie die Anzahl von Gaps im Geflecht so gering wie möglich sein. Die Gesamthäufigkeitsverteilung der Gaps in einer Lage ist für den UD-Flechtprozess schwierig darzustellen, da Produktionsvorschriften und -anforderungen in der Luftfahrt für Prepreg-Prozesse erstellt wurden. Das System sollte daher über individuell anpassbare Bildverarbeitungsparameter bezüglich der Gap-Erkennung verfügen. Ein Auflösungswert von $\pm 0,20mm$ wurde angenommen.

- Lagentrennung

Hierbei handelt es sich um eine Geflechtlage, die allerdings nur eine diskrete Lagenlänge aufweist. Grundsätzlich ist die Lagenlänge bezogen auf die Kernlänge. Zusatzlagen oder Lagentrennungen sollen seitens der Bildverarbeitung erkannt und dargestellt werden. Der gewählte Auflösungswert entspricht der Gapauflösung.

- Tape-Overlap

Tape-Overlaps können produktionstechnisch durch evtl. Verschiebung und Verdrehung der Tapes vorkommen und sollten mittels Bildverarbeitungssystem darstellbar sein. Der gewählte Auflösungswert entspricht der Gapauflösung.

Kriterium	Forderung
Onlineanalyse	globaler Flechtwinkel
	globale Gaperkennung
Offlineanalyse	lokaler / globaler Flechtwinkel
	lokale / globale Gaperkennung
	Algorithmenanpassungen
	Nachauswertung der Bilder
Datenmanagement	Anlegen von Versuchsreihen
	Speicherung des Originalbilds
	Exportfunktion der Ergebnisse
	Import neuer Algorithmen
	Toleranzeinstellungen
Mechanik	Anpassung Arbeitsabstand Objektiv

Tab. 3.2: Anforderungen: Software-Konfiguration QS-System

In *Tabelle 3.2* sind die Anforderungen der Software-Konfiguration des QS-Systems dargestellt.

- Onlineanalyse

In der Onlineanalyse bzw. Online-Inspektion soll es systembedingt möglich sein, parallel zur Fertigung eine Qualitätsprüfung des Geflechts vorzunehmen. Hierbei sollen dem Maschinenbediener kurze und präzise Informationen dargestellt werden. Mit Bezug auf die dargestellte Anforderung muss der globale Flechtwinkel angezeigt werden. Für die Gaps ist es ausreichend, wenn

i.O. bzw. *OK* angezeigt wird. Ist der Wert außerhalb der gegebenen Toleranz, so muss *FEHLER* erscheinen und ein Stoppsignal für den Flechtprozess ausgelöst werden.

Die Toleranzgrenzen werden zuvor im Datenbanksystem eingegeben. Bezüglich der Übersichtlichkeit könnte die Darstellung der Werte tabellarisch vorgenommen werden. Hierzu könnte der aktuellste Zeileneintrag jeweils zum entsprechenden Bild hervorgehoben werden, um vergleichend zu einer Anzeigetafel beim Flughafen, stets die aktuellsten Informationen anzuzeigen. Naheliegenderweise muss sich die Onlineanalyse für das Produktionsumfeld der Flechtmaschine eignen, speziell hinsichtlich der Erfassungs- und Auswertungszeiten.

Bezüglich der Onlinefunktion soll das System die Möglichkeit aufweisen, zwischen der *Aufnahme plus Verarbeitung der Bilder* sowie nur der *Aufnahme ohne Verarbeitung von Bildern* wählen zu können. Letztere hat den Sinn, Aufnahmen sehr schnell zu erstellen und diese in der sogenannten Offlineanalyse individuell außerhalb des Produktionsumfelds untersuchen zu können.

- Offlineanalyse

Die Offlineanalyse soll eine spezielle Bearbeitungsumgebung des QS-Systems darstellen, in der zeitunabhängig gearbeitet werden kann. Als Grund sei hier die Fokussierung auf eine detaillierte Untersuchung des Prozesses über die Einzelaufnahmen der textilen Lagen genannt. Daher sollte der Funktionsbereich der Offlineanalyse im Vergleich zur Onlineanalyse lokale bzw. kleinere Auswertungsbereiche für Flechtwinkel- und Gapbestimmungen ermöglichen.

Als Beispiel sei hier die Untersuchung des Drapierverhaltens von trockenem Fasermaterial, bspw. Gewebe, angeführt. Mittels eines solchen Systems könnten entsprechende analytische Beziehungen abgeleitet und bspw. Forscher im Bereich von Drapiersimulationen hinreichend mit Daten aus dem Versuch unterstützt werden, um entwickelte Modelle zu validieren. Darüber hinaus soll es in diesem Funktionsbereich möglich sein, neue Bildverarbeitungsalgorithmen zu testen bzw. vorhandene an veränderte Bedingungen anzupassen. Dies kann u.a. durch die Veränderung von Segmentierungswerten der Bildverar-

beitungsalgorithmen, aber auch durch Anpassungen sogenannter region of interests (ROI)³, ermöglicht werden.

Sind Veränderungen vorgenommen worden, so können die Bilder nacherfasst werden, d.h. das Bild wird seitens der Bildverarbeitungsalgorithmen mit ggf. angepassten Variablenwerten neu verarbeitet und aktualisierte Ergebnisse der Bildauswertung werden angezeigt.

- Datenmanagement

Trotz größer werdenden Speichermedien sollen ausschließlich das Originalbild und die Bildauswertungen bzw. -informationen in einer hierarchisch strukturierten Datenbank gespeichert werden, die die Basis des Software-Systems darstellt. In dieser können die angesprochenen Segmentierungswerte, z.B. Schwellwerte der Bildverarbeitungsalgorithmen, angepasst oder Änderungen der Toleranzwerte vorgenommen werden. Für Bildaufnahmen ist das Sichern des Originalbilds mit Zeitstempel besonders relevant und bei erfolgter Bildverarbeitung zusätzlich die Sicherung der Bildauswertungsinformation.

Bevor mit den eigentlichen Untersuchungen, sei es online oder offline, begonnen wird, ist es möglich einen individuellen Speicherort, vergleichbar mit Ordnerstrukturen bekannter Betriebssysteme, anzulegen. Darüber hinaus können prozesstechnische und materialbezogene Daten eingegeben werden, um relevante Informationen der Untersuchungsreihen zusätzlich zu speichern.

Weiterhin ist es im Hinblick auf die Qualitätssicherung wichtig, eine Report- bzw. Datenexportierung zu erlauben. Die Daten können somit in weitere Software-Systeme überführt und weiterverarbeitet werden, bspw. für statistische Auswertungen der Untersuchungsreihen.

Der Import neuer Bildverarbeitungsalgorithmen ins System sollte ebenfalls möglich sein. Dies bietet Vorteile der Anpassungsfähigkeit im Forschungs- bzw. Entwicklungsumfeld, um flexibel auf Umgebungsveränderungen oder

³ interessierender Bildbereich

Materialänderungen reagieren zu können. Aufgrund der angesprochenen Komplexität und starken Eingriffsmöglichkeiten in das System, ist eine rollenbasierte Autorisierung zu empfehlen. Fehlbedienungen und nicht sinnvoll gewählte Parameter der Bildverarbeitungsalgorithmen, bspw. seitens des Maschinenbedieners, können somit vermieden werden.

Die Datenbank bietet die Vorteile der Datenpersistenz sowie die Möglichkeit der Strukturierung und Sortierung von Daten. Über angelegte Ordnerstrukturen und Zeitstempel (Bildaufnahmedatum) kann der jeweils gesuchte Eintrag nebst Bildinformation gefunden und betrachtet werden.

- Mechanik

Als letzte Konfigurationsanforderung ist eine Mechanik sowie Softwarelösung notwendig, die die Kombination aus Kamera und Objektiv bezüglich des erforderlichen Arbeitsabstands des Objektivs ausrichtet. Hierzu ist eine Distanzmessung, ein Regelalgorithmus und eine Verfahreinheit mit Stellmotor notwendig. Eine industrieroboterbasierte Lösung wurde aufgrund der hohen Anschaffungskosten nicht weiter betrachtet.

Kriterium	Anforderung
Minimale Bildhöhe	$> 80mm$
Krümmungsradius	$> 1000mm$
Flecht kern- / Spantlänge	$< 5000mm$
Lagenanzahl	< 1000
Bauraum	$< 180 \cdot 180 \cdot 500mm^3$
Umgebungsschutz	Tageslicht / Sauberkeit

Tab. 3.3: Anforderungen: Geometrische Bedingungen QS-System

- Minimale Bildhöhe

Anforderung an das System ist eine minimale Bildhöhe von 80mm , da mindestens die Webhöhe des Spants erfasst werden muss. Die geringere Flangehöhe von 60mm liegt dadurch automatisch im Erfassungsbereich.

- Krümmungsradius

Der Flangebereich ist im Vergleich zum Web gekrümmt. Der minimal erforderliche Krümmungsradius des Flugzeugspants beträgt 1000mm , welcher Auswirkungen auf die Abmessungen der Beleuchtungseinheit haben kann.

- Flecht kern- / Spantlänge

Die Spantlänge bezieht sich auf die maximal mögliche Länge der Flecht kern-zuführung mittels Industrieroboter aus der vorhandenen Systemkonfiguration. Dies gilt es in der Datenbank entsprechend zu berücksichtigen, sofern die Datenerfassung je Flecht kern bzw. Spant aus Zuordnungsgründen gewünscht ist. Wichtiger erscheint in diesem Zusammenhang, dass die planare Abmessung des Systems nicht größer sein sollte, als der IMac-Pro Sensor - trotz der Forderung eines größeren Bildfelds ($\text{Bildhöhe} \cdot \text{Bildbreite}$).

- Lagenanzahl

Das QS-System soll bis zu 1000 Preform-Lagen im Datenbanksystem speichern, zuordnen und zusammenfassen können.

- Bauraum

Als Bauraum soll das QS-System, verglichen mit dem IMac-Pro Sensor, kleiner dimensioniert sein, um das Einsatzspektrum zu erhöhen. Das betrifft speziell die Verwendung des Systems an gekrümmten Strukturen.

Optional soll das QS-System die Möglichkeit bieten, ohne großen Aufwand an einen Industrieroboter, unter Berücksichtigung der jeweiligen Positionierungsgenauigkeit, montiert und verfahren werden zu können. Hierdurch erhöht sich das Einsatzspektrum, welches sich positiv auf die Nutzungsbereitschaft potenzieller Anwender im Bereich der Forschung auswirken könnte.

- Umgebungsschutz

Der Schutz vor variablem Tageslicht bzw. der Beleuchtung im Produktionsumfeld ist durch Abschirmung sicherzustellen, um bspw. eine direkte Bestrahlung zu vermeiden. Der Grund hierfür wurde bereits beschrieben: Die Güte des Bildverarbeitungsalgorithmus ist wesentlich von der Beleuchtungsintensität und -art abhängig.

Kriterium	Anforderung
Systemgesamtarchitektur	modular erweiterbar
Systemanpassungen	auf Anwenderebene möglich

Tab. 3.4: Anforderungen: Erweiterbarkeit des QS-Systems

Als letztes Kriterium werden die Anforderungen an die Systemerweiterbarkeit tabellarisch aufgezeigt, siehe *Tabelle 3.4*.

- Systemarchitektur

Die Systemarchitektur soll modular erweiterbar sein. Mögliche Zusatzkomponenten, u.a. weitere Bilderfassungssysteme, sollen integrierbar sein. Darüber hinaus soll auch die Option bestehen, eine Regelung der UD-Flechtmaschine vorzunehmen. Hierzu muss eine D/A-Schnittstelle vorgesehen werden.

- Systemanpassungen

Systemanpassungen sind im Rahmen der Untersuchungen stark zu vermuten. Zum einen, da unterschiedliches Tape-Material (Binderanteil) verwendet werden wird. Zum anderen, da eine Erweiterung der Systemarchitektur entsprechende Anpassungen erfordert. Optional soll das QS-System die Flechtmaschine regeln und über entsprechende Algorithmen verfügen.

Die Kriterien und Anforderungen für eine systematische Untersuchung der UD-Geflechttopographie wurden in den *Tabellen 3.1 bis 3.4* näher dargestellt und beschrieben.

Im Folgenden werden die in *Kapitel 2.5* vorgestellten QS-Systeme mit den Anforderungen ausgewählter Kriterien verglichen. Kriterien, wie bspw. die Kernlänge oder die Systemarchitektur wurden in der Bewertung nicht berücksichtigt, weil diese optional sind und einen eher geringen Gesamteinfluss auf die Auswahl des QS-Systems haben.

Die Klassifikation des jeweiligen Kriteriums ist in drei Stufen unterteilt: ungenügend (\searrow), mittel (\rightarrow) und gut (\nearrow).

- Onlineanalyse

Die Onlineanalyse ist das wichtigste Bewertungsmerkmal für das QS-System. Die verwendete Methode für die Detektion des Flechtwinkels ist beim IMac-Pro-Sensor als gut zu bewerten und auch die erforderliche Auflösung bzw. Genauigkeit wird erreicht. Das ist speziell bei Tape-Ondulationen in kleinen Bereichen wichtig, um diese hinreichend erfassen zu können. Der Sensor ermöglicht keine Detektion von Gaps und eine mittlere Bewertung resultiert.

Der FALCON-Prüfkopf soll Faserwinkel und Gaps erkennen können, allerdings für trockenes Fasermaterial. Bebindertes Material wurde nicht getestet. Es ist aufgrund des Einsatzes des Sensors auf einer Industrieroboterplattform anzunehmen, dass die erforderliche Zeit für die Bildverarbeitung vergleichbar bzw. besser als beim IMac-Pro-Sensor ist. Allerdings erfüllt der Sensor nicht vollständig die geforderte Genauigkeit für den Faserwinkel. Zusammenfassend resultiert für den Sensorkopf eine mittlere Bewertung. Welche Qualität die Bildverarbeitungsalgorithmen für bebindertes Fasermaterial haben, war nicht bewertbar.

Die verwendeten Methoden des Qualitätssensors ermöglichen die Detektion von Faserwinkel und Gaps gleichermaßen. Speziell die Genauigkeit für die Erfassung des Faserwinkels wird erfüllt. Gaps, am Beispiel eines simulierten

Taperisses im Geflecht, wurden mit den verfügbaren Methoden (Type: u.a. specular) nicht vollständig erfasst. Vorhandene Kontrastunterschiede im Bild erschweren eine optimale Auswertung, ähnlich *Abbildung 2.31*. Zusammenfassend resultiert für den Qualitätssensor eine mittlere Bewertung.

- Offlineanalyse

Die Offlineanalyse ist als Methode bei allen drei Prüfsensoren nicht vorhanden, d.h. es kann keine erneute Verarbeitung des Bildes mit veränderten Auswertungsparametern durchgeführt werden. Das ist grundlegend kein technisches Problem, schränkt aber experimentelle Untersuchungen ein. Es ist zu erwarten, dass für bestimmte Bilder erneute Auswertungen erfolgen müssen, u.a. wenn unterschiedliche ROI Gegenstand der Betrachtung sind. Mit den vorhandenen Systemen kann diese Forderung nicht erfüllt werden und resultiert jeweils in einer ungenügenden Bewertung.

- Datenmanagement

Das Datenmanagement ist mit den drei Prüfsystemen eingeschränkt möglich. Beispielsweise wird beim IMac-Pro-Sensor das erfasste Bild und das global ausgewertete Bild gespeichert. Zusätzlich wird im Format einer Textdatei der Flechtwinkel und die Auswertungsgüte gespeichert.

Der Einsatzschwerpunkt der drei Systeme ist die QS im Produktionsbetrieb. Ein Datenbanksystem mit Bewertungsmethoden ist nicht vorhanden, welches systematische Analysen sowie Zuordnungen der Bilder im Gesamtkontext der Preformherstellung ermöglicht. Spezielle Trends, u.a. ein Taperiss, könnten eindeutig sequenziell nachverfolgt und untersucht werden. Ebenfalls ist es möglich Versuchsreihen mit unterschiedlichen Einstellungen der Flechtmaschine durchzuführen und evident die Auswirkungen rückverfolgen zu können. Für die drei Systeme ergibt sich eine mittlere Bewertung.

- Bildhöhe

Der IMac-Pro-Sensor erfordert für die komplette Erfassung des Spantstegs drei übereinander geordnete Bilderfassungen und -auswertungen. Die Bildhöhe

ist mit $33,3\text{mm}$ im Vergleich zu klein, wobei durch spezielle Bildverarbeitungsalgorithmen ein gemapptes bzw. zusammengesetztes Bild erstellt werden könnte, vgl. *Anhang B2*. Dieser Lösungsansatz erfordert besondere Bildauswertungsmethoden sowie zusätzliche Verarbeitungszeit für die Zusammensetzung der Bilder. Darüber hinaus ist eine Hubeinheit für die gesamte vertikale Objektdeckung nötig. Aufgrund des mechanischen und ggf. softwaretechnischen Aufwands fällt die Bewertung ungenügend aus.

Der FALCON-Prüfkopf sowie der Qualitätssensor benötigen zwei Bildaufnahmen und damit einen geringeren Auswertungsaufwand. Dadurch resultiert ein mittleres Bewertungsergebnis für beide Sensoren.

- Gekrümmte Strukturen

Untersuchungsgegenstand ist der gekrümmte Preform-Spant. Die optimale Bildaufnahme erfordert beim Qualitäts- und IMac-Pro-Sensor einen geringen Abstand zum Geflecht. Zusätzlich ist für eine angemessene Ausleuchtung eine angepasste Dimensionierung der Beleuchtung notwendig. In der *Abbildung 2.35* ist der IMac-Pro-Sensor am Spant-Preform gezeigt. Die Erfassung von gekrümmten Strukturen ist aufgrund des geforderten Abstands zwischen Objekt und Prüfkopf schwierig, da eine Kollision dadurch nicht ausgeschlossen werden kann. Das Ergebnis der Bewertung ist ungenügend.

Der FALCON-Prüfkopf erlaubt aufgrund des größeren Arbeitsabstands eine Untersuchung gekrümmter Strukturen. Zusammenfassend ergibt sich eine gute Bewertung.

- Umgebungsschutz

Die Qualitäts- und IMac-Pro-Sensoren sind aufgrund des Gehäuses und des nahen Abstandes zum Messobjekt gut gegen Umgebungseinflüsse geschützt, daher resultiert ein gutes Bewertungsergebnis für beide Sensoren.

Der FALCON-Prüfkopf ermöglicht einen relativ großen Abstand zum Messobjekt, daher sind potenzielle Beeinträchtigungen aufgrund von Umgebungs-

einflüssen, bspw. Helligkeitsunterschiede infolge Fremdlicht oder Schatten, möglich. Zusammenfassend ergibt sich ein mittleres Bewertungsergebnis.

- Systemanpassungen

Systemanpassungen sind im Bereich der Forschung und Entwicklung vorteilhaft, da diese den Anwender unabhängiger vom jeweiligen Systemanbieter machen und flexible Anpassungen erlauben, bspw. bei einem Materialwechsel. Alle drei Systeme verfügen über wenige Grundanpassungsparameter, die u.a. Veränderungen der Bildverarbeitungsmethoden ausschließen. Die Bewertung ist für alle drei Prüfsysteme aufgrund der nicht vorhandenen Zugriffsmöglichkeit ungenügend.

Zusammenfassung der Ergebnisse der betrachteten QS-Systeme:

Kriterium System	IMac-Pro-Sensor	FALCON-Prüfkopf	Qualitätssensor
Onlineanalyse	→	→	→
Offlineanalyse	↘	↘	↘
Datenmanagement	→	→	→
Bildhöhe	↘	→	→
Gekrümmte Strukturen	↘	↗	↘
Umgebungsschutz	↗	→	↗
Systemanpassungen	↘	↘	↘

Tab. 3.5: Ausgewählte Kriterien und Methodenbewertungen der QS-Systeme

Darstellung des Bedarfs:

Die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden experimentellen Analysen des UD-Geflechts erfordern besondere Methoden, u.a. für die Bildverarbeitung der Merkmale Faserwinkel und Gaps. Nach Entwicklung systemrelevanter Anforderungen bzw. Kriterien für die UD-Geflechtanalyse (spez. Online- und Offlineanalyse) sowie einer systematischen Versuchsauswertung (spez. Datenmanagement) wurde eine Bewertung der QS-Systeme durchgeführt. Als Ergebnisse wurden Defizite identifiziert, die als Konsequenz eine technische Weiterentwicklung erfordern. Im folgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise der Konzipierung des QS-Systems QuIS vorgestellt.

3.2 Systemaufbau für die optische Analyse

In *Kapitel 2.5* wurden die Systemkomponenten für die industrielle Bildaufnahme bestehend aus den Hauptkomponenten Kamera, Beleuchtung und Objektiv erläutert. Entsprechend komplex ist es, aus der Vielzahl der verfügbaren Hardware die geeignetste auszuwählen. Dies soll unter Einbezug der *Kapitel 2.5* und *3.1* detailliert erfolgen. Im Folgenden werden die Softwarekomponenten für die Bildauswertung vorgestellt. Bei der Systementwicklung wurde bewusst die Reflexionscharakteristik der Kohlenstofffaser genutzt, um die Effekte aufgrund der Beleuchtungsperipherie mit geeigneter Auswertungssoftware zu kombinieren. Die Darstellung in *Abbildung 3.1* zeigt das Konzept des QS-Systems schematisch auf.

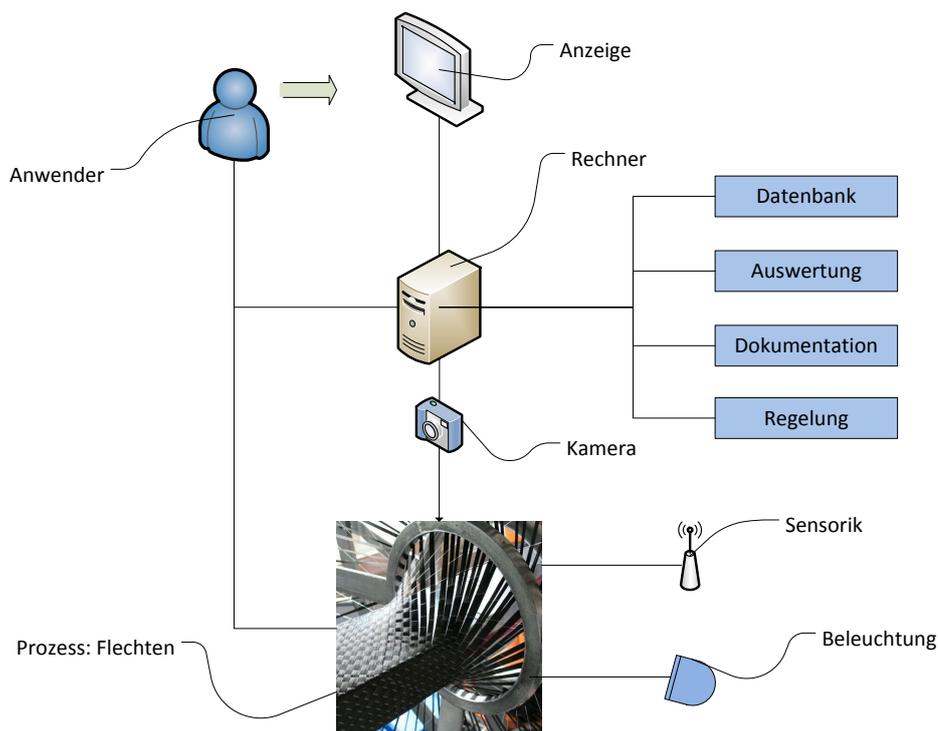


Abb. 3.1: Darstellung der konzeptionellen Idee des QS-Systems[4, vgl. S.57]

3.2.1 Kamera

Mit der Bilderfassung startet der erste Schritt der industriellen Bildverarbeitung. Das in diesem Fall zu untersuchende Objekt wird auf dem Kamerasensor, ähnlich der vergangenen analogen Bildaufzeichnung per Film, abgeleuchtet. Der in der Kamera vorhandene Bildsensor bzw. Aufnehmer funktioniert nach dem inneren photoelektrischen Effekt.[3, S.43] Vereinfacht dargestellt, wird die vom Sensor aufgenommene Strahlungsenergie in elektrische Energie transformiert. Die einfallende Photonen- bzw. Ladungsmenge wird aufsummiert und ist proportional zur Belichtungszeit und Lichtintensität.[54, vgl. S.207] Nach diesem Prinzip arbeiten u.a. die CCD⁴- sowie CMOS⁵-Sensoren.

Neben der Halbleitertechnologie ist die Auslesemethode der Bildinformation relevant, d.h. die elektronischen Kameras verfügen über eine vorkonditionierte Ausgabe der Daten. Die Datenrate und Belichtungszeit muss an den Untersuchungsgegenstand sowie an eine mögliche Objektdynamik angepasst sein. Im Falle der vorliegenden Arbeit ergibt sich die Dynamik weitestgehend aus dem Kernvorschub. Hinzu kommt eine lineare Bewegung von ca. $1Hz$ durch die Hubvorrichtung am Flechter, welche einen Einfluss auf die Objektaufnahme haben könnte.

Als Kameraart wird eine sogenannte Flächenkamera verwendet. Die Bezeichnung Flächenkamera bezieht sich auf die geometrische Anordnung der lichtempfindlichen Elemente des Kamerasensors. Im Vergleich zur Zeilenkamera wird nicht jeweils eine Zeile erfasst, ähnlich bei einem Scanner, sondern die Fläche des Objekts auf dem Sensor. Das Bild wird also gesamtheitlich erfasst.

Bevor eine Kamera ausgewählt werden kann, muss die Kameraauflösung nach *Gleichung 3.1* berechnet werden. Als Annahme gilt ein Bildbereich von $G = 85mm$. Dieser setzt sich aus der Steghöhe des Spants und einer Sicherheit von $5mm$ zusammen. Für die Methode der Kantenabtastung, relevant für die Bestimmung des

4 Charge-coupled device, ladungsgekoppelter Bildsensor

5 Complementary metal-oxid-semiconductor, komplementärer Metalloxid-Halbleiter

Flechtwinkels, wird als Subpixelfaktor 0,9 und als notwendiger Pixelwert $n_P = 1,11Pixel$ angenommen. Voraussetzung dafür sind gute Beleuchtungsverhältnisse und verzerrungsfreie Objektdarstellungen. Für das kleinste aufzulösende Merkmal wird $s_{Merkmal} = 1/25mm$ gewählt, da Kantenerkennungsalgorithmen in diesem Verhältnis bereits gute Auswertungsergebnisse liefern.

$$A_{Kamera} = G \cdot \frac{n_P}{s_{Merkmal}} \approx 2360Pixel \quad (3.1)$$

Die Kamera muss über eine Auflösung in der Höhe von mindestens $2360Pixel$ verfügen. Die Breite kann variabel sein. Als Kamera für die Untersuchungen wurde die Sony XCG-5005E ausgewählt. Die Kamera hat einen $2/3''$ CCD ICX626 Bildsensor mit einer Auflösung R von $2448 \cdot 2050$ aktivierten Pixeln, was einer Gesamtpixelanzahl von $5,02 \cdot 10^6$ entspricht, bei einem Pixelformat von $F = 8bit$ Schwarz/Weiß.[64, S.2] Die Kamera von Sony arbeitet nach dem Progressive-Scan-Prinzip, d.h. die Zeilen werden nacheinander erfasst und anschließend komplett übertragen.[54, vgl. S.206] Dynamische Bilder können dadurch besser erfasst werden.

Als Sensorauslesetechnik wird die Interline-Transfer-Methode genutzt, um sogenannte Verschmierungseffekte zu vermeiden. Als Nachteil ist der im Vergleich zum Full-Frame-Sensor geringere Füllfaktor bei gleichzeitig verringerter Empfindlichkeit zu nennen.[3, vgl. S.44f] Neben der Kameraauflösung gilt es die Bildrate zu bestimmen:

$$fps_{\max} = \frac{U_{GigE}}{R \cdot F} \approx 25Hz \quad (3.2)$$

Die Übertragungsrate U_{GigE} der Schnittstelle beträgt $1000MBit/s$. Die Bildrate der Kamera beträgt bei voll genutzter Auflösung nach Herstellerangabe $15fps$, liegt also unter der berechneten Bildrate von $25fps$. [65, S.3] Für die Untersuchungen von Flechtwinkel und Gap entspricht die Kamera den Anforderungen. Als Standard

werden GigE-Vision⁶ sowie Gen-I-Cam⁷ verwendet. Triggermodi sowie sechzehn verschiedene Kameravoreinstellungen erlauben weitere Einstellmöglichkeiten.

3.2.2 Objektiv

In *Kapitel 2.5* wurde dargestellt, dass sich für Messaufgaben bei möglichen perspektivischen Verzerrungen telezentrische Objektive eignen. Die Abbildungsgröße des Objekts vor dem Objektiv bleibt im Hinblick auf die Entfernung unberührt, lediglich die Bildschärfe verändert sich. Im Vergleich zu häufig verwendeten Makro-Objektiven ist die Schärfe bzw. Unschärfe bei leichter Defokussierung akzeptabel.

Wichtig ist im Folgenden, welches Objektiv zur gewünschten Objektgröße, hier die Steghöhe plus Sicherheit von insgesamt $G = 85mm$, auf den $2/3''$ CCD *ICX626* Sensor mit Höhe $H = 8,8mm$ passt. Berechnung des Verstärkungsfaktors β' , oftmals auch Magnitude genannt, nach *Gleichung 3.3*:

$$\beta' = \frac{H}{G} \approx 0,104 \quad (3.3)$$

Das bi-telezentrische Objektiv *TC2385* seitens Opto-Engineering mit einem $\beta' = 1,04$ sowie einem Objektbereich von $84,9mm \cdot 63,7mm$ entspricht der Anforderung an den Verstärkungsfaktor, bei einem Arbeitsabstand von $280mm$. [56, S.3]

Die maximale Verzeichnung des Objektivs wurde mit $0,08\%$ angegeben und ist im Vergleich zu anderen Tele-Objektiven ein guter Wert. Im Vergleich zu Makro-Objektiven mit identischem Bildfeld fällt die Baugröße auf. Die Länge des Objektivs beträgt knapp $345mm$, dieses Maß muss neben dem nötigen Arbeitsabstand entsprechend für den Einsatz an der Flechtanlage geprüft werden. Die Kamera kann direkt ans Objektiv geschraubt werden. Auf der anderen Seite der Kamera wird sich die Beleuchtung befinden. Diese soll zusätzlich seitlichen Umgebungslichteinfluss unterbinden und die Optik vor Schmutz und Kohlenstofffaserstaub schützen.

⁶ Gigabit Ethernet Übertragungsstandard, Hardwareschnittstelle

⁷ Generic Interface for Cameras, Softwareschnittstelle

3.2.3 Mechanik und Sensorik

Um eine hohe Bildschärfe der Objektaufnahme zu erhalten, muss der Arbeitsabstand des Objektivs eingehalten werden. Veränderungen des Arbeitsabstandes können zum einen aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Positionierung des Kerns erfolgen, zum anderen aus möglichen Radienveränderungen des Spants. Die Einhaltung des Arbeitsabstands, soll über eine Bewegungskinematik und Sensorik für die Bestimmung des Objekt-Objektiv-Abstands realisiert werden.

Für die Abstandsmessung des Kerns zum Objektiv würden sich Laser- und Ultraschallsensoren eignen. Für die Bewegungskinematik reicht aufgrund des einen Freiheitsgrades eine Linearführung mit entsprechendem Antrieb aus. Wichtig ist hier, dass das Gesamtgewicht der Mess- und Beleuchtungseinheit vom Linearantrieb im späteren Betrieb problemlos verfahren werden kann.

Das Objektiv wiegt mit Vorrichtung und Kamera ca. $4,14\text{kg}$. Zusatzelemente wie die Beleuchtung und elektronische Komponenten werden mit ca. $2,50\text{kg}$ angenommen. Zusammenfassend muss der Linearantrieb eine Masse von knapp $7,00\text{kg}$ bewegen können, folglich je nach Reibungskoeffizient eine Kraft von maximal 70N aufweisen.

Aufgrund der möglichen Einbindung der Ansteuerung durch die Programmiersprache C++ wird ein Linearantrieb mit großem Verstellweg von $\leq 300\text{mm}$ der Firma Zaber verwendet. Diese weist eine maximale lineare Stellgeschwindigkeit von 20mm/s bei einer Auflösung von $0,24\mu\text{m}$ sowie eine Hubkraft von 100N auf.[55, S.253] Der Verstellweg von $\leq 300\text{mm}$ ist mehr als ausreichend für die Anwendung und als Schnittstelle eignet sich die RS232.

Die Erfassung des Abstands soll im Messprozess erfolgen, das bedeutet, erst wenn eine bestimmte Distanzänderung einschließlich Toleranzbereich messbar wird, erfolgt die Systemregelung. Um eine Kollision zwischen Kern und Beleuchtung zu vermeiden, ist es möglich das System voreilend einzustellen, um auf Veränderungen der Abstandshöhe bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten zu reagieren. Dies ist relevant, wenn der Sensorkopf inklusive der Beleuchtung einen großen Bauraum erfordert.

Das maximale Schrägungsverhältnis des Spants ist mit 1 : 10 angenommen. D.h. nach 100mm Kernvorschub-Weg s_{tu} verändert sich die Höhe der jeweiligen Flanke um $\Delta h = 10\text{mm}$ zu gleicher Zeit. Kernvorschub $v_{tu} = 16,6\text{mm/s}$.

$$t_{Vorschub} = \frac{s_{tu}}{v_{tu}} \approx 6\text{s} \quad (3.4)$$

Die Zeit $t_{Vorschub}$ wurde mittels des Verhältnisses aus Weg und Geschwindigkeit bei gleichförmiger Bewegung in *Gleichung 3.4* berechnet. Es folgt der Nachweis der benötigten Verfahrensgeschwindigkeit für die im System eingesetzte Linearführung.

$$v_{Lineareinheit} = \frac{\Delta h}{t_{Vorschub}} \approx 2\text{mm/s} \quad (3.5)$$

Die benötigte Geschwindigkeit des Ergebnisses nach *Gleichung 3.5* zeigt deutlich, dass das Schrägungsverhältnis sowie der angedachte Kernvorschub für das QS-System mit der gewählten Linearführung in dieser Form realisiert werden kann. Im Folgenden wird die Evaluierung einer geeigneten Messmethode zwischen Laser- und Ultraschalltechnik für den Abstandssensor vorgenommen.

Die Bewertung der jeweiligen Funktion ist in drei Stufen unterteilt: ungenügend (\searrow), mittel (\rightarrow) und gut (\nearrow).

Kriterium	Ultraschall	Laser
Feinheit Strahl	\searrow	\nearrow
Reaktionszeit	\rightarrow	\nearrow
Berührungsfrei	\nearrow	\nearrow

Tab. 3.6: Vergleich der Ultraschall- und Lasertechnik[4, S.265]

Aufgrund der Feinheit des Laserstrahls und der kurzen Reaktionszeit wird ein *IL – 300* Lasersensor von Keyence implementiert. Dieser hat einen Messbereich zwischen 150mm und 450mm und die Sensoreinheit generiert eine Ausgangsspannung proportional zur Entfernung.[53, S.16f]

3.2.4 Beleuchtungsperipherie

Die Beleuchtung ist neben der Kamera das Kernelement der gesamten Hardware. Mit dieser wird über Erfolg oder Misserfolg in der Bildverarbeitung entschieden. Die Kamera nimmt das Objekt nicht 'rein' objektiv auf, sondern dessen Wirkung bei entsprechender Beleuchtung.[3, vgl. S.14]

Im Folgenden wird die für den Anwendungsfall der Geflechtanalyse geeignetste Beleuchtungsperipherie untersucht und bewertet. Die Bewertung der folgenden Kriterien ist in drei Stufen unterteilt: ungenügend (\searrow), mittel (\rightarrow) und gut (\nearrow).

- Test-Algorithmus

Die Beleuchtungen wurden mittels Bildaufnahme und Test-Algorithmus (Faserinstitut Bremen e.V.) für die Auswertung des Flechtwinkels miteinander verglichen. Die wichtigste Bewertungsgröße der Untersuchungen ist der Test-Algorithmus. Bei Erzielung des optimalen Auswertungsergebnisses wurden die anderen Kriterien entsprechend aufgenommen und miteinander verglichen.

Mit der Beleuchtungsart Lichtdome konnten gute Auswertungsergebnisse erzielt werden. Die in *Abbildung 2.31* dargestellte inhomogene Lichtintensitätsverteilung im Bereich des ROI könnte dadurch vermieden werden, indem Lichtdome und Objektiv größer dimensioniert werden.

Die Koaxial-Beleuchtung hat im Vergleich zum Lichtdome eine Vorzugsrichtung aufgrund des inneren Aufbaus der Leuchtmittel im Gerät, vgl. *Abbildung 2.32*. In beiden *Abbildungen 3.2* und *3.3* können aufgrund der leichten Omdulationen der Tapes sehr dunkle und helle Bereiche erkannt werden, die das Auswertungsergebnis beeinflussen und zu einer mittleren Bewertung führen.

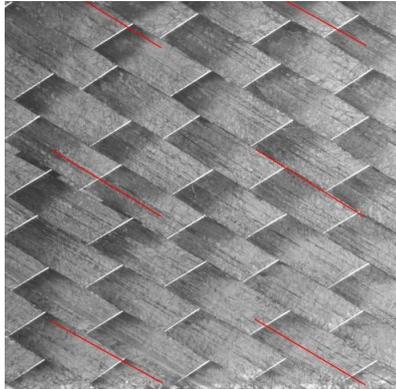


Abb. 3.2: Koaxial-Test 1

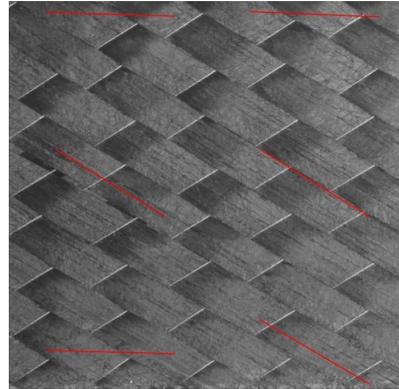


Abb. 3.3: Koaxial-Test 2

Die Funktion der Flat-Dome Beleuchtungsart wurde in *Abbildung 2.32* schematisch dargestellt. Die *Abbildung 3.4* zeigt einen Ausschnitt des ersten Versuchsaufbaus vom QS-System. Der Aufbau besteht aus dem Objektiv *TC2385*, der Halterung (welche auf einer Linearführung montiert wurde) und dem Flat-Dome, der im rechten Bereich des Bildes erkennbar ist. Interessant ist die geringe Tiefe dieses Geräts und die Möglichkeit der vollständigen Abbildung des zu erfassenden Objektbereichs unter Berücksichtigung der Abmessungen des telezentrischen Objektivs.

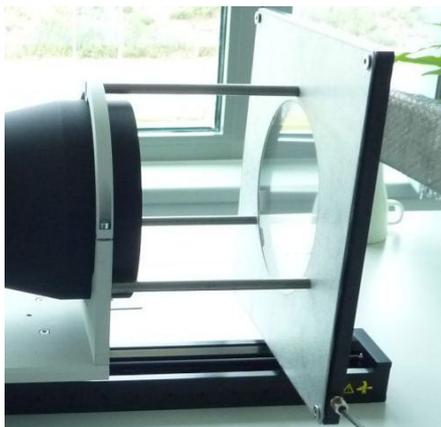


Abb. 3.4: Test 1: Flat-Dome

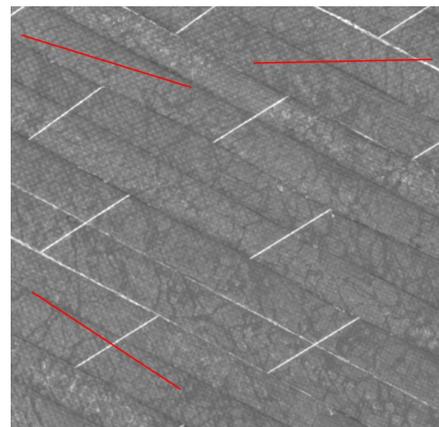


Abb. 3.5: Auswertung Test 1

Die Untersuchungen ergaben, dass ein Abstand zwischen Flat-Dome und Objekt von $\approx 150\text{mm}$ die Oberfläche des Geflechts diffus und homogen ausleuchtet. Allerdings ist hier die Aufnahme matt und das spezielle Punktmuster, welches die diffuse und homogene Beleuchtungscharakteristik ermöglicht, erkennbar.

In *Abbildung 3.5* ist die Auswertung des Flechtwinkels dargestellt. Die Orientierung der Tapes ist gut zu erkennen sowie die starke Abweichung aller roten Visualisierungslinien, die die Auswertungsergebnisse der jeweiligen Flechtwinkel repräsentieren. Mittels Abschirmung konnte ein besseres Ergebnis erzielt werden, welches jedoch nicht exakt genug ist. Resultat ist ein mittleres Bewertungsergebnis.

- Bezug Objektiv

Die Beleuchtungsperipherie hat als Zwangsgröße den Außendurchmesser des Objektivs *TC2385* von 143mm zu berücksichtigen.

Für einen Objektivdurchmesser von 143mm ist kein passender Lichtdome verfügbar. Für einen Objektivdurchmesser von 80mm würde der Außendurchmesser des Domes ungefähr 424mm betragen.[54, S.84] Es resultiert ein ungenügendes Bewertungsergebnis.

Bei der Koaxialauflichtbeleuchtung sind die erhältlichen Geräte zu klein. In Anlehnung an die *Abbildung 2.32* würde die Objektgröße des Objektivs das Gehäuse auf dem Bildsensor der Kamera abbilden. Die Innenfläche der diffusen Beleuchtung hat quadratische Abmessungen mit max. 100mm .[55, S.392] Es resultiert ein ungenügendes Bewertungsergebnis.

Der Flat-Dome ist mit einer max. Beleuchtungsfläche von $200\text{mm} \cdot 200\text{mm}$ verfügbar. Diese Größe ist ausreichend für die Objektivgröße. Es resultiert ein gutes Bewertungsergebnis.

- Sensitivität Abstand

Der Lichtdome zeigt bereits bei einem Abstand von $\approx 35\text{mm}$ zum Objekt eine negative Beeinflussung des Auswertungsergebnisses hinsichtlich der ge-

ringeren Intensität der Beleuchtung. Aufgrund dieser Abhängigkeit folgt eine ungenügende Bewertung.

Bei der Koaxial-Beleuchtung ist ersichtlich, dass der Abstand einen Einfluss auf die Helligkeitsintensität hat und folglich auch auf das Auswertungsergebnis des Flechtwinkels. In *Abbildung 3.3* (Objektabstand 50mm) konnten bspw. die oberen Flechtwinkel nicht bestimmt werden, was bei der Auswahl dieser Beleuchtung zu berücksichtigen ist.

Zusätzlich gilt es stets die Strahlleiterplatte auf Sauberkeit hin zu prüfen, da Staub oder sonstiger Schmutz aufgrund der Durchsichtaufnahme auf dem Sensor der Kamera abgebildet wird. Dies wird besonders deutlich, wenn der Abstand zum Objekt weiter verringert wird, bspw. auf $\approx 10\text{mm}$. Staubreste sind dann eindeutig erkennbar und beeinflussen das Auswertungsergebnis.

Bei einer Vergrößerung des Abstands sind an einigen Stellen überbelichtete Bereiche zu verzeichnen, die eine hinreichende Auswertung erschweren. Positiv verhält sich bei großen Abständen die Beeinflussung durch Staub. Diese ist bei $\approx 70\text{mm}$ auf ein geringes Niveau gesunken und wird auf dem Bild nicht mehr dargestellt. Es resultiert ein ungenügendes Bewertungsergebnis.

Beim Flat-Dome ist bei einem sehr nahen Objektabstand von $\approx 25\text{mm}$ das angesprochene Punktmuster sehr deutlich zu erkennen. Der Kontrast ist "gut", das Auswertungsergebnis des Flechtwinkels allerdings "mittel", *Abbildung 3.7*. Hier ist ggf. ein Kompromiss zwischen Objektabstand, Kontrast und ausgeprägtem Punktmuster auf dem Kamerabild zu treffen. Allerdings fällt auf, dass die angezeigten Flechtwinkel nicht 100% genau den Winkel der Tapes abbilden. Es resultiert ein mittleres Bewertungsergebnis.

- Bauraum

Der Bauraum der Koaxial-Beleuchtung ist im Vergleich zum Lichtdome bei ähnlicher Beleuchtungsfläche kleiner. Im Vergleich Koaxial-Beleuchtung zum Flat-Dome ist der Bauraum jedoch größer.

Der Flat-Dome hat eine geringe Tiefe von 10mm und erfordert im Vergleich

zu den anderen Beleuchtungen den kleinsten Bauraum. Das Ergebnis der Bewertung für den Flat-Dome ist daher “gut“.

- Umgebungslicht

Beim Lichtdome ist ein gutes Beleuchtungsergebnis bei geringem Abstand zum Objekt zu erzielen. Die Beeinflussung des Umgebungslichts ist gering und es folgt eine gute Bewertung.

Die Koaxial-Beleuchtung erfordert einen geringen Abstand zum Objekt, damit das Umgebungslicht das Auswertungsergebnis nicht zu sehr beeinflussen kann. Aufgrund der kleinen Abmessungen ist der Einfluss allerdings größer als beim Lichtdome und führt zu einer mittleren Bewertung. Eine Abschirmung verbesserte das Ergebnis.

Für den Flat-Dome wurde, um das System vor Einflüssen von Staub und Umgebungslicht zu schützen, eine Abschirmung erstellt, siehe *Abbildung 3.6*. Hierdurch wurde die Qualität des Bildes und damit das Auswertungsergebnis verbessert. Aufgrund der hohen Lichtintensität der LEDs konnte kein signifikanter Einfluss des Umgebungslichts festgestellt werden und resultiert in einer guten Bewertung.



Abb. 3.6: Test 2: Flat-Dome

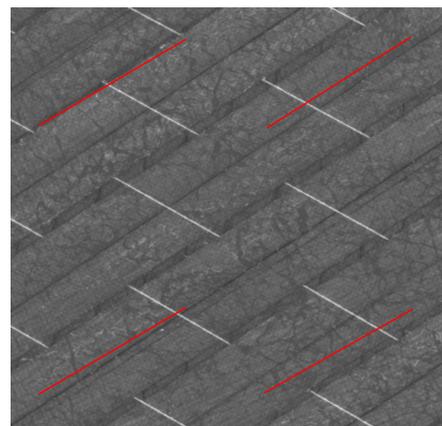


Abb. 3.7: Auswertung Test 2

- Kollision Kern

Für gute Auswertungsergebnisse muss der Lichtdome mit einem Arbeitsabstand von $\approx 10mm$ positioniert werden. Dies bedeutet allerdings eine Kollision mit dem Spant für einen minimalen Krümmungsradius von $1000mm$. Das Ergebnis der Bewertung ist aufgrund einer Spantkollision “ungenügend“.

Die Koaxial-Beleuchtung benötigt für das optimale Beleuchtungsverhältnis einen Arbeitsabstand von $\approx 25mm$. Das Ergebnis der Bewertung ist aufgrund einer Spantkollision “ungenügend“.

Der Flat-Dome erlaubt mit einem Abstand von $\approx 150mm$ zwischen Beleuchtung und Objekt gekrümmte Strukturen zu untersuchen. Das Ergebnis der Bewertung ist “gut“.

Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der Beleuchtungssysteme:

Kriterium Beleuchtung	Lichtd.	Koaxialb.	Flat-Dome
Test-Algorithmus	↗	→	→
Bezug Objektiv	↘	↘	↗
Sensitivität Abstand	↘	↘	→
Bauraum	↘	→	↗
Umgebungslicht	↗	→	↗
Kollision Kern	↘	↘	↗

Tab. 3.7: Kriterien und Methodenbewertung der Beleuchtungssysteme

Darstellung des Bedarfs:

Der Test-Algorithmus zeigte gute Auswertungsergebnisse für den Flechtwinkel unter Nutzung des Lichtdomes. Allerdings konnte aufgrund der Größe des Bildbereichs und respektive des Objektivs kein geeigneter Lichtdome für die Ausleuchtung ermittelt werden. Eine Kollision zwischen Beleuchtung und Kern ist ebenfalls wahrscheinlich. Die Koaxial-Beleuchtung und der Flat-Dome zeigten mittlere Auswertungsergebnisse und eine Kollision mit dem Kern ist speziell bei der Koaxial-Beleuchtung zu erwarten.

Aufgrund der vorhandenen Defizite der einzelnen Beleuchtungsmethoden wurde ein Beleuchtungskonzept speziell für das UD-Flechtverfahren entwickelt, das im Folgenden näher vorgestellt wird.

Entwicklung Beleuchtungskonzept

Aus der vorangegangenen Zusammenfassung ist ersichtlich, dass ein individuelles Beleuchtungskonzept entwickelt werden musste, da die Ergebnisse des Flechtwinkel-Test-Algorithmus bei zwei Beleuchtungsmethoden nicht den Anforderungen entsprachen. Der Lichtdome schied aufgrund der potenziellen Kernkollision sowie der nicht verfügbaren Dimensionierung ebenfalls aus.

Die Entwicklung wird unter Einbezug der Verwendungsanforderungen des Test-Algorithmus für den Flechtwinkel realisiert. Die Bildauswertung erfordert eine diffuse Beleuchtungsumgebung, um gewünschte Merkmale festzustellen. Das Merkmal kann durch die allgemeine Bildcharakteristik als Parameterwert quantitativ oder visuell als Linie aufgezeigt werden und hiermit auf Abweichungen bzw. Defekte im Geflecht hinweisen.

Folgende Kriterien müssen von der neuen Beleuchtungsmethodik erfüllt werden:

- Vorgabe der Test-Algorithmen: Diffuslicht
- Beleuchtung soll kleinste Abmessungen aufweisen
- keine Kollisionsgefahr zwischen Objekt und Beleuchtung
- Beleuchtungsergebnis weitestgehend unabhängig vom Abstand
- Abschottung des Umgebungslichts und Schutz vor Schmutz

Das erste Kriterium Diffuslicht wird im Folgenden näher untersucht. Die Untersuchung ist erforderlich, da die Oberfläche einer Kohlenstofffaser-Lage bei direktem Auflicht hochreflektiv erscheint. Dies ist bspw. festzustellen, wenn die Lage mit einer Systemkamera und einem Blitzlicht fotografiert wird.

Werden die Beleuchtungsverhältnisse genauer untersucht, bspw. mit einer LED-Leiste als Leuchtmittel mit direkter Abstrahlung und wird diese im Winkel von 90°

zur allgemeinen Lagenorientierung bzw. zum Flechtwinkel positioniert, so sind die Fasern gut erkennbar.

Wird die Leuchteleiste im Winkel von 0° bzw. längs zur Lagenorientierung positioniert, so erscheinen die Fasern schwarz. Ein Bild bzw. Bereiche eines Bildes, welche sich nahezu aus schwarzen Pixeln zusammensetzen, verhindern eine entsprechende Merkmalsextraktion. Ähnliches gilt für hochreflektierende und dadurch meist überbelichtete Bereiche die weiß erscheinen und unbedingt zu vermeiden sind.

Darstellung der Beleuchtungsmerkmale:

- Ausbreitung des Lichts

Im Hinblick auf den Flechtprozess werden unidirektionale Lagen geflochten. Gute Auswertungsergebnisse sind möglich, wenn das Licht ungerichtet, also diffus auf die Oberfläche der Geflechtlage trifft. Ein kontrastreicheres Bild der Tapes wird allerdings erst durch eine zusätzlich gerichtete Beleuchtung ermöglicht, denn die Ausbreitung des Lichts hat fundamentale Bedeutung. Da aufgrund des Lagenaufbaus des Spantpreforms verschiedene Winkel möglich sind, muss die Beleuchtungseinheit drehbar gelagert werden.

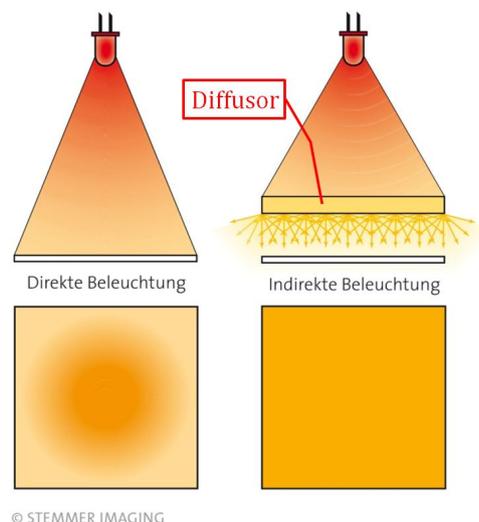


Abb. 3.8: Vergleich direkte/indirekte Beleuchtung[54]

In *Abbildung 3.8* wird der Vergleich zwischen direkter und indirekter Lichtausbreitung aufgezeigt. Die direkte Beleuchtung, hier in Form einer Einzel-LED dargestellt, zeigt eine gewisse Richtungs- und Helligkeitsinvarianz beim Objekt auf. Dies würde zwangsweise zu hellen und dunklen Bereichen führen, was die Merkmalerkennung erschwert.

Die Lage in *Abbildung 3.9* wurde mit einer LED-Leiste als Auflicht beleuchtet. Das Stützgarn sowie fleckige Bereiche, hier der Binder auf den Fasern, sind zu erkennen. Dieses Beleuchtungsergebnis ist zu vermeiden, da die reflektierten Bereiche weiß, ähnlich wie das Stützgarn, erscheinen und seitens der Bildauswertung auch als Stützgarn gewertet werden. Nützliche Merkmale gehen aufgrund unzureichender Beleuchtung verloren.

Allerdings lassen sich die Ondulationen der Tapes erkennen, die mit dieser Beleuchtungsart theoretisch erfasst werden könnten.

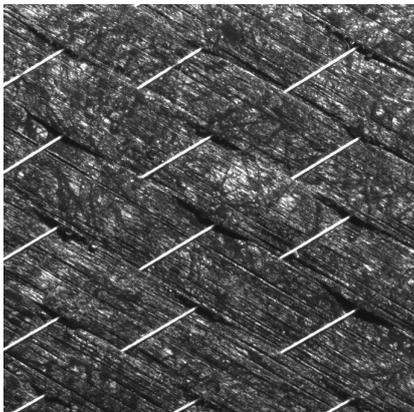


Abb. 3.9: LED-Leiste

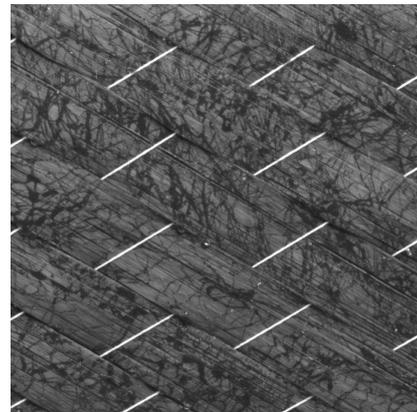


Abb. 3.10: LED-Leiste mit Diffusor

Mit der Implementierung eines Diffusors zwischen LED-Leiste und Objekt können überbelichtete Bereiche vermieden werden, siehe *Abbildung 3.10*. Mehr Bildinformationen stehen für die Auswertung zur Verfügung.

Um das mögliche Spektrum der Einsatzfähigkeit des QS-Systems zu erhöhen, wird für die Ausbreitung des Lichts die Kombination aus gerichteter LED und Diffusor Anwendung finden.

- **Objektoberfläche**

Das Kohlenstofffasermaterial entspricht dem Beleuchtungsmerkmal Objektoberfläche. Zu beachten ist hier, dass dieses Material einen thermoplastischen Binder aufweist. Der Binder beeinflusst, ähnlich wie das verwendete Stützgarn, die Bildauswertung und entsprechend die Charakteristik der Oberfläche. Erschwerend kann im Vergleich zu relativ ebenen Lagen, wie bspw. Gelegen, die angesprochene Welligkeit der Tapes werden. Hier kann sich die Wirkung des Bilds aufgrund verschiedenartiger Reflexionseigenschaften der lokalen Faserbereiche verändern. Dieser Sachverhalt muss bei der Auslegung der Beleuchtungsperipherie grundsätzlich beachtet werden.

- **Lichtintensität I**

Die Lichtintensität soll seitens der Beleuchtungseinrichtung variabel sein, um das System für unterschiedliche Einsatzzwecke nutzen zu können. Die LEDs können entsprechend mit einem Pulsweitenmodulations-Modul mit Ausgangsspannung 24V gesteuert und im Lichtintensitätswert verändert werden. Für die Berechnung und Auslegung des Lichtfelds wurde als Referenz der Test-Algorithmus verwendet.

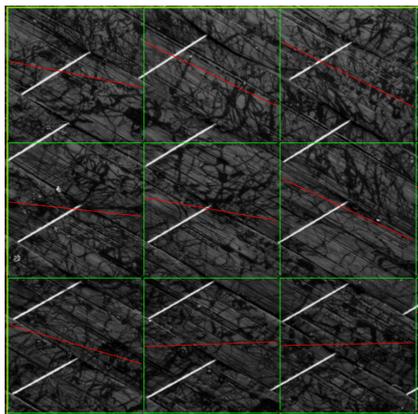


Abb. 3.11: Ausleuchtung: schlecht

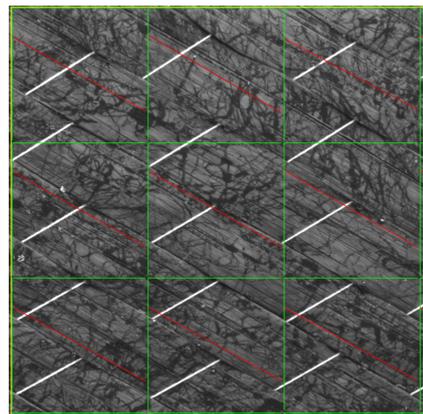


Abb. 3.12: Ausleuchtung: gut

In der *Abbildung 3.11* ist im unteren linken Auswertungsbereich eine relative Winkelabweichung zur Gesamtorientierung deutlich erkennbar. Im Vergleich

dazu die *Abbildung 3.12*, die optimaler ausgeleuchtet erscheint und daher eine verbesserte Auswertung der lokalen Winkelorientierungen zulässt.

Anlehnend an das Ergebnis aus *Abbildung 3.12* muss die spätere Objektfläche *A* mit der Beleuchtungsstärke E_v bestrahlt werden. Dies garantiert eine ausreichende und robuste Nutzung des Auswertungsalgorithmus.

Die *Abbildung 3.13* zeigt den Aufbau der Beleuchtungsstärkenbestimmung. Im Zentrum der Objektfläche *A* wurde per digitalem Luxmeter die resultierende Beleuchtungsstärke von $4500lx$ bestimmt.

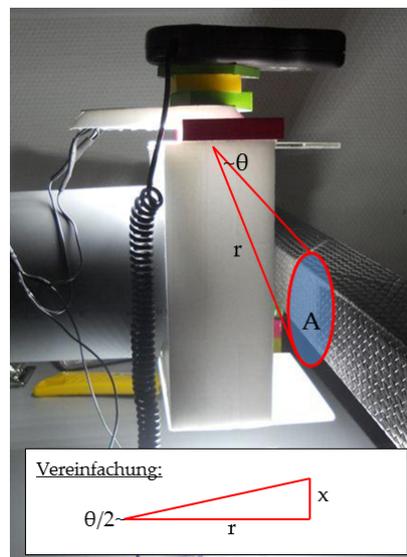


Abb. 3.13: Aufbau: Bestimmung der Beleuchtungsstärke

Die Abstrahlung der Beleuchtung ist als Punktquelle zu betrachten und strahlt in einem Winkel $\Theta \approx 40^\circ$. Die Strecke x lässt sich in grober Näherung nach der Skizze in *Abbildung 3.13* aus einem Kegel mit der Höhe r ableiten.

Höhe $r = 0,18m$ stellt den Abstand von Lichtquelle zum Mittelpunkt der Fläche dar.

Es folgt die analytische Darstellung der Vorgehensweise zur Berechnung der Lichtintensität I mittels LED-Beleuchtungsumgebung.

Berechnung Kegelradius x der Fläche A :

$$x = r \cdot \tan \frac{\Theta}{2} = 0,0655m \quad (3.6)$$

Berechnung der Kegelgrundfläche $A \approx$ bestrahlte Fläche:

$$A = x^2 \cdot \pi = 0,0135m^2 \quad (3.7)$$

Berechnung des Lichtstroms Φ_v : [S.17][3]

$$\Phi_v = A \cdot E_v = 60,75lm \quad (3.8)$$

Berechnung des Raumwinkels Ω , mit $\varphi = 2\pi$, $\Theta/2 = 20^\circ \approx 0,349rad$:

$$\Omega = \int_0^\varphi \int_0^\Theta \sin \Theta d\Theta d\varphi = 0,379 \quad (3.9)$$

Berechnung der erforderlichen Gesamtleuchtstärke I : [S.16][3]

$$I = \frac{\Phi_v}{\Omega} = 160332mcd \quad (3.10)$$

Nach *Gleichung 3.10* ergibt sich für die Gesamtleuchtstärke $I = 160332mcd$. Aus der vielfältigen Auswahl an LED wurde die High Power 24V/DC LED in SMD⁸-Bauweise mit einer Einzelleuchtstärke I_{Einzel} von $1800mcd$ gewählt, siehe *Anhang A3*. Es folgt die Berechnung der Anzahl der LED-Streifen mit jeweils 12 darauf befindlichen LED:

$$n_{LED\text{-Streifen}} = \frac{I}{I_{Einzel}} \approx 8 \quad (3.11)$$

⁸ Surface-Mounted Device, oberflächenmontierte Bauelemente

Das Beleuchtungssystem wird nach *Gleichung 3.11* acht LED-Streifen aufweisen. Diese werden aus Gründen der Symmetrie zu jeweils vier Einheiten oben und unten auf die sogenannten Leuchtmittelplatten positioniert. Die Leuchtmittelplatten haben die Abmessungen $112\text{mm} \cdot 145\text{mm}$ und die LED wurden gleichmäßig verteilt befestigt. Die vorhandene Klebung auf der Rückseite des Leuchtmittels wurde zusätzlich durch temperaturstabilen Klebstoff unterstützt, um ein Ablösen zu vermeiden.

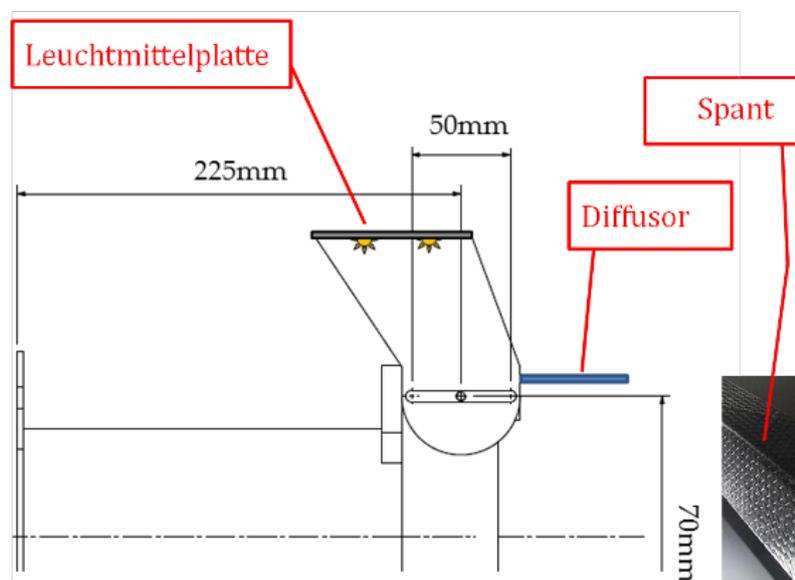


Abb. 3.14: Beleuchtungseinheit mit Leuchtmittelplatte und Diffusor

Die Leuchtmittelplatten sind drehbar gelagert und linear verschiebbar, siehe *Anhang A2*. Hierdurch lässt sich, neben der spannungsgeregelten Einstellmöglichkeit, die Leuchtdichte L weiter beeinflussen. Die Leuchtdichte wird vom Anwender im Allgemeinen als Helligkeit empfunden.[3, vgl. S.17]

Die Beleuchtungseinheit, im Wesentlichen bestehend aus Leuchtmittelplatten und Diffusoren, ist in *Abbildung 3.14* als horizontales Schnittbild dargestellt. Der Diffusor wird aufgrund der Ausbreitungscharakteristik nach *Abbildung 3.8* verwendet. Diese Konzipierung erlaubt es, verschiedene Möglichkeiten der Ausleuchtung in nur einem System zu erzielen.

Aufgrund der Verwendung von LED-Leuchtmitteln muss auf eine entsprechende Wärmeabfuhr geachtet werden, da sonst die interne Struktur der Halbleiterelemente beschädigt wird.[54, vgl. S.56] Daher ist es vorteilhaft, den Träger der Gesamtkonstruktion sowie im Speziellen die Leuchtmittelplatten, aus Metall zu fertigen. Aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit wird Aluminium bevorzugt verwendet.

Zusätzlich wird auf die Lichtfarbe im Hinblick auf die Sensitivität des Sensors eingegangen. Mit Bezug auf die Wellenlänge ist hinreichend bekannt, dass die Farbe des Lichts, speziell auch bei monochromen Bildern, kontrasterhöhenden Einfluss hat.[54, vgl. S.55] Den empfindlichsten Bereich des verwendeten Sony Chips zeigt das Diagramm in *Abbildung 3.15*.

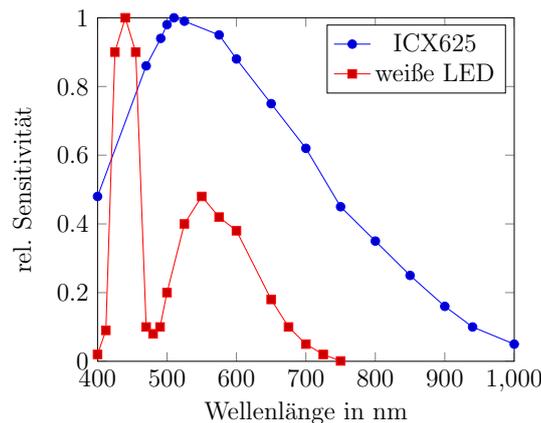


Abb. 3.15: Relative Sensitivitäten[64, S.12][54, S.54]

Hier ist festzustellen, dass im Übergangsbereich der Farbe Blau zu Grün der Sensor die höchste relative Sensitivität aufweist. Im Vergleich zur relativen spektralen Intensität einer weißen LED, ist die höchste Intensität bei Farbe Blau mit 450nm zu verzeichnen. Hier treffen Chipsensitivität und Leuchtmittelintensität nicht gänzlich optimal aufeinander.[54, vgl. S.54]

- Lichteinfallswinkel Θ

In *Gleichung 3.9* wurde der Lichteinfallswinkel Θ mit 40° festgelegt, um ein gutes Beleuchtungsergebnis zu erhalten.

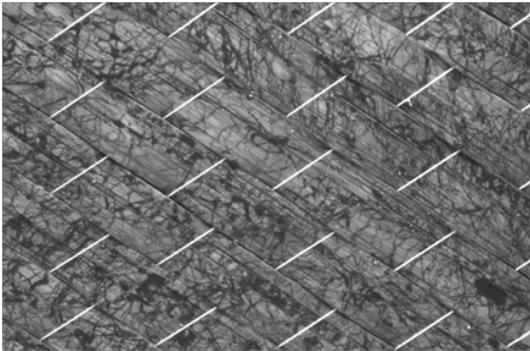


Abb. 3.16: LED Diffus

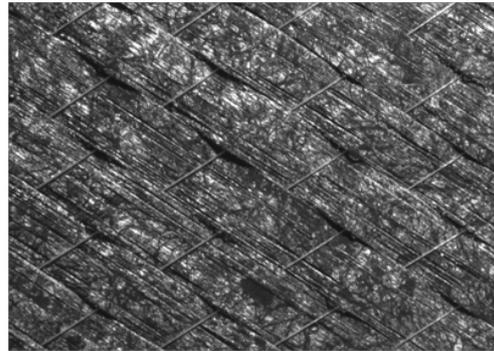


Abb. 3.17: LED 60°

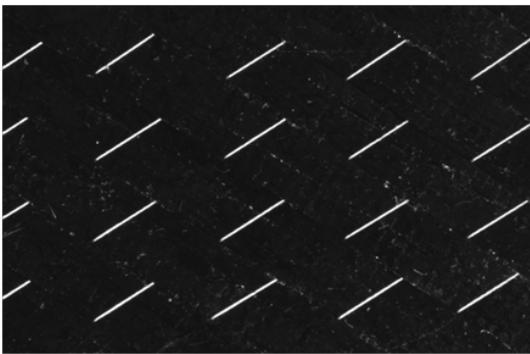


Abb. 3.18: LED 0°

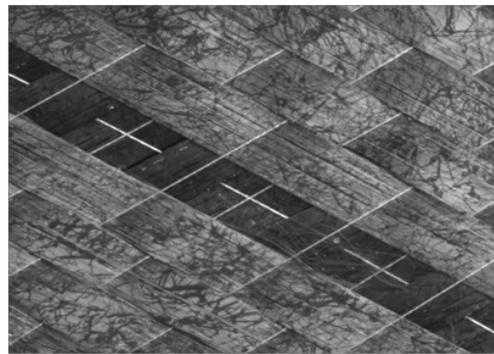


Abb. 3.19: LED Diffus-gerichtet

Vorstellung der Ausleuchtungsmöglichkeiten der Beleuchtungseinheit QuIS:⁹

- *Abbildung 3.16*: LED 90° Diffus für die Erkennung des Flechtwinkels
Drehung¹⁰ Lichtrohr 90° und Diffusorscheiben oben/unten eingesetzt.
- *Abbildung 3.17*: LED 60° für Bestimmung der Tapeondulation
Drehung Lichtrohr 60° und keine Diffusorscheiben oben/unten eingesetzt
- *Abbildung 3.18*: LED -30° für Detektion des Stützgarms
Drehung Lichtrohr -30° und keine Diffusorscheiben oben/unten eingesetzt
- *Abbildung 3.19*: LED Diffus-gerichtet für Flechtwinkel- und Gaperkennung
Drehung Lichtrohr 60° und Diffusorscheiben oben/unten eingesetzt

⁹ Bezeichnungen der Beleuchtungseinheit, siehe *Anhang A2*

¹⁰ Bezug: Kernachse, Drehrichtung im Uhrzeigersinn negativ

3.2.5 Softwarearchitektur

Die vorangegangenen Kapitel handelten von der notwendigen Hardware für die industrielle Bildverarbeitung, der Bilderfassung. Im Folgenden wird der zweite Teil der Bildverarbeitung, die Bildauswertung, betrachtet. Hier wird die Softwarearchitektur, speziell die programmiertechnische Zielsetzung des Systems sowie deren Methodik, beschrieben.

Kernpunkte des softwareseitigen Systemaufbaus sind:

- Benutzeroberfläche
- Bildaufnahme
- Bildauswertung

Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche wurde für die Verwendung von Webbrowsern wie bspw. den Firefox oder den Internet Explorer vorgesehen. Dies ermöglicht u.a. einen Benutzerzugriff über ein IT-Netzwerk. Hierbei kann die Erfassung der Bilder mittels QuIS direkt an der Preformfertigungsanlage und die Analyse am Rechner ortsunabhängig, bspw. im Büro, ggf. von mehreren Benutzern gleichzeitig erfolgen.

Aufgrund des Datenschutzes erfolgt die Benutzeranmeldung kennwortgeschützt und je nach Hierarchieebene seitens des Benutzers rollenbasiert. Hierdurch kann vermieden werden, dass Systemparameterveränderungen, z.B. die der Auswertungsalgorithmen, durch Unbefugte vorgenommen werden können.

Die Benutzerrollen sind durch den Administrator jederzeit anpassbar und frei konfigurierbar. Über das Hauptmenü des Programms können die verschiedenen Einstell- und Nutzungsmöglichkeiten ausgewählt werden.

Bevor die Bildaufnahme startet, ist es möglich, einen charakteristischen Ordner im Menüpunkt *Einstellungen/Spantspezifikation* für die zukünftigen Messungen anzulegen. Diese Systematik erleichtert auch die Zuordnung vorhandener Datensätze.

Darüber hinaus ist es angedacht mit diesen Eingabeinformationen den Flechtprozess zu unterstützen, bspw. hinsichtlich des Materialverbrauchs auf den Spulen. Endet der Materialvorrat aufgrund einer hohen Lagenanzahl des Preforms oder im Allgemeinen wegen einer hohen Anzahl zu fertigender Preformen absehbar, so kann durch die Eingabe eines Schwellwerts ein Hinweis beim Bediener auf der Bildschirmoberfläche erscheinen.

Ein weiterer Aspekt kann die Chargenvergleichbarkeit des Materials sein. Findet hier ein dokumentierter Materialwechsel statt und ändert sich zum Beispiel das mechanische Bauteilverhalten, aufgrund einer Prüfung mittels Bauteilversuch oder Bauteilversagen im Einsatz, so können entsprechende Rückschlüsse gezogen werden.

Das QuIS-System ist dahingehend vorbereitet, dass ein Materialeingangstest ebenfalls durchgeführt werden kann. Wichtige Eigenschaften hierzu wären u.a. die Bestimmung der Roving- bzw. Tapebreite sowie der Binderanteil je Tapefläche. Entsprechende Anpassungen der Softwarealgorithmenparameter können je nach Material vorgenommen werden. Vorhandene Filterfunktionen vereinfachen die Suche nach relevanten Parametern.

Die Möglichkeit der detaillierten Ansicht erlaubt Zusatzinformationen über die jeweilige Option zu erhalten. Eine interne Im- und Exportfunktion ermöglicht die Implementierung neuer Softwarealgorithmen. Das Ziel eigene und externe Bildverarbeitungsalgorithmen ins QuIS-System einzupflegen, kann somit realisiert werden.

Das Anwendungsprogramm ist methodisch so aufgebaut, dass bei Veränderung der Algorithmenparameter diese in der Grundeinstellung entsprechend überschrieben werden. Vorgegangene Erfassungen werden nicht neu berechnet oder verändert. Eine Neuberechnung von vorhandenen Bildern kann in dem Menü *Erfassen* unter der Schaltfläche *Nacherfassen* vorgenommen werden.

Dabei berücksichtigt das System je nach Zugriffsrecht die Möglichkeit, Einzelbilder bzw. eine Auswahl von zugehörigen Einzelbildern anzusehen und bei Auswahl neuer Algorithmenparameter wiederholt zu verarbeiten sowie bestehende Datensätze zu ergänzen. Es folgt die genauere Darstellung der Bildaufnahme.

Bildaufnahme

Die Bildaufnahme wird im Menü *Erfassen* angewählt und kann unter dem Punkt *Neu erfassen* gestartet werden. In diesem Menü ist es möglich zwischen den Modi der *Einzelbildaufnahme* und der *Einzelbildaufnahme plus Verarbeitung* zu wählen. Dies kann relevant werden, wenn lediglich im Fokus steht zeitnah Bilder ohne Bildauswertung zu erstellen und zu einem späteren Zeitpunkt eine Untersuchung durchzuführen.

Darüber hinaus ist es für den Anwender möglich, zwischen einer fortlaufenden Erfassung mit einstellbarem Auslösezeitpunkt und der angesprochenen Einzelbildaufnahme zu wählen. Zuerst genannte zielt auf die Online-Untersuchung prozessbegleitend ab. In *Abbildung 3.20* wird u.a. die Bilderfassung in der Systemarchitektur von QuIS schematisch dargestellt:

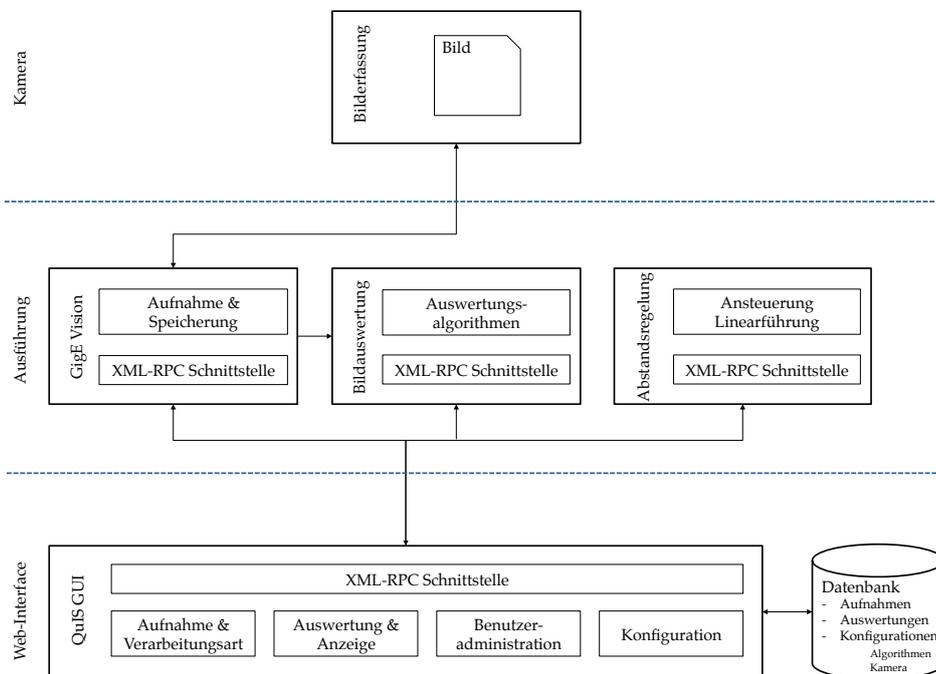


Abb. 3.20: Systemarchitektur von QuIS[74, vgl. S.3]

Auf der Benutzeroberfläche von QuIS wird die Bildaufnahme durch den Anwender gestartet. Die Initialisierung der Kamera wird per XML-RPC¹¹-Aufruf eingeleitet und das Bild im verlustfreien Grafikformat mit automatisch generiertem Dateinamen über die GigE-Vision-Hardwareschnittstelle in der Datenbank gespeichert. Die Voreinstellungen der Kamera können mittels der Software JAI SDK¹² individuell konfiguriert werden. Dies könnte bspw. die Scanning Methode, Auto-Gain oder die Belichtungszeit betreffen. Gute Ergebnisse konnten bereits mit einer Belichtungszeit ab 0,06s ohne Auto-Gain erzielt werden. Nach der Bilderfassung wird die Bildauswertung aufgerufen und das Bild per Verarbeitungsalgorithmen im gewählten ROI untersucht.

Bildauswertung

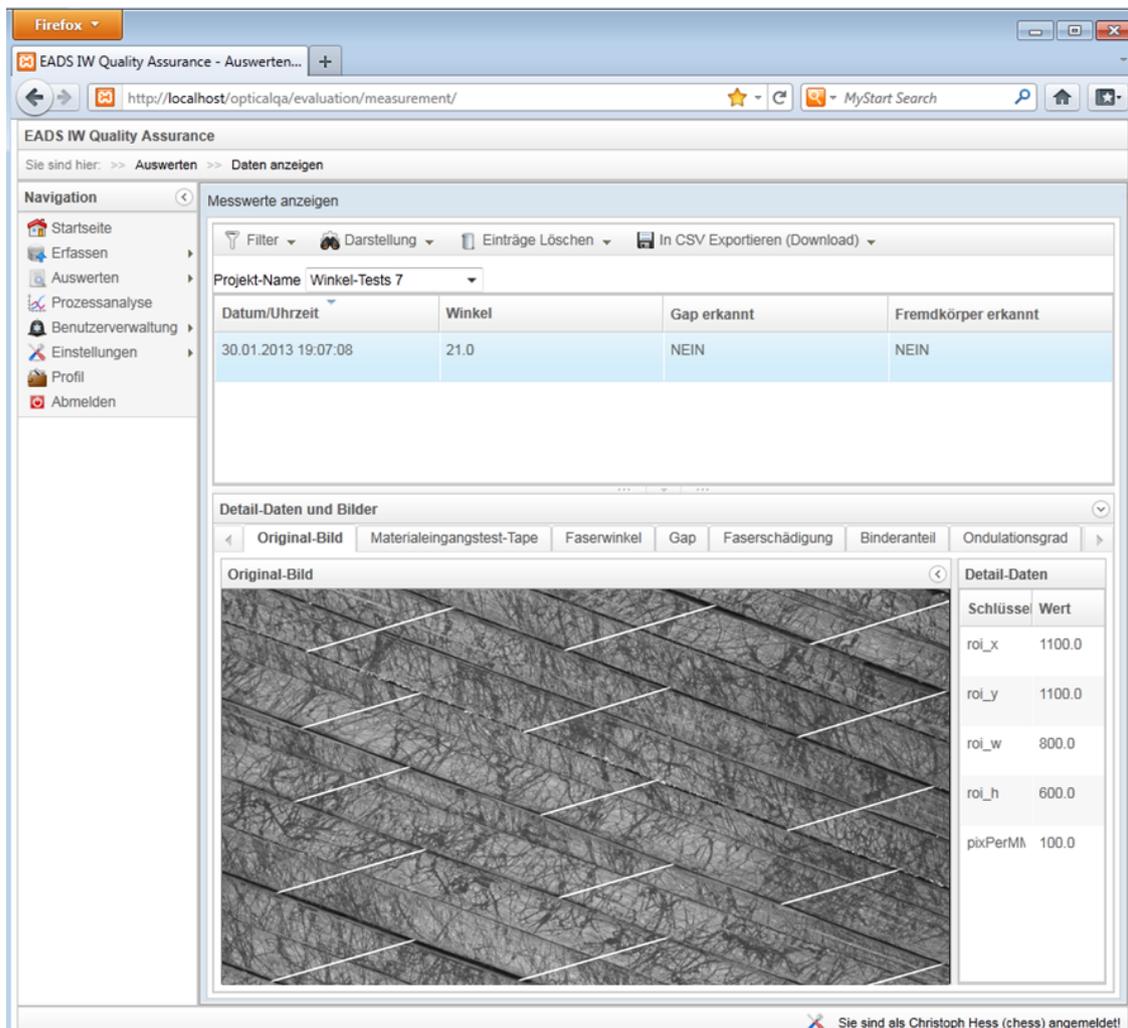
Nachdem das Bild mit gewählter Kameraeinstellung aufgenommen und in der QuIS-Datenbank gespeichert wurde, wird je nach konfigurierter Analysemethode die Auswertung gestartet. Die initialisierte Prozedur lädt das zugeordnete Bild, ruft die entsprechenden Parametereinstellungen für die optische Auswertung aus der Datenbank mittels XML-RPC auf und es erfolgt die Auswertung. Die Rückgabe, der von den Algorithmen ausgewerteten Bildinformationen, erfolgt erneut über die XML-RPC Schnittstelle. Die Informationsdatensätze werden in der Benutzeroberfläche von QuIS dargestellt, vgl. *Abbildung 3.20*. Als Software für die Datenbank im QuIS-System wird das opensource Datenverwaltungssystem MySQL¹³ verwendet. In der Datenbank werden die Auswertungsergebnisse als sogenanntes Map im JSON¹⁴ Format als Text abgelegt.[74, vgl. S.3f] Die Datenbank des QuIS-Systems erlaubt es, die Auswertungsergebnisse der Flechtwinkelorientierung oder der Gaps im Geflecht in einem tabellarischen Dateiformat zu speichern, um die Ergebnisse in externe Datenverarbeitungsprogramme zu laden, wie bspw. Excel.

11 Extensible Markup Language Remote Procedure Call, Softwareschnittstelle

12 Software Development Kit, Konfigurierungswerkzeug

13 Structured Query Language, Datenbanksprache

14 JavaScript Object Notation, Datenformat in Textform

Abb. 3.21: Offline-Bildauswertung im Menüpunkt *Auswerten*

Die *Abbildung 3.21* zeigt die Benutzeroberfläche des QuIS-Systems unter dem Menüpunkt *Auswerten* - *Messwerte anzeigen* und eignet sich für die Offline-Analyse. Die angezeigten Messwerte werden in tabellarischer Form dargestellt und die vorhandene Filterung bietet die Möglichkeit, die Auswertungsergebnisse nach Datum, Versuchsreihe, Flechtwinkel und Defekte, bspw. Gaps, einzugrenzen. Die Darstellung der Einzelergebnisse erfolgt, je nach Anwahl, als numerischer Datensatz sowie mittels visueller Funktion im ausgewerteten Bild.

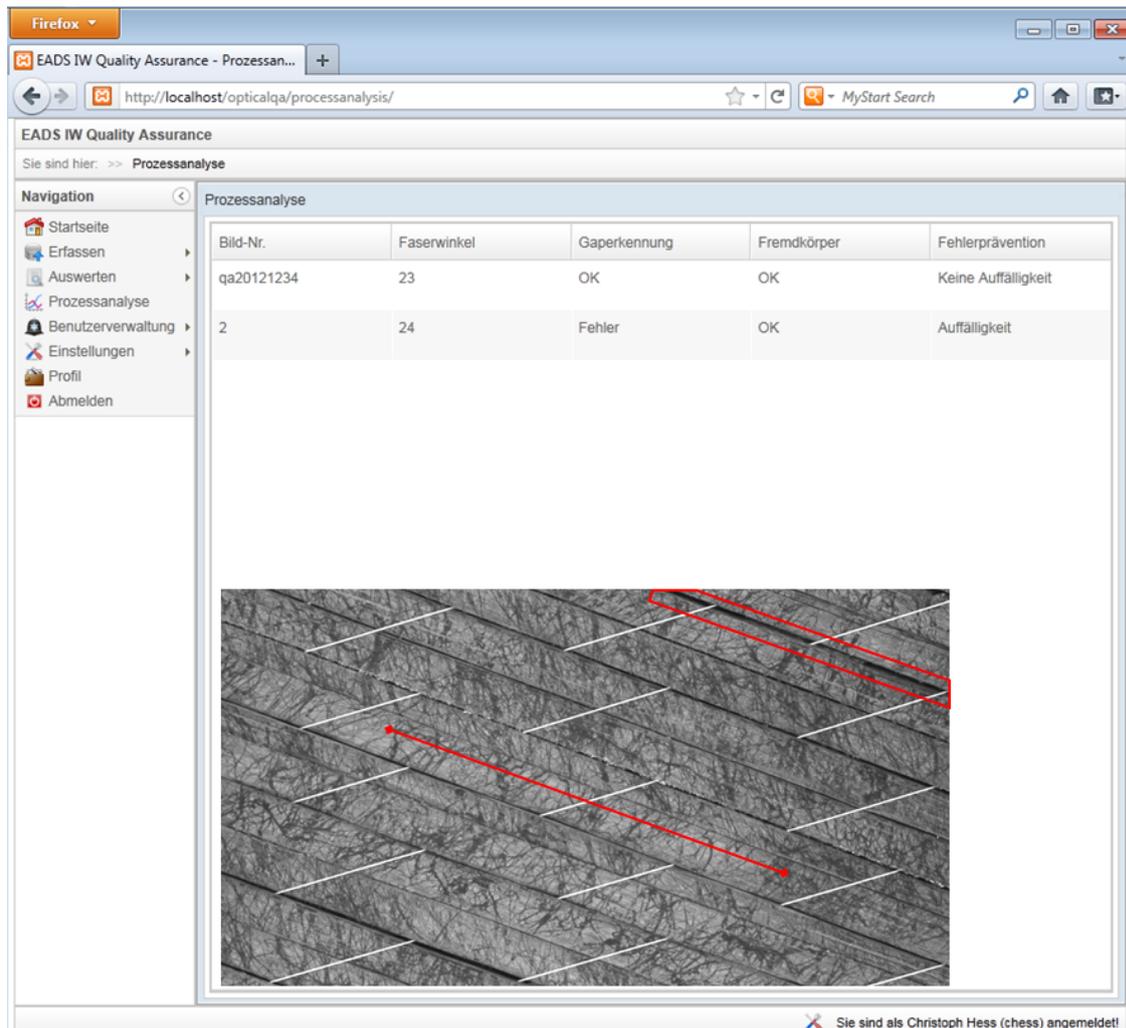


Abb. 3.22: Online-Bildauswertung im Menüpunkt *Analyse*

In diesem Menü hat der Anwender die Option, relevante Merkmale zu betrachten und zu vergleichen. Hierzu muss von der Bildnummer ausgehend, die gewünschte Untersuchungsart, bspw. Flechtwinkel, im Tab-Feld markiert werden. Im aufgerufenen Detailfeld rechts neben dem Bild erfolgt die präzise Darstellung der Ergebnisse. Die Werte können exportiert werden, bspw. in Open-Source-Programme wie CALC¹⁵, um eine Weiterverarbeitung zu ermöglichen. In *Abbildung 3.22* ist die

¹⁵ Apache OpenOffice Software, Allzweck-Tabellenkalkulation

Online-Analyse dargestellt. Hier wird im Vergleich zur Offline-Analyse eine weniger detaillierte Anschauungsart gewählt, die sich ausschließlich auf relevante Kenndaten in der Produktion beschränkt. Hierzu werden Informationen über die Bildnummer sowie den Flechtwinkelwert bereitgestellt und geprüft, ob Gaps oder Fremdkörper im jeweils zu untersuchenden Bild vorhanden sind. Die Daten werden tabellarisch angegeben und das aktuelle Auswertungsbild wird angezeigt. Die Aktualisierung findet bei der Online-Bildverarbeitungsanalyse ähnlich einer Flughafeninformationsanzeige statt. Alle Bilder des jeweiligen Untersuchungsgegenstands sowie deren Analysedaten werden mit Blick auf das QM in der QuIS-Datenbank gespeichert.

Gap-Erkennung

Im *Kapitel 3.1* wurde auf die Bedeutung der Bildverarbeitungsalgorithmen für das System QuIS eingegangen. Die zum Zeitpunkt der Entwicklung des QS-Systems vorhandenen Algorithmen waren zeitintensiv und teilweise ungenau. Besonders der Gap-Algorithmus zeigte bei der Auswertung der bebinderten Geflechtlagen Defizite, vgl. *Abbildungen 3.23f*. Zusätzlich waren die Algorithmen für die Windows Plattform mit 32bit ausgelegt. Um eine weitere Eingriffsmöglichkeit ins System zu ermöglichen, wurden neben der Beleuchtung eigene Algorithmen für das QuIS-System entwickelt. Hierbei wurde die Bildverarbeitungsbibliothek OpenCV¹⁶ Version 2.4 mit 64bit-Unterstützung verwendet.

Der neu zu konzipierende Algorithmus hat das Ziel, Gaps zu identifizieren und zu klassifizieren. Bestehende Gap-Algorithmen erfordern, speziell wenn diese für Faltungsoptionen wie Bildgradienten zur Erkennung von Kanten entwickelt wurden, eine vorherige Parametrisierung des Flechtwinkels der sichtbaren und der darunter befindlichen Lage. Die notwendigen Vorzugskantenrichtungen müssen für die Gap-Erkennung berücksichtigt werden. Kanten sind im Prinzip nichts anderes als Unterschiede in der Lichtintensität, also der Helligkeit. Der Gap-Algorithmus erfordert somit eine manuelle Voreingabe.

16 Open Source Computer Vision Library, freie Programmbibliothek

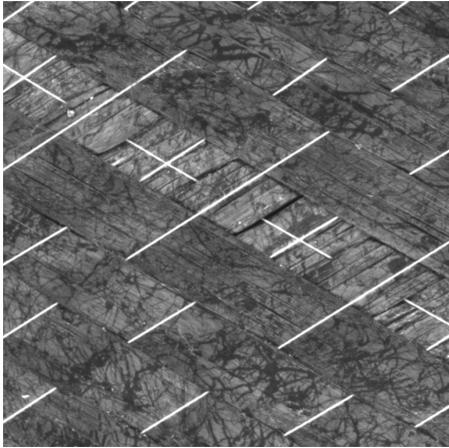


Abb. 3.23: Diffusbild

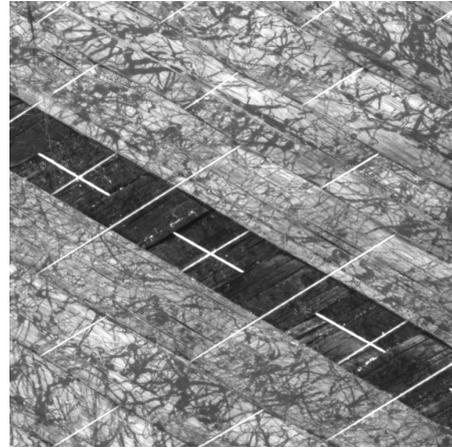


Abb. 3.24: Diffusbild-gerichtet

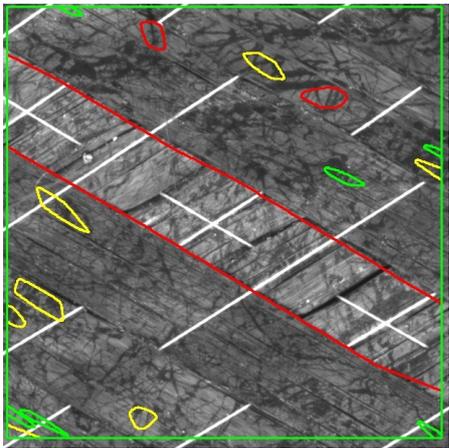


Abb. 3.25: Gap-Auswertung I

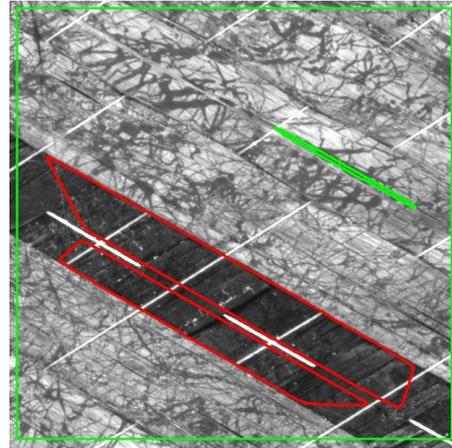


Abb. 3.26: Gap-Auswertung II

Im Fall der getesteten Gap-Auswertung I, musste die Flechtwinkelorientierung der ersten Lage vorab erfasst werden, was zusätzlichen (ggf. manuellen) Aufwand bedeutet und die Fehleranfälligkeit erhöht. Um beides zu vermeiden, wurde die Methode der Gap-Erkennung neu entwickelt.

In Anlehnung an das entwickelte Beleuchtungssystem von QuIS, soll der Gap-Algorithmus die spezielle Reflexionscharakteristik der Kohlenstofffaser zum Vorteil nutzen. In *Abbildung 3.23* ist eine Aufnahme unter Diffuslicht erstellt worden. Auf der *Abbildung* ist zu erkennen, dass ein Tape in der Mitte der Geflechtlage fehlt.

Für diesen Fall könnte der auf der Kantendetektion basierende Gap-Algorithmus verwendet werden. Das Ergebnis der Auswertung ist in *Abbildung 3.25* dargestellt. Je nach Eingabe bedeuten hier die unterschiedlichen Farbbereiche grün, gelb und rot jeweils klein, mittel und große Gapflächenklassifizierungen. Das fehlende Tape wird aufgrund seiner Größe als Auswertungsergebnis rot dargestellt. In der gesamten Auswertung wurden darüber hinaus weitere Gaps erkannt.

Wird das visuelle Auswertungsergebnis in *Abbildung 3.25* mit dem Ursprungsbild *Abbildung 3.23* auf identifizierte Gaps hin verglichen, so ist festzustellen, dass diese im Diffusbild nicht vorhanden sind. Als Ursache kann u.a. der Binder mit vereinzelt gerichteten Bereichen, die ungefähr die Orientierung der unteren Lage aufweisen, genannt werden. Leider führten auch weitere Parametrisierungen des Auswertungsalgorithmus nicht zu besseren Ergebnissen, sodass eine andere Auswertungsmethode eingesetzt wurde.

Gap-Auswertung II nutzt die speziell entwickelte diffus-gerichtete Beleuchtungsart. Die Beleuchtung kann relativ zur Einstellung der Flechtmaschine ausgerichtet werden, um die untere ggf. anders orientierte Lage schwarz darzustellen.

Dies wird bspw. in *Abbildung 3.24* aufgrund des fehlenden Tapes deutlich dargestellt. Die Beleuchtung hat den Vorteil, dass der Binderanteil auf dem Tape einen definierten Grauwert annimmt, der weit über dem schwarzer Flächen liegt. Das Ergebnis von Gap-Auswertung II wird in *Abbildung 3.26* dargestellt. Hier wurde das fehlende Tape ähnlich ungenügend erkannt wie nach der Auswertungsmethode I der Kantendetektion. Die zuvor als ein Gap erkannte Fläche wurde in zwei separiert, da das Stützgarn diese Bereiche unterteilt. Als positiv zu bewerten ist, dass nicht viele kleine Einzelgaps, sondern zwei großflächige Gaps nach Auswertungsmethode II für die oberste Lage erkannt wurden.

Darstellung des Bedarfs:

Aufgrund der beschriebenen Defizite der Gap-Auswertungsmethoden I und II wurde ein Gap-Algorithmus aufbauend auf der diffus-gerichteten Beleuchtungsmethode des QuIS-Systems konzipiert, um Gaps im UD-Geflecht exakt zu bestimmen.

Der Gap-Algorithmus wurde hierbei in der Programmiersprache C++ unter Verwendung der freien OpenCV Programmbibliotheken auf 64bit-Unterstützung geschrieben. Bezüglich der Verarbeitungsperformance wurden zusätzliche Programm-bibliotheken implementiert, die die effiziente Nutzung von Systemen mit Mehrkernprozessoren erlauben.

Im Hinblick auf den Einsatz im industrietauglichen Umfeld und um eine vielseitige Verwendbarkeit zu bieten, wurde neben dem eigentlichen Anwendungsprogramm eine Algorithmdatenbank entwickelt. Hier ist es möglich, Schritt für Schritt die Auswirkungen der Parameteränderungen der entsprechenden Bildverarbeitungs-bibliotheken festzustellen. Das ermöglicht dem Anwender eine schnelle und nachvollziehbare Darstellung der Ergebnisse. Im Folgenden wird die neue Methodik der Gap-Erkennung beispielhaft erläutert:

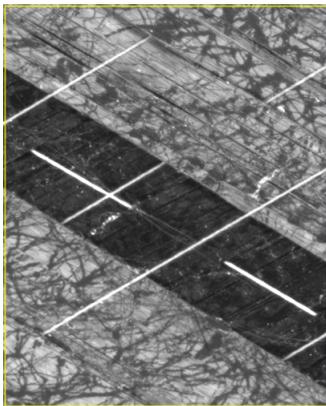


Abb. 3.27: Original

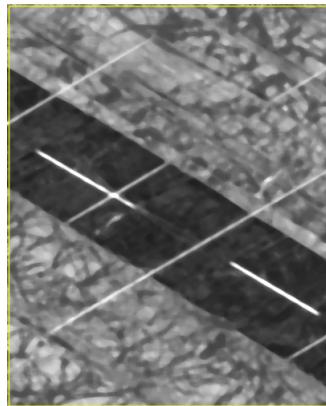


Abb. 3.28: "Blurring"

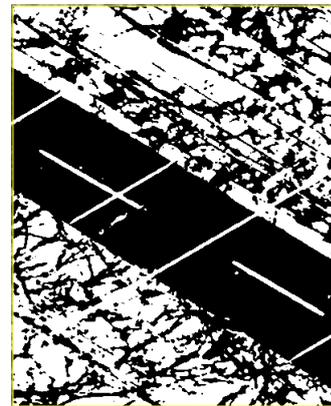


Abb. 3.29: Schwellwert

Die *Abbildung 3.27* stellt hierbei das Ursprungsbild aus *Abbildung 3.24* für die Gap-Analyse dar. Das Beispiel wurde in Anlehnung vorheriger Testauswertungen aus Gründen der Vergleichbarkeit verwendet. Die nun dargestellte Bilderserie ist als fortlaufende Veränderung der einzelnen Verarbeitungsschritte des Algorithmus zu deuten. In *Abbildung 3.28* wurde der zweite Schritt, das sogenannte "Blurring" bzw. Weichzeichnen, dargestellt. Beim Weichzeichnen findet eine Kontrastveränderung

statt. Die Kontrastveränderung wird verwendet, um bestimmte Helligkeitsbereiche einer Umgebung zu vereinheitlichen. Hier wurde eine sogenannte Kernelgröße von 7×7 parametrisiert, um den Gap-Grauwert homogener darzustellen. In *Abbildung 6.5* wurde eine Weichzeichnung mit verringerter Kernelgröße durchgeführt, um die unterschiedlichen Auswirkungen vergleichen zu können. Nach dem Weichzeichnen werden die Bilddaten mit einer schwellwertbasierten Funktion weiterverarbeitet. Diese separiert das Bild in schwarz-weiß Informationen, siehe *Abbildung 3.29*.

Ziel ist es, das fehlende Tape bzw. den Bereich zu erfassen und konkret zu deklarieren. Im angesprochenen Beispiel ist ein Wert von 120 berechnet worden. Dieser Wert liegt etwa in der Mitte der Skala, die Werte von $0 = \text{Schwarz}$ bis $\text{Weiß} = 255$ abbildet. Wert 120 repräsentiert hier ungefähr die Farbe Grau und alle Werte die gleich bzw. oberhalb des Schwellwerts 120 liegen, werden Weiß dargestellt.



Abb. 3.30: Schließen

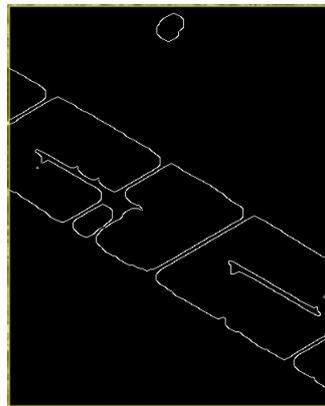


Abb. 3.31: Kanten

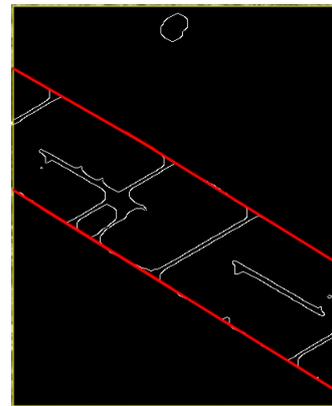


Abb. 3.32: Linien

Graustufenwerte < 120 werden einheitlich in Schwarz dargestellt. Um einen Vergleich bezüglich der Auswirkung des Schwellwerts zu erhalten, siehe *Abbildung 6.6*. In *Abbildung 3.30* ist die Schließfunktion dargestellt. Im Vergleich mit dem schwellwertbasierten Ursprungsbild sind nun keine zerklüfteten Regionen mehr zu erkennen. Die Bereiche werden quasi geschlossen. Wichtig ist hier, die Anzahl der Iterationen des Schließvorgangs zu bestimmen, die je nach Material und Prozessbild

angepasst werden müssen. Zu wenige Iterationen lassen die Bereiche zerklüftet erscheinen und zu viele Iterationen stellen die Bereiche nicht mehr realistisch dar, vgl. *Abbildung 6.7* im Anhang.

Im folgenden Verarbeitungsschritt wird ein Algorithmus zur Kantendetektion, bspw. nach *J. F. Canny*, verwendet. Dieser berechnet aus dem Ausgangsbild 'Schließen' entsprechende Kantenpunkte, siehe *Abbildung 3.31*. Der Algorithmus basiert im Wesentlichen auf extreme Helligkeitsunterschiede benachbarter Pixel. Aufgrund der vorangegangenen Schwellwertbinarisierung sind diese Kanten deutlich und ohne große Streuungen darstellbar, denn es gibt nur zwei Möglichkeiten: schwarz oder weiß. Auch der Kantenalgorithmus bedarf einer objektbezogenen Einstellung, speziell hinsichtlich der sogenannten Apertur¹⁷. Diese wurde in *Abbildung 6.8* mit 7x7 statt 3x3 parametrisiert.

Weniger komplex stellt sich die Verarbeitungsoperation nach *Abbildung 3.32* dar. Hier werden Linien auf den Kantenpunkten mit der häufigsten Vorzugsrichtung platziert. In diesem Beispiel ist die Vorzugsrichtung ca. 45° bzw. 135°. Die berechnete maximale Kantlänge ist für die Kontur eine wichtige Bezugsgröße.

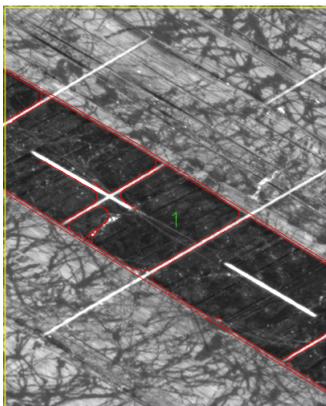


Abb. 3.33: Kontur

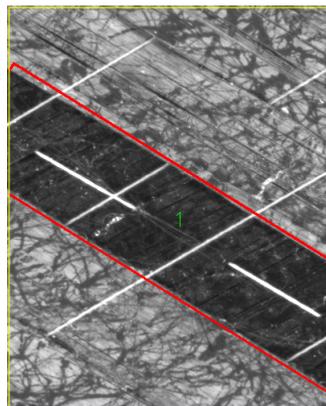


Abb. 3.34: Rechteck I

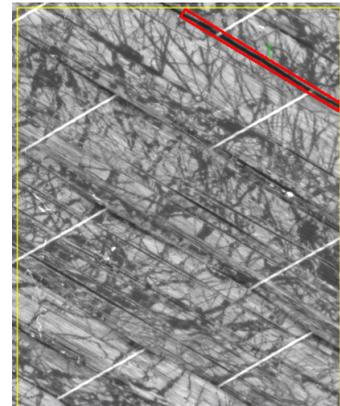


Abb. 3.35: Rechteck II

¹⁷ Übersetzt als Blendenöffnung, hier eine Art Pixelregion

Die maximale Länge der Kante muss allerdings mit dem Untersuchungsraum bzw. ROI entsprechend in Relation stehen und definiert werden. Hier könnte bspw. die maximal sichtbare Stützgarmlänge bei einem Taperiss als Referenzierung dienen. Ist die Kantenlänge zu klein, wird das Stützgarn in die Linienerkennung mit einfließen, siehe *Abbildung 6.9*. Nach der Linienerkennung folgt die Konturdarstellung, wie in *Abbildung 3.33* aufgezeigt. Die Konturdarstellung ist eine Vereinigung der Kanten- und Linienoperation. Die erkannte Konturfläche wird nummeriert, hier mit der Nummer Eins, und im Flächenschwerpunkt der Gesamtkontur positioniert.

Der Konturwert ist der absolute Pixelwert und wird von der Benutzeroberfläche von QuIS angezeigt. Die Visualisierung des Gaps erfolgt aufgrund der besseren Anschaulichkeit mittels Rechteck, wie in *Abbildung 3.34* zu sehen. Im aufgezeigten Beispiel hat die vorhandene Fläche einen kleinen Knick. Daher trifft das überlagerte Rechteck nicht ganz die Kante des oberen Tapes. Es ist hervorzuheben, dass die Konturdarstellung den direkten Gapflächenwert repräsentiert und die Rechteckdarstellung der Visualisierung des Gaps als Hilfsmittel dient. Als Nachweis für die Robustheit des Auswertungsalgorithmus zeigt die *Abbildung 3.35* den klassischen Gap-Erkennungsfall auf.

Zusammenfassung Gap-Erkennung mit neu konzipiertem Algorithmus:

Mit dem Konzept der diffus-gerichteten Beleuchtungseinheit von QuIS konnte die Methode der Gap-Erkennung für Geflechtlagen aus bebindertem Tape und Stützgarn umgesetzt werden. Die QuIS Gap-Erkennungsmethode konnte im Vergleich zur Gap-Auswertung I und II die Genauigkeit um ca. 40% steigern.

3.3 Beschreibung des Messablaufs

Die Bildverarbeitung beginnt mit der Bildaufnahme, über die Bildauswertung und endet bei der spezifizierten Informationsdarstellung des Bilds. *Abbildung 3.36* stellt das Gesamtsystem QuIS dar. Mittels Rechner (Markierung A) kann die Benutzersoftware des QuIS-Systems unter Verwendung eines Web-Browsers gestartet werden. Nach der Anmeldung wird das Hauptmenü von QuIS aufgerufen und der An-

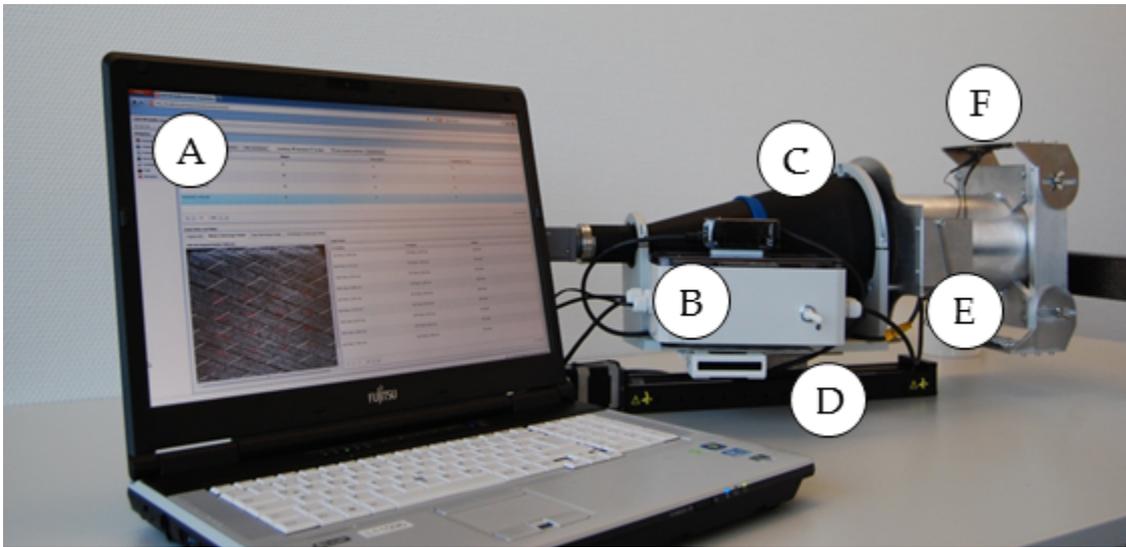


Abb. 3.36: Gesamtdarstellung: Optisches Qualitätssicherungssystem QuIS

wender kann Eingaben zum jeweiligen Untersuchungsprojekt in den Einstellungen des Systems vornehmen. Das kann bspw. die Eingabe von geflechtspezifischen Parametern oder die Anpassung der Bildverarbeitungsalgorithmen an den gegebenen Untersuchungsgegenstand sein. Helligkeitsanpassungen der Beleuchtungseinheit (Markierung F) sind an der Energieversorgungsbox (Markierung B) der Komponenten vorzunehmen. Die Entfernung zur optimalen Einstellung des Objektiv-Arbeitsabstands (Markierung C) wird über den Abstandssensor (Markierung E) gemessen und vom Rechner (Markierung A) geregelt.

Die Komponenten (B,C,E und F) können über die Linearführung (Markierung D) translatorisch bewegt werden. Wurden alle Parameter dem Untersuchungsgegenstand entsprechend eingestellt, kann mit der Bildaufnahme begonnen werden. Das System ermöglicht es dem Anwender Einzelbilder oder fortlaufende Aufnahmen, jeweils mit und ohne Auswertung, zu erstellen. Diese können nach der Aufnahme in der Software über den Menüpunkt *Daten anzeigen* betrachtet werden. Ausgewählte Datensätze können mittels Exportfunktion weiterverarbeitet werden. Neben der Online-Analyse kann das System auch für Offline-Untersuchungen genutzt werden. Diese eignet sich besonders für Prozessanalysen, wie in *Kapitel 4* dargestellt.

3.4 Darstellung der Defekte mittels QuIS

In *Kapitel 2.4* wurden mögliche Defekte des UD-Geflechts vorgestellt. Mit dem Qualitätssicherungssystem QuIS ist es möglich diese präzise zu erfassen, je nach Gewichtung zu klassifizieren und darzustellen. Je nach Anforderung und Material sind die Parameter im System zu setzen, um eine robuste Auswertung zu gewährleisten. Hierbei ist das System nicht nur für die Erfassung von geraden Strukturen, sondern auch für flächig, gekrümmte Strukturen geeignet. Das System kann darüber hinaus, neben dem Zielmaterial Kohlenstofffasern, auch Glasfasern erkennen. Im Folgenden werden die Defekte anhand von exemplarischen Beispielen nachgewiesen.

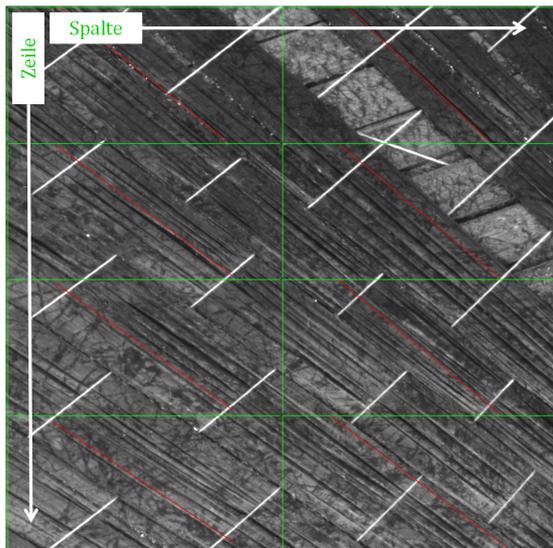


Abb. 3.37: Winkel-Auswertung

Spalte	Zeile	Winkel
1	1	39,02°
1	2	36,95°
1	3	35,98°
1	4	33,95°
2	1	43,99°
2	2	40,03°
2	3	39,95°
2	4	37,08°

Tab. 3.8: Wertetabelle Winkel

Die Winkel-Auswertung in *Abbildung 3.37* stellt das Beispielbild nach *Abbildung 2.23* aus *Kapitel 2.4* dar. Die Ergebnisse in *Tabelle 3.8* wurden mit der Offline-Analyse generiert und repräsentieren die Verarbeitungsergebnisse einzelner Bildbereiche. Hiermit kann näher untersucht werden, wie die Auswirkungen wissentlicher oder unwissentlicher Maschinenparameterveränderungen das Geflecht beeinflussen.

Aus dem QuIS-System können die Werte direkt oder mittels Exportfunktion, bspw. für Trendanalysen, weiterverarbeitet werden. Diese Darstellung würde in der Online-Analyse vermutlich die Aufnahmefähigkeit des Betrachters überfordern, weil viele Einzelwerte der jeweiligen Bereiche angezeigt werden. Daher wird in der Online-Analyse eine Mittelwertbetrachtung vorgenommen und das Ergebnis als visuelle Einzelauswertung, bspw. einer roten Linie, mit Vertrauensbereich angezeigt.

Liegt die Abweichung außerhalb der Toleranz oder ist im Vergleich zum vorherigen Bild ein Trend erkennbar, wird dies dem Anwender angezeigt und bei signifikanter Tendenz ein Maschinenstopp ausgelöst. Genauere Empfehlungen, die die Maschinensteuerung betreffen, erfolgen in *Kapitel 4*.

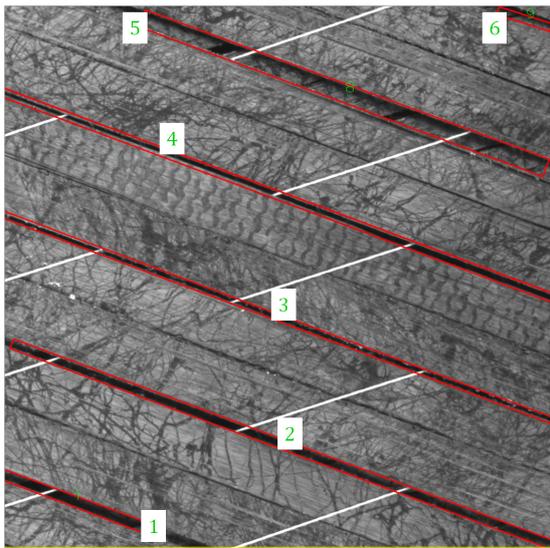


Abb. 3.38: Gap-Auswertung (neu)

Nr.	Breite	Länge
1	12px	116px
2	34px	856px
3	16px	1025px
4	12px	1025px
5	19px	1025px
6	18px	311px

Tab. 3.9: Wertetabelle Gap

Die *Abbildung 3.38* zeigt einen Ausschnitt des visuellen Auswertungsergebnisses von *Abbildung 2.27*. In *Tabelle 3.29* werden Breite und Länge des jeweils detektierten Gaps dargestellt. Hierbei zeigt das System die geometrischen Daten der Gaps in [px] an und kann über einen entsprechenden Umrechnungsfaktor in [mm] angegeben

werden. Für die Klassifizierung ist es ratsam, nicht den Flächenwert zu verwenden, sondern eine separate Betrachtung der Breite und Länge.

Würde nur ein Flächenwert als bestimmende Größe benutzt werden, so können Fehlinterpretationen entstehen. Bei dem QuIS-System ist die Gapbreite die führende Zielgröße. Folgende Beispielrechnung soll den Vergleich zwischen Gapbreite und -fläche illustrieren.

Berechnung der Gapfläche *Area* mittels Produkt von Länge und Breite:

$$Area_1 = 3000px \cdot 30px = 90000px \quad (3.12)$$

$$Area_2 = 1000px \cdot 90px = 90000px \quad (3.13)$$

In beiden Fällen ist das Ergebnis der Bildauswertung $90000px$. Die $30px$ entsprechen einem Längenmaß von $1mm$. Würde die Fläche die bestimmende Größe sein, so würde, wenn dieser Flächenwert die Toleranzschwelle darstellt, die Maschine stoppen. Bei genauerer Betrachtung wäre ein Gapbreitenwert, also der Abstand zweier Tapes voneinander, in *Gleichung 3.12* ca. $1mm$.

Diese Gapbreite könnte im Toleranzbereich der jeweiligen Anforderung liegen, die zuvor seitens des Anwenders als Parameterwert eingegeben wurde. Die Gaplänge ist hier, mit Bezug zur Strukturmechanik, nicht die ausschlaggebende Größe, da das Harz im Bauteil die Last entsprechend verteilen würde.

Das gilt auch für geringe Tape-Abstände, ohne dass nennenswerte mechnische Leistungseinbußen oder ein Bauteilversagen zu vermuten sind. Bei größeren Tape-Abständen sind allerdings Leistungseinbußen der Struktur zu erwarten.

Dies würde im zweiten Beispiel, *Gleichung 3.13*, eher zutreffen. Hier ist der Tape-Abstand $3mm$ und dies könnte bspw. den kritischen Abstand darstellen. Ebenfalls ist die Gapfläche $90000px$, ein Maschinenstopp aber diesmal sinnvoller.

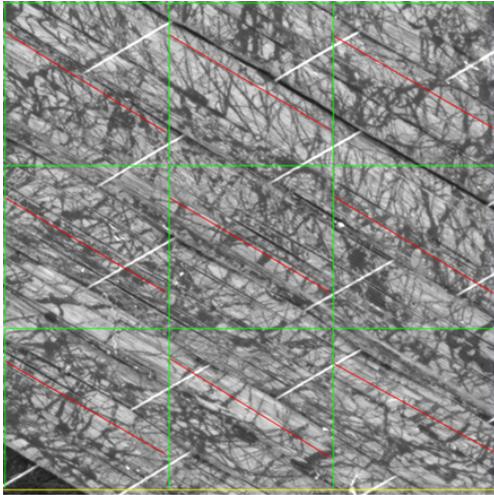


Abb. 3.39: Geflechtwinkel

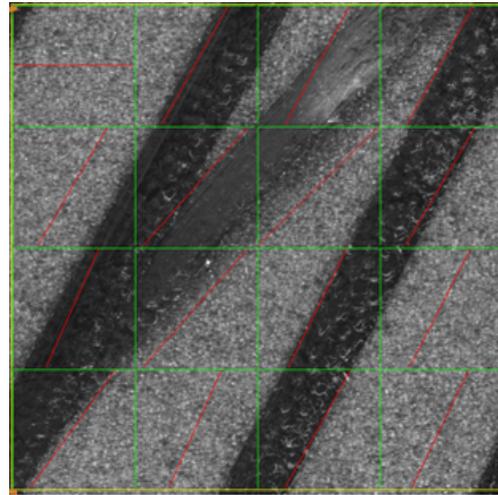


Abb. 3.40: Wicklerwinkel

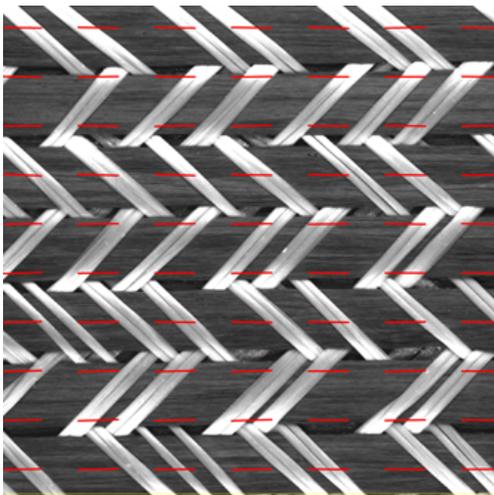


Abb. 3.41: Rovingverläufe

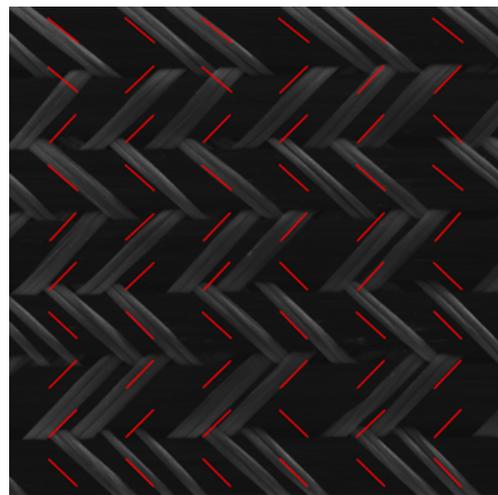


Abb. 3.42: Glasfaserverläufe

Zusammenfassung des Potenzials der QuIS Flechtwinkel- und Gap-Erfassung:

Mögliche Defekte des UD-Flechts können mit QuIS detektiert werden. Aufgrund der Anpassungsmöglichkeiten können weitere Materialien untersucht werden:

- *Abbildung 3.39* zeigt Geflechtwinkelbereiche auf
- *Abbildung 3.40* stellt Wicklerfaserwinkelbereiche dar
- *Abbildung 3.41* zeigt Rovingfaserverläufe auf
- *Abbildung 3.42* stellt Glasfaserverläufe dar

3.5 Implementierung von QuIS für die UD-Geflechtlagenanalyse

Die *Abbildung 3.43* zeigt das QS-System QuIS (Markierung 4) sowie einzelne Komponenten der halbautomatischen Spantfertigungslinie und stellt den Messaufbau für die Geflechtlagenanalyse dar. Für die UD-Geflechtlagenherstellung wurde der Kern zuerst durch den Flechter mittels Industrieroboter geführt. Die fertige UD-Lage wurde fixiert, um ein Verrutschen der Tapes zu vermeiden. Anschließend wurden die einzelnen Tapes der Geflechtlage von der Flechtmaschine getrennt.

Danach wurde die Geflechtanalyse mittels QuIS durchgeführt. Die Geflechtbilder wurden an diskreten Kernpositionen aufgenommen und ausgewertet.

QuIS wurde im Offline-Bildverarbeitungsmodus betrieben, da die Implementierung an die halbautomatische Spantfertigungslinie bedingt möglich war.

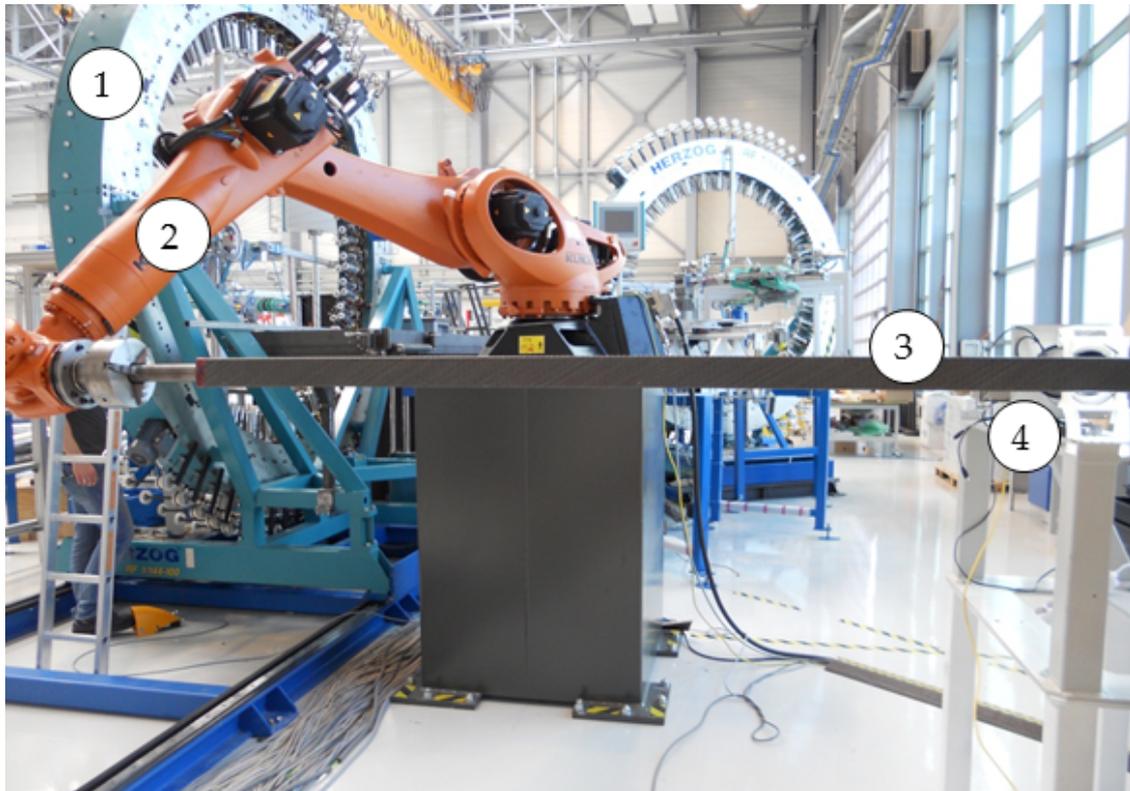


Abb. 3.43: Implementierung von QuIS an die Spant-Preform-Fertigungslinie

1. Flechtmaschine Herzog *RF1/144* – 100
2. Industrieroboter KUKA *KR150 R = 2700m*
3. Rechteckkern mit UD-Geflechtlage
4. Qualitätssicherungssystem QuIS

Im Laufe der Entwicklung wurden weitere Einsatzmöglichkeiten evaluiert und ein zweites QuIS-System konzipiert. Dieses System wurde speziell für die Untersuchung von Umform- bzw. Drapiervorgängen an trockenen Gelegelagen eingesetzt.

Die Gelegelagen wurden zuerst zugeschnitten und dann manuell über eine Vorrichtung gelegt und drapiert. Aufgrund des Drapiervorgangs veränderte sich die Faserorientierung die mit QuIS dargestellt werden konnte, siehe *Anhang B3*.

Die *Abbildung 3.44* zeigt QuIS bei der Geflechtprüfung und *Abbildung 3.45* QuIS II bei der Drapieruntersuchung.

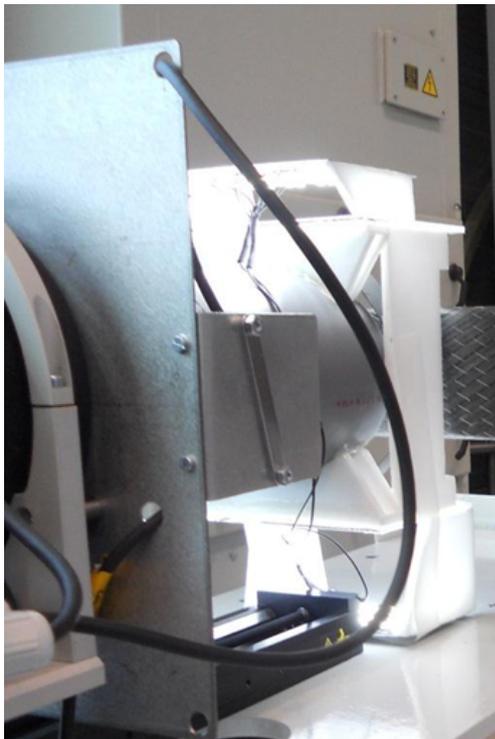


Abb. 3.44: Geflechtprüfung

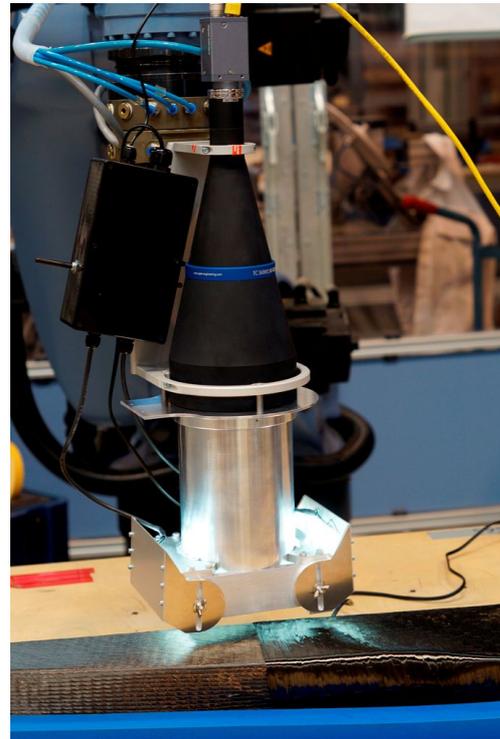


Abb. 3.45: Drapieruntersuchung

Kapitel 4

Experimentelle Untersuchungen und Modellbildung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der experimentellen Untersuchung und Modellbildung des textilen Herstellungsprozesses UD-Flechten. Hierzu findet die in *Kapitel 2.6* beschriebene statistische Versuchsplanung in Kombination mit dem eigens entwickelten QS-System QuIS in *Kapitel 3* Anwendung.

Ziel ist es in diesem Abschnitt, u.a. Optimierungsstrategien aufzuzeigen und einen mathematischen Zusammenhang zwischen geometrischen, kinematischen und weiteren physikalischen Größen sowie deren Wirkungen auf das UD-Geflecht zu schaffen.

Darüber hinaus sollen die Ergebnisse auch Anlass zur Diskussion geben, ab wann die Qualität zufriedenstellend ist, d.h. das Prozessergebnis nicht von der Sollforderung nennenswert abweicht. Die Sollforderung ist hier die Einhaltung des jeweils geforderten Toleranzbereichs. Ist das Prozessergebnis allerdings zu sehr von Schwankungen und zufälligen Fehlern abhängig, muss gegengesteuert werden, um gegebene Toleranzen nicht vollständig auszunutzen. Die Anwendung der statistischen Versuchsplanung hat u.a. als Ergebnis, welche Wirkungen die identifizierten Einflussfaktoren auf den Prozess haben. Ist die Einhaltung der Toleranzgrenzen gefordert, so kann der Anwender mit den Ergebnissen der Versuchsführung bspw. voraussagen, welche Gapgröße sich noch innerhalb der Toleranzen bei maximal möglicher Produktionsgeschwindigkeit befindet. Ein weiterer Ansatz wäre nach *G. Taguchi* mittels Modifikationen am Prozess die Minimierung von Fertigungsstreuungen als primäres Ziel zu definieren.[40, vgl. S.159]

4.1 Herstellungseinflussfaktoren und Zielgrößen

Um darzustellen, welche Maschinenparameter einen Einfluss auf das Flechtergebn haben, ist die Erstellung eines Ursache-Wirkungsdiagramms nach *Ishikawa*, wie in *Kapitel 2.6* beschrieben, hilfreich. In *Anhang C1* wurden alle angenommenen Parameter zusammengestellt. Die Erfassung aller Parameter würde den Rahmen der Untersuchungen zu sehr überschreiten, daher wurden innerhalb dieser Arbeit die angenommenen Haupteinflussfaktoren aus *Kapitel 2.7* ausführlicher untersucht.

Im Diagramm der *Abbildung 4.1* sind die Einflussfaktoren und die Zielgrößen, γ und B direkt bestimmbar aus dem Ablagebild des UD-Geflechts, dargestellt:

- Produktionsgeschwindigkeit: $v_{Produktion}$
- Hubfrequenz der Hubvorrichtung: Hub_f
- Abstand Flechtring-Flechzebene: Δ_{F-R}
- Roving- bzw. Tapespannung: σ_{Tape}

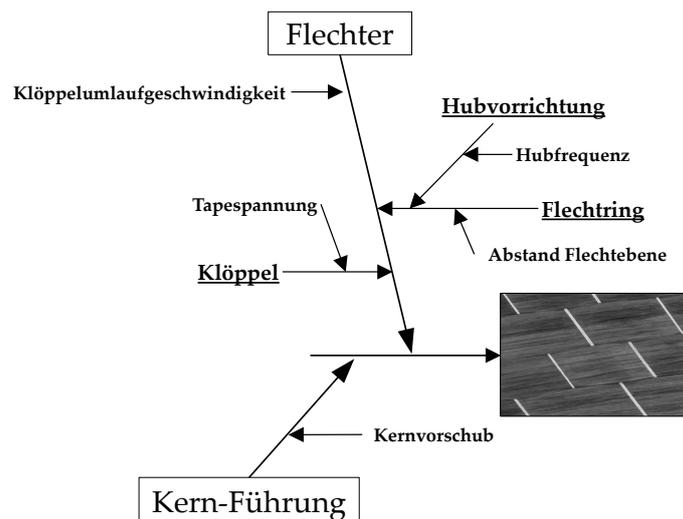


Abb. 4.1: Ursache-Wirkungsdiagramm: Einflussfaktoren | Zielgrößen UD-Flechten

4.2 Aufstellung des Versuchsplans

Mit Hilfe des Versuchsplans soll eine Verbindung zwischen den potenziellen Einflussfaktoren und der Zielgröße(n) geschaffen werden. Mittels Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung wird der experimentelle Teil der Versuchsplanung bearbeitet. Wichtig sind neben der eigentlichen Zielsetzung zusätzlich Budget- und Ressourcenplanungen. Der zeitliche Aufwand ist besonders von der Stufenanzahl der Einflussfaktoren abhängig. Allgemein werden bei mehr als fünf Faktoren zwei Stufen gewählt.[40, vgl. S.23]

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die vier Einflussfaktoren auf zwei Stufen beschränkt. Unter Verwendung von *Gleichung 6.1* bedeutet das 16 Einzelversuche bzw. Faktorstufenkombinationen. Die Versuche wurden über einen längeren Zeitraum durchgeführt und Blöcke zu je zwei Versuchen gebildet. Es wird angenommen, dass die Randbedingungen der Blöcke zueinander gleich bleiben.

Auf mögliche Randomisierungsmaßnahmen kann aufgrund der aufwendigen Versuchsdurchführung nicht eingegangen werden, sodass mit potenziellen Zufallsstreuungen zu rechnen ist.

Faktor	Stufenwert⁻	Stufenwert⁺	Unsicherheit
$v_{Produktion}$	0,01m/s	0,02m/s	$\pm 0,00012m/s$
Hub_f	0,00Hz	1,00Hz	$\pm 0,05Hz$
Δ_{F-R}	0,100m	0,250m	$\pm 0,001m$
σ_{Tape}	4,0N	10,0N	$\pm 0,1N$

Tab. 4.1: Zusammenfassung der Stufenwerte der vier Einflussfaktoren

Die Faktoren können über einen bestimmten Einstellbereich beliebige Werte annehmen, daher werden diese als quantitative Faktoren bezeichnet. Für die Unter-

suchungen wurden proportionale Abhängigkeiten angenommen. Die Auswahl des jeweiligen Faktorstufenwerts bezieht sich auf Erfahrungswerte und ist in *Tabelle 4.1* zusammengestellt. Relevant war, dass die Stufenwerte einen deutlichen Abstand voneinander hatten, gleichzeitig aber nicht zu weit auseinander lagen. Der Grund für letzteres ist, dass zu weite Stufenabstände Wirkungen erzeugen können, die sich außerhalb der erwarteten proportionalen Abhängigkeiten befinden.[40, vgl. 24]

Der Stufenwert⁻ der Produktionsgeschwindigkeit wurde so festgelegt, dass dieser Wert ungefähr die Hälfte der im Projekt angedachten Produktionsgeschwindigkeit darstellt. Stufenwert⁺ ist respektive eine mögliche Sollproduktionsgeschwindigkeit.

Die Frequenz der Hubvorrichtung wurde derart festgelegt, dass zwischen niedriger Schwingungszahl mit Stufenwert⁻ sowie hoher Schwingungszahl mit Stufenwert⁺ unterschieden wurde.

Der Faktor Abstand Flechtring zu Flechtebene wurde im Rahmen der aktuellen Einstellung zum Stand der Untersuchungen mit Stufenwert⁺ übernommen und der Flechtring auf Stufenwert⁻ alternativ verstellt.

Die Anpassung der Tapespannung wurde von der relativ weichen Federspannung Stufenwert⁻ zur harten Federspannung Stufenwert⁺ verändert.

Für die Versuche ist es wichtig, dass externe Einflussgrößen vermieden werden. Hier können als Beispiele Temperaturänderungen des Versuchsraums, aber auch dynamische Einflüsse bspw. infolge der Funktion der Hubvorrichtung auf den Flechter aufgeführt werden. Für die Versuche wurde angenommen, dass sich alle Faktorstufenwerte innerhalb möglicher Extrema befinden. Daher konnte auf Vorversuche gegen mögliche Ereignisse (u.a. Stützfadenrisse) während der Versuchsdurchführung verzichtet werden. Nicht unerheblich ist die Relevanz des Versuchsumfangs, da dieser bei entsprechend hoher Anzahl von Einzelversuchen die Streuung der Versuchsergebnisse hinsichtlich zufälliger Unterschiede verringert. Hierzu kann nach *W. Kleppmann* ein allgemeingültiger Zusammenhang für Versuche mit zwei- oder mehrstufigen Faktoren hergestellt werden.[40, vgl. S.114] Aufgrund eines Vorver-

suchs konnte die Messunsicherheit des Flechtwinkels mit $\sigma_{Mess} = 0,39^\circ$ bestimmt werden, siehe *Anhang C2*. Erfassungsrelevant ist als Vorgabe ein $\Delta\mu$ von $0,5^\circ$. Nach *Gleichung 6.2* und einer Faktorstufenkombination von 16 bedeutet dies, dass etwa 38 Einzelversuche durchgeführt werden müssten, d.h. je Kombination ≈ 2 Messdurchläufe.

Aufgrund der Länge des Kerns konnten 3 Umflechtungen bzw. Messdurchläufe pro Faktorstufenkombination realisiert werden.

Versuch	$v_{Produktion}$	Hub_f	Δ_{F-R}	σ_{Roving}
1	+	-	+	-
2	-	-	+	-
3	+	+	+	-
4	-	+	+	-
5	+	-	-	-
6	-	-	-	-
7	+	+	-	-
8	-	+	-	-
9	+	-	+	+
10	-	-	+	+
11	+	+	+	+
12	-	+	+	+
13	+	-	-	+
14	-	-	-	+
15	+	+	-	+
16	-	+	-	+

Tab. 4.2: Faktorstufenkombinationen des vollständigen faktoriellen Versuchsplans

In der *Tabelle 4.2* sind die 16 Faktorstufenkombinationen des vollständigen faktoriellen Versuchsplans 1. Ordnung dargestellt.

4.3 Versuchsdurchführung

Nach der Aufstellung des Versuchsplans, kann mit der Versuchsdurchführung der Flechtanalyse begonnen werden. Zuvor wurde die Flechtmaschine überprüft, das Programm für den Industrieroboter für die Führung des Kerns erstellt und Testläufe durchgeführt. Zusätzlich wurden alle Klöppel mit Nummern markiert, um Zuordnungen zu erleichtern. Im Anschluss wurden alle Klöppelfederstärken gemessen, hohe Abweichungen behoben und ein Durchschnittswert gebildet.

Abschließend wurde die Abstimmung zwischen Industrieroboterführung und Flechter unter Einsatz vorhandener Messmittel geprüft. Je Untersuchungsblock wurden zwei Versuche durchgeführt. Aufwendig gestaltet sich allerdings die Verschiebung des Flechtrings aus der Flechtebene sowie der Klöppelfederwechsel nach *Versuch 8*. Im Folgenden wird die Vorgehensweise am Beispiel des ersten Versuchs sowie für alle weiteren 15 Versuche aufgezeigt:

1. Check Versuchsblatt: Versuchsnummer
2. Flechter und Vorrichtungen überprüfen
3. Kernaufnahme mittels Roboter
4. Anflechten
5. Prüfung Kern: Vermeidung Exzentrizität und Verdrehung
6. Flechten der Untersuchungslage
7. Abflechten
8. Prüfung Kern: Vermeidung Exzentrizität und Verdrehung
9. Abnahme Kern
10. Messuntersuchungen
11. Prüfung Datenbank: Alle Daten vorhanden
12. Lage entnehmen und Kern überprüfen
13. Bemerkungen zum Versuch notieren und bildliche Dokumentation
14. Nächsten Versuch vorbereiten

Im QuIS Menü können Versuchsdateien mit detaillierten Angaben zur jeweiligen Untersuchung erstellt werden, was u.a. die Zuordnung für spätere Vergleiche vereinfacht. Darüber hinaus wurden für die Versuchsreihen Anpassungen vorgenommen, um konstante Auswertungsbedingungen zu erhalten. Bspw. wurde die Anpassung des Arbeitsabstands über eine Mechanik vorgenommen, um die beste Objektschärfe auf dem Kamerasensor zu garantieren. Der Arbeitsabstand wurde in der Datenbank als Festwert gespeichert und während der Untersuchungen als Abstandswert angezeigt. Die Entwicklung dieser Anpassungseinheit hat sich dahingehend als sinnvoll herausgestellt, da aufgrund der befriedigenden Wiederholbarkeit der Industrieroboterpositionierung in Verbindung mit der Einspannung des Kerns leichte Veränderungen der Position und Neigung beobachtbar waren.

Nach der Erfassung der rechten Flangeseite folgte die erneute Messprozedur für die linke Seite. Pro Versuch wurden insgesamt 42 Bildaufnahmen von beiden Flangeseiten vorgenommen, um eine ausreichende Bildbereichsabdeckung zu erhalten. Insgesamt wurden für die 16 Versuche 672 Bilder aufgenommen und entsprechend der Zielgrößen verarbeitet. Die Bilder je Flange und Seite wurden in einer grafischen Übersicht zusammengestellt, siehe *Anhang C3*.

Der zu untersuchende Bildbereich ist aus Darstellungsgründen für diese Arbeit um den Faktor 0,8 verkleinert worden. Durchgeführte Bildvergleiche mit der Originalgröße konnten keinen nennenswerten Auswertungsunterschied erkennen lassen. Nach den Messungen wurde die Untersuchungslage vom Kern entfernt, um konstante geometrische und kinematische Verhältnisse zu gewährleisten. Jeweils zwei Lagen wurden als Untergrund belassen, um realitätsbezogene Reibungswerte für die Ablage zu generieren.

Auf die Erfassung des Stegs wurde verzichtet, da die Daten des Flanges für die Darstellung der Versuchsmethodik sowie Erkenntnisgewinnung ausreichten. Fertigungsfehler, die während der Untersuchungen entstanden, wurden protokollarisch vermerkt, gesondert bewertet und konnten für die Ableitung von Fehlerpräventionsmaßnahmen genutzt werden. Der Rückbau der Maschine in den Urzustand mit ggf. folgeprojektrelevanter Einstellung schließt die Versuchsdurchführung ab.

Je Versuch wurden der Flechter und die Vorrichtungen auf Funktion überprüft. Nicht festsitzende Schraubverbindungen wurden ebenfalls kontrolliert sowie das Abspulverhalten aller Klöppel überprüft. Von den insgesamt 72 Klöppel mussten vier aufgrund mangelnder Abspuleigenschaften gewechselt werden.

Die Versuche wurden systematisch nach o.e. Auflistung durchgeführt, Besonderheiten und Abweichungen notiert und Funktionsprüfungen als vergleichbares Quality Gate durchgeführt, um stets gleiche Versuchseigenschaften zu gewährleisten.

Neben dem allgemeinen Zustand der Versuchsanlage wurde mit Messmitteln die Lagekontrolle des Flechkerns vorgenommen und das Führungsprogramm des Industrieroboters ggf. angepasst. Die *Abbildung 4.2* zeigt die Überprüfung der horizontalen Lage in Querrichtung des Kerns, um eine mögliche Beeinflussung auf das Flechtergebnis zu vermeiden. Einen wichtigen Messgegenstand stellte die Überprüfung der Zentrität des Kerns dar, siehe *Abbildung 4.3*, und bedeutet das zentrale Ein- und Durchführen des Kerns in die Flechtring- bzw. Flechtebene.

Zusätzlich ist darauf zu achten, dass sich die Flechtringebene parallel zur Ebene des Flechters befindet. Weiterhin ist die horizontale Lage des Flechkerns in Längsrichtung beim Verfahren zu kontrollieren, siehe *Abbildung 4.4*. Der Aufwand für die erwähnten Überprüfungen ist nicht zu unterschätzen, da diese sehr viel Anpassungszeit bezüglich der vorgegebenen Maschineneinstellungen erfordern.

Für die Bildaufnahme wurden fiktive Markierungen mit einem Messabstand von 100mm am Kern angebracht, um damit diskrete Positionen anfahren zu können, siehe *Abbildung 4.7*. Für die Testläufe wurde besonders auf die Lagetreue des Kerns beim Verfahren mittels Industrieroboter geachtet. Insgesamt wurden drei Testläufe durchgeführt, um die Wiederholbarkeit der Kernposition zu überprüfen und zu korrigieren.

Die Messungen wurden entlang des Kerns mit dem o.e. Messabstand durchgeführt. Startpunkt der Messungen war bei Abstandspunkt 250mm , relativ zum Kernanfang, und endete nach 21 Messungen bei Messpunkt 2250mm für die Bildaufnahmen - jeweils für die rechte und linke Flangeseite des Spants.



Abb. 4.2: Querlage



Abb. 4.3: Zentrität

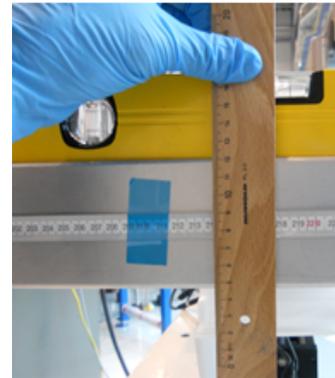


Abb. 4.4: Längslage



Abb. 4.5: Abstände

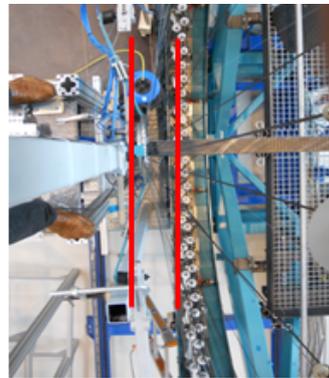


Abb. 4.6: Ebenen

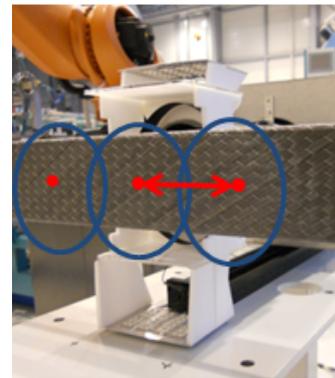


Abb. 4.7: Messbereiche

Die *Abbildungen 4.2 bis 4.7* beziehen sich auf die für die Untersuchungen relevanten Überprüfungen und Einstellungen. Die Maßnahmen wurden vorab und während der Versuche durchgeführt, um Fertigungsfehler zu minimieren. Diese Art der Vorgehensweise war sehr zeitintensiv, garantierte aber eine hohe Wiederholgenauigkeit der Untersuchungen.

4.4 Messergebnisse und statistische Auswertung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Messergebnissen und deren Auswertung aus den Versuchen nach *Tabelle 4.2*. Hierzu wird jede Faktorstufenkombination für die jeweils linke sowie rechte Seite des Flanges aufgenommen und der Mittelwert aus

beiden Ergebnissen berechnet. Das setzt voraus, dass die Ergebnisse von Versuch zu Versuch gleichartig in ihrem Verhalten bzw. Trend sind. Hierdurch kann davon ausgegangen werden, dass starke Abweichungen vom Durchschnittswert, bspw. durch eine falsche Peripherieeinstellung oder einem Fertigungsfehler infolge eines Tape-risses, vermieden werden. Potenzielle Ereignisse wurden im Rahmen der Versuchsdokumentation vermerkt. Allerdings wurden starke Abweichungen vom jeweiligen Durchschnittswert in der Ergebnisdarstellung nicht verwendet, da diese die Analyse zu sehr verfälschen könnten. Bei der Durchführung jeder Faktorstufenkombination muss hervorgehoben werden, dass die Streichung von Messwerten besonders sorgfältig abgewogen werden muss, da starke Abweichungen auch auf mögliches Maschinenfehlverhalten hinweisen könnten.[40, vgl. S. 34] Bei starken Abweichungen wurde daher der Versuch wiederholt.

Für die Auswertung soll dargestellt werden:

- Effektgröße bzw. -stärke

Für die Auswertung der Effekte wird die Varianzanalyse verwendet, da diese Methode es dem Anwender erlaubt, aus der relevanten Effektgröße auf die Wirkung des jeweiligen Faktors zu schließen. Hierbei ist der Effekt die Differenz der beiden Stichprobenmittelwerte.[40, vgl. S.78]

- Mittlere Faktorwirkung

Arithmetischer Mittelwert über die Wirkungen des jeweiligen Faktors bei Aktivität bzw. Inaktivität.

- Bestimmtheitsmaß

Hierbei handelt es sich um einen Wert bzw. Maß, das die Güte der Modellanpassung angibt.[39, vgl. S.65] Beträgt das Bestimmtheitsmaß 100%, bedeutet das eine optimale Anpassung des jeweiligen Modells.

- Signifikanz

Tritt ein Effekt aus der Zufallsstreuung sehr hervor, ist dieser als signifikant zu werten. Das bedeutet, der beobachtete Effekt tritt bei wiederholtem Versuch erneut auf.[40, vgl. S.310]

Messung der Gapflächen

In den Tabellen 4.3 und 4.4 werden die Ergebnisse der Gapflächen der Versuche 1 bis 8 dargestellt, die die Faktoren $v_{Produktion}$, Hub_f und Δ_{F-R} beinhalten.

Versuch 1					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	μ_1	287,9	Rechts	1	118,9
	μ_2	259,2		2	189,8
	μ_3	298,0		3	193,9
	μ_4	326,5		4	204,9
	μ_5	228,0		5	208,7
	μ_{L1}	279,9mm ²		μ_{R1}	183,2mm ²

Versuch 2					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	μ_1	293,1	Rechts	1	216,5
	μ_2	300,1		2	162,7
	μ_3	301,9		3	221,4
	μ_4	290,5		4	176,1
	μ_5	190,8		5	226,2
	μ_{L2}	275,3mm ²		μ_{R2}	200,6mm ²

Versuch 3					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	142,6	Rechts	1	73,7
	2	142,9		2	13,5
	3	148,5		3	123,1
	4	159,3		4	117,1
	5	119,9		5	38,9
	μ_{L3}	142,6mm ²		μ_{R3}	73,2mm ²

Versuch 4					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	108,1	Rechts	1	14,8
	2	111,7		2	148,5
	3	109,7		3	88,4
	4	100,3		4	58,1
	5	47,5		5	38,7
	μ_{L4}	95,4mm ²		μ_{R4}	69,7mm ²

Tab. 4.3: Versuchsergebnisse 1 bis 4

Die Versuchsergebnisse 1-8 beziehen sich auf die Verwendung der weichen 4N Federn. Die Versuchsreihen mit den harten 8N Federn befinden sich im *Anhang C5* und *C6*.

Versuch 5					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	252,2	Rechts	1	200,4
	2	297,5		2	217,9
	3	216,4		3	250,3
	4	290,5		4	80,6
	5	195,1		5	211,6
	μ_{L5}	250,3mm ²		μ_{R5}	192,2mm ²

Versuch 6					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	194,5	Rechts	1	116,7
	2	241,7		2	97,8
	3	195,3		3	195,1
	4	313,2		4	104,4
	5	185,7		5	200,9
	μ_{L6}	226,1mm ²		μ_{R6}	142,9mm ²

Versuch 7					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	148,7	Rechts	1	124,5
	2	179,4		2	144,6
	3	206,2		3	69,5
	4	118,9		4	79,9
	5	180,1		5	46,9
	μ_{L7}	166,6mm ²		μ_{R7}	93,1mm ²

Versuch 8					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	92,9	Rechts	1	30,7
	2	133,2		2	45,8
	3	112,7		3	58,2
	4	140,6		4	36,3
	5	133,5		5	52,5
	μ_{L8}	122,6mm ²		μ_{R8}	44,7mm ²

Tab. 4.4: Versuchsergebnisse 5 bis 8

Die Messreihen der 16 Versuche bestehen, wie in *Anhang C3* gezeigt, aus je vier Spalten und fünf Zeilen. Jeder Index ist eine Einzelbildaufnahme. Die Gesamtfläche je Einzelbild entspricht $1998 \cdot 998px \approx 74mm \cdot 37mm = 2738mm^2$.

Unter Verwendung der mathematischen Funktionen aus *Anhang D1* ab Gleichung 6.4ff kann der Effekt und die Signifikanz (F-Wert) der Faktoren $v_{Produktion}$, Hub_f , Δ_{F-R} und σ_{Tape} sowie die Wechselwirkungen 1. Grades der Faktoren berechnet werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse tabellarisch zusammengefasst:

Faktor	\bar{y}_-	\bar{y}_+	Effekt
$v_{Produktion}$	147,2	172,7	25,5
Hub_f	218,8	100,9	-117,8
Δ_{F-R}	154,8	165	10,2
$v_{Produktion} \leftrightarrow Hub_f$	154,8	165,1	10,3
$v_{Produktion} \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	167,9	151,9	-16
$Hub_f \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	170,8	149,1	-21,7

Tab. 4.5: Zusammenfassung Effekte der Versuche 1-8

Faktor	F-Wert
$v_{Produktion}$	1,1
Hub_f	23,6
Δ_{F-R}	0,2
$v_{Produktion} \leftrightarrow Hub_f$	0,2
$v_{Produktion} \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	0,4
$Hub_f \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	0,8

Tab. 4.6: Zusammenfassung der F-Werte der Versuche 1-8

Faktor	\bar{y}_-	\bar{y}_+	Effekt
$v_{Produktion}$	302,3	366,4	68,1
Hub_f	374,66	294,1	-80,6
Δ_{F-R}	382,1	286,7	-95,4
$v_{Produktion} \leftrightarrow Hub_f$	311,4	357,3	45,9
$v_{Produktion} \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	345,1	323,6	-21,4
$Hub_f \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	351,4	317,3	-34,1

Tab. 4.7: Zusammenfassung Effekte der Versuche 9-16

Faktor	F-Wert
$v_{Produktion}$	8,6
Hub_f	13,7
Δ_{F-R}	19,1
$v_{Produktion} \leftrightarrow Hub_f$	4,4
$v_{Produktion} \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	0,9
$Hub_f \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	2,4

Tab. 4.8: Zusammenfassung der F-Werte der Versuche 9-16

Bemerkung: Die Ergebnisse aus den Versuchen 9-16 zeigten eine deutliche Erhöhung der Gapflächen, siehe *Anhang C5f*. Ebenfalls konnte eine negative Wirkung der Hubvorrichtung für die Versuche 13-16 identifiziert werden. Die Hubvorrichtung wird pneumatisch mit ca. 6bar betrieben und konnte aufgrund der starken Tapekräfte¹ ihre Wirkung nicht vollständig mit kontinuierlichen 1Hz, sondern nur mit $\approx 0,75Hz$ entfalten.

¹ in Summe $\approx 730N$, einschließlich 36 Stützgarnklöppel

Faktor	\bar{y}_-	\bar{y}_+	Effekt
$v_{Produktion}$	212,8	238,9	26,1
Hub_f	289,4	162,3	-127,1
σ_{Roving}	165,0	286,7	121,7
$v_{Produktion} \leftrightarrow Hub_f$	221,2	230,5	9,3
$v_{Produktion} \leftrightarrow \sigma_{Roving}$	217,5	234,1	16,6
$Hub_f \leftrightarrow \sigma_{Roving}$	219,6	232,0	12,4

Tab. 4.9: Zusammenfassung Effekte der Versuche 1-4

Faktor	F-Wert
$v_{Produktion}$	1,8
Hub_f	43,5
σ_{Roving}	39,9
$v_{Produktion} \leftrightarrow Hub_f$	0,2
$v_{Produktion} \leftrightarrow \sigma_{Roving}$	0,7
$Hub_f \leftrightarrow \sigma_{Roving}$	0,4

Tab. 4.10: Zusammenfassung der F-Werte der Versuche 1-4

Bemerkung: Im Vergleich zu den Versuchen 13-16 konnten die Versuche 1-4 sowie 5-12 seitens der Hubvorrichtung kontinuierlich gefahren werden. Die geometrische Betrachtung bezüglich der Normalkräfte am Umlenkring 1, siehe *Anhang C4*, verdeutlicht diesen Sachverhalt. Dadurch konnte festgestellt werden, dass die Tapenormalkräfte für beide Versuchsreihen mit 4,3N bzw. 4,8N in unmittelbarer Umgebung lagen.

Es folgt die zusammenfassende Auswertung der Flechtwinkel:

Faktor	\bar{y}_-	\bar{y}_+	Effekt
$v_{Produktion}$	18,6	19,7	1,1
Hub_f	19,2	19,1	-0,1
Δ_{F-R}	19,1	19,2	0,1
σ_{Roving}	19,0	19,3	0,3
$v_{Produktion} \leftrightarrow Hub_f$	19,1	19,2	0,1
$v_{Produktion} \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	19,2	19,1	-0,1
$v_{Produktion} \leftrightarrow \sigma_{Roving}$	19,2	19,1	-0,1
$Hub_f \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	19,1	19,2	0,0
$Hub_f \leftrightarrow \sigma_{Roving}$	19,2	19,1	-0,1
$\Delta_{F-R} \leftrightarrow \sigma_{Roving}$	19,0	19,3	0,3

Tab. 4.11: Zusammenfassung Effekte der Versuche 1-16

Faktor	F-Wert
$v_{Produktion}$	20,4
Hub_f	0,1
Δ_{F-R}	0,2
σ_{Roving}	0,8
$v_{Produktion} \leftrightarrow Hub_f$	0,2
$v_{Produktion} \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	0,3
$v_{Produktion} \leftrightarrow \sigma_{Roving}$	0,1
$Hub_f \leftrightarrow \Delta_{F-R}$	0,0
$Hub_f \leftrightarrow \sigma_{Roving}$	0,1
$\Delta_{F-R} \leftrightarrow \sigma_{Roving}$	1,1

Tab. 4.12: Zusammenfassung der F-Werte der Versuche 1-16

Bemerkung: Die Auswertung erfolgte nach den Messwerten aus *Anhang C7-10*. Aufgrund der Regelmäßigkeit der Messwerte konnte hier im Vergleich zur Gapfläche der volle Versuchsumfang 1-16 ausgewertet werden.

4.5 Modellbildung

Mittels der durchgeführten Varianzanalyse wurden die Effekte der einzelnen Faktoren näher beschrieben. Entsprechendes gilt für die Modellbildung. Diese wird im Folgenden für die Versuche 9-16 erstellt und soll als Impuls dienen, weitere Analysen mittels der Versuchsplanung durchzuführen. Speziell für den Anwender ist die Kenntnis eines mathematischen Modells unter Berücksichtigung der Darstellung in *Abbildung 2.42* für den Zusammenhang zwischen Ursache (Faktoren) und Wirkung (Effekt) interessant.[39, vgl. S.183] Als mathematisches Hilfsmittel wird die Regressionsanalyse verwendet. Es sollte beachtet werden, dass die Variablen und Koeffizienten keine realen Werte darstellen, sondern qualitativ die Faktoren sowie die entsprechenden Gewichtungen der jeweiligen Faktoren. Die Versuche 9-16 sind nach dem Versuchsplan aus *Tabelle 4.2* linear mit drei unabhängigen Faktoren aufgebaut. Es wird daher folgender linearer Regressionsansatz gewählt:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 \quad (4.1)$$

Die Koeffizienten können aus den jeweiligen Gapflächenmittelwerten nach positiver oder negativer Faktoreneinstellung aus den *Tabellen 6.4* und *6.5* ermittelt werden:

$$b_0 = \frac{407,1 + 324,1 + \dots + 252,1}{8} = 334,4 \quad (4.2)$$

$$b_1 = \frac{407,1 - 324,1 + \dots - 252,1}{8} = 47,7 \quad (4.3)$$

$$b_2 = \frac{-407,1 - 324,1 + \dots + 252,1}{8} = -40,3 \quad (4.4)$$

$$b_3 = \frac{407,1 + 324,1 + \dots - 252,1}{8} = -32,1 \quad (4.5)$$

Die Vorzeichen der Ergebnisse von b_0 bis b_3 sind nachvollziehbar, da die Effekte in *Tabelle 4.7* zuvor gleichartig waren. Die *Gleichung 4.1* wird entsprechend angepasst:

$$\hat{y} = 334,4 + 47,7 \cdot x_1 - 40,3 \cdot x_2 - 32,1 \cdot x_3 \quad (4.6)$$

Die Güte des Modells kann mit dem Bestimmtheitsmaß ermittelt werden, siehe *Gleichung 6.22*. Dies wurde entsprechend berechnet und ein Wert von 77,8% ermittelt. Um die Modellanpassung zu verbessern, wird ein zusätzlicher Wechselwirkungsfaktor berücksichtigt. Aus *Tabelle 4.8* ist ersichtlich, dass aufgrund des verhältnismäßig hohen F -Werts von 4,4 eine Interaktion zwischen $v_{Produktion} \leftrightarrow Hub_f$ wahrscheinlich ist. Die Zweifachwechselwirkung wird berücksichtigt und die Regressionsgleichung wird um entsprechendes Wechselwirkungsglied b_{12} erweitert:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_{12} \quad (4.7)$$

Der Wechselwirkungswert ist mittels Kombinatorik ermittelbar. Hierzu wird in der *Versuchsplantabelle 4.2* untersucht, bei welchen Faktoren jeweils gleiche Vorzeichen bzw. ungleiche Vorzeichen vorliegen. Danach lassen sich, ähnlich der *Gleichungen 4.2ff*, weitere Wechselwirkungsbeizahlen berechnen.

$$\hat{y} = 334,4 + 47,7 \cdot x_1 - 40,3 \cdot x_2 - 32,1 \cdot x_3 + 17,06 \cdot x_{12} \quad (4.8)$$

Mit dem Wechselwirkungsglied b_{12} konnte die Modellgüte auf 83% gesteigert werden. Es ist daher anzunehmen, dass die Modellgüte mit den Wechselbeziehungen $v_{Produktion} \leftrightarrow \Delta_{F-R}$ und $Hub_f \leftrightarrow \Delta_{F-R}$ weiter gesteigert werden kann. Es ist außerdem denkbar, dass weitere Zusammenhänge unberücksichtigt blieben. Hier soll nicht die Interpretation der Ergebnisse vorweggenommen werden, sondern die Möglichkeit einer weiteren Verfeinerung des Modells dargestellt werden.

Im Folgenden soll der Nutzen eines Funktionsmodells nach *Gleichung 4.8* an einem Beispiel dargestellt werden. Hierbei wird der Unterschied zwischen niedriger und

hoher $v_{Produktion}$, respektive Kernvorschub, betrachtet. Mit der grafischen Darstellung des Modells bzw. Funktionsergebnisses kann anschaulich der Zusammenhang zwischen Kernvorschub und Gapfläche unter ökonomischen Betrachtungen diskutiert werden.

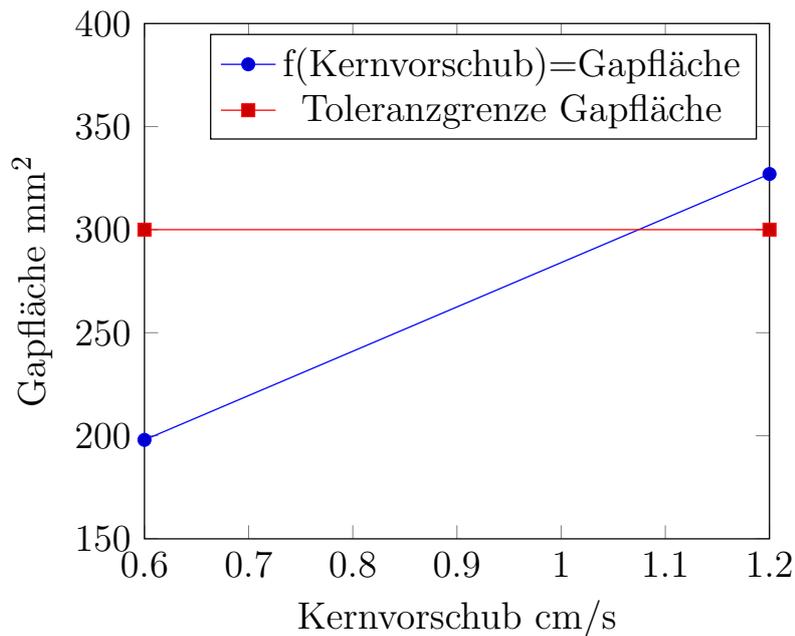


Abb. 4.8: Fertigungsdiagramm Kernvorschub vs. Gapfläche

Im Diagramm nach *Abbildung 4.8* ist die Funktion $f(\text{Kernvorschub}) = \text{Gapfläche}$ dargestellt. Aufgrund der zwei Stufen der jeweiligen Faktoren bildet der Graph eine lineare Funktion (blaue Linie) ab. Folgende Situation soll angenommen werden: Im Produktionsbetrieb der Preformherstellung mittels UD-Flechten wird mit einem Kernvorschub von $0,6 \text{ cm/s}$ gearbeitet. Der Vorschub soll nun auf $1,2 \text{ cm/s}$ gesteigert werden.

Wird der entsprechende Gapflächenwert für diesen Vorschub betrachtet, so befindet sich dieser $\approx 50 \text{ mm}^2$ über der erlaubten Toleranz von 300 mm^2 (rote Linie). Ohne ein solches Diagramm bzw. spezifische Kenntnisse über den Prozess würde

Ausschuss produziert werden, da der Gapflächenwert zu hoch wäre. Dies ist für ein Unternehmen ökonomisch nicht vorteilhaft, da Ressourcen in Form von Material, Arbeitsleistung und Betriebsmittel ohne Wertschöpfungssteigerung eingesetzt werden. Mittels des Diagramms würde bspw. ein Vorschub von $0,9\text{cm/s}$ möglich sein. Dies würde etwa einer Produktionssteigerung von 50% entsprechen und könnte ökonomisch interessant sein.

4.5.1 Darstellung der Ergebnisse, Interpretation und Maßnahmen

Nachdem die Auswirkungen der Faktorstufenkombinationen erfasst und ausgewertet wurden, erfolgt die Interpretation der Ergebnisse und mögliche Verbesserungsmaßnahmen. Zunächst kann hervorgehoben werden, dass durch die Untersuchungen gute sowie schlechte Maschineneinstellungen evaluiert und generierte Fertigungsimperfectionen mittels QuIS detektiert werden konnten.

4.5.2 Allgemeine Betrachtungen

- Nach *G. Taguchi* konnte am Beispiel der Gap-Ergebnisdarstellungen, vgl. *Abbildung 4.9* mit *Abbildung 4.10*, gezeigt werden, dass eine vorteilhafte Einstellung der Steuergrößen mögliche Störgrößen minimiert. [40, vgl. S.17] Es ist aber anzunehmen, dass einige Störgrößen nicht erfasst wurden.

Eine mögliche Störgröße könnte bspw. die Bespulung des Tape-Materials auf die relativ hohe Spule sein. Im mittleren Bereich ist das Tape-Abspulverhalten aufgrund des geringen Winkels leichtgängig. An den Flanken ist ein deutlicher Anstieg der Tape-Spannung bemerkbar, der im Mittel bei $\approx +4N$ lag. Dies verstärkt die mögliche Einschnürgefahr des verwendeten Tapes erheblich. Nicht korrekt fixierte Elemente des Klöppels verstärken diese negativen Effekte des Abspulverhaltens.

Gesamtheitlich kann das Abspulverhalten als nicht homogen für die Klöppel angesehen werden. Daher kann eine nicht optimale Ablage des Tapes aufgrund einer Verdrehung bzw. Stauchung oder auch aufgrund eines Stützgarnisses

die Folge dieses Effekts sein. Ziel der Untersuchungen war es im Speziellen, mit bekannten und unbekanntem Störgrößen umzugehen, sodass eine Maschineneinstellung identifiziert werden kann, die mit gegebener Peripherie optimale Ergebnisse, d.h. geringste Fertigungsunperfektionen, generiert.

Die Ergebnisse können daher als Optimierungsvorschlag für die Systemkonfiguration der Radialflechter-Industrieroboter Kombination betrachtet werden. Die Ergebnisse wurden aus den Versuchen 1-16 ermittelt und stellen insbesondere den Nutzen der Verwendung der statistischen Versuchsmethodik u.a. für die Evaluierung der Haupteinflussparameter dar.

- Regelmäßigkeiten und Haupteinflüsse für UD-Flechtwinkel und die Gapfläche:

UD-Flechtwinkel

- Der Flechtwinkel der linken Seite des geraden Spants ist durchschnittlich 1° größer als die Winkelwerte auf der rechten Seite.
- Als Haupteinflussparameter für den Flechtwinkel konnte aus den Untersuchungen die Vorschubgeschwindigkeit nachgewiesen werden.

Gapfläche

- Die linke Seite des geraden Spants ist bis zu 270% größer als die Gapflächenwerte der rechten Seite.
- Die Hubvorrichtung sowie die Federstärke sind als Haupteinflussparameter für die Gapfläche nachgewiesen worden.

Versuche 1-8

- Der Einfluss der Hubvorrichtung auf die Gapfläche für die Versuche 1-8 ist als signifikant zu bezeichnen.
- Die zusätzliche Veränderung der Tapekräfte aufgrund der Verschiebung des Flechtrings bzw. der Hubvorrichtung wurde mit dem Faktor *Hub* abgebildet. Die Hubvorrichtung konnte bei Verwendung der schwachen Federn ein kontinuierliches Hubverhalten aufweisen und eignet sich daher für die Produktion.

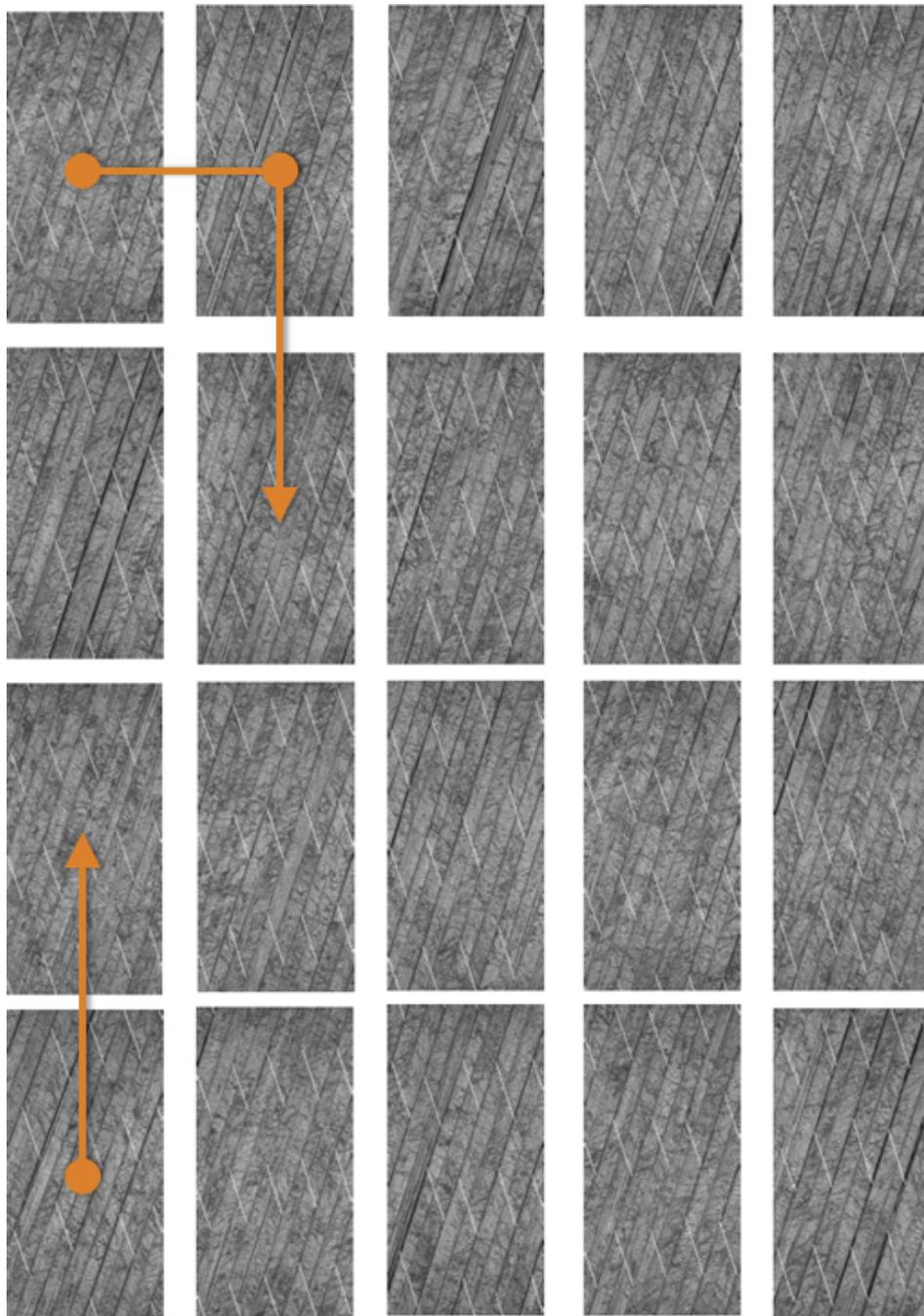


Abb. 4.9: Ergebnisdarstellung der Messbilder aus Versuch Nr. 8

Trotz Verschiebung der Flechtringebene sind vertretbare Tape-Normalkräfte am Flechtring ermittelbar, siehe *Anlage C4*.

- Einige Wechselwirkungen konnten jedoch nicht dargestellt werden.

Der Versuch Nr. 8 stellt die geringsten Defekte bzw. Gapflächen dar und ist als optimale Peripherieeinstellung zu werten, vgl. *Abbildung 4.9*.

Die Modellfunktion für die Gapfläche konnte mit einem Bestimmtheitsmaß von 95% dargestellt werden und kann, ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen, als gut angepasst betrachtet werden. Die Modellfunktion könnte für die Produktion genutzt werden.

- Trotz des hohen Einflusses der Hubvorrichtung sind weitere Faktoren bzw. Wechselwirkungen vorhanden, vgl. *Tabelle 4.6*.
- Eine Winkelabhängigkeit konnte für den Vorschub ermittelt werden. Hier ist davon auszugehen, dass die Anpassung der Geschwindigkeiten von Flechtmaschine zu Industrieroboter nicht optimal erfolgte. Hier sollte eine Anpassung der Programme zur Steuerung beider Peripherien vorgenommen werden.
- Die Winkeldifferenz zwischen beiden Kernseiten beträgt ca. 1° . Es ist auch hier davon auszugehen, dass es sich wie bei dem Vorschub, um einen systematischen Fehler handelt. Ein verbessertes Führungsverhalten des Kerns durch die Flechtringebene ist zu empfehlen. Es ist hervorzuheben, dass die Einstellungen für die Messungen sehr sorgfältig und unter hoher Genauigkeit durchgeführt wurden.
- Winkel und Gapfläche scheinen gleichsinnig zu sein, d.h. eine größere Gapfläche bedingt durch einen größeren Flechtwinkel und andersherum.
- Beste Maschineneinstellung Versuch: Nummer 8

Versuche 9-16

- In dieser Versuchsreihe war die Kombination aus Federstärke und Flechtringverschiebung die dominierende Größe. Beide Faktoren können mit einer Ereigniswahrscheinlichkeit von 95% angegeben werden. Bei Betrachtung der Ergebnisse aus den *Tabellen 6.4* bis *6.5* fällt die stark erhöhte Gapfläche beson-

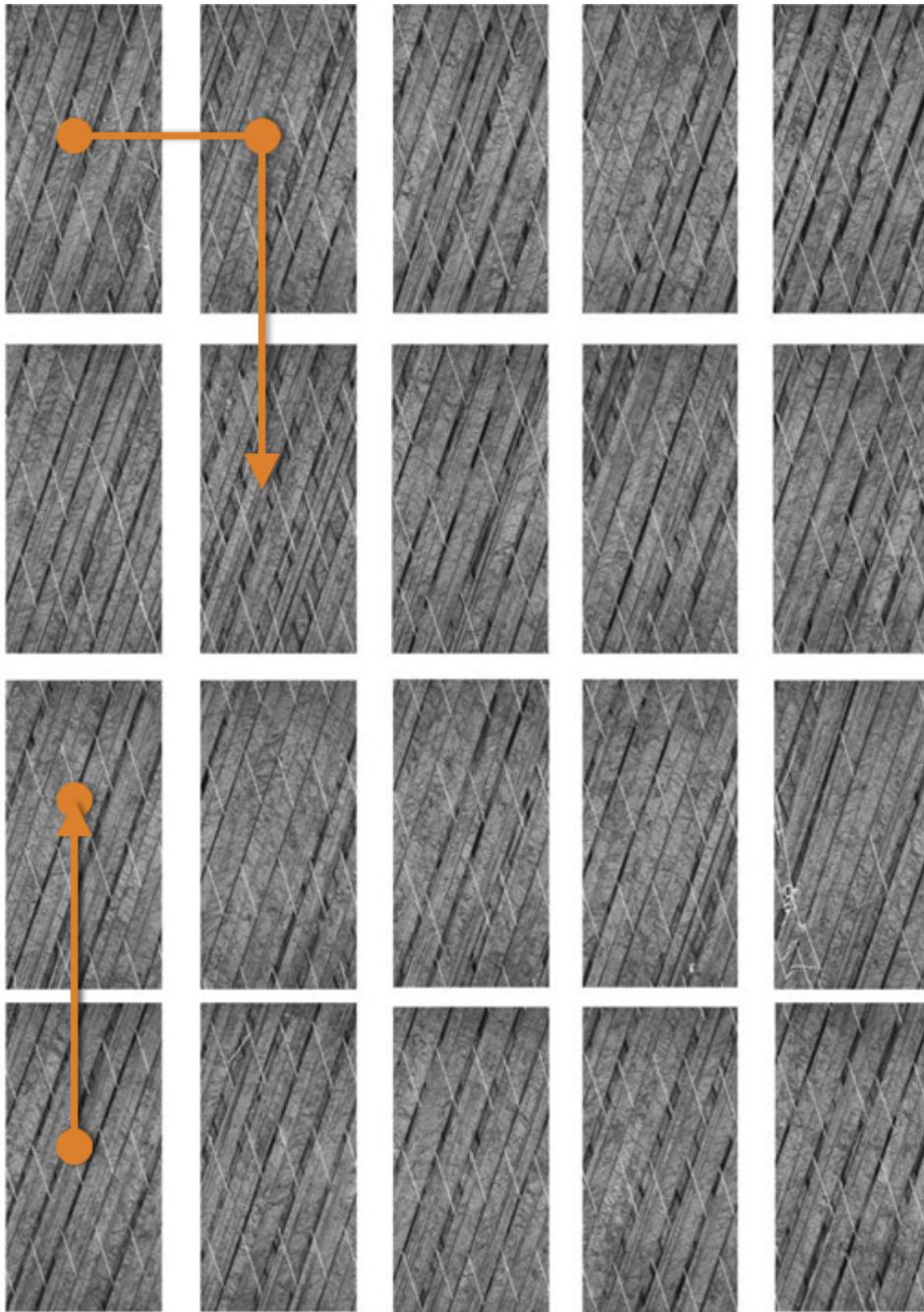


Abb. 4.10: Ergebnisdarstellung der Messbilder aus Versuch Nr. 13

ders auf. Die durchschnittliche Rovingspannung von $8N$, mit teilweise zusätzlichen Spannungsspitzen von bis zu $4N$, resultierte in einer asymmetrischen Tapenormal-

kraftverteilung am Flechtring. Diese kann als Hauptursache für die hohen Gapflächenwerte identifiziert werden.

Der Versuch Nr. 13 stellt die meisten Defekte bzw. Gapflächen dar und ist als nicht optimales Ergebnis zu werten, vgl. *Abbildung 4.10*.

Das Tape-Material legte sich in einigen Bereichen nicht gleichmäßig ab, so dass Gaps entstanden. Zusätzlich konnte aufgrund der hohen Spannung kein kontinuierlicher Betrieb der Hubvorrichtung gewährleistet werden.

- Das Ziel sollte eine sogenannte Robust-Design-Philosophie sein. Dadurch ist eine Fertigung mit geringer Störanfälligkeit und hoher Reproduzierbarkeit möglich. Werden die Flechtwinkelorientierungen auf der linken und rechten Kernseite aus den 16 Versuchsreihen miteinander verglichen, so ist ersichtlich, dass diese im Durchschnitt $1,0^\circ$ voneinander abweichen, siehe *Tabellen 6.6 bis 6.9*. Dies ist in Bezug auf die einzuhaltenden Toleranzen aus produktionstechnischer Betrachtung als befriedigend zu werten.

Eine andere Möglichkeit stellt die Anpassung der Toleranzwerte für textile Fertigungsprozesse im Allgemeinen dar. Hierzu sind weitere Versuchsreihen mit entsprechenden Messergebnissen erforderlich, um bestehende Regularien anzupassen oder neu zu definieren.

Darüber hinaus können die vorhandenen Ergebnisse als erster Benchmark betrachtet werden. Weiterführende Untersuchungen könnten anschließend als Vorher-Nachher-Vergleich verwendet werden, ob eine Prozessoptimierung, z.B. hinsichtlich der Flechtwinkel auf beiden Kernseiten, erfolgte.

- Mittels des mathematischen Modells aus den Versuchen nach *Gleichung 4.8* ist es möglich, Gapflächen bei bestimmter Maschineneinstellung innerhalb der Versuchsgrenzen vorherzusagen.
- Fertigungsdiagramme, die speziell die Wirkung der Faktoren auf Imperfektionen wie die Gapfläche darstellen, können dem Anwender entscheidende Vorteile bieten. Im Hinblick auf eine gewisse Fehlerwahrscheinlichkeit kann anhand von *Abbildung 4.8* die maximal mögliche Produktionsgeschwindigkeit

keit festgelegt werden, ohne dass eine definierte Toleranzgrenze überschritten wird.

Es wird für spezielle Materialpaarungen sowie für andere Maschineneinstellungen empfohlen, weitere Versuche durchzuführen.

- Auch in dieser Versuchsreihe scheinen Winkel und Gapfläche gleichartig zu sein, d.h. eine größere Gapfläche resultiert in einem größeren Winkel und andersherum.
- Beste Maschineneinstellung: Versuch Nummer 12.

Versuche 1-4 mit Federwechsel

- Der Vergleich der Versuche 1-4 mit jeweils weicher und harter Feder zeigte, dass die Hubvorrichtung ähnlich wie die Federstärke einen Einfluss auf die Gapfläche hat. Beide Faktoren sind als sehr signifikant einzustufen mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% gemäß Vergleich mit dem F-Grenzwert aus Tabellenwerken. Im Mittel hat sich die bereits angesprochene Tapenormalkraft verdoppelt.
- Gapfläche und Winkel sind jeweils ihrer Größe nach gleichsinnig.
- Beste Maschineneinstellung: Versuch Nummer 4.

4.5.3 Empfehlungen

- Das System QuIS kann speziell dafür genutzt werden, um potenzielle Fehler frühzeitig zu erkennen und diese mittels entsprechender Maschinenregulierung zu verhindern.

Ein kostenintensiver Produktionsstopp kann somit durch das Eingreifen des QS-Systems zukünftig verhindert werden. Zusätzlich sollten, je nach Systemkonfiguration und Material, weitere mathematische Modelle aufgestellt werden, um eine gewisse Fehlervorhersagbarkeit zu erhalten.

- Bevor überhaupt die Messungen durchgeführt wurden, musste die Maschine gewartet und u.a. Oxidationen an Umspulelementen beseitigt werden. Darüber hinaus wurden unzählige Schraubverbindungen auf festen Sitz überprüft und ggf. nachgezogen, daher wird die Erstellung eines Wartungshandbuchs empfohlen.
- Die Flechtringebene gilt es hinsichtlich der horizontalen und vertikalen Neigung zu überprüfen. Bei den Messungen wurde dies gewissenhaft durchgeführt, sodass ein Einfluss aufgrund der Neigungsverstellung ausgeschlossen werden kann. Regelmäßig gilt es den Flechtring, besonders bei Einsatz bebinderter Rovinge bzw. Tape, zu reinigen.
- Aus einem speziell durchgeführten Anflechtversuch ist ersichtlich, dass der Sollwinkel von $19,00^\circ$ beim Anflechten nach ca. $0,4m$ erreicht wird.

Dieser Wert kann für entsprechende Kernausslegungen genutzt werden, um nicht zu viel Material zu verschwenden. Auf der anderen Seite kann Gewicht eingespart und das Handling erhöht werden.

Position	0,0m	0,1m	0,2m	0,3m	0,4m	0,5m
Winkel	$39,97^\circ$	$26,99^\circ$	$23,01^\circ$	$20,18^\circ$	$19,13^\circ$	$19,10^\circ$

- Die betrachteten Wechselwirkungen der Stell- und möglichen Störgrößen ergeben sich aus der Peripherieaktion und sind nicht einstellbar, da diese erst auftreten, wenn eine bestimmte Faktorenkombination aktiviert ist.

Negative Nebeneffekte sind zu vermeiden, wie z.B. das erhöhte Schwingungsverhalten des oberen Flechterbereichs bei Inbetriebnahme der Hubvorrichtung. Letztere sollte entsprechend der Hubfrequenz verändert werden, um aus dem Resonanzbereich des oberen Flechtergehäuses zu gelangen.

Auf der anderen Seite sind Steifigkeitsoptimierungen am Flechter ebenfalls möglich, um die Schwingungsanfälligkeit zu vermindern.

- Bei Einsatz der harten Federn sollte die pneumatisch betriebene Hubvorrichtung überarbeitet werden, um einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten.

ten, bspw. mittels elektrischer Antriebe.

- Ein Stützgartriss äußert sich in einer stetigen Winkelerhöhung im lokalen Bereich des UD-Geflechts. Diese anfängliche Winkelerhöhung kann als Indiz gewertet werden, dass ein Stützgar bald reißen wird.
- Ansatz 1: Weiterhin soll das QS-System, wenn es geplant ist die Maschinensteuerung zu übernehmen, den Lagenaufbau des entsprechenden Preforms repräsentieren. Hierdurch besteht die Möglichkeit, Sollgrößen direkt ins System einzugeben und zu kontrollieren bzw. bei Implementierung eines mathematischen Modells eine Regelung vornehmen zu können.

Konkret könnte zukünftig an der Maschine der Flechtwinkel von 30° eingestellt werden. Aufgrund der gegebenen Maschinenperipherie, mit den jeweiligen identifizierten Einflussfaktoren und Größen, würde sich bspw. die Klöppelumlaufgeschwindigkeit sowie der Vorschub automatisch konfigurieren. Das QS-System überwacht die Fertigung und greift bei potenziellen Störungen, wie z.B. einem Stützgartriss, präventiv ein. Parallel werden die QS-Daten im Datenbanksystem gespeichert und dienen als Bauteilkarte.

- Ansatz 2: In Bezug auf das UD-Flechten könnten die Materialcharge und die Spulenlänge als Wareneingangsdaten erfasst werden. Das QS-System könnte mit der Flechtmaschine kommunizieren, um bspw. bei Materialknappheit neue Materialspulen bei der Logistik in Auftrag zu geben.

Eine Materialvorprüfung bzw. QS-Prüfung des Umspulvorgangs von der Herstellerspule auf die kleineren Flechterspulen könnte mögliche Verdrehungen des Tapes ggf. aufzeigen und entsprechende Aktionen veranlassen. Folglich könnte diese schwer zu erfassende Störgröße des UD-Flechtprozesses auf ein Minimum reduziert werden.

- Ansatz 3: Überarbeitung der Klöppel, um leichtgängiges Abspulen des Produktionsmaterials zu gewährleisten. Reduzierung der möglichen Störgröße.
- Ansatz 4: Kleinere Spulenhöhe, um eine Einschnürung des Tapes zu vermeiden. Reduzierung der möglichen Störgröße.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Die Flechttechnologie eignet sich als Teilsystem für die automatisierte Fertigung von textilen Preformen für Faserverbundstrukturbauteile. Vorhandene Modelle zur Bestimmung der Lagentopographie berücksichtigen allerdings ausschließlich geometrische und kinematische Zusammenhänge. Den Modellen mangelt es an weiteren physikalischen Einflussgrößen, wie bspw. vorhandenen Reibungskräften zwischen den Rovingen bzw. Tapes.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, speziell das UD-Flechten auf prozessinhärente Haupteinflussparameter hin zu untersuchen sowie die Erarbeitung von Grundlagen für die Darstellung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen.

Bevor allerdings mit den Untersuchungen begonnen werden konnte, musste ein geeignetes Sensorsystem für die Erfassung der Lagentopographie evaluiert werden. Als Messgrößen bzw. Qualitätsmerkmale sind hier die Flechtwinkelorientierung sowie die Gapfläche definiert worden. Die Detektion beider Kenngrößen bildete die Hauptanforderung an das Sensorsystem auf optischer Basis. Aufgrund des verwendeten Kohlenstofffaser-Tape-Materials als auch der Notwendigkeit gekrümmte Strukturen untersuchen zu können, wurde ein eigenes Sensorsystem im Rahmen dieser Arbeit definiert, konzipiert und umgesetzt.

Diese Entwicklungen bildeten den ersten Schwerpunkt dieser Arbeit. Mit dem neu entstandenen Qualitätssicherungssystem QuIS mit interner Datenbank ist es möglich Online- und Offline-Analysen durchzuführen. Daher eignet sich das Gerät sowohl für die prozessbegleitende Qualitätssicherung als auch für detaillierte Analysen

im Offline-Modus. Vielfältige Einstellungs- und Anpassungsoptionen erlauben verschiedene Untersuchungsmöglichkeiten textiler Gelege und eigens entwickelte Bildverarbeitungsmethoden vervollständigen die Auswertung von Rovingen mit und ohne thermoplastischen Binder sowie Glasfasern gleichermaßen. Darüber hinaus bietet das Beleuchtungssystem die Möglichkeit bis zu vier verschiedene Beleuchtungscharakteristiken zu generieren. Diese Option unterstützt speziell die Gap- oder Stützfädenerkennung. Abschließend eignet sich das System, neben der Untersuchung von UD-Geflechtlagen, auch für Drapieruntersuchungen und wurde aufgrund weiterer Anwendungsfelder stetig weiterentwickelt.

Im experimentellen Teil dieser Arbeit wurde mittels QuIS die UD-Geflechtanalyse durchgeführt. Hierfür wurden die Methoden der statistischen Versuchsführung genutzt. Im ersten Schritt war der Entwurf der Versuchsplanung notwendig. Vorversuche grenzten mögliche Haupteinflussparameter ein, um die Untersuchungen schließlich auf vier Faktoren zu begrenzen. Diese wurden gemäß des Versuchsplans definiert eingestellt und die Resultate infolge Flechtwinkel- bzw. Gapflächenveränderungen ausgewertet. Aus diesen Ergebnissen konnten zum Beispiel Interaktionen identifiziert werden. An dieser Stelle war es sinnvoll zu prüfen, ob die möglichen Einflussparameter bzw. Faktoren für die Ergebnisse signifikant waren, um letztlich ein Prozessmodell hoher Darstellungsgüte zu generieren. Auf diese Weise lassen sich zukünftig, bei gleicher Maschinenperipherie, gewünschte Qualitätsmerkmale mit geringsten Abweichungen der jeweiligen Sollwerte darstellen. Ursache und Wirkung konnten hierdurch in einem neuen Zusammenhang betrachtet werden.

Beispielsweise hat die Nutzung der verwendeten Hubvorrichtung erheblichen qualitativen Einfluss auf die Gapgröße entsprechender UD-Geflechtlagen. Darüber hinaus lassen sich mit bestimmten Produktionsgeschwindigkeiten Fehlereintrittswahrscheinlichkeiten minimieren. Hierzu wurde bspw. ein Fertigungsdiagramm aus dem Prozessmodell entwickelt, um die Relation zwischen Produktionsgeschwindigkeit bzw. Kernvorschub und Gapfläche aufzuzeigen. Mittels des entwickelten Fertigungsdiagramms kann mit optimalen Maschinenparametern der textile Preform erstellt werden und verhilft so zu einer wirtschaftlichen Produktion.

Bezüglich des Flechtwinkels konnte evaluiert werden, dass untersuchte Peripherieeinstellungen zwischen Industrieroboter und Flechtmaschine zu Abweichungen führten. Diese Abweichungen konnten als systematisch bezeichnet werden und zeigen deutlich, wie essenziell eine Peripherieeinstellung ist, bei der der Flecht kern durch den Mittelpunkt der Flechtebene sowie ohne Verdrehungen und Neigungen geführt wird.

Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden mittels QuIS charakteristische Merkmale des UD-Geflechts erkannt und ausgewertet. Die Erkennung direkt am Entstehungsort ermöglicht es, Defekte im UD-Geflecht frühzeitig zu erkennen und zu korrigieren. Dadurch kann die Robustheit des Prozesses sowie die Qualität des Preforms erhöht und ein potenzieller Bauteilausschuss am Ende der Wertschöpfungskette vermieden werden. Interessant wäre es, über einen längerfristigen Zeitraum Prozess- und Preformdaten zu kumulieren und mittels der Methoden der statistischen Versuchsplanung auszuwerten, um das bestehende Prozessmodell zu verfeinern.

Weiterhin können die mit QuIS erfassten Prozess- und Preformdaten genutzt werden, um eine Prozessqualifizierung zu unterstützen, Prozessfähigkeitskennzahlen zu ermitteln oder vorhandene Prozesstoleranzen zu überarbeiten. Die Daten könnten beispielsweise auch für ein Benchmarking genutzt werden, um den Flechtprozess mit anderen textilen Preformherstellungsprozessen zu vergleichen.

Zusätzlich könnten die Daten dafür verwendet werden, UD-Flechtsimulationen zu validieren bzw. anzupassen. Dies würde auch Drapiersimulationsmodelle beinhalten, bei denen das Drapierverhalten von textilen Gelegelagen zu untersuchen ist.

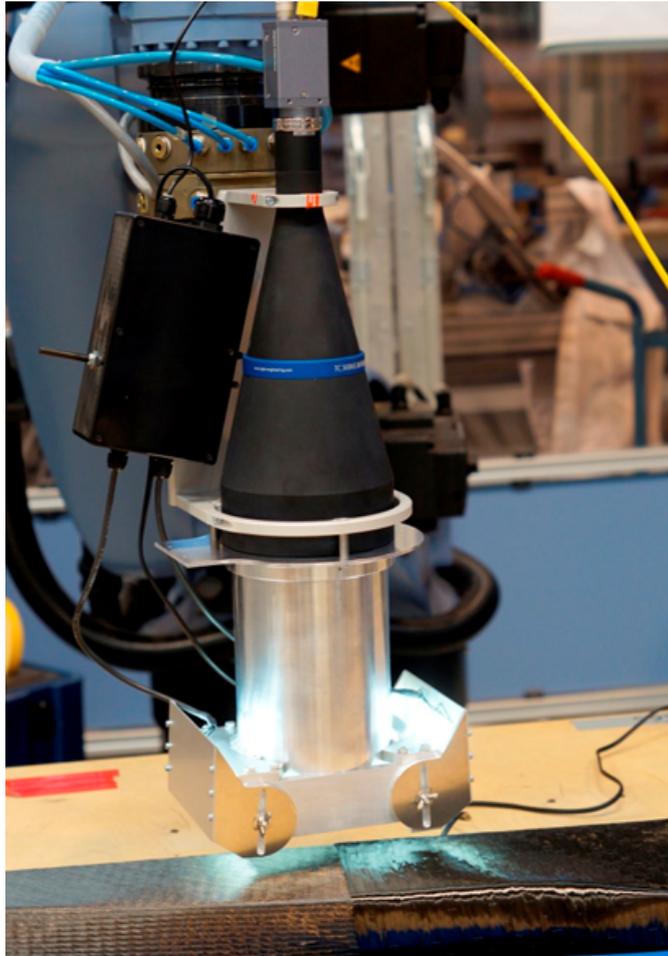


Abb. 5.1: Qualitätssicherungssystem QuIS

Anhang

A1 - Technische Zusammenhänge

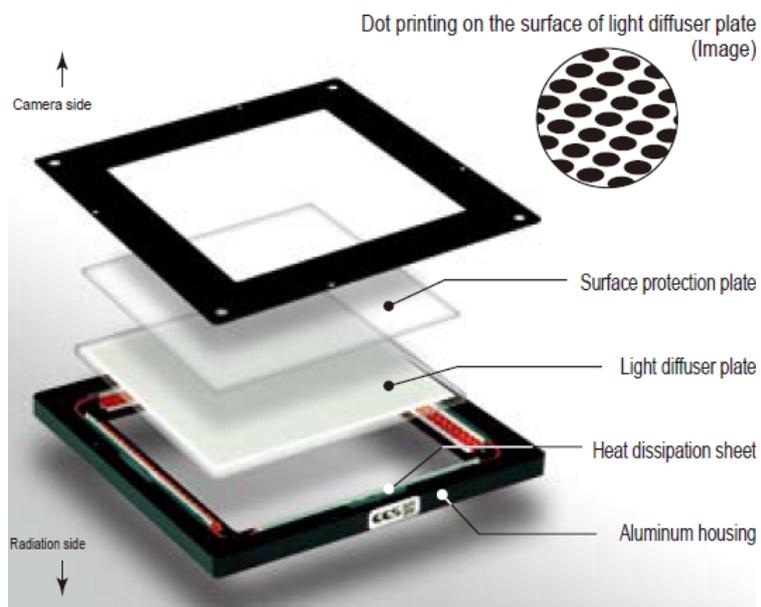


Abb. 6.1: Aufbau des Flat-Domes[52, vgl. S.2]

Die *Abbildung 6.1* zeigt den Aufbau des Flat-Domes. Das Besondere ist die Kombination aus Plexiglas und Lochschablone. Diese Lochschablone weist ein Punktmuster auf. Hierdurch wird das Licht auf der einen Seite mit $\approx 90^\circ$ gerichtet abgestrahlt und das Objekt wird nahezu homogen ausgeleuchtet. Interessant ist hier die geringe Bauhöhe des Geräts. Nach Angaben des Herstellers *CCS* vereint das Gerät die Beleuchtungseigenschaften einer Koaxial- und Dome-Beleuchtung.[vgl. S.2][52]

A2 - Technische Zusammenhänge

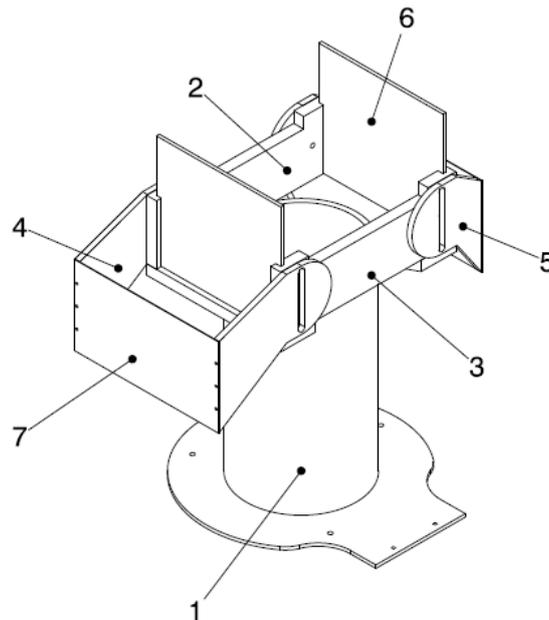


Abb. 6.2: CAD-Modell der Beleuchtungseinheit QuIS

In *Abbildung 6.2* ist die Beleuchtungseinheit, hauptsächlich aus Aluminium aufgebaut, des QuIS-Systems dargestellt. Die Nummern haben folgende Bedeutung:

1. Lichtrohr mit Anschlussplatte
2. Vertikale Verbindungsplatte A
3. Vertikale Verbindungsplatte B
4. Seitenlasche A
5. Seitenlasche B
6. Diffusorscheibe A
7. Leuchtmittelplatte mit 4 LED-Streifen

A3 - Technische Zusammenhänge

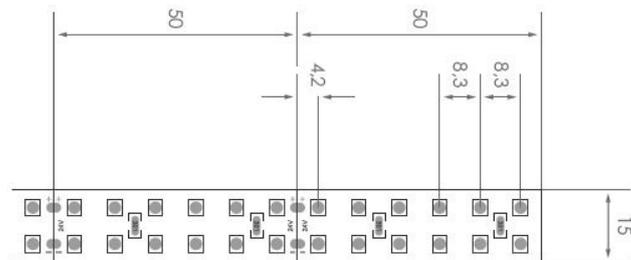


Abb. 6.3: LED-Streifen High Double 24V/DC

Angabe	Wert
Farbe	Kalt-Weiß
Ausführung	5cm \triangleq 12 LEDs
Betriebsspannung	24V/DC
Abstrahlwinkel	120°
Lichtstärke	1800mcd

Tab. 6.1: Technische Daten High Double SMD-LED[57]

A4 - Technische Zusammenhänge

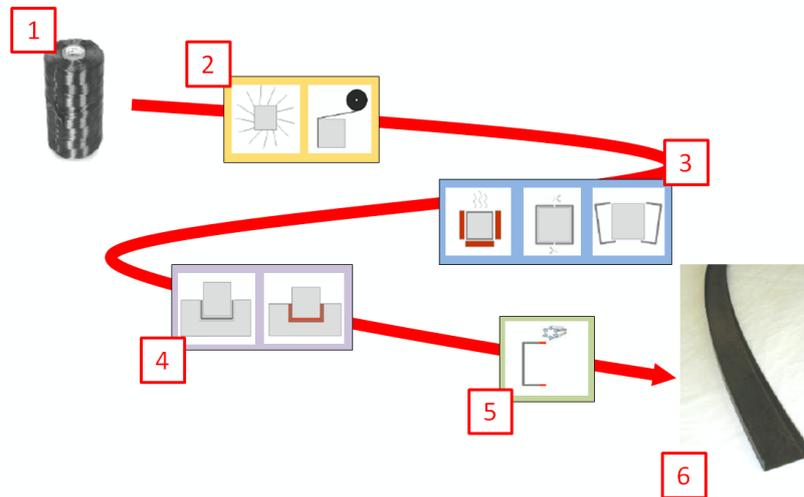


Abb. 6.4: Prozesskette der FVW-Spantherstellung[23, vgl. S.10]

Die in *Abbildung 2.9* dargestellte halbautomatische Spant-Preform-Fertigungslinie stellt einen Teilprozess dar. Die *Abbildung 6.4* zeigt schematisch den Gesamtprozess der Spantherstellung aus FVW:

1. C-Fasermaterial wird auf kleinere, für die Flechtmaschine geeignetere Spulen umgespult
2. Preform wird mittels Spant-Fertigungslinie hergestellt, vgl. *Kapitel 2.3*.
3. Hergestellter Preform wird unter Vakuum erwärmt, der thermoplastische Binder auf dem C-Fasermaterial schmilzt und die jeweiligen Kontaktstellen verbinden sich fest bei Abkühlung. Dadurch werden die Einzellagen des Preforms zueinander stabilisiert. Es folgt die Trennung des Preforms in zwei C-Profile und ggf. die Entnahme vom Flechtkern.
4. Durchtränkung des Preforms mit Matrixharz, bspw. mittels Resin-Transfer-Moulding-Verfahren.
5. Besäumung des FVW, bspw. mittels konventionellen Bearbeitungsverfahren.
6. Abbildung: Spant-Demonstrator als C-Profil

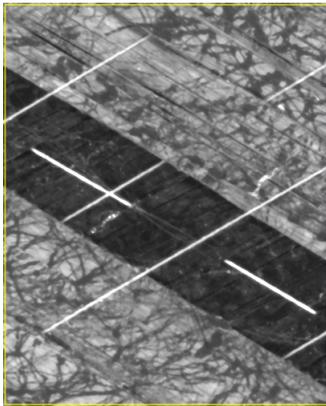
B1 - Software Zusammenhänge

Abb. 6.5: Smooth

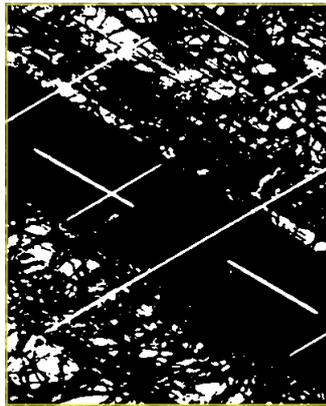


Abb. 6.6: Threshold

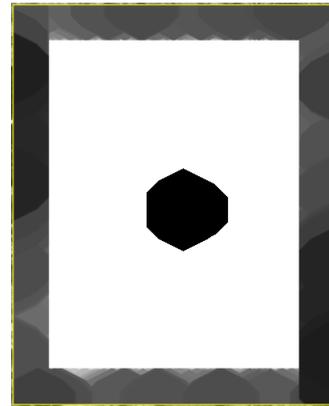


Abb. 6.7: Schließen

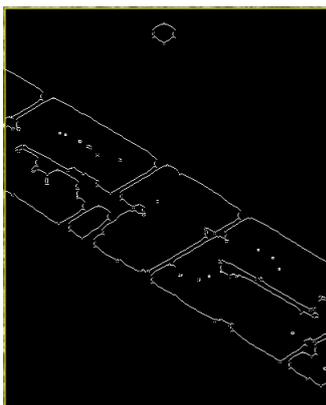


Abb. 6.8: Kontur

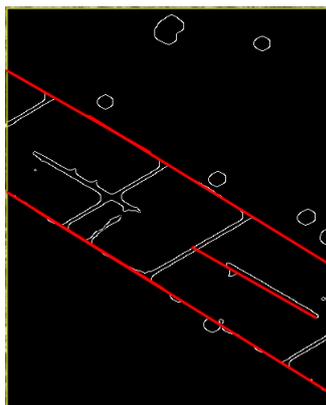


Abb. 6.9: Linie

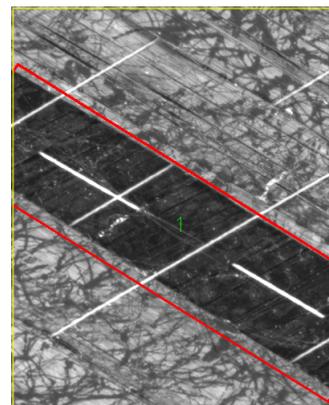


Abb. 6.10: Rechteck

Die *Abbildungen 6.5 bis 6.10* beziehen sich auf den in *Kapitel 3.2.5* vorgestellten Gap-Algorithmus und sollen zur Verdeutlichung die Ergebnisse bei verschiedenen Parametrisierungen darstellen. Für diese Beispiele ist anzumerken, dass es sich hierbei um nicht optimale Parametereinstellungen handelt. Es soll lediglich die Sensitivität und Komplexität einer sinnvollen Bildauswertung aufgezeigt werden.

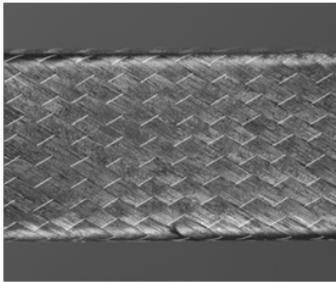
B2 - Software Zusammenhänge

Abb. 6.11: Bild A

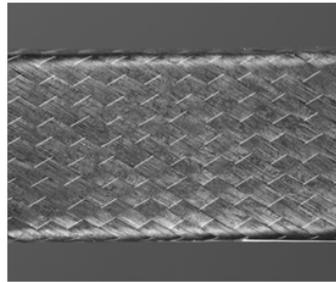


Abb. 6.12: Bild B

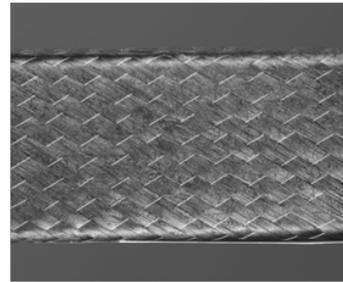
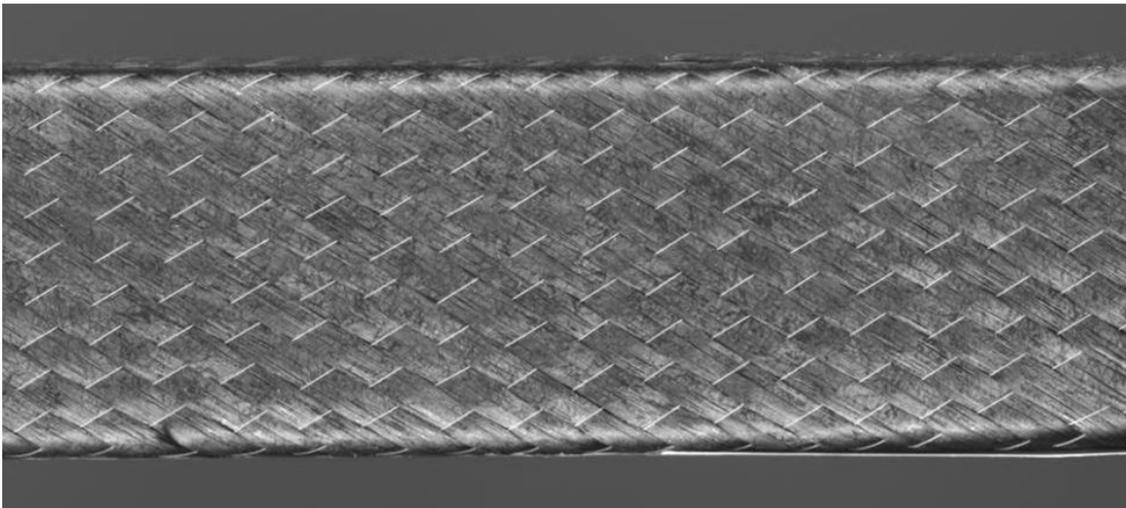


Abb. 6.13: Bild C

Abb. 6.14: Mapping der Bilder $A + B + C$

Die *Abbildungen 6.11 bis 6.13* zeigen seitliche Einzelaufnahmen des Spant-Preforms auf. Mittels Mapping-Algorithmus wurden die Bilder in *Abbildung 6.14* zusammengesetzt. Dies ermöglicht die Gesamtdarstellung einer kompletten Seite des Preforms. Eine gesamtheitliche Einzelauswertung des Bildes wäre ebenfalls möglich, erfordert aber - je nach Größe des Bildes - entsprechende Verarbeitungszeit.

B3 - Software Zusammenhänge



Abb. 6.15: Gemapptes Bild für Drapieranalyse

Die *Abbildung 6.15* zeigt eine textile Gelegelage auf, die über ein Vorrichtungswerkzeug drapiert wurde. Die Aufnahme besteht aus ca. 80 Einzelaufnahmen, die zu einem Gesamtbild zusammengesetzt wurden.

Eine Analyse der Faserverläufe ist nun mit hohem Detaillierungsgrad möglich.

C1 - Versuchstechnische Zusammenhänge

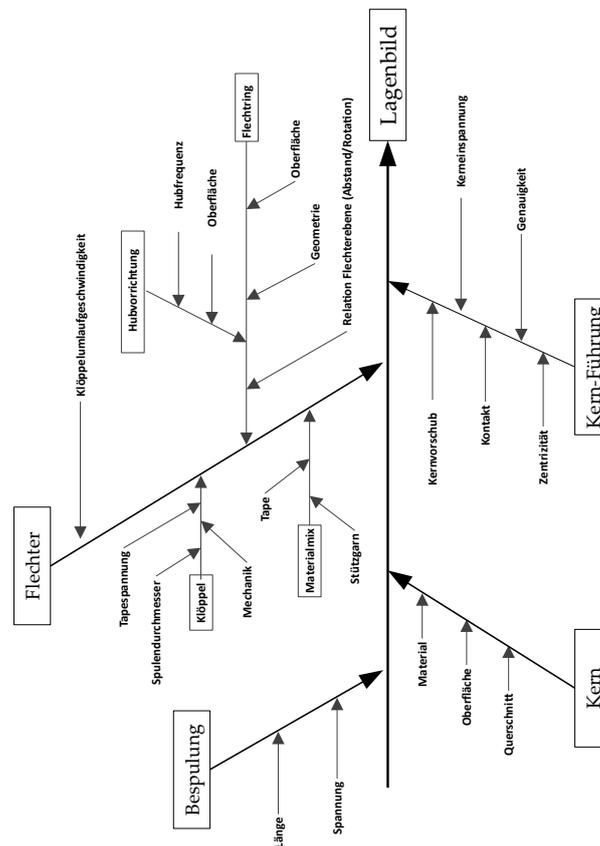


Abb. 6.16: Ursache-Wirkungsdiagramm: Einflussfaktoren UD-Flechten

Die *Abbildung 6.16* zeigt Einflussfaktoren des untersuchten UD-Flechtverfahrens auf. Diese Aufstellung berücksichtigt eine Vielzahl von Einflussparametern. Allerdings wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit des Diagramms Parameter mit vernachlässigbarem Einfluss nicht aufgeführt, bspw. die Kernlänge oder geringe Verunreinigungen. Parameter die unveränderbar sind, wie bspw. die Flechtmaschinenengröße oder Einflüsse infolge Gravitation, wurden ebenfalls nicht berücksichtigt.

C2 - Versuchstechnische Zusammenhänge

Nr.	Mess ₁	Mess ₂	\bar{x}_i	\bar{x}	$\bar{x}_i - \bar{x}$	$(\bar{x}_i - \bar{x})^2$
1	20,02°	20,04°	20,03°	20,37°	-0,35°	0,12
2	20,93°	20,89°	20,91°	20,37°	0,54°	0,29
3	20,04°	20,90°	20,47°	20,37°	0,10°	0,01
4	20,03°	20,94°	20,48°	20,37°	0,11°	0,01
5	20,05°	20,96°	20,51°	20,37°	0,13°	0,02
6	19,84°	20,96°	20,40°	20,37°	0,02°	0,00
7	20,05°	20,94°	20,49°	20,37°	0,12°	0,01
8	18,99°	20,11°	19,55°	20,37°	-0,83°	0,69
9	19,01°	20,93°	19,97°	20,37°	-0,41°	0,16
10	19,98°	20,95°	20,47°	20,37°	0,09°	0,01
11	19,03°	20,95°	19,99°	20,37°	-0,39°	0,15
12	20,02°	20,95°	20,48°	20,37°	0,11°	0,01
13	20,94°	20,88°	20,91°	20,37°	0,54°	0,29
14	19,02°	20,92°	19,97°	20,37°	-0,41°	0,17
15	21,00°	20,99°	21,00°	20,37°	0,62°	0,39
		\bar{x}	20,37		σ_{Mess}	0,39°

Tab. 6.2: Berechnung der Messunsicherheit σ_{Mess} des Flechtwinkels

Die *Tabelle 6.2* zeigt die Ergebnisse zweier Messreihen mit Sollwinkel 20° zur Bestimmung der Messunsicherheit σ_{Mess} . Wird σ_{Mess} in der *Gleichung 6.2* verwendet, kann der Versuchsumfang N der experimentellen Untersuchung bestimmt werden.

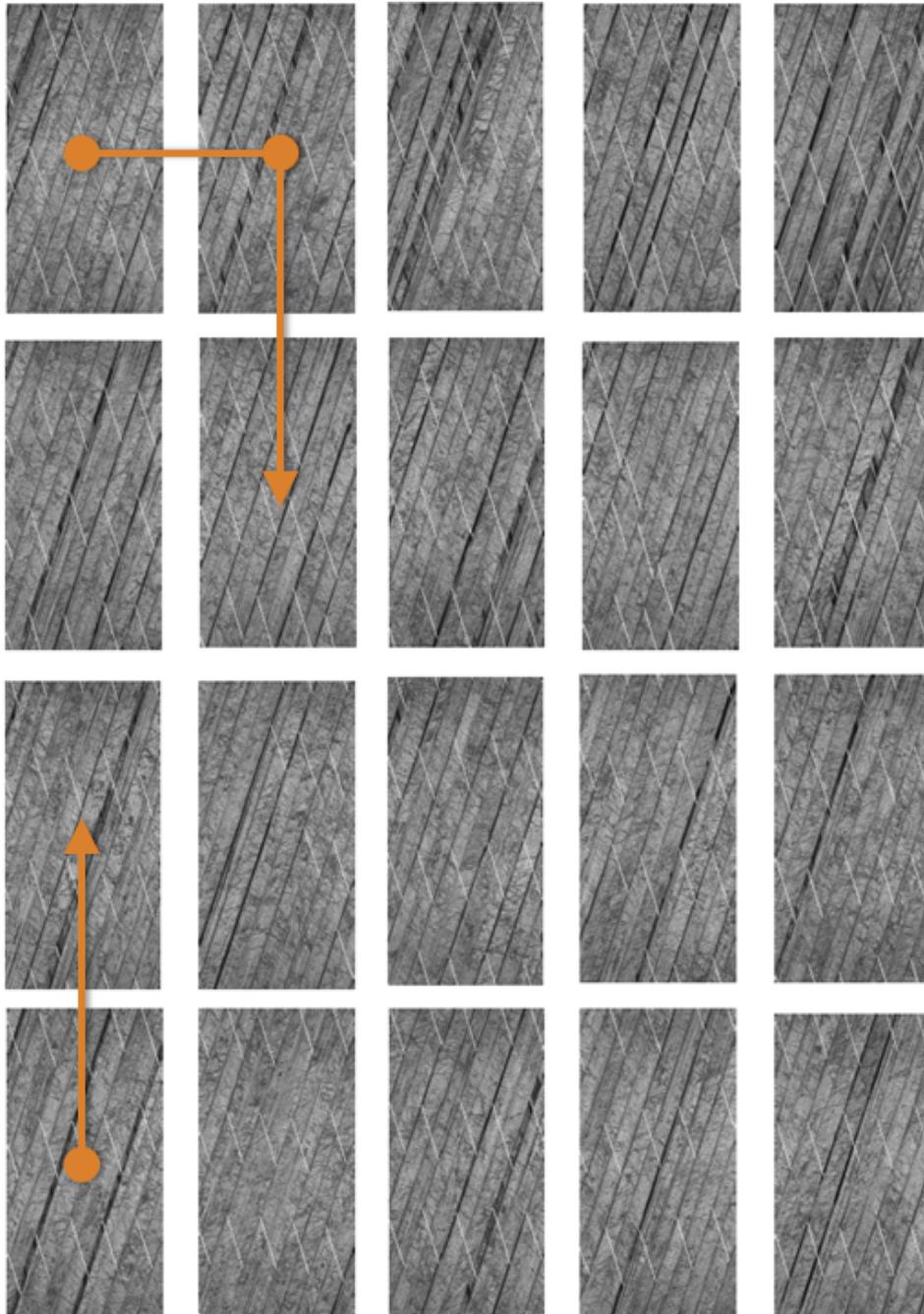
C3 - Versuchstechnische Zusammenhänge

Abb. 6.17: Ergebnisdarstellung der Messbilder aus Versuch Nr. 5

C4 - Versuchstechnische Zusammenhänge

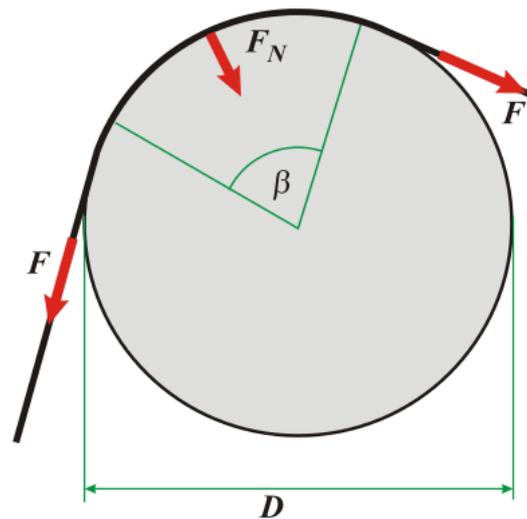


Abb. 6.18: Kräfteverhältnis am Umlenkring 1

Unter Verwendung der *Gleichung 6.20* werden die Normalkräfte F_N am Umlenkring 1 berechnet. Zur Veranschaulichung dient die Darstellung in *Abbildung 6.18*.

Fall	Versuch 1-4	5-8	9-12	13-16	β	F
0,25m	2,4N	-	-	-	35°	4N
0,1m	-	4,3N	-	-	65°	
0,25m	-	-	4,8N	-	35°	8N
0,1m	-	-	-	8,6N	65°	

Tab. 6.3: Zusammenfassung Rovingnormalkräfte am Umlenkring 1

C5 - Gap-Ergebnis Zusammenhänge

Versuch 9					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	389,9	Rechts	1	340,2
	2	416,2		2	336,6
	3	359,1		3	373,5
	4	442,0		4	320,2
	5	356,3		5	295,9
	μ_L	388,7		μ_R	339,3

Versuch 10					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	358,7	Rechts	1	277,2
	2	357,0		2	328,8
	3	302,2		3	302,6
	4	381,2		4	181,9
	5	272,6		5	478,3
	μ_L	334,3		μ_R	313,8

Versuch 11					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	277,7	Rechts	1	221,5
	2	303,9		2	233,3
	3	278,9		3	252,9
	4	268,2		4	221,7
	5	270,6		5	191,7
	μ_L	279,8		μ_R	224,2

Versuch 12					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	237,5	Rechts	1	195,4
	2	206,9		2	214,0
	3	186,3		3	187,6
	4	193,6		4	205,9
	5	219,4		5	219,4
	μ_L	208,7		μ_R	204,5

Tab. 6.4: Versuche 9 bis 12

C6 - Gap-Ergebnis Zusammenhänge

Versuch 13					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	471,5	Rechts	1	319,5
	2	413,1		2	403,2
	3	403,2		3	375,7
	4	375,4		4	380,3
	5	408,4		5	405,9
	μ_L	414,3		μ_R	392,1

Versuch 14					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	463,7	Rechts	1	345,3
	2	385,3		2	563,7
	3	460,9		3	289,3
	4	364,6		4	407,9
	5	483,3		5	307,0
	μ_L	431,5		μ_R	382,6

Versuch 15					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	451,4	Rechts	1	335,3
	2	519,5		2	438,8
	3	518,1		3	407,7
	4	433,7		4	426,9
	5	533,7		5	375,7
	μ_L	495,3		μ_R	396,9

Versuch 16					
	Reihe	Gapfläche		Reihe	Gapfläche
Links	1	96,3	Rechts	1	144,2
	2	410,7		2	333,5
	3	255,3		3	307,8
	4	299,7		4	199,6
	5	368,0		5	300,3
	μ_L	285,9		μ_R	257,1

Tab. 6.5: Versuche 13 bis 16

C7 - Winkel Zusammenhänge

Versuch 1			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	20,50°	μ_R	19,02°
Varianz	0,18	Varianz	0,00
Differenz	-0,56°	Differenz	0,98°
Abweichung 1,53°			

Versuch 2			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	19,87°	μ_R	18,68°
Varianz	0,051	Varianz	0,322
Differenz	0,13°	Differenz	1,32°
Abweichung 1,18°			

Versuch 3			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	20,19°	μ_R	19,31°
Varianz	0,44	Varianz	0,34
Differenz	-0,19	Differenz	0,69°
Abweichung 0,88°			

Versuch 4			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	18,81°	μ_R	18,95°
Varianz	0,09	Varianz	0,01
Differenz	1,19	Differenz	1,05°
Abweichung -0,14°			

Tab. 6.6: Versuche 1 bis 4

C8 - Winkel Zusammenhänge

Versuch 5			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	21,05°	μ_R	18,96°
Varianz	0,36	Varianz	0,01
Differenz	-1,05°	Differenz	1,04°
Abweichung 2,09°			

Versuch 6			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	19,12°	μ_R	18,00°
Varianz	0,088	Varianz	0,01
Differenz	0,89°	Differenz	2,00°
Abweichung 1,12°			

Versuch 7			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	20,14°	μ_R	19,01°
Varianz	0,09	Varianz	0,01
Differenz	-0,14	Differenz	0,99°
Abweichung 1,13°			

Versuch 8			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	18,85°	μ_R	17,75°
Varianz	0,11	Varianz	0,13
Differenz	1,15	Differenz	2,25°
Abweichung 1,1°			

Tab. 6.7: Versuche 5 bis 8

C9 - Winkel Zusammenhänge

Versuch 9			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	20,03°	μ_R	19,14°
Varianz	0,01	Varianz	0,28
Differenz	-0,03°	Differenz	0,86°
Abweichung 0,89°			

Versuch 10			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	18,99°	μ_R	17,90°
Varianz	0,01	Varianz	0,05
Differenz	1,00°	Differenz	2,10°
Abweichung 1,09°			

Versuch 11			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	20,02°	μ_R	19,13°
Varianz	0,01	Varianz	0,18
Differenz	-0,02	Differenz	0,09°
Abweichung 0,89°			

Versuch 12			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	18,50°	μ_R	18,09°
Varianz	0,19	Varianz	0,06
Differenz	1,50	Differenz	1,91°
Abweichung 0,41°			

Tab. 6.8: Versuche 9 bis 12

C10 - Winkel Zusammenhänge

Versuch 13			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	20,30°	μ_R	18,97°
Varianz	0,17	Varianz	0,01
Differenz	-0,30°	Differenz	1,03°
Abweichung 1,34°			

Versuch 14			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	18,97°	μ_R	17,96°
Varianz	0,01	Varianz	0,01
Differenz	1,03°	Differenz	2,04°
Abweichung 1,01°			

Versuch 15			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	20,21°	μ_R	19,08°
Varianz	0,142	Varianz	0,05
Differenz	-0,21	Differenz	0,92°
Abweichung 1,13°			

Versuch 16			
Sollwinkel=20°			
Links	Winkel	Rechts	Winkel
μ_L	18,98°	μ_R	18,12°
Varianz	0,01	Varianz	0,12
Differenz	1,02	Differenz	1,88°
Abweichung 0,86°			

Tab. 6.9: Versuche 13 bis 16

D1 - Mathematische Zusammenhänge

- Faktorstufenkombinationen, mit $k = \text{Einflussfaktor}$ [40, S.107]

$$m = 2^k \quad (6.1)$$

- Versuchsumfang, mit $n = \text{Kombinationen}$ [40, S.114]

$$N = n \cdot m = 60 \cdot \left(\frac{\sigma}{\Delta\mu} \right)^2 \quad (6.2)$$

- Standardabweichung für die Messunsicherheit[40, S.71]

$$\sigma_{\text{Mess}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (6.3)$$

- Einzeleffekt- und Wechselwirkungsbestimmung[39, S.195]

$$E_{\text{Faktor}} = \frac{2}{n} \cdot \left(\sum y_+ - \sum y_- \right) \quad (6.4)$$

- Normierung[39, S.203]

$$\text{Normierung nach } x = \frac{E - \frac{E_{\text{oben}} + E_{\text{unten}}}{2}}{\frac{E_{\text{oben}} - E_{\text{unten}}}{2}} \quad (6.5)$$

- Re-Normierung[39, S.203]

$$\text{Re-Normierung nach } E = \frac{E_{\text{oben}} + E_{\text{unten}}}{2} + \frac{E_{\text{oben}} - E_{\text{unten}}}{2} \cdot x \quad (6.6)$$

- Mittlere Faktorwirkung[39, S.26]

$$\bar{y}_{1\pm} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m y_{1\pm,i} \quad (6.7)$$

- Quadratische Mittelwertabweichung[39, S.187]

$$SQ_m \equiv CF = \frac{(\sum y_i)^2}{n} \quad (6.8)$$

- Fehlerquadratsumme aller Abweichungen[39, S.187]

$$SQ_{\text{Gesamt}} \equiv \sum y_i^2 - CF \quad (6.9)$$

- Quadratsummen der Abweichungen aller Faktoren[39, S.187]

$$SQ_{\text{Faktoren}} = \left[\frac{(\sum y_{A_i})^2}{n_{A_i}} + \frac{(\sum y_{A_{i+1}})^2}{n_{A_{i+1}}} + \dots \right] - CF \quad (6.10)$$

- Fehlerquadratsumme aller Faktoren[39, S.259]

$$SQ_{A,B,\dots} = SQ_A + SQ_B + \dots \quad (6.11)$$

- Wiederholbarkeitsfehler[39, S.259]

$$SQ_e = SQ_{\text{Gesamt}} - SQ_{A,B,\dots} \quad (6.12)$$

- Freiheitsgrad[39, S.259]

$$f_e = f_{\text{Gesamt}} - f_{\text{Faktor}} \quad (6.13)$$

- Fehlervarianz[39, S.259]

$$V_e = \frac{SQ_e}{f_e} \quad (6.14)$$

- Schätzvarianz[39, S.259]

$$V_i = \frac{SQ_i}{f_i} \quad (6.15)$$

- F-Wert[39, S.259]

$$F_i = \frac{V_i}{V_e} \quad (6.16)$$

- Bereinigte Fehlerquadratsumme[39, S.259]

$$SQ_i' = SQ_i - f_i \cdot V_e \quad (6.17)$$

- Faktoranteil[39, S.259]

$$p_i' = \frac{SQ_i'}{SQ_{\text{Gesamt}}} \cdot 100 \quad (6.18)$$

- Freiheitsgrad[40, S.74]

$$f = n - 1 \quad (6.19)$$

- Normalkraft am Roving

$$F_N = 2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (6.20)$$

- Residuum[39, S.205]

$$d_i = y_i - \hat{y}_i \quad (6.21)$$

- Bestimmtheitsmaß[39, S.205]

$$B_m = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6.22)$$

Abbildungsverzeichnis

2.1	Seitenansicht A350-900 mit Rumpf-Sektionen	5
2.2	Rumpfsektion in Halb-Schalenbauweise mit Spanten	8
2.3	Unterschiedliche Querschnitte von Spantprofilen	9
2.4	Halb-Schalenbauweise aus FVW der Boeing 787 mit Spanten	10
2.5	Fasern mit flüssigem Harz	11
2.6	Multidirektionales Laminat	11
2.7	Umformmaschine ASFM	14
2.8	Autoklave	14
2.9	Zeichnung halbautomatische Preform-Fertigungslinie	16
2.10	Flechtmaschine und Roboter	19
2.11	Darstellung Klöppel und sinusförmige Gangbahnen	20
2.12	Herstellung des Rundgeflechts	21
2.13	Biax-Geflecht mit Flechtwinkeln	22
2.14	UD-Geflecht mit einer Stützfaden- und C-Faserrichtung	23
2.15	Umlenkring 1, Umlenkring 2 und Flechtunkt	25
2.16	Geflochtener JASSM-Flugkörper	27
2.17	Stützfadenriss	28
2.18	Taperiss	28
2.19	Binderanteil zu hoch	29
2.20	Binderanteil zu niedrig	29
2.21	Fremdkörper	29
2.22	Verunreinigungen	29
2.23	Ungleiche Flechtwinkel	30
2.24	S-Schlag exemplarisch	30
2.25	Stauchung Tape	31

2.26	Verdrehung Tape	31
2.27	Schmale Gaps	31
2.28	Breite Gaps	31
2.29	Qualitätsmanagement-Kreislauf	33
2.30	Beleuchtungsart Lichtdome	39
2.31	Helligkeitsverteilung schematisch und im realen Bild	40
2.32	Weitere Diffusbeleuchtungen: Koaxial- und Flatdome	41
2.33	Vergleich Standard- und telezentrisches Objektiv	42
2.34	Sensorkopf iSAM System	46
2.35	Sensorkopf am UD-Flechter montiert	47
2.36	Visualisierungshilfe des UD-Flechtwinkels	48
2.37	Clientprogramm für die Darstellung am Bildschirm	48
2.38	Sensor-Fusion-Prüfkopf FALCON	49
2.39	Geometrieprüfung eines Textils	50
2.40	Profactor Qualitätssensor mit Richtungsbeleuchtung	51
2.41	Faserwinkelbewertungen für verschiedene Lagen	52
2.42	Systemgrößen und Systemwirkung	54
2.43	Ursache-Wirkungsdiagramm nach Ishikawa	60
3.1	Darstellung der konzeptionellen Idee des QS-Systems	79
3.2	Koaxial-Test 1	86
3.3	Koaxial-Test 2	86
3.4	Test 1: Flat-Dome	86
3.5	Auswertung Test 1	86
3.6	Test 2: Flat-Dome	89
3.7	Auswertung Test 2	89
3.8	Vergleich direkte/indirekte Beleuchtung	92
3.9	LED-Leiste	93
3.10	LED-Leiste mit Diffusor	93
3.11	Ausleuchtung: schlecht	94
3.12	Ausleuchtung: gut	94
3.13	Aufbau: Bestimmung der Beleuchtungsstärke	95

3.14	Beleuchtungseinheit mit Leuchtmittelplatte und Diffusor	97
3.15	Relative Sensitivitäten	98
3.16	LED Diffus	99
3.17	LED 60°	99
3.18	LED 0°	99
3.19	LED Diffus-gerichtet	99
3.20	Systemarchitektur von QuIS	102
3.21	Offline-Bildauswertung im Menüpunkt <i>Auswerten</i>	104
3.22	Online-Bildauswertung im Menüpunkt <i>Analyse</i>	105
3.23	Diffusbild	107
3.24	Diffusbild-gerichtet	107
3.25	Gap-Auswertung I	107
3.26	Gap-Auswertung II	107
3.27	Original	109
3.28	”Blurring”	109
3.29	Schwellwert	109
3.30	Schließen	110
3.31	Kanten	110
3.32	Linien	110
3.33	Kontur	111
3.34	Rechteck I	111
3.35	Rechteck II	111
3.36	Gesamtdarstellung: Optisches Qualitätssicherungssystem QuIS . . .	113
3.37	Winkel-Auswertung	114
3.38	Gap-Auswertung (neu)	115
3.39	Geflechtwinkel	117
3.40	Wicklerwinkel	117
3.41	Rovingverläufe	117
3.42	Glasfaserverläufe	117
3.43	Implementierung von QuIS an die Spant-Preform-Fertigungslinie . .	118
3.44	Geflechtprüfung	119

3.45	Drapieruntersuchung	119
4.1	Ursache-Wirkungsdiagramm UD-Flechten	122
4.2	Querlage	129
4.3	Zentrität	129
4.4	Längslage	129
4.5	Abstände	129
4.6	Ebenen	129
4.7	Messbereiche	129
4.8	Fertigungsdiagramm Kernvorschub vs. Gapfläche	139
4.9	Ergebnisdarstellung der Messbilder aus Versuch Nr. 8	142
4.10	Ergebnisdarstellung der Messbilder aus Versuch Nr. 13	144
5.1	Qualitätssicherungssystem QuIS	152
6.1	Aufbau des Flat-Domes	153
6.2	CAD-Modell der Beleuchtungseinheit QuIS	154
6.3	LED-Streifen High Double 24V/DC	155
6.4	Prozesskette der FVW-Spantherstellung	156
6.5	Smooth	157
6.6	Threshold	157
6.7	Schließen	157
6.8	Kontur	157
6.9	Linie	157
6.10	Rechteck	157
6.11	Bild A	158
6.12	Bild B	158
6.13	Bild C	158
6.14	Mapping der Bilder $A + B + C$	158
6.15	Gemapptes Bild für Drapieranalyse	159
6.16	Ursache-Wirkungsdiagramm: Einflussfaktoren UD-Flechten	160
6.17	Ergebnisdarstellung der Messbilder aus Versuch Nr. 5	162
6.18	Kräfteverhältnis am Umlenkring 1	163

Tabellenverzeichnis

2.1	Vor- und Nachteile von Metallen zu FVW	12
2.2	Lagenaufbau des Spant-Demonstrators	17
2.3	Zusammenstellung der technischen Daten der QS-Systeme	53
3.1	Anforderungen: Erfassungsauflösung Hard-/Software QS-System . .	67
3.2	Anforderungen: Software-Konfiguration QS-System	69
3.3	Anforderungen: Geometrische Bedingungen QS-System	72
3.4	Anforderungen: Erweiterbarkeit des QS-Systems	74
3.5	Ausgewählte Kriterien und Methodenbewertung der QS-Systeme . .	78
3.6	Vergleich der Ultraschall- und Lasertechnik	84
3.7	Kriterien und Methodenbewertung der Beleuchtungssysteme	90
3.8	Wertetabelle Winkel	114
3.9	Wertetabelle Gap	115
4.1	Zusammenfassung der Stufenwerte der vier Einflussfaktoren	123
4.2	Faktorkombinationen vollständiger Versuchsplan	125
4.3	Versuchsergebnisse 1 bis 4	131
4.4	Versuchsergebnisse 5 bis 8	132
4.5	Zusammenfassung Effekte der Versuche 1-8	133
4.6	Zusammenfassung der F-Werte der Versuche 1-8	133
4.7	Zusammenfassung Effekte der Versuche 9-16	134
4.8	Zusammenfassung der F-Werte der Versuche 9-16	134
4.9	Zusammenfassung Effekte der Versuche 1-4	135
4.10	Zusammenfassung der F-Werte der Versuche 1-4	135
4.11	Zusammenfassung Effekte der Versuche 1-16	136
4.12	Zusammenfassung der F-Werte der Versuche 1-16	136
6.1	Technische Daten High Double SMD-LED	155

6.2	Berechnung der Messunsicherheit σ_{Mess} des Flechtwinkels	161
6.3	Zusammenfassung Rovingnormalkräfte am Umlenkring 1	163
6.4	Versuche 9 bis 12	164
6.5	Versuche 13 bis 16	165
6.6	Versuche 1 bis 4	166
6.7	Versuche 5 bis 8	167
6.8	Versuche 9 bis 12	168
6.9	Versuche 13 bis 16	169

Literaturverzeichnis

- [1] ACHTERBOSCH, M.: Analyse der Umweltauswirkungen bei der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von CFK- bzw. Aluminiumrumpfkompone-
nten. (2003)
- [2] AVK: *Handbuch Faserverbundkunststoffe*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010
- [3] AZAD, Pedram: *Computer Vision*. Elektor Verlag, 2009
- [4] BAUER, Norbert: *Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung*. Fraunhofer
Allianz Vision, 2007
- [5] BEAUMONT, Matthew: Vision der Luftfahrtindustrie für CFK. In: *Bayern
Innovativ Cluster Treff Rosenheim* (Vortrag 2010)
- [6] BINGÖL, Nayim: Airbus Stress Test Ingenieur. (Mitschrift Juli 2010)
- [7] BIRKEFELD, Karin: Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter
Berücksichtigung von Fertigungsaspekten. (Dissertation 2013)
- [8] BLANK, Hans P.: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. Springer, 2003
- [9] BRANDT, Jürgen ; GESSLER, Andreas ; JÜRGEN, Filsinger: *New approaches
in textile and impregnation technologie for the cost effective manufactu-
ring of cfrp aerospace components*. Vortrag ICAS 2002 Congress, Abruf
19.03.2013 [http://www.researchgate.net/publication/228815910_New_](http://www.researchgate.net/publication/228815910_New_approaches_in_textile_and_impregnation_technologies_for_the_cost_effective_manufacturing_of_CFRP_aerospace_components)
[approaches_in_textile_and_impregnation_technologies_for_the_](http://www.researchgate.net/publication/228815910_New_approaches_in_textile_and_impregnation_technologies_for_the_cost_effective_manufacturing_of_CFRP_aerospace_components)
[cost_effective_manufacturing_of_CFRP_aerospace_components](http://www.researchgate.net/publication/228815910_New_approaches_in_textile_and_impregnation_technologies_for_the_cost_effective_manufacturing_of_CFRP_aerospace_components)
- [10] DAXEN, Nautic E.: Autoclave for composite materials. (Abruf 28.02.2013),
Februar. http://www.daxen.fr/en/en-1500x3000_200_20.html

-
- [11] DRECHSLER, Klaus: Textiltechnik und Flugzeugbau. In: *Jahrbuch Wechselwirkungen* (Abruf 22.02.2013). <http://www.uni-stuttgart.de/wechselwirkungen/ww2004/K.%20Drechsler.pdf>
- [12] DUFFE, André: Automatische Fehlerdetektion in der Faserverbundproduktion. In: *Fraunhofer Vision Allianz* (Abruf 09.05.2013). <http://www.vision.fraunhofer.de/de/presse/428.html>
- [13] EHRENSTEIN, Gottfried W.: *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*. 2. Auflage. Carl Hanser, 2006
- [14] EHRHARDT, Angelika: *Einführung in die Digitale Bildverarbeitung*. Teubner B.G. GmbH, 2008
- [15] EITZINGER, Christian: Profactor GmbH Qualitätssensor. In: *www.profactor.at* (Stand: 09.11.2010)
- [16] ENGMANN, Klaus: *Technologie des Flugzeuges*. Leuchtturm Verlag, 2000
- [17] ERMANNI, Paolo: Composite Technologien. (Vorlesung 2004)
- [18] ETZKORN, Achim: Qualitätsmanagement. (Vorlesung 2009), S. 27–29
- [19] FLEMMING, Manfred ; ZIEGMANN, Gerhard ; ROTH, Siegfried: *Faserverbundbauweisen, Halbzeuge und Bauweisen*. Springer Verlag, 1996
- [20] FUNKE, Herbert: Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in FV-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges. (Dissertation 2001)
- [21] FÜRTJES, Tobias ; SCHMIDT, Robert (Hrsg.): *FVK Sensor Defect Defender*. Bd. Im Blickpunkt. Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Abruf 09.05.2013. – S. 25. http://institut-wv.de/fileadmin/iwv_files/pdf/076-044_25Jahre_Fertigung2.pdf
- [22] GESSLER, Andreas: Flechtmaschine. In: *DE10115953 A1* (Patent 2002). <https://www.google.com/patents/DE10115953A1?cl=de>
- [23] GESSLER, Andreas: A Composite Process Innovation: Automated Preform Production Line for CFRP Aircraft Frames. In: *JEC Forum* (Vortrag 2010)

- [24] GESSLER, Andreas: Textile Technologies and Preform Manufacturing for Advanced Composites. In: *SAMPE Swiss* (Vortrag 2011)
- [25] GESSLER, Andreas ; MAIDL, Franz: Verfahren zum Herstellen von Faserverbund-Halbzeugen mittels Rundflechttechnik. In: *DE102004017311 A1, EP1738005 A1* (Patente 2004, 2007). <http://www.google.com/patents/DE102004017311A1?hl=de&cl=de>
- [26] GIETL, Gerhard ; LOBINGER, Werner: *Leitfaden für Qualitätsauditoren: Planung und Durchführung von Audits nach ISO 9001:2008*. Hanser Verlag, 2012
- [27] GRAINGER, Phil: GKN Aerospace develops manufacturing processes for complex composite structures. In: *GKN Media News* (Abruf 28.02.2013). <http://www.gkn.com/aerospace/media/news/>
- [28] GRAVE, Guido: Nichts ist leichter als ein geflochtenes Teil. In: *Industrie Anzeiger 2011* (Abruf 30.03.2014). <http://www.industrieanzeiger.de/home/-/article/32571342/35280108?returnToFullPageURL=back;>
- [29] GREIM, Sebastian: Erarbeitung einer Vorgehensweise zur Simulation von Flugzeugrumpfschalen. In: *Diplomarbeit 2006 HTWK* (Abruf 21.02.2013). <http://ft.carstenkloehn.de/Joomla/index.php/aktuelle-projekte/projekte-2006/86-projekte-2006/174-sebastian-greim-d06>
- [30] GRIFFITHS, Bob: Composite fan blade containment case. (Abruf 02.04.2014). <http://www.compositesworld.com/articles/composite-fan-blade-containment-case>
- [31] GROENENDIJK, Chris: High rate production process for thermoplastic fuselage frames. In: *SAMPE: NEW MATERIALS AND PROCESSES FOR A NEW ECONOMY* (Vortrag 2010)
- [32] GÖTZ, Konrad: Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde - eine lokale Approximation. In: *Forschungszentrum Karlsruhe: Wissenschaftliche Berichte* (2000)
- [33] HERMANN, Jörg: Messe Stuttgart GmbH: Neue Schnittstellen – schneller

- denn je. (Abruf 06.05.2013). http://www.maschinenmarkt.ch/automation_antriebe/automation_antriebs_steuerungstechnik/articles/336052/
- [34] HEUER, Henning: Bildgebende Wirbelstromprüfverfahren zur hochauflösenden Prüfung im Bereich Photovoltaik oder CFK. In: *Fraunhofer Vision Technologietag* (Vortrag 2011)
- [35] HEUMÜLLER, Marvin: QA system integration and evaluation for high volume frame and beam production. (Berichtsbeitrag IMAC-PRO 2010)
- [36] HINDERSMANN, Arne: Forschungsplattform für endkonturnahe Faserverbundbauteile im automatisierten Fertigungsprozess. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress* (Vortrag 2012)
- [37] HINSCH, Martin: *Industrielles Luftfahrtmanagement*. Springer Verlag, 2010
- [38] IAQG (Hrsg.): *DIN EN 9100 Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung*. Beuth Verlag, 2010
- [39] KLEIN, Bernd: *Versuchsplanung DoE*. Oldenburg Verlag, 2011
- [40] KLEPPMANN, Wilhelm: *Versuchsplanung: Produkte und Prozess optimieren*. Hanser Verlag, 2011
- [41] KOSSE, Philipp: FVK Sensor Defect Defender WZL-Prüfstandsflyer. In: *Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen* (Abruf: 28.02.2013)
- [42] KOTZELSKI, Jürgen: Gespräch zum Thema LN9100. (Mitschrift 2011)
- [43] KRAUS, Josef: Prefoming großer Stückzahlen wird wirtschaftlicher. In: *Maschinenmarkt* (Abruf 28.03.2014). http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/produktion/kunststoffverarbeitung_gummiverarbeitung/articles/394311/
- [44] KRUESI, August H. ; HASKO, Gregory H.: Computer controlled resin impregnation for composite braiding. (1987)
- [45] LILISCHKIS, Peter: Final Report Summary - IMAC-PRO (Industrialization of manufacturing technologies for composite profiles for aerospace applications).

- (Abruf 05.04.2014), September. http://cordis.europa.eu/result/report/rcn/58517_de.html
- [46] MAHLER, Guido: Anwendung der Wärmefluss-Thermographie. In: *Fraunhofer Vision Technologietag* (Vortrag 2011)
- [47] MASON, Karen: Autoclave Quality Outside The Autoclave? In: *Composites World* (Abruf 02.04.2014), March. <http://www.compositesworld.com/articles/autoclave-quality-outside-the-autoclave>
- [48] MIENE, Andrea: Genau in die Textur geschaut. In: *Kunststoffe* (Abruf 09.05.2013). <https://www.kunststoffe.de/kunststoffe-zeitschrift/archiv/artikel/prozessueberwachung-genau-in-die-textur-geschaut-540012.html>
- [49] MIRACLE, D.B. ; DONALDSON, S.L.: *ASM Handbook Composites*. Bd. 21. ASM International, 2001
- [50] NEUMANN, Ulf H.: Konzipierung und Entwicklung einer kontinuierlichen Vorrichtung zum Preformen geflochtener Kohlenstofffaserprofile. (Diplomarbeit 2012)
- [51] NIU, Michael Chun-Yung: *Airframe Structural Design: Practical Design Information and Data on Aircraft Structures*. Connilit Press, 1988
- [52] N.N.: Katalog - LFX Flat Dom. In: *CCS Inc.* (2008)
- [53] N.N.: Katalog - Stabile Erkennung Perfektioniert. In: *Keyence* (2011)
- [54] N.N.: Handbuch der Bildverarbeitung. In: *Stemmer Imaging* (2013)
- [55] N.N.: Hauptkatalog. In: *Edmund Optics* (2013)
- [56] N.N.: Hauptkatalog. In: *Opto-Engineering* (2013)
- [57] N.N.: Hauptkatalog. In: *Conrad* (2013)
- [58] N.N.: Affordable Inlet Duct for Jet Fighters Developed. In: *netcomposites* (Abruf 02.04.2014). <http://www.netcomposites.com/news/affordable-inlet-duct-for-jet-fighters-developed/3740>

- [59] N.N.: Composite Fuselage on Stealthy JASSM Missile Goes Operational. In: *PRNewswire* (Abruf 02.04.2014). <http://www.prnewswire.com/news-releases/>
- [60] N.N.: AGM-158 JASSM Cruise Missiles: FY 2011 Orders. In: *defenseindustrydaily* (Abruf 03.04.2014). <http://www.defenseindustrydaily.com/>
- [61] N.N.: Kameragestützte Justierhilfe. In: *Bi-Ber Bilderkennungssysteme* (Abruf 10.04.2013). www.bildererkennung.de/pdf/Bi-Ber_prod0407_Justierhilfe.pdf
- [62] N.N.: Continuous Composite Preforming System. In: *Broetje Media* (Abruf 19.03.2013). <http://www.broetje-automation.de/loesungen-und-kundennutzen/equipment/composite-manufacturing/continuous-preforming/>
- [63] N.N.: Duqueine: a new global Tier-1. In: *JEC Composite Magazine* No. 63 (Abruf 21.03.2013). <http://www.duqueine.fr/images/presse/JECMAG63.PDF>
- [64] N.N.: Sensordatenblatt ICX625ALA. In: *Sony* (Abruf 21.05.2013). http://www.1stvision.com/cameras/sensor_specs/ICX625.pdf
- [65] N.N.: Sony GigE Vision Kameras XCG. In: *Maxxvision* (Abruf 21.05.2013). <http://www.maxxvision.com/produkte/kameras/gige-vision-kameras/xcg-5005e.html>
- [66] N.N.: Bild Fuselage 787. (Abruf 26.02.2013). <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2b/787fuselage.jpg>
- [67] N.N.: Boeing 787 conducts fatigue testing. In: *Youtube* (Abruf 26.02.2013). <http://www.youtube.com/watch?v=TH9k9fWaFrs&list=PL115E9092CCF2053B>
- [68] N.N.: Fertigungstechnik und Leichtbau. In: *TU Dortmund - IUL* (Abruf 26.02.2013). <http://www.leichtbau.de/>

- [69] N.N.: Verbundwerkstoffe. In: *Huber+Suhrner* (Abruf 27.02.2013). <http://www.composites.ch/co-cfk/de/mozilla/hs-pol-composites-vw.htm>
- [70] N.N.: ATK Opens ACCE Facility Commercial Aircraft Orders. In: *ATK Media* (Abruf 28.02.2013). <http://www.atk.com/products-services/commercial-aircraft/>
- [71] N.N.: Datenblatt KR 150 R2700 extra (KR QUANTEC extra). In: *KUKA* (Abruf 29.04.2013). http://www.kuka-robotics.com/germany/de/products/industrial_robots/high/extra/kr150_r2700_extra/start.htm
- [72] ORTH, Andreas: Die Optimierung von Produkten und Prozessen. In: *Wirtschaft Nordhessen - IHK Magazin* (Abruf 09.05.2013), 40. http://www.ihk-kassel.de/solva_docs/methodenpass_doe.pdf
- [73] PICKETT, Anthony ; DRECHSLER, Klaus ; REDEN, Tjark von ; ERBER, Andreas: Comparison of analytical and finite element simulation of 2D braiding. In: *Plastics, Rubber and Composites* (Abruf 10.05.2013). http://www.researchgate.net/publication/233609638_Comparison_of_analytical_and_finite_element_simulation_of_2D_braiding
- [74] PIENING, Andreas: Optical QA - Web GUI. (Dokument 2013)
- [75] POE, C.C. j. ; DEXTER, H.B. ; RAJU, I.S.: Review of the NASA textile composite research. In: *Journal of Aircraft* 1997 (Abruf 19.03.2013). <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/2.2521?journalCode=ja>
- [76] PREMIUM-AEROTEC: Airbus A350 XWB Arbeitspakete. (Abruf 20.02.2013). <http://www.premium-aerotec.com/PM-A350-XWB.html#Section1505>
- [77] REDEN, Tjark von: Prozessgrenzen beim Flechten. In: *LCC Doktorandenkonferenz* (Vortrag 2012)
- [78] ROSENBAUM, Jens: Flechten: rationelle Fertigung faserverstärkter Kunststoffbauteile. In: *TÜV Rheinland* (Dissertation 1991)

- [79] RÖSER, Joachim: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Teubner B.G. GmbH, 2006
- [80] SCHEITL, J.P.: Leistungsfähige FVW-Anwendung in Hubschraubern und Flugzeugen. In: *Kooperationsforum FVK* (Abruf 26.02.2013). http://www.b2match.eu/composite2012/system/files/1_Pr%C3%A4sentation_Scheitle.pdf
- [81] SCHMITT, Robert: Qualitätsmanagement. In: *RWTH Aachen* (Vorlesung 2009)
- [82] SCHULSHENKO, M.: *Konstruktion von Flugzeugen*. Militärverlag DDR, 1976
- [83] SCHULT, Katja ; RETTIG, Carsten: Kohlenstofffasern: Wohin geht es mit den Faserkapazitäten, Produkten und Entwicklungstrends? In: *lightweight-design* (Abruf 28.02.2013), Januar. http://www.tohotenax-eu.com/uploads/media/2010-03_Kohlenstofffasern_lw.pdf
- [84] SCHÜRMAN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer Verlag, 2007
- [85] SIEBERZT, Karl: *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE) (VDI-Buch)*. Springer, 2010
- [86] THANNER, Petra: Qualitätssicherung von Carbonfaserteilen mittels Bildverarbeitung. In: *Dokument Profactor GmbH* (01.02.2012)
- [87] TÖPFER, Armin: *Six Sigma: Konzeption und Erfolgsbeispiele für praktizierte Null-Fehler-Qualität*. Springer, 2007
- [88] ULLMANN, T. ; AOKI, R. ; SCHMIDT, T.: Lock-in Thermography for Process Integrated Non-Destructive Evaluation of Carbon Fibre Reinforced Aircraft Structures. In: *10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography* (Vortrag 2010). qirt.gel.ulaval.ca/.../QIRT%202010-140.pdf
- [89] UNCKENBOLD, Wilm F.: Grundlagen der Faserverbundwerkstoffe. In: *Vorlesungsunterlage, PFH Göttingen* (2008)
- [90] WEISSBACH, Wolfgang: *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010

- [91] WÄLDER, Konrad ; WÄLDER, Olga ; BRUNNER, Franz J. (Hrsg.): *Statistische Methoden der Qualitätssicherung: Praktische Anwendung mit MINITAB und JMP*. Carl Hanser Verlag, 2013