Schlussbericht

der

3win Maschinenbau GmbH

Zum Vorhaben

GrafCarbon – Entwicklung eines plasmabasierten **Graf**tingprozesses für die Maximierung der Belastbarkeit von ultraleicht-**Carbon**faserverbundwerkstoffen mit unpolaren Matrixkunststoffen

FKZ 03LB2048B

Gefördert durch das

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

Vorhaben GrafCarbon

Verbundvorhaben:
GrafCarbon – Entwicklung eines plasmabasierten Graftingprozesses für die Maximierung der Belastbarkeit von ultraleicht-Carbonfaserverbundwerkstoffen mit unpolaren Matrixkunststoffen

Teilvorhaben:
Konstruktion der Faserführung

Förderkennzeichen:
03LB2048B

Projektträger:
Projektträger Jülich (PtJ)

Laufzeit des Vorhabens:
01.11.2022 – 31.10.2025

Berichtszeitraum:
01.11.2022 – 31.10.2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

I Kurzdarstellung

I.1 Einleitung

I.2 Aufgabenstellung

I.3 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

I.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen und Projektpartnern

II Eingehende Darstellung

II.1 Entwicklungskonzept der Faserführung

II.2 Erstellung des Anforderungskataloges

II.3 Konzeptstudie zur Plasmabehandlung

II.3.1 Entwicklung der Inertgaskammer

II.3.2 Entwicklung der Faserdurchführung

II.4 Entwicklung der Versuchskomponenten

II.4.1 Entwicklung der Modelldüse

II.4.2 Untersuchungen zur Gasdurchdringung des Rovings

II.5 Entwicklung des Faserführungsmoduls

II.5.1 Konstruktive Zielsetzung

II.5.2 Entwicklung der Umlenkrollen

II.5.3 Werkstoff- und Oberflächenuntersuchungen

II.5.4 Entwicklung der Spreizsysteme

II.5.5 Entwicklung der Luftführung

II.5.6 Entwicklung der Abschirmungen

II.5.7 Integration der Sensorik

II.5.8 Integration in die Plasmaanlage

II.5.9 Validierung der Versuchsanlage

II.5.10 Wissenschaftliche Bewertung

III Wissenschaftlich-technische Erkenntnisse

IV Zusammenfassung und Fazit

V Vergleich mit Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

VI Änderungen der Zielsetzung

VII Ergebnisse Dritter

VIII Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse

I.1 Einleitung

Die Entwicklung leistungsfähiger Carbonfaserverbundwerkstoffe erfordert eine möglichst effiziente Lastübertragung zwischen Faser und Matrix. Während Carbonfasern aufgrund ihrer hohen Festigkeit und Steifigkeit seit vielen Jahren in zahlreichen Leichtbauanwendungen eingesetzt werden, stellt insbesondere die Haftung zwischen Carbonfaser und unpolaren Matrixwerkstoffen weiterhin eine technologische Herausforderung dar. Eine gezielte Aktivierung der Faseroberfläche durch plasmabasierte Verfahren bietet die Möglichkeit, die Grenzflächenhaftung zu verbessern, ohne die mechanischen Eigenschaften der Fasern wesentlich zu beeinflussen.

Im Rahmen des Verbundvorhabens **GrafCarbon – Entwicklung eines plasmabasierten Graftingprozesses für die Maximierung der Belastbarkeit von ultraleicht-Carbonfaserverbundwerkstoffen mit unpolaren Matrixkunststoffen** wurde die Entwicklung eines Faserführungsmoduls als Teilvorhaben der 3win Maschinenbau GmbH durchgeführt. Ziel war die Konstruktion einer modular aufgebauten Faserführung, welche eine reproduzierbare Führung ungesizter Carbonfaserrovings innerhalb einer Plasmaanlage ermöglicht und gleichzeitig die Voraussetzungen für eine homogene Plasmabehandlung schafft.

Die Entwicklung der Anlage erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen. Während der Projektlaufzeit wurden unterschiedliche konstruktive Konzepte entwickelt, gefertigt und experimentell untersucht. Die Ergebnisse der Versuchsreihen flossen kontinuierlich in die Weiterentwicklung der einzelnen Baugruppen

ein. Hierdurch entstand ein iterativer Entwicklungsprozess, bei dem Konstruktion, Fertigung und experimentelle Validierung unmittelbar miteinander verknüpft wurden.

Neben der Entwicklung der eigentlichen Faserführung umfassten die Arbeiten die Konstruktion geeigneter Umlenkrollen, die Entwicklung unterschiedlicher Spreizmechanismen, die Optimierung der Luftführung sowie die Integration sämtlicher Baugruppen in eine bestehende Plasmaanlage. Ziel sämtlicher Arbeiten war die Entwicklung eines stabilen und reproduzierbaren Gesamtsystems, welches eine gleichmäßige Behandlung der Carbonfasern innerhalb des Plasmabereiches ermöglicht.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse leisten einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis des Zusammenwirkens von Faserführung, Faserspreizung und Plasmabehandlung. Gleichzeitig bilden sie die Grundlage für die Weiterentwicklung plasmabasierter Prozesse zur Oberflächenmodifizierung von Carbonfaserrovings und schaffen Voraussetzungen für eine spätere industrielle Umsetzung der entwickelten Technologie.

I.3 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Die Entwicklung innovativer Carbonfaserverbundwerkstoffe stellt hohe Anforderungen an sämtliche Prozessschritte entlang der Fertigungskette. Neben den mechanischen Eigenschaften der eingesetzten Carbonfasern besitzt insbesondere die Qualität der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix einen entscheidenden Einfluss auf die Belastbarkeit und Dauerfestigkeit des späteren Verbundwerkstoffs. Für Anwendungen mit unpolaren Matrixsystemen reicht die natürliche Oberflächenbeschaffenheit der Carbonfasern häufig nicht aus, um eine dauerhaft belastbare Anbindung an die Matrix sicherzustellen. Aus diesem Grund gewinnen Verfahren zur gezielten Oberflächenaktivierung zunehmend an Bedeutung.

Plasmabasierte Behandlungsverfahren ermöglichen eine gezielte Modifizierung der Faseroberfläche, ohne die mechanischen Eigenschaften der Carbonfasern wesentlich zu beeinflussen. Voraussetzung für eine gleichmäßige Aktivierung ist jedoch, dass sämtliche Filamente eines Carbonfaserrovings möglichst homogen vom Prozessplasma erfasst werden. Da Carbonfaserrovings aus mehreren tausend Einzelfilamenten bestehen, stellt insbesondere die gleichmäßige Durchdringung des Faserverbandes eine erhebliche technische Herausforderung dar.

Für die Durchführung des Vorhabens war deshalb die Entwicklung einer speziell angepassten Faserführung erforderlich. Diese musste nicht nur eine reproduzierbare Führung der Carbonfasern gewährleisten, sondern gleichzeitig eine definierte Faserspreizung ermöglichen, um eine möglichst gleichmäßige Plasmabehandlung aller Filamente sicherzustellen. Gleichzeitig mussten konstruktive Lösungen gefunden werden, welche die empfindlichen Carbonfasern möglichst schonend führen und mechanische Schädigungen vermeiden.

Die Entwicklung des Faserführungsmoduls erfolgte unter Berücksichtigung mehrerer Randbedingungen. Hierzu gehörten insbesondere die begrenzten Einbauräume innerhalb der

vorhandenen Plasmaanlage, die Integration bestehender Antriebskomponenten, die Anforderungen an eine modulare Versuchsanlage sowie die Möglichkeit, einzelne Baugruppen während des Projektverlaufs ohne grundlegende Änderungen der Gesamtanlage austauschen und weiterentwickeln zu können.

Aufgrund dieser Anforderungen wurde die Entwicklung von Beginn an als iterativer Prozess angelegt. Bereits in einer frühen Projektphase war vorgesehen, einzelne Baugruppen zunächst als Prototypen zu fertigen, unter realen Versuchsbedingungen zu untersuchen und die gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar in die weitere Konstruktion einfließen zu lassen. Dieser Entwicklungsansatz ermöglichte eine kontinuierliche Optimierung der Versuchsanlage und reduzierte gleichzeitig den Aufwand für spätere konstruktive Änderungen.

Die wissenschaftliche Bearbeitung des Vorhabens erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen. Während das ITA insbesondere die experimentellen Untersuchungen sowie die plasmatechnischen Fragestellungen bearbeitete, lag der Schwerpunkt der 3win Maschinenbau GmbH auf der konstruktiven Entwicklung, der Fertigung sowie der schrittweisen Optimierung der mechanischen Baugruppen. Der kontinuierliche Austausch zwischen beiden Projektpartnern ermöglichte eine direkte Rückkopplung zwischen experimentellen Ergebnissen und konstruktiver Weiterentwicklung und bildete damit eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Projektverlauf.

Die Kombination aus wissenschaftlicher Untersuchung, experimenteller Validierung und konstruktiver Entwicklung schuf die Grundlage für die erfolgreiche Realisierung des Faserführungsmoduls und stellte sicher, dass die entwickelten Lösungen unter praxisnahen Bedingungen bewertet und kontinuierlich verbessert werden konnten.

I.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Bearbeitung des Teilvorhabens erfolgte entsprechend der im Verbundprojekt definierten Arbeitspakete und war auf die Entwicklung einer funktionsfähigen Faserführung für die plasmabasierte Behandlung von Carbonfaserrovings ausgerichtet. Der Projektverlauf war durch eine enge Verzahnung konstruktiver Entwicklungsarbeiten mit experimentellen Untersuchungen gekennzeichnet. Neue Erkenntnisse aus den Versuchsreihen wurden kontinuierlich in die Konstruktion zurückgeführt und bildeten die Grundlage für die schrittweise Optimierung der Versuchsanlage.

Zu Beginn des Vorhabens stand die Definition der technischen Anforderungen an das zu entwickelnde Faserführungsmodul im Vordergrund. In mehreren Projekttreffen wurden die Anforderungen aus textiltechnischer, plasmatechnischer und konstruktiver Sicht zusammengeführt und in einem gemeinsamen Anforderungskatalog dokumentiert. Dieser definierte die grundlegenden Randbedingungen für sämtliche nachfolgenden Entwicklungsarbeiten und bildete die Basis der konstruktiven Auslegung.

Parallel hierzu wurden erste konzeptionelle Untersuchungen zur Plasmabehandlung durchgeführt. Aufgrund von Verzögerungen innerhalb der Projektplanung wurde gemeinsam

mit dem Institut für Textiltechnik beschlossen, die experimentellen Arbeiten zunächst mit einer Lichtbogen-Plasmaquelle aufzunehmen. Hierfür entwickelte die 3win Maschinenbau GmbH eine Inertgaskammer einschließlich geeigneter Komponenten zur Faserdurchführung und unterstützte deren Fertigung und Integration in den Versuchsaufbau.

Im weiteren Projektverlauf konzentrierten sich die Arbeiten auf die Entwicklung der mechanischen Versuchskomponenten. Hierzu gehörten insbesondere die Konstruktion verschiedener Düsengeometrien, die Entwicklung von Komponenten zur Gasführung sowie die Unterstützung experimenteller Untersuchungen zur Durchdringung des Carbonfaserrovings mit Prozessgas. Bereits diese Untersuchungen zeigten, dass eine ausreichende Beaufschlagung sämtlicher Filamente ohne zusätzliche Spreizung des Rovings nicht erreicht werden konnte. Diese Erkenntnis beeinflusste die weitere Entwicklung der Faserführung maßgeblich.

Den Schwerpunkt des Vorhabens bildete die Entwicklung des eigentlichen Faserführungsmoduls. In mehreren aufeinander aufbauenden Entwicklungsstufen wurden unterschiedliche Walzengeometrien, Luftführungskonzepte, Halterungen und Abschirmungen konstruiert, gefertigt und unter realen Prozessbedingungen untersucht. Sämtliche Baugruppen wurden wiederholt überarbeitet und an die Ergebnisse der Versuchsreihen angepasst. Hierdurch entstand ein iterativer Entwicklungsprozess, bei dem theoretische Konstruktionen kontinuierlich experimentell überprüft und konstruktiv optimiert wurden.

Mit zunehmendem Projektfortschritt verlagerte sich der Schwerpunkt auf die vollständige Integration der entwickelten Baugruppen in die Plasmaanlage. Hierfür wurden bestehende Komponenten erweitert, neue Halterungen entwickelt sowie Sensorik und Führungselemente an die gewachsenen Anforderungen angepasst. Parallel hierzu erfolgte die Optimierung der Luftführung sowie der Spreizmechanismen, um eine möglichst gleichmäßige Beaufschlagung des Carbonfaserrovings innerhalb des Plasmabereiches sicherzustellen.

Die abschließende Projektphase diente der experimentellen Validierung der entwickelten Versuchsanlage. Ziel war die Bewertung der Prozessstabilität sowie der Nachweis einer reproduzierbaren Faserführung unter praxisnahen Betriebsbedingungen. Die im Projekt erzielten Ergebnisse bestätigten die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des entwickelten Anlagenkonzeptes und bildeten die Grundlage für die abschließende wissenschaftliche Bewertung der Konstruktion.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen und Projektpartnern

Die Bearbeitung des Teilvorhabens erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen innerhalb des Verbundvorhabens GrafCarbon. Während die 3win Maschinenbau GmbH die konstruktive Entwicklung, Fertigung und kontinuierliche

Optimierung der mechanischen Baugruppen übernahm, konzentrierten sich die Arbeiten des ITA auf die experimentellen Untersuchungen sowie die wissenschaftliche Bewertung der Plasmabehandlung und der Faseraktivierung.

Der kontinuierliche fachliche Austausch zwischen beiden Projektpartnern stellte einen wesentlichen Bestandteil des Entwicklungsprozesses dar. Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen wurden regelmäßig gemeinsam ausgewertet und unmittelbar in neue konstruktive Lösungen überführt. Hierdurch konnte eine enge Verzahnung zwischen wissenschaftlicher Untersuchung und praktischer Anlagenentwicklung erreicht werden.

Im Projektverlauf fanden regelmäßig Projekttreffen statt, in denen sowohl der Fortschritt der einzelnen Arbeitspakete als auch neu gewonnene experimentelle Erkenntnisse diskutiert wurden. Auf Grundlage dieser Abstimmungen wurden konstruktive Änderungen priorisiert und die weitere Vorgehensweise gemeinsam festgelegt. Dieser iterative Entwicklungsprozess ermöglichte eine zielgerichtete Optimierung der Versuchsanlage und trug wesentlich zur Erreichung der Projektziele bei.

Darüber hinaus unterstützte die 3win Maschinenbau GmbH das ITA in mehreren Projektphasen über die ursprünglich vorgesehenen Aufgaben hinaus. Hierzu gehörten unter anderem konstruktive Arbeiten an der Inertgaskammer, die Entwicklung verschiedener Versuchsdüsen sowie die Fertigung zusätzlicher Komponenten für experimentelle Untersuchungen. Diese enge Zusammenarbeit ermöglichte eine flexible Anpassung der Entwicklungsarbeiten an neue wissenschaftliche Erkenntnisse und verkürzte gleichzeitig die Umsetzungszeiten einzelner Arbeitspakete.

Die partnerschaftliche Zusammenarbeit zwischen wissenschaftlicher Forschung und konstruktiver Entwicklung erwies sich als wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Verlauf des Teilvorhabens. Sie ermöglichte die kontinuierliche Rückkopplung zwischen Theorie, Konstruktion und experimenteller Validierung und führte zu einer schrittweisen Erhöhung des technologischen Reifegrades der entwickelten Faserführungsanlage.

II Eingehende Darstellung

II.1 Entwicklungsstrategie des Faserführungsmoduls

Die Entwicklung des Faserführungsmoduls stellte den zentralen Arbeitsschwerpunkt des Teilvorhabens der 3win Maschinenbau GmbH dar. Ziel war die Entwicklung einer modular aufgebauten Versuchsanlage, welche eine reproduzierbare Führung ungesizter Carbonfaserrovings innerhalb einer Plasmaanlage ermöglicht und gleichzeitig die Voraussetzungen für eine homogene Plasmabehandlung schafft.

Die konstruktive Entwicklung erfolgte nicht als linearer Entwicklungsprozess, sondern als iterative Abfolge aus Konstruktion, Fertigung, experimenteller Untersuchung und anschließender Optimierung. Sämtliche Baugruppen wurden zunächst als Prototypen entwickelt und unter praxisnahen Bedingungen untersucht. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die kontinuierliche Weiterentwicklung der Anlage.

Dieser Entwicklungsansatz wurde bewusst gewählt, da zahlreiche konstruktive Randbedingungen zu Projektbeginn noch nicht vollständig bekannt waren. Insbesondere das Zusammenwirken von Faserführung, Luftströmung, Faserspreizung und Plasmabehandlung konnte erst im Rahmen experimenteller Untersuchungen bewertet werden. Dadurch entstand ein fortlaufender Entwicklungsprozess, bei dem theoretische Überlegungen unmittelbar durch praktische Versuche überprüft und bei Bedarf konstruktiv angepasst wurden.

Ein wesentliches Entwicklungsziel bestand darin, sämtliche Baugruppen möglichst modular auszulegen. Hierdurch konnten einzelne Komponenten unabhängig voneinander ausgetauscht, verändert und weiterentwickelt werden, ohne die Grundstruktur der Versuchsanlage wesentlich zu verändern. Gleichzeitig wurde dadurch eine hohe Flexibilität für spätere Erweiterungen geschaffen.

Die Entwicklung des Faserführungsmoduls gliederte sich in mehrere aufeinander aufbauende Entwicklungsphasen. Nach der Definition der grundlegenden Anforderungen wurden zunächst Voruntersuchungen zur Plasmabehandlung sowie zur Gasdurchdringung des Carbonfaserrovings durchgeführt. Darauf aufbauend erfolgte die Entwicklung geeigneter Umlenkrollen, Spreizsysteme sowie Komponenten zur Luftführung. Anschließend wurden sämtliche Baugruppen in die bestehende Plasmaanlage integriert und unter realen Betriebsbedingungen kontinuierlich optimiert.

Die enge Zusammenarbeit zwischen der 3win Maschinenbau GmbH und dem Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen ermöglichte eine unmittelbare Rückkopplung zwischen experimenteller Untersuchung und konstruktiver Entwicklung. Hierdurch konnten neue Erkenntnisse ohne Zeitverlust in die Weiterentwicklung der Anlage übernommen werden.

Der iterative Entwicklungsprozess stellte sich während des gesamten Projektes als entscheidender Erfolgsfaktor heraus und führte schrittweise zu einer deutlichen Verbesserung der Prozessstabilität sowie der Reproduzierbarkeit der Faserführung.

II.2 Erstellung des Anforderungskataloges

Die Grundlage sämtlicher Entwicklungsarbeiten bildete ein gemeinsamer Anforderungskatalog, der zu Beginn des Projektes in mehreren Abstimmungsgesprächen zwischen den Projektpartnern erarbeitet wurde. Ziel war die systematische Erfassung sämtlicher funktionaler, konstruktiver und prozesstechnischer Anforderungen an das zu entwickelnde Faserführungsmodul.

Da die Versuchsanlage sowohl textiltechnische als auch plasmatechnische Anforderungen erfüllen musste, wurden die unterschiedlichen Randbedingungen gemeinsam betrachtet und in einem einheitlichen Lastenheft zusammengeführt. Ergänzend wurden theoretische Überlegungen zur chemischen Aktivierung der Carbonfasern berücksichtigt, um bereits frühzeitig Anforderungen an die spätere Prozessführung abzuleiten.

Die definierten Anforderungen umfassten insbesondere:

- reproduzierbare Führung empfindlicher Carbonfaserrovings,
- möglichst geringe mechanische Beanspruchung der Filamente,
- definierte Faserspannung über den gesamten Prozess,
- gleichmäßige Spreizung des Rovings,
- homogene Beaufschlagung aller Filamente mit Prozessgas,
- modulare Bauweise der Versuchsanlage,
- einfache Austauschbarkeit einzelner Baugruppen,
- Integration in die bestehende Plasmaanlage,
- hohe Prozessstabilität und Wiederholgenauigkeit.

Neben funktionalen Anforderungen wurden auch konstruktive Randbedingungen festgelegt. Hierzu gehörten unter anderem die maximale Anlagenbreite, die Einbausituation innerhalb der vorhandenen Versuchsanlage, die Nutzung bestehender Antriebskomponenten sowie die Auswahl geeigneter Werkstoffe für Umlenkrollen und Führungselemente. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit ungesizter Carbonfasern wurde bereits in dieser frühen Projektphase besonderer Wert auf die Minimierung von Reibung und Filamentschädigung gelegt.

Der Anforderungskatalog bildete während der gesamten Projektlaufzeit die Grundlage sämtlicher Konstruktionsentscheidungen. Neue Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen wurden kontinuierlich mit den ursprünglichen Anforderungen abgeglichen und führten bei Bedarf zu einer Anpassung einzelner Entwicklungsziele. Dadurch entwickelte sich der Anforderungskatalog im Verlauf des Projektes zu einem zentralen Werkzeug für die systematische Weiterentwicklung der gesamten Versuchsanlage.

Abb. 2.1: Technischer Anforderungskatalog für das entwickelte Faserführungsmodul

Gegenstand	Technische Funktionalitäten und relevante Parameter	Wert	Kommentar
Carbonfaser, Eingang	Fasertyp	Standard Modulus	
	Anzahl Filamente	6-24K	
	Filamentdurchmesser	7-10 µm	
	Sizing	Ohne	
	Faserspannung	0,5-15 N	Bei geringer Spannung (<1,5N) muss die Faser gegen das herunterrutschen von den Rollen gesichert werden
Spreizmodule	Spreizvorrichtungen	Statisch: Air Knife und Unterdruckdüse dynamisch: Rollen Überduck (Perforiert/Bohrung) und Unterdruck (Schlitz)	Düsenanordnungen für die Überdruckrolle: Senkrecht zu Rollenoberfläche, Angewinkeltin/gegen Faserlaufrichtung, Angewinkelt von Rollenmitte aus gesehen auswärts
	Laufflächenbreite	40 mm	
	Durchmesser	80 mm	
	Umschlingungswinkel	tbd	
	Druckluft	6 oder 10 bar	
	Unterdruck	Venturi-Düsen	
Rollen	Material	gut bearbeitbar, möglichst leicht, Oberflächenbehandelbar	Für erste Versuche wird nochmals auf 3D-Druck zurückgegriffen, um Umschlingungswinkel und Düsenanordnung zu bestimmen. Die Bearbeitbarkeit muss auf Basis der erforderlichen Lochgröße der Umlenkrolle beurteilt werden.
	Oberflächenbehandlung	tbd, je nach Präzision	Als Oberflächenbehandlung kommen Keramik, Verchromung und Topochrom infrage
	Antrieb	Optional über Zahnriemen von Motor aus	
	Position	versetzt, abhängig von Umschlingungswinkel	Variabel montiert auf Aluprofilsystem, verschiebbar
Abschirmung Rollen	Materialeigenschaften	hohe Steifigkeit	Abschirmung darf bei Über/Unterdruck nicht ausgelenkt werden
	Winkel	90, 120, 180	Wird in vorversuchen getest und festgelegt
	Abtsand zu Rolle	minimal, Fertigungstechnisch bedingt	

II.3 Voruntersuchungen und konzeptionelle Entwicklung

II.3.1 Entwicklung der Inertgaskammer

Bereits zu Beginn der experimentellen Arbeiten zeigte sich, dass für die Durchführung erster Plasmauntersuchungen geeignete Randbedingungen geschaffen werden mussten. Aufgrund von Verzögerungen innerhalb der Entwicklung der endgültigen Plasmaquelle wurde gemeinsam mit dem Institut für Textiltechnik (ITA) entschieden, die ersten Untersuchungen mithilfe eines Lichtbogen-Plasmajets durchzuführen. Ziel dieser Versuchsreihe war es, grundlegende Erkenntnisse über die Wechselwirkung zwischen Plasma und Carbonfaser zu gewinnen und gleichzeitig Anforderungen für die spätere Auslegung des Faserführungsmoduls abzuleiten.

Für die Realisierung dieser Untersuchungen war zunächst die Entwicklung einer geeigneten Inertgaskammer erforderlich. Die Kammer sollte den Einfluss der Umgebungsluft auf den Plasmaprozess minimieren und gleichzeitig einen reproduzierbaren Faserlauf durch den Versuchsaufbau ermöglichen. Aufgrund ihrer Erfahrung im Bereich der Konstruktion und

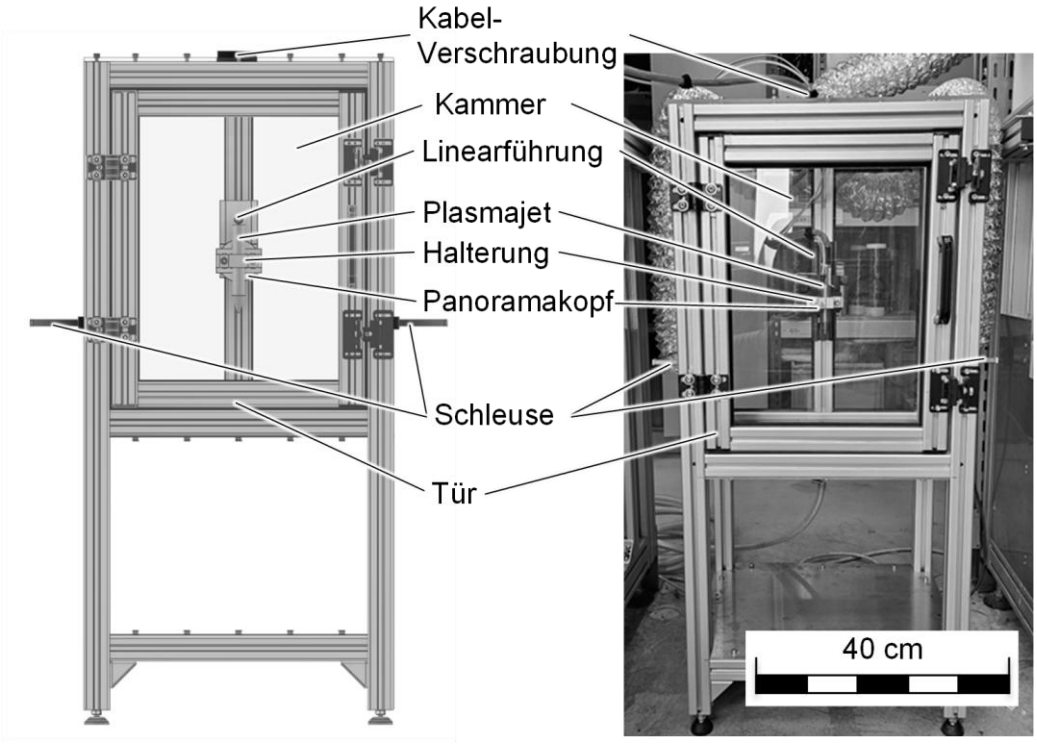
Fertigung übernahm die 3win Maschinenbau GmbH die konstruktive Auslegung der Einhausung und unterstützte das ITA bei deren Fertigung.

Bei der Entwicklung standen insbesondere folgende Anforderungen im Vordergrund:

- möglichst geringer Eintrag von Umgebungsluft in den Plasmabereich,
- einfache Integration in den vorhandenen Versuchsaufbau,
- ausreichende Zugänglichkeit für experimentelle Untersuchungen,
- Möglichkeit zur nachträglichen Anpassung einzelner Komponenten,
- stabile mechanische Ausführung bei gleichzeitig kompakter Bauweise.

Die entwickelte Inertgaskammer bildete die Grundlage sämtlicher nachfolgender Untersuchungen und ermöglichte erstmals reproduzierbare Versuchsbedingungen für die experimentelle Bewertung der Plasmabehandlung.

Abbildung 2.2: Einhausung der Inertgaskammer



II.3.2 Entwicklung der Faserdurchführung

Parallel zur Entwicklung der Inertgaskammer wurde eine geeignete Faserdurchführung entwickelt. Diese sollte den Carbonfaserroving sicher durch die Einhausung führen und gleichzeitig den Eintrag von Umgebungsluft möglichst gering halten.

Die konstruktive Auslegung der Durchführung stellte einen wesentlichen Bestandteil der Vorentwicklung dar, da sowohl die Dichtigkeit der Kammer als auch die spätere Qualität der Plasmabehandlung unmittelbar vom Faserdurchtritt beeinflusst werden. Darüber hinaus durfte die Durchführung keine zusätzlichen mechanischen Belastungen auf den empfindlichen Carbonfaserroving ausüben.

Im Rahmen mehrerer Konstruktionsschleifen wurden unterschiedliche Varianten entwickelt und hinsichtlich ihrer Funktion bewertet. Die schließlich realisierte Ausführung ermöglichte einen reproduzierbaren Faserlauf und reduzierte den Lufteintrag in die Prozesskammer deutlich.

Die im Rahmen dieser Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse flossen unmittelbar in die spätere Entwicklung des Faserführungsmoduls ein und bildeten eine wesentliche Grundlage für dessen konstruktive Auslegung.

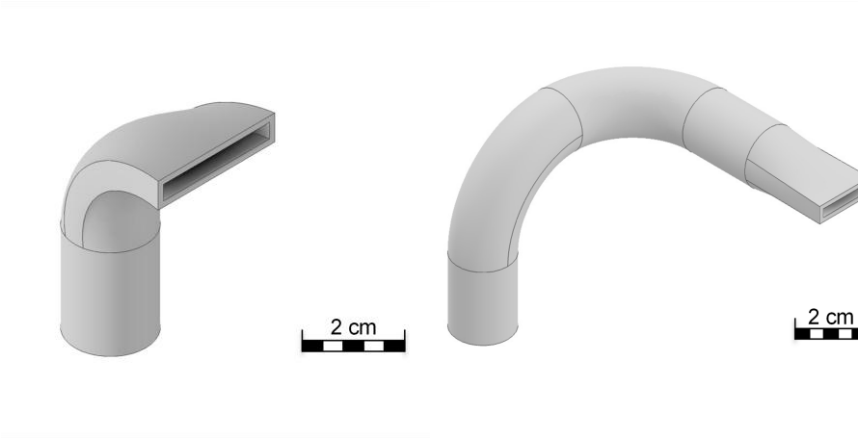
II.3.3 Entwicklung einer Modelldüse

Da die endgültige Geometrie der später eingesetzten Plasmaquelle zu Beginn der Arbeiten noch nicht feststand, wurde zunächst auf die Fertigung einer endgültigen Prozessdüse verzichtet. Stattdessen konzentrierten sich die Entwicklungsarbeiten auf eine flexibel einsetzbare Modelldüse, welche erste experimentelle Untersuchungen ermöglichen sollte.

Die entwickelten Düsen dienten insbesondere der Zuführung eines Partikelaerosols in die Plasmaflamme und ermöglichten damit grundlegende Untersuchungen zum Strömungsverhalten innerhalb des Plasmabereiches. Sämtliche Versuchsdüsen wurden additiv gefertigt, wodurch unterschiedliche Geometrien innerhalb kurzer Entwicklungszyklen realisiert und unmittelbar experimentell untersucht werden konnten.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen reduzierten den späteren Entwicklungsaufwand für die endgültige Plasmaquelle erheblich, da bereits frühzeitig wesentliche Erkenntnisse über die Strömungsführung und die konstruktiven Anforderungen an die Düsengeometrie gewonnen werden konnten.

Abbildung 2.3: Additiv gefertigte Modelldüse zur Zuführung eines Partikelaerosols



II.3.4 Untersuchung der Gasdurchdringung des Carbonfaserrovings

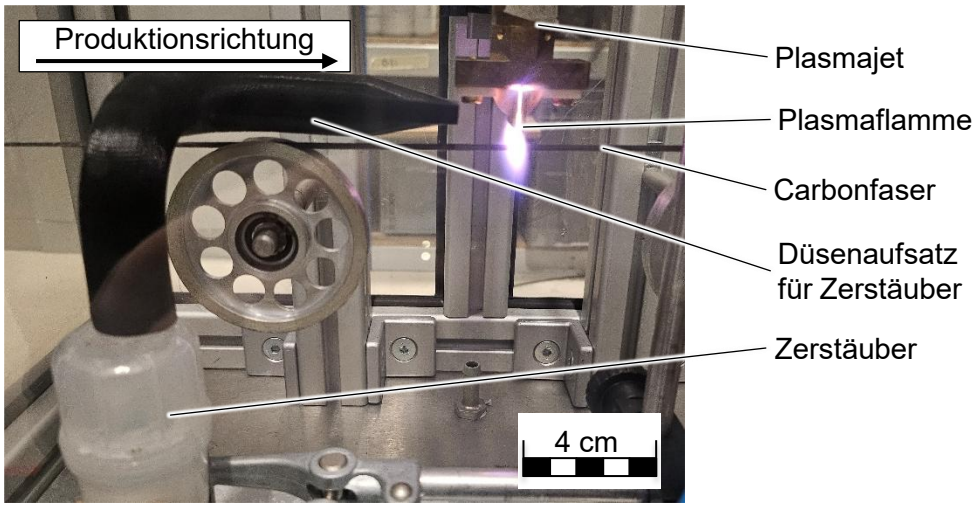
Im Anschluss an die Entwicklung der Versuchskomponenten wurden Untersuchungen zur Durchdringung des Carbonfaserrovings mit Prozessgas durchgeführt. Ziel dieser Arbeiten war die Bewertung, in welchem Umfang die einzelnen Filamente innerhalb des Rovings durch das Prozessgas erreicht werden und welche konstruktiven Maßnahmen zur Verbesserung der Plasmabehandlung erforderlich sind.

Die Versuche wurden unter Verwendung der zuvor entwickelten Aerosoldüsen durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass das Prozessgas überwiegend die äußeren Filamente des Rovings erreichte, während die innenliegenden Filamente nur unzureichend beaufschlagt wurden. Eine homogene Behandlung sämtlicher Filamente konnte unter diesen Bedingungen nicht erreicht werden.

Diese Erkenntnis stellte einen wesentlichen Meilenstein innerhalb des Projektes dar. Sie machte deutlich, dass eine wirksame Plasmabehandlung nur durch eine gezielte Spreizung des Carbonfaserrovings möglich ist. Hieraus ergaben sich unmittelbar neue konstruktive Anforderungen an das Faserführungsmodul sowie an die spätere Gestaltung der Umlenkrollen und Luftführung.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bildeten die Grundlage sämtlicher nachfolgender Entwicklungsarbeiten und beeinflussten die Konstruktion der Versuchsanlage maßgeblich.

Abbildung 2.4: Versuch zur Untersuchung der Gasdurchdringung des Carbonfaserrovings



II.4 Entwicklung des Faserführungsmoduls

II.4.1 Konstruktive Ausgangssituation

Die im Rahmen der Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zeigten, dass die ursprünglich angenommene Führung eines Carbonfaserrovings ohne gezielte Spreizung nicht ausreicht, um eine homogene Plasmabehandlung sämtlicher Filamente zu gewährleisten. Insbesondere die Untersuchungen zur Gasdurchdringung machten deutlich, dass lediglich die äußeren Filamente zuverlässig mit dem Prozessgas beaufschlagt werden, während der innere Bereich des Rovings weitgehend unbeeinflusst bleibt.

Aus dieser Erkenntnis ergaben sich neue konstruktive Anforderungen an das zu entwickelnde Faserführungsmodul. Ziel war nicht mehr ausschließlich die sichere Führung des Rovings durch die Plasmaanlage, sondern zusätzlich dessen definierte Auffächerung unmittelbar vor dem Plasmabereich. Gleichzeitig mussten sämtliche konstruktiven Maßnahmen so ausgeführt werden, dass die empfindlichen Carbonfilamente möglichst keiner zusätzlichen mechanischen Belastung ausgesetzt werden.

Neben der eigentlichen Faserführung waren daher insbesondere folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- gleichmäßige Führung des Rovings über den gesamten Prozessweg,
- definierte Faserspannung,
- reproduzierbare Spreizung des Faserverbandes,
- geringe Reibung zwischen Faser und Führungselementen,
- modulare Austauschbarkeit einzelner Baugruppen,
- einfache Anpassbarkeit an unterschiedliche Versuchsanordnungen,
- Integration in die vorhandene Plasmaanlage.

Da zahlreiche konstruktive Zusammenhänge zu Projektbeginn nicht vollständig bekannt waren, wurde die Entwicklung bewusst als iterativer Optimierungsprozess angelegt. Sämtliche Komponenten wurden zunächst prototypisch ausgeführt und nach jeder Versuchsreihe konstruktiv überarbeitet. Dieser Entwicklungsansatz ermöglichte eine kontinuierliche Verbesserung der gesamten Anlage und bildete die Grundlage für sämtliche nachfolgenden Entwicklungsarbeiten.

II.4.2 Entwicklung der ersten Umlenkrollengeometrien

Die Umlenkrollen stellen das zentrale Funktionselement des entwickelten Faserführungsmoduls dar. Sie bestimmen maßgeblich den Verlauf des Carbonfaserrovings, beeinflussen die Reibungsverhältnisse zwischen Faser und Führungselementen und wirken sich unmittelbar auf die Qualität der Faserspreizung aus.

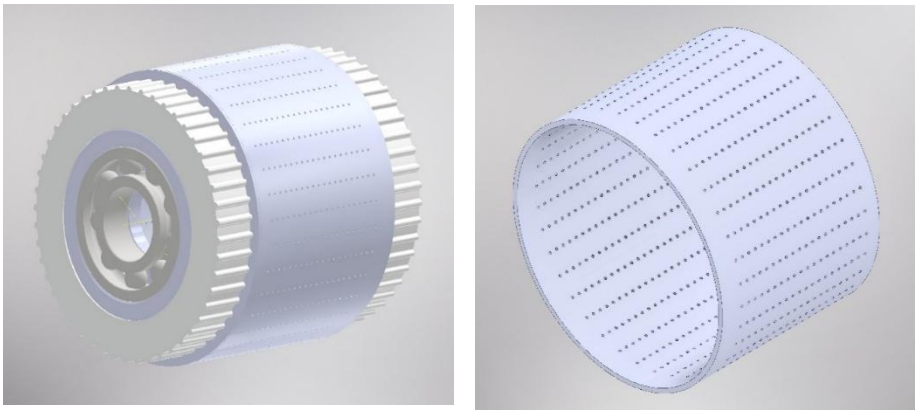
Aus diesem Grund begann die Entwicklung des Faserführungsmoduls mit der systematischen Untersuchung unterschiedlicher Walzengeometrien.

Bereits in einer frühen Entwicklungsphase fiel die Entscheidung, die ersten Walzen additiv im Selektiven Lasersintern (SLS) herzustellen. Dieses Fertigungsverfahren ermöglichte kurze Entwicklungszyklen und erlaubte die wirtschaftliche Herstellung unterschiedlicher Geometrievarianten. Änderungen konnten dadurch innerhalb weniger Tage konstruiert, gefertigt und unmittelbar experimentell untersucht werden.

Die erste Walzengeneration basierte auf einer Bohrungsgeometrie. Ziel dieser Konstruktion war die gezielte Beeinflussung der Luftströmung innerhalb des Rovings durch Druck- beziehungsweise Unterdruck. Gleichzeitig sollte untersucht werden, ob sich hierdurch eine definierte Spreizung der Carbonfasern erreichen lässt.

Die entwickelten Walzen wurden konstruktiv so ausgelegt, dass unterschiedliche Lochbilder sowie verschiedene Bohrungsdurchmesser ohne Änderung der Grundkonstruktion untersucht werden konnten.

→ **Abbildung 2.5:** Erste Entwicklungsgeneration der Umlenkrolle mit Bohrungsgeometrie.



Die ersten Versuche bestätigten grundsätzlich die Funktionsfähigkeit des Konzeptes. Gleichzeitig zeigten sich jedoch deutliche Unterschiede hinsichtlich der Luftverteilung sowie des Faserverlaufs. Insbesondere lokale Strömungsspitzen führten zu einer ungleichmäßigen Auffächerung einzelner Filamentbereiche.

Diese Ergebnisse machten eine konstruktive Überarbeitung der Walzengeometrie erforderlich und führten unmittelbar zur Entwicklung einer zweiten Generation von Umlenkrollen.

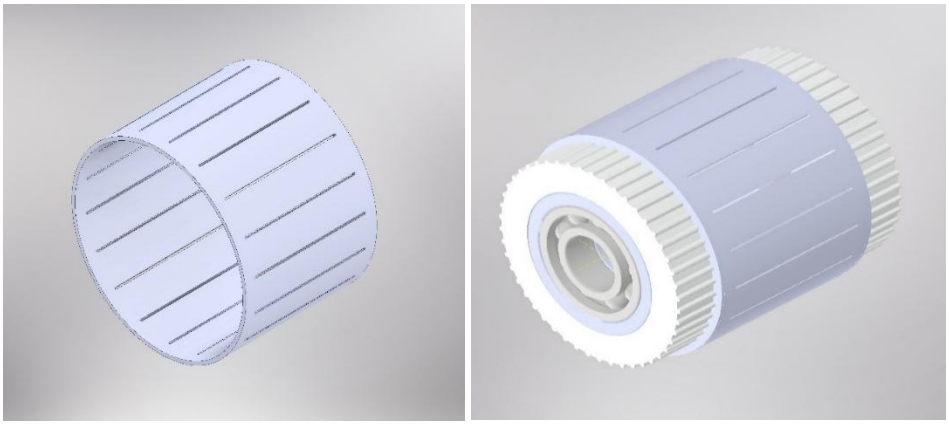
II.4.3 Entwicklung einer Schlitzgeometrie

Auf Grundlage der Ergebnisse der ersten Versuchsreihen wurde das ursprüngliche Bohrungskonzept grundlegend überarbeitet. Ziel der Weiterentwicklung war eine möglichst gleichmäßige Luftverteilung über die gesamte Breite des Carbonfaserrovings.

Hierfür wurde eine Walzengeometrie entwickelt, bei der die einzelnen Bohrungen durch längs verlaufende Schlitze ersetzt wurden. Durch diese konstruktive Änderung sollte eine homogenere Beaufschlagung sämtlicher Filamente erreicht und gleichzeitig die Strömung innerhalb des Rovings verbessert werden.

Die neue Walzengeneration wurde ebenfalls additiv gefertigt und unmittelbar in den bestehenden Versuchsaufbau integriert.

→ **Abbildung 2.6:** Weiterentwickelte Umlenkrolle mit Schlitzgeometrie.



Bereits die ersten Untersuchungen zeigten eine deutlich gleichmäßigere Spreizung des Rovings. Gleichzeitig reduzierte sich die lokale Belastung einzelner Filamentbereiche, wodurch sich der gesamte Faserlauf stabilisierte.

Die Ergebnisse bestätigten, dass die Geometrie der Luftaustrittsöffnungen einen erheblichen Einfluss auf die spätere Qualität der Plasmabehandlung besitzt. Die Schlitzgeometrie bildete deshalb die Grundlage sämtlicher weiterer Entwicklungsarbeiten und wurde im weiteren Projektverlauf kontinuierlich optimiert.

II.4.4 Experimentelle Bewertung der Walzengeometrien

Nach der Fertigung der ersten Walzengenerationen wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss der unterschiedlichen Geometrien auf den Faserlauf und die Qualität der Faserspreizung systematisch zu bewerten. Ziel dieser Versuchsreihen war es, die konstruktiven Unterschiede zwischen den entwickelten Varianten unter identischen Randbedingungen vergleichbar zu machen und daraus Optimierungspotenziale für die weitere Entwicklung abzuleiten.

Hierzu wurde ein modularer Versuchsaufbau entwickelt, der den schnellen Austausch unterschiedlicher Walzenvarianten erlaubte. Dadurch konnten einzelne Konstruktionsmerkmale gezielt untersucht werden, ohne den übrigen Aufbau der Versuchsanlage verändern zu müssen. Gleichzeitig wurde sichergestellt, dass sämtliche Versuche unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt wurden.

Ein Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Beobachtung des Faserlaufes beim Ein- und Austritt aus den Umlenkrollen. Bereits geringe Veränderungen der Walzengeometrie führten zu deutlich unterschiedlichen Spreizbildern. Während einzelne Varianten eine vergleichsweise homogene Auffächerung des Rovings ermöglichten, zeigten andere Ausführungen lokale Filamentbündelungen oder instabile Faserverläufe. Diese Beobachtungen verdeutlichten den erheblichen Einfluss der Walzengeometrie auf die spätere Qualität der Plasmabehandlung.

Darüber hinaus wurden die Reibungsverhältnisse zwischen Carbonfaser und Walzenoberfläche bewertet. Eine möglichst geringe Reibung war erforderlich, um Filamentschädigungen zu vermeiden und gleichzeitig eine konstante Faserspannung über den gesamten Prozessweg sicherzustellen. Die Untersuchungen bestätigten, dass neben der eigentlichen Geometrie auch die Oberflächenqualität der Walzen einen wesentlichen Einfluss auf das Laufverhalten besitzt.

Abbildung 2.7: Erster Versuchsaufbau zur Untersuchung unterschiedlicher Walzengeometrien.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bildeten die Grundlage für die weitere Optimierung der Umlenkrollen und bestätigten den gewählten iterativen Entwicklungsansatz. Sämtliche Erkenntnisse wurden unmittelbar in die Konstruktion der nächsten Entwicklungsstufe übernommen.

II.4.5 Entwicklung der Walzenlagerung und Halterungen

Parallel zur Optimierung der Walzengeometrien wurde die konstruktive Ausführung der Lagerungen und Halterungen weiterentwickelt. Ziel war die Schaffung einer stabilen und präzise justierbaren Aufnahme, welche den reproduzierbaren Einsatz unterschiedlicher Walzenvarianten ermöglicht.

Die ersten Lagerungskonzepte erfüllten die grundsätzlichen funktionalen Anforderungen, zeigten jedoch während des Versuchsbetriebs Optimierungspotenzial hinsichtlich der Justierbarkeit und der Austauschbarkeit einzelner Komponenten. Aus diesem Grund wurden mehrere konstruktive Überarbeitungen vorgenommen, um den Umbau der Versuchsanlage zu vereinfachen und die Wiederholgenauigkeit bei Versuchsreihen zu erhöhen.

Besonderes Augenmerk wurde auf die exakte Positionierung der Walzenachsen gelegt. Bereits geringe Lageabweichungen beeinflussten den Faserlauf und führten zu Veränderungen der Spreizcharakteristik. Durch die Entwicklung neuer Halterungen konnten diese Einflüsse deutlich reduziert und die Stabilität der gesamten Versuchsanlage verbessert werden.

Abbildung 2.8: Entwicklung der Walzenaufnahme und Lagerung.

Die modulare Ausführung der Halterungen erwies sich im weiteren Projektverlauf als wesentlicher Vorteil. Unterschiedliche Walzengeometrien konnten dadurch innerhalb kurzer Zeit ausgetauscht und unmittelbar experimentell bewertet werden. Gleichzeitig bildete die

entwickelte Konstruktion die Grundlage für die spätere Integration zusätzlicher Komponenten wie Luftführungen und Abschirmungen.

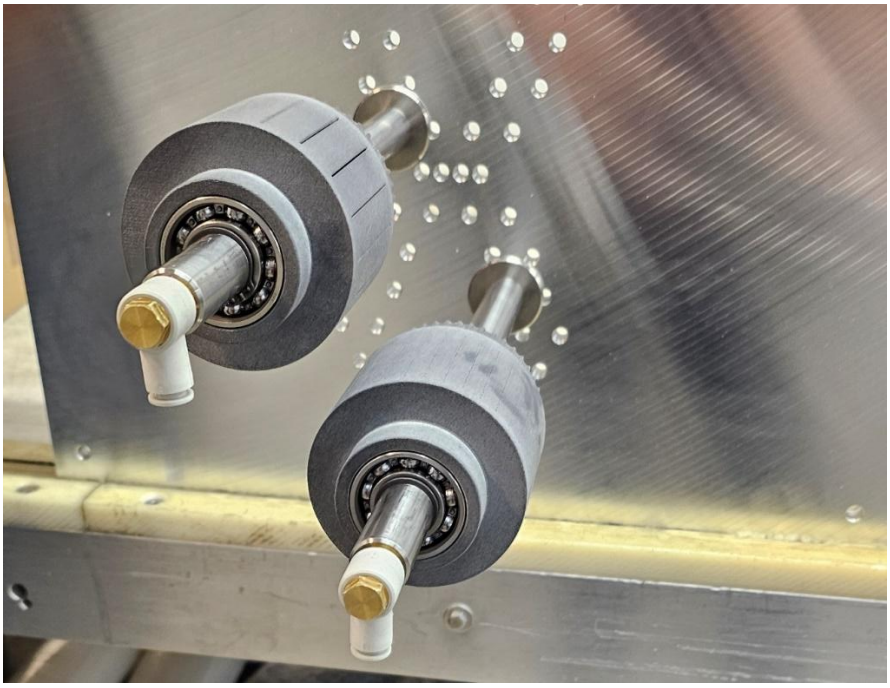
II.4.6 Erster vollständiger Aufbau des Faserführungsmoduls

Nach Abschluss der grundlegenden Entwicklungsarbeiten an Walzen und Lagerungen erfolgte erstmals der vollständige Zusammenbau des Faserführungsmoduls. Ziel dieser Entwicklungsphase war die Bewertung des Zusammenwirkens sämtlicher mechanischer Komponenten innerhalb einer gemeinsamen Versuchsanordnung.

Der Aufbau ermöglichte erstmals die Untersuchung des vollständigen Faserverlaufs über mehrere Umlenkpunkte hinweg. Gleichzeitig konnten konstruktive Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Baugruppen identifiziert werden, die bei der isolierten Betrachtung einzelner Komponenten nicht erkennbar waren.

Die ersten Gesamtversuche bestätigten die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des entwickelten Anlagenkonzeptes. Gleichzeitig zeigte sich, dass insbesondere die Positionierung einzelner Umlenkrollen sowie die Luftführung weiteren Optimierungsbedarf aufwiesen. Diese Erkenntnisse führten zu einer weiteren Überarbeitung der Konstruktion und bildeten die Grundlage für die nachfolgenden Entwicklungsstufen.

Abbildung 2.9: Erster vollständiger Zusammenbau des Faserführungsmoduls.



Mit dem erfolgreichen Aufbau des Gesamtsystems war erstmals eine experimentelle Untersuchung des vollständigen Prozessablaufs möglich. Dies stellte einen wesentlichen Meilenstein innerhalb des Projektes dar und schuf die Voraussetzungen für die nachfolgenden Arbeiten zur Optimierung der Luftführung und der Plasmabehandlung.

II.4.7 Vergleich und Optimierung der Walzenkonzepte

Nach Abschluss der ersten Versuchsreihen wurden die entwickelten Walzenkonzepte systematisch miteinander verglichen. Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss der unterschiedlichen Luftführungskonzepte auf die Spreizung des Carbonfaserrovings sowie auf die Prozessstabilität der gesamten Versuchsanlage zu bewerten.

Während die erste Walzengeneration mit Bohrungsstruktur bereits eine gezielte Beeinflussung der Luftströmung ermöglichte, zeigten die experimentellen Untersuchungen deutliche Unterschiede hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Faserspreizung. Insbesondere lokale Strömungsspitzen führten zu einer ungleichmäßigen Auffächerung einzelner Filamentbereiche und erschwerten eine reproduzierbare Positionierung des Rovings innerhalb des Plasmabereiches.

Die auf Basis dieser Ergebnisse entwickelte Schlitzgeometrie führte zu einer homogeneren Verteilung der Prozessluft über die gesamte Breite des Faserverbandes. Gleichzeitig verringerte sich die mechanische Belastung einzelner Filamentgruppen, wodurch ein ruhigerer und gleichmäßigerer Faserlauf erreicht werden konnte.

Die vergleichenden Untersuchungen bestätigten damit, dass die Gestaltung der Luftaustrittsgeometrie einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Faserspreizung besitzt. Darüber hinaus zeigte sich, dass bereits geringe konstruktive Änderungen der Walzengeometrie erhebliche Auswirkungen auf den gesamten Prozessverlauf haben können.

Abbildung 2.10: Vergleich der entwickelten Bohrungs- und Schlitzgeometrien.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden unmittelbar für die weitere Entwicklung der Faserführungsanlage genutzt und bildeten die Grundlage für die anschließende Optimierung der Luftführung.

II.4.8 Entwicklung der Luftführung

Neben der Geometrie der Umlenkrollen erwies sich die gezielte Führung des Prozessgases als weiterer entscheidender Einflussfaktor auf die Qualität der Plasmabehandlung. Ziel der Entwicklungsarbeiten war es, den Luftstrom so zu führen, dass sämtliche Filamente des gespreizten Rovings möglichst gleichmäßig beaufschlagt werden.

Die ersten Versuchsreihen zeigten, dass bereits geringe Änderungen der Luftführung deutliche Auswirkungen auf den Verlauf der Carbonfasern hatten. Ungünstige Strömungsverhältnisse führten zu lokalen Verwirbelungen und beeinflussten sowohl die Stabilität des Faserlaufes als auch die Homogenität der Plasmabehandlung.

Zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse wurden verschiedene Luftführungselemente entwickelt und experimentell untersucht. Die einzelnen Varianten unterschieden sich insbesondere hinsichtlich ihrer Geometrie sowie der Führung des Prozessgases im unmittelbaren Bereich der Plasmabehandlung.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen machten deutlich, dass eine abgestimmte Kombination aus Walzengeometrie, Luftführung und Faserspreizung erforderlich ist, um einen stabilen Prozess zu gewährleisten. Erst das Zusammenwirken sämtlicher Komponenten führte zu einer reproduzierbaren Prozessführung.

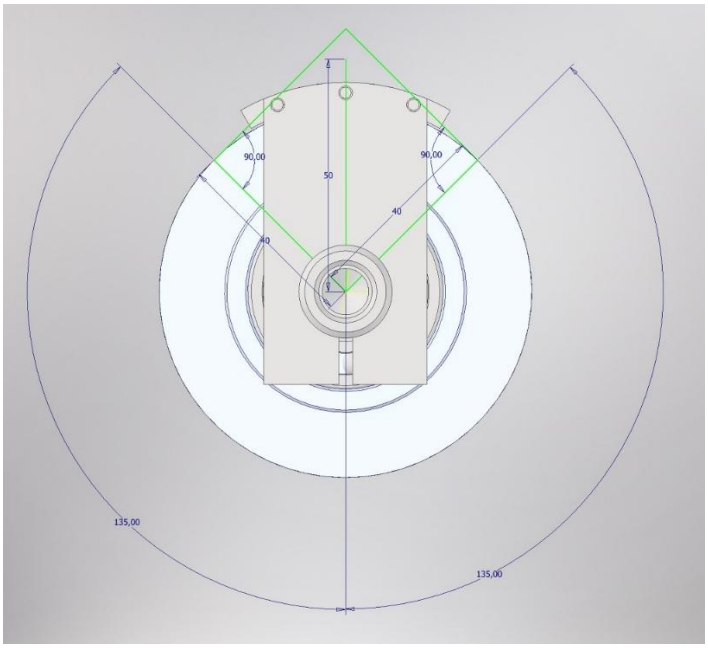
II.4.9 Entwicklung der Abschirmungen

Im weiteren Projektverlauf rückte die konstruktive Gestaltung der Abschirmungen in den Mittelpunkt der Entwicklungsarbeiten. Diese Bauteile dienten dazu, die Strömungsverhältnisse im Bereich der Plasmaquelle gezielt zu beeinflussen und äußere Störeinflüsse auf den Prozess zu reduzieren.

Ausgehend von den Ergebnissen der bisherigen Versuchsreihen wurden mehrere Abschirmungsgeometrien entwickelt und miteinander verglichen. Ziel war die Identifikation einer Geometrie, welche eine möglichst gleichmäßige Luftführung ermöglicht und gleichzeitig den stabilen Verlauf des Carbonfaserrovings unterstützt.

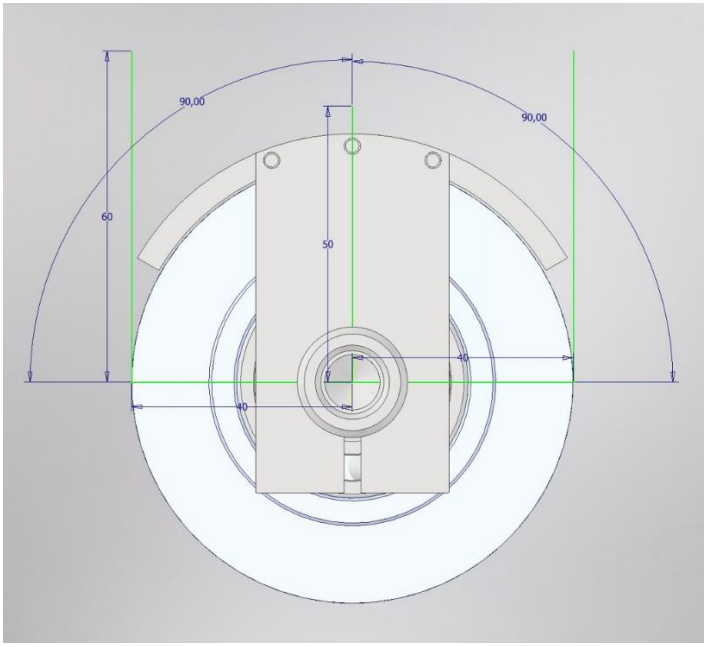
Zunächst wurde eine Abschirmung mit einem Öffnungswinkel von 60° entwickelt und experimentell untersucht.

Abbildung 2.11: Abschirmung mit 60° Öffnungswinkel.



Die erzielten Ergebnisse führten anschließend zur Entwicklung einer zweiten Variante mit einem Öffnungswinkel von 120°. Durch die veränderte Geometrie konnte die Strömungsverteilung weiter verbessert und die Gleichmäßigkeit der Beaufschlagung des Faserverbandes erhöht werden.

Abbildung 2.12: Abschirmung mit 120° Öffnungswinkel.



Die vergleichenden Untersuchungen bestätigten, dass die Geometrie der Abschirmung einen wesentlichen Einfluss auf die Prozessstabilität besitzt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden unmittelbar in die endgültige Ausführung der Versuchsanlage übernommen.

Damit war die Entwicklung der wesentlichen Strömungs- und Führungskomponenten abgeschlossen. Im nächsten Entwicklungsschritt erfolgte die vollständige Integration der Anlage sowie deren experimentelle Validierung unter realen Betriebsbedingungen.

II.4.10 Integration der Faserführung in die Plasmaanlage

Nach Abschluss der grundlegenden Entwicklungsarbeiten an den einzelnen Baugruppen erfolgte die schrittweise Integration des Faserführungsmoduls in die am Institut für Textiltechnik aufgebaute Plasmaanlage. Ziel dieser Projektphase war die Überführung der zuvor einzeln untersuchten Komponenten in ein gemeinsames Gesamtsystem sowie die Bewertung ihres Zusammenwirkens unter realen Prozessbedingungen.

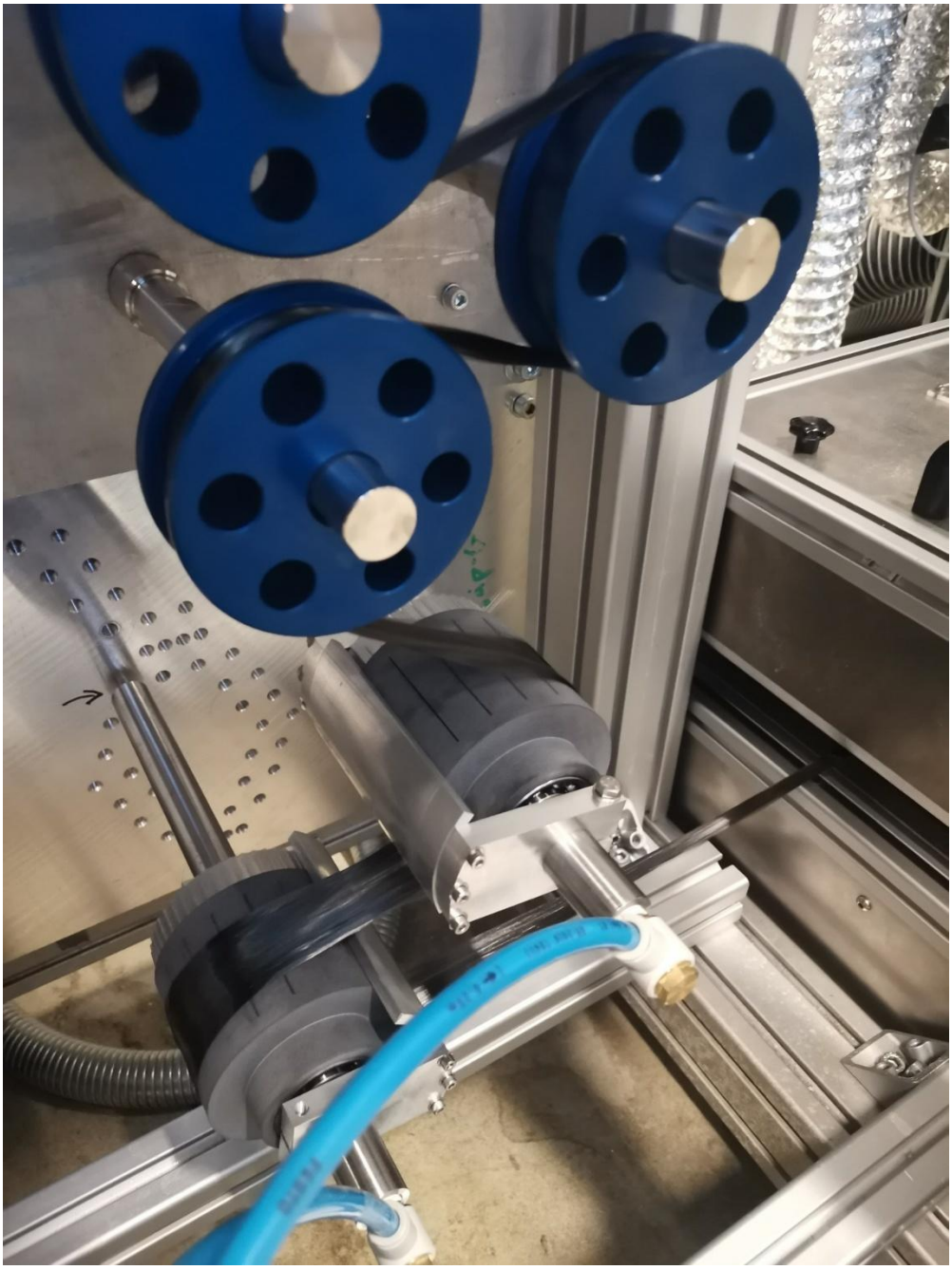
Die Integration erforderte eine präzise Abstimmung sämtlicher mechanischer und prozesstechnischen Komponenten. Neben der eigentlichen Faserführung mussten die Position der Plasmaquelle, die Luftführung, die Sensorik sowie die Halterungen so aufeinander abgestimmt werden, dass ein reproduzierbarer Faserlauf innerhalb des Behandlungsbereiches gewährleistet werden konnte.

Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der exakten Positionierung des Carbonfaserrovings im Bereich der Plasmaquelle. Bereits geringe Abweichungen der Faserlage führten zu Veränderungen der Plasmabeaufschlagung und beeinflussten damit unmittelbar die Gleichmäßigkeit der Oberflächenaktivierung. Aus diesem Grund wurden sämtliche Komponenten zunächst justiert und anschließend unter Versuchsbedingungen überprüft.

Die modulare Konstruktion der Faserführung erwies sich während dieser Arbeiten als wesentlicher Vorteil. Einzelne Baugruppen konnten ohne grundlegende Änderungen an der Gesamtanlage angepasst oder ersetzt werden. Hierdurch war es möglich, konstruktive Optimierungen unmittelbar nach den jeweiligen Versuchsauswertungen umzusetzen und erneut experimentell zu bewerten.

Die erfolgreiche Integration der Baugruppen bestätigte die grundsätzliche Eignung des entwickelten Anlagenkonzeptes und bildete die Voraussetzung für die nachfolgenden Validierungsversuche.

Abbildung 2.13: Vollständig montierte Faserführung innerhalb der Plasmaanlage.



II.4.11 Optimierung des Gesamtsystems

Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme der Versuchsanlage begann eine weitere Entwicklungsphase, in der nicht mehr einzelne Komponenten, sondern das Zusammenwirken des Gesamtsystems im Mittelpunkt stand.

Während der ersten Versuchsreihen zeigte sich, dass die Qualität der Plasmabehandlung nicht ausschließlich von der Konstruktion einzelner Baugruppen abhängig ist. Vielmehr beeinflussten sich Faserführung, Luftströmung, Walzengeometrie und Anlagenaufbau

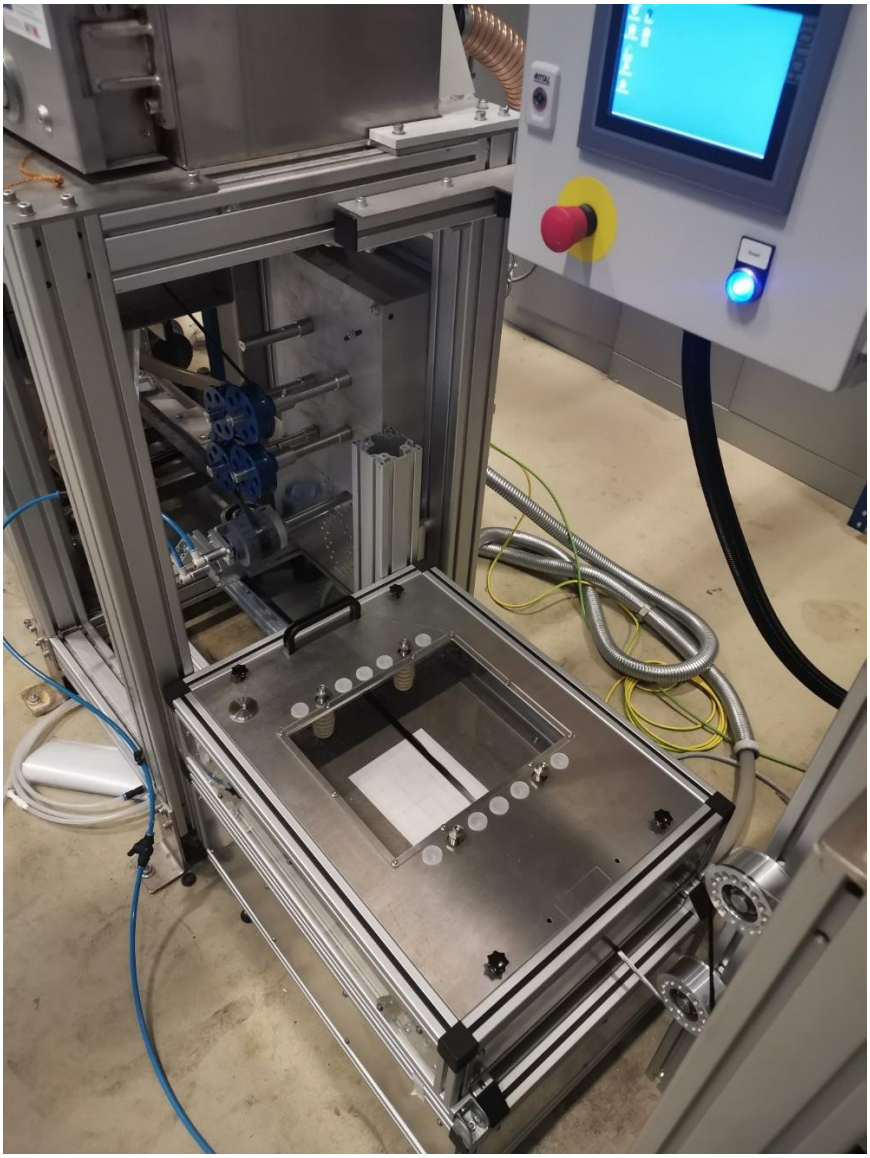
gegenseitig. Änderungen an einer Baugruppe wirkten sich häufig auf mehrere Prozessparameter gleichzeitig aus.

Aus diesem Grund wurde die Optimierung konsequent auf Systemebene durchgeführt. Nach jeder Versuchsreihe wurden die gewonnenen Erkenntnisse gemeinsam mit dem Institut für Textiltechnik ausgewertet und konstruktive Verbesserungen definiert. Anschließend wurden die entsprechenden Komponenten angepasst, gefertigt und erneut untersucht.

Dieses iterative Vorgehen führte zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Prozessstabilität. Gleichzeitig erhöhte sich die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse, wodurch belastbare Aussagen über den Einfluss einzelner konstruktiver Maßnahmen möglich wurden.

Die Ergebnisse dieser Entwicklungsphase zeigen deutlich, dass eine erfolgreiche plasmabasierte Behandlung von Carbonfaserrovings nur durch das abgestimmte Zusammenwirken sämtlicher Anlagenkomponenten erreicht werden kann.

Abbildung 2.14: Gesamtansicht der entwickelten Versuchsanlage.



II.4.12 Validierung unter Betriebsbedingungen

Den Abschluss der konstruktiven Entwicklungsarbeiten bildeten umfangreiche Untersuchungen unter realen Betriebsbedingungen. Ziel dieser Arbeiten war der Nachweis, dass die entwickelte Faserführung einen reproduzierbaren Anlagenbetrieb ermöglicht und die zuvor definierten Anforderungen erfüllt.

Hierzu wurde der vollständige Prozess über längere Versuchszeiträume untersucht. Im Mittelpunkt standen insbesondere die Stabilität des Faserlaufes, die Gleichmäßigkeit der Faserspreizung, die Lage des Rovings innerhalb des Plasmabereiches sowie das Zusammenwirken der entwickelten Baugruppen.

Die Versuchsreihen bestätigten, dass die entwickelte Konstruktion einen kontinuierlichen und reproduzierbaren Transport des Carbonfaserrovings ermöglicht. Gleichzeitig zeigte sich, dass die zuvor entwickelten Optimierungsmaßnahmen an Walzen, Luftführung und Abschirmung maßgeblich zur Erhöhung der Prozessstabilität beigetragen haben.

Besonders hervorzuheben ist, dass die im Projekt entwickelte Faserführung eine definierte Positionierung des Rovings im Plasmabereich ermöglicht. Dadurch konnten reproduzierbare Versuchsbedingungen geschaffen werden, welche eine belastbare wissenschaftliche Bewertung der Plasmabehandlung erlaubten.

Abbildung 2.15: Faserführung während des Versuchsbetriebs.

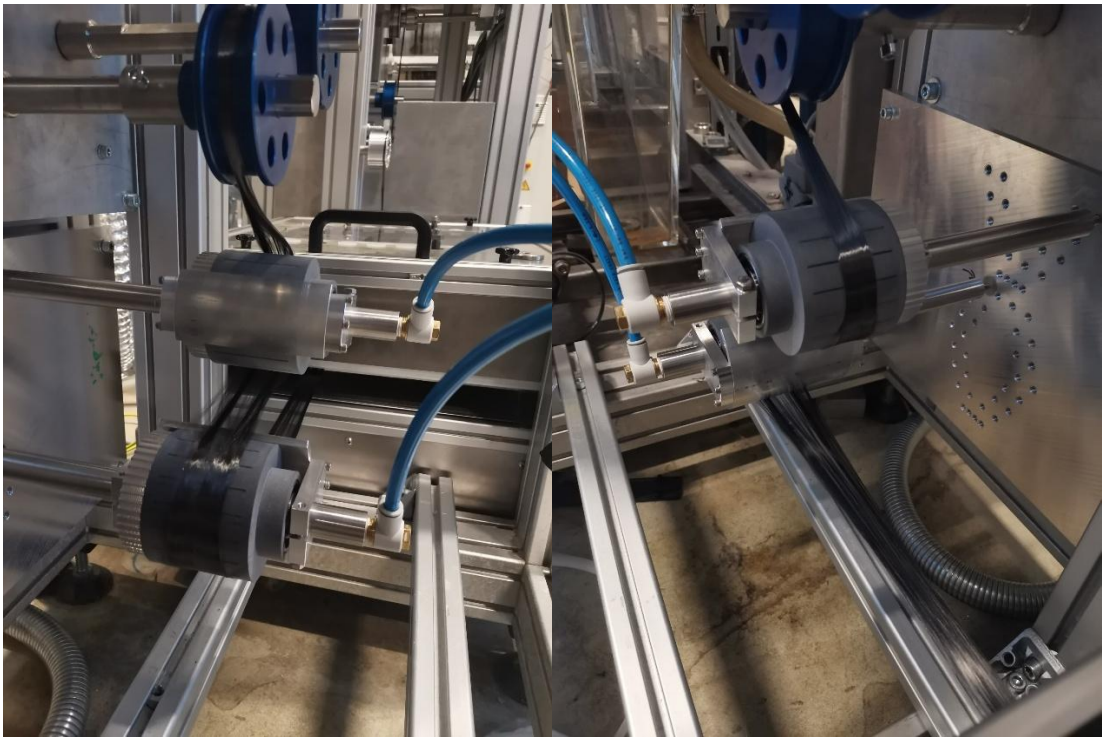
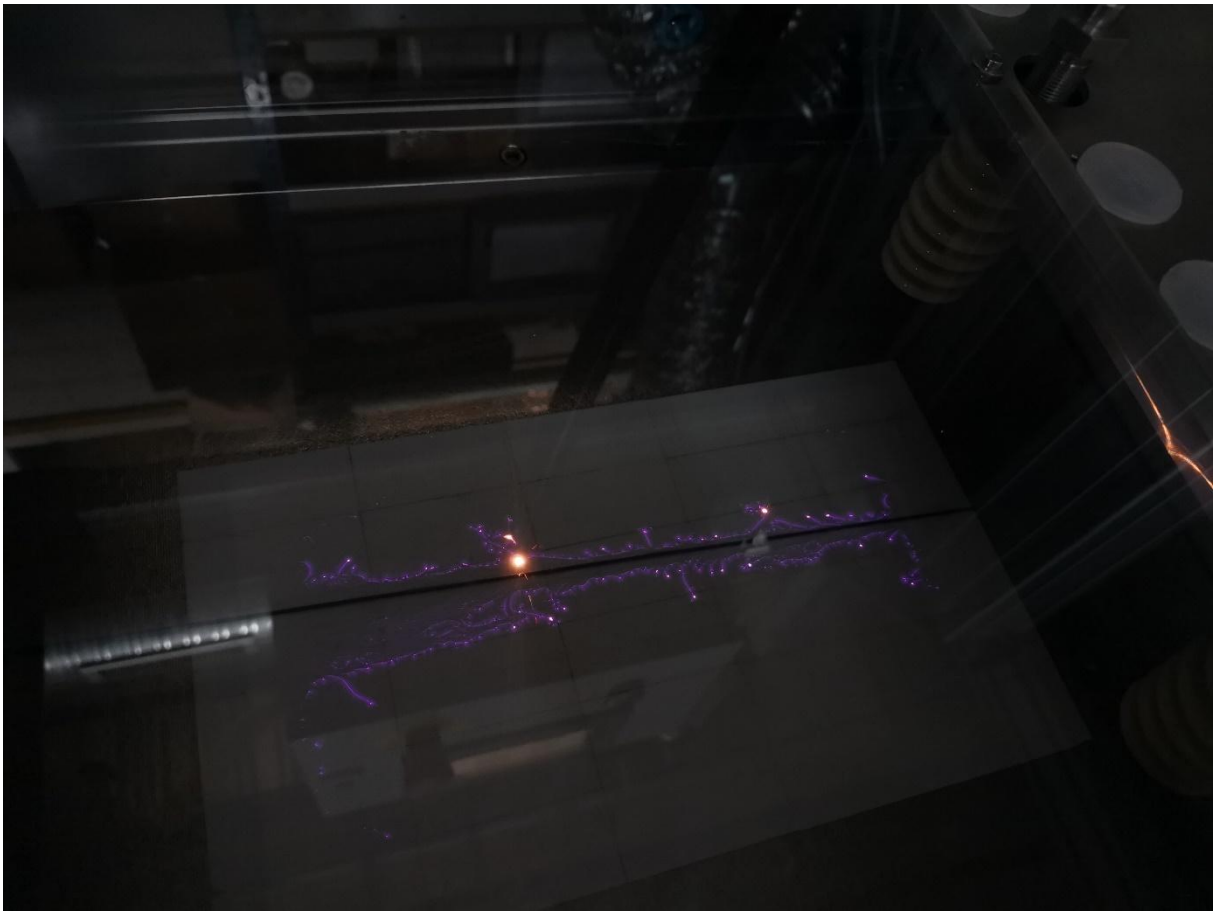


Abbildung 2.16: Detailaufnahme des Rovings innerhalb des Plasmabereiches.



Die erfolgreiche Validierung der Versuchsanlage bildet den Abschluss der konstruktiven Entwicklungsarbeiten und bestätigt die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des entwickelten Anlagenkonzeptes.

II.4.13 Wissenschaftliche Bewertung der Entwicklungsarbeiten

Die Entwicklung des Faserführungsmoduls verdeutlicht die hohe Komplexität plasmabasierter Behandlungsprozesse für kontinuierliche Carbonfaserrovings. Bereits während der frühen Projektphase zeigte sich, dass die Qualität der Plasmabehandlung nicht durch einzelne Komponenten bestimmt wird, sondern maßgeblich vom Zusammenwirken sämtlicher mechanischer und prozesstechnischer Baugruppen abhängt.

Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen bestätigten, dass insbesondere die Gestaltung der Faserführung einen entscheidenden Einfluss auf die Reproduzierbarkeit des Gesamtprozesses besitzt. Eine definierte Führung des Carbonfaserrovings sowie eine gleichmäßige Auffächerung der Filamente stellen die grundlegende Voraussetzung für eine homogene Plasmabehandlung dar. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass bereits geringe konstruktive Änderungen der Walzengeometrie oder der Luftführung deutliche Auswirkungen auf die Prozessstabilität besitzen.

Die systematische Untersuchung unterschiedlicher Walzengeometrien führte zu einem verbesserten Verständnis der Zusammenhänge zwischen Luftführung, Filamentspreizung und

Faserlauf. Während die ersten Entwicklungsstufen vor allem der grundsätzlichen Machbarkeitsbewertung dienten, ermöglichten die nachfolgenden Optimierungsschritte eine schrittweise Verbesserung der Prozessführung. Insbesondere die Entwicklung geschlitzter Walzengeometrien sowie die Anpassung der Luftführung erwiesen sich als wesentliche Beiträge zur Stabilisierung des Gesamtprozesses.

Auch die Entwicklung der Abschirmungen zeigte, dass konstruktive Details einen erheblichen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse innerhalb des Plasmabereiches besitzen. Durch die experimentelle Untersuchung verschiedener Geometrien konnten die Strömungsbedingungen gezielt verbessert und die Gleichmäßigkeit der Plasmabehandlung erhöht werden. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer ganzheitlichen Betrachtung mechanischer und prozesstechnischer Komponenten bei der Entwicklung plasmabasierter Behandlungssysteme.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt des Projektes war die konsequente Anwendung eines iterativen Entwicklungsprozesses. Sämtliche Baugruppen wurden zunächst prototypisch entwickelt, experimentell untersucht und anschließend auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse konstruktiv überarbeitet. Dieses Vorgehen ermöglichte eine kontinuierliche Erhöhung des technologischen Reifegrades der Versuchsanlage und reduzierte gleichzeitig das Risiko grundlegender Fehlentwicklungen.

Die erfolgreiche Integration sämtlicher Baugruppen in die Plasmaanlage bestätigt die grundsätzliche Eignung des entwickelten Anlagenkonzeptes für die Durchführung reproduzierbarer Forschungsarbeiten. Darüber hinaus konnten wesentliche konstruktive und prozesstechnische Zusammenhänge identifiziert werden, die über das unmittelbare Projektziel hinaus für zukünftige Entwicklungen plasmabasierter Carbonfaserbehandlungsanlagen von Bedeutung sind.

Zusammenfassend konnte im Rahmen des Teilvorhabens eine modulare Faserführungsanlage entwickelt werden, welche die wesentlichen Anforderungen hinsichtlich Faserführung, Prozessstabilität und Anlagenintegration erfüllt. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bilden damit eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der plasmabasierten Oberflächenmodifizierung kontinuierlicher Carbonfaserrovings.

III.1 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Die im Rahmen des Teilvorhabens durchgeführten Entwicklungsarbeiten führten zur erfolgreichen Konzeption, Konstruktion und experimentellen Validierung eines modular aufgebauten Faserführungsmoduls für die plasmabasierte Behandlung kontinuierlicher Carbonfaserrovings. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen der 3win Maschinenbau GmbH und dem Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen konnten konstruktive Entwicklung und experimentelle Forschung kontinuierlich miteinander verknüpft werden.

Ein wesentliches Ergebnis des Projektes ist der Nachweis, dass eine homogene Plasmabehandlung kontinuierlicher Carbonfaserrovings nur dann erreicht werden kann, wenn eine definierte Faserspreizung mit einer reproduzierbaren Führung des Rovings kombiniert wird. Die Untersuchungen zur Gasdurchdringung des Faserverbandes zeigten, dass ohne geeignete Spreizmechanismen lediglich die äußeren Filamente zuverlässig mit dem Prozessgas beaufschlagt werden. Diese Erkenntnis bildete die Grundlage für sämtliche weiteren Entwicklungsarbeiten.

Im Rahmen der Entwicklung des Faserführungsmoduls wurden unterschiedliche Walzengeometrien entwickelt, gefertigt und experimentell untersucht. Die vergleichenden Untersuchungen belegten den erheblichen Einfluss der Luftaustrittsgeometrie auf die Gleichmäßigkeit der Faserspreizung. Die entwickelte Schlitzgeometrie zeigte gegenüber der ursprünglichen Bohrungsvariante deutliche Vorteile hinsichtlich Luftverteilung, Faserlauf und Prozessstabilität.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Gestaltung der Luftführung und der Abschirmungen einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität des gesamten Behandlungsprozesses besitzt. Erst das abgestimmte Zusammenwirken von Walzengeometrie, Luftführung, Abschirmung und Anlagenstruktur ermöglichte eine reproduzierbare Führung des Carbonfaserrovings innerhalb des Plasmabereiches.

Die entwickelte Versuchsanlage erfüllt die wesentlichen Anforderungen an eine modulare Forschungsplattform. Einzelne Komponenten können unabhängig voneinander verändert oder weiterentwickelt werden, wodurch zukünftige Forschungsarbeiten ohne grundlegende Änderungen an der Gesamtanlage durchgeführt werden können. Gleichzeitig bietet die modulare Bauweise eine hohe Flexibilität für die Untersuchung weiterer Prozessparameter.

Aus wissenschaftlich-technischer Sicht konnte das Projekt wesentliche Erkenntnisse über das Zusammenwirken mechanischer Konstruktion und plasmabasierter Oberflächenbehandlung liefern. Die erzielten Ergebnisse bilden eine belastbare Grundlage für die Weiterentwicklung entsprechender Anlagenkonzepte und leisten einen Beitrag zur technologischen Weiterentwicklung der Oberflächenmodifizierung von Carbonfaserrovings.

III.2 Bewertung der entwickelten Faserführung

Die im Rahmen des Teilvorhabens entwickelte Faserführungsanlage erfüllt die wesentlichen Anforderungen, die zu Beginn des Projektes im Anforderungskatalog definiert wurden. Durch die Kombination aus reproduzierbarer Faserführung, gezielter Spreizung des Carbonfaserrovings und einer an die Plasmabehandlung angepassten Luftführung konnte eine Versuchsanlage entwickelt werden, welche die Durchführung reproduzierbarer Untersuchungen unter praxisnahen Bedingungen ermöglicht.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Qualität der Plasmabehandlung in erheblichem Maße von der mechanischen Führung des Carbonfaserrovings beeinflusst wird. Während die Plasmaquelle selbst die notwendige

Energie zur Oberflächenaktivierung bereitstellt, entscheidet die konstruktive Ausführung der Faserführung darüber, ob sämtliche Filamente den Behandlungsbereich in reproduzierbarer Weise durchlaufen.

Von besonderer Bedeutung erwies sich hierbei die Entwicklung geeigneter Umlenkrollen. Die vergleichenden Untersuchungen verschiedener Geometrien zeigten, dass bereits geringe Änderungen der Luftaustrittsöffnungen erhebliche Auswirkungen auf die Gleichmäßigkeit der Faserspreizung besitzen. Die entwickelte Schlitzgeometrie führte gegenüber der ursprünglichen Bohrungsvariante zu einer homogeneren Auffächerung des Carbonfaserrovings und trug wesentlich zur Verbesserung der Prozessstabilität bei.

Darüber hinaus bestätigten die Untersuchungen, dass die Luftführung nicht unabhängig von der mechanischen Konstruktion betrachtet werden kann. Erst das Zusammenwirken von Walzengeometrie, Abschirmung und Luftführung ermöglichte eine stabile Führung des Rovings innerhalb des Plasmabereiches. Die einzelnen Baugruppen bilden daher kein Nebeneinander unabhängiger Komponenten, sondern ein funktional aufeinander abgestimmtes Gesamtsystem.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Entwicklung war die konsequent modulare Ausführung der Versuchsanlage. Sämtliche wesentlichen Baugruppen wurden so konstruiert, dass sie unabhängig voneinander verändert oder ausgetauscht werden konnten. Dadurch konnten unterschiedliche konstruktive Lösungsansätze mit vergleichsweise geringem Aufwand untersucht werden. Gleichzeitig schafft diese Modularität die Voraussetzungen für zukünftige Forschungsarbeiten sowie die Erweiterung der Versuchsanlage um zusätzliche Prozesskomponenten.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse des Projektes, dass die entwickelte Faserführungsanlage eine belastbare Grundlage für die experimentelle Untersuchung plasmabasierter Oberflächenmodifizierungsverfahren darstellt. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bestätigen zugleich, dass der gewählte iterative Entwicklungsansatz wesentlich zur erfolgreichen Realisierung des Anlagenkonzeptes beigetragen hat.

III.3 Wissenschaftlicher Beitrag des Vorhabens

Das Teilvorhaben der 3win Maschinenbau GmbH leistet einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung plasmabasierter Verfahren für die Oberflächenmodifizierung kontinuierlicher Carbonfaserrovings. Während sich zahlreiche Forschungsarbeiten auf die chemischen und physikalischen Vorgänge innerhalb der Plasmaquelle konzentrieren, zeigt das vorliegende Vorhaben, dass die mechanische Prozessführung einen ebenso entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Oberflächenbehandlung besitzt.

Im Verlauf des Projektes konnte nachgewiesen werden, dass eine reproduzierbare Plasmabehandlung nur dann erreicht werden kann, wenn sämtliche Filamente eines Carbonfaserrovings in definierter Weise durch den aktiven Plasmabereich geführt werden. Hierfür reicht eine reine Umlenkung des Rovings nicht aus. Vielmehr müssen Faserführung,

Spreizung, Luftführung und Anlagengeometrie als aufeinander abgestimmtes Gesamtsystem betrachtet werden.

Durch die Entwicklung verschiedener Walzengeometrien konnte der Einfluss der Luftführung auf die Auffächerung des Carbonfaserrovings systematisch untersucht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zum Verständnis der Wechselwirkungen zwischen mechanischer Faserführung und prozesstechnischer Behandlung bei und liefern wichtige Grundlagen für zukünftige Entwicklungen auf diesem Gebiet.

Darüber hinaus wurde mit der entwickelten Versuchsanlage eine modulare Forschungsplattform geschaffen, welche zukünftige Untersuchungen unterschiedlicher Prozessparameter ermöglicht. Die modulare Bauweise erlaubt den Austausch einzelner Komponenten, ohne grundlegende Änderungen am Gesamtsystem vornehmen zu müssen. Dadurch können neue Walzengeometrien, Luftführungskonzepte oder Plasmakomponenten mit vergleichsweise geringem konstruktivem Aufwand untersucht werden.

Neben den unmittelbar erzielten Projektergebnissen besitzt das Vorhaben daher auch einen methodischen Mehrwert. Der entwickelte iterative Entwicklungsprozess aus Konstruktion, experimenteller Untersuchung und kontinuierlicher Optimierung hat sich als geeignet erwiesen, komplexe Zusammenhänge zwischen mechanischer Konstruktion und plasmabasierter Prozessführung systematisch zu untersuchen.

Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine belastbare Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der plasmabasierten Behandlung kontinuierlicher Carbonfaserrovings und tragen zur weiteren technologischen Entwicklung entsprechender Anlagenkonzepte bei.

III.4 Grenzen der Untersuchungen

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Entwicklungsarbeiten dienten vorrangig der Konzeption, Konstruktion und experimentellen Validierung einer Forschungsanlage. Entsprechend lag der Schwerpunkt des Teilvorhabens auf der Entwicklung und Optimierung der mechanischen Baugruppen sowie deren Integration in die bestehende Plasmaanlage.

Die erzielten Ergebnisse beziehen sich daher auf die im Projekt eingesetzten Materialien, Prozessparameter und Versuchsbedingungen. Änderungen einzelner Randbedingungen, beispielsweise hinsichtlich anderer Carbonfasertypen, Rovingfeinheiten oder Plasmaparameter, können Anpassungen der entwickelten Faserführung erforderlich machen. Aufgrund der bewusst modularen Konstruktion der Versuchsanlage können entsprechende Anpassungen jedoch mit vergleichsweise geringem konstruktivem Aufwand umgesetzt werden.

Darüber hinaus war das Ziel des Teilvorhabens nicht die Entwicklung einer industriellen Produktionsanlage, sondern die Bereitstellung einer reproduzierbaren Forschungsplattform. Die im Projekt entwickelten Komponenten wurden deshalb hinsichtlich Flexibilität und Anpassbarkeit optimiert. Für einen späteren industriellen Einsatz wären insbesondere

Aspekte wie Langzeitstabilität, Wartungsfreundlichkeit, Automatisierungsgrad sowie wirtschaftliche Fertigung weiter zu untersuchen.

Trotz dieser projektbedingten Randbedingungen zeigen die Ergebnisse, dass das entwickelte Anlagenkonzept die wesentlichen Anforderungen an eine wissenschaftliche Versuchsanlage erfüllt und eine belastbare Grundlage für weiterführende Entwicklungsarbeiten darstellt.

III.5 Schlussfolgerungen für zukünftige Entwicklungen

Die Ergebnisse des Vorhabens verdeutlichen, dass die mechanische Führung kontinuierlicher Carbonfaserrovings einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität plasmabasierter Oberflächenbehandlungen besitzt. Zukünftige Entwicklungsarbeiten sollten daher die konstruktive Auslegung der Faserführung bereits frühzeitig als integralen Bestandteil der Prozessentwicklung berücksichtigen.

Die entwickelte modulare Versuchsanlage bietet hierfür eine geeignete Grundlage. Durch den flexiblen Aufbau können zukünftige Untersuchungen unterschiedliche Walzengeometrien, Luftführungskonzepte oder Prozessparameter ohne grundlegende Änderungen an der Gesamtanlage integrieren. Dadurch eignet sich die entwickelte Anlage sowohl für weiterführende Forschungsarbeiten als auch für die schrittweise Überführung der gewonnenen Erkenntnisse in praxisnahe Anwendungen.

Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt kann in der weitergehenden Automatisierung der Prozessführung liegen. Hierzu zählen beispielsweise die kontinuierliche Überwachung des Faserverlaufs, die automatische Regelung der Faserspannung sowie die adaptive Anpassung einzelner Prozessparameter während des Anlagenbetriebs. Die im Projekt entwickelte Konstruktion schafft hierfür die notwendigen konstruktiven Voraussetzungen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse des Teilvorhabens, dass die entwickelte Faserführungsanlage eine geeignete Basis für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten darstellt. Gleichzeitig wurden wesentliche konstruktive und prozesstechnische Zusammenhänge identifiziert, welche über den unmittelbaren Projektumfang hinaus für die Weiterentwicklung plasmabasierter Behandlungssysteme von Bedeutung sind.

IV Vergleich mit Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

IV.1 Vergleich mit der ursprünglichen Arbeitsplanung

Die Durchführung des Teilvorhabens orientierte sich grundsätzlich an der im Projektantrag vorgesehenen Arbeitsplanung. Die wesentlichen Entwicklungsziele konnten im Verlauf der Projektbearbeitung erreicht werden. Hierzu zählen insbesondere die Entwicklung eines modularen Faserführungsmoduls, die Konstruktion und experimentelle Untersuchung verschiedener Umlenk- und Spreizsysteme sowie die erfolgreiche Integration der entwickelten Baugruppen in die Plasmaanlage.

Im Projektverlauf ergaben sich einzelne Anpassungen der Reihenfolge verschiedener Entwicklungsarbeiten. Ursache hierfür waren insbesondere Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Arbeitspaketen des Verbundvorhabens. Da die endgültige Plasmaquelle zu Beginn der Arbeiten noch nicht vollständig zur Verfügung stand, wurden zunächst alternative Versuchsaufbauten entwickelt und experimentell untersucht. Die hierfür konstruierten Komponenten ermöglichten es, bereits in einer frühen Projektphase wesentliche Erkenntnisse über die Anforderungen an die spätere Faserführung zu gewinnen.

Die veränderte Reihenfolge einzelner Arbeitsschritte hatte keinen negativen Einfluss auf die Erreichung der Projektziele. Im Gegenteil konnten die zusätzlichen Voruntersuchungen frühzeitig wichtige konstruktive Randbedingungen identifizieren, welche anschließend unmittelbar in die Entwicklung der Faserführungsanlage einflossen.

Die iterative Vorgehensweise erwies sich dabei als besonders vorteilhaft. Anstelle einer einmaligen Konstruktion wurde die Versuchsanlage kontinuierlich anhand der experimentellen Ergebnisse weiterentwickelt. Dadurch konnten Optimierungspotenziale bereits während der Projektlaufzeit erkannt und umgesetzt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die ursprünglich definierten Arbeitspakete erfolgreich bearbeitet wurden. Abweichungen betrafen überwiegend die zeitliche Reihenfolge einzelner Entwicklungsschritte und ergaben sich aus den technischen Anforderungen des Gesamtprojektes sowie den Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen.

IV.2 Zeitplanung

Die Bearbeitung des Teilvorhabens erfolgte über die gesamte Projektlaufzeit hinweg entsprechend den Anforderungen des Verbundvorhabens. Wie bei Forschungs- und Entwicklungsvorhaben dieser Art üblich, machte der iterative Entwicklungsprozess mehrfach konstruktive Anpassungen erforderlich. Hierdurch verschoben sich einzelne Arbeitsschritte innerhalb der Projektlaufzeit, ohne dass die Erreichung der Projektziele grundsätzlich gefährdet wurde.

Insbesondere die enge Verzahnung zwischen Konstruktion und experimenteller Untersuchung führte dazu, dass einzelne Entwicklungsschritte mehrfach durchlaufen wurden. Erkenntnisse aus den Versuchsreihen machten konstruktive Überarbeitungen erforderlich, welche anschließend erneut experimentell überprüft wurden. Diese iterative Vorgehensweise war wesentlicher Bestandteil des Entwicklungsprozesses und stellte keine Abweichung vom wissenschaftlichen Charakter des Vorhabens dar.

Durch die kontinuierliche Abstimmung zwischen den Projektpartnern konnten notwendige Anpassungen zeitnah umgesetzt werden. Hierdurch blieb die Bearbeitung des Teilvorhabens trotz einzelner Verschiebungen innerhalb des vorgesehenen Projektzeitraums zielgerichtet und effizient.

IV.3 Kostenplanung

Die im Teilvorhaben durchgeführten Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich auf die Konstruktion, Fertigung und experimentelle Optimierung der Versuchsanlage. Die hierfür eingesetzten personellen und materiellen Ressourcen entsprachen den Anforderungen eines iterativen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens.

Durch die modulare Auslegung der Versuchsanlage konnten zahlreiche konstruktive Änderungen ohne grundlegende Neufertigung des Gesamtsystems umgesetzt werden. Dies ermöglichte eine wirtschaftliche Durchführung der Entwicklungsarbeiten und reduzierte den Aufwand für spätere Anpassungen erheblich.

Die im Projekt entwickelten Komponenten wurden überwiegend als Prototypen gefertigt und dienten ausschließlich der wissenschaftlichen Untersuchung unterschiedlicher konstruktiver Lösungsansätze. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die kontinuierliche Weiterentwicklung der Versuchsanlage und leisteten einen wesentlichen Beitrag zur erfolgreichen Erreichung der Projektziele.

Insgesamt wurden die verfügbaren Ressourcen zielgerichtet eingesetzt, um die im Projekt definierten Entwicklungsziele zu erreichen und gleichzeitig eine hohe Flexibilität für die experimentelle Optimierung der Versuchsanlage sicherzustellen.

V Änderungen der Zielsetzung und des Arbeitsprogramms

V.1 Änderungen gegenüber der ursprünglichen Projektplanung

Die grundlegende Zielsetzung des Teilvorhabens blieb während der gesamten Projektlaufzeit unverändert. Ziel war die Entwicklung eines Faserführungsmoduls zur reproduzierbaren Führung und Spreizung kontinuierlicher Carbonfaserrovings innerhalb einer Plasmaanlage. Dieses Ziel wurde während des gesamten Projektes konsequent verfolgt.

Im Verlauf der Bearbeitung ergaben sich jedoch Anpassungen innerhalb der Reihenfolge einzelner Entwicklungsarbeiten. Ursache hierfür waren insbesondere neue Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen sowie technische Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Arbeitspaketen des Verbundvorhabens. Diese Anpassungen entsprachen dem Charakter eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens und ermöglichten eine zielgerichtete Weiterentwicklung der Versuchsanlage.

Bereits in einer frühen Projektphase wurde deutlich, dass die ursprünglich vorgesehenen konstruktiven Lösungen auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse weiterentwickelt werden mussten. Insbesondere die Untersuchungen zur Gasdurchdringung des Carbonfaserrovings führten zu einer Neubewertung der Anforderungen an die spätere Faserführung. Hieraus ergab sich die Notwendigkeit, den Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten stärker auf die gezielte Faserspreizung sowie die Optimierung der Luftführung zu legen.

Darüber hinaus wurden verschiedene zusätzliche konstruktive Arbeiten durchgeführt, welche ursprünglich in diesem Umfang nicht vorgesehen waren. Hierzu zählten insbesondere die Entwicklung der Inertgaskammer, die konstruktive Unterstützung bei der Entwicklung der Faserdurchführung sowie die Fertigung verschiedener Versuchskomponenten für die experimentellen Untersuchungen. Diese Arbeiten unterstützten das Gesamtprojekt wesentlich und lieferten gleichzeitig wichtige Erkenntnisse für die spätere Entwicklung des Faserführungsmoduls.

Die vorgenommenen Anpassungen führten nicht zu einer Änderung der grundlegenden Projektziele, sondern dienten der besseren Erreichung der ursprünglich definierten Entwicklungsziele. Sämtliche Änderungen erfolgten auf Grundlage der während des Projektes gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse und wurden in enger Abstimmung mit den Projektpartnern umgesetzt.

V.2 Bewertung der Projektanpassungen

Die während der Projektlaufzeit vorgenommenen Anpassungen verdeutlichen den iterativen Charakter technologischer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Anders als bei rein konstruktiven Entwicklungsprojekten entstehen wesentliche Erkenntnisse häufig erst während der experimentellen Untersuchungen und führen anschließend zu einer gezielten Weiterentwicklung der technischen Lösungen.

Im vorliegenden Projekt erwies sich dieses Vorgehen als besonders erfolgreich. Durch die kontinuierliche Rückkopplung zwischen Konstruktion und experimenteller Untersuchung konnten Optimierungspotenziale frühzeitig erkannt und unmittelbar umgesetzt werden. Gleichzeitig wurden Fehlentwicklungen vermieden, da sämtliche konstruktiven Änderungen experimentell überprüft und anschließend bewertet wurden.

Die hohe Flexibilität der entwickelten Versuchsanlage unterstützte diesen Entwicklungsprozess wesentlich. Aufgrund der modularen Konstruktion konnten einzelne Baugruppen unabhängig voneinander verändert, ersetzt oder erweitert werden. Dadurch war es möglich, neue konstruktive Ansätze ohne grundlegende Änderungen am Gesamtsystem zu untersuchen.

Rückblickend kann festgestellt werden, dass die im Projekt vorgenommenen Anpassungen einen wesentlichen Beitrag zur erfolgreichen Erreichung der Projektziele geleistet haben. Die iterative Vorgehensweise ermöglichte eine kontinuierliche Verbesserung der Versuchsanlage und führte zu einem deutlich höheren technologischen Reifegrad der entwickelten Konstruktion.

VI Ergebnisse Dritter

Während der Projektlaufzeit sind der 3win Maschinenbau GmbH keine weiteren Forschungs- und Entwicklungsergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Teilvorhabens wesentlich oder unmittelbar relevant gewesen wären.

Die im Bericht dargestellten Ergebnisse beruhen auf den innerhalb des Verbundvorhabens durchgeführten Arbeiten sowie auf der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Externe Ergebnisse, die eine Änderung der Zielsetzung, der technischen Vorgehensweise oder der konstruktiven Auslegung des Faserführungsmoduls erforderlich gemacht hätten, lagen nicht vor.

Eine Anpassung des Arbeitsprogramms aufgrund neuer Erkenntnisse Dritter war daher nicht erforderlich.

VII Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse

VII.1 Wissenschaftliche und technische Verwertbarkeit

Im Rahmen des Teilvorhabens wurde eine modulare Faserführungsanlage entwickelt, die die reproduzierbare Führung und Spreizung kontinuierlicher Carbonfaserrovings während einer plasmabasierten Oberflächenbehandlung ermöglicht. Die im Projekt entwickelten konstruktiven Lösungen bilden eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Oberflächenmodifizierung von Carbonfasern.

Die entwickelte Versuchsanlage ermöglicht die Untersuchung unterschiedlicher Prozessparameter sowie die experimentelle Bewertung neuer konstruktiver Lösungsansätze. Aufgrund ihres modularen Aufbaus können einzelne Baugruppen unabhängig voneinander angepasst oder weiterentwickelt werden. Dadurch steht eine flexible Forschungsplattform zur Verfügung, welche auch für zukünftige Entwicklungen im Bereich plasmabasierter Behandlungstechnologien genutzt werden kann.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse leisten darüber hinaus einen Beitrag zum besseren Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Faserführung, Faserspreizung, Luftführung und Plasmabehandlung. Diese Zusammenhänge bilden eine wesentliche Grundlage für die weitere Optimierung entsprechender Anlagenkonzepte.

VII.2 Wirtschaftliche Verwertbarkeit

Die im Projekt entwickelten konstruktiven Lösungen besitzen grundsätzlich das Potenzial, in zukünftige Anlagenkonzepte zur plasmabasierten Behandlung kontinuierlicher Carbonfaserrovings übernommen zu werden. Insbesondere die entwickelte modulare Bauweise erleichtert die Anpassung an unterschiedliche Prozessanforderungen und schafft Voraussetzungen für eine spätere technische Weiterentwicklung.

Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses stand jedoch die Entwicklung und Validierung einer wissenschaftlichen Versuchsanlage im Vordergrund. Eine unmittelbare Überführung der entwickelten Konstruktion in eine industrielle Produktionsanlage war nicht Gegenstand des Teilvorhabens. Für eine spätere industrielle Umsetzung wären insbesondere Untersuchungen zur Langzeitstabilität, Prozessautomatisierung, Wirtschaftlichkeit und Skalierbarkeit erforderlich.

Die im Projekt entwickelten Lösungen bilden hierfür eine geeignete technische Grundlage und können als Ausgangspunkt für weiterführende Entwicklungsarbeiten dienen.

VII.3 Beitrag zum Verbundvorhaben

Mit der Entwicklung des Faserführungsmoduls konnte ein wesentlicher Beitrag zum Gesamtvorhaben GrafCarbon geleistet werden. Die entwickelte Versuchsanlage schuf die konstruktiven Voraussetzungen für die experimentellen Untersuchungen der Projektpartner und ermöglichte die reproduzierbare Durchführung plasmabasierter Behandlungsversuche an kontinuierlichen Carbonfaserrovings.

Die enge Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und wissenschaftlicher Untersuchung ermöglichte eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Versuchsanlage während der gesamten Projektlaufzeit. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse flossen unmittelbar in die Optimierung der Baugruppen ein und unterstützten die Erreichung der gemeinsamen Projektziele.

Die im Teilvorhaben entwickelten konstruktiven Lösungen stellen damit einen wesentlichen Bestandteil des Gesamtprojektes dar und bilden eine Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der plasmabasierten Oberflächenaktivierung von Carbonfasern.

VIII Zusammenfassung und Fazit

Das Teilvorhaben der 3win Maschinenbau GmbH hatte das Ziel, eine Faserführungsanlage für die plasmabasierte Behandlung kontinuierlicher Carbonfaserrovings zu entwickeln und konstruktiv umzusetzen. Im Mittelpunkt der Arbeiten stand die Entwicklung einer modular aufgebauten Versuchsanlage, welche eine reproduzierbare Führung empfindlicher Carbonfasern ermöglicht und gleichzeitig die Voraussetzungen für eine möglichst homogene Plasmabehandlung schafft.

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte als iterativer Entwicklungsprozess, bei dem konstruktive Entwicklung, Fertigung und experimentelle Untersuchung eng miteinander verknüpft wurden. Bereits während der frühen Projektphase zeigte sich, dass zahlreiche Zusammenhänge zwischen Faserführung, Luftführung und Plasmabehandlung erst durch praktische Untersuchungen vollständig bewertet werden konnten. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden kontinuierlich in die Weiterentwicklung der Versuchsanlage übernommen und führten zu einer schrittweisen Optimierung sämtlicher Baugruppen.

Im Verlauf des Projektes wurden unterschiedliche Walzengeometrien entwickelt, gefertigt und experimentell untersucht. Die vergleichenden Untersuchungen zeigten den erheblichen Einfluss der konstruktiven Ausführung auf die Qualität der Faserspreizung sowie auf die Stabilität des gesamten Prozessablaufs. Darüber hinaus konnten durch die Entwicklung

angepasster Luftführungselemente und Abschirmungen die Strömungsverhältnisse innerhalb des Plasmabereiches gezielt verbessert werden.

Die erfolgreiche Integration sämtlicher Baugruppen in die Plasmaanlage bestätigte die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des entwickelten Anlagenkonzeptes. Die im Projekt entstandene Versuchsanlage ermöglicht reproduzierbare Untersuchungen plasmabasierter Oberflächenbehandlungen und stellt eine geeignete Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten dar.

Neben den konstruktiven Entwicklungen leistete das Teilvorhaben einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtvorhaben GrafCarbon. Durch die Bereitstellung einer geeigneten Faserführung konnten die wissenschaftlichen Untersuchungen der Projektpartner unter definierten und reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt werden. Gleichzeitig entstand eine modulare Forschungsplattform, welche zukünftige Entwicklungen auf diesem Gebiet unterstützt.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die Qualität plasmabasierter Oberflächenbehandlungen nicht ausschließlich von der Plasmaquelle selbst abhängt. Vielmehr beeinflusst die konstruktive Gestaltung der Faserführung den Behandlungserfolg in erheblichem Maße. Erst das abgestimmte Zusammenwirken von Faserspreizung, Luftführung, Walzengeometrie und Anlagenstruktur ermöglicht eine reproduzierbare Prozessführung.

Zusammenfassend konnten die im Teilvorhaben definierten Entwicklungsziele erreicht werden. Es wurde eine modulare und experimentell validierte Faserführungsanlage entwickelt, welche die Anforderungen an eine wissenschaftliche Versuchsanlage erfüllt und eine belastbare Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der plasmabasierten Oberflächenmodifizierung kontinuierlicher Carbonfaserrovings bildet.

Die Ergebnisse des Vorhabens leisten damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung innovativer Verfahren für die Herstellung leistungsfähiger Carbonfaserverbundwerkstoffe und schaffen gleichzeitig die konstruktiven Voraussetzungen für zukünftige Entwicklungen in Richtung industriell einsetzbarer Anlagenkonzepte.

Aachen, 26.06.2026

_____	_____
Ort, Datum	Dagmar Wirtz Geschäftsführung