M&A Dieterle GmbH

Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)

Zwischenbericht

ZIM-Projekt „SpreizSize“

„Entwicklung eines Herstellungsverfahren für Carbonfaserrovings mit niedrigem Flächengewicht bei gleichzeitigem Auftrag eines Sizings“

Förderkennzeichen:

ZF4558915P08

ZF 4215605PO8

Inhaltsverzeichnis

1 Beschreibung der Abarbeitung der Arbeitspakete sowie Begründung für signifikante inhaltliche, aufwandsmäßige und/oder zeitliche Abweichungen im Vergleich zur ursprünglichen Planung 3

2 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen und anderer wesentlicher Ergebnisse 5

2.1 Ergebnisse von AP 1 – Entwicklung von Konzepten zum Tauchspreizen von Carbonfasern 5

2.2 Ergebnisse von AP 2 und AP 3 - Entwicklung Tauchspreizmodul im Labormaßstab und Ermittlung von Prozessparametern und Charakterisierung der Fasereigenschaften im Labormaßstab 5

2.3 Ergebnisse von AP 4 – Entwicklung einer Pilotanlage bestehend aus dem Modul zum Tauchspreizen und anschließendem Trocknen und Wickeln 14

2.4 Ergebnisse von AP 5 19

2.5 Ergebnisse von AP 6 – Prozessauslegung zur Herstellung von Spread Tows im Pilotmaßstab 23

2.6 Ergebnisse von AP 7 – Validierung der Spread Tows entlang der weiteren Prozesskette bis zur Faserverbundherstellung 37

3 Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Projektziele oder die Zielsetzungen innerhalb des angegebenen Berichtszeitraumes gegenüber dem Antrag geändert (wenn ja: Be-gründung)? 51

4 Sind inzwischen von dritter Seite FuE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Projektes relevant sind (auch Darstellungen der aktuellen Informationsrecheren)? 52

5 Wie hat sich die Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner entwickelt? 53

1 Beschreibung der Abarbeitung der Arbeitspakete sowie Begründung für signifikante inhaltliche, aufwandsmäßige und/oder zeitliche Abweichungen im Vergleich zur ursprünglichen Planung

Im Folgenden werden die relevanten Ergebnisse des ersten Bearbeitungsjahres des Forschungsvorhabens vorgestellt und erläutert. Einen Überblick über die bearbeiteten Arbeitspakete liefert Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht über Arbeitspakete (AP) und Abarbeitung der AP

AP	Ziel AP	Bearbeitung	Zeitraum
AP 1	**Entwicklung von Konzepten zum Tauchspreizen von Carbonfasern**	**AP 1 erfolgreich abgeschlossen**	1 - 4
AP 2	**Entwicklung Tauchspreizmodul im Labormaßstab**	**AP 2 erfolgreich abgeschlossen**	2 - 9
AP 3	**Ermittlung von Prozessparametern und Charakterisierung der Fasereigenschaften im Labormaßstab**	**AP 3 erfolgreich abgeschlossen**	4 - 15
AP 4	**Entwicklung einer Pilotanlage bestehend aus dem Modul zum Tauchspreizen und anschließendem Trocknen und Wickeln**	**AP 4 erfolgreich abgeschlossen**	7 - 16
AP 5	**Inbetriebnahme der Pilotanlage**	**AP 5 erfolgreich abgeschlossen**	15 - 24
AP 6	**Prozessauslegung zur Herstellung von Spread Tows im Pilotmaßstab**	**AP 6 erfolgreich abgeschlossen**	15 - 21

AP	Ziel AP	Bearbeitung	Zeit-raum
AP 7	**Validierung der Spread Tows entlang der weiteren Prozesskette bis zur Faserver-bundherstellung**	**AP 7 erfolgreich abgeschlossen**	20 - 24

2 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen und anderer wesentlicher Ergebnisse

2.1 Ergebnisse von AP 1 – Entwicklung von Konzepten zum Tauchspreizen von Carbonfasern

Im Rahmen des ersten Arbeitspaketes wurden drei grundsätzliche Konzepte zum Spreizen ungesizter Carbonfasern aufgestellt und für die Betrachtung in den späteren Arbeitspaketen festgelegt:

1) Spreizen im Tauchbad bzw. Spreizen nasser Fasern
2) Luftspreizen ungesizter Fasern + anschließender Sizingauftrag
3) Stangenspreizen ungesizter Fasern + anschließender Sizingauftrag

Weiterhing wurden die in den folgenden Arbeitspakten verwendeten Materialien (Carbonfasern, Sizing) definiert und festgelegt.

Es wurden insgesamt 5 unterschiedliche ungesizte Fasern von 4 Herstellern getestet: Mitsubishi (12k), Dow Aksa (24k), Formosa Plastic (12k, 24k), SGL Carbon (50k).

2.2 Ergebnisse von AP 2 und AP 3 - Entwicklung Tauchspreizmodul im Labormaßstab und Ermittlung von Prozessparametern und Charakterisierung der Fasereigenschaften im Labormaßstab

Aufgrund der engen Zusammenarbeit bei den Arbeitsinhalten von AP 2 und AP 3 zwischen M&A Dieterle und ITA werden die Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeitspakete zusammen präsentiert.

Zunächst wurden die in AP 1 entwickelten Konzepte im Labormaßstab auf einer Testanlage untersucht (Abb. 1 und Abb. 2)

Abb. 1: Versuchsanlage bei M&A Dieterle zur Validierung und Bewertung des Faserspreizens und des Sizingauftrags

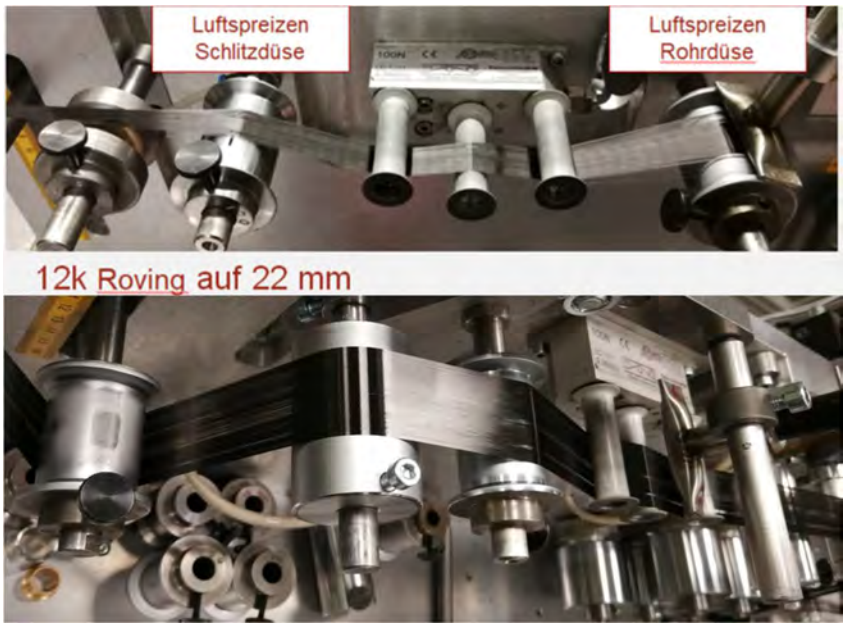

Abb. 2: Untersuchung verschiedener Spreizkonzepte auf der Versuchsanlage

In der folgenden Tabelle sind die sich ergebenden Vor- und Nachteile der einzelnen Konzepte dargelegt.

Tabelle 2: Konzepte zum Spreizen von Carbonfasern

	Luftspreizen (ungesizte Fasern)	Stangenspreizen (ungesizte Fasern)	Tauchspreizen
Vorteile	• Hoher Spreizgrad (> Faktor 6) • Einfaches Spreizprinzip • Geringer technischer Aufwand • Faserschonend	• Mittlerer Spreizgrad • Einfaches Spreizprinzip • Gleichmäßige Spreizung (Homogenisierung)	• Bauraumsparende Umsetzung

Nachteile	• Ungleichmäßige Aufspreizung	• Mittlerer technischer Aufwand • Faserschädigend bei hohen Spreizgraden	• Nasse Fasern sind sehr schlecht spreizbar • Spreizergebnis wird durch Einführungswinkel beeinflusst • Hohe Faserkräfte durch aufgrund der hohen Anzahl an Umlenkungen • Faserschädigung durch hohe Faserkräfte • Grad der Verunreinigung des Tauchmedium nicht sichtbar • Aufwendige Reinigung des Tauchmediums

Die Versuche an der Laboranlage zeigen, dass das Tauchspreizen prinzipiell funktioniert. Im Vergleich zu den anderen Konzepten ergeben sich jedoch erhebliche Nachteile. Feuchte Carbonfasern lassen sich aufgrund der erhöhten Reibwerte an den Spreizstangen schwerer aufspreizen. Dies ist sowohl im Tauchbad, als auch an der Luft der Fall. Durch die hohen Reibkräfte an den Umlenkrollen kommt es zu starken Faserschädigungen. Die Fasern wickeln sich daher vermehrt an den Umlenkrollen auf. Eine stabile Prozessführung kann so nur eingeschränkt gewährleistet werden. Zudem sind Verunreinigungen an den Umlenkrollen aufgrund des milchigen Tauchbads nur schwer zu erkennen. Ein schnelles Eingreifen bei Fehlern (Umwicklungen an Spreizstangen) ist daher nicht möglich. Durch den erhöhten Faserabrieb im Tauchbad kommt es zudem zu einer starken Verunreinigung selbigen. Die Reinigung des Tauchbads gestaltet sich sehr aufwendig. Abschließend überwiegen die Nachteile, den Vorteil, der Einsparung zusätzlichen Bauraums.

Im Vergleich ist das Luftspreizprinzip an ungesizten Carbonfasern besonders faserschonend. Es ergibt sich im Vergleich zum Luftspreizen gesizter Carbonfasern ein sehr hoher Spreizgrad von Faktor ≥ 6. Nachteil dieses Konzepts ist eine ungleichmäßige Spreizung der Carbonfaser (Abb. 3).

Abb. 3: Luftspreizen ungesizter Carbonfasern

Wie in Abb. 3 zu erkennen ist, entstehen leichte Gassen im Spread Tow. Im Rahmen der Vorversuche wurden unterschiedliche Düsengeometrien entwickelt und getestet um ein möglichst gleichmäßiges Spreizbild zu erhalten.

Beim Stangenspreizprinzip werden die ungesizten Carbonfasern sehr gleichmäßig bei einem mittleren Spreizgrad aufgespreizt. Die Faserschädigung ist im Vergleich zum Spreizen gesizter Fasern größer, liegt jedoch ebenfalls in einem vertretbaren Rahmen. Weiterhin hängt die Faserschädigung stark von der aufgebrachten Faserkraft ab. Hohe Faserkräfte sind daher zu vermeiden. Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden ebenfalls unterschiedliche Rollenoberflächen und Rollentypen miteinander verglichen. Besonders faserschonend ist eine Kombination aus mitlaufenden Rollen aus gehärtetem Stahl.

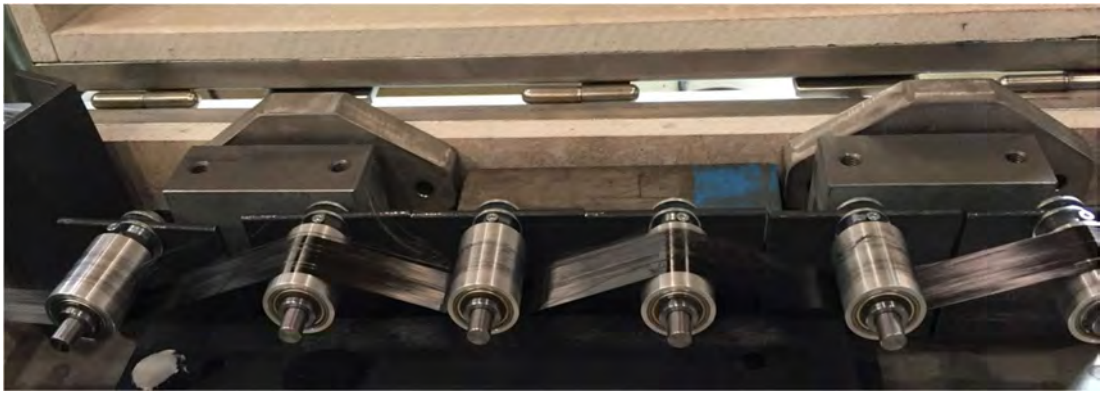

Abb. 4: Spreizergebnis auf der Prototypenanlage

Aufgrund der äußerst positiven Spreizergebnisse an den ungesizten Carbonfasern wird ein modifiziertes Konzept aus einer Kombination von Luft- und Stangenspreizen entwickelt. Mittels des Luftspreizverfahren wird die Faser zunächst mit einem hohen Spreizgrad faserschonend aufgespreizt. Anschließend wird die Spreizung der Carbonfaser durch ein Stangenspreizsystem homogenisiert und mögliche Gassen im Spread Tow ausgeglichen. Da die Fasern bereits

vorgespreizt sind, sind hier nur geringe Kräfte die auf die Faser wirken, nötig. Aufgrund der zahlreichen Nachteile des Tauchspreizprinzips wird dieser Ansatz nicht weiterverfolgt. Da die Faser beim Sizingauftrag mit dem modifizierten Konzept (Kombination aus Luft- und Stangenspreizen) bereits gespreizt ist, ergeben sich die im Antrag beschriebenen Vorteile. Zum Auftrag des Sizings auf die gespreizte Faser werden zwei unterschiedliche Auftragsarten in Betracht gezogen (Abb. 5).

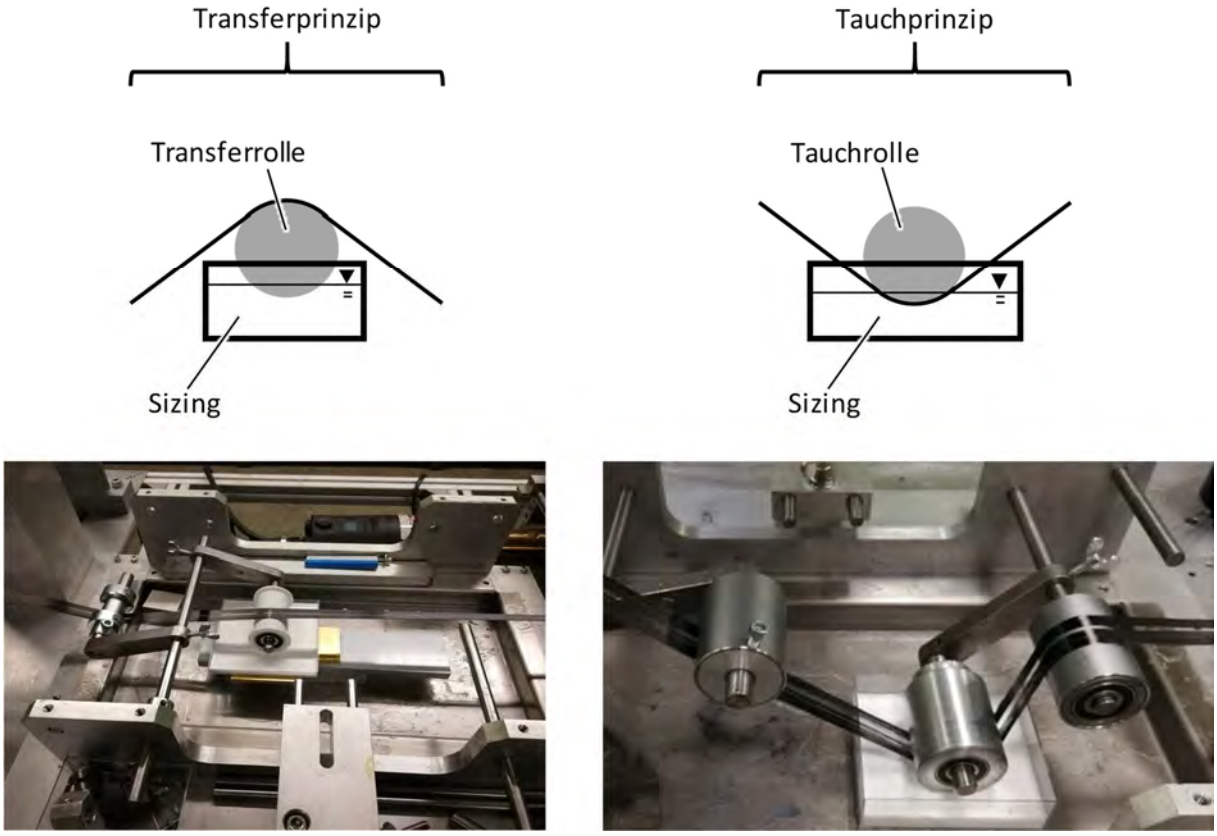

Abb. 5: Prinzip des Sizingauftrags schematisch (oben) und real auf der Versuchsanlage (unten)

Bei der ersten Auftragsart handelt es sich um das Transferprinzip, bei dem das Sizing über eine mitlaufende Rolle (Transferrolle) auf die Fasern aufgetragen wird. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Menge des aufgetragenen Sizings über die Oberflächeneigenschaften der Transferrolle eingestellt werden kann. Im Rahmen der Vorversuche werden drei unterschiedliche Oberflächen untersucht:

1) Aluminium
2) Kunststoff
3) Gummi

Die Thermogravimetrischen Analyse (TGA) der gesizten Faserproben ergeben, dass die Menge des Sizingauftrags beim Transferprinzip mithilfe von Aluminium- und Gummirollen

identisch ist. Durch den Einsatz einer Kunststoffrolle verringert sich der Sizinganteil um 33 % (Abb. 6). Die Ergebnisse verdeutlichen den Zusammenhang aus Oberflächenmaterial zu Sizingauftrag.

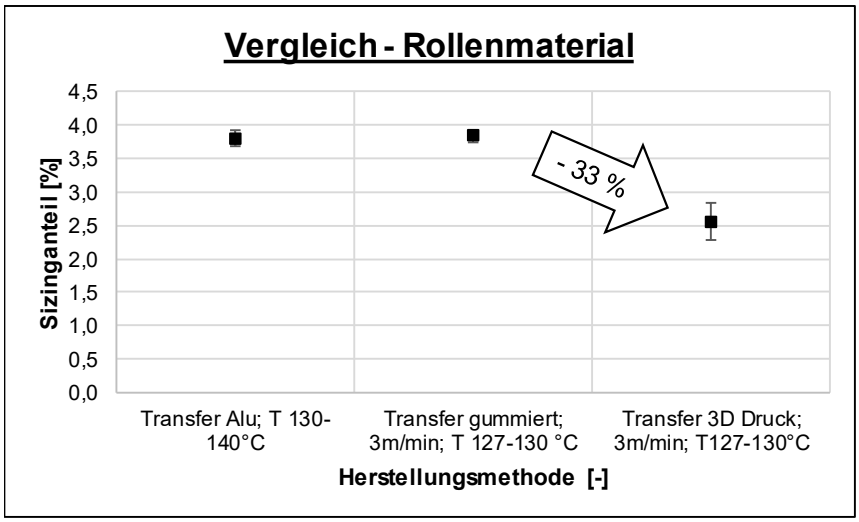

Abb. 6: Vergleich unterschiedlicher Rollenmaterialien für den Sizingauftrag

Weiterhin wurde im Rahmen von Laborversuchen das Tauchprinzip untersucht. Beim Tauchprinzip wird die aufgespreizte Faser mithilfe einer Tauchrolle durch das Sizing geführt. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass im Vergleich zum Transferprinzip eine deutlich höhere Menge an Sizing aufgetragen wird (maximaler Auftrag). Die Länge der Eintauchstrecke spielt aufgrund der niedrige Viskosität des Sizings keine signifikante Rolle. Der Vergleich der beiden Auftragsarten in (Abb. 7) zeigt, dass der Sizinganteil des Spread Tows mit einer Tauchbehandlung im Vergleich zum Transferauftrag um 317 % gestiegen ist.

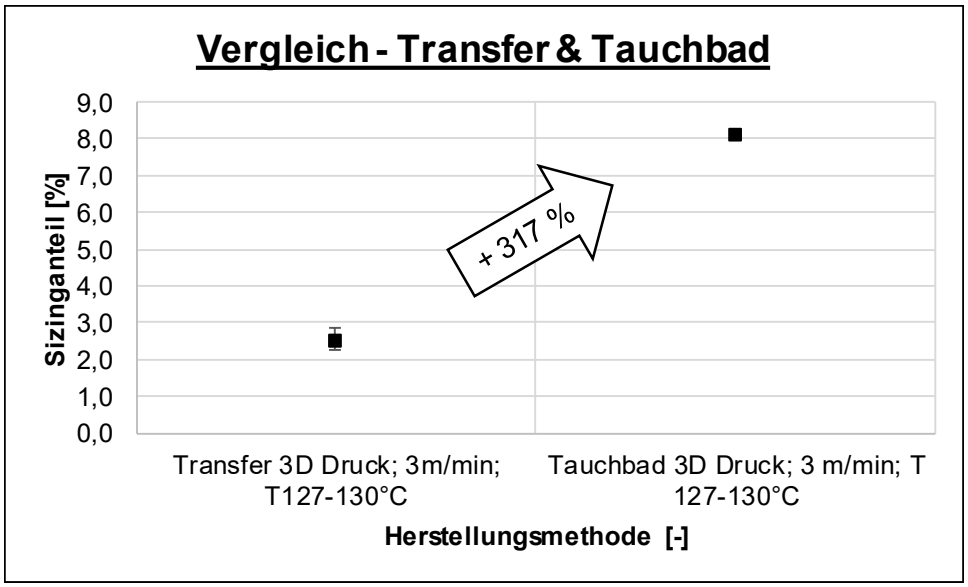

Abb. 7: Vergleich unterschiedlicher Auftragsarten für den Sizingauftrag

Weiterhin wurde der Einfluss der Sizingkonzentrationen auf die Menge des aufgetragenen Sizings bestimmt. Abb. 8 verdeutlich, dass die aufgetragene Sizingmenge stark von der Sizingkonzentration abhängt. Eine direkte Korrelation ist jedoch nicht zu erkennen.

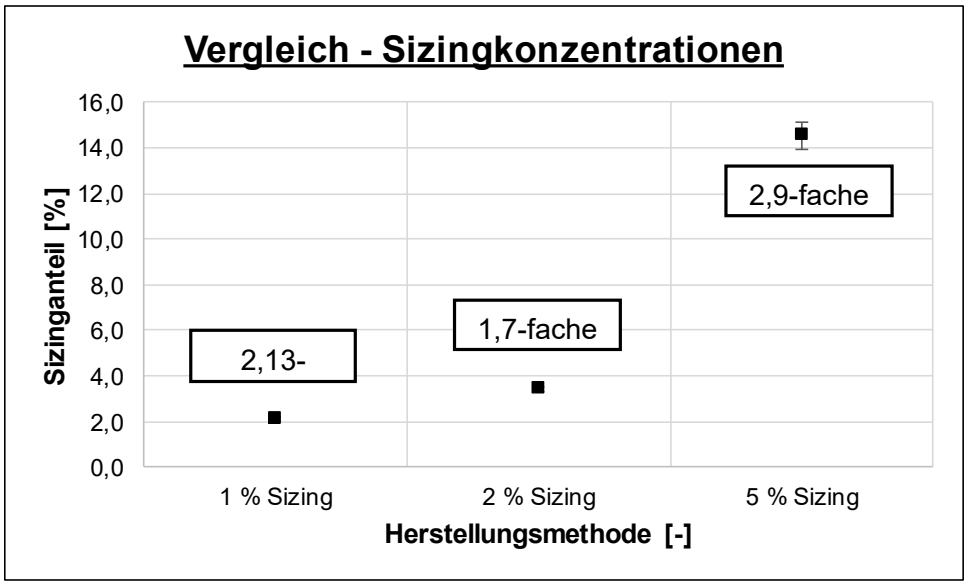

Abb. 8: Vergleich unterschiedlicher Auftragsarten für den Sizingauftrag

Zur Trocknung der Fasern wurde in den Laborversuchen ein Umluftofen benutzt. Zur Bestimmung der maximalen Trocknungstermperatur und Auslegung der Ofendimension für die Technikumsanlage werden Versuche mit unterschiedlichen Trocknungstemperaturen durchgeführt. Die Betrachtung des Sizinganteils der getrockneten Fasern zeigt, dass eine erhöhte Temperatur im Trocknungsofen zu einer Abnahme des Sizinganteils führt (Abb. 9). Das Sizing zersetzt sich. Dier Ergebnisse verdeutlichen, dass für jedes Sizing eine maximale Trocknungstemperatur bestimmt werden muss. Zur Bestimmung dieser kann eine Thermogravimetrischen Analyse verwendet werden. Hierzu wurden ebenfalls Messungen durchgeführt.

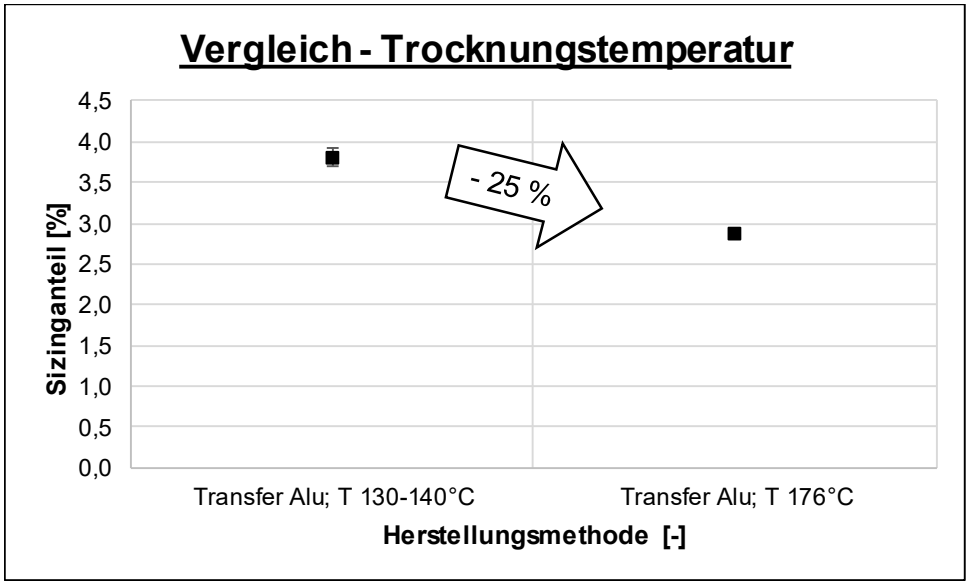

Abb. 9: Vergleich unterschiedlicher Trocknungstemperaturen

In einem weiteren Versuch wird der Einfluss der Sizingkonzentration auf die Trocknungsdauer ermittelt. Hierzu werden Sizingproben unterschiedlicher Sizingkonzentration und möglichst gleichem Volumen in der TGA verdampft. Die Ergebnisse in der folgenden Abbildung zeigen, dass die Sizingkonzentration keinen signifikanten Einfluss auf die Trocknungsdauer hat. Vielmehr wird die Trocknungsdauer durch die Sizingmenge (Gewicht der Probe) festgelegt.

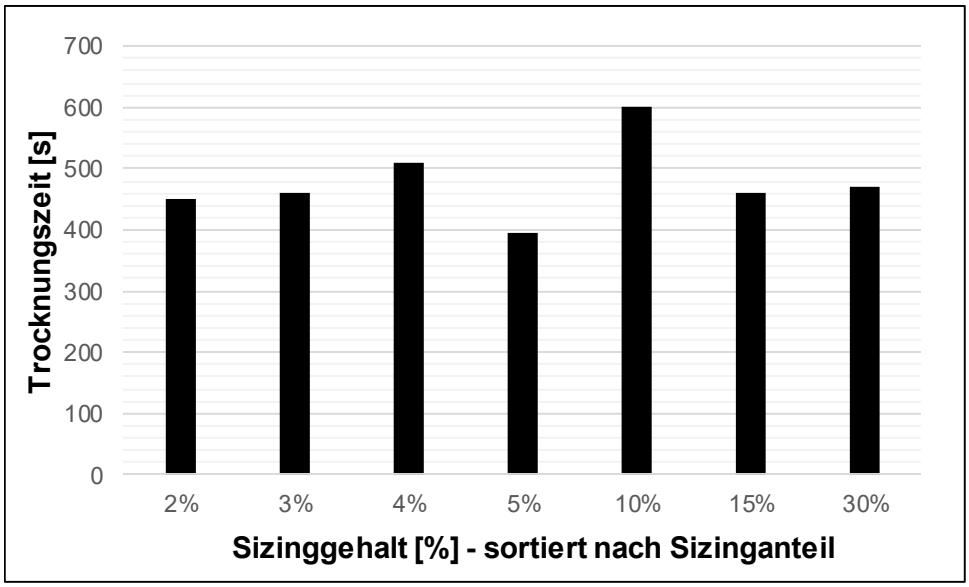

Abb. 10: Trocknungsdauer je nach Sizinganteil (sortiert nach Sizinganteil)

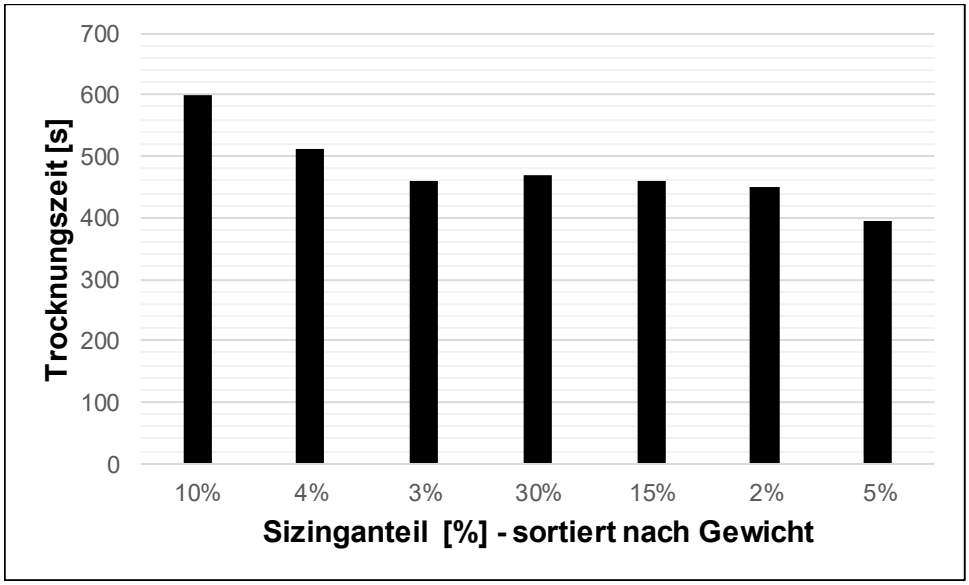

Abb. 11: Trocknungsdauer je nach Sizinganteil (sortiert nach Gewicht)

Zusammenfassend zeigen die Versuche zur Trocknung, dass eine möglichst geringe Sizingmenge mit einer hohen Sizingkonzentration zu einer ideal schnellen Trocknung führt.

Die Meilensteine M2 und M3 sind somit erfolgreich abgeschlossen. Mithilfe einer Testanlage wurde ein neues Anlagenkonzept inklusive Spreizkonzept entwickelt, bei dem die Prinzipien der Luft- und Stangenspreizung kombiniert werden. Die Entwicklung des ursprünglich geplanten Tauchspreizmodul wird aufgrund der zahlreichen Nachteile nicht weiterverfolgt. Nachfolgend wird der Entwurf der Pilotanlage gezeigt (Abb. 12).

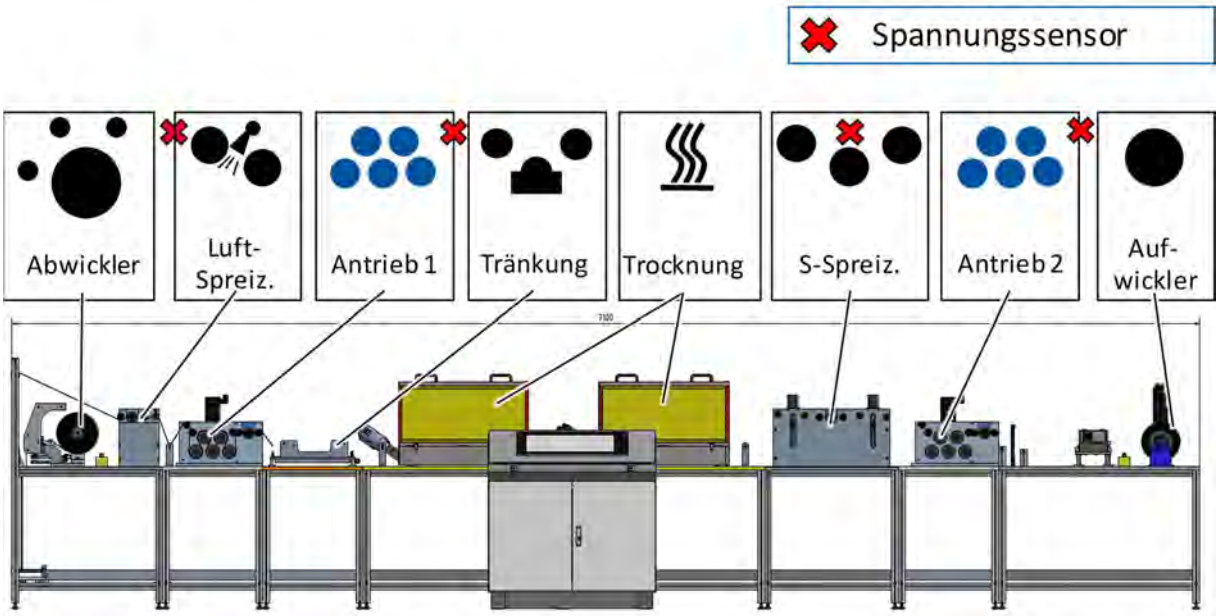

Abb. 12: Erste Skizze der Pilotanlage mit einem kombinierten Einsatz des Luft- und Stangenspreizprinzips

2.3 Ergebnisse von AP 4 – Entwicklung einer Pilotanlage bestehend aus dem Modul zum Tauchspreizen und anschließendem Trocknen und Wickeln

Die Entwicklung der Pilotanlage wurde in zwei Stufen durchgeführt.

Erste Entwicklungsstufe

In einer ersten Entwicklungsstufe wurde die Pilotanlage nach den in AP 2 und AP3 entwickelten Anlagenkonzept umgesetzt und anschließend durch Versuche an der Anlage validiert.

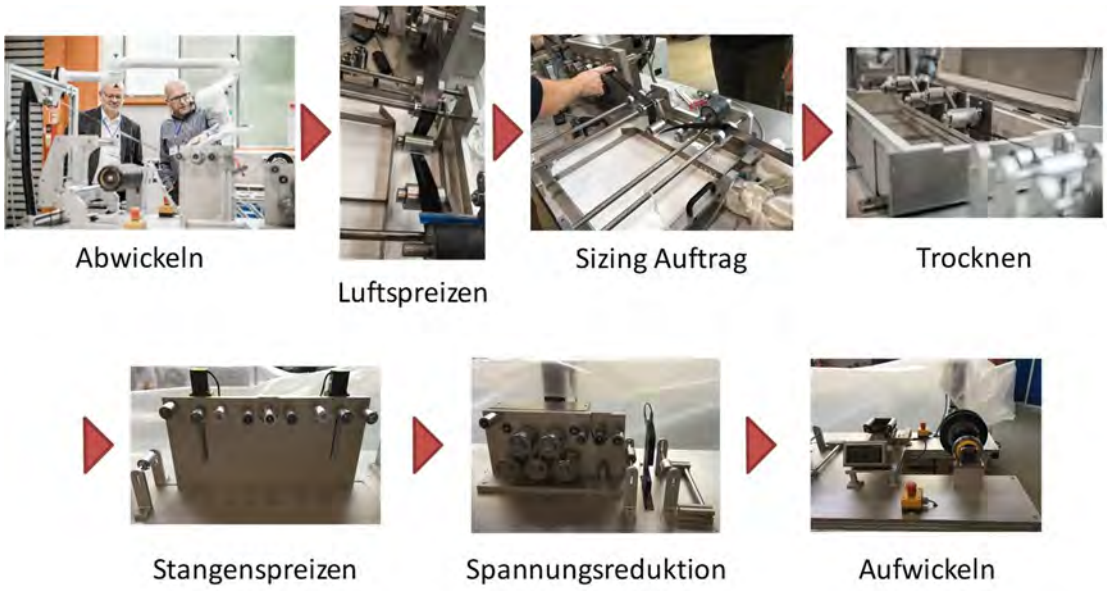

Abb. 13: Einzelne Module der Pilotanlage 1.0

Nachfolgend werden die Stärken und Schwächen der einzelnen Module der Pilotanlage der ersten Entwicklungsstufe tabellarisch aufgeführt:

Tabelle 3: Bei der Inbetriebnahme beobachtete Stärken und Schwächen der Einzelmodule der Pilotanlage in der ersten Entwicklungsstufe

Modul	Stärken	Schwächen
Abwickler	• Kein Verdrehen der Faser • Keine Faserschädigung bei der Abwicklung	• Spannungsschwankungen beim Abwickeln • Zu hohe Abwickelspannung (ungeregelt 7 N; gebremst 35 N) für Luftspreizeinheit
Luftspreizung	• Hoher Spreizgrad mittels Luftspreizung (> Faktor 6) • Niedrige Drücke möglich	• Spannung an Luftspreizposition zu hoch (< 2 N wird benötigt) • Aussage über Dauerbetrieb aufgrund Spannungsschwankungen (Abwickler) nicht möglich
Omegaantriebe	• Spreizgrad bleibt über Antrieb erhalten • Fast keine Faserschädigung	• Fasern rutschen bei hohen Kräften durch

Tränkung	• Spreizgrad bleibt im Sizingbecken erhalten • Wenig Faserschädigung • Quetschwalze statt Abstreifer reduziert Faserschädigung	• Getränkter Roving zieht sich außerhalb des Bades zusammen (Faserquerkontraktion)
Trocknung	• Trocknung von Wasser bei 3-4 m/min möglich (aufgespreizt) • Schnelle Aufheizung • Ausreichende Temperatur	• Freie Faserstrecke zu lang (Faserquerkontraktion)
Stangespreizung	• Wenig Faserschädigung am ungesizten Roving bei ca. 10 N • Mittlerer Spreizgrad (bis Faktor 2) • Ausgleich von Gassen in der gespreizten Faser	• Position hinter Tränkung und Trocknung • Keine reproduzierbare Positionierung der Spreizstangen • Höherer Abrieb an Topocrom im Vergleich zu gehärtetem Stahl
Aufwicklung	• Funktioniert einwandfrei	• -

Der Abwickler sorgt für eine faserschonende Abwicklung der Carbonfaser ohne Verdrehen. Jedoch schwankt die Faserspannung beim Abwickeln und die Abwickelspannung ist zu hoch für die anschließende Luftspreizung (benötigt werden < 2 N, es liegt aber > 7 N vor). Die Luftspreizung funktioniert bei niedrigen Drücken und bewirkt einen Spreizgrad von Faktor >6. Allerdings ist die Funktionalität der Luftspreizeinheit aufgrund der hohen Faserspannung, verursacht durch den Abwickler, eingeschränkt. Die eingesetzten Omegaantriebe gewähren eine faserschonende und konstant bleibende Breite der aufgespreizten Faser. Die Tränkung ermöglicht mittels Quetschwalze einen faserschonenden Sizingauftrag, bei dem der Spreizgrad im Becken erhalten bleibt. Allerdings zieht sich der getränkte Roving nach Verlassen des Sizingbads auf der langen Trocknungsstrecke wieder zusammen. Aufgrund des fehlenden Abflusses, ist es schwierig das verbrauchte Sizingmedium zu entsorgen. Bei Betrachtung der Trocknungseinheit fällt auf, dass das Wasser im Sizing auf den gespreizten Fasern bei Fasergeschwindigkeiten von 3-4 m/min getrocknet werden kann. Es wird eine ausreichende hohe Temperatur (min 130-140 °C) bei hoher Aufheizrate gewährleistet. Die freie Faserlänge in den beiden Trocknungsöfen der Pilotanlage ist allerdings zu lang. Dies führt zu einer ungewollten Faserquerkontraktion. Die Stangenspreizeinheit bewirkt bei wenig Faserschädigung einen mittleren Spreizgrad (bis Faktor 2). Zudem werden, wie im Vorversuch bereits beobachtet, Gassen in der gespreizten Faser ausgeglichen. Die Stangenspreizung weist einige Schwächen auf. Dazu gehört ihre ungünstige Positionierung hinter der Tränkung und Trocknung. Die Höhe der Spreizstangen kann nicht reproduzierbar eingestellt werden. Die Aufwicklungseinheit funktioniert in der ersten Entwicklungsstufe einwandfrei.

Zweite Entwicklungsstufe

Zur Behebung der beobachteten Mängel der Pilotanlage in AP 4 werden Anpassungen der einzelnen Module und ein Umbau der Pilotanlage in der zweiten Entwicklungsstufe vorgenommen. Anlehnend an Tabelle 3 werden die entsprechenden Maßnahmen zur Anpassung der Module der Pilotanlage in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Maßnahmen zur Anpassung der Module der Pilotanlage in der zweiten Entwicklungsstufe

Modul	Maßnahmen
Abwickler	• Einbau Antrieb am Abwickler • Einsatz von Lagern zur Abwicklung
Luftspreizung	• Einbau neuer Luftspreizdüsen
Omegaantriebe	• Erhöhung der Reibung gegen Durchrutschen der Faser bei hohen Kräften • Einbau eines dritten Antriebs nach dem Luftspreizmodul • Anpassung der Regelung
Tränkung	• Anpassung der Umlenkrollen an höhere Faserkräfte • Einbau eines Abflusses zur Entsorgung des Sizingmediums
Trocknung	• Einbau von Umlenkrollen zur Vermeidung der Faserquerkontraktion • Ermittlung des minimalen Rollenabstands zur Vermeidung der Faserquerkontraktion
Stangespreizung	• Umpositionierung der Stangenspreizeinheit nach Antrieb • Gewährleistung einer reproduzierbaren Höheneinstellung der Umlenkrollen • Einsatz neuer Walzen aus gehärtetem Stahl
Aufwicklung	-

Maßnahmen am Aufbau der Anlage werden in Abb. 14 aufgezeigt.

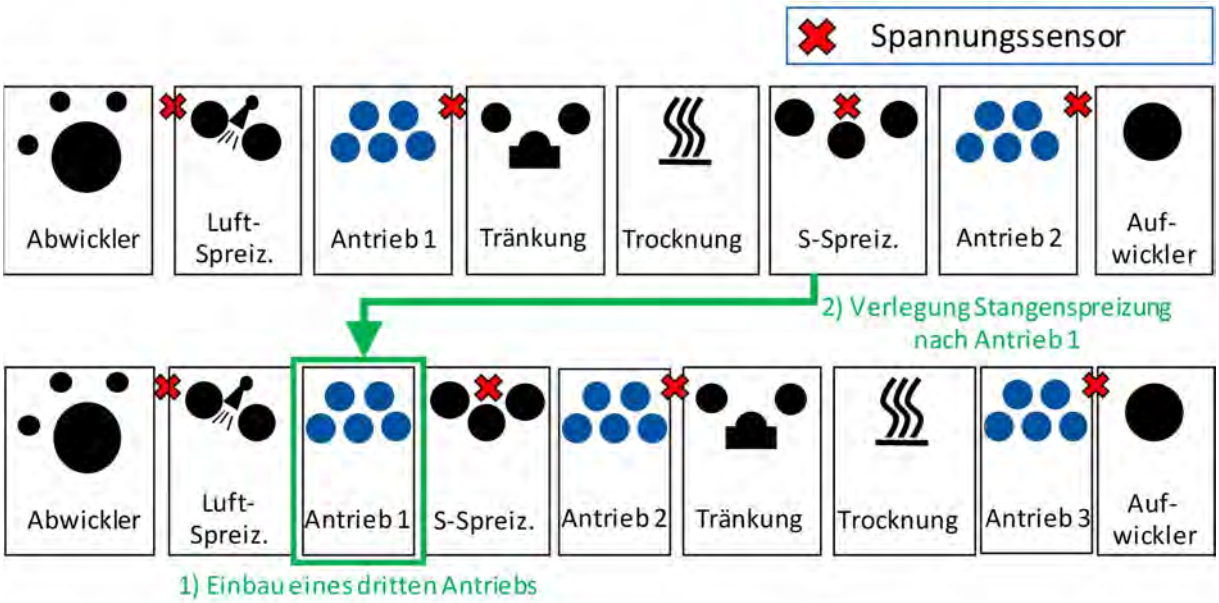

Abb. 14: Umbaumaßnahmen zur Optimierung der Pilotanlage

Der Abwickler muss zur Reduzierung der Fadenspannung (zur Gewährleistung der Luftspreizung) durch einen Motor angetrieben werden. Zudem werden neue Lager integriert, um die Carbonfaser abzuwickeln. Um dem Durchrutschen der Fasern bei hohen Kräften entgegenzuwirken, wird eine Oberflächenmodifikation der Antriebsrollen in Erwägung gezogen. Eine Gummierung der Rollen beim Omegaantrieb zeigt eine positive Wirkung zur Übertragung der eingestellten Faserspannung. Der Einbau eines zusätzlichen Antriebs (Abb. 14) wurde kurz vor Projektende umgesetzt und ermöglicht eine starke Reduzierung der Faserspannung beim Luftspreizmodul, welche sich positiv auf den Spreizgrad auswirkt. Die Stangenspreizeinheit wird direkt hinter das Luftspreizmodul gesetzt, da die Versuche an der ersten Entwicklungsstufe gezeigt haben, dass eine Homogenisierung an der ungesizten Faser besser funktioniert. Das Nachschalten der Stangenspreizung hinter die Luftspreizung ermöglicht somit eine zusätzliche Erhöhung des Spreizgrads sowie eine Homogenisierung der Faser.

Um weiterhin eine Querkontraktion der Faser auf der langen Trocknungsstrecke zu vermeiden, werden Umlenkrollen mit einem definierten Abstand in den Trocknungsofen eingebaut. In Laborversuche wurden hierzu die minimalen Rollenabstände, bei denen die Faserquerkontraktion vermieden wird, ermittelt. Abb. 15 zeigt hierzu den Aufbau für Vorversuche zur Ermittlung des minimalen Rollenabstands zur Vermeidung der Faserquerkontraktion beim Auftrag eines Sizings.

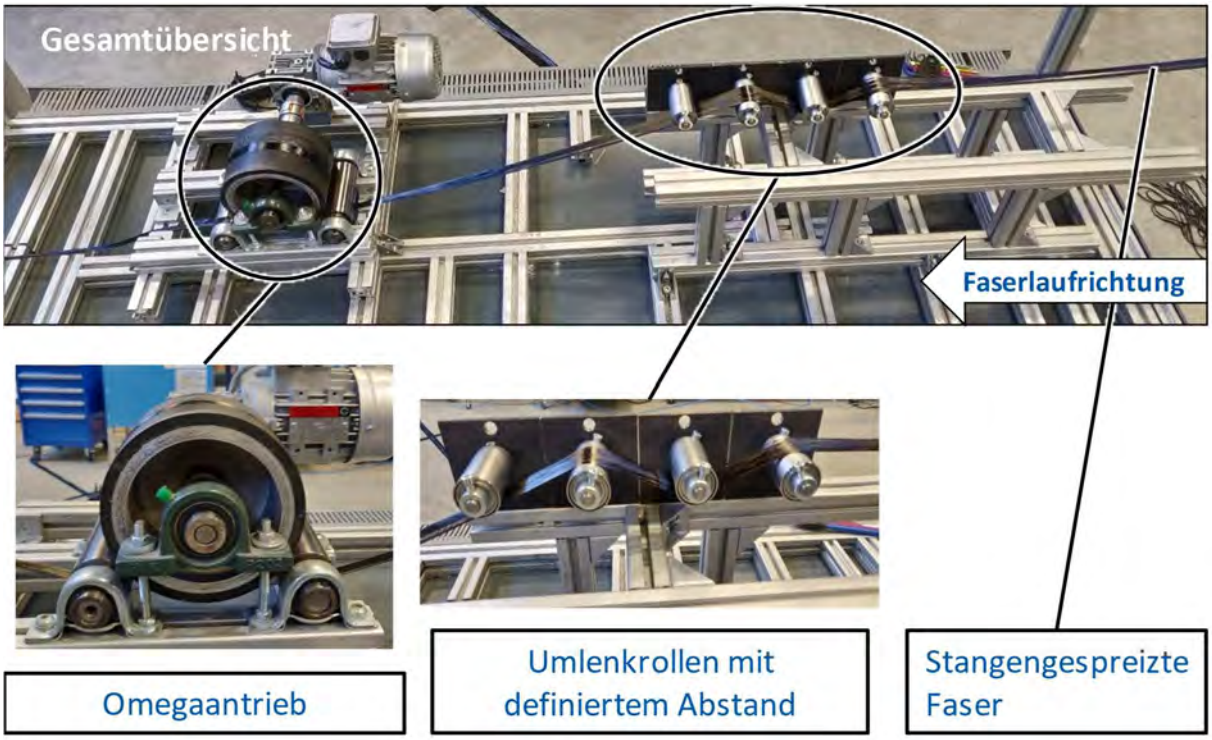

Abb. 15: Aufbau des Versuchsstands für Vorversuche zur Ermittlung des minimalen Rollenabstands zur Vermeidung der Faserquerkontraktion

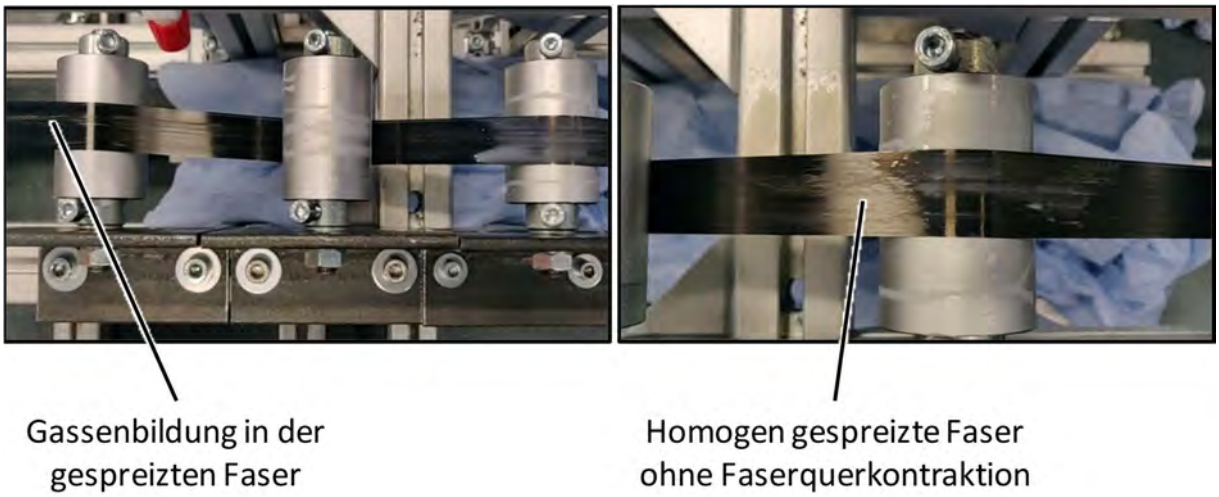

Abb. 16: Ergebnis der Vorversuche zur Ermittlung des minimalen Rollenabstands

Im Vorversuch wird eine Carbonfaser zunächst stangengespreizt und anschließend über ein Rollensystem mit definiertem Abstand geführt. Für den Antrieb sorgt ein Omegamotor (Abb. 15). Nach Erreichen eines stabilen Prozesses wird Sizing auf die laufende Spread Tow gesprüht. Die Parameter für den Vorversuch werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 5: Parameter für Vorversuche zur Ermittlung des minimalen Rollenabstands

Faserkraft F [N]	Rollenabstand L [mm]	
20	100	150
40	100	150

Die Ergebnisse des Vorversuchs werden in Abb. 16 dargestellt. Es ist zunächst zu erkennen, dass die Fasern beim Einlauf in das Rollensystem leichte Gassen aufweisen (Abb. 16, links). Diese werden bereits nach der ersten Umlenkrolle wieder ausgeglichen. Zudem ist zu erkennen, dass die Faser trotz Sizingauftrag bei allen untersuchten Faserkräften und Rollenabständen keine sichtbaren Änderungen der Faserbreite aufweisen. Der Rollenabstand wird zur Vermeidung der Faserquerkontraktion zunächst auf mindestens 100 mm festgelegt.

Die Umsetzung der zweiten Entwicklungsstufe wird derzeit durchgeführt und ist voraussichtlich zum Ende des Monats abgeschlossen. Anschließend erfolgt in AP5 die Inbetriebnahme der finalen Pilotanlage, sowie in AP 6 die Prozessauslegung.

2.4 Ergebnisse von AP 5

Inbetriebnahme der Pilotanlage 1.0

Die Pilotanlage 1.0 wurde in Betrieb genommen: Siehe Video für gemeinsame Versuche mit dem ITA auf der Pilotanlage unter https://www.dropbox.com/sh/7a79vuar1w6yp6a/AAAIPb4EJnjyZ6yBD6nXEuwLa?dl=0

Im Dez 2019 wurde die Pilotanlage gemäß den Versuchsergebnissen zur Anlage 2.0 umgebaut, so dass eine optimierte Prozessführung möglich ist.

Inbetriebnahme der Pilotanlage 2.0

Bei der Inbetriebnahme der Pilotanlage 2.0 wurden die wesentlichen Verbesserungen überprüft. In Tabelle 6 ist die Überprüfung der Ergebnisse der zweiten Entwicklungsstufe dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Inbetriebnahme der Anlage nach der zweiten Entwicklungsstufe

Modul	Maßnahmen	Ergebnis
Abwickler	• Einbau Antrieb am Abwickler • Einsatz von Lagern zur Abwicklung	• Antrieb eingebaut und Lager eingesetzt
Luftspreizung	• Einbau neuer Luftspreizdüsen	• Luftspreizdüsen müssen bei der Prozessauslegung spezifisch ausgelegt werden
Omegaantriebe	• Erhöhung der Reibung gegen Durchrutschen der Faser bei hohen Kräften • Einbau eines dritten Antriebs nach dem Luftspreizmodul • Anpassung der Regelung	• Durchrutschen bei der Inbetriebnahme nicht mehr auf: Maßnahmen nicht mehr notwendig • Antrieb nach Luftspreizen eingebaut • Regelung angepasst
Tränkung	• Anpassung der Umlenkrollen an höhere Faserkräfte • Einbau eines Abflusses zur Entsorgung des Sizingmediums	• Anpassung der Umlenkrollen durchgeführt • Entsorgungsschlauch eingebaut
Trocknung	• Einbau von Umlenkrollen zur Vermeidung der Faserquerkontraktion • Ermittlung des minimalen Rollenabstands zur Vermeidung der Faserquerkontraktion	• Umlenkrollen eingebaut (Mithilfe der Ergebnisse aus Vorversuchen) • Minimaler Abstand ermittelt
Stangenspreizung	• Umpositionierung der Stangenspreizeinheit nach Antrieb • Gewährleistung einer reproduzierbaren Höheneinstellung der Umlenkrollen • Einsatz neuer Walzen aus gehärtetem Stahl	• Umpositionierung der Stangenspreizung durchgeführt • Reproduzierbarkeit der Höheneinstellung gewährleistet • Einsatz von neuen Walzen nicht notwendig
Aufwicklung	-	-

Zur Reduzierung der Fadenspannung für die Luftspreizung, welche sich zwischen Abwickler und Antrieb 1 befindet, wurde ein Antrieb und entsprechende Lager für die Fadenführung am Abwickler eingebaut. Bereits bei der ersten Inbetriebnahme hat sich die Anpassung der Luftspreizdüse als sehr komplex herausgestellt, da hier sehr viele Faktoren berücksichtigt werden (Bsp: Gewährleistung einer laminaren Strömung, Strömungsgeschwindigkeit, Luftdruck, Position der Luftdüse usw.). Aus diesem Grund konnte die Arbeit zur Auslegung einer passenden Luftspreizdüse zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen werden. Die konstruktive Arbeit ist Teil von AP 6, deren Inhalte im nachfolgenden Unterkapitel vorgestellt werden. Vor der zweiten Inbetriebnahme wurden weitere Versuche durchgeführt. Es konnte kein Durchrutschen der Fasern mehr beobachtet werden. Aus diesem Grund ist diese Maßnahme überflüssig. Das Einbauen des zusätzlichen Antriebs ist jedoch durchgeführt worden. Hierzu ist die Regelungstechnik ebenfalls angepasst worden. Bei der Tränkung wurde ein Abflussschlauch

mit höherem Durchmesser und einem Ventil eingesetzt. Dieser gewährleistet das schnelle Abfließen von Restsizing, welches Faserfilamente enthält. Das Verstopfen des Schlauchs kommt nicht mehr vor. Zur Befestigung und Anpassung der Umlenkrollen der Tränkung an höhere Faserkräfte wird eine Metallstange eingesetzt, welche die zahlreichen Umlenkrollen befestigt (Abb. 17).

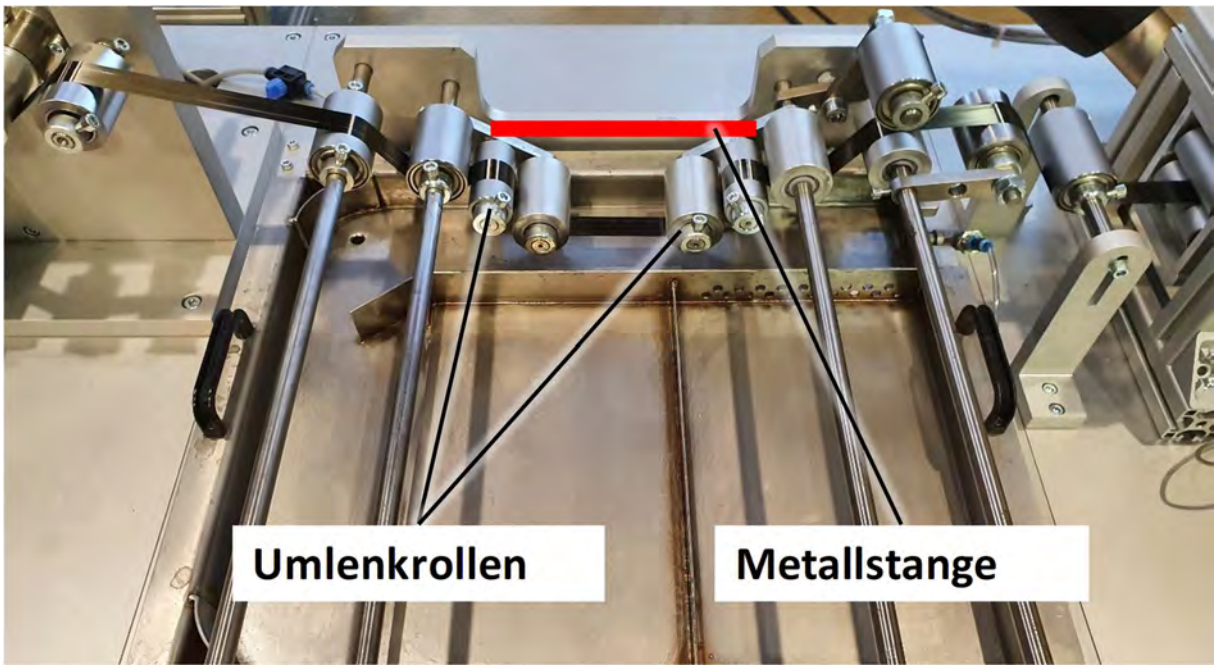

Abb. 17: Maßnahmen der zweiten Entwicklungsstufe zur Anpassung der Tränkung

Zur Vermeidung der Querkontraktion der mit Sizing getränkten Carbonfasern werden zahlreiche Rollen im Trocknungsofen eingesetzt (Abb. 18). Ein minimaler Abstand von ca. 50 bis 100 mm ist geeignet, um eine homogene Tapebreite zu gewährleisten.

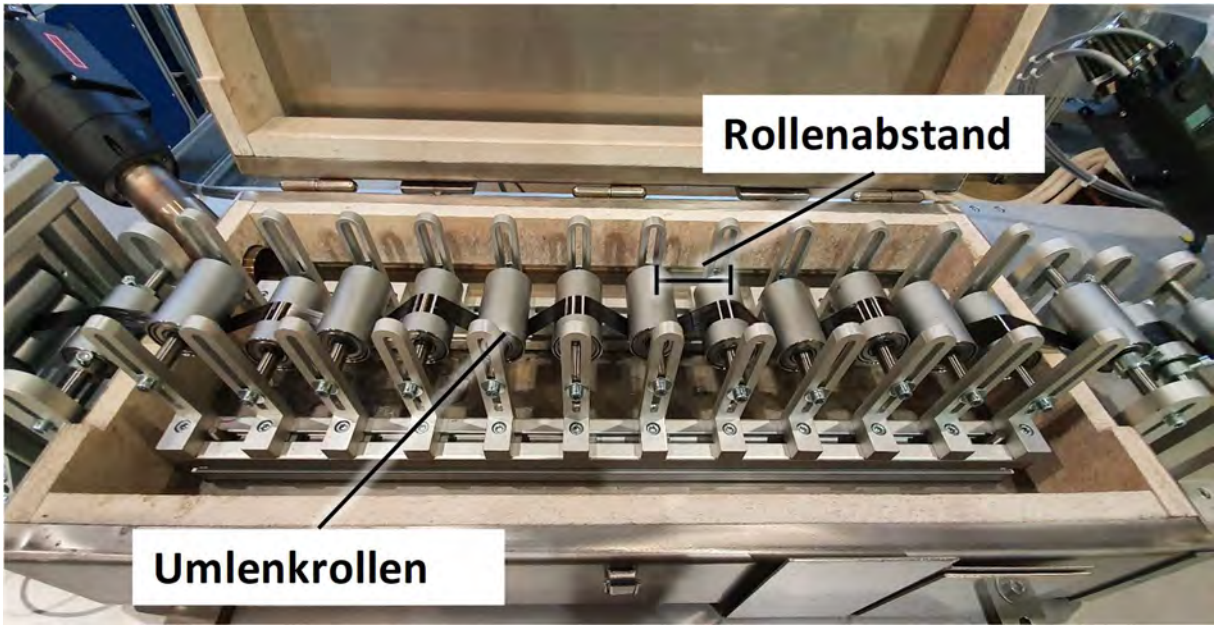

Abb. 18: Umlenkrollen im Trocknungsofen

Die Stangenspreizung wurde gemäß Abb. 14 umgebaut und befindet sich jetzt hinter dem Antrieb 1 direkt nach der Luftspreizung. Weiterhin ist die Höhe der Spreizstangen reproduzierbar. Dies wurde mithilfe von aufgeklebten Positionsmaßen ermöglicht. Der Einsatz bzw. Austausch der Spreizstangen ist nicht notwendig, da weitere Vorversuche gezeigt haben, dass die Carbonfasern nicht weiter gespreizt werden, falls Stangen mit polierten Oberflächen eingesetzt werden.

Inbetriebnahme am ITA

Zur Durchführung der AP 6 und 7 wird die SpreizSize-Anlage der zweiten Entwicklungsstufe ans ITA transportiert und dort Inbetrieb genommen. Die aufgestellte Anlage, sowie das dazugehörige Bedienpanel ist in Abb. 19 dargestellt.

Abb. 19: Inbetrieb genommene SpreizSize-Anlage am ITA

Neben dem elektrischen und dem pneumatischen Anschluss ist die Anlage weiterhin nach DGUV Vorschrift 3 elektrisch geprüft worden. Erste Prozessparameter (Tabelle 7) wurden abgeschätzt, um grundlegende Funktionen der Anlage zu überprüfen.

Tabelle 7: Erste Anlagenparameter, ermittelt bei der Inbetriebnahme

Modul	Abwickler	Antrieb1	Antrieb 2	Antrieb 3	Trocknungsofen	Gesamtanlage
Prozessparameter	Fadenspannung	Fadenspannung	Fadenspannung	Fadenspannung	Trocknungstemperatur	Anlagengeschwindigkeit
Wert	4 N	15 N	40 N	10 N	140 °C	5 m/min

2.5 Ergebnisse von AP 6 – Prozessauslegung zur Herstellung von Spread Tows im Pilotmaßstab

In diesem Arbeitspaket werden zwei Hauptaufgaben bearbeitet. Zunächst müssen eine an die Anlage angepasste Luftspreizdüse sowie die dazugehörige Luftspreizeinheit für den Dauerbetrieb ausgelegt werden. Nach diesem Schritt müssen geeignete Prozessparameter für den Dauerbetrieb ermittelt werden.

Auslegung der Luftspreizeinheit

Für die pneumatische Spreizung von unbeschlichteten Carbonfaser werden zwei Prinzipien ausgewählt. Zu diesen gehören das Anströmprinzip und das Ansaugprinzip (Abb. 20 und Abb.

21). Beim Anströmprinzip wird die unbeschlichtete Faser mittels Luft, welche aus einer speziellen Düse austritt, angeströmt und entweder durch die Erzwingung des Rovings zur Ausbildung eines Faserbogens oder durch Druckunterschiede innerhalb der Luftdüse gespreizt (Abb. 20). Beim Ansaugprinzip wird Luft oberhalb des Rovings mittels Unterdruck nach unten gesaugt. Beim Passieren der Luftströmung durch die unbeschlichteten Carbonfasern werden diese zur Ausbildung eines Faserbogens in Saugrichtung erzwungen. Wie beim Anströmprinzip wird bei der Ausbildung eines Faserbogens Querkräfte von der Rovingmitte nach außen hin erzeugt. Dadurch werden die Einzelfilamente gespreizt.

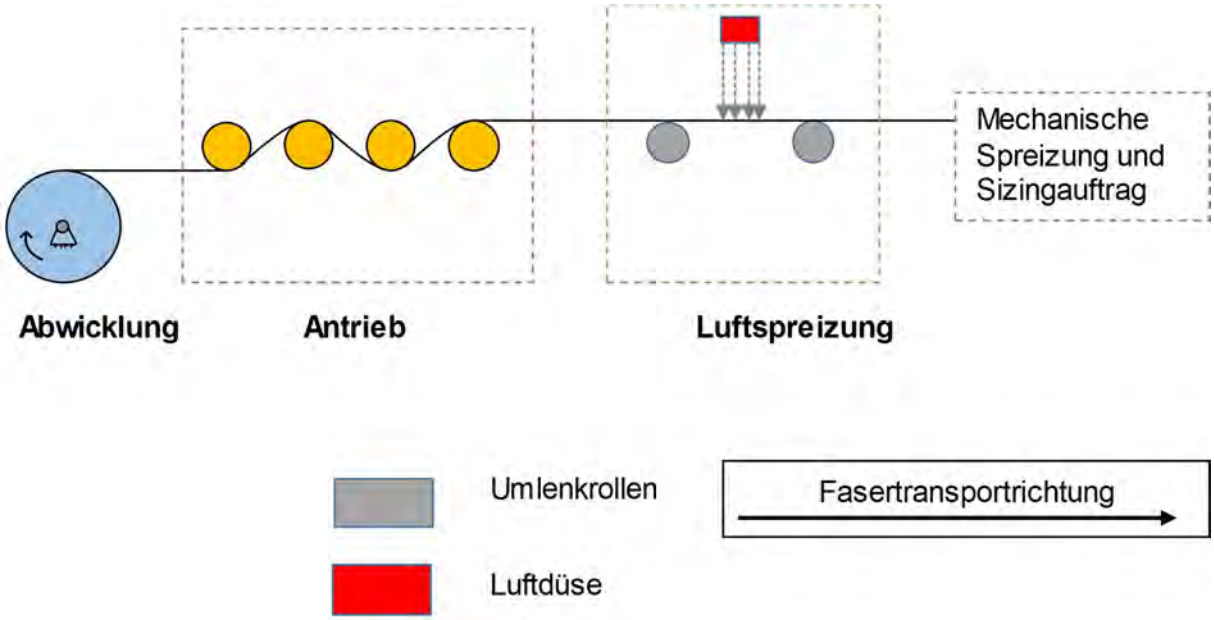

Abb. 20: Luftspreizung durch das Anströmprinzip

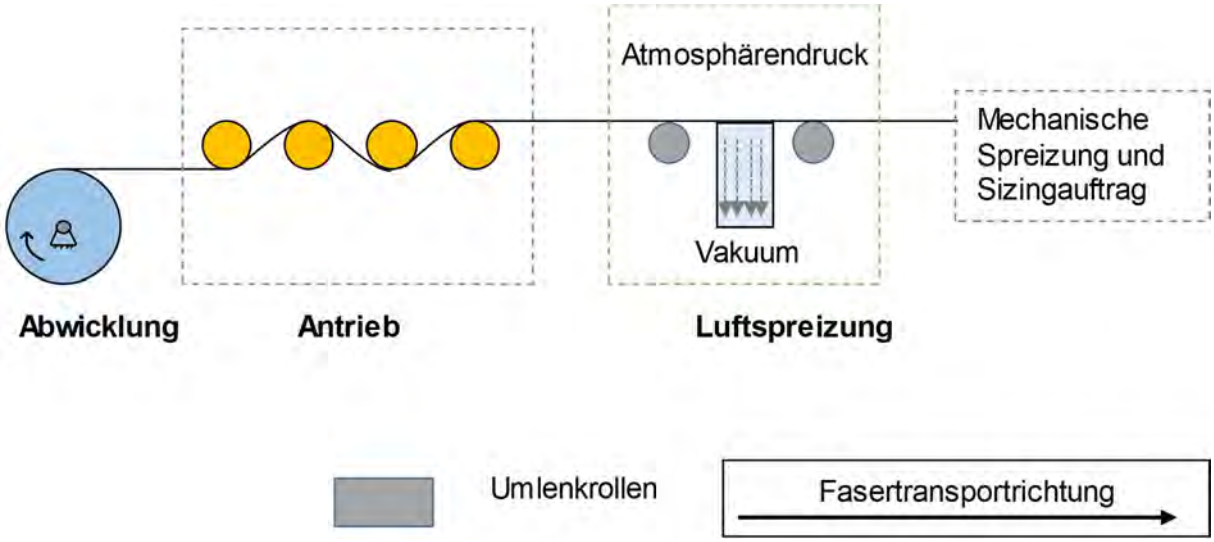

Abb. 21 Luftspreizung durch das Ansaugprinzip

Zur Auslegung der Luftspreizeinheit werden insgesamt 5 unterschiedliche Düsenkonzepte untersucht (4 beim Anströmprinzip und 1 beim Ansaugprinzip). Alle Luftdüsen werden mithilfe eines 3D-Druckers aus dem nachhaltigem Material Polylactide (PLA) nach dem Rapid-Prototyping Prinzip hergestellt. Nachfolgend werden die untersuchten Konzepte vorgestellt. Abb. 22 zeigt das erste und einfachste Düsenkonzept. Hierbei werden die Carbonfasern direkt durch die aus der Düse austretenden Luft angeströmt.

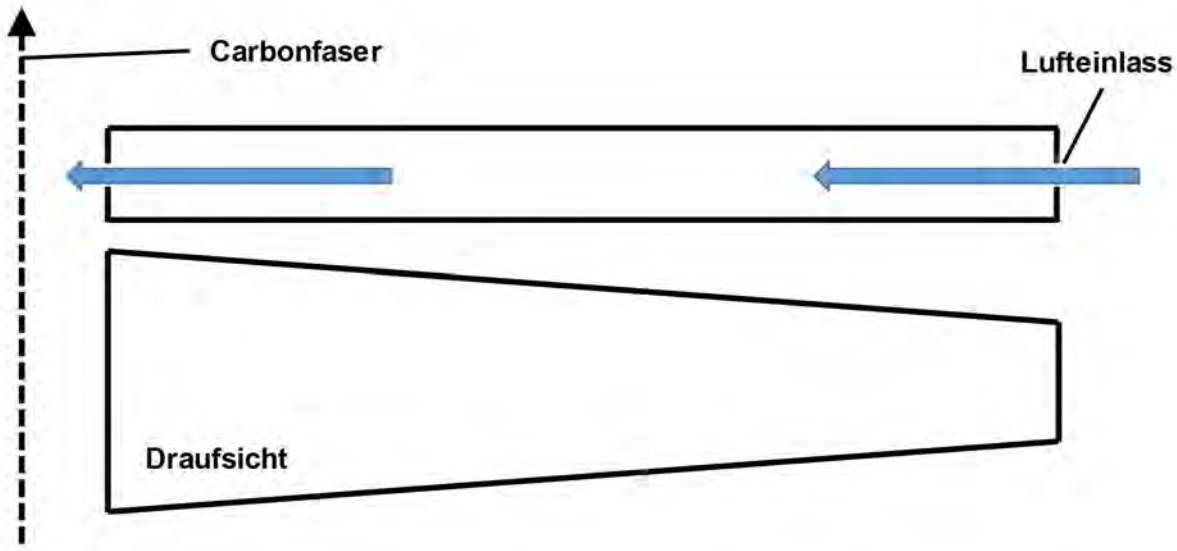

Abb. 22: Konzept 1 (Anströmprinzip)

Beim Konzept 2 wird die Carbonfaser durch die Düse geführt. Die Luft wird durch einen Lufteinlass an der Oberseite der Düse eingeleitet und anschließend in Faserlaufrichtung umgelenkt. Die Luft soll durch die sich vergrößernden Querschnitt der Luftdüse expandieren und somit die Faser spreizen.

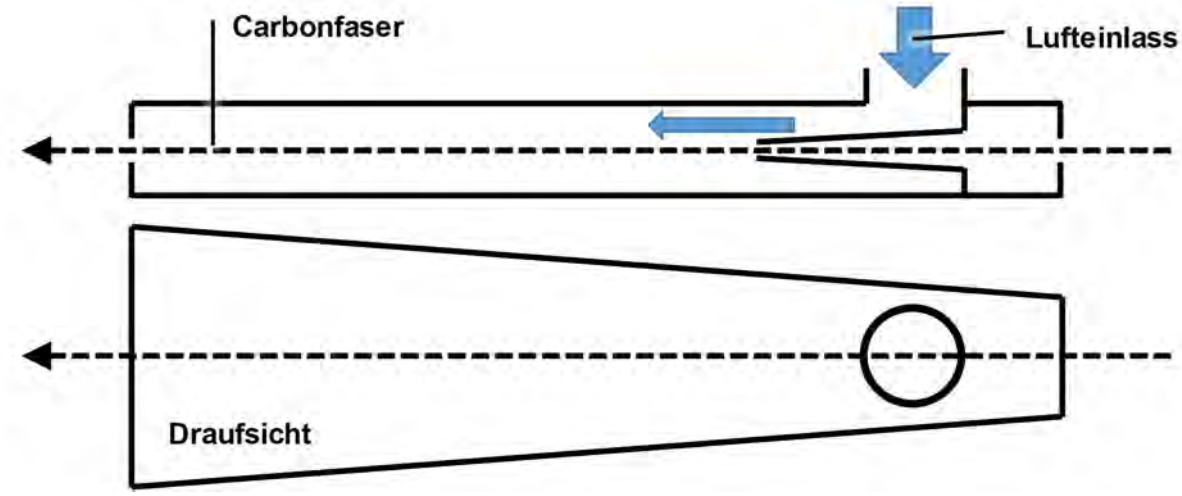

Abb. 23: Konzept 2 (Anströmprinzip)

Das Konzept 3 ähnelt dem Konzept 2, jedoch wird hierbei die Luft durch einen von der Carbonfaser getrennten Luftkanal abgeleitet, um auf diese Weise die turbulente Luft von der Carbonfaser wegzulenken, welche beim Passieren der Carbonfasern entstehen.

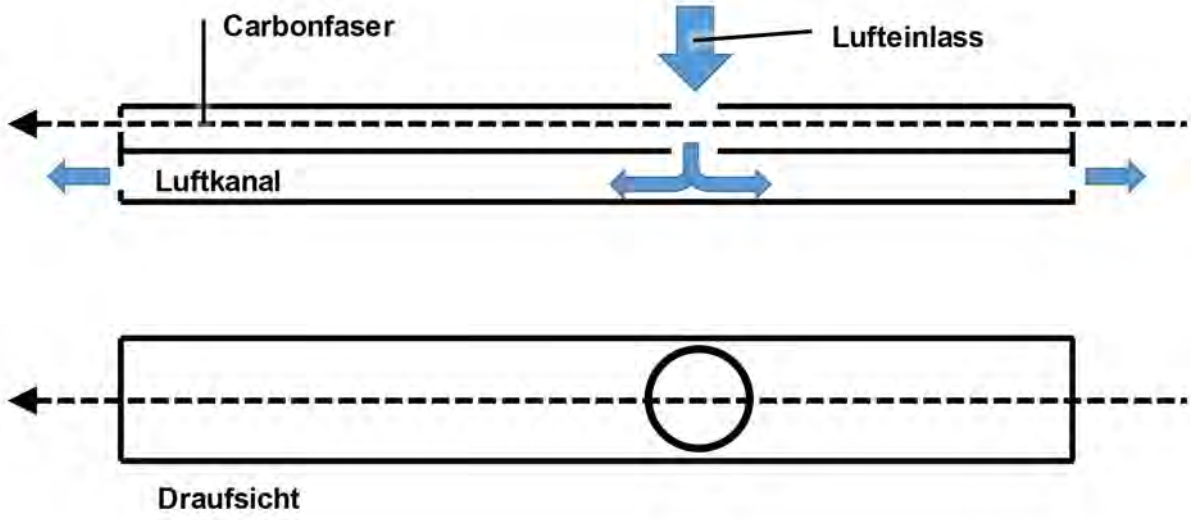

Abb. 24: Konzept 3 (Anströmprinzip)

Das Konzept 4 basiert auf Konzept 3 und erweitert dieses mit einem sich zunächst verengenden Düsenquerschnitt. Anschließend vergrößert sich der Querschnitt wieder. Durch die Querschnittsänderungen soll die Luft im Inneren der Luftdüse, ähnlich wie bei einem Luftkanal, zunächst verengt und dann expandiert werden. Hierdurch sollen mehr laminare Anteile im Luftstrom erzeugt werden. Ähnlich wie bei Konzept 3 wird die turbulente Luft, welche beim Passieren der Carbonfaserfilamente entstehen, durch einen getrennten Luftkanal abgeführt werden.

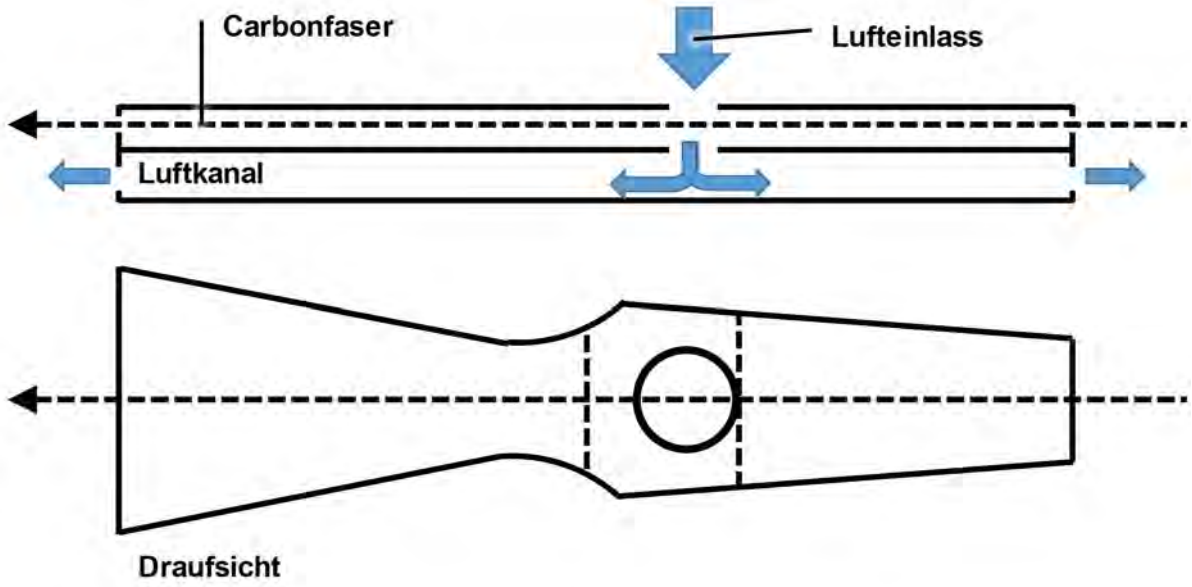

Abb. 25: Konzept 4 (Anströmprinzip)

Das Konzept 5 basiert auf dem Ansaugprinzip. Hierbei wird eine Düse mit einem rechteckigen Querschnitt unterhalb der Carbonfasern und senkrecht zur Faserlaufrichtung positioniert (Abb. 26). Durch eine Pumpe wird ein Unterdruck erzeugt, wodurch die Luft oberhalb der Carbonfaser angesaugt wird. Ein besonderer Vorteil bei dieser Düse ist der Nebeneffekt, bei dem einzelne lose Filamente direkt abgesaugt werden können.

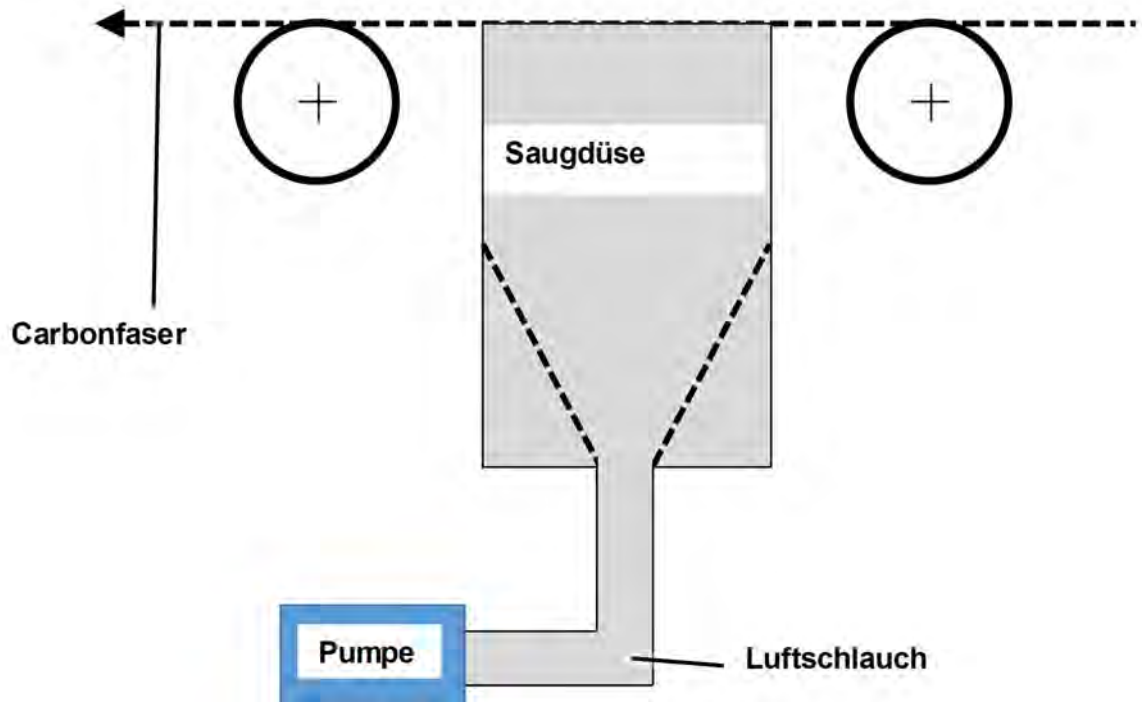

Abb. 26: Konzept 5 (Ansaugprinzip)

Für die Bewertung und Auswahl eines Spreizkonzepts werden die Parameter in Tabelle 7 verwendet. In Abb. 27 bis Abb. 29 sind alle ausgedruckten Düsenkonzepte zu sehen. Die Lufteinlässe sind jeweils mit blauen Pfeilen markiert.

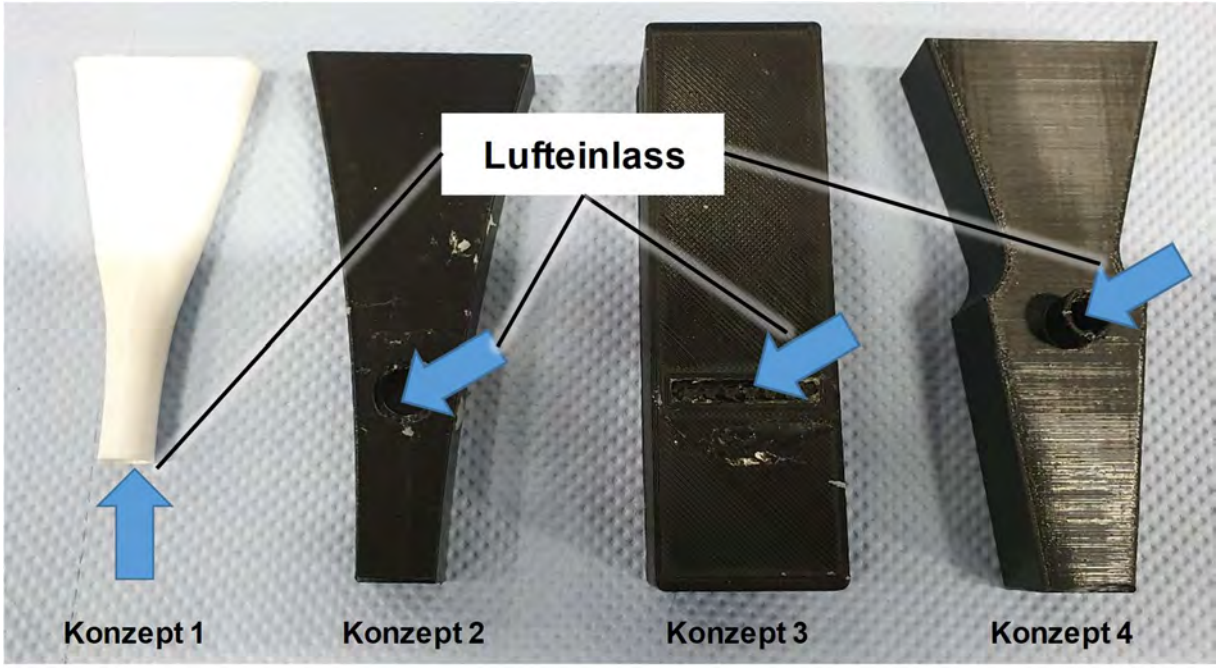

Abb. 27: Düsenkonzepte 1 bis 4 (Anströmprinzip)

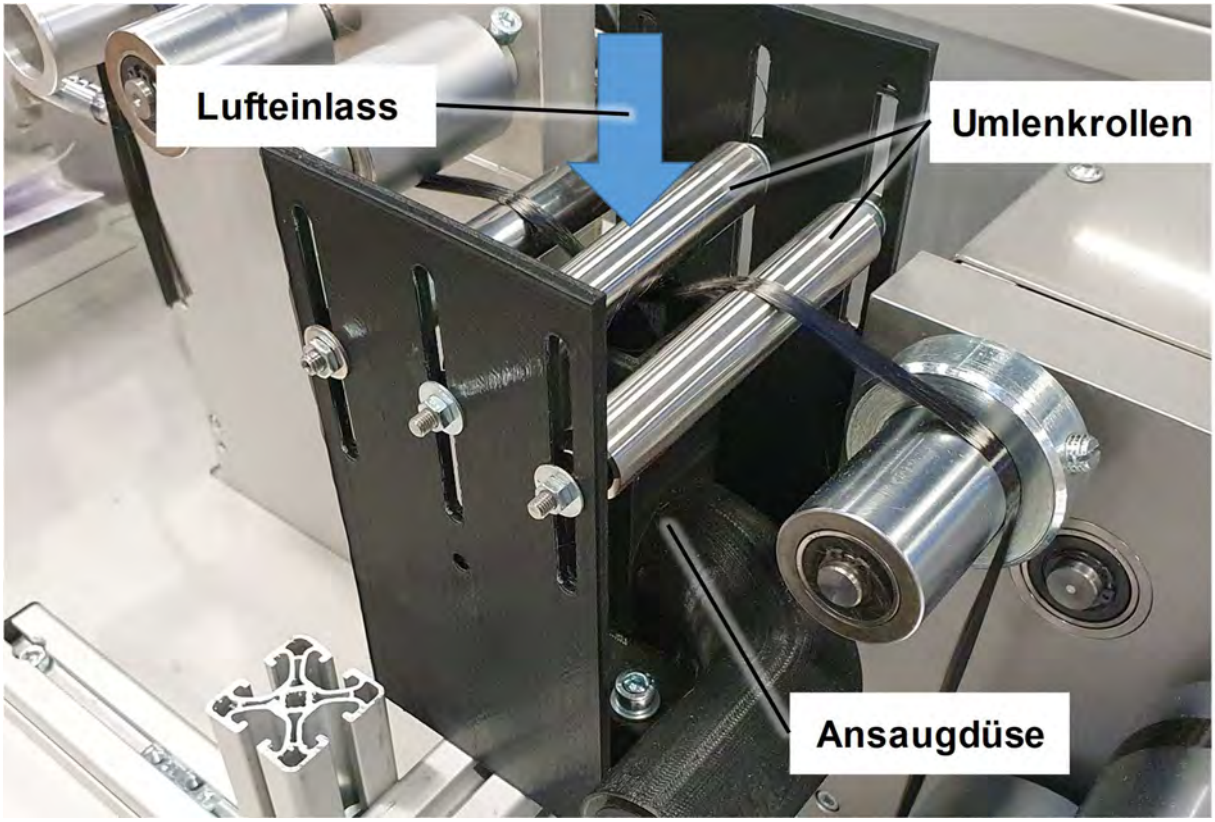

Abb. 28: Düsenkonzept 5 (Ansaugprinzip)

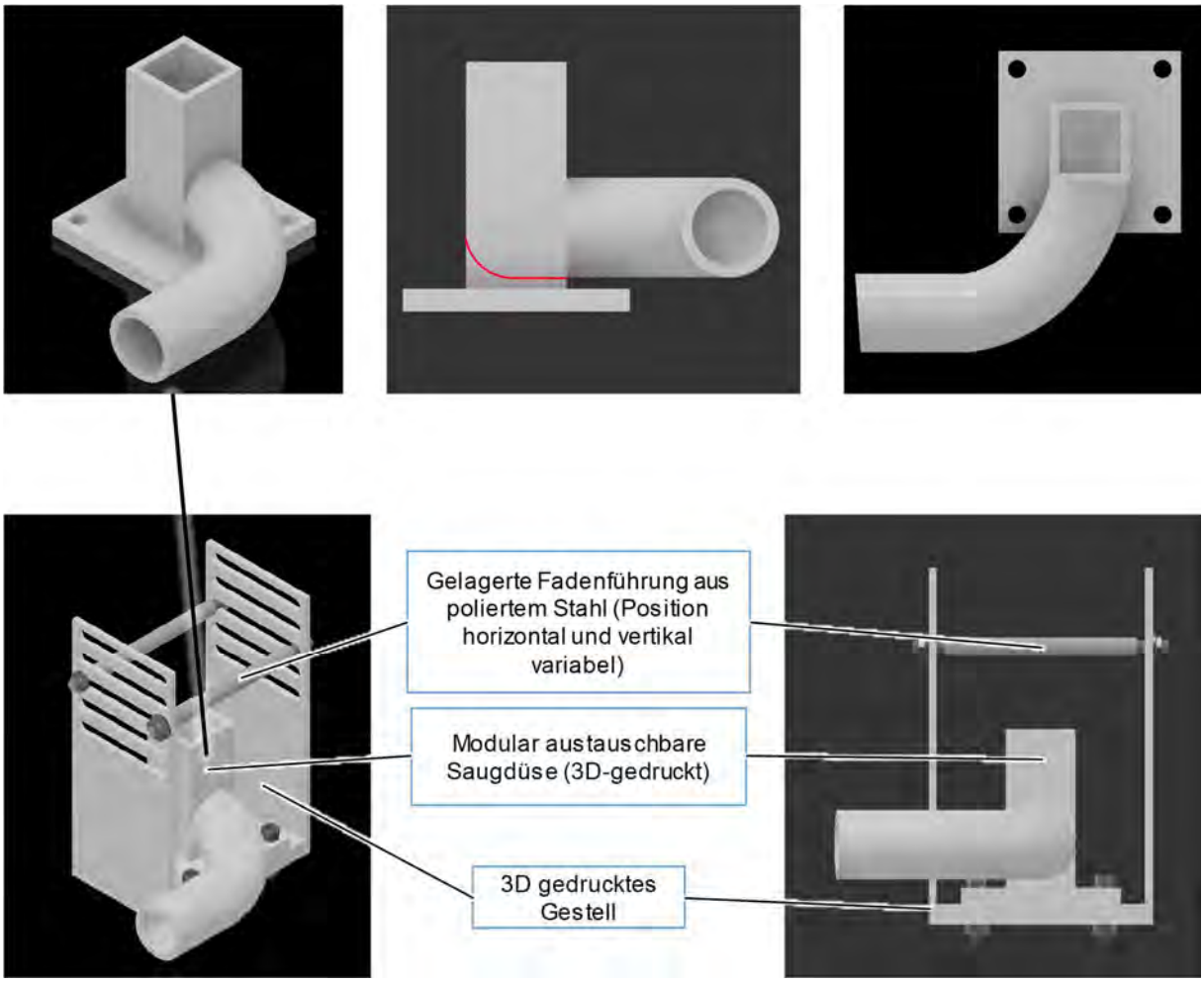

Abb. 29: CAD-Modell des Düsenkonzepts 5 (Ansaugprinzip)

Für die Bewertung der Düsenkonzepte werden die folgenden Kriterien festgelegt:

- Geometrische Komplexität
- Spreizeffekt bei unterschiedlichem Luftdruck (Breite des CF-Tapes)
- Spreizqualität (Gassen, Verdreher und Homogenität)
- Strömungsqualität und Handling der Düsenformen
- Faserschädigung

Nachfolgend werden beispielhaft die aussagekräftigsten Bilder der Versuche zu den einzelnen Düsenkonzepten gezeigt.

In Abb. 30 ist das Ergebnis der Spreizversuche mit dem Düsenkonzept 1 dargestellt. Bei diesem ist zu erkennen, dass die Carbonfaser mit einem relativ hohen Spreizfaktor gespreizt werden. Jedoch können zahlreiche kleine Gassen zwischen den Filamenten der gespreizten Carbonfaser beobachtet werden. Die Gassen sind so zahlreich, dass diese mit der nachgelagerten Stangenspreizeinheit nicht beseitigt werden können. Somit ist das CF-Tape relativ inhomogen.

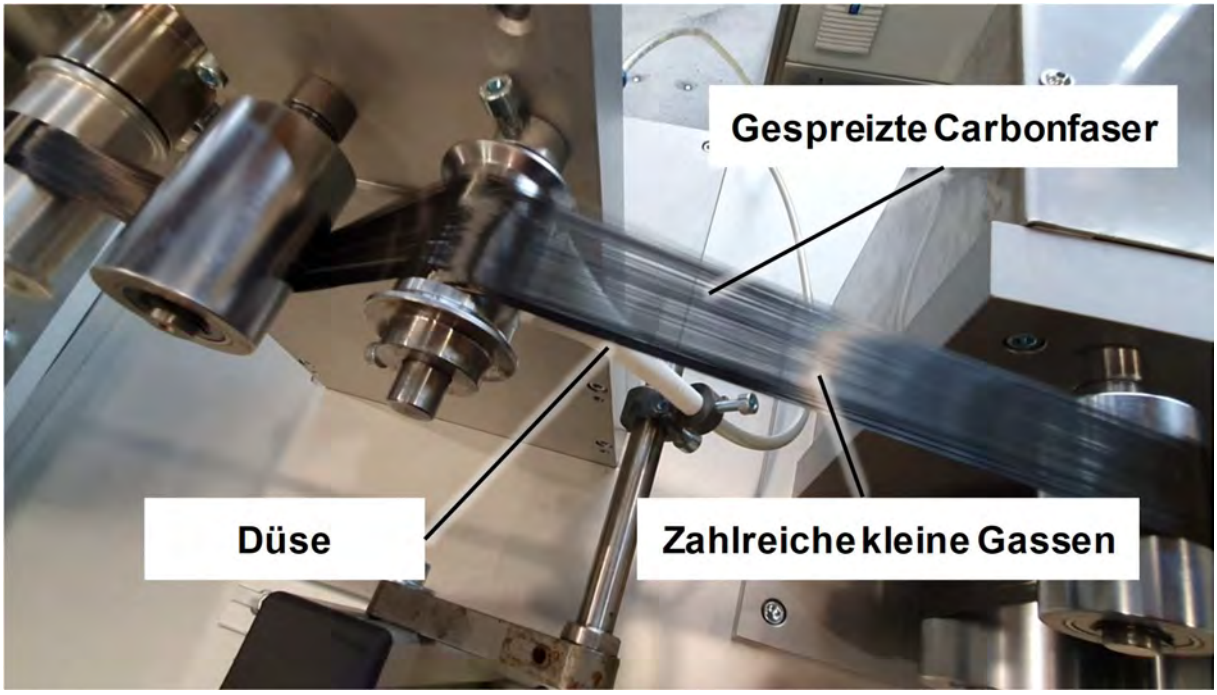

Abb. 30: Spreizergebnis des Düsenkonzepts 1 (Anströmprinzip)

Düsenkonzept 2 hat eine eindeutig höhere geometrische Komplexität als das Düsenkonzept 1. Beim Düsenkonzept 2 wird die Carbonfaser fast gar nicht gespreizt und die Faserbreite nimmt nach dem Passieren der Luftdüse wieder ab (Abb. 31). Weiterhin ist die Luftströmung sehr turbulent, sodass die CF-Filamente stark verwirbelt werden. Zudem entstehen zahlreiche unregelmäßig auftauchende breite Gassen. Das Carbonfasertape besitzt aufgrund der starken Faserschädigungen und der breiten Gassen eine ungenügende Qualität.

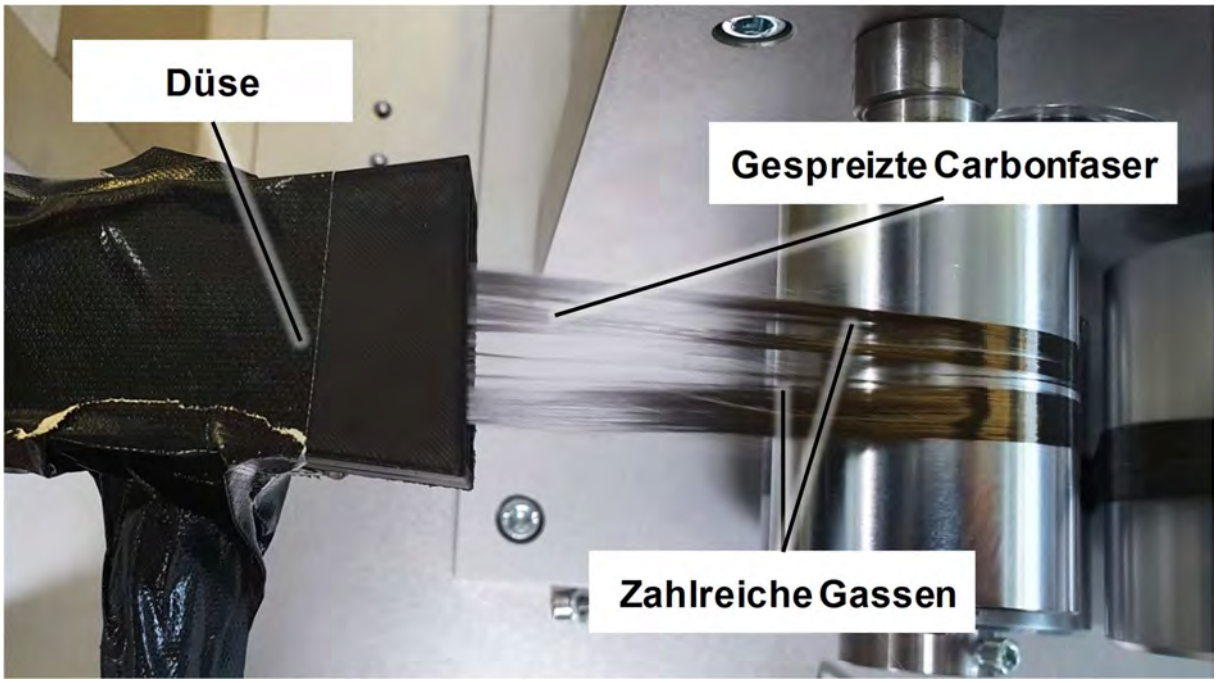

Abb. 31: Spreizergebnis des Düsenkonzepts 2 (Anströmprinzip)

Bei den Düsenkonzepten 3 und 4 ist die geometrische Komplexität relativ hoch (Abb. 32, Abb. 33). Der Spreizeffekt ist eindeutig besser als beim Düsenkonzept 2. Die Spreizqualität ist jedoch ebenfalls aufgrund vieler Faserschädigungen relativ gering. Die Strömungsqualität befindet sich im Bereich zwischen den Düsenkonzepten 1 und 2.

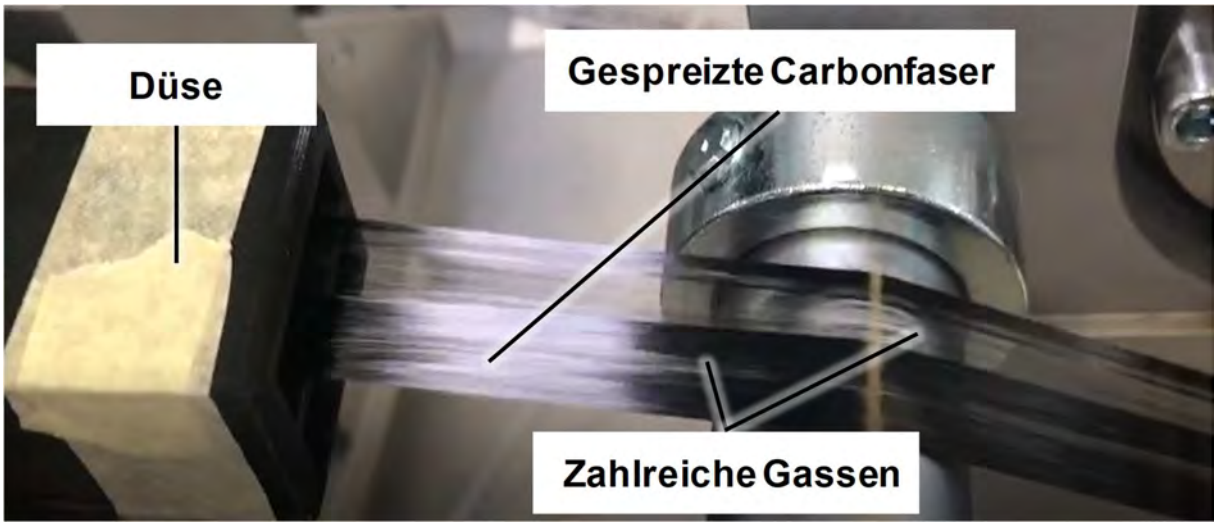

Abb. 32: Spreizergebnis des Düsenkonzepts 3 (Anströmprinzip)

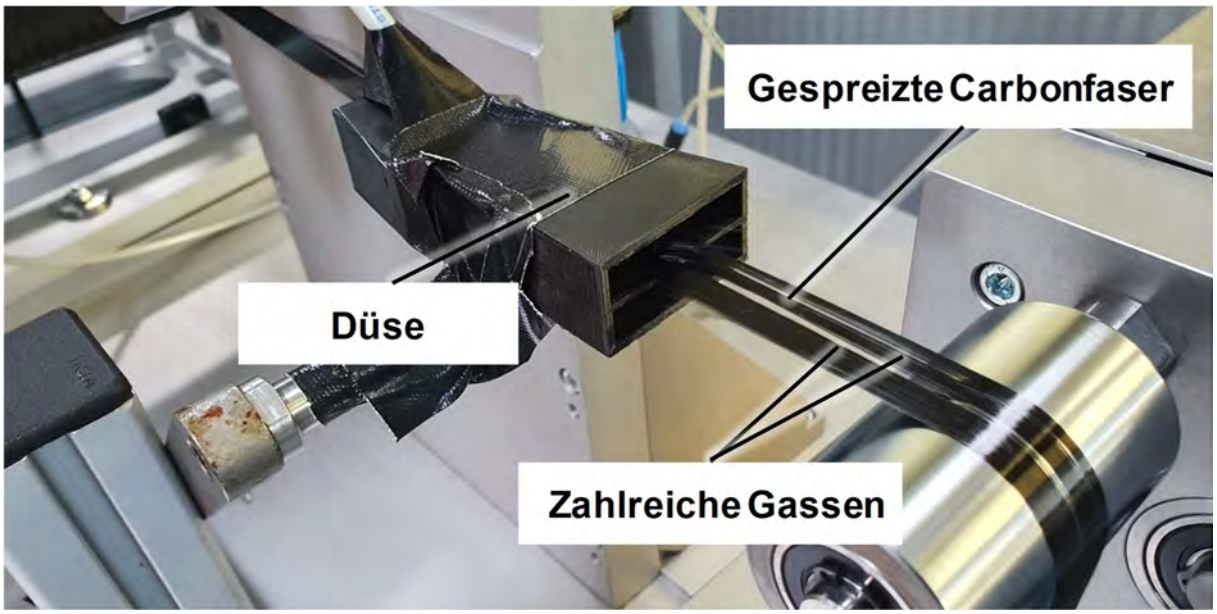

Abb. 33: Spreizergebnis des Düsenkonzepts 4 (Anströmprinzip)

Die Versuchsergebnisse des Düsenkonzepts 5 werden in Abb. 34 gezeigt. Die geometrische Komplexität ist nur geringfügig höher und der Spreizeffekt bzw. die erreichbare Spreizbreite ist ähnlich hoch wie beim Düsenkonzept 1. Die Spreizqualität bei diesem Konzept ist am höchsten. Es lassen sich nur wenige vereinzelte schmale Gassen erkennen, welche durch die Stangenspreizung wieder ausgeglichen werden (Abb. 34, links unten). Weiterhin ist die Quali-

tät der Luftströmung sehr gleichmäßig. Die Faserschädigung ist mittelmäßig. Durch die Saugdüse des Düsenkonzepts 5 ergibt sich ein sehr homogenes Spreizbild, insbesondere nach der Trocknungseinheit (Abb. 34, rechts unten).

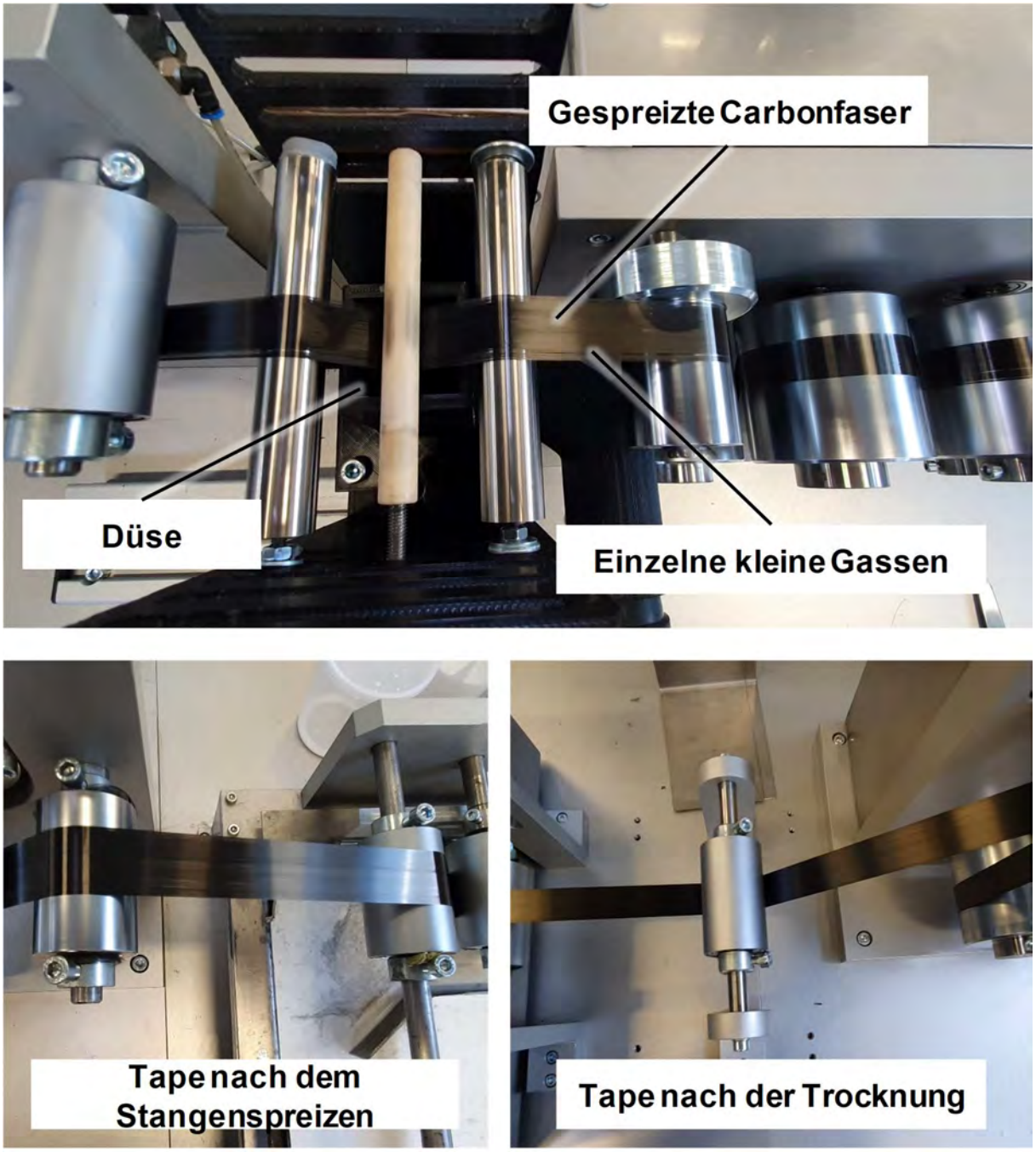

Abb. 34: Spreizergebnis des Düsenkonzepts 5 (Ansaugprinzip)

In Tabelle 8 werden alle Düsenkonzepte abschließend bezüglich der oben erwähnten Kriterien gewichtet und bewertet. Das Düsenkonzept 2 hat bis auf eine einfache Geometrie keine weiteren Vorteile. Düsenkonzepte 3 und 4 erzielen einen geringen Spreizgrad bei einem inhomogenen Spreizbild mit zahlreichen Gassen. Mit dem Düsenkonzept 1 lassen sich die Faser sehr

gut spreizen. Dieses punktet vor Allem mit der sehr einfachen Geometrie. Jedoch können hierbei die zahlreichen schmalen Gassen mit der nachgelagerten Stangenspreizung nicht mehr wieder behoben werden. Für den höchsten Spreizgrad und die beste Spreizqualität sollte das Konzept 5 gewählt werden. Im weiteren Verlauf des Projekts wird dieses Düsenkonzept 5 (Ansaugprinzip) weiter optimiert und analysiert.

Tabelle 8: Bewertung der Düsenkonzepte

	Konzept 1	**Konzept 2**	**Konzept 3**	**Konzept 4**	**Konzept 5**
Geom. Komplexität	**2**	**1**	**0**	**0**	**2**
Spreizeffekt	**2**	**0**	**1**	**1**	**2**
Spreizqualität	**1**	**0**	**1**	**1**	**2**
Strömungsqualität + Handling	**2**	**0**	**1**	**1**	**2**
Faserschädigung	**1**	**0**	**1**	**1**	**1**
Gesamtbewertung	**8**	**1**	**4**	**4**	**9**

0 (Schlecht); 1 (mittel); 2 (gut)

Ermittlung von Prozessparametern für den Dauerbetrieb

Für die Herstellung von CF-Tapes im Dauerbetrieb müssen folgende Anlagenparameter ermittelt werden:

- Breite W der Umlenkrollen der Luftspreizeinheit
- Höhe H der Umlenkrollen der Luftspreizeinheit
- Zugspannung der Stangenspreizeinheit
- Positionierung der Spreizstangen in der Stangenspreizeinheit

Die Zugspannung der Luftspreizeinheit wird auf den minimal erreichbaren Wert von 3 N festgelegt, da hierbei eine so geringe Faserspannung wie möglich erwünscht ist. Abb. 35 zeigt die Definition der Breite W, der Höhe H sowie die Positionen der Spreizstangen.

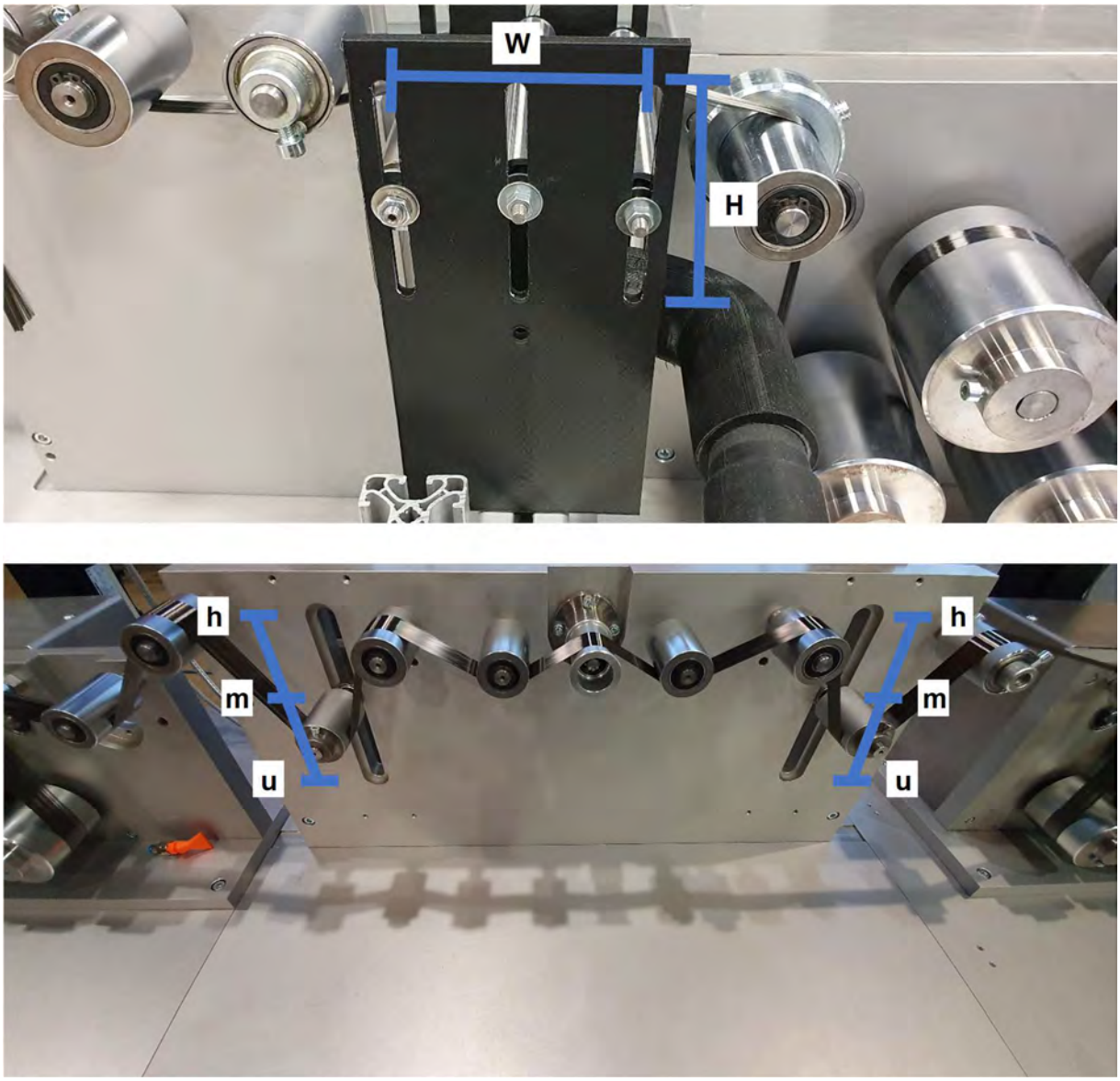

Abb. 35: Höhe H und Breite W der Umlenkrollen der Luftspreizeinheit sowie Positionen der Spreizstangen

Im ersten Schritt wird die Höhe H der Umlenkrollen in der Luftspreizeinheit ermittelt. Es werden insgesamt die 3 Höhen 15, 21 und 33 mm ausgewählt (Tabelle 9). Alle anderen Prozessparameter werden auf einen konstanten Wert gehalten. Die Anlagengeschwindigkeit wird zwischen 2, 5 und 10 m/min variiert. Für die Validierung der Parameter wird die Anlage jeweils ca. 15 min betrieben und die erreichte Tapebreite (Maximal- und Minimalwert sowie Durchschnittswert) gemessen. Die höchsten Durchschnittswerte bei jeder Anlagengeschwindigkeit sind in den nachfolgenden Tabellen markiert. Für die Höhe H ergeben sich die höchsten durchschnittlichen Tapebreiten bei 15 mm. Dieser Wert wird für die restliche Untersuchung festgelegt.

Tabelle 9: Ermittlung der Höhe H

V [m/min]	H [mm]	W [mm]	P [omu]	Spannung Lufts. [N]	Spannung Stangens. [N]	Tapebreite [mm]		
						Max	Min	Durch-schnitt
2	33	70	mm	3	15	15	9	12
	21	70	mm	3	15	22	18	20
	15	70	mm	3	15	22	20	21
5	33	70	mm	3	15	16	14	15
	21	70	mm	3	15	20	16	18
	15	70	mm	3	15	22	18	20
10	33	70	mm	3	15	18	16	17
	21	70	mm	3	15	21	16	17,5
	15	70	mm	3	15	20	15	18

Für die Breite W bzw. Abstand zwischen den beiden Umlenkrollen in der Luftspreizeinheit werden die Werte 52, 60, und 70 mm ausgewählt. Zwar wird bei der niedrigsten Anlagengeschwindigkeit die höchste Tapebreite bei W = 70 mm erreicht, jedoch ergeben sich die höchsten Spreizfaktoren bei höheren Geschwindigkeiten mit einer Breite W = 60 mm. Eine höhere Anlagengeschwindigkeit ist erwünscht. Aus diesem Grund wird die Breite W auf 60 mm festgelegt.

Tabelle 10: Ermittlung der Breite W

V [m/min]	H [mm]	W [mm]	P [omu]	Spannung Lufts. [N]	Spannung Stangens. [N]	Tapebreite [mm]		
						Max	Min	Durch-schnitt
2	15	52	mm	3	15	21	17	19
	15	60	mm	3	15	15	13	15
	15	70	mm	3	15	22	20	21
5	15	52	mm	3	15	20	16	18
	15	60	mm	3	15	24	21	22,5
	15	70	mm	3	15	22	18	20
10	15	52	mm	3	15	23	21	22
	15	60	mm	3	15	24	20	23
	15	70	mm	3	15	20	15	17,5

Die Faserspannung der Stangenspreizung wird mit den Werte 5, 10 und 15 N variiert. Bei einer Anlagengeschwindigkeit von 2 m/min wird die größte Tapebreite bei 5 N erreicht. Bei höheren Anlagengeschwindigkeiten ergibt sich die höchste Tapebreite bei 15 N. Wie bei der Breite W wird auch bei der Faserspannung der Stangenspreizung zugunsten einer höheren Anlagengeschwindigkeit entschieden. Die Faserspannung wird somit auf 15 N festgelegt.

Tabelle 11: Ermittlung der Faserspannung der Stangenspreizung

V [m/min]	H [mm]	W [mm]	P [omu]	Spannung Lufts. [N]	Spannung Stangens. [N]	Tapebreite [mm]		
						Max	Min	Durch-schnitt
2	15	60	mm	3	5	20	16	18
	15	60	mm	3	10	11	9	10
	15	60	mm	3	15	16	12	14
5	15	60	mm	3	5	19	17	18
	15	60	mm	3	10	20	16	18
	15	60	mm	3	15	25	17	21
10	15	60	mm	3	5	23	19	21
	15	60	mm	3	10	20	16	18
	15	60	mm	3	15	23	21	22

Im letzten Schritt müssen die Positionen der Spreizstangen ermittelt werden. Die Bezeichnung „hh“ beschreibt die Einstellung beider Spreizstangen auf die höchst mögliche Position, während „mm“ und „uu“ jeweils die mittlere und unterste Position beider Spreizstangen definiert (Abb. 35). Bei allen 3 untersuchten Anlagengeschwindigkeiten ergeben sich jeweils unterschiedliche Positionen der Spreizstangen (Tabelle 12). Bei der niedrigsten Geschwindigkeit ist die Positionierung „hh“ besonders geeignet. Bei einer Geschwindigkeit von 5 m/min sorgt die mittlere Positionierung der Spreizstangen für eine maximale Tapebreite. Bei der höchsten Anlagengeschwindigkeit sollte die unterste Position der Spreizstangen verwendet werden, da hierbei der höchste Spreizfaktor erreicht wird (Faktor 4).

Tabelle 12: Ermittlung der Positionierung der Spreizstangen

V [m/min]	H [mm]	W [mm]	P [omu]	Spannung Lufts. [N]	Spannung Stangens. [N]	Tapebreite [mm]		
						Max	Min	Durch-schnitt
2	15	60	hh	15	3	21	17	19
	15	60	mm	15	3	22	14	18
	15	60	uu	15	3	16	14	15
5	15	60	hh	15	3	23	17	20
	15	60	mm	15	3	25	21	23
	15	60	uu	15	3	21	19,5	20
10	15	60	hh	15	3	22	17,5	20
	15	60	mm	15	3	24	22	23
	15	60	uu	15	3	25	23	24

Zusammenfassend sollten für die Anlagengeschwindigkeiten 5 und 10 m/min die in Tabelle 13 aufgeführten Anlagenparameter für den Dauerbetrieb verwendet werden.

Tabelle 13: Parameter für den **Dauerbetrieb**

V [m/min]	H [mm]	W [mm]	P [omu]	Spannung Lufts. [N]	Spannung Stangens. [N]
5	15	60	mm	3	15
10	15	60	uu	3	15

2.6 Ergebnisse von AP 7 – Validierung der Spread Tows entlang der weiteren Prozesskette bis zur Faserverbundherstellung

Zur Validierung der Spread Tows (bzw. CF-Tapes) werden die Sizinggehalte der Tapes bestimmt. Dadurch kann ermittelt werden, inwieweit die Prozessführung der SpreizSize-Anlage (zuerst Spreizen und dann Beschlichten) den Sizinggehalt der Carbonfasertapes im Vergleich zu konventionellen Carbonfasern beeinflusst. Weiterhin werden Untersuchungen mit dem REM (Rasterelektronenmikroskop) durchgeführt, um die Homogenität der Schlichte auf den Carbonfasern zu analysieren. Zur Analyse der mechanischen Eigenschaften werden Einzelfilamentmessungen der hergestellten CF-Tapes durchgeführt. Das minimal erreichbare Flächengewicht der an der SpreizSize-Anlage hergestellten CF-Tapes wird bestimmt und mit einem konventionell gespreizten CF-Tape verglichen. Bei der Herstellung der Proben wurden folgende Parameter verwendet:

Tabelle 14: Prozessparameter zur Herstellung von Faserproben

Sizinggehalt [%]	1,4	2	10
Anlagengeschwindigkeit [m/s]	2	2	2
	8	8	8
	10	10	10

Bestimmung des Sizinggehalts

Zur Bestimmung des Sizinggehalts auf dem CF-Tape werden entsprechend Abb. 36 jeweils 3 Proben aus dem Tape entnommen. Die Messungen werden nach dem Prinzip der Thermogravimetrie mithilfe des Messgeräts DSC/TGA 1 der Firma Mettler Toledo AG (Schwerzenbach, Schweiz).

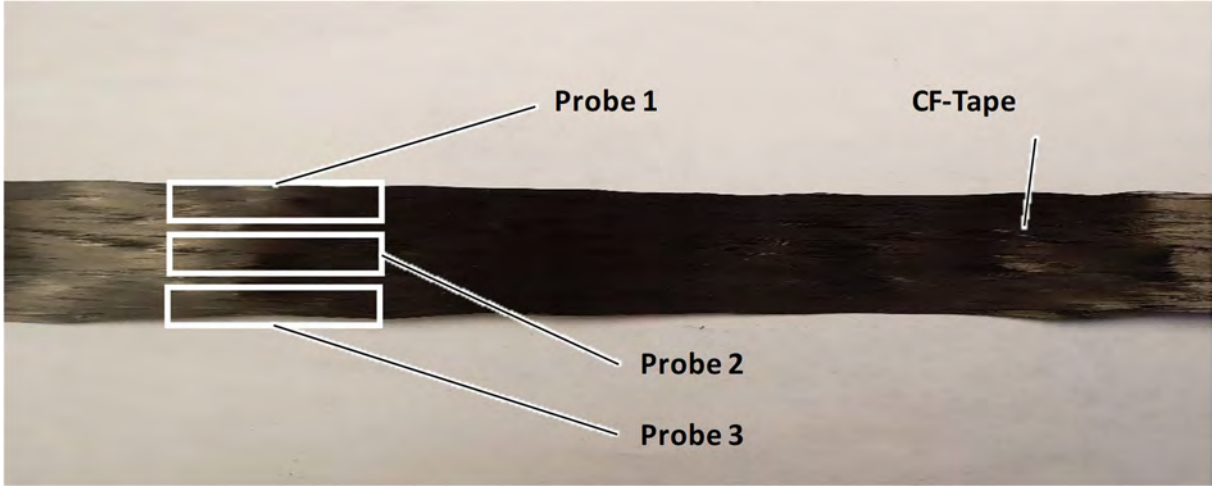

Abb. 36: Entnahme der Proben aus dem CF Tape (Bestimmung des Sizinggehalts)

Beim Vergleich zwischen Faserproben, die jeweils mit 1,4 bzw. 2 % Sizing bei gleicher Geschwindigkeit beschlichtet wurden, wird deutlich, dass es bei beiden Proben geringe Sizingverluste zu erkennen sind. Der Sizinggehalt der 1,4 % Probe hat eine ca. 14 prozentige Abweichung während die 2 % Probe eine nur 2 prozentige Abweichung aufweist.

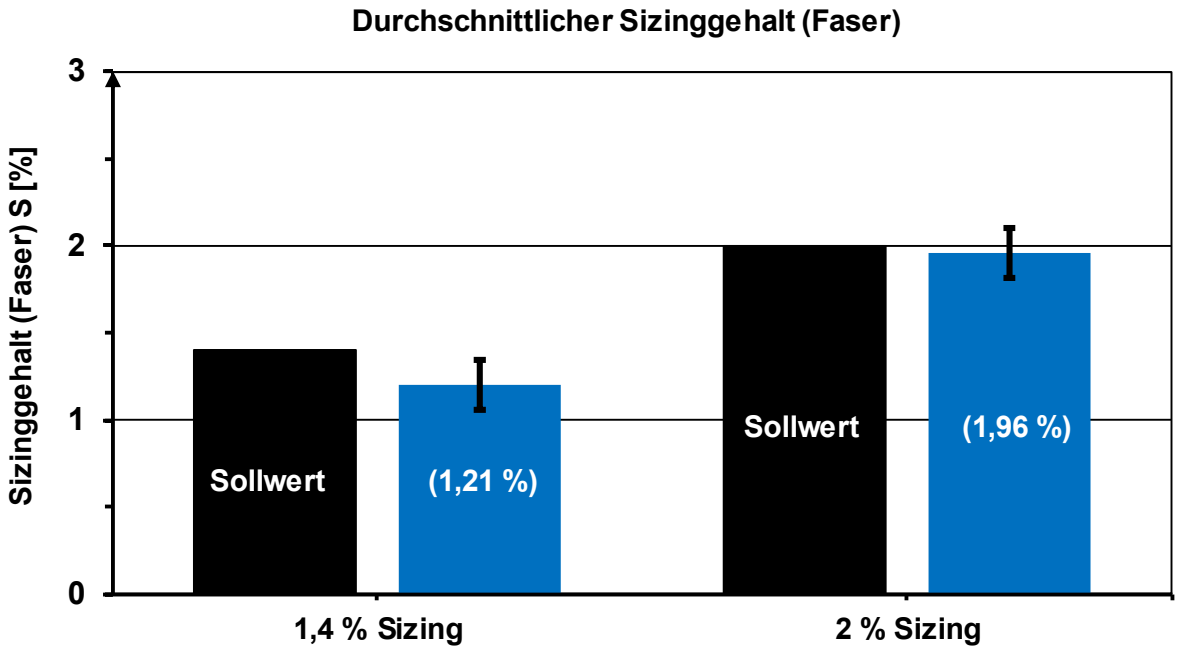

Abb. 37: Vergleich zwischen 1,4 %- und 2 %-Proben

Abb. 38 zeigt den Vergleich zwischen der 2 %- und der 10 %-Probe. Hier wird deutlich, dass die 10 %-Probe die größte Abweichung vom Sollwert von allen drei Proben aufweist, welche 22 % beträgt.

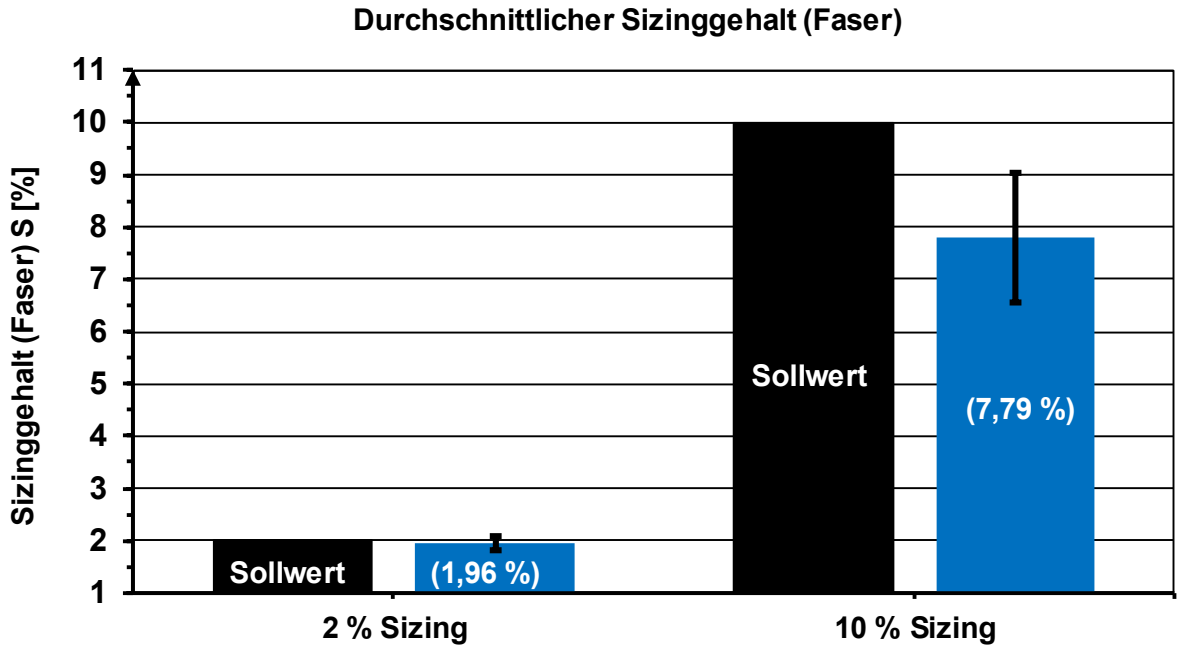

Abb. 38: Vergleich zwischen 2 %- und 10 %-Proben

Aus den obigen 3 Diagrammen ist zunächst erkennbar, dass eine Sizingkonzentration von 2 % besonders präzise auf das gespreizte Carbonfasertape aufgetragen werden kann. Im nächsten Schritt werden die unterschiedlichen Anlagengeschwindigkeiten miteinander verglichen.

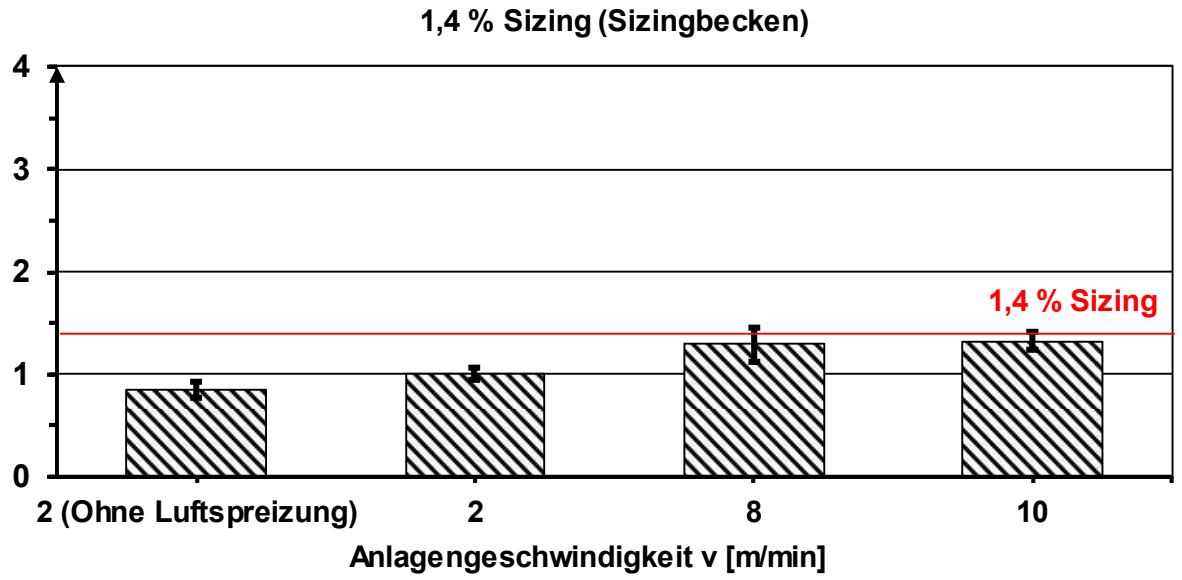

Abb. 39: Sizinggehalt auf dem CF-Tape in Abhängigkeit von der Anlagengeschwindigkeit (1,4 % Sizing im Sizingbecken)

In Abb. 39 wird der verbleibende Sizinggehalt auf dem CF-Tape bei unterschiedlichen Anlagengeschwindigkeit gezeigt, welche jeweils durch ein Schlichtebad mit 1,4 % Sizing und 98,6 % Wasser geführt werden. Deutlich wird zunächst, dass der Spreizvorgang einen positiven Effekt auf den Sizinggehalt auf dem CF-Tape hat. Weiterhin weist der Sizinggehalt auf dem CF-Tape mit zunehmender Anlagengeschwindigkeit und insbesondere bei 10 m/min eine sehr kleine Abweichung vom Sollwert von 6 % auf.

Bei Betrachtung der Sizinggehalte auf dem CF-Tape, welche im Herstellungsprozess durch ein 2 prozentiges Sizingbad geführt werden, werden ähnliche Beobachtungen wie bei den 1,4 %-Proben gemacht (Abb. 40). Jedoch wird hier bei der niedrigsten und bei der höchsten Anlagengeschwindigkeit die kleinste Abweichung vom Sollwert ermittelt.

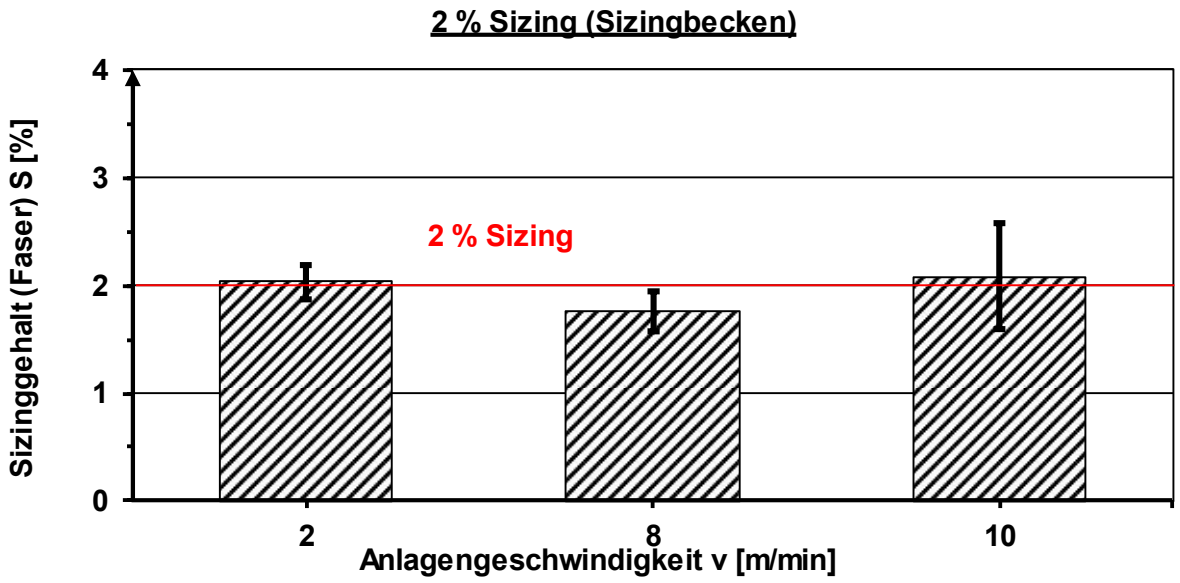

Abb. 40: Sizinggehalt auf dem CF-Tape in Abhängigkeit von der Anlagengeschwindigkeit (2 % Sizing im Sizingbecken)

Die Ergebnisse der Thermogravimetrie bei der Bestimmung des Sizinggehalts der 10 %-Proben zeigen, dass die Konzentration von 10 % Sizing im Sizingbecken viel zu hoch ist, da der Sizinggehalt auf dem CF-Tape mit steigender Anlagengeschwindigkeit sinkt und weiterhin die Abweichung vom Soll extrem hoch ist. Zudem wird das starke Verkleben der Faserfilamente auf den Umlenkrollen im Sizingbecken und im Trocknungsofen beobachtet. In Tabelle 15 werden die wichtigsten Rückschlüssen aus den Sizingversuchen zusammengefasst.

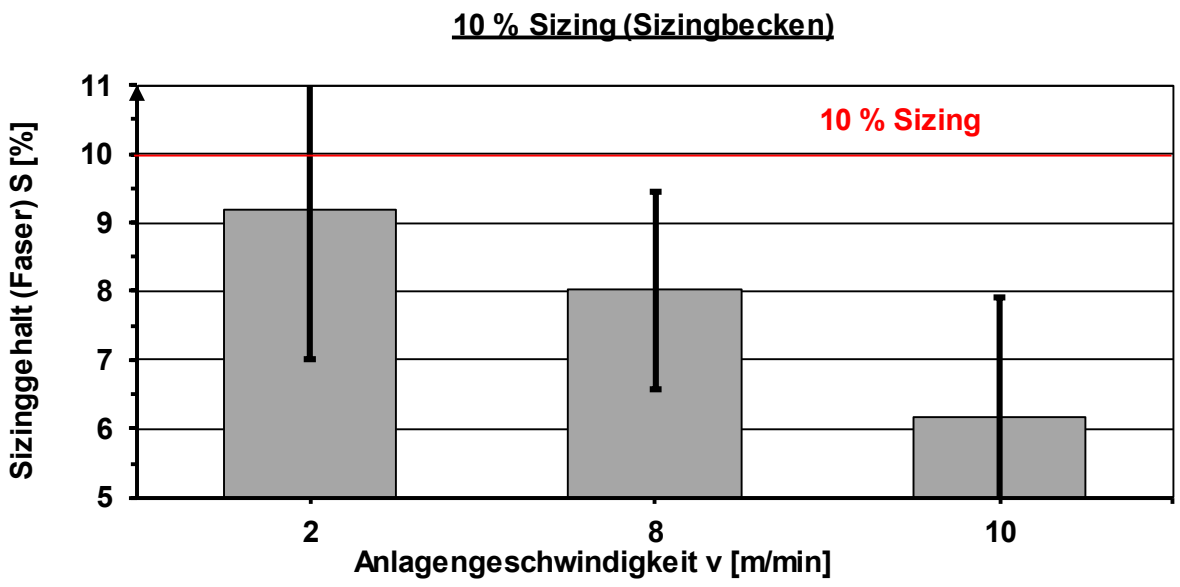

Abb. 41: Sizinggehalt auf dem CF-Tape in Abhängigkeit von der Anlagengeschwindigkeit (10 % Sizing im Sizingbecken)

Tabelle 15: Zusammenfassung der Beobachtungen aus den Sizingversuchen

	1,4 % Sizinggehalt (Tränkung)	**2 % Sizinggehalt (Tränkung)**	**10 % Sizinggehalt (Tränkung)**
Sizinggehalt abhängig von Anlagengeschwindigkeit	Sizinggehalt auf Faser annähernd 1,4 % (Bei max. Geschwindigkeiten)	Sizinggehalt auf Faser annähernd 2 % (Bei allen Geschwindigkeiten)	Sizinggehalt auf Faser weist hohe Abweichungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf
Sizinggehalt entlang des Faserquerschnitts	Relativ geringe Schwankungen entlang des Querschnitts der Faser	Relativ geringe Schwankungen entlang des Querschnitts der Faser	Hohe Schwankungen entlang des Querschnitts der Faser
Fazit: • **Bei 1,4 % Sizinggehalt im Sizingbecken und einer Anlagengeschwindigkeit von 8 – 10 m/min ist am besten geeignet und bietet eine Vergleichbarkeit mit der Referenzfaser** • **Mit der SpreizSize-Anlage wird die Carbonfaser besser durchtränkt als bei der konventionellen Nachbehandlung, bei denen teilweise Abweichungen von über 100 % vorhanden sind**			

Mikroskopie

Zur Bestimmung des Sizinggehalts auf dem CF-Tape wird entsprechend Abb. 42 eine Probe aus dem Tape entnommen. Die Messungen werden mit einem Rasterelektronenmikroskop durchgeführt.

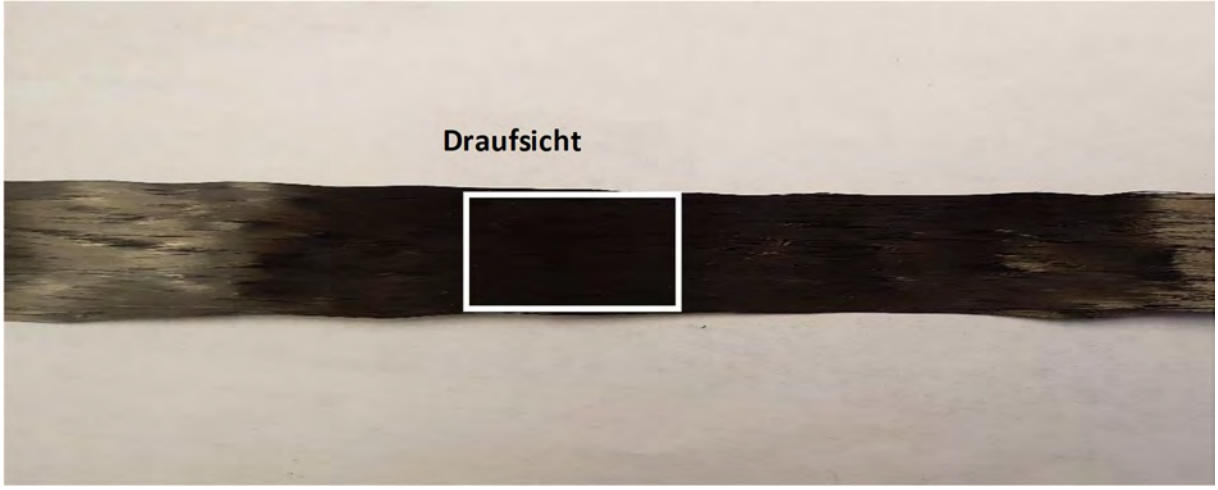

Abb. 42: Entnahme der Proben aus dem CF Tape (REM Untersuchungen)

In Abb. 43 werden REM-Aufnahmen der 1,4 %-Proben mit der Referenzfaser (Mitsubishi 1,4 % Sizing) verglichen.

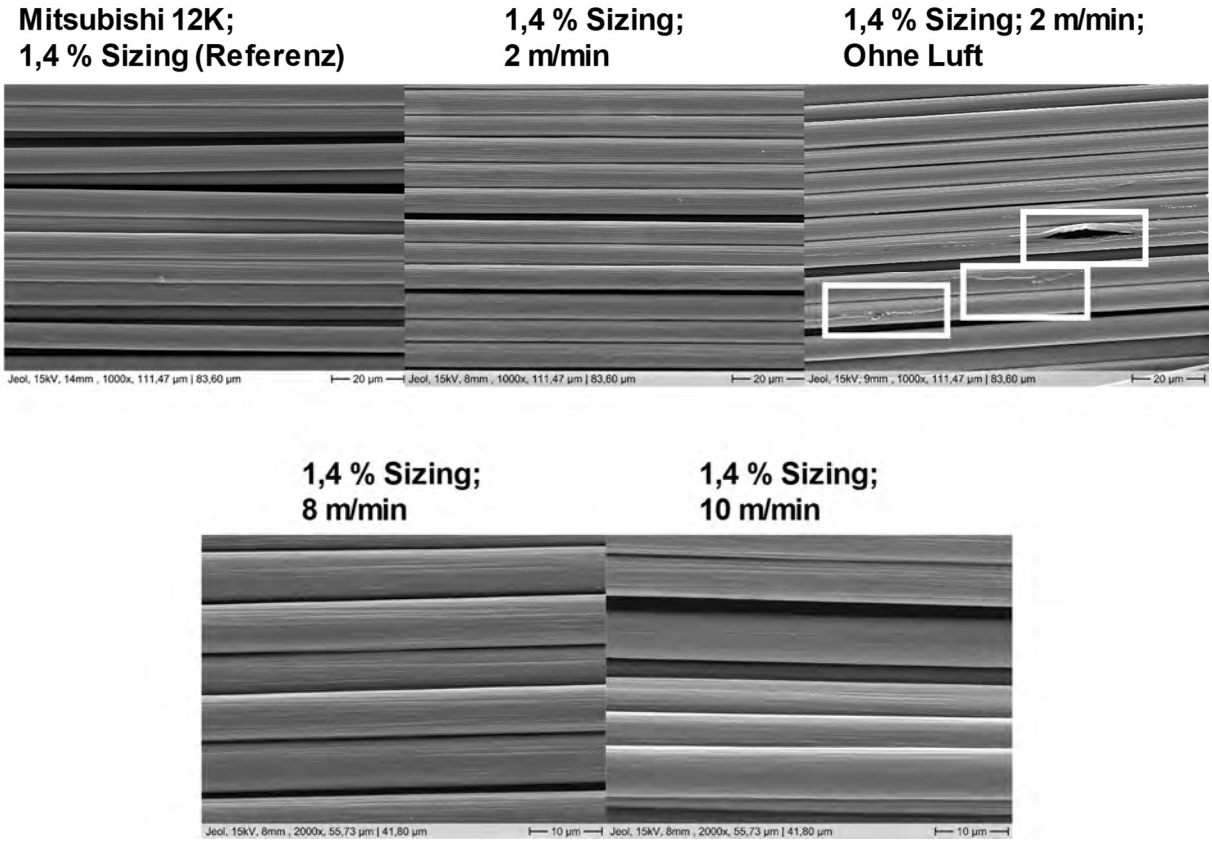

Abb. 43: REM-Aufnahmen der 1,4 %-Proben

Genau wie bei den Sizingversuchen wird auch hier deutlich, dass das Spreizen ohne Einsatz der Luftspreizdüse negative Auswirkungen auf die Faserqualität hat. Bereits bei nur 2 m/min werden Faser sehr stark beschädigt (Abb. 43). Das Luftspreizen ist unbedingt notwendig um solche Beschädigungen zu vermeiden. Weiterhin weist die Oberfläche von allen 1,4 %-Proben (Außer der Probe, welche ohne die Luftspreizeinheit hergestellt wurde) eine ähnlich hohe Qualität auf wie bei der Referenzprobe.

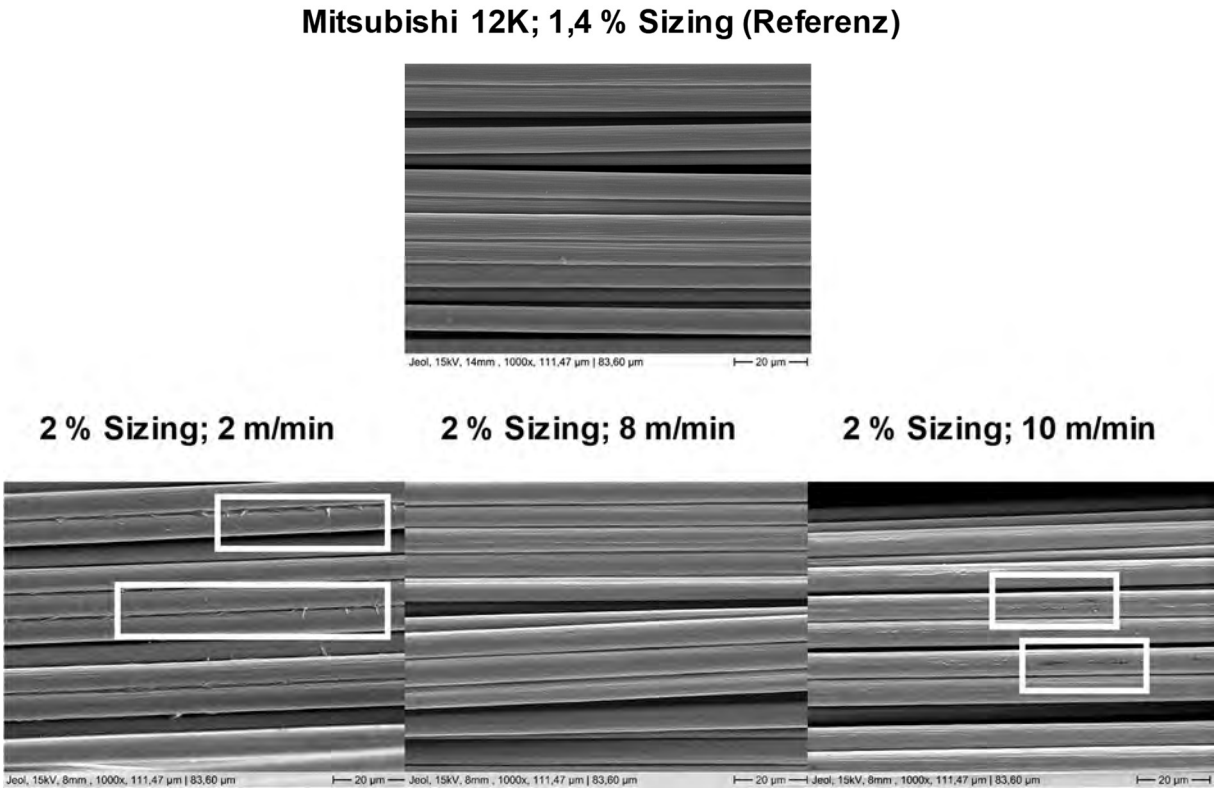

Abb. 44: REM-Aufnahmen der 2 %-Proben

Bei den 2 %-Proben werden im Gegensatz zu 1,4 %-Proben mittelstarke Faserbeschädigungen beobachtet, welche bei den Anlagengeschwindigkeit 2 und 10 m/min auftauchen (Abb. 44). Bei 2 % Sizing und 8 m/min wird ein CF-Tape mit ähnlicher Oberflächengüte hergestellt wie bei der Referenzfaser. Bei den 10 %-Proben wird deutlich, dass das CF-Tape bei allen Anlagengeschwindigkeiten viel überschüssiges Sizingmaterial und Verklebungen zwischen den Filamenten aufweist. Die höchste Oberflächenqualität wird wie bei den 2 %-Proben bei einer Anlagengeschwindigkeit von 8 m/min erreicht.

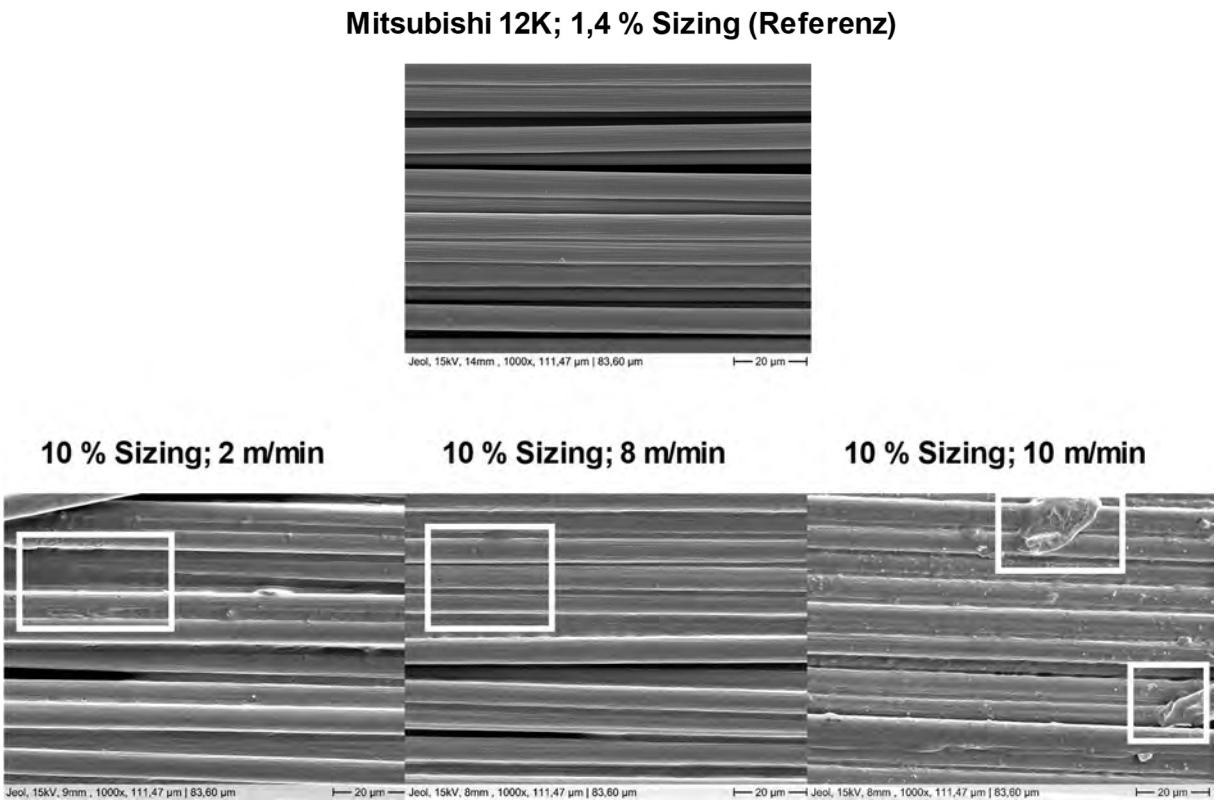

Abb. 45: REM-Aufnahmen der 10 %-Proben

Abschließend werden alle Sizingkonzentrationen hergestellt undbei der gleichen Geschwindigkeit miteinander verglichen (Abb. 46). Mit zunehmendem Sizinggehalt verschlechtert sich die Oberflächenqualität. Weiterhin wird bereits ab 2 % Sizinggehalt im Sizingbecken Mikrorisse in den Faserfilamenten sichtbar.

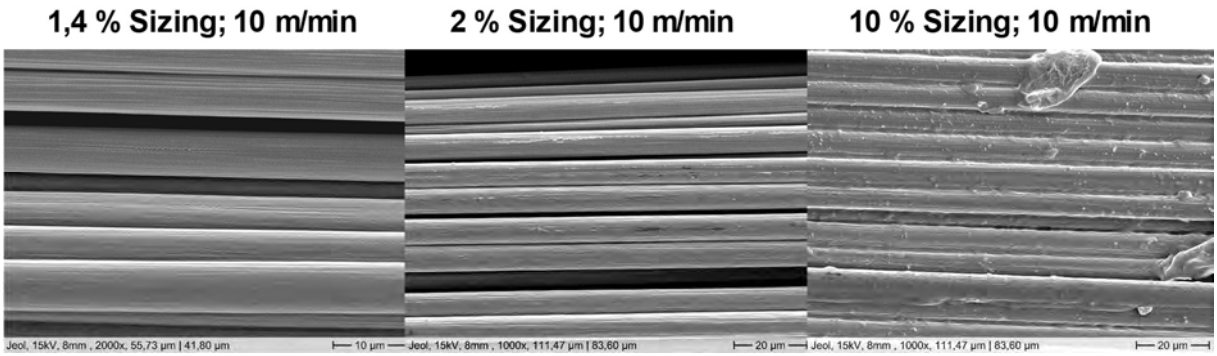

Abb. 46: REM-Aufnahmen der Proben mit unterschiedlichen Sizingkonzentrationen im Sizingbad

Als Fazit aus den REM-Aufnahmen ergibt sich:

- Die Luftspreizung verhindert starke Filamentschädigungen

- Mit **1,4 %** Schlichte und einer Anlagengeschwindigkeit von **8 bis 10 m/min** können ähnlich homogene gesizte Filamente hergestellt werden wie bei der Referenzfaser von Mitsubishi

Einzelfilamentmessung

Zur Bestimmung der mechanischen Fasereigenschaften der auf der SpreizSize-Anlage hergestellten CF-Tapes werden entsprechend Abb. 47 jeweils 35 Proben aus jedem Tape entnommen. Die Messungen werden mithilfe des Messgeräts Favimat der Firma TexTechno H. Stein GmbH (Mönchengladbach, Deutschland) durchgeführt.

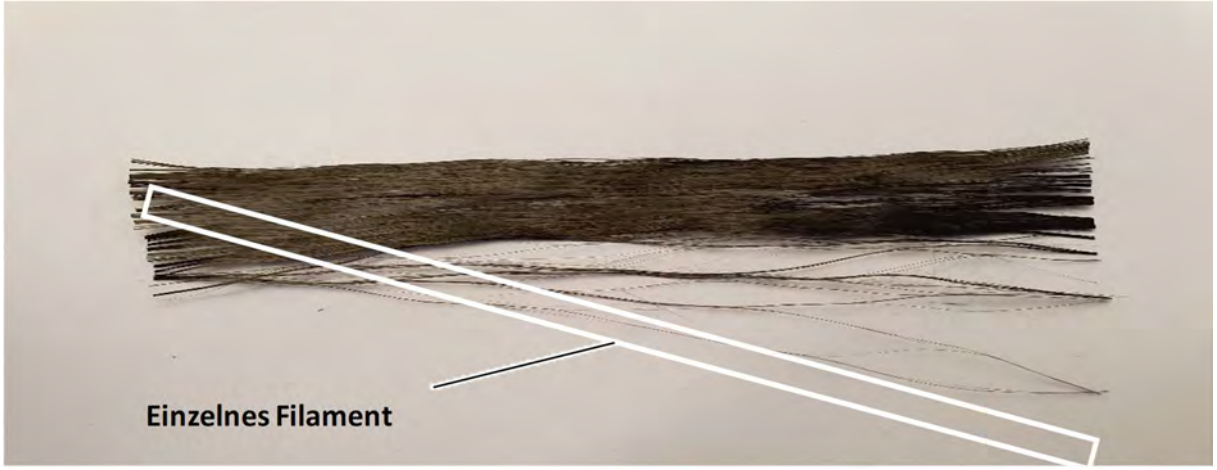

Abb. 47: Entnahme der Proben aus dem CF Tape (Einzelfilamentmessung)

Bei Vergleich aller hergestellten CF-Tapes wird beobachtet, dass die die Fasern bei 1,4 und 2 % Sizing im Sizingbad ähnlich hohe Bruchspannungen aufweisen (Abb. 48).

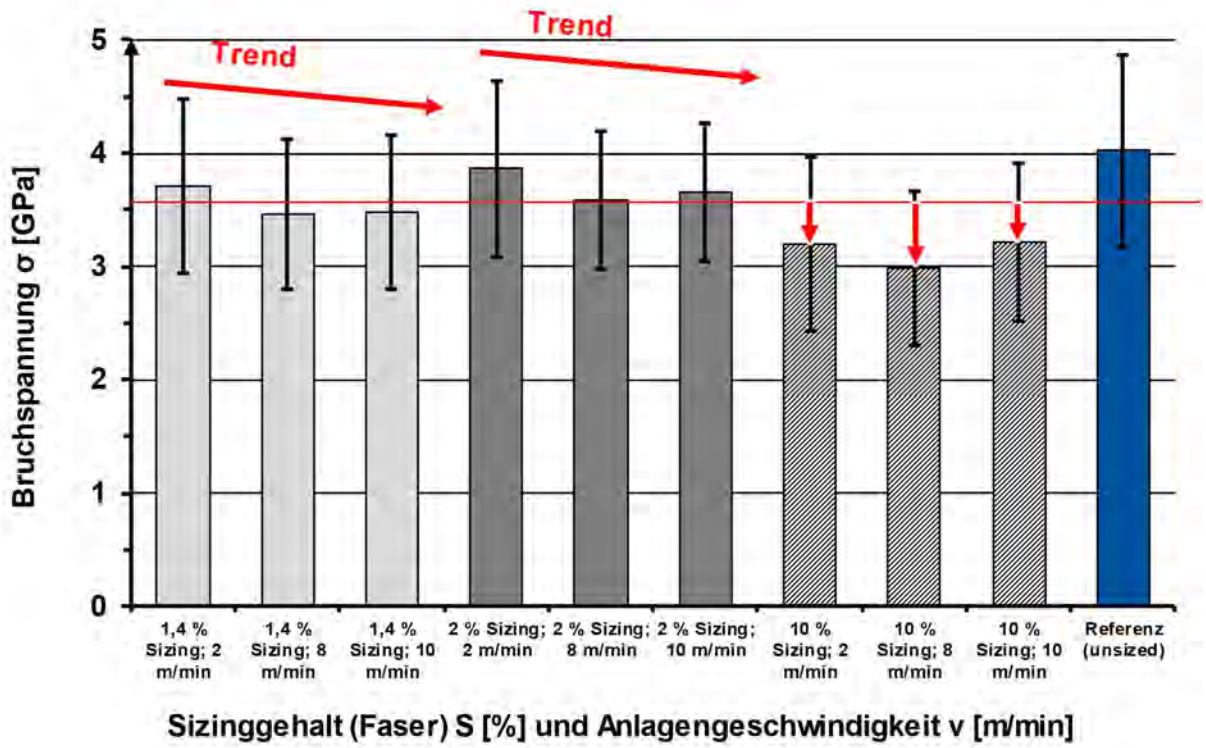

Abb. 48: Bruchspannungen aller CF-Tapes

Es lässt sich ein Trend beobachten, dass die zunehmende Anlagengeschwindigkeit einen leichten negativen Einfluss auf die Bruchspannungen haben. Der Einsatz von 10 % Sizing im Sizingbad führt zu starken Verlusten der Bruchspannungen führt. Ein Sizinggehalt von 10 % im Sizingbad ist viel zu hoch und sollte vermieden werden. Somit werden die Beobachtungen der Sizingbestimmung und der REM-Aufnahmen bestätigt.

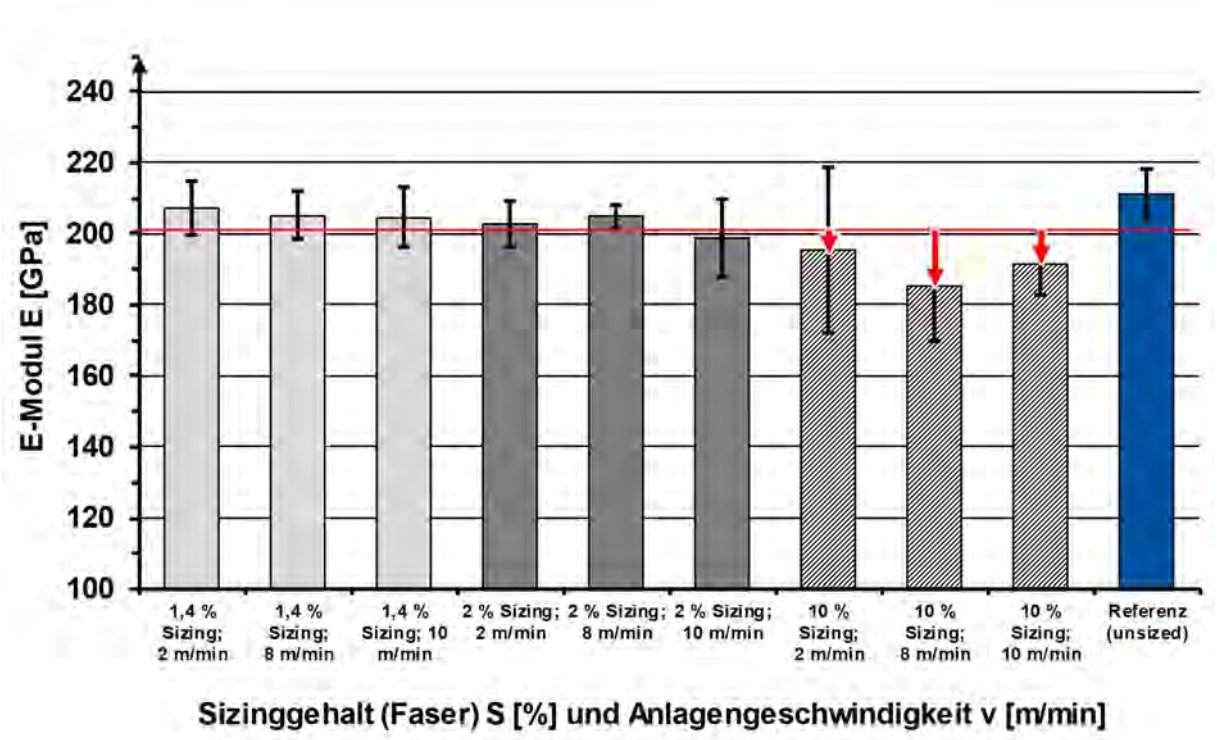

Abb. 49: E-Moduln aller CF-Tapes

Bei den E-Modulen gibt es kaum Unterschiede zwischen Referenz und den 1,4- bzw. 2 %-Proben (Abb. 49). Jedoch wird bei den 10 %-Proben eine ähnliche Beobachtung gemacht wie im Bruchspannungsdiagramm. Die E-Moduln der 10 %-Proben liegen eindeutig unterhalb dem E-Modul der Referenz und der anderen Proben.

Die CF-Tapes werden nach dem Spreizen und Sizen vor der weiteren Verarbeitung mit einem Polymer bebindert. Hierbei ist es von Interesse eventuelle Verluste der mechanischen Eigenschaften beim Bebindern zu ermitteln. Der Vergleich der Bruchspannungen der 1,4 %-Proben mit den bebinderten Proben zeigt, dass die CF-Tape mit ca. 8 % Binderanteil kaum Unterschiede zu den 1,4 % Proben aufweisen (Abb. 50). Jedoch führt ein Binderanteil von 25 % zu Verlusten der Bruchspannung. Bei Vergleich der E-Moduln zwischen den 1,4 %-Proben und der bebinderten Proben werden keine besonderen Beobachtungen gemacht.

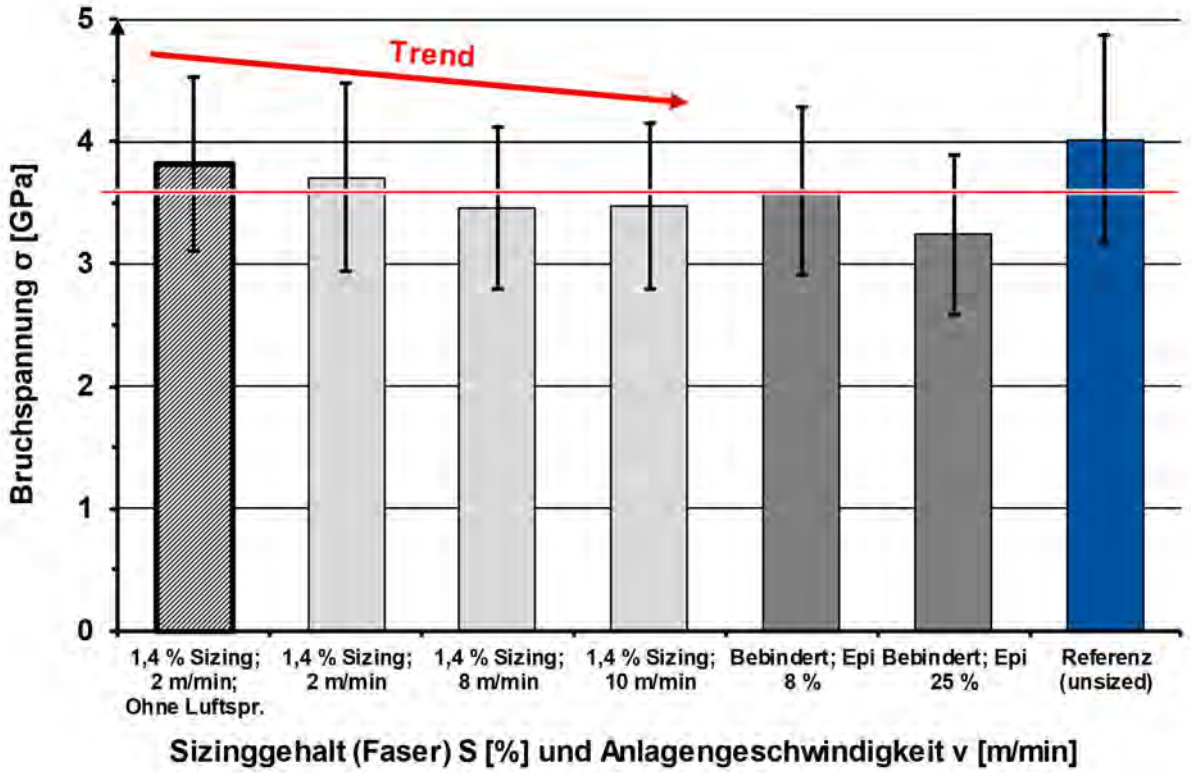

Abb. 50: Bruchspannungen der 1,4 %-Proben im Vergleich mit bebinderten Tapes

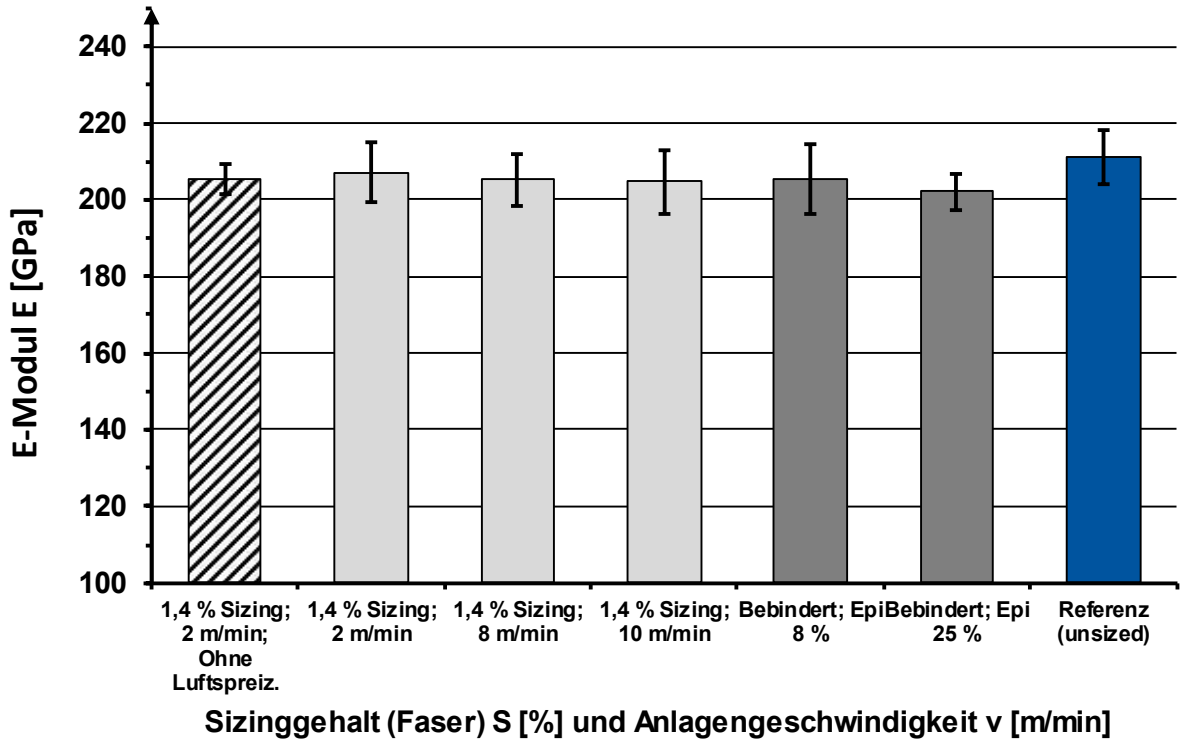

Abb. 51: E-Moduln der 1,4 %-Proben im Vergleich mit bebinderten Tapes

Zusammenfassend wird aus den Einzelfilamentmessungen ersichtlich, dass der SpreizSize-Prozess bei einem Sizinggehalt von 1,4 bzw. 2 % einen sehr leichten Einfluss auf die Bruchspannungen der CF-Tapes hat. Die E-Module werden kaum beeinflusst. Ein Sizinggehalt von 1,4 % und eine mittlere Anlagengeschwindigkeit von 8 m/min sollte für den Dauerbetrieb ausgewählt werden.

Tapebreite

Mit den in AP 6 und 7 ermittelten Prozessparametern werden CF-Tapes im Dauerbetrieb hergestellt. Hierbei werden jeweils zweimal 500 m CF-Tape mit maximaler Spreizbreite hergestellt (Tabelle 16). Die Anlagengeschwindigkeit beträgt 8 m/min (Produktionszeit beträgt ca. 60 min) und der Sizinggehalt 1,4 %.

Tabelle 16: Tapelänge und -breite sowie Spreizfaktor der im Dauerbetrieb hergestellten CF-Tapes

	Tapelänge	**Tapebreite**	**Spreizfaktor**	**Standardabw.**
Tape 1	Ca. 500 m	21,5 mm	3,6	2,1
Tape 2	Ca. 500 m	22,7 mm	3,8	2,4

Bei der Herstellung der CF-Tapes auf der SpreizSize-Anlage wurde besondersWert auf die Prozessstabilität gelegt. Beobachtungen zu möglichen Verschmutzungen und Unregelmäßigkeiten werden für die Spreizeinheiten sowie die Sizing- und Trocknungseinheit nach der Hälfte der Produktionszeit sowie nach der gesamten Produktionszeit aufgezeichnet (Tabelle 17). Nur bei den Umlenkrollen im Trocknungsofen können nach dem Dauertest mittelstarke Verschmutzungen (Auf die Umlenkrollen verklebte Filamente und Faserreste) beobachtet werden. Als Maßnahme sollten für die Zukunft der Einsatz von Umlenkrollen aus poliertem Stahl untersucht werden.

Tabelle 17: Vermutzungsgrad der Spreizeinheiten, des Sizingbeckens und der Trocknungsöfen bei der Herstellung von CF-Tapes im Dauerbetrieb

Produktionszeit	**Verschmutzung der Luftspreizeinheit und der Stangespreizung**	**Verschmutzung des Sizingbeckens**	**Verschmutzung der Trocknungsöfen**
30 min	gering	gering	gering
60 min	gering	gering	mittel

Bei den hergestellten Tapes werden sehr gute Ergebnisse erzielt. Mithilfe der SpreizSize-Prozessführung ist das Flächengewicht der CF-Tapes im Vergleich zu einem konventionell hergestellten CF-Tapes um bis zu 50 % reduziert worden (Abb. 52). Dies bedeutet, das beim Ablegen der CF-Tapes mit einem Flächengewicht von 38 g/m^2 doppelt so viele Faserschichten abgelegt werden können, um die gleiche Bauteildicke zu erreichen. Dies führt zu einer starken Erhöhung des Faservolumengehalts und folglich zu einer Steigerung der mechanischen Bauteileigenschaften.

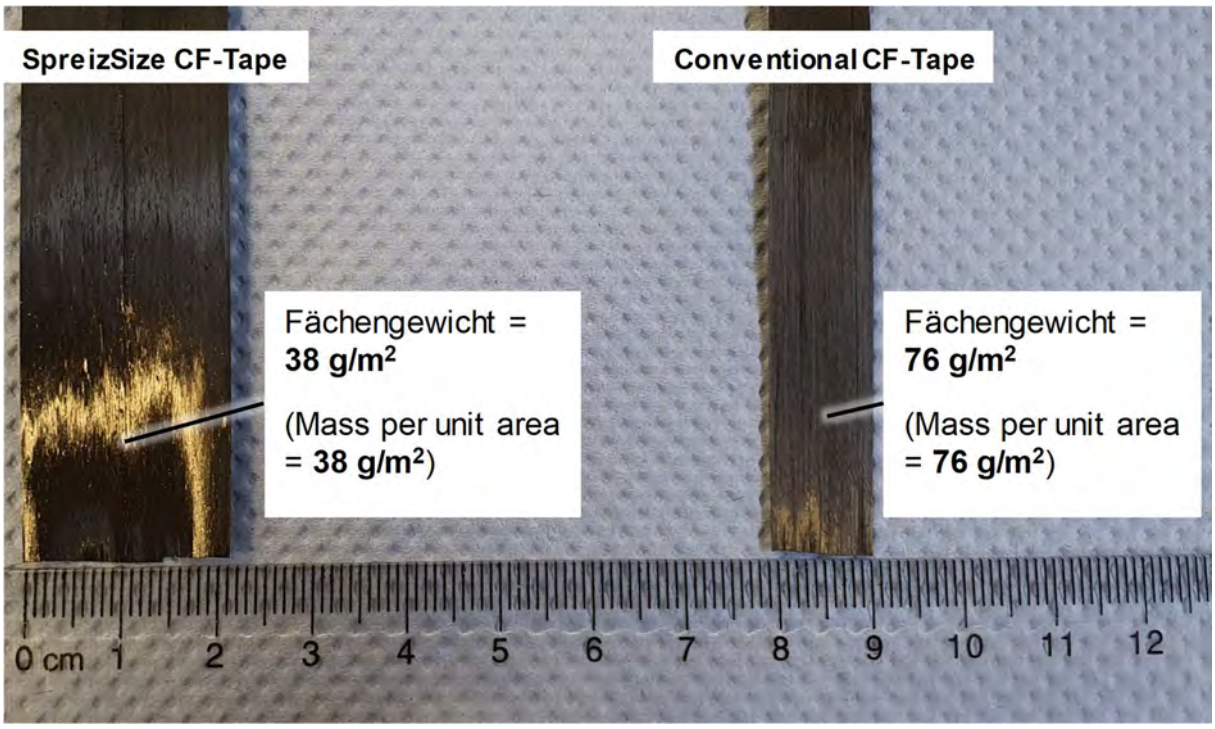

Abb. 52: Vergleich der Tapebreite und des Flächengewichts von konventionellen CF-Tapes mit CF-Tapes, hergestellt auf der SpreizSize-Anlage

Zusammenfassung der Ergebnisse

- SpreizSize-Anlage ermöglicht eine sehr präzise Einstellung des Sizinggehalts auf dem CF-Tape (Bessere Durchtränkung der CF-Filamente)
- SpreizSize-Prozessführung (Zuerst Spreizen und dann Beschlichten) ermöglicht die Herstellung mit hoher Anlagengeschwindigkeit (Idealerweise bei 8 m/min und bis zu 10 m/min)
- SpreizSize-Anlage ermöglicht die Herstellung von CF-Tapes mit einem Flächengewicht von nur 38 g/m^2 (Reduzierung des Flächengewichts um ca. 50 %)
- Leichte Reduzierung der Bruchspannungen der Einzelfilamente, jedoch starke Erhöhung des Faservolumengehalts im Bauteil

3 Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Projektziele oder die Zielsetzungen innerhalb des angegebenen Berichtszeitraumes gegenüber dem Antrag geändert (wenn ja: Be-gründung)?

Nein

4 Sind inzwischen von dritter Seite FuE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Projektes relevant sind (auch Darstellungen der aktuellen Informationsrecheren)?

Nein.

5 Wie hat sich die Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner entwickelt?

Die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern entwickelt sich sehr positiv. Es finden regelmäßige Telefonkonferenzen statt, wobei die grundlegende Projektbearbeitung besprochen wird. Bilaterale Projekttreffen finden häufig statt. Die Treffen vereinfachen die Entwicklung der Module durch die gemeinsame Bewertung der verschiedenen Konzepte sowie der Definition notwendiger Schnittstellen. Im Rahmen des Projektes wurden zudem bereits gemeinsame Versuche mit der entwickelten Pilotanlage durchgeführt. Die so gewonnenen Erkenntnisse sind bereits in konstruktive Verbesserungen der einzelnen Module eingeflossen.

Abb. 53: Gemeinsame Versuche mit dem ITA und M&A Dieterle in Ottenbach