

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



**LEICHTBAU
FORSCHUNG**

Pultix

Neuartiger Pultrusionsprozess zur kontinuierlichen
Herstellung duroplastischer Bewehrungsstäbe mit
Helix-Profilierung

Schlussbericht



Industrielle
Gemeinschaftsforschung **IGF**

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum.....	3
1.1 Materialcharakterisierung und Ableitung von Prozessszenarien.....	3
1.2 Entwicklung und Beschaffung eines Komplexwerkzeugs für die Helix-Pultrusion	13
1.3 Aufbau der Labor-Pultrusionsanlage und Prozesserprobung	24
1.4 Durchführung von Fertigungsstudien und Bewertung der Verbundqualität.....	30
1.5 Charakterisierung der Bewehrungsstäbe und Ableitung von Gestaltungsrichtlinien.....	34
1.6 Untersuchungen zur experimentellen Umformung von teilkonsolidierten duromeren Stabstrukturen	37
2 Verwendung der Zuwendung.....	42
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	43
4 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzens	44
5 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	46
6 Quellen	49

Kurzfassung

Der etablierte Einsatz von Stahlbeton ermöglicht vielseitige Anwendungen im Bauwesen. Die Korrosionsanfälligkeit der Stahlbewehrung führt jedoch aufgrund der notwendigen Kapselung zu einem höheren Materialeinsatz von Beton, als es für das optimale Tragverhalten erforderlich ist. Zudem besteht Beton größtenteils aus dem ressourcenintensiv produzierten Zement. Mit Bewehrungsstäben aus faserverstärkten Kunststoffen (FKV) können dagegen ausreichend hohe Trageigenschaften ohne Korrosionsproblematik erreicht werden.

Im Projekt Pultix wurde ein effizienter, einstufiger Pultrusionsprozess für solche duroplastische FKV-Bewehrungsstäbe mit prozessintegriert ausgebildeter Profilierung entwickelt. Dazu wurden verschiedene Verfahren konzipiert und bewertet und ein neuartiger Urformprozess (Helix-Pultrusion) als Vorzugslösung identifiziert. Nach der Erarbeitung und experimentellen Untersuchung von Gestaltungsweisen zur Tränkung unterschiedlicher Fasern mit verschiedenen Matrixsystemen wurde das Aushärteverhalten von Harzsystemen charakterisiert sowie Umformmöglichkeiten von Reinharz- und Faserverbundproben bei unterschiedlichen Aushärtegraden und Verformungstemperaturen untersucht. Auf Basis der erarbeiteten Kenntnisse wurde ein kombiniertes Formgebungs- und Aushärtungswerkzeug für die prozessintegrierte Ausbildung der Helixprofilierung entwickelt und erfolgreich in Betrieb genommen. Im Rahmen von Prozesserprobungen erfolgte die Validierung der neuartigen Fertigungstechnologie. Zusätzlich wurden Möglichkeiten zum Biegen von teilkonsolidierten faserverstärkten duromeren Kunststoffstabstrukturen untersucht und Parameter ermittelt, welche eine grundsätzliche Umformbarkeit ermöglichen.

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

1.1 Materialcharakterisierung und Ableitung von Prozessszenarien

Auswahl von Faser- und Matrixhalbezeugen

Basis für die Forschungsentwicklungen in diesem Projekt war die neuartige optimierte Realisierung von stabförmigen Bewehrungssystemen in Betonanwendungen. Das Entwicklungsziel war ein effizienter Fertigungsprozess zur Realisierung von oberflächentopologierten Stabstrukturen mit axial hinterschnittiger Mantelstruktur zur Verankerung in Betonsystemen zur Übertragung von Zuglasten. Dabei sollte der Fertigungsprozess bestenfalls für alle relevanten Faserarten und duromeren Matrixsysteme funktionieren und somit werkstoffunabhängig umgesetzt werden.

Verstärkungsfasern sind aufgrund ihrer großen axialen Steifigkeit und Festigkeit der dominierende Werkstoffanteil bei optimaler lastgerechter Anwendung in Faserverbundelementen. Aufgrund der schlanken axialen Struktur und der Belastungsrichtung der Halbzeuge sowie einer effizienten kontinuierlichen Fertigungsmöglichkeit ist der Pultrusionstechnologie prädestiniert. Diese Technologie ist Stand der Technik und wird für verfügbare Stabbewehrungen aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) mit nachgelagerten Prozessschritten eingesetzt. Gängige Verfahren sind dabei nachträgliches Konturfräsen, Besanden oder aufgesetztes Wickeln. Mit der neuartigen entwickelten Technologie der Helix-Pultrusion soll der Prozess auf einen einzigen Urformprozessschritt reduziert werden.

Erläuterungen und Grundlagen zum Prozess sind in den Kapiteln 1.2 und 1.3 beschrieben. Der Einfluss des Fasermaterials auf den Pultrusionsprozess ist relativ gering. Die größte Herausforderung für die Verarbeitung ist die Fasertränkung. Dabei unterscheiden sich die Fasertypen vor allem hinsichtlich ihrer Filamentstruktur. Hierbei soll nur auf die gängigen technischen Fasersysteme eingegangen werden. Glasfasern haben üblicherweise eine sehr glatte Mantelfläche und ermöglichen dadurch eine einfache Tränkung. Kohlenstofffasern und Basaltfasern weisen eher eine schuppige Oberfläche auf,

so dass das flüssige Matrixsystem eher im Fließen behindert und die Tränkung erschwert wird. Im Rahmen der Fertigungsuntersuchungen (vgl. Kapitel 1.4) erfolgten Bewertungen zum Tränkungsverhalten auch zu verschiedenen Fasertypen. Im Allgemeinen sind dünner Rovingstränge aufgrund des geringeren Fließweges besser tränkbar. Die weitere Festlegung auf die Garnfeinheit bildet einen Kompromiss aus dem Tränkungsverhalten und dem Bestückungsaufwand der Fertigungsanlage. Untersuchungsgegenstand für die Pultrusionsprozess-erprobung mit Injektionsbox sind Fertigungshalbzeuge mit einem Durchmesser von 5 mm. Für die Erprobung der Helix-Pultrusion zur Herstellung oberflächentopologierter Stäbe wurde ein äquivalenter Durchmesser von ca. 8 mm umgesetzt. Für beide Varianten sollte eine gleiche Anzahl von Spulen zum Einsatz kommen. Damit liegt die Feinheit des Rovings für die zweite Erprobungsvariante bei dem doppelten Wert im Vergleich zur ersten Variante. Für den Glasfaserroving wurden somit für die 5 mm Variante 2400 tex verwendet und für die 8 mm Variante 4800 tex ausgewählt und verwendet.

Die Matrixmaterialauswahl erfolgte exemplarisch für die verschiedenen duromeren Matrixvarianten. In Abstimmung mit den Partnern im projektbegleitenden Ausschuss wurden mit Epoxidharzsystemen (EP) und Polyurethanharzsystem (PUR) zwei unterschiedliche Systeme hinsichtlich ihres Konsolidierungsverhaltens ausgewählt. Beide Systeme finden sich in einer Vielzahl von technischen System wieder und sind entsprechend weit verbreitet. Während EP-Harze meist niedrig viskos sind und durch eine höhere Topfzeit längere Aushärtezeiten erfordern, zeigen PUR-System eher gegenteiliges Verhalten. Sie sind höher viskos und haben eine geringe Topfzeit bzw. Startzeit. Für den Pultrusionsprozess ist eine niedrige Viskosität für die Tränkung sehr vorteilhaft und eine kurze Topfzeit für eine schnelle und damit produktivere Prozessgeschwindigkeit. Damit verbunden sind unterschiedliche Dosier- und Infiltrationstechnologien. Für die EP-Systeme kann mittels vorgemischten Harzsystem die Infiltration aus dem Drucktopf erfolgen. Das PUR-System würde dabei schon reagieren und beginnen zu konsolidieren. Somit wurde für das PUR-System eine bestehende Dosieranlage umgerüstet und ertüchtigt (vgl. 1.3). Erprobt wurden EP-Systeme

Huntsman XB 6469 / Aradur2954 sowie BiresinCR170 / BiresinCH150-3. Wo- bei ersteres durch die sehr lange Topfzeit sehr lang und flexibel verarbeitbar ist. Auf Vorschlag vom Beratungspartner RÜHL PUROMER GmbH erfolgte die Fertigungserprobung des PUR-Systems mit puroreg® 185L.

Recherchearbeiten lieferten die folgenden Parametereinflüsse auf das Tränkungsverhalten in Injektionsboxen:

- Harzviskosität
- Filamentdurchmesser
- Filamentoberfläche
- Filamentkomprimierung
- Strangdicke (Wandungsdicke)
- Vorspannung der Fasern
- Prozessgeschwindigkeit
- Injektionsboxgeometrie

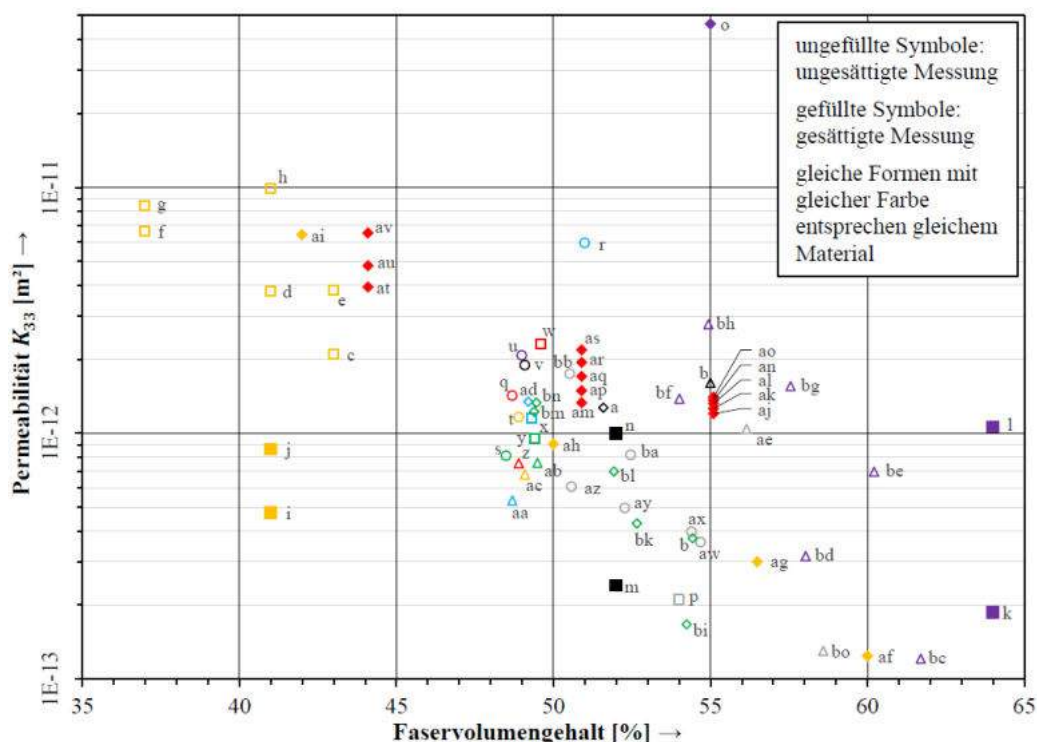


Abbildung 1-1: Dickenpermeabilität K33 unterschiedlicher Faserhalbzeuge über den Faservolumengehalt (als Zusammenfassung aus [1] für [2-13])

Für die Abschätzung des Tränkungsverhaltens und damit zur Ableitung möglicher Fertigungsparameter erfolgten Recherchen zum vergleichenden Tränkungsverhalten unterschiedlicher Faserarten. Die verfügbare Literatur dazu ist sehr eingeschränkt. Messungen zur Permeabilität unterschiedlicher Faserarten bei unterschiedlichem Faservolumengehalt sind in Abbildung 1-1 dargestellt. Ableitungen zu Erkenntnissen in Laminatdickenrichtung, wie die Tränkung in der Injektionsbox erfolgt, können damit nur abgeschätzt werden.

Charakterisierung von duromeren Matrixsystemen und Ableitung von Verarbeitungsparametern für den Verarbeitungsprozess

Zur Ableitung von Verarbeitungsparametern der Matrixsysteme und zur Gestaltung der Pultrusionsprozessstrecke wurden die Matrixsysteme hinsichtlich ihres reaktionskinetischen Verhaltens charakterisiert und mittels reaktionskinetischer Modellierung beschrieben. Mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) wurden mit einer DSC1 von Mettler Toledo DSC-Scans bei verschiedenen Heizraten (5 K/min, 10 K/min und 15 K/min) durchgeführt, um Eingabedaten für die reaktionskinetische Modellierung in der Software Netzsch Thermokinetics 3.1 zu erzeugen. Weitere DSC-Scans wurden an teilweise ausgehärteten Proben bei einer Heizrate von 10 K/min durchgeführt, um härtingsabhängige Glasübergangstemperaturen zu bestimmen. Erprobt wurden dabei die EP-Systeme XB 6469 / Aradur2954 von Huntsman International LLC und BiresinCR170 / BiresinCH150-3 von Sika Deutschland GmbH sowie das PUR-System puropreg® 185L der RÜHL PUROMER GmbH.

Für das System von Huntsman, mit welchem eine Vielzahl der Fertigungsversuche durchgeführt wurden, sind die ermittelten Daten im Folgenden dargestellt. Je nach Heizrate findet die Vernetzungsreaktion zwischen 60 °C und 250 °C statt. Die experimentellen und modellbasierten Daten sind in Abbildung 1-2a dargestellt. Die Daten zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Glasübergangstemperatur kann in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Daten durch die DiBenedetto-Gleichung beschrieben werden (Abbildung 1-2b).

Zusätzlich zur reaktionskinetischen Analyse erfolgten rheometrische Analysen an den Harzsystemen. Dabei wurden die Mischviskositäten bei unterschiedlichen Temperaturen bestimmt und die Topfzeiten bis zu den einsetzenden Vernetzungsreaktionen sowie Abschätzungen bis zum Erreichen des Gelzustandes. Damit ergaben sich Gestaltungsrandbedingungen für die Injektionsbox und die Konsolidierstrecke in Abhängigkeit von der erreichbaren Härtungstemperatur. Dies floss in die Gestaltungsanforderungen mit ein.

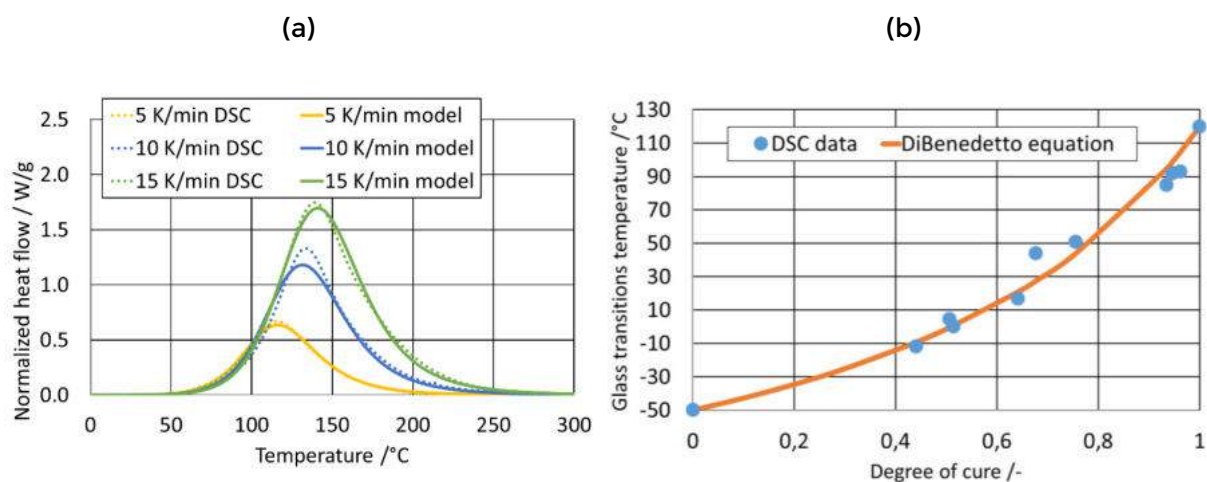


Abbildung 1-2: Reaktionsverhalten des Epoxidharzes XB 6469 / Aradur2954: (a) Vergleich von DSC-Daten und Modellvorhersage, (b) Aushärtungsabhängigkeit des Glasübergangs

Untersuchungen zum Umformvermögen von teilkonsolidierten Reinharzprobekörpern

Erfahrungen aus Forschungsarbeiten zur Gestaltung von FKV-Bewehrungsstäben im speziellen mit thermoplastischer Matrix zeigen die Möglichkeit zur umformenden Formgebung eines Halbzeugstabs. Für duromere Matrixsysteme können Umformungen nur im teilkonsolidierten Zustand bei noch nicht vollständiger Vernetzung erfolgen. Hierfür muss die Vernetzung soweit fortgeschritten sein, dass das Material nicht mehr flüssig ist. Zur Ermittlung des Umformpotentials wurde an teilkonsolidierten Reinharzproben Zug- und Druckversuche durchgeführt.

Zugproben wurden in einem RTM-Formwerkzeug bei 60 °C für 6 Stunden teilweise vorgehärtet. Druckproben wurden in Glaszylindern ausgehärtet,

die auf der Unterseite versiegelt und bei einem ähnlichen Aushärtungszyklus in einen Umluftofen gelegt wurden. Nach dem Zuschneiden der Zug- und Druckproben auf die erforderlichen Abmessungen wurden sie im Umluftofen bei den in Tabelle 1-1 angegebenen Temperaturen und Verweilzeiten nachgehärtet. Die resultierenden abgestuften Glasübergangstemperaturen wurden durch DSC-Scans bestimmt.

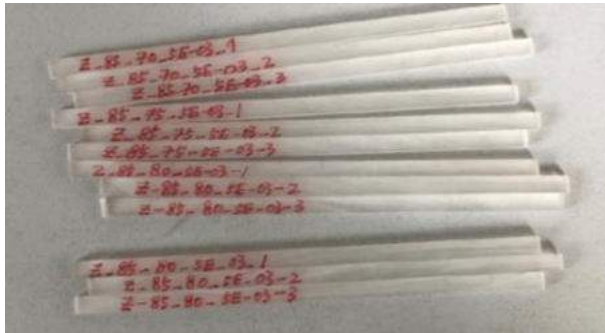
Tabelle 1-1: Nachhärtungszyklen für teilweise ausgehärtete Zug- und Druckproben

Nachhärtungstemperatur (°C)	Verweilzeit (h)	Resultierende T_g der Zugproben (°C)	Resultierende T_g der Druckproben (°C)
60	2	85	85
80	2	93	97
120	1	118	118

Die quasi-statischen Prüfungen wurden auf einer Zug-Druck-Torsionsprüfmaschine mit einer 10 kN Kraftmessdose und einer Traversengeschwindigkeit von 15 mm/min durchgeführt. Die Probekörper hatten einen Querschnitt von 4 mm x 2 mm, eine Länge von 100 mm und eine Messlänge von 50 mm (Abbildung 1-3a). Um das gesamte Verfestigungsverhalten zu erfassen, wurden die Druckversuche mit einer 250 kN-Kraftmessdose durchgeführt. Es wurde eine Traversengeschwindigkeit von 3 mm/min verwendet. Zylindrische Probekörper wurden auf einen Durchmesser von 10 mm und eine Höhe von 10 mm geschnitten und anschließend plangedreht, um planparallele Oberseiten zu gewährleisten (Abbildung 1-3b). Zur Verringerung der Reibung zwischen Proben und Platten wurden PTFE-Folien verwendet. Die Prüftemperaturen wurden durch einen Umluftofen eingestellt. Die Probekörper wurden nicht früher als 10 min vor der Prüfung eingelegt, um eine mögliche Nachhärtung zu verhindern [14].

Die Zug- und Druckprüfungen wurden unter verschiedenen Prüftemperaturen durchgeführt und die Spannungs-Dehnungskurven ermittelt. Bei niedriger Temperatur zeigen die Proben eher spröderes Materialverhalten, welches für die Umformung ungeeignet ist.

(a)

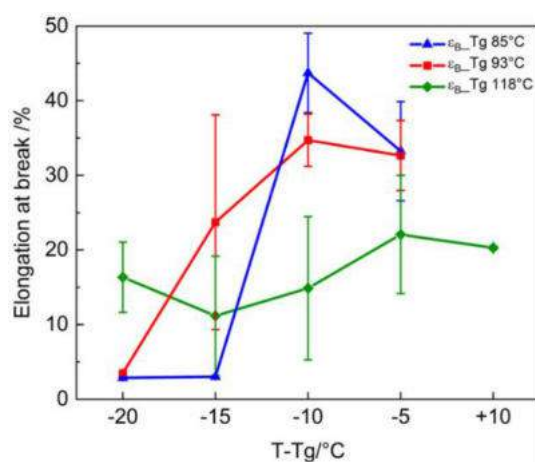


(b)



Abbildung 1-3: Teilweise ausgehärtete (a) Zug- und (b) Druckprüfkörper

(a)



(b)

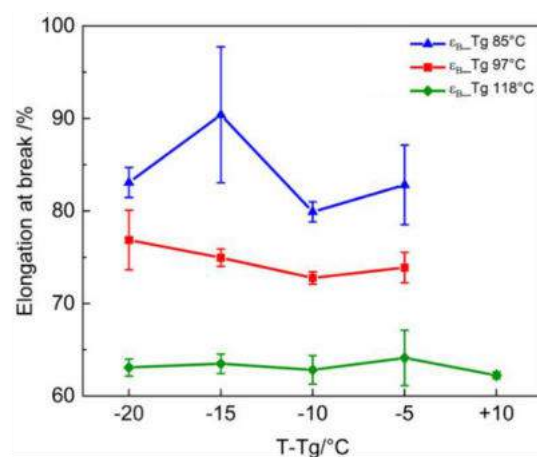


Abbildung 1-4: Bei (a) Zug- und (b) Druckversuchen ermittelte Bruchdehnungen in Abhängigkeit von Temperatur und Aushärtegrad

In der Annahme, dass die Bruchdehnung ϵ_b von großer Bedeutung für die Verformbarkeit des faserverstärkten Epoxidharzes ist. Daher sind in Abbildung 1-4 die gemessenen Ergebnisse für ϵ_b in Abhängigkeit von T_g und der durch $(T - T_g)$ angegebenen Prüftemperatur dargestellt. Daraus lässt sich schließen, dass die niedrigste T_g von 85 °C am besten geeignet ist, um große plastische Verformungen zu realisieren. Während im Zugmodus ein maximales ϵ_b von 43 % 10 K unter T_g erreicht wurde, war im Druckmodus eine maximale Verformung von 90 % möglich, wenn eine Prüftemperatur von 15

K unter T_g verwendet wird. Im Hinblick auf die temperaturbedingte Nachhärtung während der Prüfung ist zu beachten, dass eine leichte Erhöhung von T_g möglich ist.

Untersuchung zur Umformung von teilkonsolidierten FKV-Probekörpern

Zur Abschätzung des Einflusses von Fasern auf das Verformungsverhalten von teilkonsolidierten duromeren FKV-Elementen erfolgten dazu Untersuchungen an Biegeproben. Dazu wurden faserverstärkten Verbundplatten mittels RTM-Form mit den Abmessungen 500x500x2 mm³ hergestellt. Als Verstärkungsmaterial wurden unidirektionale Kohlenstofffasergelege PX35 von Zoltek mit einem Flächengewicht von 333 g/m² verwendet. Es wurden zwei verschiedene Lagenaufbauten gewählt: eine unidirektionale $[0^\circ_6]$ und eine bidirektional verstärkte $[45^\circ/-45^\circ/45^\circ]_s$, was zu einem theoretischen Faservolumengehalt von 56 % führt. Die Probekörper für die Biegeversuche wurden auf die Abmessungen 150x15x2 mm³ zugeschnitten und analog zu den reinen Harzproben nachgehärtet.

Für die Verbundbiegeversuche wurde eine selbstgebaute Rotationszugbiegevorrichtung verwendet, die in Abbildung 1-5 schematisch dargestellt ist. Auswechselbare Biegerollen ermöglichen die Anpassung des Biegeradius. Die Krümmung kann durch die Wahl des Drehwinkels variiert werden. Zur Erzeugung erhöhter Temperaturen werden die Rotationszugbiegevorrichtung und die Probekörper in einen Konvektionsofen gestellt. Vor den Biegevorgängen wurden die Ofentüren geöffnet. Dadurch ist ein leichter Temperaturabfall während der Verformung möglich.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der thermoanalytischen und mechanischen Charakterisierung des reinen Harzes wurden auf Biegeversuche an CFK-Proben übertragen. Tabelle 1-2 vergleicht die variierten Parameter mit den Ergebnissen. Es wurden Biegerolldurchmesser von 32 mm und 48 mm gewählt. Für beide Lagenaufbauten wurde teilgehärtetes Verbundmaterial mit einer T_g von 93 °C gewählt. Die Prüftemperaturen wurden iterativ bestimmt, wobei mit den vielversprechendsten Temperaturen begonnen wurde, die bei der Charakterisierung des reinen Harzes ermittelt wurden. Der anfängliche Biegewinkel wurde manuell durch Drehen des Stehbolzens

eingestellt. Nach Ablauf einer definierten Verweilzeit beim Ausgangsbiege-
winkel wurde die Probe entlastet, entnommen und gemessen. Die Ergeb-
nisse werden durch Auswertung des endgültigen Biegewinkels nach der
Entlastung und des Auftretens von Schädigungsmustern wie Faserknicken,
Faltenbildung oder Harzrissen dargestellt (Tabelle 1-2).

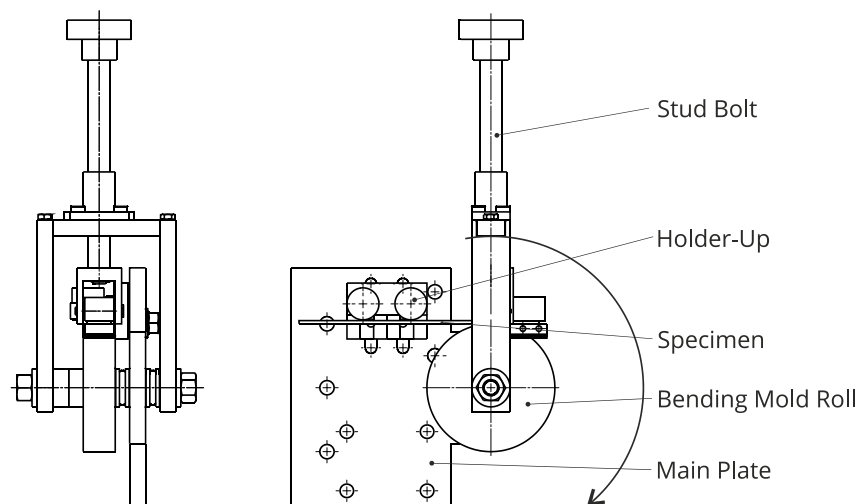


Abbildung 1-5: Rotationszugbiegevorrichtung für Biegeversuche

Die Probekörper mit $\pm 45^\circ$ -Verstärkung zeigten insgesamt eine gute Ver-
formbarkeit. Die beiden Prüftemperaturen von 80°C und 90°C führten zu
einer überwiegend plastischen Verformung. Bei einem anfänglichen Biege-
winkel von 90° und einem Rollendurchmesser von 48 mm ergab sich ein
endgültiger Biegewinkel zwischen 84° und 88° . Es traten keine sichtbaren
Schäden auf (Abbildung 1-6a). Eine Erhöhung der Verweilzeit von 10 min auf
30 min verbesserte die Ergebnisse geringfügig.

Im Gegensatz zu den $\pm 45^\circ$ -Proben zeigte das Material mit 0° -Verstärkung
ein eher elastisches Verhalten, das zu einer deutlichen Rückfederung nach
der Entlastung führte. Die bisher verwendeten Parameter waren nicht ge-
eignet, um ein Versagen zu vermeiden. Um dieses Problem zu lösen, wur-
den ein reduzierter Anfangsbiegewinkel von 60° und ein Rollendurchmes-
ser von 48 mm gewählt. Die bei 90°C und 120°C geprüften Probekörper
zeigten noch immer Faserfalten und Matrixversagen auf der Druckseite
(Abbildung 1-6b). Bei einer weiter erhöhten Prüftemperatur von 140°C

konnte eine Schädigung vermieden werden, während der Rückfederungsbetrag vergleichsweise hoch blieb. Es konnte ein endgültiger Biegewinkel von 18° erreicht werden.

Tabelle 1-2: Parameter und Ergebnisse der Rotationszugbiegeversuche an FKV-Proben

Lay-Up	T _g (°C)	Prüfttemperatur (°C)	Rollendurchmesser (mm)	Verweilzeit (min)	Anfangs-Biegewinkel (°)	End-Biegewinkel (°)	Schaden aufgetreten?
[45°/-45°/45°] _s	93	80	32	10	90	84,5	Nein
[45°/-45°/45°] _s	93	90	32	10	90	87,5	Nein
[45°/-45°/45°] _s	93	80	32	30	90	88	Nein
[0°] ₆	93	90	48	30	60	-	Ja
[0°] ₆	93	120	48	30	60	-	Ja
[0°] ₆	93	140	48	30	60	18	Nein

(a)

(b)



Abbildung 1-6: Beispielhafte Ergebnisse der Biegeversuche an CFK-Verbundproben mit (a) ±45° und (b) 0° Faserausrichtung

Diese Untersuchungen bestätigen die Notwendigkeit für FKV-Umformungen bei reiner axialer Faserbelastung in Zug- und Druckrichtung Elastizitätsreserven für das Fasermaterial vorzusehen.

1.2 Entwicklung und Beschaffung eines Komplexwerkzeugs für die Helix-Pultrusion

Gestaltung von Injektionsboxen

Das duromere Pultrusionsverfahren (vgl. Abbildung 2-1) als gängiges Verfahren für lange und schlanke faserverstärkte duromere Kunststoffbauteile zieht Fasern von Spulen von einem Faserregal durch eine Imprägniereinheit und eine Formgebungs- und Konsolidiereinheit. Die Abzieheinheit bildet den Prozessantrieb und ermöglicht bei entsprechender Gestaltung einen kontinuierlichen Prozess. Die Ablängeinheit kürzt den Profilstrang auf gewünschte oder transportable Längen. Kernstücke der Prozessstrecke sind die Imprägniereinheit sowie Formgebungs- und Konsolidiereinheit. Diese Elemente wurden vertieft betrachtet und weiterentwickelt.

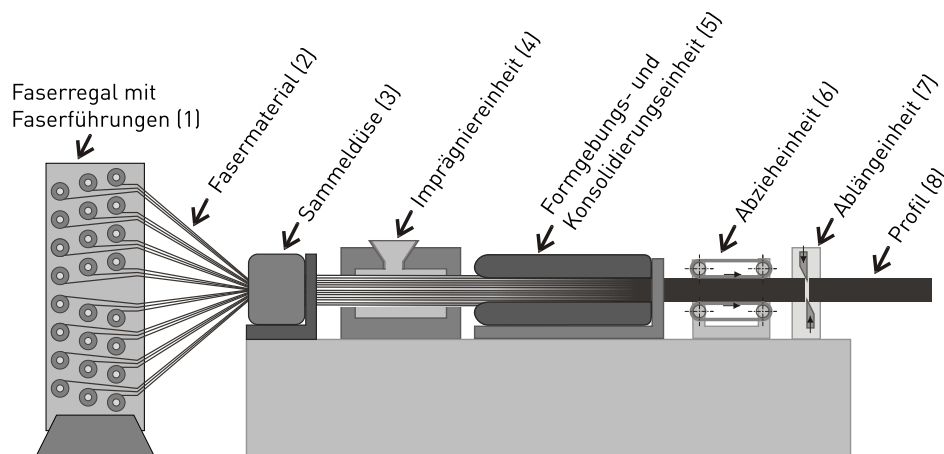


Abbildung 2-1: Prozessstrecke der Duroplastpultrusion (Prinzipiskizze)

Die Imprägnierung der zugeführten Halbzeuge kann grundsätzlich in zwei unterschiedlichen Arten erfolgen: der offenen sowie der geschlossenen Imprägnierung. Beim offenen Verfahren läuft die Imprägnierung in einem offenen Harzbad ab (vgl. Abbildung 2-2), wohingegen beim geschlossenen Verfahren dies mithilfe eines Injektionswerkzeuges mit vorhandener Injektionskammer erfolgt. Das offene Verfahren wird zudem noch in mehrere konstruktiven Varianten unterteilt (vgl. Abbildung 2-2). [15]

Nach [16] befinden sich beim Wannenverfahren mehrere Umlenkrollen im Harzbad. Die Imprägnierung erfolgt durch mehrere Umlenkvorgänge sowie

Führungsblenden bzw. -platten. Diese Verfahrensvariante ist am gebräuchlichsten für geringe Bauteilkomplexitäten.

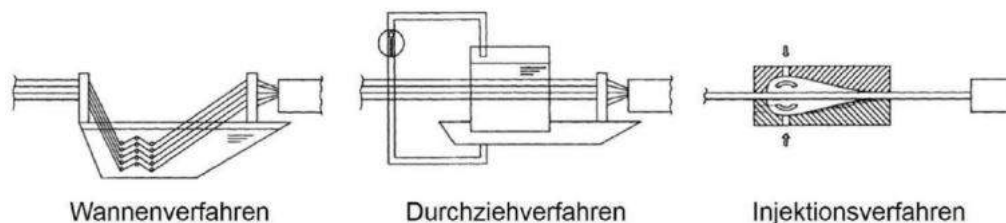


Abbildung 2-2: Übersicht Imprägnierungsvarianten [16]

Das Durchziehverfahren eignet sich hingegen für komplexere Pultrusionsprofile. Die Zufuhr sowie Abfuhr der Fasern bzw. Halbzeuge erfolgt über Loch-/ Schlitzplatten, dessen Form sich bereits der späteren Profilform angleichen. Das durch die Faserzuführungseinheiten abtropfende Harz wird in der Harzwanne aufgefangen und über eine Pumpeinrichtung dem Harzbad wieder zugeführt. [16]

Die offenen Varianten besitzen gegenüber der geschlossenen Imprägnierung jedoch den Nachteil, dass das gesamte sich im Harzbad befindliche Harzsystem in regelmäßigen Zeitintervallen ausgetauscht werden muss, um Gelierungs- sowie Aushärtungsvorgänge zu vermeiden. Zudem wirkt sich die zeitabhängige Viskositätsänderung beeinflussend auf die Prozessstabilität aus. Ein weiterer entscheidender Nachteil sind die Gesundheitsbelastungen für die Arbeiter am Arbeitsplatz. Aufgrund des Vorkommens von leicht flüchtigen Bestandteilen, wie z.B. Styrol, sind umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen für den Arbeitsplatz notwendig. [15, 16] Zusätzlich können Umgebungsbedingungen (bspw. Luftfeuchte) den Prozess beeinflussen.

Bei der geschlossenen Variante, der Harzinjektion, werden die Rovings ähnlich dem Durchziehverfahren ohne Umlenkung durch das Werkzeug geleitet. Das Harzgemisch wird über eine Dosiereinheit zugeführt und mit einstellbarem Druck in die Injektionskammer eingespritzt. Der Austrittsquerschnitt des Werkzeuges kann hierbei schon die finale Form des herzustellenden Profils besitzen. Das Harzinjektionsverfahren wird meist für einfache

Strangprofile mit hohen Produktionsmengen sowie für Harzsysteme mit hoher Viskosität sowie niedriger Topfzeit verwendet [12]

Nur unter der Verwendung des Harzinjektionsverfahrens mithilfe einer Injektionsbox können reaktive Harzsysteme für die Herstellung von Pultrusionsprofilen mit hoher Imprägnierqualität eingesetzt werden. Durch die kontinuierliche Zuführung von Matrixmaterial ist die Imprägnierqualität reproduzierbar und lässt sich exakt einstellen. Der Misch- und Dosiervorgang geschieht dabei in der Regel mit Hilfe einer Misch-/Dosieranlage. Somit kann das ganze System als geschlossen betrachtet werden, wodurch die Emissionsbelastung am Arbeitsplatz erheblich gesenkt wird. Der Einsatz von Injektionsboxen beschränkt sich somit auf geschlossene Pultrusionsprozesse. [15, 17]

Das Matrixsystem kann mittels Druck in die Injektionskammer eingebracht werden tränkt dabei schon die Fasern. Aufgrund der konischen Form des Injektionskammerauslaufs werden Matrix und Fasern bzw. Halbzeuge komprimiert. Dadurch entsteht zusätzlich in diesem Bereich ein höherer Injektionsdruck und Luft oder andere Gase können entweichen. Das führt zu einer besseren Imprägnierung als bei den anderen Verfahrensvarianten (vgl. Abbildung 2-3).

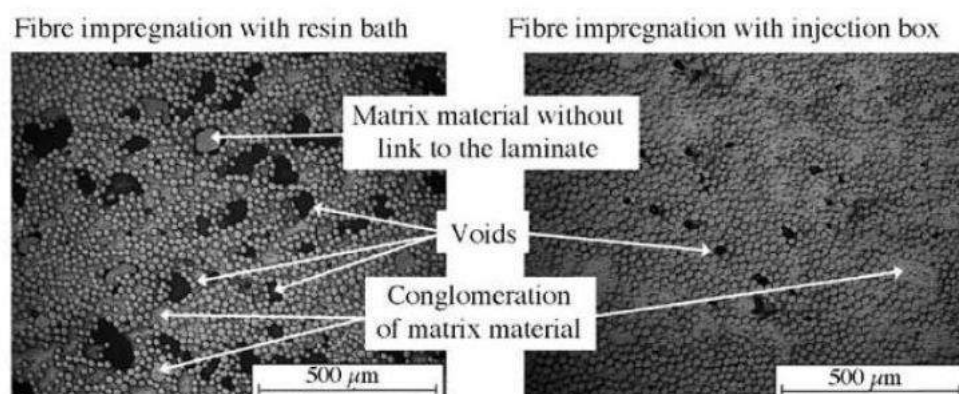


Abbildung 2-3: Imprägnierqualität Harzbad (links) und Injektionsbox (rechts) [17]

Die Injektionskammer kann lediglich durch die Kompression der Fasern bzw. Halbzeuge am Ein- und Austritt abgedichtet werden. Hierzu ist eine entsprechende konstruktive Auslegung der Kammer sowie der Ein- und

Austrittsquerschnitte notwendig, um den Matrixaustritt und den damit entstehenden Druckabfall zu verhindern. Zusätzlich wird durch den Einsatz von definierten Materialflussraten kein überschüssiges Matrixmaterial verbraucht. [15, 17]

Arten von Injektionsboxen

Grundsätzlich gibt es 2 Arten von Injektionsboxen, welche sich aufgrund der Geometrie der Injektionskammer unterscheiden: die „tropfenförmige Injektionskammer“ und die „konische Injektionskammer“ (vgl. Abbildung 2-4). [18]

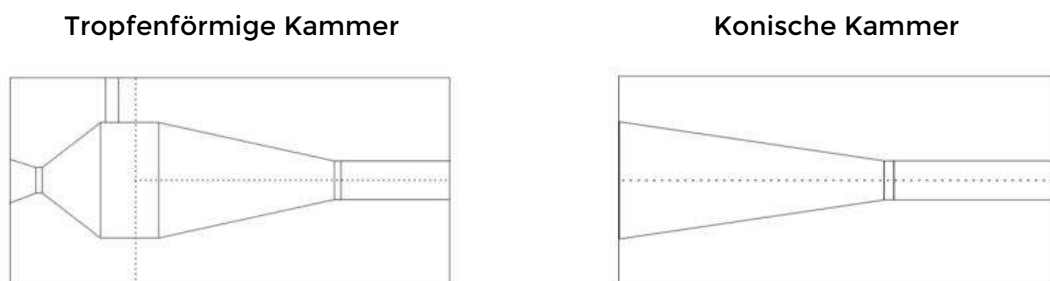


Abbildung 2-4: Arten von Injektionskammern

Die tropfenförmige Injektionskammer stellt hierbei eine Erweiterung der konischen Kammer dar. Die Vorteile der tropfenförmigen Kammer sind vor allem die Imprägnierqualität, der exakt einstellbare Druckaufbau innerhalb der Kammer sowie die Verminderung von Matrixrückfluss/ -austritt. [19]

Aufbau einer tropfenförmigen Injektionskammer

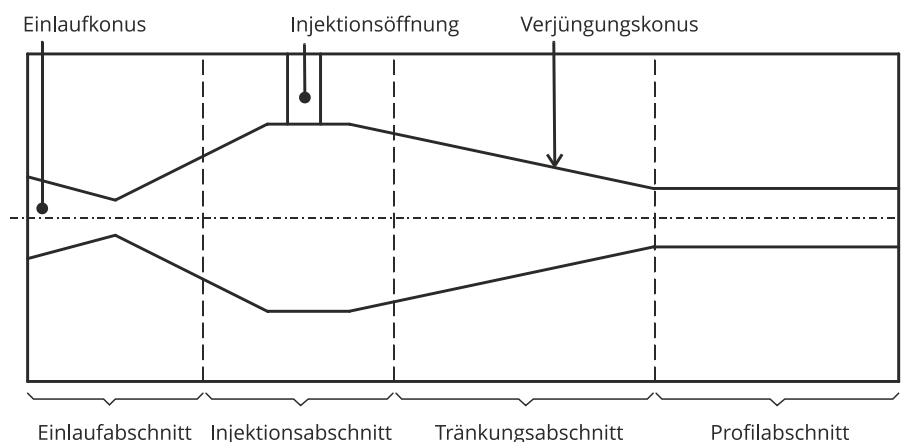


Abbildung 2-5: Aufbau tropfenförmige Injektionskammer

Die tropfenförmige Injektionsbox ist in Mittelachsenrichtung in mehrere Abschnitte unterteilt. Sie besteht aus dem Einlaufabschnitt, dem Harzinjektionsabschnitt, dem Übergangsabschnitt sowie dem Profilabschnitt (vgl. Abbildung 2-5). [19]

Einlaufabschnitt

Über den Einlaufkonus verjüngt sich der Querschnitt B in Richtung des Kammeraustrittes, um die zugeführten Verstärkungsmaterialien zu komprimieren und den Matrixrückfluss zu verhindern. Die Verjüngung trägt zudem zur axialen Ausrichtung des Pultrusionsstranges bei. Zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen am Kammereintritt können helfen den Matrixausritt aus der Injektionskammer zu unterbinden. (vgl. Abbildung 2-5)

Injektionsabschnitt

Das Harzsystem wird über die Injektionsöffnung bzw. dem Einspritzkanal unter Druck der Injektionskammer zugeführt (vgl. Abbildung 2-5). Eine vorgeschaltete Temperierung hilft dabei, die gewünschte Viskosität des Harzsystems einzustellen und somit das Einspritz- und Imprägnierverhalten zu verbessern. Die Temperatur liegt jedoch unterhalb der anfänglichen Reaktionstemperatur [19].

Tränkungs- und Profilabschnitt

Der Tränkungsabschnitt erzeugt über den Verjüngungskonus und die Pultrudatbewegung lokal einen höheren Injektionsdruck. Somit wird eine vollständige Imprägnierung der Verstärkungsmaterialien erreicht. Zudem wird überschüssiges Matrixmaterial aus dem Pultrusionsstrang entfernt. Somit wird die endgültige Schrumpfung reduziert sowie die Reaktionsgasbewegung kontrolliert [19]. Der Profilabschnitt komprimiert den Pultrusionsstrang in seine endgültige Form innerhalb der Injektionskammer.

Funktion der tropfenförmigen Injektionskammer

Die speziell tropfenförmige Kontur mit abgerundeten Kanten verhindert Aushärtungszonen („dead spots“). Die Funktion der Injektionskammer liegt darin, die Verstärkungsmaterialien vollständig zu imprägnieren, bevor die

Aushärtung des Harzsystems beginnt. Zusätzliche eingebrachte Temperierkanäle oder auch der Einsatz von konventionellen Heizelementen können die Temperierung des Harzsystems unterstützen. [19]

Injektionsboxvarianten und Gestaltungstool

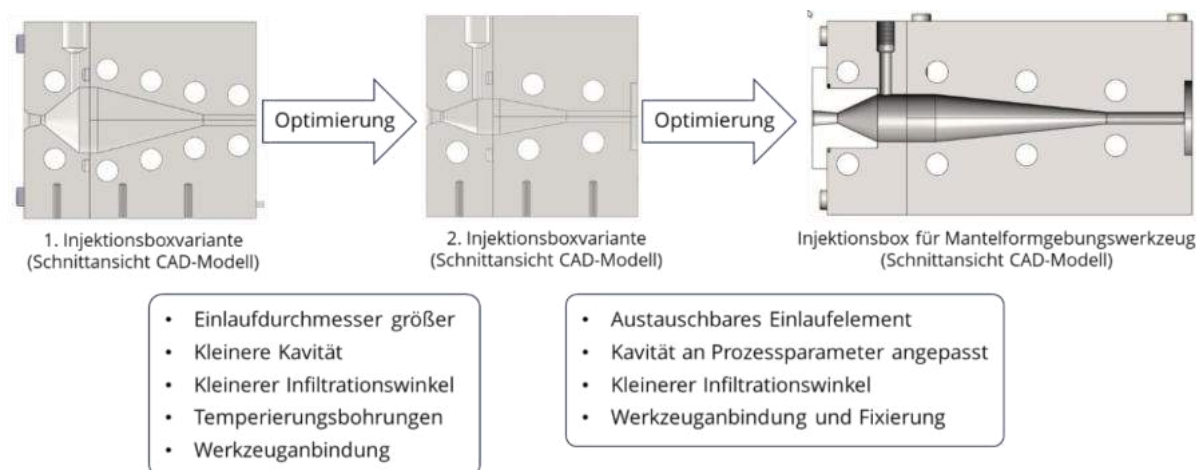


Abbildung 2-6: Injektionsboxvarianten

Im Rahmen des Projektes wurde über die verschiedenen Fertigungsversuche eine Vielzahl an Erkenntnissen gewonnen, die direkt wieder in die Gestaltung der Prozesskette einfließen. So wurde ein Auslegungstool im Excelformat angelegt, in welchem Auslegungs- und Geometriekriterien für Injektionsboxen hinterlegt sind. Mit diesem kann über Informationen zum Harzsystem (Topfzeit, Viskosität) und zum Prozess (Tränkungsquerschnitt, Geschwindigkeit, Faservolumengehalt) mit geringem Aufwand Geometriefaktoren abgeleitet werden und in die Basiskonstruktionsdatei für Injektionsboxen übertragen werden und eine angepasste Neukonstruktion erstellt werden. Im Rahmen des Projekts wurde das an drei Injektionsboxvarianten erfolgreich erprobt. In Abbildung 2-6) sind diese mit den entsprechenden Optimierungsaspekten dargestellt.

Gestaltung und Variation der Konsolidierstrecke

Der Imprägnierung folgt die Formgebung und anschließende Konsolidierung. Dabei werden der imprägnierte Pultrusionsstrang durch das beheizte

Formgebungs- und Konsolidierwerkzeug gezogen. Hierbei werden die Fasern bzw. Halbzeuge auf die gewünschte Nenndicke komprimiert und die Vernetzungsreaktionen des duromeren Matrixsystems erfolgt.

Für die Temperierung des Werkzeuges sind in der Regel mehrere Heizzonen in Längs- und Querrichtung mit Hilfe von Heizkanälen integriert zur präzisen Steuerung der Wärmezufuhr. Die Heiaushärtung und Formgebung des Profils erfolgt in Abhängigkeit von den Matrixeigenschaften in der Regel im Temperaturbereich von 100 °C und 250 °C statt. Voneinander unabhängige Fluidkreisläufe können das Werkzeug in mehrere Heizzonen unterteilen im Allgemeinen sind das 3 Zonen.

Zone 1 definiert die Eintrittszone in das Konsolidierwerkzeug und ermöglicht den kontrollierten Reaktionsbeginn. Zone 2 als eigentliche beheizte Konsolidierzone beschleunigt und kontrolliert die Vernetzungsreaktion des Matrixsystems. Dabei verändert sich der Zustand von flüssig über gelartig bis hin zu fest. Zone 3 stellt die unbeheizte Zone sowie eine Kühlstrecke dar. Die freiwerdende Reaktionswärme des Harzsystems wird hierbei abgeführt. [15, 16]

Der Übergang zwischen Imprägnier- und Aushärtungsstrecke sollte thermisch isoliert ausgeführt sein, um die Einbringung von unnötiger Wärme sowie stark unterschiedliche Temperaturzonen zu vermeiden. Aufgrund der Komprimierung des Pultrusionsstranges treten im Werkzeug Reibungskräfte auf. Zur Reduktion dieser Kräfte sollte die Aushärtungsstrecke kurz gestaltet sein [20].

Kombination von Injektion und Konsolidierung durch angepasste Temperierung

Im Rahmen der Infiltrations- und Konsolidieruntersuchungen zeigten sich Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Injektionsbox. Vor allem die erste Injektionsboxvariante ermöglichte optimale Tränkungsergebnisse nur bei sehr niedrigen Prozessgeschwindigkeiten. Die ist vor allem auf den zu großen Konuswinkel im Verdichtungsbereich zurückzuführen. Neben der konstruktiven Anpassung wurde über eine angepasste Heizkaskade eine

Optimierungsmöglichkeit der Fasertränkung erfolgreich erprobt. Die Auflösung der strikten thermischen Trennung von Injektionsbox und Härtungsstrecke ermöglichte die Ausweitung des Infiltrationsbereichs in die Härtungsstrecke hinein (vgl. Abbildung 2-7), wenn die Temperatur im ersten Teil der Härtungsstrecke dem der Injektionsbox entspricht. Dabei bleibt die Matrixviskosität länger im Fließbereich und ermöglicht eine tiefere Tränkung in radialer Richtung. Andererseits reduziert sich die Länge des Härtungsbereichs, dies wird über eine erhöhte Konsolidiertemperatur ausgeglichen.

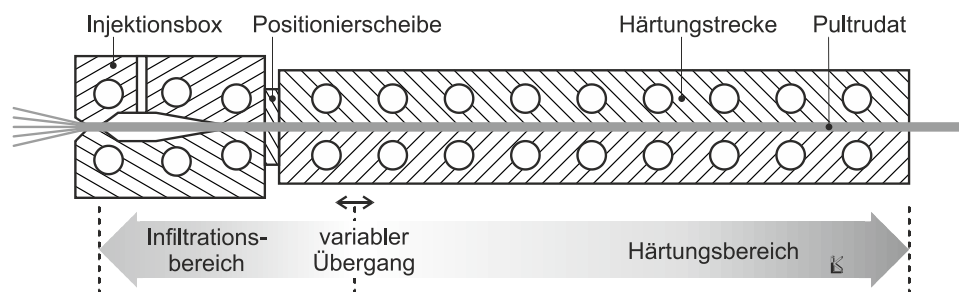


Abbildung 2-7: Prinzip der variablen Temperatureinteilung

Konstruktion und Umsetzung der Komplexformgebungsstrecke

In [22, 23] wurden Gestaltungs- und Fertigungsmöglichkeiten von oberflächentopologierten FKV-Stäben, wie sie als Bewehrungsstab ausgeführt werden müssten, systematisch untersucht und vorgestellt. Davon abgeleitet ergeben sich hinsichtlich der Einordnung nach Fertigungsverfahren vier Hauptvarianten. Diese sind in Abbildung 2-8 dargestellt. Ein entscheidender Unterschied ist die Anzahl der Prozessschritte. Weiterhin werden die Fasermaterialien unterschiedlich gut ausgenutzt.

Für die Verarbeitung und Umsetzung einer effizienten duromeren FKV-Bewehrungsstabsfertigung erfolgten die Aufschlüsselung der relevanten Fertigungsmöglichkeiten. Diese werden mittels objektiver Analyse durch geeignete Kriterien bewertet und eine entsprechende Vorzugsvariante ausgewählt (vgl. Tabelle 2-1). Als Vorzugsvariante ergab sich ein Urformungsprozess mit direkt integrierter Formgebungswelle.

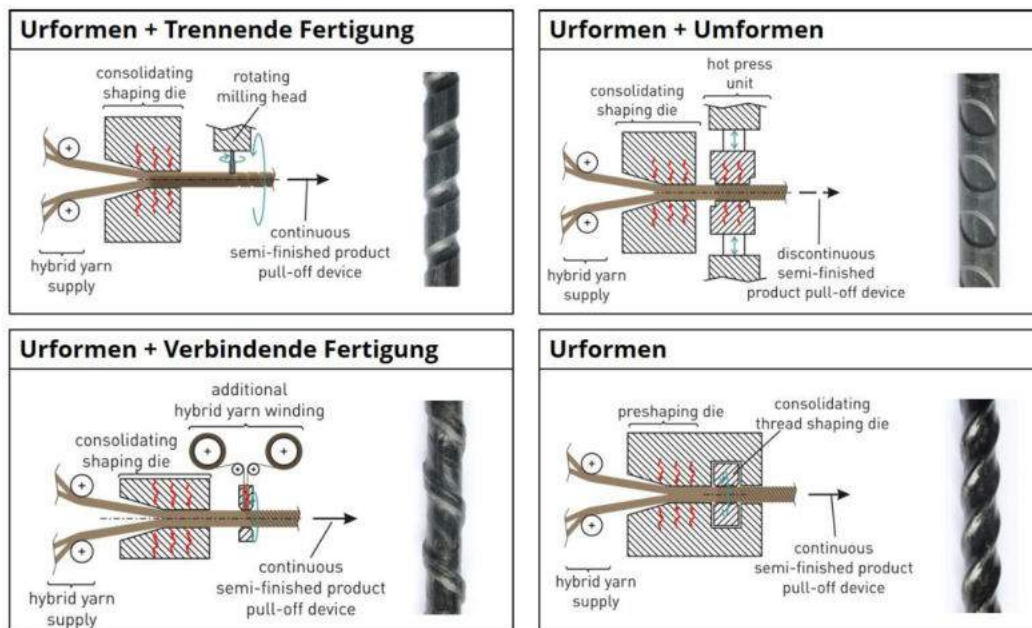


Abbildung 2-8: Fertigungs- / Funktionalisierungsprozesse für FKV-Bewehrungsstäbe [22]

Tabelle 2-1: Auswahl Fertigungsverfahren mittels vergleichenden Kriterien

Bewertungskriterien									Ergebnis	
	Qualität Formkontur	gezielte Faser-orientierung	Prozess-schrittzahl	Wartung/ Reinigung	Lebensdauer Werkzeug	Wirtschaftlichkeit bezügl. Bearbeitungszeit	Komplexität Werkzeug	Stabwiderstand gegen Formkontur-einbringung		
Konzeptvarianten										
Gewichtung	12	11	1	4	6	3	6	13	Summe Rang	
Formgebungswelle integriert	3	3	3	2	2	2	2	3	149	1
Formgebungswelle nachgegliedert	2	2	2	3	2	2	2	3	129	2
Formpressen	2	2	2	3	2	2	1	3	123	4
Fräsen	3	2	2	3	2	3	1	2	125	3
Wickeln	1	2	2	2	3	1	1	2	97	5
Bewertungsmaßstab	1	"schlecht" erfüllt			2	"mittel" erfüllt		3	"gut" erfüllt	

Die Vorzugsvariante wurde auskonstruiert und für entsprechende Detail-elemente verschiedene Detaillösungen erarbeitet. Diese wurden hinsichtlich Umsetzbarkeit, Funktionalität und Aufwand bewertet und als Vorzugs-variante umgesetzt. Somit wurde neben den vorhandenen Peripherieele-menten eine geometrieangepasste und optimierte Injektionsbox realisiert. Außerdem wurde ein Formgebungswerkzeug zur Urformung von helixpro-filierten FKV-Stabstrukturen konstruiert und gefertigt. Diese Elemente wur-den in die Pultrusionsprozessstrecke integriert (vgl. Abbildung 2-9)

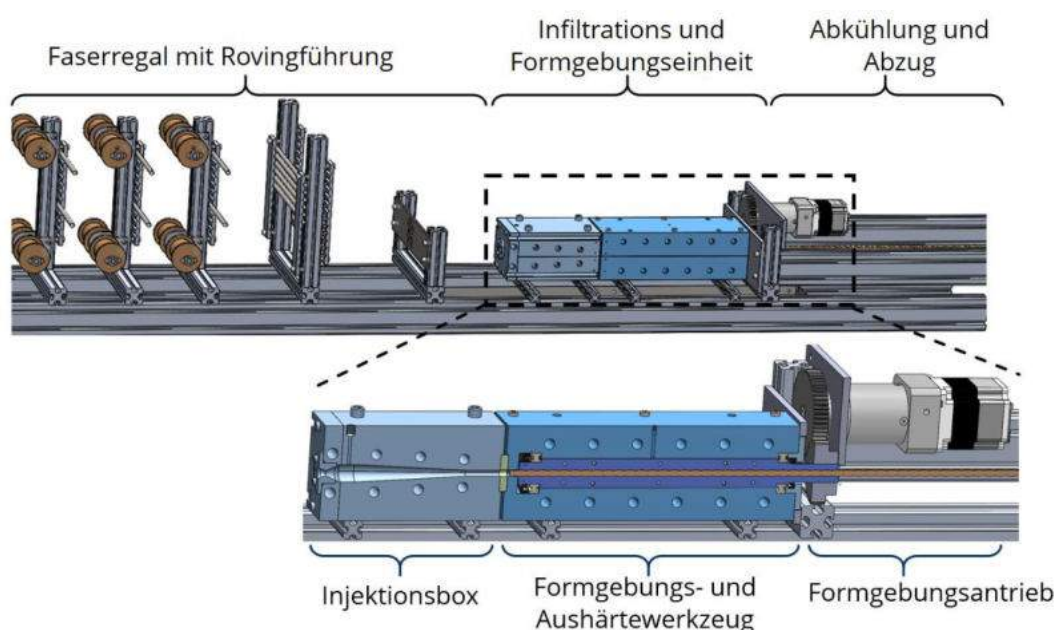


Abbildung 2-9: Finales Formgebungsprozess-Streckendesign der duromeren Helix-Pultrusion

Die Formgebungsprozessstrecke mit seinen Einzelteilen ist in Abbildung 2-10 dargestellt. Sie zeichnet sich durch eine rotierende Formgebungswelle aus, die als Innenkontur die Negativkontur der Stabkontur aufweist. Diese wird über einen Zahnradantrieb und einen Motor in Abstimmung zur Abzugsgeschwindigkeit angetrieben. Für einen leichtgängigen Prozess ist die Welle mittels Kugellagern eingebaut. Der Wärmeeintrag vom äußeren temperierten Werkzeugober- und -unterteil erfolgt über ein gut wärmeleitendes und temperaturbeständiges Schmiermittel. Dieses wird über Wellendichtringe vor dem Austritt aus dem Werkzeug und vor eindringenden Matrixmaterial geschützt.

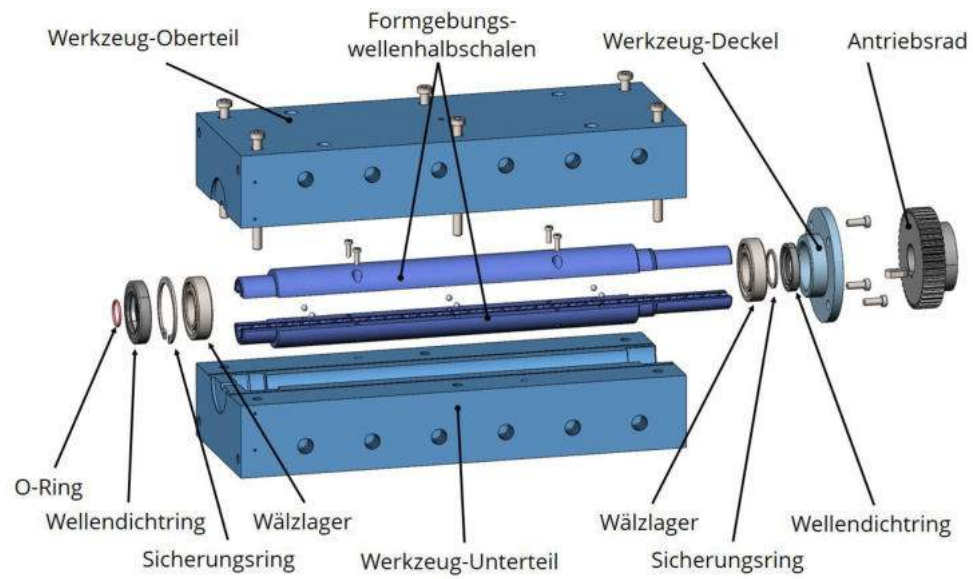


Abbildung 2-10: Finales Formgebungswerkzeugdesign

1.3 Aufbau der Labor-Pultrusionsanlage und Prozesserprobung

Aufbau der Pultrusionsanlage mit Peripherieelementen

Wie in Kapitel 1.2 dargestellt besteht eine Pultrusionsanlage zur Verarbeitung von duroplastischem Matrixmaterial im Allgemeinen aus den folgenden Bestandteilen: Faserregal und Faserzuführungseinheit, Imprägniereinheit, Formgebungs- und Konsoliderwerkzeug, Abziehvorrichtung und Abläng- bzw. Schneideeinheit. Die entsprechenden Peripherieelemente sind im Folgenden dargestellt.

Halbzeuglagerung und Faserzuführungseinheit

Spulengatter stellen die verwendeten Halbzeuge (Rovings, Bänder, Gelege, ...) bereit, welche über entsprechende Zuführungselemente zur Imprägniereinheit geführt werden. Im Forschungsprojekt wurden Rovingmaterialien eingesetzt. Im Spulengatter sind diese auf Spulen positioniert. Die Spulen werden über Reibelemente gebremst, um einem Verdrillen oder Kräuseln der Rovings vorzubeugen und einen Abzug unter definierter gleichbleibender Fadenspannung zu ermöglichen. Über den Austausch von Federelementen kann die Fadenspannung dabei variiert werden.

Die Anzahl der Spulen wird über die Garnfeinheit, dem gewünschten Faservolumengehalt (FVG), der Querschnittsfläche sowie der Anzahl der zu erzeugenden Bauteile definiert. In dem untersuchten Prozess wurden einstrangige Pultrudate erzeugt mit dem FVG zwischen 45 % und 60 %. Die beiden umgesetzten Querschnitte haben eine Querschnittsfläche von 20 mm² und 50 mm². Dabei wurden Glasfaser- und Basaltfaserrovingmaterialien mit Garnfeinheiten von 2400 tex und 4800 tex verwendet. Damit ergaben sich der Einsatz von 10 bis 16 Spulen.

Um einen definierten und geringen Eintrittswinkel der Verstärkungsmaterialien in die Imprägnierstation zu gewährleisten werden die Halbzeuge über eine Lochblende vorgebündelt. Die Rovings werden über den Querschnitt verteilt und mithilfe der Zuführungselemente an die entsprechende Position geführt. Hinsichtlich der Anforderungen an Zuführungselemente wurde darauf geachtet, dass die Lochmusterposition und die Kontaktflächen ein Durchdringen und Verfilzen bzw. Kräuseln der Fasern vermeiden.

Über eine durchdachte und geordnete Struktur der Fadenführungen sowie über polierte Umlenkstangen und keramische Rovingführungsaugen konnte das ermöglicht werden.

Abzugs- und Trenneinheit

Mittels Abzugseinheit der Pultrusionsstrecke wird die Zugkraft auf den Pultrusionsstrang übertragen und somit die kontinuierliche Fortbewegung durch die verschiedenen Werkzeuge ermöglicht. Innerhalb des Pultrusion-Verfahrens können sehr hohe Abzugskräfte aufgrund der Klemm- und Reibungskräfte entstehen. Daher werden in der Regel hydraulische Abzugssysteme eingesetzt [20]. Grundsätzlich unterscheidet man in zwei verschiedene Abzugssysteme (vgl. Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Vergleich Abzugsvarianten [15, 21]

Raupenabzug	Alternierende Klemmgreifer
	
Einfache Anlagentechnik	aufwendige Anlagen- u. Steuertechnik
Breiter Anwendungsbereich	bessere Klemmkraft
hoher Verschleiß der Abzugspads	für höhere Abzugskräfte geeignet
Krafteinleitung über größere Flächen (Verminderung von Spannungsspitzen)	günstigere Anschaffungskosten und kürzere Rüstzeiten

Die Abzugsgeschwindigkeit und Abzugskräfte hängen vorrangig vom Faser volumengehalt, Harzsystem, Vernetzungsreaktionsrate, Oberflächenrauheit sowie der Geometrie ab [16]. Gängige Abzugsgeschwindigkeiten liegen zwischen 0,3 m/min bis 5 m/min [15]. Aufgrund der Verfügbarkeit, des Vollprofilquerschnitts und der geringen Komplexität wurde ein vorhandener Raupenabzug genutzt. Eine an die Abzugseinheit angegliederte Trennstation kürzt das Profil auf die gewünschte Länge.

Anpassung der Faserführungen vom Spulengatter zum Einlauf

Im Laufe des Projekts wurde die Faserführung vom Spulengatter zum Einlauf in die Injektionseinheit stetig angepasst und optimiert. Ziel dieser Anpassungen war die Minimierung von Reibflächen und Vermeidung von Verdrillung der Fasern. Folgende Maßnahmen wurden dabei getroffen:

- Anpassung Anordnung der Rovings durch Lochblende,
- Einführung eines „Rechen“ zur Separierung der einzelnen Rovings,
- Angepasste Faserwege über die Umlenkstangen.

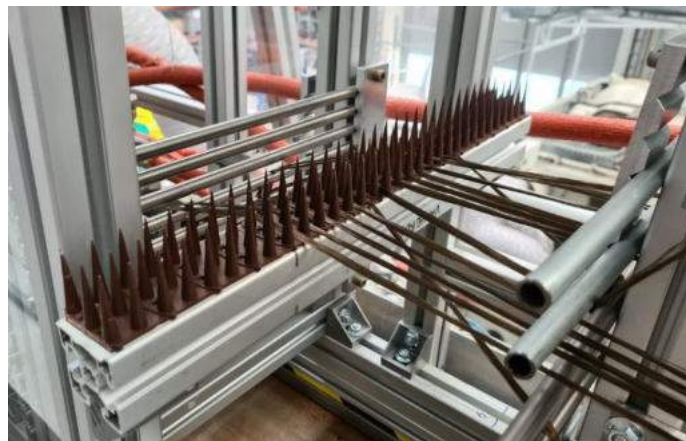


Abbildung 3-1: Rovingzufuhr separiert durch „Rechen“

Ein Rechen zwischen Spulengatter und Lochblende (Abbildung 3-1) wurde als Separierung der Rovings installiert. Hierrüber können die Abstände der Rovings zueinander eingestellt bzw. fixiert werden und somit die gegenseitige Berührung mit Faserschädigung als Folge verhindert werden.

Eine weitere Anpassung wurde an der Lochblende durchgeführt. Hier wurde das Muster (Abbildung 3-2) der Rovingdurchführung geändert. Durch eine kreisrunde Anordnung konnte eine Verdrillung der Rovings beim Einlauf die Injektionseinheit verringert werden.

Die nächste Maßnahme war eine neue Anordnung und Definition der Faserbahn. Durch einen durchdachteren Faserverlauf von den Spulen über die Umlenkstangen zum Rechen, konnte ein Kreuzen der Rovings verhindert

werden. Die jeweiligen Verläufe sind in Abbildung 3-3 oben (alter Verlauf) und Abbildung 3-3 unten (angepasster Verlauf) hervorgehoben

(a)



(b)



Abbildung 3-2: Ursprünglicher (a) und angepasstes (b) Lochmuster

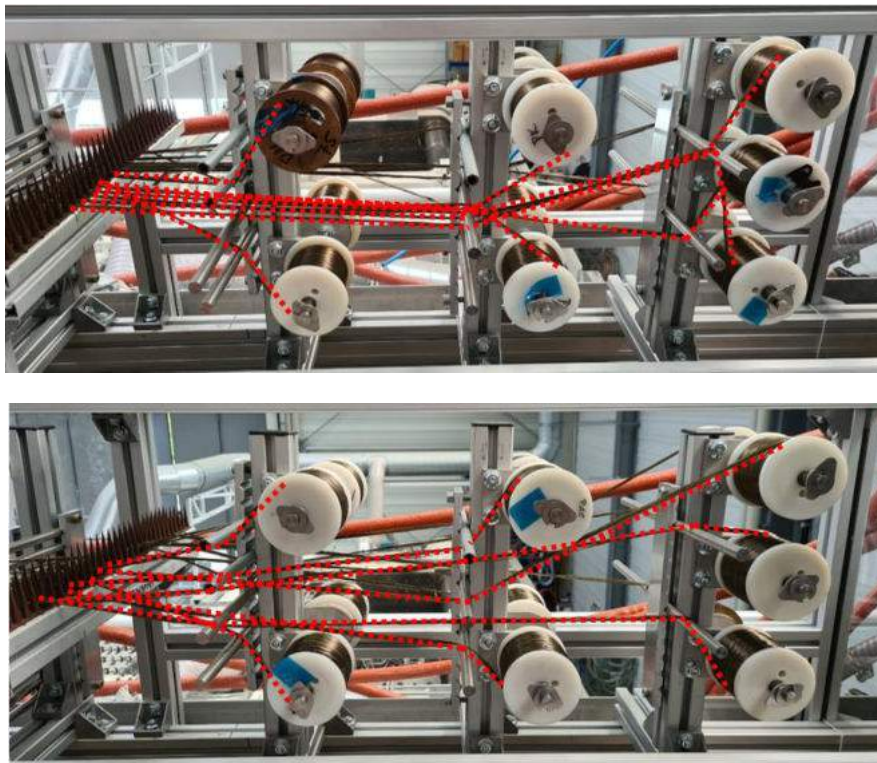


Abbildung 3-3: Ursprüngl. (oben) und angepasster (unten) Faserverlauf im Spulengatter

Umrüstung der Dosieranlage zur Implementierung in den Pultrusionsprozess

Die Verarbeitung von Matrixsystem mit einer geringen Topfzeit und dem damit verbundenen kurzen Verarbeitungsprozessfenster erfordern für die erfolgreiche Verarbeitung die Mischung der Einzelkomponenten kurz vor der Fasertränkung und Konsolidierung. Speziell Polyurethan-Matrixsysteme stellen diese Anforderungen an die Prozesstechnik. Für die Fertigungsversuche mit diesem Matrixsystem wurde eine vorhandene Dosieranlage angepasst und ertüchtigt. Die Dosieranlage war vorher im Einsatz um Schaummaterialien in größeren Mengen auszutragen. Für die Anpassungen wurden neben dem Matrixsystem mit seinem festgelegten Mischungsverhältnis auch die Austragsleistung in Abhängigkeit von den geplanten Prozessgeschwindigkeiten (0,2 bis 2,0 m/min) und die Querschnittsfläche und der FVG berücksichtigt. Dementsprechend wurden die Pumpen der Matrixeinzelemente ausgetauscht und Standschäden behoben. Ziel war die

gezielte Anpassung der Prozessparameter Austragsleistung und Injektionsdruck. Der Injektionsdruck konnte jedoch nur mittels zusätzlicher Hilfskonstruktion variiert werden. Letztlich konnten gezielt angepasste und reproduzierbare Verarbeitungsbedingungen gewährleistet werden.

1.4 Durchführung von Fertigungsstudien und Bewertung der Verbundqualität

Mit den bereits beschriebenen Anlagenkonfigurationen wurden verschiedene Fertigungs- und Parameterstudien durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Parameter untersucht:

- Material (Harzsysteme, Additive, Faserart)
- Prozessgeschwindigkeit
- Injektionsdruck
- Temperatur
- Faservolumengehalt bzw. Anzahl der Faserrovings.

Die Bewertung der Parametereinflüsse erfolgte vor allem über die Schliffbildmikroskopieanalyse. Hierzu wurden Zuschnitte aus dem Pultrudat bei den jeweiligen Parametern entnommen, Probekörper präpariert und Mikroskopieaufnahmen angefertigt. Anhand der so entstanden Aufnahmen lässt sich nun optisch die Laminat- und Tränkungsqualität beurteilen. Des Weiteren wurden auch während der Fertigungsversuche Beobachtungen dokumentiert, die auf unterschiedliche Einflüsse der variierenden Parameter hindeuten.

Vergleichende Pultrusionsversuche mit unterschiedlichen Halbzeugen

Der überwiegende Teil der Fertigungsstudie wurde mit Glasfasern (Owens Corning SE1200 2400 TEX) und Epoxidharz (Huntsman XB 6469/A-radur2954) durchgeführt. Neben der Matrixvariation erfolgte auch Pultrusionsuntersuchungen mit Basaltfasern (Deutsche Basal Faser GmbH Roving 2400tex A76.9.2 A-G und Roving 2400tex A76.9.3 A-G). Schon beim Rüsten der Anlage wurden Unterschiede zur Glasfaser sichtbar. Die Basaltfaser neigt mehr zum Verfilzen und ist anfälliger für Faserschädigung infolge von Reibung, was eine Anpassung der Faserführung (vgl. Kapitel 1.3) notwendig machte.

Beim Vergleich der Mikroskopieaufnahmen (Abbildung 4-1) wird deutlich, dass die Probekörper mit Basaltfasern stets einen höheren Porengehalt und somit eine geringere Tränkungsqualität aufweisen. Während die Pultrudate

mit Glasfasern bei steigendem Injektionsdruck nahezu frei von Poren und Luft einschläüssen sind, verbessert sich das Bild bei Basaltfasern nur geringfügig.

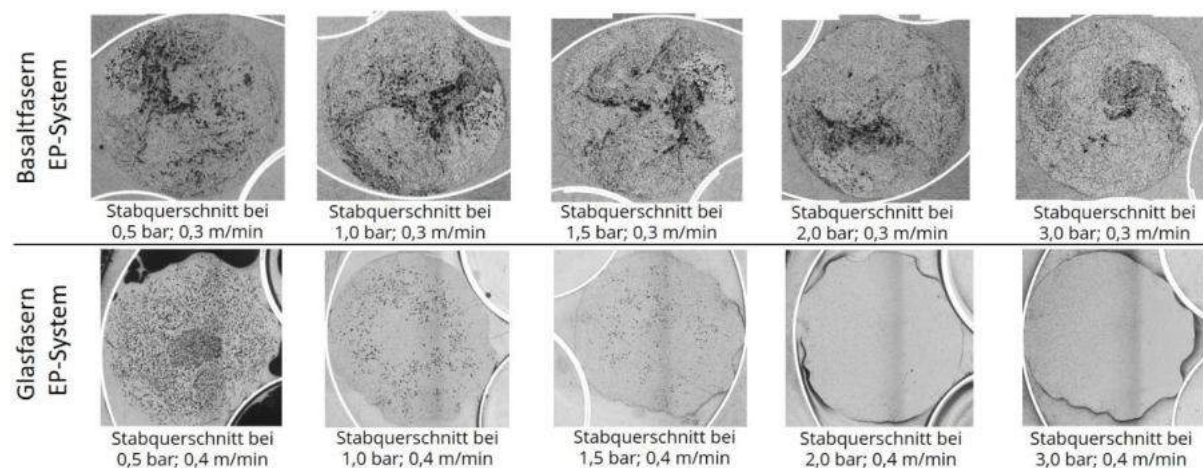


Abbildung 4-1: Vergleich zwischen Mikroskopieaufnahmen von Basalt- und Glasfasern

Die Untersuchungen zeigten eine starke Abhängigkeit der Pultrudatqualität in Abhängigkeit von Faser- und Matrixmaterial.

Vergleichende Pultrusionsversuche mit unterschiedlichen Prozessgeschwindigkeiten und Injektionsdrücken

Im laufenden Pultrusionsprozess können die beiden Parameter Geschwindigkeit und Injektionsdruck eingestellt werden, ohne dass der Prozess unterbrochen werden muss. Für die Fertigungsstudie wurden Injektionsdrücke von bis zu 3 bar und Geschwindigkeiten von bis zu 1 m/min genauer untersucht. Bei den folgenden Untersuchungen waren Aushärtetemperatur und Aushärtestrecke konstant. Die mögliche Aushärtedauer wiederum variiert in Abhängigkeit der Prozessgeschwindigkeit. Je schneller der Prozess läuft, desto kürzer befindet sich das Pultrudat demzufolge in der Aushärtestrecke.

Schon während des Prozesses konnten erste Beobachtungen bei einer Parametervariation gemacht werden (Abbildung 4-2). So konnte bei zu hohen Geschwindigkeiten ab ca. 0,8 m/min ein Nachhärtungseffekt festgestellt werden. Das Pultrudat ist bei Austritt aus Härtungstrecke zunächst noch weich und an der Oberfläche etwas klebrig, was auf eine unvollständige

Vernetzung hindeutet. Bei niedrigeren Abzugsgeschwindigkeiten konnte wiederum ein Harzmantel mit Härtingsresten auf der Oberfläche festgestellt werden.

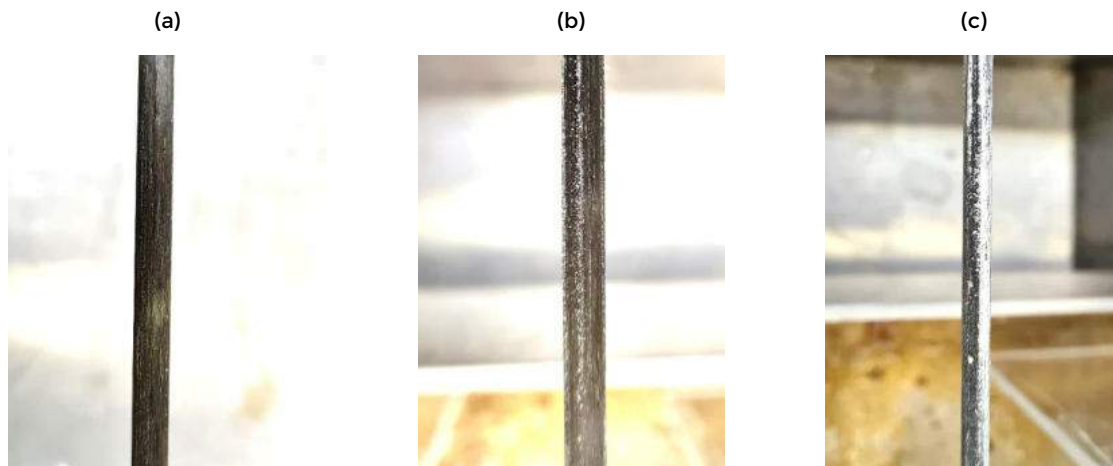


Abbildung 4-2: Manteldetail bei: (a) 0,8 m/min und 0,5 bar; (b) 0,6 m/min und + 1 bar und (c) 0,3 m/min + 1 bar

Aber erst die Schliffbildanalyse (Abbildung 4-3) liefert deutliche Korrelationen hinsichtlich der unterschiedlichen Fertigungsparameter und Pultrudatqualität. Allgemein ist feststellbar je langsamer der Prozess abläuft und je höher der Injektionsdruck ist, desto weniger Poren befinden sich im Verbund und umso besser ist die Qualität. Bei einer Geschwindigkeit von 0,4 m/min kann ab 2 bar ein Sättigungseffekt festgestellt werden. Eine Druckerhöhung führt zu keiner weiteren Qualitätsverbesserung. Bei niedrigen Drücken ist zudem ein trockener Bereich im Kern erkennbar. Ist die Geschwindigkeit zu hoch, sind in der Probe Risse erkennbar. Das deutet auf eine zu geringe Vernetzung des Epoxids hin, die während der Fertigung bereits beobachtet wurde.

Mit Hilfe der Schliffbilder konnte außerdem ein reproduzierbarer kontinuierlicher Fertigungsprozess nachgewiesen werden.

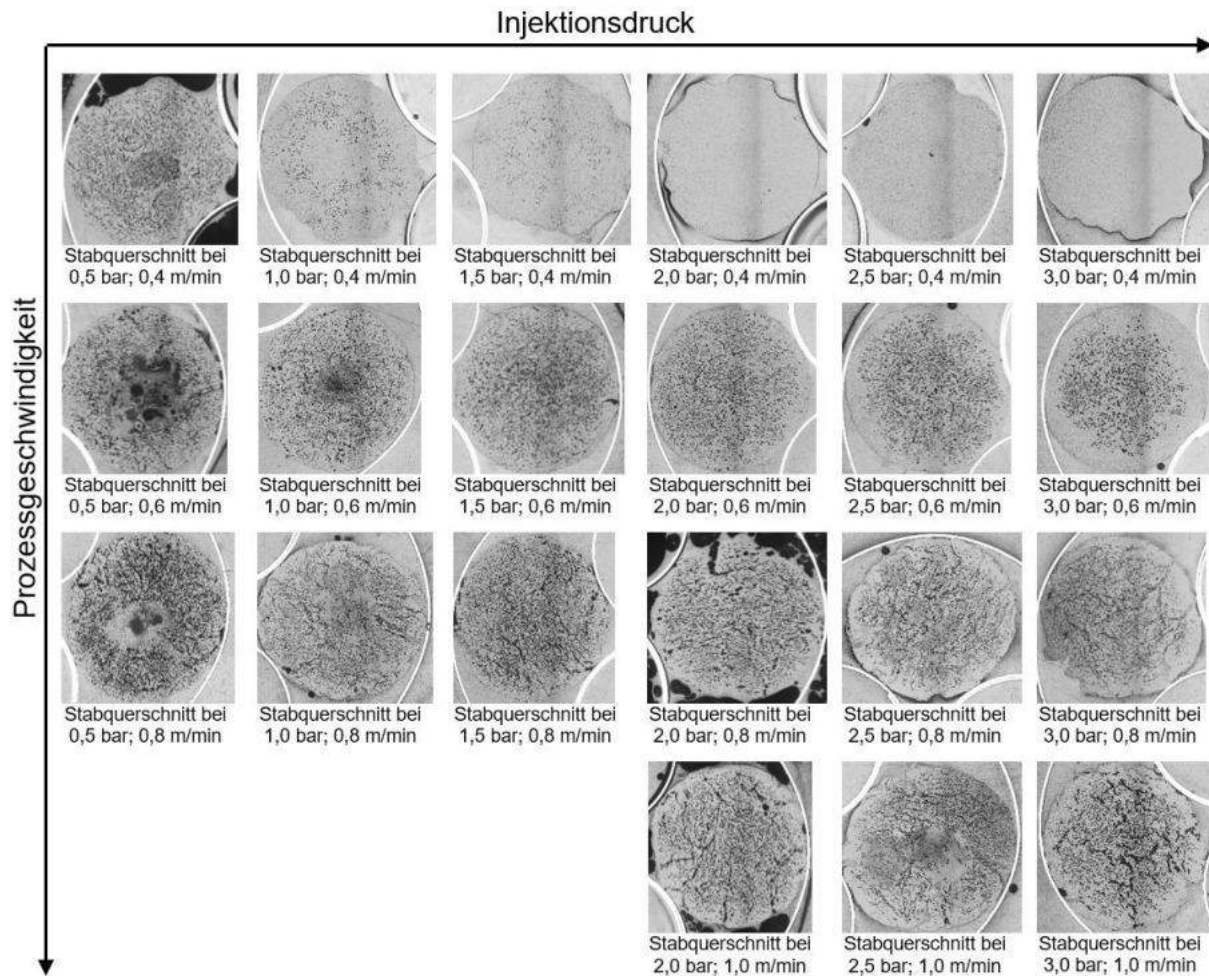


Abbildung 4-3: Schliffbilder bei unterschiedlichen Prozessgeschwindigkeiten und Injektionsdrücken

1.5 Charakterisierung der Bewehrungsstäbe und Ableitung von Gestaltungsrichtlinien

Die Inbetriebnahme und Fertigungserprobung der Helixformungsprozessstrecke erfolgte mittels der beschriebenen angepassten Peripherieelemente (vgl. Kapitel 1.2). Dabei wurden Glasfaserrovings mit einer Garnfeinheit von 4800 tex verwendet und in verschiedenen Konfigurationen erprobt (Direktroving, assemblierter Roving). Für eine optimale Faserführung und zur weiteren Reduzierung von Reibungspunkten erfolgte eine weitere Anpassung der Faserführung mittels Schlauchelementen und durch eine Lochplatte. Die Rotation des Formgebungssegmentes erfolgt mittels Zahnradgetriebe und Motor, welcher über ein externes Netzteil mit Spannung versorgt und mittels externer Steuersoftware auf einem Rechner hinsichtlich Drehzahl und Beschleunigung geregelt wird. In Abbildung 5-1 sind Details der Prozessstrecke dargestellt. In Vorversuchen konnte eine große Reproduzierbarkeit und Beständigkeit der eingestellten Parameter bestätigt werden.

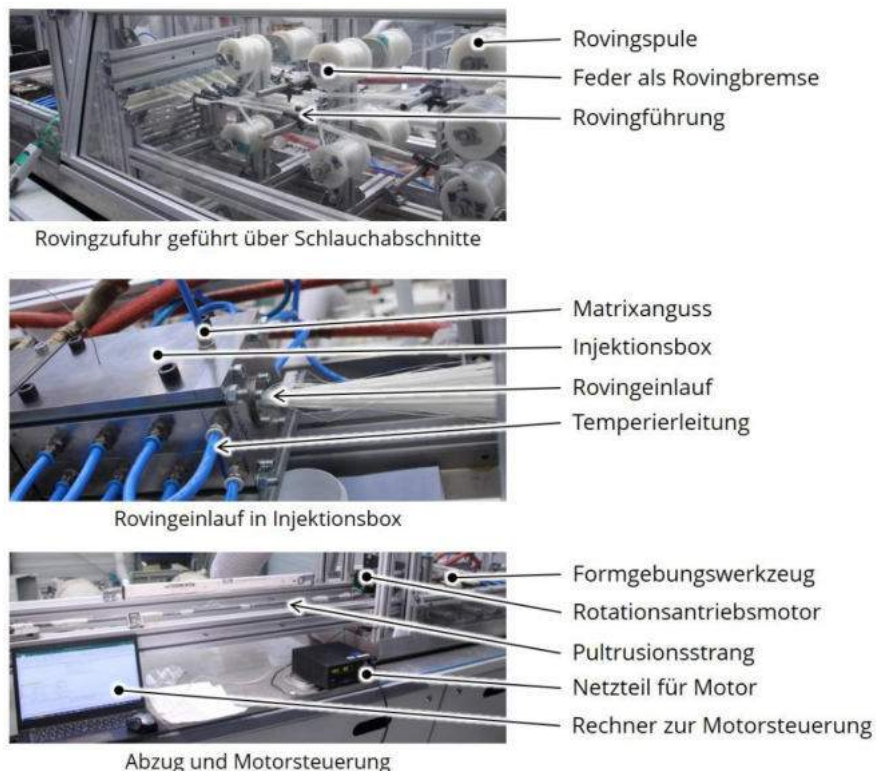


Abbildung 5-1: Details der Helix-Pultrusionsprozessstrecke

Im Rahmen der Formgebungsuntersuchungen mit der aufgebauten Prozessstrecke konnten die entsprechenden Komponenten wie angedacht angesteuert und geregelt werden. Die Wärmeübertragung vom Heiz-Träger-Werkzeug-Element auf den rotierenden Formgebungskern mittels Wärmeleitschmiermittel funktioniert. Der Formgebungsbereich ist gut gekapselt, so dass kein Schmiermittel eindringt. Die synchrone aufeinander abgestimmte Abzugsbewegung und Formgebungsrotation erfolgt reproduzierbar und regelbar. Letztlich konnten Stäbe gefertigt werden, die eine optimale Tränkung aufweisen. Jedoch konnte die Helixprofilierung nicht in dem gewünschten und reproduzierbaren Umfang erstellt werden, um Charakterisierungen an den gefertigten Stäben im Allgemeinen sowie im Verbund vorzunehmen. Ziel ist eine funktionalisierte Mantelfläche mit Helixkontur. Wobei der Stabquerschnitt in axialer Richtung mit Faser verstärkt ist. Auch in den Helixrippen sollen die Fasern in axialer Richtung verlaufen und lediglich durch die äußere Kontur onduliert sein. Somit werden die axialen Kräfte optimal aufgenommen und durch den radialen Faseranteil in den tragenden Querschnitt übertragen. Im Gegensatz dazu sind wickeltechnische aufgesetzte Helixkonturen rein über das Matrixmaterial an den tragenden Kernquerschnitt angebunden. Dabei wird die Last rein über das Matrixmaterial in den Stab eingeleitet und somit stark auf Schub ohne Faserunterstützung übertragen.



Abbildung 5-2: Ergebnisse der Stabkonturausformung

Im Rahmen von Parameterstudien wurde die Fertigung variiert um zu optimaleren Fertigungsergebnissen zu gelangen. Dazu zählen:

- Abzugsgeschwindigkeit
- Rotationsrichtung und -geschwindigkeit zur Formgebungsinitiierung
- Aushärtetemperatur
- Zusatzstoffe (interne Trennmittel, Thixotropiermittel)
- Faservolumengehalt

Grundsätzlich wird das Pultrudat beim Rotieren der Formgebung auch in Rotation versetzt. Dies sollte mit den Prozessanpassungen minimiert werden und ist weiterhin Teil der Forschungsarbeit. Die bereits erfolgreich umgesetzte thermoplastische Helix-Pultrusion mittels vorimprägnierten Tape-material weißt hinsichtlich der Rotation des Pultrudats weniger Schwierigkeiten auf. Nach ersten Erkenntnissen ist dies auf die schnellere Konsolidierung und die damit verbundene kleinere Kontaktfläche in der Formgebungsdüse zurückzuführen. Sowie auch die deutlich höhere Schmelzviskosität von thermoplastischen Matrixmaterialien im Vergleich zu Duroplasten erhöht die Torsionssteifigkeit des Pultrudats. Diese Aspekte sollen im Weiteren noch anschließend an das Forschungsvorhaben untersucht werden. Damit Versuchsstäbe für abschließende Untersuchungen zur Stabcharakterisierung und Ableitung von Gestaltungsrichtlinien durchgeführten werden können.

1.6 Untersuchungen zur experimentellen Umformung von teilkonsolidierten duromeren Stabstrukturen

Duromere Matrixsysteme bilden im konsolidierten Zustand starke Vernetzungen unter den Molekülketten, welche im Nachgang keine erneute Erweichung und Umformung ermöglichen. Damit erreichen sie eine hohe chemische Beständigkeit und teilweise auch höhere Temperaturbeständigkeiten als thermoplastische Matrixsysteme. Die Untersuchungen und Ergebnisse zu den Umformmöglichkeiten von teilkonsolidierten duromeren Matrixsystemen ohne und mit Faserverstärkung aus Kapitel 1.1 führte zu weiteren Forschungszielen hinsichtlich der Umformmöglichkeiten im speziellen die Biegemöglichkeiten von duromeren Stabstrukturen. Diese würden nachträgliche Konturanpassungen zur Gestaltung von Bewehrungskörpern oder sonstige Winkelanpassungen ermöglichen. Entsprechende einschätzende Bestätigungen wurden auch von Endanwendern gegeben.

Für die Biegeuntersuchungen sollten definierte geometrische Rundstäbe genutzt werden, welche reproduzierbar mit definierten Eigenschaften gefertigt sein sollen. Vor allem der Aushärtegrad soll definiert für mehrere gleichzeitig gefertigte Probekörper eingestellt werden. Dafür wurde zur Probekörperherstellung der Fasernasspressprozess ausgewählt und ein Werkzeug konzipiert und gefertigt (vgl. Abbildung 6-1).

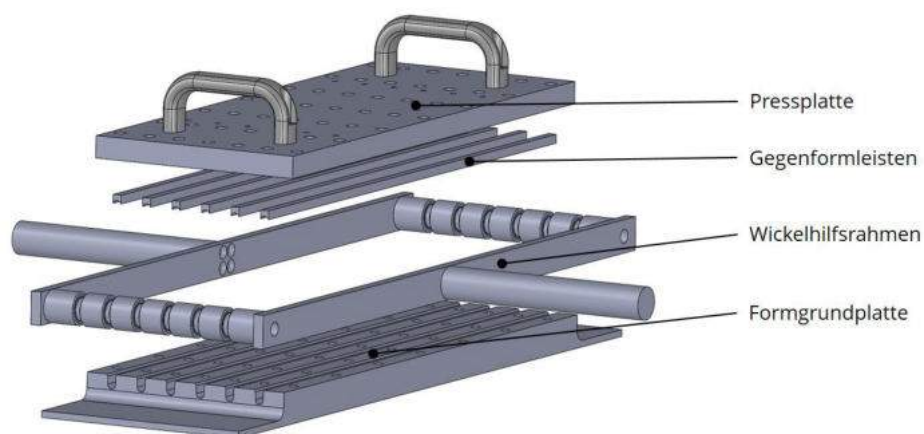


Abbildung 6-1: Stabpresswerkzeug (Darstellung ohne Schrauben)

In Abbildung 6-2 ist das Vorgehen zur Fertigung der Probekörper dargestellt. Mit Matrixmaterial getränkte Fasern werden auf einem Wickelhilfsrahmen in der gewünschten Anzahl in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt abgelegt. Anschließend werden diese in der Grundplatte vom Presswerkzeug abgelegt und der Pressdeckel aufgesetzt und zur Verpressung verschraubt. Im Ofen unter definierte Temperatur und Zeit erfolgt die Aushärtung bis zum geplanten teilkonsolidierten Matrixzustand. An den entformten Prüfkörpern werden zur Überprüfung des Aushärtegrades DSC-Messungen durchgeführt.

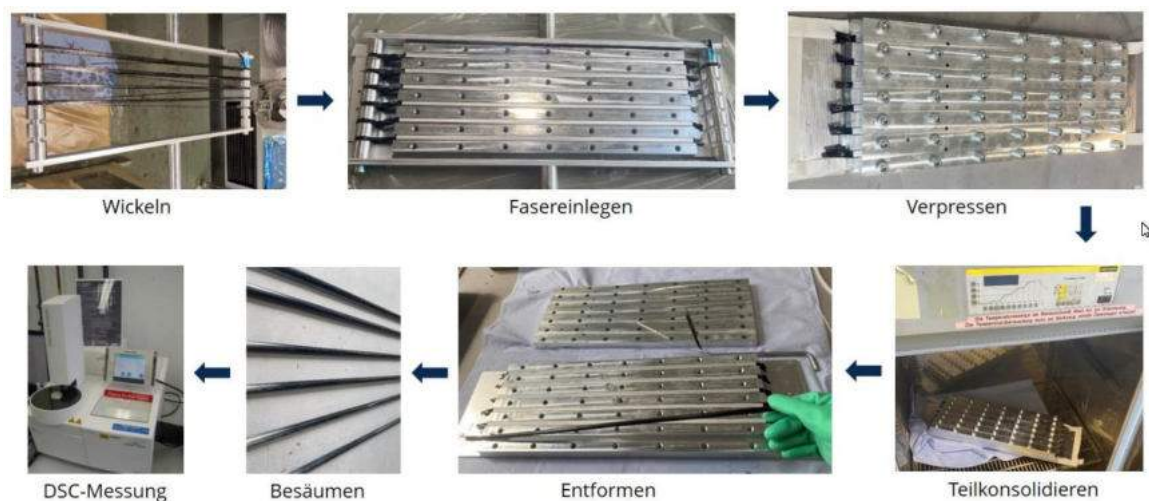


Abbildung 6-2: Fasernasspressprozess zur Probekörperherstellung von Stabbiegeproben

Untersuchungen zum Verdrillen

Im Allgemeinen zeigen gängige Fasermaterialien kein plastisches Materialverhalten unter Zugbelastung. Für die optimale Werkstoffausnutzung sind die Verstärkungsfasern in der Hauptbelastungsrichtung angeordnet. Beim Rundstabbiegen nehmen die Verformungskräfte und Dehnungen mit zunehmendem Abstand zur biegeneutralen Ebene zu. Wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben, ist im Biegebereich die axiale Faseranordnung ungeeignet zum Ausgleich der Dehnungen außerhalb der neutralen Ebene. Für eine gleichmäßige Faserbelastung in der Biegezone kann u. a. eine radiale Verdrillung des Rundstabs mit einem ganzzahligen Vielfachen von 360° zu einer gleichmäßigen Belastung der Fasern führen.

Dazu erfolgten Verdrillungsuntersuchungen an den teilkonsolidierten Rundstäben. Diese wurden in einer Torsions-Zug-Druck-Prüfmaschine durchgeführt zur Überwachung des Torsionsmomentes und zur Realisierung von gleichbleibenden Verdrillgeschwindigkeiten und Verdrillwinkeln. Die Stäbe wurden dazu mittels Widerstandheizrohr im Verdrillbereich erhitzt. Dabei wurden drei Versuchstemperaturen (T_g ; T_g+10K ; T_g-10K) untersucht. Die Proben wurden mit einer Verdrillgeschwindigkeit von $60^\circ/\text{min}$ bis 740° verdrillt hierbei erfolgten bei 360° und 540° für jeweils 1 min eine Pause zur Materialsetzung.

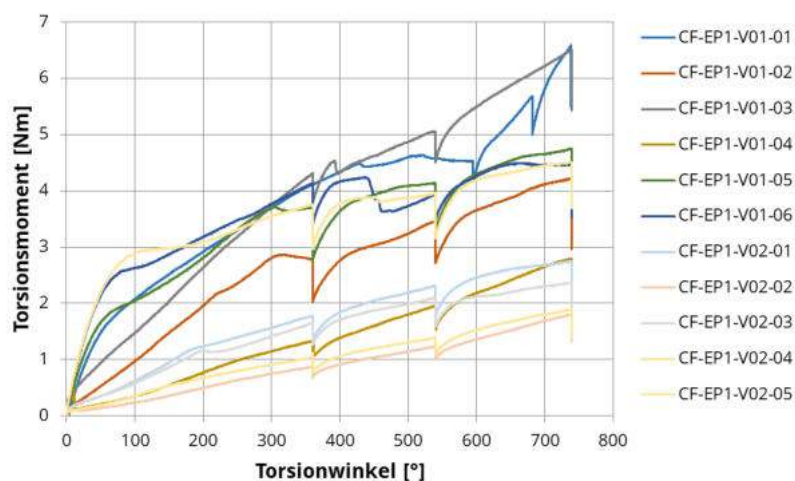


Abbildung 6-3: Torsionsmoment-Winkel-Verläufe der Verdrillversuche

Abbildung 6-3 zeigt die Torsionsmomentverläufe über den Torsionswinkel für die Probekörper. Dabei ist zu erkennen, dass die Torsionsmomente niedrig und auch ohne Prüfmaschine umzusetzen sind. Die Schwankungsbreite unter den Prüfkörpern im Vergleich zum relativ niedrigen Messwert ist hoch. Es zeigt sich jedoch, dass Probekörper mit der geringeren Glasübergangstemperatur und damit dem geringeren Aushärtegrad niedrigere Torsionsmomente zum Verdrillen benötigen. Somit bestätigt sich, dass größere Verformungsvermögen niedrigere Aushärtegrade. Vor dem Verdrillen wurden die Probekörper zur Messung der Verdrillung mittels einer Linie markiert, in einem Silikonschlauch geschoben und Thermoelemente zur Überwachung positioniert. Nach dem Verdrillen zeigen die Probekörper

lokales Beulen in unregelmäßigen Abständen und unterschiedlicher Intensität (vgl. Abbildung 6-4).



Abbildung 6-4: Detail eines verdrehten Probekörpers

Untersuchungen zum Biegen

Die Stäbe mit der verdrehten Biegestelle wurden anschließend unter höheren Temperaturen als beim Biegen, also oberhalb der Glasübergangstemperatur, gebogen. Dazu wurde die Rotationsbiegevorrichtung aus Kapitel 1.1 im Umluftofen bei der entsprechenden Biegetemperatur positioniert und die Probekörperstäbe durchtemperiert. Anschließend erfolgte das Biegen in mehreren Stufen, um wie beim Verdrillen Setzungs- und Kriechvorgänge zu ermöglichen. Die Parameter und Ergebnisse zum Verdrillen und anschließenden Biegen der einzelnen Probekörper sind Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Verdrill- und Biegeparameter der einzelnen Probekörper

Bezeichnung	T _g [°C]	T _{wind} [°C]	Realisierter Ver- drillwinkel	Beul-intensi- tät	T _{bieg} [°C]	Biegequalität
CF-EPI-V01-01	65	65	576°	klein	80	-
CF-EPI-V01-02	65	65	Bruch	---	---	
CF-EPI-V01-03	65	65	446°	klein	65	- -
CF-EPI-V01-04	65	65	705°	mittel	90	+
CF-EPI-V01-05	65	55	641°	hoch	110	-
CF-EPI-V01-06	65	55	400°	mittel	110	-
CF-EPI-V02-01	52	52	410°	mittel	---	Rückstellung
CF-EPI-V02-02	52	52	715°	klein	90	+
CF-EPI-V02-03	52	62	734°	hoch	130	- -
CF-EPI-V02-04	52	62	715°	klein	90	- -
CF-EPI-V02-05	52	42	440°	mittel	110	-

Die Ergebnisse zeigen einen sehr starken Einfluss der lokalen Beulen aus der Verwindung auf die Biegemöglichkeit und das Biegeergebnis. Die Beulen lösen Knicke beim Biegen aus, so dass keine gleichmäßig geformte Biegekontur entsteht (vgl. Abbildung 6-5). Schlimmstenfalls brechen an diesen Knicken der Stab in dem die Fasern reißen. Prinzipiell konnten die teilkonsolidierten duromeren Rundstäbe gebogen werden. Um schädigungsarme und reproduzierbare Biegeergebnisse zu erzielen sind weitere Untersuchungen notwendig, welche mit einer geringeren Verdrillung durchgeführt werden sollten. Ziel sollte sein, das Verdrillen und Biegen direkt in einer Aufwärmphase umzusetzen. Derzeit konnte sehr gut in der Nähe von T_g verdrillt und ca. 20 K drüber gebogen werden. Weitere Versuche sollen zeigen, ob dies auch bei einer Temperatur möglich ist.

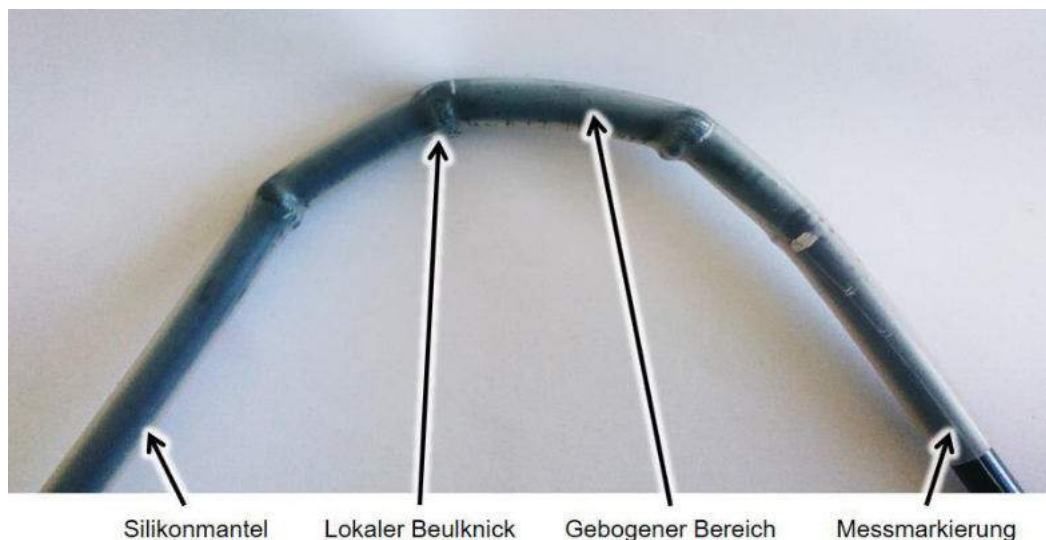


Abbildung 6-5: Erfolgreich verdrillt und gebogener Stab mit ausgebildeten lokalen Beulen

2 Verwendung der Zuwendung

Überblick über die Verwendung der Zuwendung:

- wissenschaftlich-technisches Personal: 22,65 PM
- Geräte: 15.660,00 Euro
- Leistungen Dritter: 1.692,00 Euro

Im Rahmen im des Forschungsvorhabens wurden für die 22,65 PM für wissenschaftliches und nichtwissenschaftliches Personal verwendet. Dabei erarbeiteten das wissenschaftliche Personal die konzeptionellen und konstruktiven Ideen zur Helixpultrusion und gingen damit in die Abstimmung der Fertigung der benötigten Werkzeuge. Außerdem erstellten es Fertigungsversuchspläne, begleitete die Fertigungsversuche, bewertete die Versuchsergebnisse, koordinierte und betreute studentische Arbeiten und diskutierte die Ergebnisse mit den Partnern des projektbegleitenden Ausschusses. Das technische Personal baute die Fertigungsstrecken auf, passte diese an die erarbeiteten Erkenntnisse an und bereitete die Fertigungsversuche vor und nach. Außerdem führte es die Fertigungsversuche in Begleitung des wissenschaftlichen Personals durch und unterstützte bei der Probekörperaufbereitung und -bewertung zur Fertigungscharakterisierung. Die Arbeiten zur Durchführung von kleineren Anpassungen und die Fertigung von Zusatzelementen und kleinen Verschleißteilen für die Fertigungswerkzeuge fiel auch in den Aufgabenbereich des technischen Personals.

Für die Anpassung und Ertüchtigung der Dosieranlage für die Pultrusion mit PUR-System wurde 15.660 Euro aufgewendet, welches die Aufwendungen der Herstellfirma der Dosieranlage abdeckt. Für Material und kleinere Aufwendungen von Dritten wurden 1.692,00 verwendet.

Zusätzlich zu den Zuwendungen wurden die Arbeiten im Projekt zum einen durch die bereichernden Gespräche in den projektbegleitenden Ausschusssitzungen und bilateralen Diskussionen maßgeblich unterstützt und ein großes Interesse an den Arbeiten gezeigt. Zum anderen wurden durch die projektbegleitenden Partner verschiedene Materialien für die Fertigungsuntersuchungen bereitgestellt.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle durchgeführten Arbeiten dienten dem Erkenntnisgewinn zur Gestaltung von Werkzeugen und Elementen, zum Aufbau und der Optimierung der Prozesssteuerung und zur Bewertung von Möglichkeiten des Einsatzes unterschiedlicher Faserarten und Matrixsysteme. Damit sind die beschriebenen geleisteten Arbeiten notwendig um das Projektziel einen Pultrusionsprozess zur kontinuierlichen Herstellung duroplastischer Bewehrungsstäbe mit Helix-Profilierung zu erreichen. Die Vorteile dieser gearteten Fertigung von nicht metallischen Bewehrungsstäben ist prozessschrittarm und damit ressourcenschonend sowie effizient. Gleichzeitig bieten die duroplastischen Kunststoffe im Vergleich zu thermoplastischen Kunststoffen Entwicklungspotentiale zu höheren Temperaturbeständigkeit verbunden mit geringeren Kostensteigerungen. Diese Alleinstellungsmerkmale ermöglichen vielfältige Einsatzfelder der Produkte und des Prozesses für wirtschaftliche industrielle Anwendung. Somit werden angemessene Anknüpfungspunkte für die Industrialisierung dieser Forschungsarbeiten geschaffen.

4 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzens

Sowohl der Maschinenbau als auch das Bauwesen sind mit zunehmenden Herausforderungen hinsichtlich der Ressourcenknappheit konfrontiert. So werden derzeit für Bau und Abriss von Gebäuden etwa 10 % des weltweiten Energieverbrauchs aufgewendet. Für heutige Gebäude wird zudem von einer begrenzten Lebensdauer von 40 bis 80 Jahren ausgegangen. Weiterhin wird die Zahl der Brücken mit einem Alter von über 40 Jahren und einem damit einhergehenden erhöhten Sicherheitsrisiko in Deutschland auf 120.000 geschätzt. Der volkswirtschaftliche Schaden durch Umleitungen und Staus allein durch Brückenbauarbeiten beläuft sich jährlich auf etwa 2 Milliarden Euro [24, 25, 26, 27]. Die beschriebene Problemlage ist eng mit dem Einsatz von Stahlbeton als der dominierende Baustoff des 20. Jahrhunderts verbunden. Stahlbeton ist ressourcenintensiv, schwer und zudem korrosionsanfällig. Der Einsatz alternativer Materialien wie kohlenstofffaserverstärkter Beton (Carbonbeton) bietet daher ein enormes Potenzial zur Einsparung von Ressourcen und Energie [28].

Die Verbreitung von Bewehrungen aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) ist aktuell jedoch noch limitiert, da die derzeitigen Herstellungsverfahren noch nicht auf die spezifischen Bedürfnisse im Bauwesen angepasst sind. Tendenziell werden verfügbare FKV-Bewehrungen im Gegensatz zu Stahlbewehrungen nicht mittels Umformtechnik gefertigt, sondern eher mit Hilfe der Urformtechnik und nachgelagerten Prozessschritten. Dabei sind meist keine Fasern zur Aufnahme von Scherkräften vorhanden und eine optimale Anbindung der Profilierung zum Tragquerschnitt fehlt. Hinzu kommt, dass durch den derzeit oftmals anfallenden Verschnitt in Kombination mit den relativ hohen Materialpreisen nur eine unbefriedigende Materialausnutzung erreicht werden kann. Durch die Entwicklung eines Fertigungsverfahrens wie der Helix-Pultrusion und der Forschungsarbeiten dazu, wurde ein Beitrag zur nachhaltigen Lösung dieser Herausforderungen geleistet. Somit kann ein lastoptimierter gestalteter FKV-Bewehrungsstab mittels eines effizienten Fertigungsprozess zur Verfügung gestellt werden, welches zur Etablierung dieser Bauweise führen kann.

Eine nachhaltige Etablierung von FKV-Bewehrungsstäben ermöglicht KMU, die sich auf die Verarbeitung von FKV spezialisiert haben, neue Märkte zu eröffnen. Gerade die Kombination von Auslegung, Fertigung und Qualitätssicherung angepasster Bewehrungen erfordert zwar ein hohes Maß an werkstoff- und prozessspezifischem Know-how, bietet aber andererseits die Möglichkeit, sich langfristig als Lieferant zu positionieren. Die neuartige Helix-Pultrusion und die dadurch erreichbare hohe Material- und Ressourceneffizienz bei gleichzeitig gesteigerter Performance (Anbindung an den Beton, Faserausrichtung) sind dabei wichtige Unterscheidungskriterien zu bereits aktiven Anbietern auf dem Markt für FKV-Bewehrungen.

Im Bereich der kunststoff- und FKV-verarbeitenden Betriebe ist der Anteil kleiner und mittlerer Unternehmen außerordentlich hoch. Diese sind in besonderer Weise darauf angewiesen, durch einen Technologievorsprung auch in Zukunft wirtschaftlich am Standort Deutschland produzieren zu können. Somit stellt die hier entwickelte neuartige Prozesstechnik einen entscheidenden Beitrag zur Stärkung und nachhaltigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der hier ansässigen KMU im globalen Umfeld dar.

5 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeit
Treffen des projektbegleitenden Ausschuss	Diskussion der Projektergebnisse, Abstimmung der weiteren Entwicklungsschritte	Projekttreffen am ILK bzw. virtuelle durchgeführte Treffen aufgrund der Pandemie	12/2019; 06/2020; 12/2020; 06/2021 01/2022
Hinweise auf das Projekt und die Arbeiten	Kontaktherstellung zu potentiellen Interessenten und Unterstützern	Pressemitteilungen und auf der ILK-Homepage, Gespräche mit Firmen und Institutionen	kontinuierlich
Vorstellung des Projektes auf Messen	Kontaktherstellung zu potentiellen Interessenten und Unterstützern	Beispielsweise Composites Europe, JEC, Leichtbausymposium	jährlich
Kontaktaufnahme mit potentiellen Verwertern	Abstimmung kundenspezifischer Anforderungen, Rückmeldung zu Projektergebnissen	Projekttreffen im Rahmen von C ³ (Carbon Concrete Composites), Telefonate, Webkonferenzen und persönliche Treffen	kontinuierlich
Teilnahme an Arbeitsgruppentreffen des CU	Unterstützung von Arbeiten zur Standardisierung, Normung und Zertifizierung	z.B. Arbeitsgruppen der Abteilung CC Bau; AG Normung und Standardisierung	kontinuierlich
Teilnahme am MAI Carbon Projektforum	Diskussion und Vorstellung des Projektfortschritts	MAI Carbon Projektforum in Augsburg bzw. als virtuelle Veranstaltung	10/2019; 10/2020; 10/2021
Übernahme von Forschungsergebnissen in	Know-how-Transfer durch Absolventen	TU Dresden	seit 10/2021 kontinuierlich

das Lehrangebot der TU Dresden			
Präsentation von Projektergebnissen und Technologiedemonstratoren	Kontaktherstellung zu potentiellen Interessenten, Akquise von Folgevorhaben	Koordinationstreffen des C ³ -Clusters;	Q2, Q3, Q4 2021
Präsentation von Projektergebnissen in Artikeln und Vorträgen	Verbreitung von der Projektergebnisse, Einbringung in wissenschaftlichen Diskurs	24. Internationales Dresdner Leichtbausymposium 16th World Pultrusion Conference 2022	06/2021, 05/2022

Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeit
Abschlussbericht	Know-how Transfer und Weiterentwicklung der Technologie		05/2022
Demonstration der entwickelten Laboranlage und des Pilotprozesses	Akquise von Folgevorhaben zur Überführung in industrielle Anwendungen	Internationales Dresdner Leichtbausymposium, ILK-Projektschau	Juni 2022
Vorstellung des Projektes, Diskussion von Projektergebnissen mit regionalen KMU	Akquise von Folgevorhaben zur Überführung in industrielle Anwendungen	Workshop in Kooperation mit Handwerkskammer sowie IHK Dresden am ILK	1. Quartal 2023
Teilnahme am MAI Carbon Projektforum	Vorstellung der Projektergebnisse	MAI Carbon Projektforum in Augsburg	10/2022
Präsentation von Technologiedemonstratoren auf Messen	Akquise von Folgevorhaben zur Überführung in industrielle Anwendungen	JEC Composites Europe	März 2023 Oktober 2022

Präsentation von Projektergebnissen in Artikeln und Vorträgen	Verbreitung von der Projektergebnisse, Einbringung in wissenschaftlichen Diskurs	Fachartikel in Zeitschriften	Q3, Q4 2022
Präsentation von Projektergebnissen und Technologiedemonstratoren	Kontaktherstellung zu potentiellen Interessenten, Akquise von Folgevorhaben	Koordinationstreffen des C ³ -Clusters; Dresdner Carbon- und Textilbetontage	Q3 2022
Dissertation		Für den bearbeitenden wiss. Mitarbeiter besteht die Möglichkeit zur Promotion auf dem beantragten Forschungsthema	Q3 2023

6 Quellen

- [1] Göbel, P.: Untersuchungen zur experimentellen Bestimmung textilspezifischer Permeabilitätskennwerte in Laminatdickenrichtung. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik
- [2] Mitschang, P.; Glawe, M.; Kreutz, D.; Rieber, G. M.; Becker, D.: Influence of textile parameters on the through-the-thickness permeability of woven textiles. In: LESCHER, P.; GOVIGNON, Q. (Hrsg.): Proceedings of the 11th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM-11). Auckland, Neuseeland. 2012
- [3] Konstantopoulos, S.; Grössing, H.; Hergan, P.; Weninger, M.; Schledjewski, R.: Determination of the unsaturated through-thickness permeability of fibrous preforms based on flow front detection by ultrasound. In: Polymer Composites, 39 (2016) 2
- [4] Drapier, S.; Monatte, J.; Elbouazzaoui, O.; Henrat, P.: Characterization of transient through-thickness permeabilities of Non Crimp New Concept (NC2) multiaxial fabrics. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 36 (2005) 7, S. 877–892
- [5] Elbouazzaoui, O.; Drapier, S.; Henrat, P.: An Experimental Assessment of the Saturated Transverse Permeability of Non-crimped New Concept (NC2) Multiaxial Fabrics. In: Journal of Composite Materials, 39 (2005) 13, S. 1169–1193
- [6] Li, M.; Wang, S.-K.; Gu, Y.-Z.; Li, Y.-X.; Potter, K.; Zhang, Z.-G.: Evaluation of through-thickness permeability and the capillary effect in vacuum assisted liquid molding process. In: Composites Science and Technology, 72 (2012) 8, S. 873–878
- [7] Stöven, T.; Weyrauch, F.; Mitschang, P.; Neitzel, M.: Continuous monitoring of three-dimensional resin flow through a fibre preform. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 34 (2003) 6, S. 475–480

- [8] George, A.: Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials. Dissertation. Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau. 2011
- [9] Becker, D.; Broser, J.; Mitschang, P.: An experimental study of the influence of process parameters on the textile reaction to transverse impregnation. In: Polymer Composites, 37 (2016) 9, S. 2820–2831
- [10] Klunker, F.; Danzi, M.; Ermanni, P.: Fiber deformation as a result of fluid injection. Modeling and validation in the case of saturated permeability measurements in through thickness direction. In: Journal of Composite Materials, 49 (2015) 9, S. 1091–1105
- [11] Ven, E. C. van de; Loendersloot, R.; Akkerman, R.: Experimental investigation of the compressibility and permeability of fabric reinforcements. In: BINETRUY, C. (Hrsg.): Proceedings of the 8th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM-8). Douai, Frankreich. 2006
- [12] Weitzenböck, J. R.; Shenoi, R. A.; Wilson, P. A.: Measurement of three-dimensional permeability. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 29 (1998) 1– 2, S. 159–169
- [13] Hergan, P.: Konstruktive Auslegung und Umsetzung eines 3D Permeameters. Masterarbeit. Montanuniversität Leoben, Department Kunststofftechnik. 2015
- [14] Opfermann J. Kinetic Analysis Using Multivariate Non-linear Regression. I. Basic concepts. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2000;60(2):641–58. <https://doi.org/10.1023/A:1010167626551>.
- [15] Krebs, D.: Grundlagen der Pultrusion zur Fertigung von FV-Bauteilen für die Anforderungen der automobilen Großserie. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät Maschinenbau, Karlsruhe, 2018.
- [16] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen – Halbzeuge und Bauweisen. 1. Aufl. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.
- [17] Michaeli, W.; Preuß, T: Pultrusion von FVK-Profilen - Polyurethan (PUR) als alternatives Matrixsystem. Polymers & polymer composites. 2010. 18 (9), S. 537–542

- [18] Bezerra, R.: Modelling and Simulation of the Closed Injection Pultrusion Process. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruhe, 2017.
- [19] Beall, F. C.; Koppernaes, J. D.: US 5176865A - Pultrusion method for condensation resin injection, 1988. URL: <https://www.google.com/patents/US5176865>
- [20] Hopmann, C.; Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. 8. Aufl. RWTH Aachen: Hanser Fachbuchverlag, 2017.
- [21] Brack, A.: Kontinuierliche Herstellung von miniaturisierten Endlosprofilen aus thermoplastischen Faserverbundkunststoffen. Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät Maschinenwesen, Aachen, 2018.
- [22] Böhm, R.; Thieme, M.; Wohlfahrt, D.; Wolz, D.S.; Richter, B.; Jäger, H.: Reinforcement systems for carbon concrete composites based on low-cost carbon fibers. *Fibers* 2018, 6 (3), doi:10.3390/fib6030056
- [23] Wohlfahrt, D.; Thieme, M.; Böhm, R.; Gude, M.: Design and manufacturing of novel 552 thermoplastic CFRP rods for carbon concrete composites. 18th European Conference on Composite 553 Materials, June 2018, Athens
- [24] Schladitz, F.; Tietze, M.; Lieboldt, M.; Curbach M.: Carbon and Concrete - The Future of Construction? IABSE Conference - Bridges and Structures Sustainability - Seeking Intelligent Solutions, IABSE, Guangzhou, 2016
- [25] Tietze, M.; Schladitz, F.; Kahnt, A.; Curbach, M.: Modular Building Solutions with Carbon Reinforced Concrete. IABSE Conference - Bridges and Structures Sustainability - Seeking Intelligent Solutions, IABSE, Guangzhou, 2016
- [26] Frenzel, M.; Curbach, M.: Designing textile-reinforced structural concrete elements under bending stress - theoretical basics and practical application, Proceedings 60th BetonTage Ulm, pp. 180-182, BFT International, Neu-Ulm, 2016
- [27] Ilg, P.; Höhne, C.; Günther, E.: High-performance materials in infrastructure: A Review of Applied Life Cycle Costing and its Drivers - the Case

of Fiber-Reinforced Composites. Journal of Cleaner Production 112, pp. 926-945, 2015

[28] Scheerer, S.: Was ist Textilbeton? Eine kurze Einführung in das Thema. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 110, pp. 4-7, 2015

Gefördert durch:

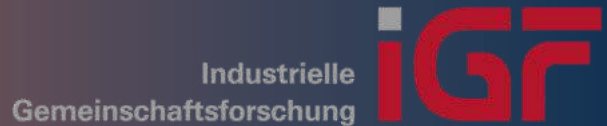


Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



**LEICHTBAU
FORSCHUNG**



Pultix

Neuartiger Pultrusionsprozess zur kontinuierlichen Herstellung duroplastischer Bewehrungsstäbe mit Helix-Profilierung

Schlussbericht

Autoren:

Daniel Wohlfahrt, Tom Dziewiencki , Michael Müller-Pabel
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik
TU-Dresden

Composites United Leichtbau-Forschung gGmbH
Am Technologiezentrum 5
86159 Augsburg
www.leichtbau-forschung.de
Leichtbau-Forschung@Composites-United.com

Stand Juli 2022