

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger:
Institut für Konstruktion
und Verbundbauweisen e.V.

Förderkennzeichen
Projekt - Nr. (PT): 37/02

Vorhabensbezeichnung:

Technologieentwicklung für bauteilnahe Fasergelege

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2002 bis 30.04.2004
Berichtszeitraum: 01.01.2004 bis 30.04.2004

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Michael Puckl

Vorstand KVB: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Wielage

Chemnitz, den 18.10.2004

Institut für Konstruktion
und Verbundbauweisen e.V.
Annaberger Str. 240
09125 Chemnitz

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	WICKELVERSUCHE GABELABLAGUNG UND OPTIMIERUNG.....	3
3	FIXIERUNG DER WICKELHALBZEUGE	10
3.1	FIXIERUNG DURCH VERNÄHEN.....	10
3.2	FIXIERUNG UNTER VERWENDUNG VON SPRÜHKLEBER.....	15
4	HERSTELLUNG VON PROBEKÖRPERN.....	20
5	VERGLEICH UND BEWERTUNG DER TECHNOLOGIEN.....	25
5.1	VERGLEICH UND BEWERTUNG DER ABLAGEVARIANTEN.....	25
5.2	VERGLEICH UND BEWERTUNG DER FIXIERVARIANTEN	27
5.3	VARIANTENKOMBINATIONEN FÜR DIE GESAMTECHNOLOGIE	28
6	WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNGEN.....	31
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	32
8	LITERATURVERZEICHNIS	34
9	ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS.....	35
9.1	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	35
9.2	TABELLENVERZEICHNIS	35

1 Einleitung

Die Ausgangsbasis für die Herstellung von Faserverbundbauteilen bilden textile Halbzeuge. Der Preis für diese setzt sich aus den Kosten für die Rovings und den Verarbeitungskosten zusammen. Um diese Kosten zu reduzieren und somit der Werkstoffgruppe weitere Anwendungsfelder zu erschließen, sind vorhandene Technologien zur Halbzeugherstellung weiter zu optimieren und durch neue Techniken zu ergänzen /1/.

Zudem ist es zwingend erforderlich die Endlosfasern belastungsgerecht zu orientieren, um das Potential dieser Werkstoffgruppe voll auszunutzen. Dementsprechend sind die zu verarbeitenden Halbzeuge zu optimieren und an die jeweiligen Anforderungen der herzustellenden Bauteile anzupassen.

Mit dem Projekt „Technologieentwicklung für bauteilnahe Fasergelege“ soll diesen Forderungen nachgekommen werden. Ziel ist die Entwicklung einer Technologie zur Herstellung von kostengünstigen Faserhalbzeugen, die zugleich eine belastungsgerechte Orientierung der Fasern aufweisen und somit optimal an die herzustellenden Bauteile angepasst sind. Hierdurch soll weiterhin eine vorhandene Lücke zwischen den Großserientechnologien zur Herstellung von Endlosware und Sondertechnologien zur Preformherstellung u.ä. geschlossen werden. Dies soll unter Nutzung der Faserwickel-Technik in Verbindung mit geeigneten Fixiertechniken erfolgen.

Im Rahmen des Projektes wurden hierfür der Stand der Technik analysiert und darauf aufbauend Konzepte für die neue Technologie erarbeitet. Für die verschiedenen Teilproblemstellungen konnten unterschiedliche Lösungsansätze gefunden werden. Diese galt es näher zu untersuchen, zu erproben, anzupassen und aus der Vielzahl der Varianten die optimale Kombination von Einzelverfahren für die Gesamttechnologie herauszuarbeiten.

Mit verschiedenen Vorversuchen konnte bereits zu Beginn des Projektes die prinzipielle Eignung der Technologie nachgewiesen werden. Aufbauend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurden zwei Ablagevarianten (Zylinderablage, Gabelablage) konzipiert und entsprechende Vorrichtungen gebaut /2/, /3/. Die Zylinderablage wurde bereits erfolgreich getestet. Auf die mit der Gabelablage durchgeführten Versuche wird in einem nachfolgenden Kapitel näher eingegangen.

Bereits zu Beginn des Projektes wurden verschiedene Möglichkeiten der Fixierung der Gelege aufgezeigt und diese in verschiedenen Projektabschnitten näher untersucht. Auf noch offene, bis dahin nicht untersuchte, Fixiervarianten wird ebenfalls in einem nachfolgenden Kapitel näher eingegangen.

Mit den verschiedenen Varianten sollen in einem weiteren Schritt Gelege hergestellt und diese zu FVK-Teilen verarbeitet werden. Somit lässt sich eine Aussage über die Verwendbarkeit der hergestellten Halbzeuge treffen.

Abschließend sollen die Varianten der Einzeltechnologien miteinander verglichen und bewertet werden. Darauf aufbauend sind geeignete Kombinationen vorzuschlagen, wobei technische, technologische und wirtschaftliche Aspekte Berücksichtigung finden müssen. Die genannten Lösungsvarianten sollen weiterhin mit bekannten Verfahren (Großserientechnologien zur Herstellung von Endlosware und Sondertechnologien zur Preformherstellung u.ä.) verglichen werden, um ihre Verwendbarkeit für ein geeignetes optimales Halbzeugspektrum herauszuarbeiten. Anhand der durchgeführten Untersuchungen sollen die Eignung der neuen Technologie nachgewiesen, Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt und Grundlagen für weitere Optimierungen geschaffen werden. Letztendlich sollen die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse die Basis für eine neue Technologie bilden, die es ermöglicht, angepasste und optimierte Faserhalbzeuge kostengünstig herzustellen.

2 Wickelversuche Gabelablage und Optimierung

In /2/ und /3/ wurde bereits ausführlich auf die Konzeption, Entwicklung und die prinzipielle Gestaltung der Gabelablage eingegangen. Ziel dieser Ablagevariante ist es, eine noch höhere Flexibilität bezüglich der herstellbaren Halbzeuggrößen gegenüber der Zylinderablage zu erreichen.

Durch die Kombination von Zylindern unterschiedlicher Länge können mit einer modular aufgebauten Zylinderablage Halbzeuge in entsprechenden Längen hergestellt werden. Die Halbzeugbreite ist durch den Zylinderumfang vorgegeben und lässt sich nicht ohne weiteres variieren. Gelege mit einer kleineren Breite könnten natürlich hergestellt werden, indem nach der Entformung ein Teil abgetrennt wird. Für Gelege größerer Breite sind jedoch größere Zylinder mit entsprechenden Verbindungsringen, Deckelscheiben und Nadelkränzen erforderlich. Ggf. kann es sinnvoll sein mehrere modular aufgebaute Zylinderablagen mit entsprechenden Durchmesserstufen bereitzustellen, um somit ein breites Halbzeugspektrum abdecken zu können.

Bei der Gabelablage ist neben der Variation der Vorrichtungslänge auch eine Variation des Vorrichtungsumfangs vorgesehen, um somit Gelege in nahezu beliebigen Dimensionen ohne größeren Verschnitt herstellen zu können. Die Vorrichtungslänge kann durch die Verwendung unterschiedlicher Ablagerohre (axial verlaufende Rohre) realisiert werden. Zur Einstellung jedes beliebigen Durchmessers, innerhalb einer unteren und oberen Grenze, können zum einen die Gabeln zueinander geschwenkt und zum anderen Gabelarme (radial angeordnete Vierkantprofile) in verschiedenen Längen (Abstufung siehe /3/) eingesetzt werden. Mit einer derartigen Anordnung lassen sich beliebige Vorrichtungslängen und -umfänge realisieren. Dies konnte mit der entwickelten und gebauten Vorrichtung nachgewiesen werden /3/. Das wesentlichste Problem dieser Ablagevariante ist die Gestaltung der Wendezone, da bei der Verstellung des Vorrichtungsumfangs die Wendezone mit angepasst werden muss. Die Wendezone lässt sich zwar durch starre Kamm- bzw. Nadelleisten realisieren, jedoch wären diese Teile jeweils nur für einen Vorrichtungsumfang einsetzbar. Dies stellt folglich einen Widerspruch zur angestrebten Flexibilität dar. Aus diesem Grund galt es im Rahmen des Projektes eine universelle und beliebig einstellbare Wendezone zu konzipieren.

In einem ersten Versuch wurde die Gabelablage im Bereich der Wendezone in Umfangsrichtung mit Stahldrähten umspannt. Mit einem hinreichend langen Draht kann jeder beliebige Vorrichtungsumfang umspannt werden. Bei kleineren Umfängen wird das überstehende Ende einfach aufgerollt und im Inneren der Gabelablage platziert. Um die durch die Rovingablage

auf die Wendezone einwirkenden Kräfte (Fadenspannung) abfangen zu können, müssen die Stahldrähte mit einer entsprechenden Vorspannung aufgebracht werden. Bei ersten durchgeführten Wickelversuchen wurde festgestellt, dass mit dieser Variante eine exakte Faserablage nicht möglich ist. Die Drähte sind zu glatt und somit verrutschen die Rovings unkontrolliert in der Wendezone.

Wie bereits in /3/ erwähnt, wäre es bei der Verwendung einer seilförmigen Wendezone denkbar, diesem Effekt durch die Integration von Zusatzelementen entgegen zu wirken (Perlenkettenprinzip). Eine alternative Variante ist im Einsatz von Zahnriemen zu sehen. Diese sind kostengünstig als Endlosware erhältlich und lassen sich ebenfalls auf jedem beliebigen Umfang der Gabelablage ablegen. Zudem weisen sie die gewünschte Strukturierung auf, die ein Verrutschen des Rovings verhindern soll. In Analogie zur Stahlseilvariante müssen die Zahnriemen ebenfalls eine gewisse Vorspannung aufweisen. Für die durchzuführenden Versuche wurde eine Flachzahnriemen 10 AT 5 (10 mm Riemenbreite; Teilung 5 mm) ausgewählt, da für eine möglichst exakte Faserablage der Abstand zwischen den Zähnen und die Breite der Zähne möglichst klein sein sollten. Ein Nachteil dieses Riemens ist allerdings die mit 1,2 mm relativ kleine Zahnhöhe. Die mit diesen Zahnriemen umspannte Gabelablage ist in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Gabelablage mit Wendezonen (Zahnriemenvariante)

Abbildung 2 zeigt in einer Detailansicht die Spanneinrichtung für die Wendezone. Der Riemen ist an einer Seite eines Gabelarms fest eingespannt, dann um die komplette Vorrichtung gelegt und auf der gegenüberliegenden Seite des gleichen Gabelarms zwischen zwei Klemmplatten befestigt. Diese Klemmplatten können über einen Gewindebolzen in ihrer Längsrichtung bewegt werden, wodurch die erforderliche Riemenspannung erzeugt wird. Die Riemenlänge ist so groß gewählt, dass auch die Gabelablagevariante mit dem größten Vorrichtungsumfang umspannt werden kann. Für alle kleineren Varianten wird das freie überschüssige Ende des Riemens aufgerollt und im Inneren der Gabelablage befestigt.

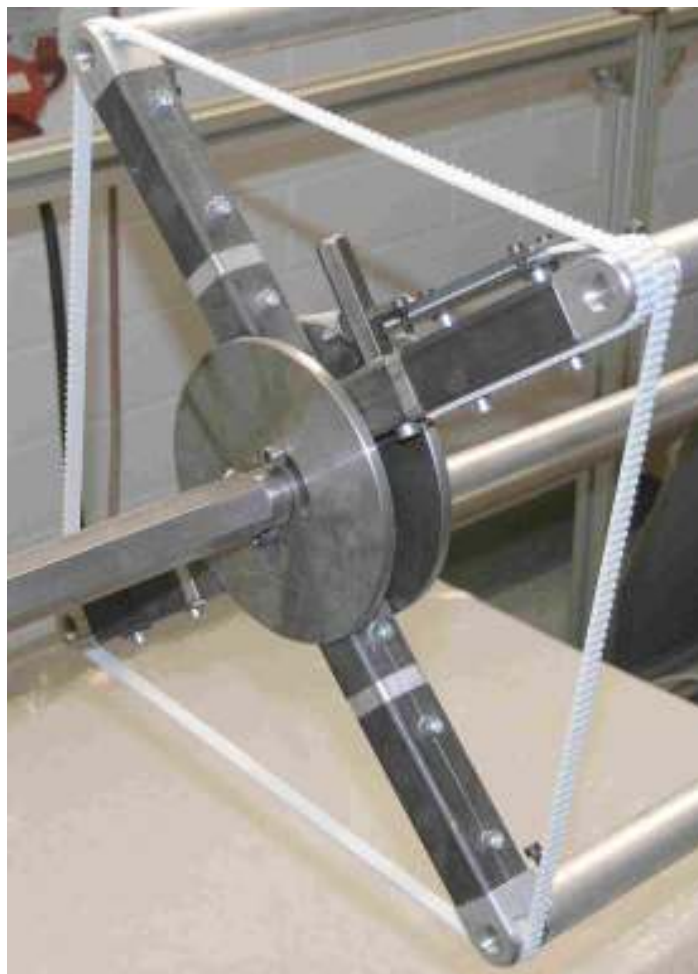


Abbildung 2: Spannvorrichtung der Wendezone

Mit der beschriebenen und dargestellten Ausführungsform der Gabelablage wurden verschiedene Wickelversuche durchgeführt. In den nachfolgenden Abbildungen ist die Ablage des Roving auf die Vorrichtung zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt (Abbildung 3 – Gabelablage zu Beginn der Bewicklung; Abbildung 4 – Gabelablage nach Durchlauf einiger Ablagezyklen; Abbildung 5 – bewickelte Gabelablage).



Abbildung 3: Gabelablage zu Beginn der Bewicklung

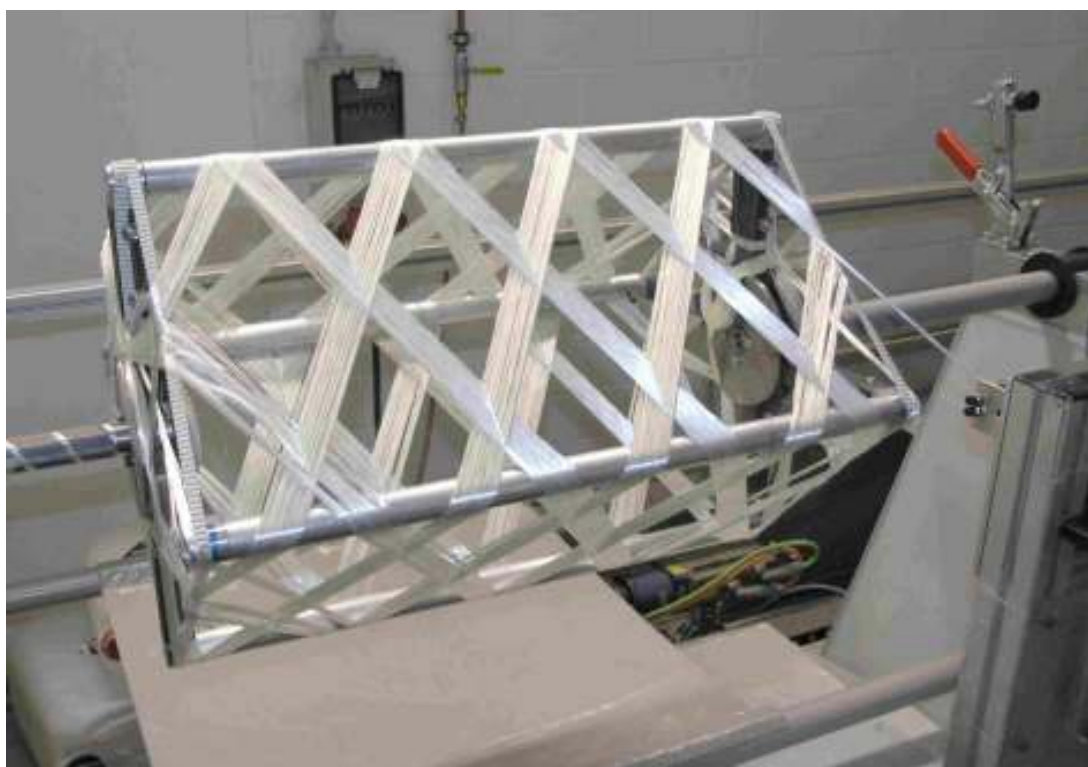


Abbildung 4: Gabelablage nach einigen Umläufen



Abbildung 5: Bewickelte Gabelablage

Bei den durchgeführten Versuchen kam es in den geraden Bereichen der Wendezone immer wieder zum Verrutschen des Rovings. Folglich konnte der Roving in den Randbereichen nicht exakt abgelegt werden. Bei geringen Abweichungen in der Wendezone wird der Roving im mittleren Vorrichtungsbereich trotzdem noch exakt abgelegt. Wird der Versatz in der Wendezone jedoch zu groß, ist auch hier eine deutliche Fehlplatzierung sichtbar.

Generell kann gesagt werden, dass die Tendenz zum Verrutschen mit sinkendem Wickelwinkel abnimmt. Der extremste Fall hierfür wäre eine Axialwicklung (Wickelwinkel 0°), wobei der Roving unter 90° zur Wendezone abgelegt wird und somit kein Verrutschen stattfindet. Flache Wickelwinkel erfordern jedoch größere Überlaufwege (Verfahrbewegung des Schlittens über die eigentliche Bauteillänge hinaus) und bedingen somit längere Fertigungszeiten sowie eine größere Fasermenge in der Wendezone (späterer Abfall) /3/.

Weiterhin sind als Ursache für das Verrutschen folgende Punkte zu nennen. Zum einen ist, wie bereits erwähnt, die Zahnhöhe des verwendeten Riemens relativ klein, wodurch das Ver-

rutschen begünstigt wird. Synchronriemen mit einer größeren Zahnhöhe haben jedoch automatisch eine größere Teilung und sind zudem breiter. Beides wirkt einer exakten Ablage ebenfalls entgegen. Alternativ wäre zur Beseitigung dieses Problems ggf. die Verwendung von gezahnten Keilriemen denkbar. Bei dieser Ausführungsform ist die Zahnhöhe größer und zudem verjüngen sich die Zähne im eigentlichen Ablagebereich. Weiterhin ist zu bemerken, dass bei geringen Zahnhöhen mit Rovings niedrigerer Tex-Zahl bessere Ablageergebnisse zu erzielen sind, als mit Rovings höherer Tex-Zahl. Riemen mit einer zu geringen Zahnhöhe erlauben zudem nicht die Herstellung von mehrschichtigen Gelegen. Sind die Zahnlücken bereits mit der ersten Gelegeschicht ausgefüllt, kann das Verrutschen der nachfolgend abgelegten Rovingschicht nicht verhindert werden.

Zum anderen wurde bei dieser Ausführungsform der Wendezone ein weiterer negativer Effekt festgestellt. Die Ablage des Rovings erfolgt unter einer gewissen Fadenspannung, wodurch auf den Riemen Kräfte einwirken, die ihn in Richtung Drehachse der Vorrichtung auslenken (maximale Auslenkung in der Mitte der geraden Wendezonenbereiche). Dieser Kraft soll durch die Vorspannung des Riemens entgegengewirkt werden. Da die durch den abgelegten Roving erzeugte Kraft jedoch senkrecht auf den Riemen wirkt, wäre zur Vermeidung einer Auslenkung eine extrem hohe Vorspannkraft notwendig, die wiederum mit dem vorhandenen einfachen Aufbau nicht erzeugt werden kann und zudem eine extrem steife Gesamtvorrichtung erfordern würde. Eine deutliche Reduzierung der Fadenspannung des Rovings führte zwar zu einer Verbesserung (Verringerung der Auslenkung), konnte den Effekt aber nicht beseitigen. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Auslenkung im Verlauf der Faserablage zunimmt, da sich die Zahl der Rovingablagen und somit die Summe der einwirkenden Kräfte mit jedem Schlittenumlauf erhöht. Die Erhöhung der einwirkenden Kräfte führt zu einer entsprechend größeren Auslenkung der Wendezone. Dies hat zur Folge, dass sich die zuerst abgelegten Rovingbahnen lockern und sich ggf. nicht mehr in der gewünschten Position befinden. Der beschriebene Effekt wirkt sich bei Gabelablagen mit größerem Vorrichtungsumfang noch wesentlich stärker aus, da sich hier die freie Länge des Riemens zwischen den Ablagepunkten (Gabelarme) entsprechend vergrößert.

Mit den durchgeführten Versuchen konnten wesentliche Probleme der Gabelablagevariante aufgezeigt werden. Es wurde nachgewiesen, dass das Grundprinzip der universellen Verstellbarkeit für die Herstellung verschiedener Halbzeuggrößen (Länge und Breite) realisierbar ist. Das Ziel, eine variable und optimal funktionierende Wendezone zu entwickeln, wurde im Rahmen des Projektes allerdings nicht erreicht. Die Gabelablage kann jedoch in Verbindung mit kamm- bzw. leistenförmigen Wendezonenelementen eingesetzt werden, die eine ausrei-

chende Eigensteifigkeit aufweisen (Verhinderung des Auslenkens) und zugleich eine ausreichend große Zahn- bzw. Nadelhöhe besitzen (Verhinderung des Verrutschens). Da derartige Elemente jedoch nur für einen Vorrichtungsumfang verwendet werden können, ist der Einsatz sicherlich nur sinnvoll, wenn eine gewisse Mindeststückzahl an Halbzeugen benötigt wird. Um die Kosten für diese starren Wendezonenelemente möglichst gering zu halten, wäre es denkbar, lange kammförmige Leisten bzw. profilierte Stangen zu verwenden, aus denen die benötigten Elemente in den erforderlichen Maßen durch einfaches Ablängen hergestellt werden können. Alternativ wäre auch die Verwendung von speziellen Einzelsegmenten (Nadelblocksegmente) denkbar, die zu Wendezonenelementen beliebiger Länge zusammengefügt werden können und durch Form- und Kraftschluss eine ausreichende Steifigkeit aufweisen. Die genannten Varianten von starren Wendezonenelementen wurden im Rahmen des Projektes nicht näher untersucht.

Ein Vergleich und eine Bewertung der konzipierten Ablagevarianten (Zylinderablage; Gabelablage) erfolgt in einem nachfolgenden Kapitel des Berichtes.

3 Fixierung der Wickelhalbzeuge

In /2/ wurden bereits einige wesentliche Möglichkeiten der Fixierung textiler Halbzeuge genannt und teilweise näher beschrieben (siehe hierzu auch /1/, /4/, /5/). Hierbei wurde zwischen der Fixierung durch Vernähen und der Fixierung unter Verwendung von Zusatzstoffen (Bindern, Kleber usw.) unterschieden. Ebenfalls in /2/ ist die Fixierung mittels nachträglichen Vernähens und die Verwendung von Klebebandstreifen beschrieben. Weitere Untersuchungen befassten sich mit der Verwendung von Schmelzklebern. Hierfür wurden Vorrichtungen zur Herstellung reiner Klebefäden und mit Kleber ummantelter Trägerfäden konzipiert und gebaut. Die damit hergestellten Hilfsfäden wurden zur Fixierung der Wickelgelege eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sowie Vor- und Nachteile des Verfahrens sind in /3/ näher erläutert.

Weitere Fixiermöglichkeiten sind im Einsatz spezieller Nähtechnik und in der Verwendung von Sprühklebern zu sehen. Auf diese Varianten soll in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen werden.

3.1 Fixierung durch Vernähen

Eine Sonderform der Nähtechnik ist in der Verwendung robotergeführter Einseitnähköpfe zu sehen. Diese Technologie wurde speziell für die Fixierung von Faserhalbzeugen entwickelt und wird teilweise zur Bauteilherstellung für die Luft- und Raumfahrt und den Fahrzeugbau eingesetzt /6/. Im Gegensatz zu klassischen Zweiseitnähverfahren erfolgt hier die Stich- und Nahtbildung von nur einer Seite aus. Dies ermöglicht beispielsweise das Vernähen von Halbzeugen auf einer Form oder aber auf einem Kern. Letzteres ist speziell für die zu entwickelnde Technologie zur Herstellung bauteilnaher Fasergelege relevant.

Das KVB verfügt über einen Roboter mit Einseitnähkopf (Blindstichnähkopf), welcher Bestandteil einer Arbeitszelle zur Preformherstellung ist. Zur Durchführung von Nähversuchen wurden die bewickelten Ablagevarianten (Zylinder- und Gabelablage) in diese Arbeitszelle transportiert und die entsprechenden Untersuchungen dort durchgeführt. Alternativ wäre es aber auch denkbar den Roboter mit dem Nähkopf an der Wickelmaschine zu platzieren und ggf. in die Steuerung zu integrieren (Fertigung kleiner Serien). Somit könnten der Transport entfallen und ggf. erforderliche Zwischenfixierungsschritte nach der Ablage einzelner Gelegeschichten durchgeführt werden. Die Platzierung an der Wickelmaschine hätte weiterhin den

Vorteil, dass die Drehachse zur Rotation des Wickelkerns genutzt werden kann. Dies wäre beispielsweise für eine Umfangsfixierung des Wickelgeleges sinnvoll.

Für erste grundlegende Untersuchungen ist es jedoch ausreichend, die jeweilige Ablagevariante in der Arbeitszelle zur Preformherstellung zu platzieren. Abbildung 6 zeigt die bewickelte Zylinderablage in der Arbeitszelle bei der Durchführung von Nähversuchen.



Abbildung 6: Bewickelte Zylinderablage bei Nähversuchen

In Abbildung 7 ist der Nähkopf mit seiner bogenförmigen Nadel und dem Nähfuss bei Versuchen zur Axial- und Umfangsfixierung eines Wickelgeleges auf der Zylinderablage dargestellt.

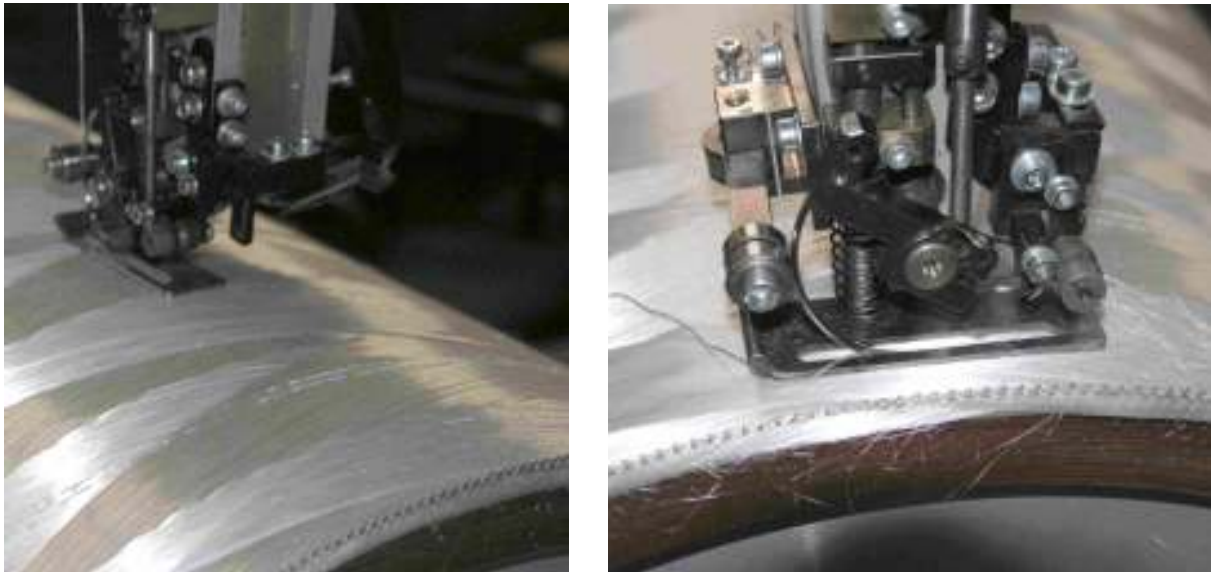


Abbildung 7: Nähnversuche: Axial- und Umfangsnaht

Bei den durchgeführten Versuchen konnten einige grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden. Aufgrund der während des Wickelprozesses aufbrachten Fadenspannung entsteht auf der Zylinderablage ein sehr dichtes und festes Gelege. Der Nadel des Blindstichnähkopfes gelingt es teilweise nicht dieses dichte Gelege zur Stichbildung zu durchstechen. Um dies zu vermeiden, kann das Gelege lediglich mit einer extrem niedrigen Fadenspannung erzeugt werden. Dies hat allerdings Nachteile hinsichtlich einer möglichst exakten Faserablage.

Da sich das Wickelgelege direkt auf der harten Kernoberfläche befindet, muss die Positionierung des Nähkopfes zum Kern sehr genau sein, damit die Nadel während des Nähvorgangs nicht gegen die Kernoberfläche gedrückt wird (Kollision). Dies erfordert zum einen eine sehr exakte Ausrichtung des Kerns und zum anderen eine sehr exakte Beschreibung des Nähpfades. Letzteres bedingt eine aufwendige Programmierung. Alternativ wäre es noch denkbar, eine weiche äußere Kernschicht (Schaum) auf der Zylinderablage vorzusehen, die ggf. problemlos durchstochen werden kann. Weiterhin könnten in den geplanten Fixierungsbereichen Nuten auf der Zylinderablage vorgesehen werden, in denen die Nadel ggf. ohne Kollision einstecken kann. Beide Varianten würden jedoch zu einer nicht unerheblichen Kostenerhöhung der Zylinderablage führen.

Im Rahmen der Versuche wurde weiterhin festgestellt, dass es bei dichten und festen Gelegen zu Problemen führt, wenn die Nahtichtung nicht der Faserrichtung der Rovings entspricht. Bei Wickelgelegen kreuzen die abgelegten Rovings einer Bedeckung immer unter einen Winkel, der sich aus $180^\circ - 2 \cdot \alpha$ ergibt (α = Wickelwinkel). Wird die Naht unter einem Winkel zwischen 0 und 90° zur Faserrichtung platziert, führt dies während des Nähprozesses zu Kräften, welche die Nadel seitlich auslenken und somit eine optimale Nahtbildung teilweise unmöglich

machen. Folglich ist ein optimaler Nähprozess nur bei Gelegen möglich, bei denen der Winkel zwischen den abgelegten Fasern 90° beträgt. Dies sind jedoch nur zwei Sonderfälle ($0^\circ/90^\circ$ Gelege und $-45^\circ/+45^\circ$ Gelege) die mit Großserientechnologien wesentlich preisgünstiger gefertigt werden können und deren Herstellung als Wickelgelege somit nicht sinnvoll ist. Weitere Einschränkungen für das Fixieren der Gelege sind durch die Geometrie des Nähkopfes gegeben. Speziell der Nähfuss (plattenförmiges Bauteil an der Unterseite des Nähkopfes) erlaubt es nicht mit dem Nähkopf in Ecken zu fahren, da er funktionsbedingt größer als der Arbeitsbereich der Nadel ist. Eine derartige Ecke ist beispielsweise der Übergang von den abgelegten Fasern zum Nadelkranz. Um eine Überschneidung zwischen Axial- und Umfangsfixierung gewährleisten zu können, wäre es somit erforderlich, die Umfangsfixierungen (für die späteren Umfangsschnitte der Entformung) in Richtung Ablagemitte zu versetzen. Dies hat jedoch zugleich eine Erhöhung des Abfallmaterials zur Folge (zusätzlich zur eigentlichen Wendezone und Beschnittzugabe).

Neben den durchgeführten Nähversuchen mit der Zylinderablage wurde auch das Fixieren durch Vernähen auf der Gabelablage untersucht. Abbildung 8 zeigt eine bewickelte Gabelablage in der Arbeitszelle zur Preformfertigung.



Abbildung 8: Bewickelte Gabelablage bei Nähversuchen

Einige bereits bei den Versuchen mit der Zylinderablage analysierte Probleme konnten auch bei der Gabelablage festgestellt werden. Diese betrifft zum einen die für einen optimalen Nähprozess erforderliche exakte Ausrichtung des Wickelkerns und die aufwendige Beschreibung des Nähpfades. Andererseits gilt auch hier, dass ein optimaler Nähprozess nur bei Gelegen möglich ist, bei denen der Winkel zwischen den abgelegten Fasern 90° beträgt.

Im Gegensatz zur Zylinderanlage liegt der Roving bei der Gabelablage in weiten Bereichen frei (Bereiche zwischen den Ablagerohren). Somit besteht hier keine Gefahr, dass es zu einer Nadelkollision mit der Vorrichtung kommen kann. Da der Roving in diesem Bereich eine große Strecke mit geringer Fadenspannung (siehe Kapitel 2) frei überspannt, kann er mit einer vergleichsweise kleinen Kraft, die senkrecht auf ihn einwirkt, leicht in Richtung Drehachse der Vorrichtung ausgelenkt werden. Eine derartige Kraft wird durch den federbelasteten Nähfuss ausgeübt, was zu einem neuen Problem führt. Speziell in den Bereichen zwischen den Kreuzungspunkten des Geleges senkt der Nähfuss die belasteten Rovings ab und schiebt sich beim Verfahren unter die vor ihm liegenden unbelasteten Rovings. Somit ist kein Vernähen mehr möglich. In den Bereichen der Kreuzungspunkte ist diese Gefahr wesentlich geringer, da sich hier die einzelnen Rovings durch ihre Umschlingung stabilisieren. Aufgrund dieser Eigenstabilisierung ist eine Fixierung in diesen Bereichen jedoch weniger sinnvoll als in den Bereichen zwischen den Kreuzungspunkten. Die Bereiche der Kreuzungspunkte verlaufen zudem verfahrensbedingt in Umfangsrichtung. Für eine Axialfixierung muss der Nähkopf dementsprechend auch immer die weniger stabilen Bereiche überstreichen, wobei die genannten Probleme auftreten. In Abbildung 9 sind die beschriebenen Effekte dargestellt. Eine Verbesserung könnte hier ggf. durch einen modifizierten Nähfuss erzielt werden.



Abbildung 9: Nähversuche Gabelablage; zwischen bzw. auf Kreuzungspunktbereichen

Für die Gabelablage könnte ggf. die Verwendung eines Tufting Nähkopfes zu besseren Ergebnissen führen. Bei dieser speziellen Einseitnähetechnologie durchsticht die Nadel die abgeleg-

ten Faserhalbzeuge, bildet auf der Rückseite eine Schlinge und somit eine Naht. Für die freiliegenden Bereiche zwischen den Ablagerohren wäre ein derartiger Nähkopf einsetzbar. Da die Nadel senkrecht zur Gelegeoberfläche einsticht, sollten hierbei auch Nähte unter beliebigen Winkeln zur Rovingablage erzeugt werden können. Für die Zylinderablage kann ein Tufing Nähkopf, aufgrund der harten Unterlage (Ablagezylinder), normalerweise nicht verwendet werden. Eine Ausnahme bilden hierbei ebenfalls wieder Zylinderablagen, die in den späteren Nahtbereichen Nuten aufweisen, in denen die Nadel eintauchen kann. Allerdings sind durch die vorgegebenen Nuten die möglichen Fixierbereiche sehr eingeschränkt, was einer universellen Einsetzbarkeit entgegensteht.

Mit den durchgeführten Untersuchungen zur Fixierung von Wickelgelegen mit robotergeführter Einseitnähtechnik konnten für beiden Ablagevarianten eine Vielzahl von Problemen aufgezeigt werden, die einem Einsatz dieser Technologie entgegenstehen. Weitere wesentlichste Nachteile dieser Fixierungstechnologie sind:

- teure Anlagentechnik (Mehrachsroboter; Nähkopf)
- teure Steuerungssoftware zur Programmierung des Nähpfades
- aufwendige Programmierung mit Software oder im zeitintensiven „Teach-In“-Verfahren
- sehr exakte Positionierung der Ablagen erforderlich
- vergleichsweise langsames Fixierverfahren → sehr zeitintensiv → höhere Fertigungskosten

Als Ergebnis der durchgeführten Versuche und der genannten prinzipiellen Nachteile kann davon ausgegangen werden, dass die Einseitnähtechnik als Fixiervariante für die Technologie zur Herstellung bauteilnaher Fasergelege ungeeignet ist.

3.2 Fixierung unter Verwendung von Sprühkleber

Wie bereits in /2/ erwähnt, bietet der Einsatz von Sprühklebern eine weitere Möglichkeit zur Fixierung textiler Faserhalbzeuge. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes weiterhin Fixierversuche mit einem derartigen Hilfsmaterial durchgeführt. Für die Versuche fand der Klebe-Spray „AEROFIX Gewebe-Fixier-Spray“ (Suter Kunststoffe AG) Anwendung. Hierbei handelt es sich um einen Klebe-Spray auf Styren-Basis der speziell für das Verkleben und Fixieren von Geweben aus Glas-, Aramid- sowie Carbonfasern entwickelt wurde.

In ersten Versuchen wurde der Roving einfach auf der Zylinderablage (ohne zusätzliche Vorbehandlung) abgelegt. Nach der vollständigen Bedeckung der Ablage wurden die Bereiche für die späteren Entformungsschnitte mit Klebebandstreifen fixiert. Anschließend erfolgte der Auftrag des Sprühklebers auf der Außenseite des abgelegten Wickelgeleges. Die Außenseite des Geleges konnte somit sehr gut und sehr schnell fixiert werden. Bereits bei der Entformung zeigte sich jedoch, dass die fehlende Fixierung auf der Innenseite ein Verschieben der abgelegten Rovings zur Folge hat und somit kein exaktes Wickelgelege hergestellt werden kann. In Abbildung 10 ist die Innen- und die Außenseite eines einschichtigen Glasfaserwickelgeleges mit einseitiger Sprühkleberfixierung dargestellt.

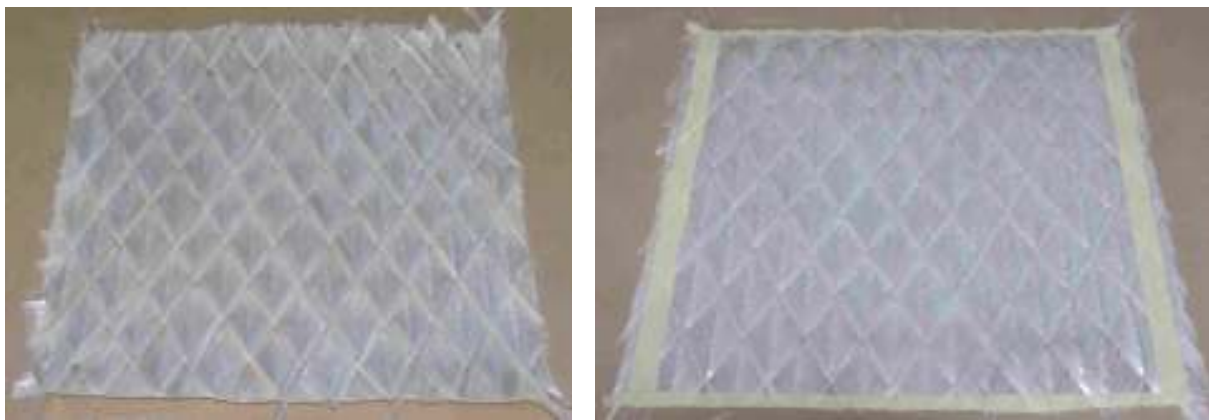


Abbildung 10: Einschichtiges GF-Wickelgelege mit einseitiger Sprühkleberfixierung

Dementsprechend galt es in einem weiteren Schritt einen Weg zu finden, um auch die Innenseite des Geleges mit Sprühkleber zu fixieren. Der direkte Auftrag des Klebers auf dem Kern vor der Rovingablage würde zwar auch dazu führen, dass die Fasern der Innenseite mit Kleber benetzt werden, allerdings würden bei der Entformung Fasern am Kern haften bleiben, was wiederum zur Zerstörung der Wickelgeleges führt.

Zur Lösung dieses Problems wurden darum Versuche mit einer Trennfolie durchgeführt. Diese Trennfolie wird vor dem Beginn der Faserablage auf dem Kern aufgebracht. Hierbei ist es möglich sie einfach am vorhandenen Nadelkranz der Ablage zu befestigen (durchstechen der Folie im Wendezonenbereich). Alternativ kann die Folie aber auch mit Klebeband in späteren Abfallbereichen befestigt werden.

Anschließend erfolgt der Auftrag einer Sprühkleberschicht auf die Trennfolie. Bei der darauf folgenden Rovingablage werden die abgelegten Fasern mit dem Kleber benetzt und somit fixiert. Abbildung 11 zeigt den mit einer Trennfolie ummantelten und eingesprühten Kern während der Rovingablage.

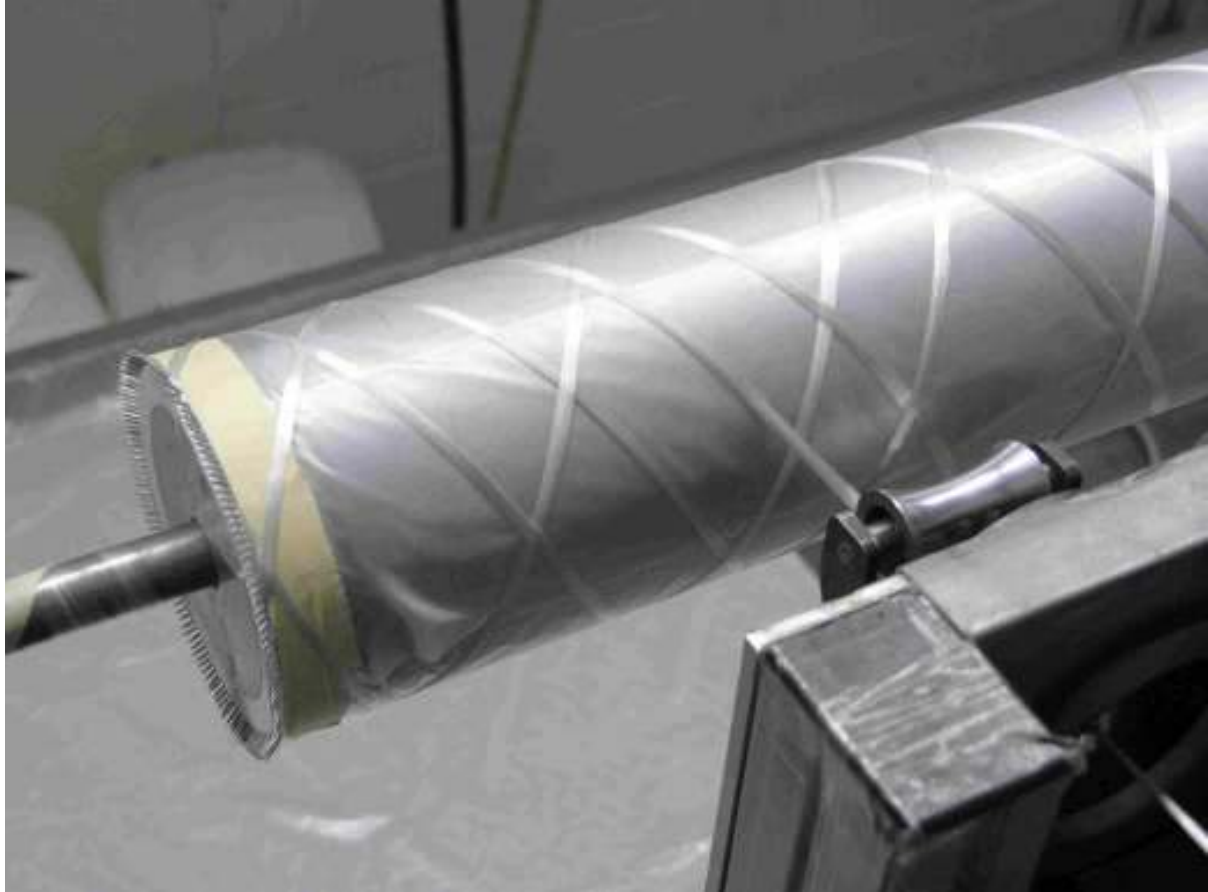


Abbildung 11: Kern mit aufgebrachtener Trennfolie bei der Rovingablage

Nachdem die Bedeckung des Kerns abgeschlossen ist, wird auf der Gelegeaußenseite eine weitere Sprühkleberschicht aufgetragen. Somit ist das einschichtige Wickelgelege von beiden Seiten fixiert und kann anschließend, ggf. unter Verwendung von Klebebandstreifen in den Schnittbereichen, entformt werden.

Soll ein mehrschichtiges Wickelgelege hergestellt werden, so ist für die Innen- und Außenseite analog zu verfahren. Zusätzlich ist nach jeder Bedeckung des Kerns eine Sprühkleberschicht aufzutragen. Somit können alle Einzellagen des Geleges sicher zueinander fixiert werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Variante ist, dass die Fixierung ganzflächig (somit gleichmäßig) und ohne ggf. störende Zusatzstoffe (Fäden) erfolgt. Dies wirkt sich auch positiv für das Einbringen der Entformungsschnitte aus. Hierbei kommt es bei der Sprühkleberfixierung nahezu zu keiner Verschiebung der Rovings im Schnittbereich mehr.

In einem anschließenden Schritt ist nach der Entformung lediglich noch die Trennfolie von der Innenseite des Geleges abzuziehen. Ggf. kann die Trennfolie aber auch bis zur weiteren Verarbeitung auf dem Gelege verbleiben, um ein Verkleben untereinander oder mit der Umgebung zu vermeiden. In Abbildung 12 ist das Entfernen der Trennfolie dargestellt.



Abbildung 12: Entformtes Gelege beim Entfernen der Trennfolie

Mit der beschriebenen Fixiervariante wurden verschiedene ein- und mehrschichtige Wickelgelege aus verschiedenen Fasern hergestellt. Als Beispiel hierfür ist in Abbildung 13 die Innen- und Außenseite eines zweischichtigen Glasfaserwickelgelege mit Sprühkleberfixierung dargestellt.



Abbildung 13: Zweiseichtiges GF-Wickelgelege mit Sprühkleberfixierung

Die betrachteten Varianten mit Verwendung von Sprühkleber führten von allen untersuchten Fixiertechnologien zu den besten Ergebnissen. Weitere wesentliche Vorteile der Sprühkleberfixierung sind:

- sehr preiswerte Technologie; nur geringer Materialaufwand (Sprühkleber, Trennfolie, ggf. Klebeband)
- prinzipiell keine teuren Zusatzgeräte/Zusatzeinrichtungen erforderlich
- prinzipiell keine aufwendige Programmierung erforderlich
- kann jedoch bei Bedarf auch automatisiert werden
- extrem schnelle Technologie; in sehr kurzer Zeit kann das komplette Gelege fixiert werden
- ganzflächige Fixiervariante

In einem nachfolgenden Kapitel werden die einzelnen Fixiertechnologien nochmals miteinander verglichen und bewertet. Darauf aufbauend wird dann die Kombination der geeigneten Einzeltechnologien (Ablagetechnologie und Fixiertechnologie) zur optimalen Gesamttechnologie herausgearbeitet.

4 Herstellung von Probekörpern

Um die Weiterverarbeitbarkeit der Faserhalbzeuge zu untersuchen, galt es in einem abschließenden Schritt Probekörper aus den gefertigten Wickelgelegen herzustellen. Für die Herstellung von Faserverbundbauteilen gibt es eine Vielzahl von Fertigungstechnologien. Diese unterscheiden sich beispielsweise aufgrund der zu verarbeitenden Ausgangsstoffe. Teilweise werden Vorimprägnierte Faserhalbzeuge verwendet. Verarbeitungstechnologien hierfür sind z.B. verschiedene Pressverfahren und das Autoklavverfahren (/7/, /8/, /9/). Diese Verfahren sind für die durchzuführenden Untersuchungen jedoch nicht relevant, da mit der Technologie zur Herstellung bauteilnaher Fasergelege trockene Faserhalbzeuge hergestellt werden. Derartige trockene Halbzeuge werden beispielsweise im Handlaminierverfahren, mit dem Vakuumpressverfahren, Formpressverfahren oder verschiedenen Injektionsverfahren zu Faserverbundkunststoffbauteilen verarbeitet. Hiervon ist das Handlaminieren das einfachste Verfahren, mit welchem sich aber auch nur Teile mit vergleichsweise geringen Faservolumengehalten herstellen lassen. Um höhere Faservolumengehalte und damit bessere mechanische Eigenschaften zu erzielen, muss das Laminat ausgepresst werden. Beim Vakuumpressen wird hierzu das zuvor handlamierte Bauteil mit der Form in einen Foliensack geschoben oder mit einer Folie abgedeckt. Durch anschließendes Absaugen der Luft presst sich die Folie auf das Laminat und drückt diese gegen die Form. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass nur eine Formhälfte benötigt wird. Die der Folie zugewandte Bauteilseite weist jedoch keine gute Oberflächenqualität auf und ggf. gibt es kleinere Wandstärkenschwankungen im Bauteil. Bei Formpressverfahren wird das Laminat in einer zwei- oder mehrteiligen Pressform ausgepresst. Somit lassen sich gute Oberflächen und hohe Faservolumengehalte realisieren. Mit steigender Anzahl der Formteile erhöhen sich allerdings die Werkzeugkosten. Für sehr komplizierte Teile mit hohen Anforderungen an die Oberfläche werden häufig Injektionsverfahren eingesetzt. Diese Verfahren bedingen allerdings gewisse Investitionskosten (z.B. RTM-Anlage) und in der Regel immer hohe Formkosten (/8/, /9/, /10/).

Zur Fertigung der Probekörper wurde sich im Rahmen des Projekts für ein Laminier-Pressverfahren entschieden. Hergestellt werden sollen einfache Platten. Ein Vorteil dieser Variante ist, dass kein kompliziertes Werkzeug benötigt wird. Für die Plattenherstellung können einfache Stahlbleche verwendet werden. Diese werden in eine Presse eingelegt und verkörpern somit die eigentliche Form. Ein weiterer Vorteil ist, dass aus den ebenen FVK-Platten einfache Proben für verschiedene Standardversuche (Biegeversuch, Zugversuch) entnommen werden können.

Für die Versuche wurde als Matrixwerkstoff das Epoxydharz L mit dem Härter SF gewählt (R&G Faserverbundkunststoff GmbH). Hierbei handelt es sich um ein schnelles Harzsystem mit einer Verarbeitungszeit von 15 Minuten. Da die herzustellenden Probeplatten nicht sehr groß sind, kann ein Harzsystem mit einer solchen geringen Topfzeit gewählt werden.

In Abbildung 14 ist dargestellt, wie ein auf der unteren Formplatte (Stahlblech) aufgelegtes Glasfaserwickelgelege im Handlaminierverfahren getränkt wird. Dabei ist darauf zu achten, dass möglichst keine Luft im Laminat eingeschlossen wird.



Abbildung 14: Laminieren einer Probeplatte

Nachdem das Laminat vollständig durchtränkt ist, wird die obere Formplatte aufgelegt und die Presse zugefahren. Das Laminat härtet dann anschließend unter Druck in der Presse aus. Falls Platten mit einer engen Dickentoleranz benötigt werden, so können ggf. Anschläge zum Einsatz kommen, die den Pressenweg begrenzen. Abbildung 15 zeigt die zugefahrene Presse. Zwischen den Pressplatten befinden sich die Formplatten und das Laminat.

Mit der beschriebenen Technologie wurden verschiedene Probeplatten hergestellt. Eine kleine Auswahl von Platten ist in Abbildung 16 dargestellt (ein- und zweischichtige Glasfaserwickelgelege).



Abbildung 15: Aushärten einer Probplatte unter der Presse



Abbildung 16: Hergestellte Probplatten

Als Variationen wurden Platten gefertigt, die mit unterschiedlichen Methoden fixiert wurden. Weiterhin wurden Platten aus ein- und zweischichtigen Gelegen hergestellt. Die Herstellung von Platten aus mehrschichtigen Gelegen (besonders bei dicken Rovings) ist in Verbindung mit dem Handlaminierverfahren problematisch, da die ordnungsgemäße Durchtränkung mit steigender Halbzeugdicke immer schwieriger wird. Dickere Lamine können allerdings problemlos aus beliebig vielen Lagen von ein- oder zweischichtigen Wickelgelegen aufgebaut werden. Mehrschichtige Wickelgelege sind hingegen speziell für die Verarbeitung mit Infiltrationsverfahren geeignet. Durch die Fixierung über die komplette Halbzeugdicke kann ein Verschieben der einzelnen Fasern während des Infiltrationsprozesses verhindert werden.

Die Verarbeitung der hergestellten Wickelgelege zu Probepplatten bereitete keinerlei Schwierigkeiten. Es konnte auch kein Einfluss der Fixiermethode auf die Verarbeitbarkeit festgestellt werden. Um vergleichbare mechanische Kennwerte zu ermitteln, wurden weiterhin Platten aus Wickelgelegen mit gleichen Ablagewinkeln, jedoch unterschiedlichen Fixierungen und Schichtanzahlen hergestellt.

Aus diesen Platten wurden anschließend mit einer Wasserstrahlschneidanlage Probekörper herausgeschnitten. Abbildung 17 zeigt einige Probekörper für die Bestimmung des Biege-E-Moduls. Zur Berechnung des Faservolumengehaltes wurde vor der Biegeprüfung Volumen und Masse der Proben bestimmt.



Abbildung 17: Probekörper für Biegeversuche

Abbildung 18 zeigt die zur Bestimmung von Biege-E-Moduli verwendete statische Prüfmaschine sowie eine Wickelgelegeprobe auf der Biegebank im Detail.



Abbildung 18: Statische Prüfmaschine; Biegebank mit Wickelgelegeprobe

In Abbildung 19 sind als Beispiel die aufgezeichneten Verläufe von verschiedenen Proben einer Probeplatte in einem Spannungs-Dehnungsdiagramm dargestellt.

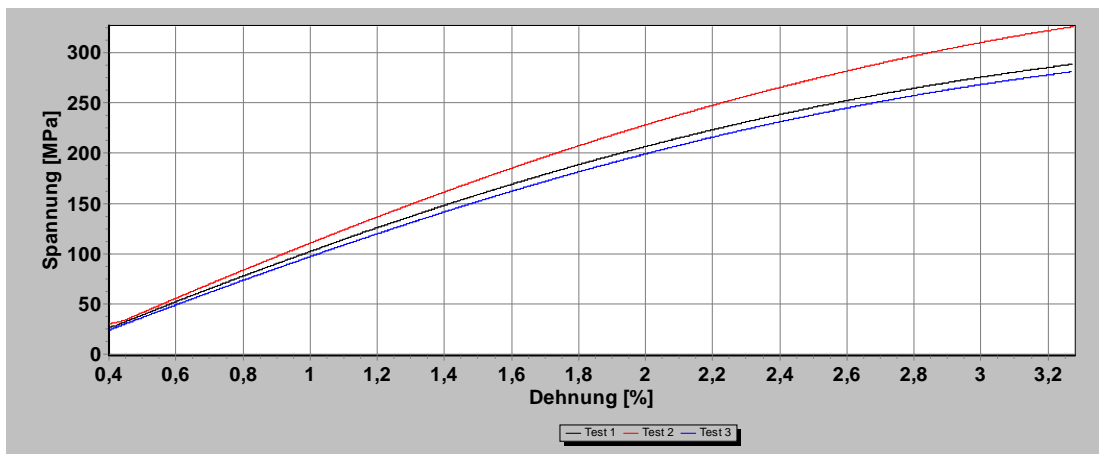


Abbildung 19: Spannungs- Dehnungsdiagramm

In Abhängigkeit des jeweiligen Faservolumengehaltes lagen die experimentell ermittelten Modulwerte der Proben im Bereich der theoretisch berechneten Werte. Somit konnte nachgewiesen werden, dass die hergestellten Wickelgelege wie normale Faserhalbzeuge weiterverarbeitet werden können.

5 Vergleich und Bewertung der Technologien

5.1 Vergleich und Bewertung der Ablagevarianten

Im Rahmen des Projektes wurden zwei verschiedene prinzipielle Ablagevarianten (Zylinderablage, Gabelablage) konzipiert, gebaut und erprobt (/2/, /3/). Die Funktion der Ablage besteht darin, den durch die Wickelmaschine abgelegten Faserstrang aufzunehmen, zu stützen und bis zur Fixierung in der gewünschten Position zu halten. Bei der Konzeption wurde neben den zu erfüllenden technologischen Grundanforderungen auch darauf geachtet, dass die Ablagevarianten möglichst einfach aufgebaut sind und preiswert hergestellt werden können. Ein weiteres Entwicklungsziel war eine gewisse Erweiterbarkeit, die es ermöglichen soll, mit einer modular aufgebauten Ablage Wickelgelege in verschiedenen Dimensionen fertigen zu können. Der Aufbau sowie die grundlegenden Eigenschaften der konzipierten Ablagevarianten werden in der nachfolgenden Tabelle 1 vergleichend beschrieben.

Tabelle 1: Vergleich der Ablagevarianten

	Zylinderablage	Gabelablage
Konstruktiver Aufbau	<ul style="list-style-type: none"> • Rohr(e) mit Deckelscheiben und ggf. Verbindungsringen • Wendezone: speziell angepasster Nadelkranz 	<ul style="list-style-type: none"> • zwei einfache Schwenkeinheiten sowie Gabelarme und Ablagerohre in verschiedenen Längen • universelle Wendezone nur sehr schwer realisierbar • ggf. starre Wendezonen
Kosten der Ablagevorrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • für kleinere Varianten sehr preisgünstig • progressive Kostenerhöhung für größeren Varianten • ggf. stehen benötigte Rohre nicht als Halbzeuge zur Verfügung → Sonderanfertigung 	<ul style="list-style-type: none"> • für größere Varianten relativ preisgünstig • lineare Kostenerhöhung für größeren Varianten • Größenerweiterung preisgünstig, da einfache Standardhalbzeuge verwendet werden können
Erweiterbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • einfach möglich durch zusätzliche Zylinder und ggf. zusätzliche Verbindungsringe • beschränkt auf Vorrichtungslänge • größere Gelegebreiten erfordern neue Vorrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> • einfach möglich durch zusätzliche Gabelarme und/oder Ablagerohre • Gelegebreite und Länge erweiterbar • andere Breiten erfordern andere oder einstellbare Wendezonen
Anpassung an verschiedene Gelegegrößen	<ul style="list-style-type: none"> • nur für Gelegelänge möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • für Gelegelänge und Gelegebreite möglich

Rovingablage	<ul style="list-style-type: none"> • optimale und sehr exakte Fadenablage möglich • nur geringer Abfall, da Wendezone sehr klein bemessen werden kann • besser für größere Wickelwinkel geeignet (wenig Abfall) 	<ul style="list-style-type: none"> • nur bei einer optimalen Wendezone ist exakte Faserablage möglich • besser für kleinere Wickelwinkel geeignet (geringere Gefahr des Verrutschens, jedoch somit mehr Abfall)
Fixierung durch Vernähen	<ul style="list-style-type: none"> • nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich (bestimmte Wickelwinkel, geringe Fadenspannung bei der Ablage, ggf. Nuten im Kern erforderlich) • sehr aufwendig • Einschätzung: ungeeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich (bestimmte Wickelwinkel, geringe Fadenspannung bei der Ablage, ggf. muss Gelege auf dem Kern abgestützt werden) • Einschätzung: ungeeignet
Fixierung durch Klebefäden	<ul style="list-style-type: none"> • sehr gut möglich • optimale und sehr exakte Fadenablage möglich • Einschätzung: geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • möglich (ggf. müssen Gelegesichten aneinander gepresst werden) • exakte Fadenablage nur mit optimaler Wendezone möglich • Einschätzung: bedingt geeignet
Fixierung durch Sprühkleber	<ul style="list-style-type: none"> • sehr gut möglich (ggf. Verwendung einer Trennfolie) • Einschätzung: sehr gut geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • eingeschränkt möglich (ggf. müssen Gelegesichten aneinander gepresst werden) • Einschätzung: bedingt geeignet

Aufgrund der bei den Versuchen gesammelten Erfahrungen, kann gesagt werden, dass die Zylinderablage der Gabelablage überlegen ist. Die Zylinderablage ist sehr einfach aufgebaut und speziell für kleine Ausführungsformen sehr preiswert. Sie erlaubt eine problemlose und zuverlässige Faserablage. Weiterhin bietet sie bei den geeigneten Fixierverfahren verschiedene Vorteile. Ein Nachteil dieser Variante ist darin zu sehen, dass eine Erweiterung auf größere Gelegebreiten eine neue Zylinderablage erfordert.

Die beliebige Erweiterbarkeit der Gabelablage war das wesentlichste Entwicklungsziel und ist zugleich ihr größter Vorteil. Allerdings konnte für das Hauptproblem (universell einsetzbare Wendezone) im Rahmen des Projektes keine optimale Lösung gefunden werden. Mit den gebauten und erprobten Varianten konnten bislang keine optimalen Ablageergebnisse erzielt werden. Zudem sind bei dieser Ablagevariante verschiedene Fixiervarianten nur mit zusätzlichem Aufwand realisierbar. Ihre Berechtigung hat sie allerdings für die Herstellung von Wickelgelegen in sehr großen Breiten, da sich die Kosten für eine Zylinderablage mit extrem

großem Durchmesser beträchtlich erhöhen. Die Gabelablage ist allerdings in solchen Fällen, nach dem derzeitigen Erkenntnisstand, mit einer starren Wendezone auszustatten, was allerdings der anvisierten universellen Einsetzbarkeit widerspricht.

5.2 Vergleich und Bewertung der Fixiervarianten

Nach der Ablage des Rovings auf dem Kern ist eine geeignete Fixierung durchzuführen, um somit zu gewährleisten, dass die Fasern für alle nachfolgenden technologischen Schritte in der gewünschten Position verbleiben. Nachfolgende technologische Schritte sind in diesem Fall die Entformung, der Transport und die Verarbeitung des Wickelgeleges zum FVK-Bauteil. Bei all diesen Schritten treten Kräfte auf, die bei einer unzureichenden Fixierung ein Verschieben der Fasern zur Folge haben. Die Art und Stärke der Fixierung ist somit von diesen Parametern abhängig und muss speziell hinsichtlich der abschließenden Verarbeitungstechnologie angepasst werden. So treten beispielsweise beim Handlaminieren wesentlich geringere Kräfte auf als bei Press- oder Infiltrationsverfahren.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene grundsätzliche Fixiervarianten erarbeitet und getestet. Die wesentlichsten Varianten sind in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgelistet und näher beschrieben.

Tabelle 2: Vergleich der prinzipiellen Fixiervarianten

	Trägerfäden mit Schmelzkleberummantelung	Robotergeführte Einseitnähtechnik	Sprühkleberfixierung
Fixiermaterial/Zusatzmaterial	<ul style="list-style-type: none"> • ummantelter Trägerfaden 	<ul style="list-style-type: none"> • Nähfaden 	<ul style="list-style-type: none"> • Sprühkleber
Art der Fixierung	<ul style="list-style-type: none"> • partiell/linienförmig 	<ul style="list-style-type: none"> • partiell/linienförmig 	<ul style="list-style-type: none"> • flächig • partiell flächig
erforderl. Zusatzeinrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • ggf. Düse zur Herstellung des ummantelten Trägerfadens • Einrichtung zum Aufschmelzen des Klebers (Strahler, Heißluft) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nähroboter • Nähkopf 	<ul style="list-style-type: none"> • prinzipiell nicht erforderlich • bei Bedarf aber automatisierbar
erforderl. Zusatzsoftware/Programmierung	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung der vorhandenen Wickelmaschinensoftware 	<ul style="list-style-type: none"> • Steuerungssoftware für Roboter und Nähkopf • aufwendige Pro- 	<ul style="list-style-type: none"> • prinzipiell nicht erforderlich • bei Bedarf aber automatisierbar

	• einfache Programmierung	grammierung/aufwendiges Teach-In	
Zeitaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • geringer Einrichtungsaufwand • Fixierung (Fadenablage und Aufschmelzen) relativ schnell 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Einrichtungsaufwand • Fixierung (Nahtbildung) sehr langsam 	<ul style="list-style-type: none"> • nahezu kein Einrichtungsaufwand • Fixierung (Auftrag) sehr schnell
Anwendung Zylinderablage	• sehr gut geeignet	• ungeeignet	• sehr gut geeignet
Anwendung Gabelablage	• geeignet	• ungeeignet	• geeignet

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, ist die Fixierung unter Verwendung robotergestützter Einseitnähtechnik mit erheblichen Problemen verbunden. Zudem erfordert sie eine teure Anlagentechnik und Software. Aus diesen Gründen muss sie für die Technologie zur Herstellung bauteilnaher Fasergelege als ungeeignet eingestuft werden.

Die Verwendung von Trägerfäden mit Schmelzkleberummantelung ist als Fixierungstechnologie gut geeignet, da die vorhandene Anlagentechnik (Wickelmaschine) zur Ablage verwendet werden kann. Bei einer serienmäßigen Herstellung der Trägerfäden ist diese Technologie zudem durchaus als kostengünstig zu bewerten. Speziell für partielle linienförmige Fixierungen, die für die Herstellung von Wickelgelegen häufig ausreichend sind, stellt diese Fixiervariante eine geeignete Alternativ dar /3/.

Die schnellste und preiswerteste Fixierung ist mit dem Einsatz von Sprühkleber möglich. Hierfür werden prinzipiell keine Zusatzeinrichtungen benötigt. Die Stärke der Fixierung kann über die Auftragsmenge variiert werden. Eine räumlich sehr begrenzt Fixierung kann allerdings nur sehr schwer realisiert werden.

5.3 Variantenkombinationen für die Gesamttechnologie

Als Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen konnten zwei geeignete Variantenkombinationen für die Gesamttechnologie erarbeitet werden.

- Gabelablage + Sprühkleberfixierung
- Gabelablage + Fixierung mittels schmelzkleberummantelter Trägerfäden

Variante eins ist die schnellste und kostengünstigste, jedoch primär für flächig fixierte Wickelgelege geeignet. Für partielle Fixierungen bietet die zweite etwas aufwendigere Variante gewisse Vorteile.

Die genannten Technologiekombinationen beinhalten nur die grundsätzlichen Varianten. In der erarbeiteten Technologie zur Herstellung bauteilnaher Fasergelege ist jedoch durch mögliche Erweiterungen und Kombinationen ein weitaus größeres Potential zu erkennen. Neben den genannten und näher beschriebenen grundsätzlichen Ablagevarianten zur Herstellung rechteckiger Wickelgelege mit verschiedenen Längen und Breitenverhältnissen sind auch noch Sonderformen denkbar. Derartige Spezialkerne können z.B. unterschiedliche Kombinationen von Zylindern und Kegeln sein (gestufte Kerne). Auf solchen Ablagen lassen sich Wickelgelege mit unterschiedlichen Halbzeugbreiten und erheblich reduziertem Verschnittanteil herstellen /2/. Derartige Kerne könnten zudem durch eine Anzahl von Standardelementen im Baukastenprinzip einfach und kostengünstig bereitgestellt werden. Speziell die Verwendung von angepassten Kernen bietet ein hohes Potential für die Technologie zur Herstellung bauteilnaher Fasergelege, welches im Rahmen des Projektes noch nicht eingehend untersucht wurde.

Die einfachste und preiswerteste Form der Ablage sind Rohre ohne zusätzliche Wendezonenelemente. Hierauf können ebenfalls Wickelgelege mit konstanten Ablagewinkeln hergestellt werden, was allerdings einen erhöhten Verschnittanteil (Abfall) bedingt. Mit dieser Ablagevariante können allerdings auch Wickelgelege mit sich gezielt verändernden Ablagewinkel gefertigt werden. Dies wurde bereits in /2/ ausführlich beschrieben und ist beispielhaft nochmals in der nachfolgenden Abbildung 20 dargestellt.



Abbildung 20: Wickelgelege mit kontinuierlich verändertem Faserwinkel

Zur Fixierung der Wickelgelege können die genannten Technologievarianten, wie beschrieben, angewendet werden. Alternativ sind aber auch Kombinationen denkbar. So können beispielsweise zusätzlich zu einer Sprühkleberfixierung die späteren Bereiche der Entformungsschnitte mit schmelzkleberummantelten Trägerfäden verstärkt werden.

Falls eine extrem feste Fixierung benötigt wird, ist es weiterhin möglich das Wickelgelege mit einer der genannten Vorzugsvarianten zu fixieren und es nach der Entformung zusätzlich zu vernähen. Dies kann dann, wie in /2/ beschrieben, auf einer einfachen Industrienähmaschine erfolgen. Das gezielte nachträgliche Vernähen des Wickelgeleges bietet die Möglichkeit, das Halbzeug bereichsweise mehr oder weniger zu fixieren. So können beispielsweise Bereiche von denen eine hohe Drapierfähigkeit gefordert wird weniger stark vernäht werden als Bereiche die einen ebenen Bauteilbereich abbilden. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber Standardgelegen, die über die komplette Halbzeugbreite gleichmäßig vernäht sind. Bei hierzu durchgeführten Versuchen wurden sehr gute Ergebnisse erzielt.

Anhand der Ausführungen wird deutlich, dass es für die Technologie zur Herstellung bauteilnaher Fasergelege trotz verschiedener Einschränkungen mehrere geeignete Untervarianten gibt. Welche Technologievariante bzw. Kombination von Einzeltechnologien letztendlich zum Einsatz kommt, ist von der Art des herzustellenden Faserhalbzeuges und von den gestellten Anforderungen abhängig.

6 Wirtschaftliche Betrachtungen

Durch die erarbeitete Technologie wird das KVB in der Lage versetzt Faserhalbzeuge, die vom üblichen Standardangebot abweichen, schnell und kostengünstig herzustellen. Speziell bei der Bereitstellung kleinerer Mengen ergeben sich mit der neuen Technologie wesentliche Vorteile. Faserhalbzeuge mit vom Normalfall abweichenden Winkeln können zwar ebenso mit Großserientechnologien hergestellt werden, jedoch ist dies an gewisse Mindestabnahmemengen gebunden. Diese sind meist in einer Größenordnung von ca. 100 m angesiedelt. Weiterhin kommt es durch den erforderlichen Umrüstaufwand an den Maschinen zu Mehrkosten. Wenn also wenige Quadratmeter oder auch Einzelstücke von Faserhalbzeugen mit spezieller Faserorientierung benötigt werden, bietet die neue Technologie erhebliche Kostenvorteile. Der Preis der Wickelgelege ist selbstverständlich von der jeweiligen Faserart, der Faserorientierung (Programmieraufwand; Abfall durch entstehenden Wendezonenbereich), der Fixiervariante (einfache Fixierung; ggf. zusätzliches Vernähen o.ä.) und ähnlichen Dingen abhängig. Dementsprechend ist er explizit für das jeweilige Halbzeug zu bestimmen. Um eine gewisse Orientierung zu ermöglichen sind nachfolgend zwei Beispiele angegeben.

- Glasfaserwickelgelege; Faserwinkel $\pm 30^\circ$; Flächengewicht ca. 1200 g/m^2 ; einschichtig; Sprühkleberfixierung: ca. 48 €/m^2
- Kohlefaserwickelgelege (HT-Faser); Faserwinkel $\pm 15^\circ$; Flächengewicht ca. 600 g/m^2 ; einschichtig; Sprühkleberfixierung: ca. 72 €/m^2

Weiterhin bietet die neue Technologie die Möglichkeit Faserhalbzeuge zu fertigen, die nicht mit Großserientechnologien hergestellt werden können (kontinuierlich veränderbare Faserwinkel; lokale Zusatzverstärkungen; gitterförmige Wickelgelege; Kombination verschiedener Faserwerkstoffe usw.). Die Kosten für derartige Halbzeuge können allerdings nur an konkreten Beispielen abgeschätzt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn des Projektes wurde der Stand der Technik für die einzelnen, zur Technologie gehörenden, Teilproblemstellungen recherchiert und analysiert. Darauf aufbauend wurden prinzipielle Konzepte für die neue Technologie erarbeitet sowie mögliche Vorteile und Grenzen dieses Verfahrens dargestellt. Anhand von einfachen Vorversuchen konnte die prinzipielle Eignung bereits zu einem frühen Zeitpunkt nachgewiesen werden. Aufbauend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurden zwei Ablagevarianten (Zylinderablage, Gabelablage) konzipiert, entsprechende Vorrichtungen gebaut und erprobt.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Gesamttechnologie ist die Fixierung der abgelegten Fasern. Aus diesem Grund wurden verschiedene Methoden zur Fixierung erarbeitet (Fixierung mit ummantelten Trägerfäden; robotergeführte Einseitnähtechnik; Sprühkleberfixierung; Zusatzfixierung durch nachträgliches Vernähen), sowie teilweise erforderliche Hilfseinrichtungen konzipiert und gebaut. Die erarbeiteten Teiltechnologien zur Fixierung wurden erprobt und in weiteren Schritten optimiert.

Mit den verschiedenen Technologien für die Ablage und die Fixierung wurden Wickelgelege hergestellt und anschließend zu FVK-Bauteilen weiterverarbeitet. Dabei zeigte sich, dass die hergestellten Halbzeuge gut für die weitere Verarbeitung geeignet sind und die erzielbaren mechanischen Eigenschaften den zu erwartenden theoretischen Werten entsprechen.

Auf der Basis der durchgeführten Technologie- und Bauteilversuche erfolgte daraufhin der Vergleich und die Bewertung der Einzeltechnologien für die verschiedenen Teilaufgaben (Ablage; Fixierung). Hierbei konnten zwei optimale Technologiekombinationen herausgearbeitet werden (Gabelablage + Sprühkleberfixierung; Gabelablage + Fixierung mittels schmelzkleberummantelter Trägerfäden). Die genannten Technologiekombinationen stellen jedoch nur die Grundvarianten dar. Durch verschiedene Variationsmöglichkeiten bietet die erarbeitete Technologie zur Herstellung bauteilnaher Fasergelege darüber hinaus ein weitaus höheres Potential (Spezialkerne für Gelege mit angepassten Breiten; Gelege mit kontinuierlich veränderbarem Faserwinkel; lokale Zusatzverstärkungen durch Faserablage; gitterförmige Wickelgelege; Kombination verschiedener Faserwerkstoffe; partiell verstärkte Fixierung durch nachträgliches Vernähen usw.). Die genannten Variationsmöglichkeiten und Zusatzoptionen konnten im Rahmen des Projektes nur in ihren Grundzügen betrachtet werden. Dementsprechend ist hier ein gewisses Potential für nachfolgende Untersuchungen vorhanden. Welche Technologiekombination letztendlich für die Halbzeugherstellung angewendet wer-

den sollte, kann nicht pauschal vorgegeben werden. Die Auswahl ist immer abhängig vom herzustellenden Faserhalbzeug und von den Anforderungen an selbiges.

Die wirtschaftliche Betrachtung zeigte, dass die erarbeitete Technologie besonders für die Bereitstellung spezieller Faserhalbzeuge in geringen Stückzahlen ein preiswertes Verfahren ist. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist, dass sehr verschiedene Faserhalbzeuge innerhalb kurzer Zeit bereitgestellt werden können.

Mit der Technologie zur Herstellung bauteilnaher Fasergelege konnte letztendlich die vorhandene Lücke zwischen den bekannten Grenztechnologien (Großserientechnologien zur Herstellung von Endlosware und Sondertechnologien zur Preformherstellung u.ä.) weiter geschlossen werden. Der Industrie wird damit ein Mittel zur Verfügung gestellt, welches es ermöglicht, preiswerte und belastungsgerechte Faserhalbzeuge speziell in kleinen Stückzahlen herzustellen.

8 Literaturverzeichnis

- /1/ Friedrich K.: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde; DGM Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 1997
- /2/ Puckl, M.: Sachbericht zum FuE-Vorhaben "Technologieentwicklung für bauteilnahe Fasergelege", Reg.-Nr.: 37/02, KVB Chemnitz, Januar 2003
- /3/ Puckl, M.: Sachbericht zum FuE-Vorhaben "Technologieentwicklung für bauteilnahe Fasergelege", Reg.-Nr.: 37/02, KVB Chemnitz, August 2004
- /4/ DE 19707125 C2, Verfahren zur Herstellung eines unidirektionalen Geleges aus parallel einlaufenden Hochleistungsfasern, Epo-Faser-Technik GmbH, Grundmann E. u.a., 22.02.1997
- /5/ DE 19733133 A1, Pulverförmige, vernetzbare Textilbinder-Zusammensetzung, Wacker-Chemie GmbH, Kohlhammer K. u.a., 31.07.1997
- /6/ Kresse, D.; Kühne, E.: Sachbericht zum FuE-Vorhaben "Robotergestützte Einseit-Nähetechnik", Reg.-Nr.: 91/01, KVB Chemnitz, Juni 2003
- /7/ Schulz J.; Puckl, M.: Sachbericht zum FuE-Vorhaben "Entwicklung einer Pressenautoklavtechnologie", Reg.-Nr.: 90/01, KVB Chemnitz
- /8/ Köhler, E.; Bergner, A.: Faserverbundkonstruktion. Umdruck zur Vorlesung Faserverbundkonstruktion, TU-Chemnitz, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik, 1997
- /9/ N.N.: Faserverbundwerkstoffe - Neue Technologien – Neue Werkstoffe Firmenkatalog, 2. aktualisierte Auflage 2000– Handbuch, R&G
- /10/ Neitzel M., Breuer U.: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde, Carl Hanser Verlag München Wien, 1997

9 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gabelablage mit Wendezonen (Zahnriemenvariante).....	4
Abbildung 2: Spannvorrichtung der Wendezone	5
Abbildung 3: Gabelablage zu Beginn der Bewicklung	6
Abbildung 4: Gabelablage nach einigen Umläufen	6
Abbildung 5: Bewickelte Gabelablage.....	7
Abbildung 6: Bewickelte Zylinderablage bei Nähversuchen.....	11
Abbildung 7: Nähversuche: Axial- und Umfangsnaht	12
Abbildung 8: Bewickelte Gabelablage bei Nähversuchen	13
Abbildung 9: Nähversuche Gabelablage; zwischen bzw. auf Kreuzungsbereichen	14
Abbildung 10: Einschichtiges GF-Wickelgelege mit einseitiger Sprühkleberfixierung.....	16
Abbildung 11: Kern mit aufgebracht Trennfolie bei der Rovingablage	17
Abbildung 12: Entformtes Gelege beim Entfernen der Trennfolie.....	18
Abbildung 13: Zweischichtiges GF-Wickelgelege mit Sprühkleberfixierung.....	18
Abbildung 14: Laminieren einer Probeplatte	21
Abbildung 15: Aushärten einer Probeplatte unter der Presse	22
Abbildung 16: Hergestellte Probeplatten	22
Abbildung 17: Probekörper für Biegeversuche.....	23
Abbildung 18: Statische Prüfmaschine; Biegebank mit Wickelgelegeprobe.....	24
Abbildung 19: Spannungs- Dehnungsdiagramm	24
Abbildung 20: Wickelgelege mit kontinuierlich verändertem Faserwinkel	29

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Ablagevarianten	25
Tabelle 2: Vergleich der prinzipiellen Fixiervarianten	27