

# **ATG** Automations-Technik Gröditz GmbH & Co. KG

Am Stahlwerk 5 • 01609 Gröditz

☎ (03 52 63) 666 0 • 📠 666 30

e-mail: [info@atgr.de](mailto:info@atgr.de) • Web: [www.atgr.de](http://www.atgr.de)

---

## Zusammenfassung des Projektes Fügen (Sticken) von FVK

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist, konsolidiertes FVK-Material zu vernähen. Zur Herstellung der erforderlichen Löcher für den Vernähprozess sollte für einen optimalen Kraftfluss das Einprägen während der Einzelteilfertigung erfolgen. Hierbei wird aus fertigungstechnischen Gründen das einseitige Einprägen empfohlen. Ein idealer Nähfaden, welcher hohe Zugfestigkeiten und Biegebelastungen bei gleichzeitig geringem E-Modul erträgt, konnte nicht gefunden werden. Dennoch zeigen die Ergebnisse mit Kevlar-/Aramid- und Vectranfäden, dass Verbindungsfestigkeiten von bis zu 30 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden können. Damit liegt die Festigkeit oberhalb des Niveaus von Klebstoffverbindungen.

Arbeitspakete der Teilprojekte gemäß Anlage 5 des Antrags

### **AP1 Herstellung von konsolidierten Mustern mit Sollbruchstellen, glatt und geformt**

Es wurde eine große Menge an ebenen und glatten konsolidierte Platten in unterschiedlicher Materialdicke mit entsprechenden vorgefertigten Nadeleinstichlöchern hergestellt. Daraus wurden die Muster ausgearbeitet. Anhand dieser wurden die umfangreichen Untersuchungen hinsichtlich der Verarbeitbarkeit, Stichkraft, Nadelspitzengeometrie, temperierter Nadel, zusätzliches Ultraschallschweißen und Fadenmaterial untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass bei geformten konsolidierten Mustern mit vorgefertigten Nadeleinstichstellen, bis auf die Zugänglichkeit der Nadel, keine Einflüsse zu erwarten sind. Daher wurden die Stichversuche mit geformten konsolidierten Mustern als nicht erforderlich beurteilt.

### **AP2 Anpassung einer bestehenden Stickmaschine: Dicke der konsolidierten Platten**

Für die Durchführung der ersten Nähversuche wurde eine klassische Haushaltsnämaschine verwendet, da diese von Hand bedienbar ist und für die ersten Erkenntnisse ausreichend war. Zum Vernähen der dickeren Muster und zur Erzielung einer größeren Fadenvorspannkraft wurde dann eine Industrienähmaschine verwendet. Die hier vorhandenen Halterungssysteme konnten sehr leicht an die Aufgaben und die unterschiedlichen Materialdicken angepasst werden. Auf ein Reinigungssystem für die Nadeln konnte verzichtet werden, da die Untersuchungen gezeigt haben, dass eine beheizte Nadel nicht zielführend ist. Es war geplant, eine bestehende Stickmaschine für das Vernähen einzusetzen. Der Vorteil dieser Maschine wäre gewesen, dass sie mit einem über Schrittmotore angetriebenen X-Y-Kreuztisch ausgerüstet ist. In Verbindung mit einer Kamerapositionierung könnte dann steuerungsmäßig gesichert werden, dass die Nadel die vorgeprägte Einstichstelle trifft. Bei den Planungen zum Projekt waren wir davon ausgegangen, dass die genaue Positionierung der Nadel zu den vorgeformten Einstichstellen die größte technische Herausforderung sein wird. Im Laufe der Versuche stellte sich aber heraus, dass die Genauigkeit von Industrienähmaschinen und dessen Möglichkeiten der Programmierung für das Treffen der Einstichstellen ausreichend ist. Stattdessen wurde festgestellt, dass die Stickmaschinen nicht den für die Tests erforderlichen Fadenzug haben und nicht in der Lage sind, die Fäden zu verarbeiten, die sich als geeignet für das Vernähen erwiesen haben. Eine Programmierung der Stichfolge ist auch mit den Steuerungen der Industrienähmaschinen möglich. Deshalb wurde von der Verwendung einer Stickmaschine Abstand genommen und stattdessen mit robusten Industrienähmaschinen gearbeitet.

### **AP3 Herstellung der gefügten Muster**

Das Fügen der Muster erfolgte problemlos mit zunächst einer klassischen Haushaltsnämaschine, sowie später mit einer Industrienähmaschine.

Dabei wurden unterschiedliche Materialstärken, Fadenmaterialie, Überlappungslängen, Sticharten und nachträgliches Überschweißen der Naht mittels Ultraschallschweißen durchgeführt. Zur Beurteilung der erzielten Verbindungsfestigkeiten wurden anschließend Zugversuche an den gefügten Proben durchgeführt (AP4).

#### **AP4 Tests und nachträgliche Anpassungen**

Die vorhandenen Halterungs- und Transportsysteme konnten die geforderten Anforderungen erfüllen und ermöglichten eine problemlose Verarbeitung des Materials. In diesem Arbeitspaket wurden Zugversuche mit nur vernähten, vernäht und verschweißten, sowie mit alternativgefügt Proben (Kleben, Induktionsschweißen, Ultraschallschweißen) durchgeführt und anhand derer die Verbindungsfestigkeit der vernähten Proben bewertet.

#### **AP5 Abschluss**

Im Arbeitspaket wurden die Erkenntnisse zusammengeführt und abschließend ausgewertet.

Ergebnisse des Projektes einschließlich eines Vergleichs der angestrebten und erreichten technischen Parameter

### **Anlass und Ausgangssituation:**

Prepregs sind textile Stoffe zusammengesetzt aus Hochleistungsgarnen wie z.B. Glas oder Karbon und thermoplastischen Garnen. Durch Verpressen unter Wirkung von Wärme und Druck lassen sich aus Prepregs faserverstärkte Bauteile herstellen.

Meist müssen diese Bauteile zu einem Endprodukt zusammengefügt werden. Eine Verbindung bzw. Konfektionierung von nicht konsolidierten Prepregs ist unproblematisch und wird mit üblichen Industrienähmaschinen durchgeführt. Die Konsolidierung (Zuführung von Wärme unter Druck) eines bereits konfektionierten Prepregs ist dagegen sehr aufwändig, da für solche Hohlstrukturen aufwendige und kostenintensive Kerne eingesetzt werden müssen, um an jeder Stelle der Form einen gleichmäßigen Druck zu erzeugen. Daher wird diese Variante bisher nicht im Serienprozess eingesetzt /1,3,5/.

Eine Verbindung von konsolidierten Bauteilen bzw. Geometrien aus FVK stellt eine Herausforderung dar. Diese werden miteinander vernietet, verklebt oder als dünnere Schichten mit Ultraschall verschweißt. Solche Verbindungen erreichen aber nicht die gleichen Festigkeiten wie das eigentliche Grundmaterial /1,4/. Da jedoch die Zerlegung einer Gesamtgeometrie in mehrere Einzelteile die Fertigung deutlich kostengünstiger macht und teilweise erst ermöglicht, müssen Bauteilschwächungen aufgrund der Fügeverbindungen bisher akzeptiert werden /2,3/.

### **Zielstellung:**

Projektziel war es einen Demonstrator einer Stickmaschine bzw. Nähmaschine zu entwickeln, der in der Lage ist, konsolidierte Flächen zu verbinden. Die Verbindung soll ohne Zerstörung der Verstärkungsfasern erzeugt werden, um die Zugfestigkeit der Materialien zu erhalten. Gleichzeitig soll die Verbindung dauerhaft sein. Dies sollte durch die Erprobung der Nähtechnologie als Fügeverfahren an konsolidierten faserverstärkten Kunststoffen und ein Vergleich der damit erreichten Verbindungsfestigkeit mit anderen Fügeverfahren erfolgen. Dabei sollte besonders darauf eingegangen werden, welchen Einfluss das Verbindungsloch, der Verbindungsfaden, die Vernähart und ein nachträgliches Verschweißen auf die Verbindungsfestigkeit haben.

### **Aufzählung der bisherigen wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse:**

- Die Untersuchungen von Proben mit gestanzten, einzeln eingeschmolzenen, gebohrten und eingepägten Lochmustern haben gezeigt, dass zur Erzielung einer hohen Verbindungsqualität die Löcher in den konsolidierten Bauteilen durch Einprägen während der Einzelteilerfertigung erzeugt werden sollten. Dadurch werden die Fasern nicht durchtrennt sondern nur leicht verdrängt und der Kraftfluss innerhalb der Bauteile nicht unterbrochen, sowie die Kraft besser in die Verbindungszone eingeleitet.
- Es ist möglich, konsolidiertes FVK Material mit voreingepägten Sollbruchstellen (Nadeleinstichlöchern) herzustellen. Mit Hilfe einer Heißpresse und entsprechenden Werkzeugen wurden ebene und glatte GFK-Bauteile mit vorgeprägten Lochmustern gefertigt. Für die Einbringung der Sollbruchstellen sorgte dabei eine definierte Anordnung von PIN's auf den Werkzeugen, sodass die Verstärkungsfasern durch die PIN's verdrängt wurden und sich dadurch um die Löcher herum orientierten. Nach dem Aufschmelzen des Matrixmaterials und dem anschließenden Erstarren wurde das

Lochmuster so in das Bauteil eingeprägt, ohne die Verstärkungsfasern zu beschädigen. Auf Grund der Herstellungsverfahren von FVK-Bauteilen, sowohl mit thermoplastischem als auch duroplastischem Kunststoff ist durch den zwischenzeitlich flüssigen Zustand des Matrixmaterials ein durchgehendes Loch nicht "einprägbar". Dies liegt daran, dass auf der einen Werkzeughälfte PIN's vorhanden sind, die dann in Bohrungen auf der anderen Werkstückseite eintauchen müssten. Damit ein leichtes Öffnen und Schließen der Werkzeuge sichergestellt ist, wäre ein gewisses Spiel zwischen PIN und Bohrung zwingend erforderlich. Dadurch würde das Matrixmaterial im flüssigen Zustand und unter Druck in die Bohrungen eindringen. Dies hätte ein "Verkleben" der Werkzeuge zur Folge und zusätzlich würde die Oberflächenqualität der FVK-Bauteile durch einen vorhandenen Grat deutlich abgemindert.

Denkbar wäre auch ein zweiseitiges Einprägen der Lochmuster. Dies ist aufgrund von Toleranzanforderungen und einer allgemein höheren Werkzeugkosten infolge zwei aufwendiger Werkzeughälften nicht zu empfehlen. Ein möglicher Lösungsweg ist hier das Einprägen von Sollbruchstellen durch PIN's auf einer Werkzeughälfte, die nach dem Verpressen einen sehr geringen Restquerschnitt von 0,1 bis 0,5 mm belassen. Diese Restquerschnitte lassen sich relativ leicht durchstechen und die Gefahr von Delaminationen ist nahezu ausgeschlossen.

- Eine leichte Kegelform der Pins ermöglicht ein leichteres Entformen der FVK-Bauteile.
- Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Industrienähmaschinen und entsprechenden Nadelstärken Materialstücken von bis zu 2mm durchstochen werden können. Daher ist die Toleranzbreite für die Restquerschnittsdicke relativ groß und auch die Stichkraft spielt eine etwas untergeordnete Rolle, da die Nadelstärke sich nach der verwendeten Fadendicke richtet und diese wiederum mit der Materialstärke korreliert. So wird bei höheren geforderten Verbindungsfestigkeiten (dickeres Grundmaterial) auch ein dickerer Nähfaden eingesetzt werden und dementsprechend auch eine stärkere Nadel. Daher ist die Erwärmung der Nadel zur Reduzierung der Stichkraft beim Einstechen nicht erforderlich. Hinzukommt, dass ein gewünschtes „Durchschmelzen“ des Grundmaterials langsamere Vorschubzeiten erfordert, da es sonst auf Grund der geringen zeitlichen Wärmeeinwirkung trotzdem zum Durchstechen kommt. Demzufolge ist eine überlagerte Erwärmung der Nadel beim Einstechen nicht zielführend.
- Der Restquerschnitt sollte so klein wie möglich sein, um möglichst viele Verstärkungsfasern intakt und um das Loch umgelenkt zu erhalten und dadurch das Tragverhalten der Verbindung zu verbessern.
- Der Restquerschnitt sollte ebenfalls so klein wie möglich sein, um ungewollte Delaminationen des FVK-Materials, aufgrund eines trichterförmigen Ausbrechens des Restquerschnittes bei dessen Durchstechen, zu vermeiden. Hinzukommt, dass die erforderliche Kraft zum Durchstechen des Restquerschnittes mit dünner werdendem Restquerschnitt ebenfalls abnimmt. Dadurch ist von einer erhöhten Standzeit der Nadeln mit sinkender Restquerschnittsdicke auszugehen.
- Für das Durchstechen des Restquerschnittes können klassische Kegelspitznadeln, Stanznadeln, oder auch Nadeln mit einem Schneidanteil, wie Ledernadeln, verwendet werden. Letztere haben den Vorteil, dass die erforderliche Stichkraft durch den Schneidanteil reduziert ist.

- Beim Fügen zweier Bauteile sollten die Restquerschnitte beider Bauteile so angeordnet sein, dass diese mittig in der Verbindung liegen, damit der Faden unter Belastung durch keine scharfe Kante am äußeren Lochrand geschädigt wird.
- Der Lochdurchmesser der Sollbruchstellen sollte, in Abhängigkeit vom einzusetzenden Faden, der zugehörigen Nadeldicke entsprechen. Ist der Lochdurchmesser zu klein, kommt es zum Verklemmen der Nadel im Bauteil, wodurch der Prozess gestört wird bzw. zum Durchstechen des Grundmaterials, was eine Schädigung der umliegenden Verstärkungsfasern zur Folge hat und zu ungewollten Delaminationen führt. Ist das Loch wiederum zu groß, wird das Grundmaterial zu stark geschwächt und es kommt im Belastungsfall zum Versagen des Bauteils, ähnlich einer perforierten Stelle, (beispielsweise bei Briefmarken)
- Die Vernähart des Doppelsteppstiches bestehend aus Unter- und Oberfaden ist prinzipiell für das Vernähen von konsolidiertem Material geeignet. Vorteilhaft ist die gleichmäßige Verteilung der Fäden auf der Ober- und Unterseite der Fügestelle, sowie die Fadenverbindung untereinander durch Schlaufen. Mit jedem Einstich wird der Oberfaden jedoch sehr weit durch das Loch gezogen und dadurch stark beansprucht, wodurch eine Schwächung des Materials eintreten kann. Der Unterfaden hingegen wird kaum durch das Loch gezogen und ist daher weniger beansprucht.
- Die Wirklängen sollten möglichst in Belastungsrichtung liegen, um die Biegebeanspruchung bzw. Querkraft für die Fäden so gering wie möglich zu halten.
- Der verwendete Nähfaden muss relativ unempfindlich gegen Biegung oder Querkräfte sein. So sind beispielsweise Glasfasern oder Kohlefasern ungeeignet, da diese beim Nähprozess brechen und dadurch die Verbindung unzureichend hergestellt werden kann. In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass Nähfäden aus Kevlar/Aramid und Vectran gute Festigkeitseigenschaften, bei gleichzeitig guter Biegeverträglichkeit zeigen und somit empfohlen werden können.
- Trotz des relativ großen E-Moduls der Kevlar-/Aramid- und Vectranfasern sind die Dehnungen der Verbindung unter Belastung gegenüber Kleb- oder Schweißverbindungen relativ groß. Dies liegt daran, dass beim Vernähprozess keine „unendlich“ große Fadenvorspannung erzielt werden kann und somit die Fäden ein geringes Spiel haben. Ein zweiter Grund besteht darin, dass dickere Nähfäden als Zwirnfäden vorhanden sind. Dies sind mehrere kleinere Fäden zu einem größeren verzwirnt. Dadurch kommt es zu einer Verringerung des Gesamtelastizitätsmoduls gegenüber den Einzelfäden. Durch möglichst geringe Stichlängen und somit kurze „Wirklängen“ der Nähfäden, kann Verbindungssteifigkeit erhöht werden.
- In den Untersuchungen konnten Verbindungsfestigkeiten, bezogen auf die Überlappungsfläche der Verbindungstelle, von gut 30 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Dies ist gegenüber einer typischen Klebverbindungsfestigkeit von 10 N/mm<sup>2</sup> ein sehr guter Wert. Hinzukommt, dass keine speziellen Anforderungen an die Oberfläche der Bauteile gestellt werden müssen und auch schwer klebbare Matrixwerkstoffe, wie Teflon, ffügbar sind. Zu beachten ist jedoch, dass die eingepprägten Einstichlöcher eine Querschnittsverringerung darstellen, sodass mit geringerer Grundmaterialdicke es zum Grundmaterialversagen kommt. Daraus lässt sich ableiten, dass bei konstanter Überlappungsfläche mit geringerer Materialstärken eine Klebverbindung effektiver ist,

jedoch mit steigender Materialdicke der Vernähprozess bessere Verbindungsfestigkeiten erzielt. Dies liegt daran, dass bei einer konstanten Überlappungs-/Fügefläche die Festigkeit einer Klebstoffverbindung unabhängig von der Materialstärke ist. Beim Vernähen jedoch ist neben der Fadenfestigkeit auch der tragende Materialquerschnitt entscheidend für die Verbindungsfestigkeit. Der tragende Materialquerschnitt wird mit steigender Materialdicke erhöht.

- Gegenüber einem Schweiß- oder Klebverfahren ist es auch möglich die Bauteile auf Stoß mit einander zu Vernähen. Dadurch kann eine Materialaufdickung und somit eine Gewichtserhöhung in der Fügezone verhindert werden. Die erzielten Verbindungsfestigkeiten lagen hier bei  $10 \text{ N/mm}^2$ , bezogen auf die Flächen zwischen den Lochreihen. Die größeren „Wirklängen“ der Nähfäden bei dieser Bauteilanordnung sorgen jedoch für größere Dehnungen der Verbindung unter Belastung.
- Die Steigerung der Verbindungsfestigkeit durch eine Hybridverbindung, welche durch ein zusätzliches Ultraschallschweißen erzeugt werden sollte, konnte nicht erreicht werden. Folgende Ursachen wurden diesbezüglich ermittelt. Zunächst wird durch den Schweißprozess, in Folge der Anpresskraft zwischen Sonotrode und Amboss, die Naht in der Verbindungszone beim Verschweißen zusammengedrückt. Dadurch kommt es zu Verformungen im Querschnittsprofil, die zum Verlust der Fadenvorspannkraft führen. Dies hat zur Folge, dass unter Belastung nur die Schweißverbindung trägt und nach deren Versagen der Faden zunächst noch Belastung aufnimmt, bis es zum vollständigen Versagen der Verbindung kommt. Die Resttragkraft der Verbindung durch den Faden ist jedoch deutlich geringer als bei gleichen Verbindungen ohne zusätzliches Verschweißen. Daraus lässt sich als zweites Ableiten, dass der Ultraschallschweißprozess zusätzlich zu einer Schädigung der Fäden führt und gleichzeitig auch der tragfähige Querschnitt der Bauteile durch das Zusammendrücken reduziert wird. Demzufolge ist zusätzliches Verschweißen nicht förderlich. Um dennoch eine geforderte Dichtigkeit der Verbindung gegenüber Medien erfüllen zu können, ist der Einsatz eines elastischen Abdichtklebstoffs denkbar.
- Die eingepprägten Lochmuster werden durch Pingeometrien an den Kunststoffpresswerkzeugen hergestellt. Zur Fertigung dieser Presswerkzeuge werden entsprechende CAD-Daten erstellt, welche wiederum für den Vernähprozess direkt genutzt werden können. Heutige Industrienähmaschinen mit X-Y-Tisch sind bereits mit CNC-Steuerungen erhältlich, über die das Lochmuster aus den CAD-Daten eingelesen und verarbeitet werden kann. Wie sich in dem Projekt gezeigt hatte, ist die Fixierung und Positionierung der FVK-Bauteile mit den vorhandenen Spanntischen unproblematisch. Dadurch ist eine Lochmustererkennung mittels Kamerasteuerung nicht mehr zwingend erforderlich.
- Die gewünschte Erreichung der Grundwerkstofffestigkeit im Verbindungsbereich ohne partielle Materialaufdickung bei der Hybridverbindung konnte nicht erreicht werden. Dies liegt an den bereits weiter oben beschriebenen negativen Einflüssen durch das nachträgliche Verschweißen.

Im Laufe des Projektes hatte es sich gezeigt, dass die eigentlichen Herausforderungen nicht in der Steuerung und Anlagentechnik für den Vernähprozess lagen, sondern in der Einbringung der Lochmuster und dem Fadenmaterial. Bezüglich des Lochmusters wurde eine technische Lösung entwickelt. Ein idealer Nähfaden, welcher hohe Zugfestigkeiten und Biegebelastungen bei gleichzeitig geringem E-Modul erträgt, konnte nicht gefunden werden. Dennoch zeigen die Ergebnisse mit Kevlar-/Aramid- und Vectranfäden, dass Verbindungsfestigkeiten von bis zu 30 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden können.

Der ursprünglich geplante Erwerb einer Stickmaschine, die für die Versuche umgebaut werden sollte, war nicht erforderlich. Einerseits hat sich die Stickmaschine als nicht geeignet erwiesen und andererseits bestand die Möglichkeit die Industrienähmaschinen für die Test entgeltlich zu nutzen.

#### **Literatur:**

- /1/ Hufenbach, W.: Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien, SDV Dresden 2007
- /2/ Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe; Hanser, Wien 2006
- /3/ Michaeli, W.: Einführung von Kunststoffbearbeitung; Hanser, Wien 2006
- /4/ Winkler, A.: Heißpressen von Hybridgarn-Textil-Thermoplast- (HGTT) Halbzeugen für dreidimensionale Leichtbau-Tragwerkskomponenten, TU Dresden 2008
- /5/ Bonnet, M.: Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung; Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2009