

# Verbindungstechnik von carbonfaserverstärkten Kunststoff-Halbzeugen in dynamischen Robotersystemen

Prof. Dr. P. Steibler, J. Riegger & M. Frey

Institut für Werkstoffsystemtechnik der HTWG Konstanz, Bereich Kunststofftechnik

(Veröffentlicht: 11/2015)

## Abstract

In folgender Veröffentlichung wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie der zukunftssträchtige Werkstoff „Carbonfaserverstärkter Kunststoff“ (CFK) einfach und kostengünstig in hochdynamischen Robotersystemen zum Einsatz kommen kann. Hierbei ist es entscheidend, dass die aufwendige und kostenintensive Fertigung von einzelnen CFK-Bauteilen umgangen wird, ohne die herausragenden Werkstoffeigenschaften einzuschränken. Im Forschungsprojekt „Stabkinematik-Leichtbau-Roboter“ (SLR) werden dazu verschiedene Möglichkeiten erarbeitet, stattdessen auf standardmäßig angebotene Halbzeuge aus CFK zurückzugreifen. Ein zentrales Thema stellt dabei die Verbindungstechnik dar, die beim Fügen von CFK Halbzeugen (hier: Platten) erforderlich wird. Eine Vielfalt von Tests verschiedener Verbindungen zeigt, dass sich eine Fingerverzinkung für den betrachteten Anwendungsfall am besten eignet. Daher werden zwei Varianten mit Fingerverzinkung genau analysiert, zum einen, eine mit Verschraubungen und, zum anderen, als Klebung. Die Ergebnisse der beiden Varianten zeigen ähnliche Festigkeitskennwerte, wobei die Klebung etwas höhere Werte aufweist. Demgegenüber ist die Schraubverbindung komfortabler zu montieren und bietet die Möglichkeit der Demontage.

## 1. Einleitung

Im Zeitalter der Automatisierungstechnik steigt die Nachfrage an kollaborierenden Robotern stetig [3, 4]. In diesem Zusammenhang ist der Leichtbau von Robotersystemen ein besonders wichtiger Punkt, um bewegte Massen und somit Antriebs- und Bremsleistung zu minimieren. Dadurch kann neben günstigeren Antrieben auch ein schnelleres Stoppen bei einer eventuell entstehenden Kollision mit Menschen ermöglicht werden. Wobei letzteres für die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter bei Verzicht auf eine Sicherheitsabkapselung des Robotersystems eine große Bedeutung hat.

## 2. Ansatz der Forschungsarbeit

Eine entscheidende Stellgröße um das Gewicht des Roboters gering zu halten, ist das verwendete Material. Da ein Roboter ein hochdynamisches System darstellt, wird Material benötigt, das bei geringem Gewicht eine hohe Steifigkeit und Festigkeit aufweist. Daher ist der Gedanke einen carbonfaserverstärkten Kunststoff zu verwenden naheliegend. Dieser Werkstoff bringt herausragende Eigenschaften mit sich, wie geringe Dichte, gute Härte, gute Dauerfestigkeit, hohe Festigkeit, hohe Steifigkeit, geringer Reibungskoeffizient, Korrosionsbeständigkeit, Dimensionsstabilität und hohe Kriechbeständigkeit.[2]

Grundsätzlich gibt es drei Vorgehensweisen, ein Robotersystem mit carbonfaserverstärkten Kunststoffen aufzubauen, wobei dies durch verschiedene Fertigungsverfahren umgesetzt werden

kann: Erstens einzelne Roboterbauteile in eine, für die Kräfteverteilung und Beweglichkeit des Roboters, idealen Form herzustellen und anschließend zu einem Roboter zusammenzubauen. (Auf weitere Fertigungsverfahren und Vorgehensweisen wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da sie für das hier behandelte Thema nicht direkt relevant sind.) Zweitens ein hybrider Aufbau, d.h. der Roboter wird in der Grundstruktur aus Metall aufgebaut und mit carbonfaserverstärkten Gewebematten umwickelt und anschließend mit Harz infiltriert. Drittens, die Verwendung von standardmäßig angebotenen CFK-Halbzeugen. Hierbei handelt es sich vor allem um Carbonfaserrohre und -platten, die von mehreren Herstellern in einer Vielzahl von Varianten angeboten werden [10, 11]. Die einzelnen Baugruppen des Roboters werden mit den Carbonfaser-Halbzeugen aufgebaut, wobei durch die Anordnung eine hochsteife Struktur erzielt wird. Die Herausforderung besteht darin, die einzelnen CFK-Platten miteinander zu verbinden, da die Verbindungen zwischen den beiden Carbonfaserbauteilen so ausgelegt werden muss, dass sie nicht zur Schwachstelle in der Roboterstruktur wird. Mit ebendiesem Thema der „Verbindungstechnik von carbonfaserverstärkten-Kunststoff-Halbzeugen in dynamischen Systemen“ hat sich das Institut für Werkstoffsystemtechnik der HTWG Konstanz in den letzten Jahren auseinandergesetzt.

### 3. Anforderungen an die Verbindungstechnik

Um eine steife Struktur bei einer Bauweise mit ebenen Platten zu erhalten, ist es erforderlich diese in einem Winkel von  $90^\circ$  miteinander zu verbinden. Mit einer solchen Anordnung ist es möglich, alle relevanten Bauteilgeometrien zu generieren. Daher werden die erarbeiteten Varianten jeweils in Proben mit zwei Platten senkrecht zueinander stehend ausgeführt.

Aus technischer Sicht wird ein geringes Gewicht bei gleichzeitig hoher Festigkeit und Steifigkeit angestrebt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist entscheidend, dass die Verbindung eine möglichst geringe Komplexität aufweist, um eine einfache Fertigung sicherzustellen und somit eine kostengünstige Herstellung zu erreichen. Daher wird die Prämisse gesetzt, dass nur Varianten in Frage kommen, welche ohne kostenintensive mechanische Fertigungsverfahren herzustellen sind. Die geeignetsten Fertigungsverfahren, um carbonfaserverstärkte Kunststoffplatten auf eine definierte Geometrie zu bekommen, stellt das Wasserstrahlschneiden sowie das  $\text{CO}_2$  Strahlschneiden dar.[1] Um den weiteren Fertigungsaufwand gering zu halten, werden für Verbindungen mit weiteren Verbindungselementen (wie bspw. Gewinde) Normteile eingesetzt. Das hat den Vorteil, dass die carbonfaserverstärkten Kunststoffplatten in einem, maximal aber in zwei Fertigungsschritten, vollständig produziert werden können.

### 4. Erarbeitete Verbindungsvarianten

Auf Basis dieser Voraussetzungen werden verschiedene Verbindungsvarianten ausgearbeitet. Die geeignetsten Varianten werden aus einem Vergleichsmodell aufgebaut und einer statischen Bauteilprüfung unterzogen. (Vergleichsmodell: Zuerst werden anstelle von teuren carbonfaserverstärkten Kunststoffplatten Platten aus PMMA verwendet.) Dieses Vorgehen ist für eine erste vergleichende Aussagen über die Qualität der Verbindungstechniken ausreichend. Die Bauteilprüfung wird dabei mit einer Belastungsrichtung durchgeführt (siehe Abbildung 1). Im Ergebnis stellen sich zwei Lösungsvarianten mit ähnlichem Grundaufbau, als besonders geeignet dar. D.h. sie haben beide sowohl einen einfachen Grundaufbau als auch gute Festigkeitswerte und jeweils handelt es sich um eine Fingerverzinkung.

Im Maschinenbau werden die vorgestellten Varianten der Verbindungstechnik kaum verwendet. Bei der Verwendung ebener Bauteile ist sie allerdings eine logische Konsequenz.[5, 6] Diese Verbindungsart bringt montagetechnisch den Vorteil, dass die CFK-Platten, beim Einhalten entsprechender Toleranzen, optimal zueinander positioniert werden. Dazu wird

eine Verbindung wird mithilfe eines Klebstoffs zu einer unlöslichen Verbindung, welche somit form- und stoffschlüssig ist, gefügt.[8, 9] Die zweite Lösung wird durch Schrauben fixiert und stellt somit eine form- und kraftschlüssige Verbindung dar, die auch demontiert werden kann.[7]

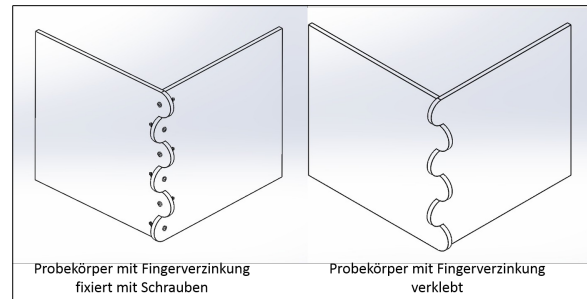


Abbildung 1: Probekörper

### 5. Ergebnisse der aufgezeigten Lösungen

Bei der Bauteilprüfung wird ein Belastungsfall betrachtet. Die Platten werden durch eine sich bewegende, nach vorne abgerundete Stahlplatte mittig nach Innen belastet. Seitlich liegt die Verbindung in Form eines Linienkontakts gleichmäßig auf. Abbildung 2 zeigt schematisch den Prüfaufbau und -ablauf.

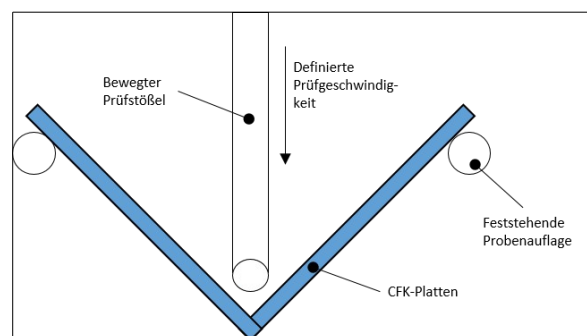


Abbildung 2: Prüfaufbau

Pro Versuchsreihen werden fünf Proben vorbereitet und getestet. Die PMMA-Platten besitzen eine Dicke von 4 mm, die Verbindungen jeweils sechs Verzinkungen. Die Prüfgeschwindigkeit für die Versuchsreihen beträgt  $v = 0,612 \text{ mm/min}$ . Dabei wird durch die Klebverbindung ein Messergebnis der maximalen Kraftaufwendung von  $F = (106,83 \pm 29,8) \text{ N}$ ,  $k = 2$  und bei der Schraubverbindung  $F = (100,46 \pm 20,7) \text{ N}$ ,  $k = 2$  erzielt. Die Bruchstelle liegt jeweils direkt an der Verbindung. Die Klebverbindung weist im Test ein minimal besseres Ergebnis auf. Dies könnte durch die Schwächung des Materials an den Durchgangsbohrungen und den Aussparungen für die Mutteraufnahme erklärt werden. Hinzukommt, dass die Klebverbindung im Gegensatz zu Schraubverbindung deutlich kostengünstiger (aufgrund geringerer Bauteilanzahl sowie weniger

Fertigungsschritte) ist. Die Schraubenvariante ermöglicht allerdings eine Demontage.

## 6. Anwendung im Roboter-System

Wird nun die gesamte Baugruppe aus ebenen CFK-Platten generiert, ist entscheidend, dass die Struktur so aufgebaut wird, dass die Kräfte gleichmäßig verteilt und idealerweise in die angrenzenden Lagerstellen abgeleitet werden, ohne dabei Kippmomente auf die Gesamtstruktur zu erzeugen. Weiter ist darauf zu achten, dass die Struktur symmetrisch aufgebaut wird und Belastungen aus allen Raumrichtungen aufnehmen kann. Um die Platten miteinander zu verbinden, wird in dem aufgezeigten Fall die Variante mit Klebstoff verwendet. Abbildung 3 zeigt den Arm (einzelne Baugruppe eines Stabkinematik-Leichtbauroboters).

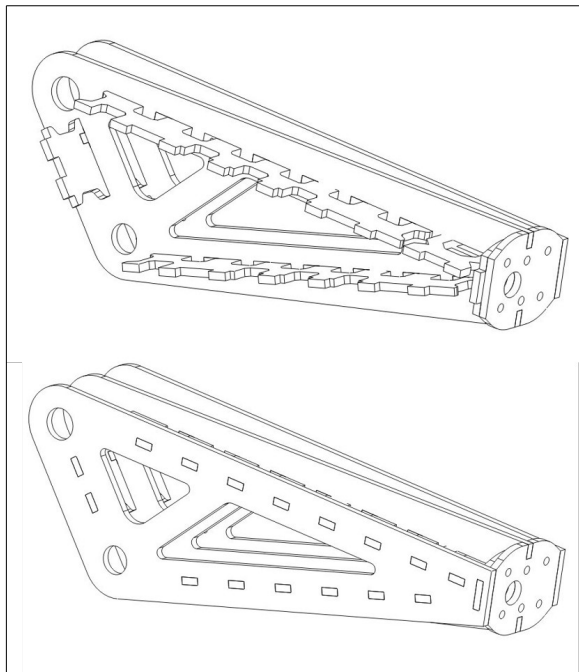


Abbildung 3: Anwendungsbeispiel Roboterarm mit Fingerverzinkung geklebt

## 7. Schlussfolgerung

Vorliegende Veröffentlichung zeigt, wie der zukunftssträchtige Werkstoff CFK effizient und einfach in dynamischen Systemen zum Einsatz kommen kann. Hierbei ist darauf zu verweisen, dass Dauertests im Gesamtsystem noch ausstehen. Jedoch sind erste Ergebnisse ausgearbeitet worden und stellen somit eine Grundlage sowie Denkanstöße für weiterführende Forschungsarbeiten in diesem Bereich dar.

Im Resümee kann festgehalten werden, dass CFK-Bauteile nicht zwingend mit einer individuellen und somit kostenintensiven Fertigung Hand in Hand gehen, sondern dass weitere Möglichkeiten bestehen, vielfach angebotene und kostengünstige CFK-

Normalien so einzusetzen, dass sie für komplexe Anwendungsfälle eine attraktive Lösung darstellen.

## Literaturverzeichnis

- [1] E. Uhlmann, F. Sammler, S. Richarz, F. Heitmüller und M. Bilz (2014). *Machining of Carbon Fibre Reinforced Plastics. New Production Technologies in Aerospace Industry - 5th Machining Innovations Conference (MIC 2014)*, S. 19-24.
- [2] Cong, W.K., Pei, Z.J., Deines, T.W., Srivastava, A., Riley, L., Treadwell, C. (2012). *Rotary ultrasonic machining of CFRP composites: A study on power consumption*. *Ultrasonics*, S. 1030-1037.
- [3] Matthias, B., Ding, I. H., (2013). *Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage*. ABB AG Forschungszentrum.
- [4] Huelke, M. (2015). *Arbeitsplätze der Industrie 4.0 – Kollaborierende Roboter*. DGUV Forum 3/2015, S. 10-13.
- [5] Hansgert, S. (1977). *"Eckverbindungen bei der Möbelherstellung."* *European Journal of Wood and Wood Products* 35.12, S. 449-455.
- [6] Menges, A. (2014). *Integration aus Form, Material und Struktur: Computerbasierte Morphogenese in der Architektur*. In *Über Form und Struktur-Geometrie in Gestaltungsprozessen* (S. 33-50). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- [7] Haberhauer, H., Bodenstein, F. (2001). *Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Anwendung*. 11. Auflage. Berlin; Heidelberg: Springer Fachmedien, S. 67.
- [8] Rasche, M. (2012): *Handbuch Klebtechnik*. München: Hanser Verlag, S.5-6.
- [9] Ehrenstein, G. W. (2004). *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. München: Carl-Hanser-Verlag, S. 427.
- [10] Haufler Composites GmbH & Co. KG. Online aufgerufen [09.11.2015] unter: <http://cfk-platten.de/Carbonplatten.html>.
- [11] Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co. KG. Online aufgerufen [09.11.2015] unter: <http://www.carbon-vertrieb.com/shop/index.php?cPath=113>.