Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–03–66

Entwicklung eines roboterbasierten anpassbaren Formwerkzeugs für Faserkunststoffverbunde

Formwerkzeuge für Faserkunststoffverbunde

M. Mages, T. Mayer

ZUSAMMENFASSUNG Dieser Beitrag stellt die Entwicklung eines anpassbaren Formwerkzeugs vor. Es soll automatisiert an beliebige Geometrien angepasst werden können, um Faserverbundbauteile kostengünstig herzustellen. Im Rahmen des Vorhabens wird das Formwerkzeug durch einen Roboter angepasst. Dieser verstellt eine Matrix aus 80 Pins in der Höhe. Zur Validierung des Formwerkzeugs wird sowohl die Genauigkeit der Pinverstellung als auch der Werkzeugform untersucht.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Faserverbundwerkstoffe, Werkzeug-/Formenbau

Reconfigurable molds for fiber-reinforced-plastics – Development of a robot-based adaptable molding tool for fiber-reinforced plastics

ABSTRACT This paper presents the development of an adaptable mold. The mold should be automatically adaptable to any geometry in order to produce fiber composite components cost-effectively. In the project, the mold is adapted by a robot. The robot adjusts the height of a matrix of 80 pins. To validate the mold, both the accuracy of the pin adjustment and the mold shape are investigated.

1 Einleitung

Zur Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen (FVK) werden Formwerkzeuge benötigt. Diese werden beispielsweise aus speziellem Invarstahl oder aus Aluminium gefräst. Mit einem Formwerkzeug lässt sich jeweils nur eine Bauteilgeometrie herstellen. Dadurch steigen vor allem im Prototypenbau und bei Kleinserien die Bauteilkosten enorm, da sich die gesamten Kosten des Formwerkzeugs auf eine geringe Bauteilanzahl verteilen. [1, 2]

Zur Reduktion der Werkzeugkosten gibt es schon Ansätze zur flexiblen Anpassungsfähigkeit von Formwerkzeugen an doppelt gekrümmte Geometrien. Ein vielversprechender Ansatz ist es, die Form aus einer Matrix mit höhenverstellbarer Pins aufzubauen. Über die Pin-Matrix wird eine Interpolationsschicht aus Folie gelegt. Diese Interpolationsschicht sorgt für eine geschlossene Oberfläche, auf der Bauteile hergestellt werden können (**Bild 1** a).

Bisherige Versuche zur Entwicklung eines solchen Formwerkzeugs beruhen auf einem integrierten Antriebskonzept für jeden Pin [3, 4]. *Simon et al.* [3] etwa nutzen eine Platte, welche die Pins zunächst in die höchste Position verfährt und anschließend absenkt. Die Pins werden während des Absenkens einzeln in der Sollposition arretiert. *Wimmer et al.* [5] verstellen die Pins über eine Gewindespindel.

Um die Werkzeugkomplexität zu reduzieren, wurde in den nachfolgenden Schritten ein Formwerkzeug entwickelt, welches über einen Industrieroboter eingestellt wird (Bild 1 b). Da der Industrieroboter aufgrund seiner Flexibilität auch für andere Einsatzzwecke genutzt werden kann, können Produktionsreserven effizient genutzt werden. So werden etwa Industrieroboter in der FVK-Herstellung für die Faserdirektablage eingesetzt [6]. Entsprechend könnte ein Roboter zunächst die Form einstellen und im Anschluss die Fasern automatisiert ablegen.

Dieser Beitrag untersucht die Einstellgenauigkeit der Pins und der endgültigen Form. Die Genauigkeitsmessungen wurden auch mit einem Roboter durchgeführt. *Abele et al.* [7] haben mit einem Laserliniensensor bereits robotergestützt Tiefziehformen vermessen. Die Genauigkeit beträgt dabei bis zu 0,14 mm.

2 Untersuchung der Systemgenauigkeit

Damit die Geometrie des Formwerkzeugs eine ausreichend hohe Genauigkeit aufweist, war es wichtig, die Pins mit einer Genauigkeit von 0,3 mm einzustellen. Dies entspricht der Allgemeintoleranz für Geradheit und Ebenheit nach DIN ISO 27682 Klasse H, für Bauteile mit Nennmaß zwischen 300 mm und 1000 mm [8]. Die Einstellung der Pins erfolgte, indem diese durch den Roboter ein- und ausgeschraubt wurden. Für die Formgenauigkeit ist die relative Höhe der Pins zueinander entscheidend. Als Nullniveau wird deshalb immer die Isthöhe des ersten Pins in der Matrix definiert.

Die Einstellgenauigkeit soll im Folgenden genauer untersucht und schrittweise optimiert werden. Dazu soll sowohl durch Verbesserung des Schraubwerkzeugs als auch der Software bestmögliche Genauigkeit erreicht werden. Für die Pinverstellung und die Genauigkeitsbewertung des Einstellprozesses wurde der Roboter „Horst 900“ der Firma fruitcore Robotics verwendet.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

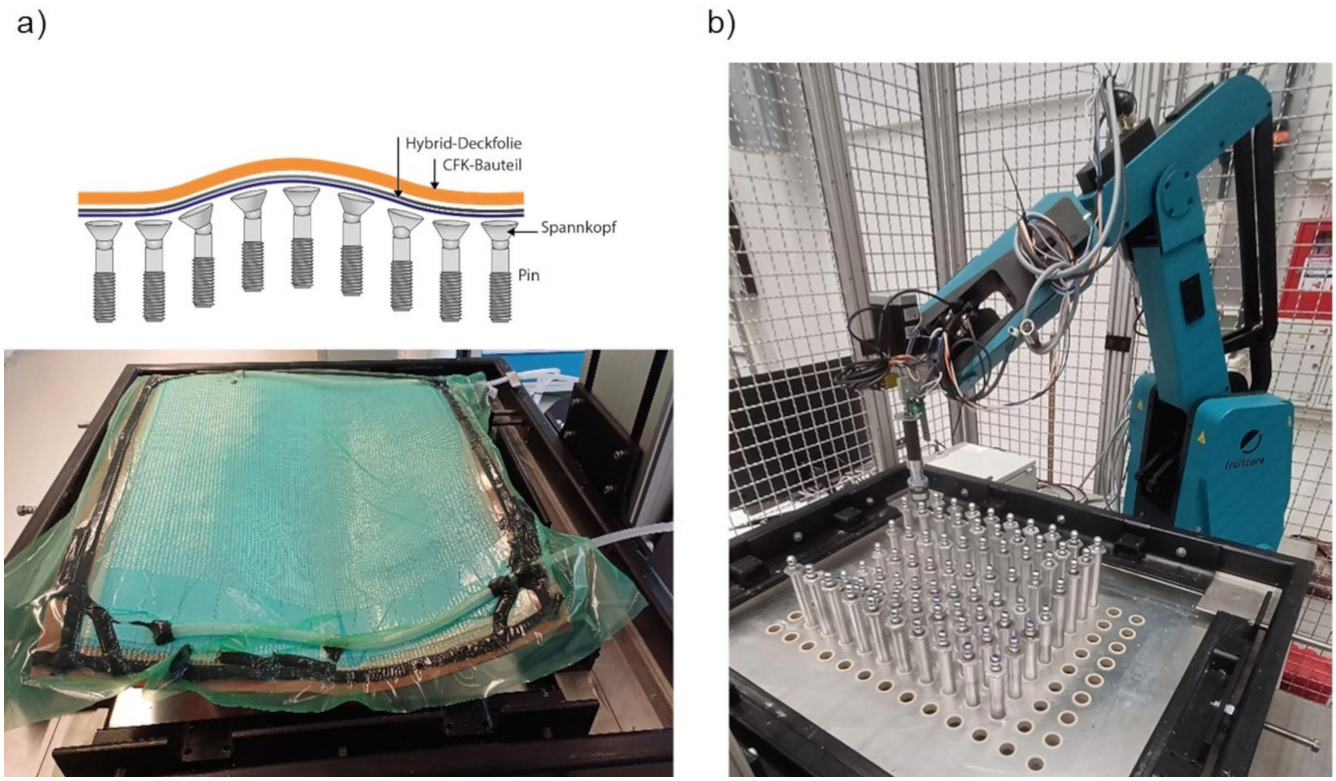

Bild 1. a) Funktionsprinzip des anpassbaren Formwerkzeugs; b) robotergestützte Anpassung des Formwerkzeugs. *Foto: Fraunhofer IPA*

Die Wiederholgenauigkeit dieses Robotersystems wird vom Hersteller mit 0,05 mm angegeben. Die Genauigkeitsmessungen erfolgten mit dem Lasertriangulationssensor „Panasonic HG-C1050-P". Dieser weist eine Genauigkeit von 0,03 mm auf und wird am Roboter geführt. Der Sensor verfügt über einen I/O-Ausgang. Der I/O-Ausgang befindet sich auf einem niedrigen Potenzial-Level (Low). Wenn der Sensorabstand zum Messobjekt zwischen 35 mm und 50 mm liegt, wechselt das Potenzial-Level auf ein hohes Niveau (High).

2.1 Untersuchung der Messgenauigkeit

Zunächst wurde die Messgenauigkeit des Systems aus Roboter und Lasertriangulationssensor untersucht, da im Anschluss die Genauigkeit des Einstellprozesses damit bewertet werden soll. Dazu wurde als Referenz eine 10 mm hohe und 45 mm breite Stufe vermessen. Die Stufe bestand aus einer Parallelunterlage mit einer Genauigkeit von 0,01 mm. Die Vermessung erfolgte entlang einer Linie in X-Richtung des Roboterkoordinatensystems. Entlang der Linie wurde mit einer Auflösung von 0,5 mm gemessen. Zur Vermessung eines Punktes fuhr der Roboter 0,5 mm in X-Richtung und um die Strecke H_s nach oben. So sollte sichergestellt werden, dass der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt bei Beginn der Messbewegung mehr als 50 mm beträgt und sich der Sensorausgang auf Low befindet. Wenn sich das Messobjekt dennoch näher am Sensor befand, fuhr der Roboter mit 50 % der Maximalgeschwindigkeit nach oben bis das Sensorsignal auf Low wechselte. Indem der Roboter bei jeder Messung in Bewegungsrichtung überschwingt, konnte sichergestellt werden, dass der Überschwinger immer in der gleichen Richtung ist.

Zur Messung der Oberflächenhöhe fuhr der Roboter auf das Objekt zu, bis der Ausgang des Lasersensors von Low auf High wechselte. Dann wurde die Roboterbewegung abgebrochen und die Z-Position des Roboters abgespeichert. Im Folgenden wird vor allem der Einfluss der Messgeschwindigkeit und der Strecke H_s auf den Messfehler untersucht. **Bild 2** zeigt ein so gemessenes Höhenprofil der Stufe. Die Stufe steigt bei 25 mm um 10 mm an und fällt bei 70 mm wieder auf null ab. Der im Diagramm gezeigte verfrühte Abfall des gemessenen Höhenprofils ist auf die Auflösung in X-Richtung zurückzuführen. Der letzte Messpunkt mit einem Wert von etwa 10 mm liegt bei 69,5 mm.

In **Bild 3** sind die maximalen Abweichungen vom Sollwert aufgetragen. Bei deren Ermittlung wurde der Messwert direkt vor und nach dem Stufenan- und -abstieg nicht mitberücksichtigt, weil an den Kanten die genaue Geometrie, aufgrund von Fasen, nicht bekannt war.

Die Messungen ergaben, dass der Messfehler mit der Messgeschwindigkeit ansteigt. Die Differenz zwischen maximalen und minimalem Fehler betrug bei einer Messgeschwindigkeit von 0,5 mm/s lediglich 0,4 mm, und stieg mit der Messgeschwindigkeit auf 2,5 mm an. Als Grund für die stärkeren Schwankungen der Messwerte werden zum einen stärkere Vibrationen im System und zum anderen stärkere Schwankungen im Anhalteweg des Roboters vermutet. Der Wert H_s hatte bei den Messgeschwindigkeiten 0,5 mm/s und 1 mm/s keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit.

Für alle weiteren Messungen mit dem Lasersensor wurde eine Messgeschwindigkeit von 0,5 mm/s verwendet, da hier der Messfehler am geringsten war. Es sind Messungen mit einer Genauigkeit kleiner 0,2 mm möglich. Dies deckt sich mit der von *Abele et al.* [7] genannten Messgenauigkeit von 0,14 mm.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

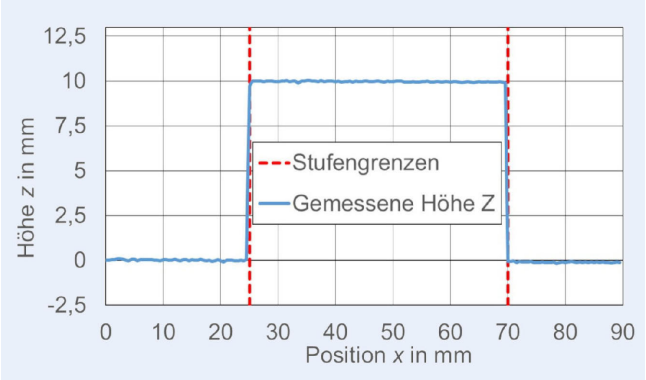

Bild 2. Vermessung einer 10-mm-Stufe: Messgeschwindigkeit 0,5 mm/s. *Grafik: Fraunhofer IPA*

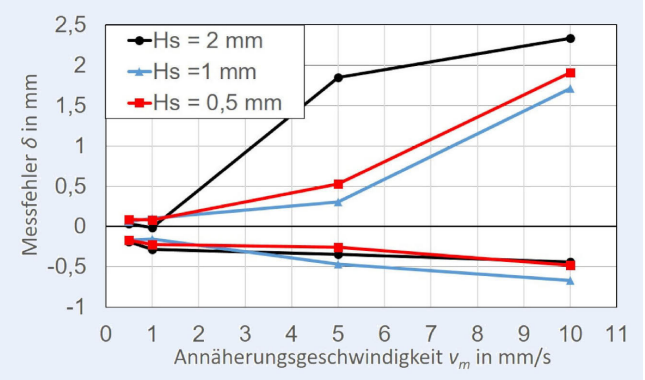

Bild 3. Genauigkeit des robotergestützten Lasermesssystems. *Grafik: Fraunhofer IPA*

2.2 Untersuchung der Einstellgenauigkeit der Pins

Zur Einstellung der Pins wurde zunächst deren Ist-Höhe detektiert und die Differenz zur Sollhöhe berechnet. Anschließend konnten die Pins um diese verschraubt werden. Dies wurde in einem einzigen Arbeitsschritt durch das Schraubwerkzeug durchgeführt.

Damit der Roboter die Pins verschrauben konnte, befand sich an der Oberseite der Pins ein Sechskant. Über dem Sechskant befand sich ein Kugelzapfen zur Anbindung der späteren Interpolationsschicht. Der Schrauber des Roboters war so gestaltet, dass er unabhängig vom Verdrehwinkel auf die Pins passte. Der Schrauber saß dabei auf der Oberfläche des Kugelzapfens auf, jedoch nicht auf der des Sechskants (**Bild 4**).

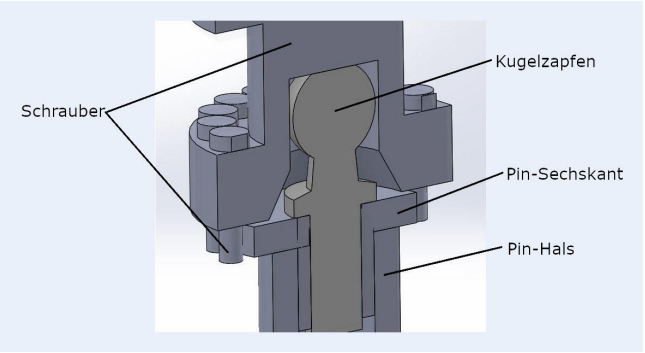

Bild 4. Pin mit aufgesetztem Schraubwerkzeug. *Grafik: Fraunhofer IPA*

Beim Schraubvorgang fuhr der Roboter über den Pin, bis der Schrauber auf dem Kugelzapfen aufsaß. Hierdurch federte der Aufsatz ein, bis ein Taster betätigt wurde und die Bewegung beendete. Der Roboter ermittelte aus der internen *Z*-Position die Isthöhe des Pins und verglich diese mit der Sollhöhe. Aus der Differenz wurde die Anzahl der Schritte für den Schrittmotor ermittelt. Anschließend starteten Roboter und Schrittmotor synchron die Schraubbewegung. Beim Tastmechanismus 1 befand sich der Taster längs an der Welle des Schraubers (**Bild 5** a).

In einer zweiten Version wurden die Taster nur noch als Sicherheitsmechanismus eingesetzt. Die Detektion des Pins erfolgte, indem der Einfederweg des Schraubers durch den Lasersensor gemessen wurde (Bild 5 b). Die Genauigkeiten beider Versionen werden im Folgenden untersucht.

Um die Einstellgenauigkeit zu ermitteln, wurde ein Array aus 7 x 9 Pins zunächst auf Ausgangshöhe geschraubt. Für die Ausgangshöhen der Matrix wurde eine zufällige Verteilung zwischen −40 mm und +40 mm gebildet. Diese Verteilung wurde bei jedem Versuchsdurchlauf verwendet. Anschließend wurden alle Pins auf die Höhe des ersten Pins geschraubt. Dann wurden alle Höhen mit dem Lasertriangulationssensor gemessen und die Differenz zum ersten Pin ermittelt. Der Messpunkt bei der Vermessung befand sich auf dem Kugelzapfen des Pins und stimmte mit der Tastposition überein. **Bild 6** zeigt die Pinhöhe relativ zur Höhe des ersten verschraubten Pins. Verwendet wurde der Tastmechanismus 1.

Die größte Abweichung zur Sollposition betrug 1,0 mm, die Standardabweichung der Pinhöhen lag bei 0,369 mm. Bei den Pins 9, 27, 36 und 57 zeigten sich lokale Extremwerte. Diese Pins lagen am weitesten in Y-Plus Richtung. Der Roboter startete bei der kleinsten Y-, und X-Koordinate und fuhr meanderförmig die Pins ab. Als Grund für das Muster in der Genauigkeitsverteilung wird vermutet, dass der Pin, je weiter er von der Ausgangsposition entfernt ist, umso ungenauer getroffen wird. Dadurch kommt es zu einem leichten Verbiegen der Welle zwischen Motor und Schrauberaufsatz. Aufgrund der Position der Taster reagierten diese sehr sensibel auf das Verbiegen und lösten früher beziehungsweise später aus. Um die Vermutung zu überprüfen und die Genauigkeit zu verbessern, wurden verschiedene Strategien verfolgt. Der Versuch mit dem Tastmechanismus 1 diente als Referenz zur Bewertung der Strategien.

Strategie 1: Das Programm zum Verschrauben der Pins wird zweimal durchgeführt. Dadurch reduzieren sich die Höhenabweichungen im zweiten Durchgang auf weniger als 1 mm. Fehler bei der Verschraubung, die mit der Verstellstrecke ansteigen, können so verringert werden.

Strategie 2: Nach dem ersten Durchgang werden die Pinhöhen mit dem Lasertriangulationssensor gemessen und die Differenz zum ersten Pin berechnet. In einem zweiten Durchgang werden die Pins dann um diese gemessenen Differenzen verschraubt. Da der Tastmechanismus beim zweiten Durchgang keinen Einfluss mehr hat, wird vor allem die Genauigkeit des Schraubwerkzeugs ohne Einfluss der Taster untersucht.

Strategie 3: Die Pins werden in einem Durchgang mit der oben beschriebenen Version 2 des Schraubwerkzeugs (Bild 5 b) verschraubt. Durch die neue Messposition soll der Einfluss der Verbiegung der Welle reduziert werden.

In **Bild 7** sind die Fehler unter Verwendung der verschiedenen Einstellstrategien dargestellt. Gezeigt werden die Standard-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

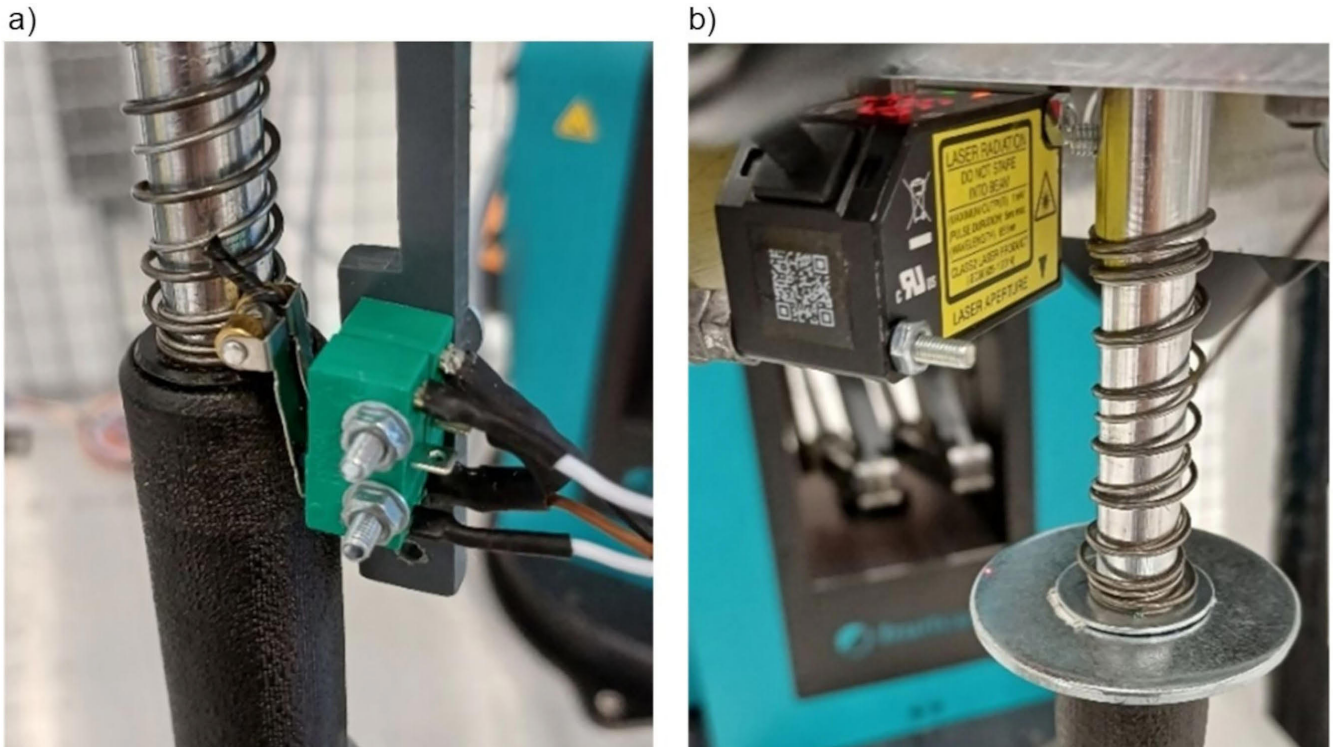

Bild 5. a) Pin-Erkennung über Taster an der Welle des Schraubers; b) durch Messung des Federwegs mittels Lasersensor. *Foto: Fraunhofer IPA*

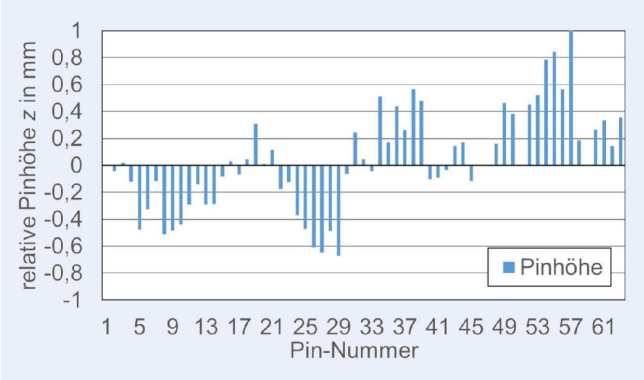

Bild 6. Höhendifferenzen der mit dem Taster 1 eingestellten Pins. *Grafik: Fraunhofer IPA*

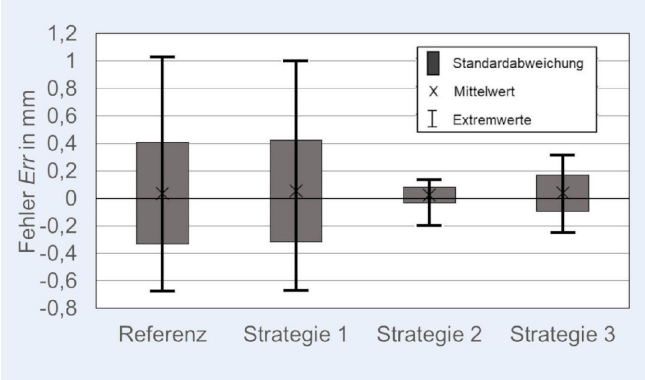

Bild 7. Einstellgenauigkeit verschiedener Verschraubungsstrategien. *Grafik: Fraunhofer IPA*

abweichung, die maximale Abweichung nach oben und unten sowie der Mittelwert der Pinhöhen.

Am geringsten waren die Abweichungen, wenn die Pinhöhen anhand der Lasermessung korrigiert wurden (Strategie 2). Die Abweichungen waren kleiner als 0,2 mm und lagen im Bereich der Messgenauigkeit des Lasermesssytems. Daraus kann geschlossen werden, dass durch die Verschraubung mittels Schrittmotor nur ein geringer Fehler entsteht. Der Fehler entsteht hauptsächlich beim Ertasten der Pins. Gestützt wird dieser Schluss durch die fehlende Genauigkeitsverbesserung nach einem zusätzlichen Iterationsschritt (Strategie 1). Durch die hohe Genauigkeit des Verschraubprozesses, hat auch die Distanz, um welche die Pins verstellt wurden, keinen Einfluss. Die Geometrie des Lasersensors erlaubt eine Vermessung der Pins nur, wenn die Höhendifferenz zu den benachbarten Pins kleiner als 50 mm ist. Andernfalls ist eine Kollision des Roboters mit den Pins möglich.

Damit die Pins auch ohne zusätzlichen Arbeitsschritt bei Differenzhöhen größer als 50 mm verschraubt werden konnten, wurde die zweite Version des Schraubwerkzeugs (Bild 5 b) entwickelt. Mit dieser wurde eine bessere Genauigkeit erzielt, da die Sensibilität auf die Verbiegung der Welle und auf einen unrunden Lauf deutlich geringer ausfallen. Die maximalen Abweichungen zur Sollposition lagen unter 0,3 mm. Diese Genauigkeit wird als ausreichend erachtet.

3 Formgenauigkeit nach Aufbringen der Interpolationsschicht

Damit auf dem Formwerkzeug Faserverbundbauteile hergestellt werden können, wurde über die Pins eine Interpolationsschicht gespannt. Dadurch entstand zum einen eine geschlossene Oberfläche und zum anderen wurde aus den diskreten Pinhöhen eine stetige Oberfläche. Die Interpolationsschicht bestand aus

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

einer Silikonfolie. Diese verfügte über die nötige Dehnbarkeit um auch doppelt gekrümmte Oberflächen abbilden zu können. An der Unterseite befanden sich Kugelpfannen, die zu den Kugelzapfen der Pins passen. Die Kugelpfannen konnten nach dem Einstellen der Pins auf diese aufgeklipst werden. In **Bild 8** ist ein Querschnitt, der vermessenen Oberfläche des Formwerkzeugs abgebildet.

Als Beispielgeometrie wurde eine sphärische Oberfläche mit einem Radius von 600 mm vorgegeben. Die Oberfläche wurde mit dem vorgestellten Messsystem mit einer Auflösung von 3,93 mm in X-Richtung vermessen. Bei einem Abstand der Pins von 39,3 mm entspricht dies 10 Messpunkten von Pin zu Pin. Zusätzlich wurde die Oberflächengeometrie in einer FEM (Finite-Elemente-Methode)-Rechnung mit dem Simulationstool „Ansys“ berechnet. Dieser Querschnitt ist auch in Bild 8 dargestellt. Da die Geometrie des Formwerkzeugs im Randbereich starke Abweichungen zur Sollgeometrie aufweist, wurden die Messwerte bei diesem Versuch nicht relativ zur Höhe des ersten Pins sondern relativ zur Höhe der Geometrie bei einer Position von 157,2 mm dargestellt. Hier beträgt die Höhe *Z* beim gemessenen und berechneten Querschnitt per Definition 35,3 mm.

Sowohl Simulation als auch Messung stimmten für den inneren Bereich der Werkzeugform ab dem dritten Pin (X = 78,6 mm) sehr gut mit der Sollgeometrie überein. Es ist nur eine leichte Welligkeit zu erkennen, die entsteht, da die Folie in den Pin-Zwischenräumen um 0,5 mm durchhängt. Im Randbereich, beim ersten und zweiten Pin wichen die Messwerte teils um mehr als 2 mm von der Sollgeometrie ab, die Simulationswerte um bis zu 1,7 mm. Dies ist vor allem auf eine falsche Neigung der Kugelpfannen an der Unterseite der Interpolationsschicht zurückzuführen. Diese sind starr, lassen sich aber auf dem Pin frei neigen, um sich an die Neigung der Geometrie anzupassen. Im Randbereich blieben diese aber in einer waagrechten Position, sodass die linke Kante über die Sollgeometrie herausragte und die rechte Kante zu niedrig war. Dieser Effekt konnte in der Simulation nur beim ersten Pin beobachtet werden. Daraus ergibt sich eine unzureichende Genauigkeit im Randbereich des Formwerkzeugs. Der Innenbereich der Form kann jedoch genutzt werden, um Bauteile mit einer Genauigkeit von 0,5 mm herzustellen. Der Rand sollte breiter als 80 mm sein.

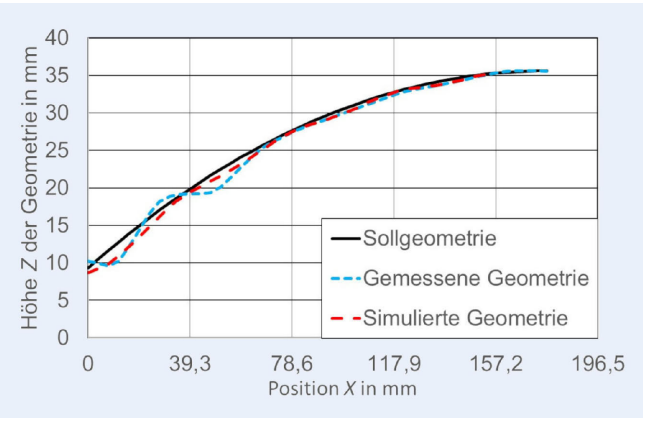

Bild 8. Vergleich der Sollgeometrie mit der Istgeometrie des Formwerkzeugs. *Grafik Fraunhofer IPA*

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Systemgenauigkeit eines anpassbaren Formwerkzeugs für die FVK-Herstellung untersucht. Die Anpassung erfolgte durch eine verstellbare Pin-Matrix, deren einzelne Pins durch Ein- und Ausschrauben in der Höhe verstellt wurden. Dazu wurde ein Industrieroboter mit Schraubwerkzeug eingesetzt. Als Hauptursache für Fehler in der Pinverstellung wurde die Detektion der Isthöhe identifiziert. Diese erfolgte durch Abtasten der Pins. Durch Optimierung der Tastfunktion konnte der Fehler bei der Einstellung von 1 mm auf 0,3 mm verbessert werden. Zur Überprüfung der Einstellgenauigkeit wurde ein Messsystem aufgebaut, welches ebenfalls durch den Roboter geführt wurde. Es konnte gezeigt werden, dass dieses Messsystem mit einer Genauigkeit von 0,2 mm misst.

In abschließenden Untersuchungen wurde die Gesamtgenauigkeit der Form untersucht. Diese ist im mittleren Bereich gut. Für den vermessenen Querschnitt lagen die Abweichungen zwischen +0,1 mm und -0,5 mm zur Sollgeometrie. Im Außenbereich betrugen diese jedoch mehr als 2 mm. Mit der entwickelten Form können somit mehrfach gekrümmte Bauteile hergestellt werden. Das Formwerkzeug muss aber entsprechend größer als das herzustellende Bauteil dimensioniert werden, um den unzureichenden Randbereich zu kompensieren. Die Verkleinerung des ungenauen Randbereichs ist Teil weiterer Untersuchungen.

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

Literatur

[1] Lässig, R.; Eisenhut, M.; Mathias, A. et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Studie. München: Roland Berger Strategy Consultants, VDMA 2012

[2] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Heidelberg: Springer 2007

[3] Simon, D.; Kern, L.; Wagner, J. et al.: A Reconfigurable Tooling System for Producing Plastic Shields. Procedia CIRP 17 (2014), pp. 853–858

[4] Hornfeck, R.; Lusic, M.: FlexForCFK – Entwicklung eines prozessautomatisierten formflexiblen Werkzeug zur Herstellung von CFK-Bauteilen. Forschungsbericht. Nürnberg: Technische Hochschule Nürnberg 2017

[5] Wimmer, M. S.; Lušić, M.; Maurer, C.: Vacuum Assisted Multipoint Moulding – A Reconfigurable Tooling Technology for Producing Spatially Curved Single-item CFRP Panels. Procedia CIRP 57 (2016), pp. 368–373

[6] Buschle, F.; Reisen, K.; Marquart, M. et al.: Technologiereifebewertung Faserdirektablage zur CFK-Herstellung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 9, S. 616–620

[7] Abele, E.; Haddadian, K.; Baier, C. et al.: Geometrieerfassung komplexer Bauteile mit Laserliniensensoren. wt Werkstattstechnik online 105 (2015) 06, S. 390–394

[8] DIN ISO 2768–2. Allgemeintoleranzen Teil 2: Toleranzen für Form und Lage ohne einzelne Toleranzeintragung. Ausgabe April 1991

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Max Mages, M. Sc.
Foto: Autor

Dipl.-Ing. Tim Mayer

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-3662
max.mages@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY