

PROJEKT FLEXICUT – DARSTELLUNG EINER BEARBEITUNGSZELLE FÜR DIE KOMBINIERT BEARBEITUNG VON CFK-BAUTEILEN

G. Braun

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland.

Dr. R. Glück

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland.

F. Krebs

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

M. Schönheits

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

Zusammenfassung

Die Marktanforderungen an Flugzeughersteller sowie die damit verbundenen Zulieferer verlangen von diesen eine Erhöhung der Stückzahl bei zugleich steigenden und strikt einzuhaltenden Qualitätsanforderungen unter wachsendem Preisdruck.

Aus diesen oben genannten Gründen wird eine automatisierte Herstellung von Flugzeugbauteilen angestrebt, welche in Verbindung mit einem höheren Stückzahlenniveau eine Senkung der Stückkosten mit sich bringt. Bezogen auf die Bauteilherstellung unter Verwendung von endlosfaserverstärkten CFK-Halbzeugen kann dies auch eine automatisierte Nachbearbeitung des fertig konsolidierten Bauteils bedeuten, sofern dies wirtschaftlich ist.

Im Rahmen des FlexiCut-Projektes wurde am ZLP-Augsburg eine prototypische Zelle zur kombinierten Bearbeitung von Bauteilen realisiert, welche zur Nachbearbeitung von CFK-Bauteilen eingesetzt werden kann. Der Projektverlauf, diese Fertigungszelle sowie die im Verlauf des Projektes erzielten Ergebnisse werden in diesem Artikel kurz beschrieben.

1. EINLEITUNG

Bedingt durch die steigende Anzahl von Fluggästen [1] sowie die steigenden Anforderungen hinsichtlich der Verringerung der Umweltbelastung sowie der hieraus resultierenden Notwendigkeit, veraltete Flugzeuge frühzeitig zu ersetzen, sind Flugzeughersteller und deren Lieferanten gezwungen, die Stückzahl pro Zeiteinheit ihrer Produkte erheblich zu erhöhen.

Weiterhin steigt der Anteil an CFK-Bauteilen im Flugzeugbau kontinuierlich an.

Aus diesen Gründen laufen zurzeit Forschungsarbeiten mit dem Ziel, die Prozesskette zur Bauteilherstellung von CFK-Bauteilen zu automatisieren.

Bei der Automatisierung dieser Prozesskette ist es sinnvoll, zunächst einzelne Prozessschritte einer Prozesskette zu untersuchen und anschließend die hierbei gewonnenen Erkenntnisse in eine optimierte

Prozesskette einfließen zu lassen [2].

Das Projekt FlexiCut beschäftigte sich mit der Nachbearbeitung und Qualitätskontrolle von CFK-Bauteilen (Bild 1).

Das Projekt begann am 01.11.2011 und endete am 31.10.2015 und wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

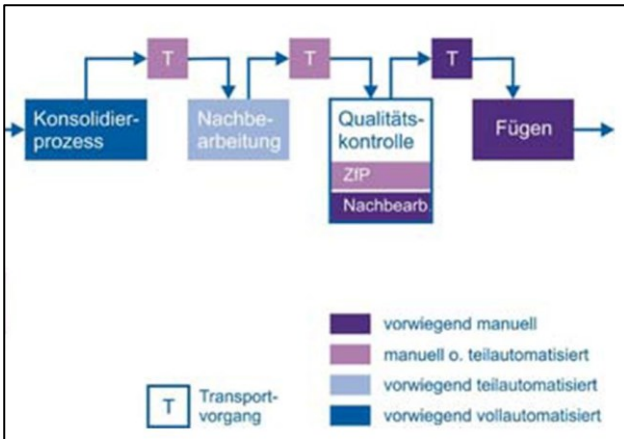


Bild 1: Verallgemeinerte Darstellung einer FVW-Prozesskette und Automatisierungsgrad der einzelnen Prozessteilschritte. Auszug aus [2].

Das Projekt wurde als Kooperation verschiedener Industriepartner und Forschungseinrichtungen durchgeführt, die nachfolgend aufgeführt werden.

Industriepartner

- Airbus Group Innovations GmbH.
- CIMPA GmbH.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie; Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie Süd.
- Fahrion Produktionssysteme GmbH & Co. KG.
- Fraunhofer Institut für Chemische Technologie; Projektgruppe Funktionsintegrierter Leichtbau FIL.
- GKN Aerospace Deutschland GmbH.
- GMA-Werkstoffprüfung GmbH.
- Universität Stuttgart; Institut für Flugzeugbau.
- Technische Universität München; iwb Anwenderzentrum Augsburg.
- KUKA Roboter GmbH.
- MAPAL Fabrik für Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG.
- TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH.

Assoziierte Projektpartner

- BMW AG.
- Flow Europe GmbH.

2. PROJEKTZIEL UND PROJEKTSTRUKTUR

Ziel des Projektes war es, eine kosten-, qualitäts- und taktzeitoptimierte Bearbeitung (Nachbearbeitung und Qualitätskontrolle) (Bild 1) von komplexen Faserverbundbauteilen in einer automatisierten, durchgängigen, robusten und ressourceneffizienten Teilprozesskette im Labormaßstab aufzuzeigen.

Im Hinblick darauf wurden die Arbeitspakete (APs) im finalen Rahmenplan des Projektes FlexiCut definiert [3].

- AP 0 - Projektkoordination.
- AP 1 - Spezifikation und Konzeptentwicklung.
- AP 2 - Technologieentwicklung und Optimierung.
- AP 3 - Entwicklung virtueller Prozessketten und Module.
- AP 4 - Realisierung einer Pilotanlage und Bearbeitungsprozesskette.
- AP 5 - Testdurchführung, Verifikation und Bewertung der Pilotanlage.

Nachfolgend wird schwerpunktmäßig das AP 4 beschrieben, da diese Pilotanlage beim Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie Süd in Augsburg aufgebaut wurde und den Fokus der Arbeiten des DLR bildete.

3. PILOTANLAGE UND PROZESSKETTE

3.1. Anlagenlayout

Bei der Pilotanlage handelt es sich um eine Fertigungszelle zur kombinierten Bearbeitung von CFK-Bauteilen mittels Laserbearbeitung mit nachgeschalteter Fräsbearbeitung. Zum besseren Verständnis ist das Layout auf Bild 2 dargestellt.

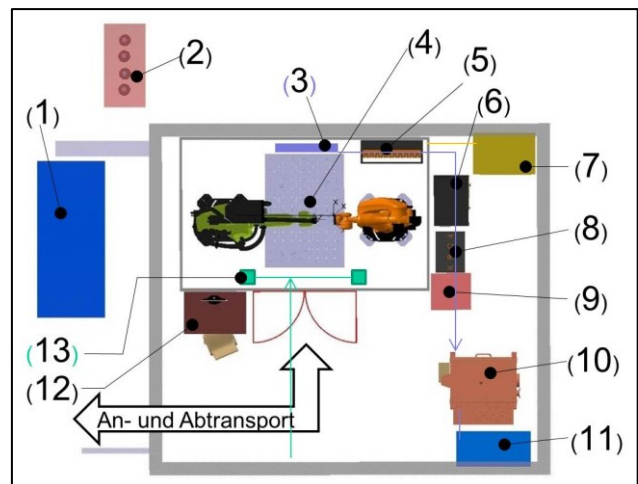


Bild 2: Anlagenlayout.

Der An- und Abtransport der Bauteile erfolgt über

die hierfür gekennzeichneten Wege. Das Bauteil wird hiernach auf der mittig in der Laserschutzkabine befindlichen Spannvorrichtung(4) definiert gespannt und die Kabinentüren werden geschlossen. Die Spannvorrichtung ist mit einer eigenen Steuerung ausgestattet (9).

Hiernach erfolgt die Inbetriebnahme der Kabinenlüftung, welche aus der Frischluftversorgung (13), der Abluftöffnung (3) sowie einem Staubfilter(10) und einem Aktivkohlefilter(11) besteht.

Darauffolgend kann die Laserbearbeitung des Bauteils mittels Laserbearbeitung erfolgen. Hierbei versorgt die Laserquelle(1) den Endeffektor am grün dargestellten Roboter mit den Laserlichtwellen, während die Gasversorgung(2) den Endeffektor mit einem Schutzgas versorgt.

Nachdem mittels Laserschnitt der größte Teil des überschüssigen Materials abgetrennt wurde, erfolgt die Feinbearbeitung durch einen Fräseneffektor, welcher am rechten Roboter auf Bild 2 angebracht ist. Dieser wird durch eine Frässpindelsteuerung(6) angesteuert. Ein Wechsel des Werkzeuges ist unter Verwendung des Werkzeugmagazins(5) möglich.

Um große Adaptivität, hohe Flexibilität und einen möglichst umfassenden Arbeitsraum bei gleichzeitig niedrigen Anlagenkosten zu erreichen, wurden Industrieroboter statt Portalanlagen verwendet [4]. Die Bewegungsbahnen beider Roboter werden durch Robotersteuerungen(8) errechnet.

Die Energie- und Medienversorgung geschieht durch den Einspeiseschrank(7), der direkt in die Halleninfrastruktur integriert wurde.

Die Steuerung der Zellenkomponenten erfolgt durch den Leitstand-PC(12) der Zelle, auf welchem sowohl die Software-SPS als auch der Prozesskonfigurator ausgeführt wird, der nachfolgend beschrieben wird.

3.2. Digitale Prozesskette und Prozessdatenbank

Zur einfachen Bearbeitung von Bauteilen wurde ein Softwarepaket für Bearbeitungsprozesse entwickelt. Dabei werden CAD- gestützt Bearbeitungsprozesse definiert und mit validierten Prozessparametern aus einer Datenbank versehen.

Die Prozesseinstellungen werden über den Leitstand(12) der Zelle übergeben, dessen Herzstück der Prozesskonfigurator ist.

Dieser steuert alle wichtigen Zellenkomponenten und die peripheren Komponenten im umgebenden Hallenbereich, welche mit der Zelle interagieren.

Eine vereinfachte Darstellung dieses Sachverhaltes zeigt Bild 3.



Bild 3: Vereinfachte Darstellung der digitalen Prozesskette.

3.3. Bearbeitungsprozesskette

Die für die Nachbearbeitung entwickelte Bearbeitungsprozesskette wird nachfolgend auf Bild 4 dargestellt.

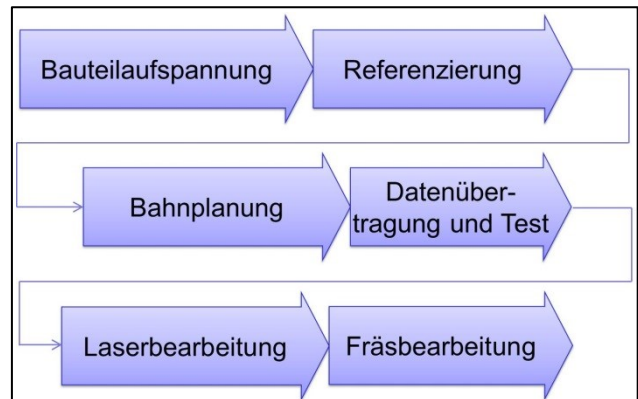


Bild 4: Bearbeitungsprozesskette.

Für die hardwareseitige Ausgestaltung der oben dargestellten Bearbeitungsprozesskette sind die Bauteileigenschaften von entscheidender Bedeutung. Wichtige Faktoren sind hierbei beispielsweise Faserorientierung, der Faser-Volumen-Anteil, die Bauteildicke und Bauteilgeometrie.

Das Aufspannen des Bauteils erfolgt mittels einer flexiblen Spannvorrichtung, welche auf Bild 5 dargestellt ist.



Bild 5: Flexible Spannvorrichtung.

Mit dieser Vorrichtung ist es möglich, eine große Zahl von Bauteilen zu spannen, da die entsprechenden Säulen dieser Vorrichtung höhenverstellbar sind, durch die flexiblen Sauger ein Ansaugen unterschiedlich ausgeprägter räumlicher Krümmungen des Bauteils möglich ist und weiterhin die Säulen flexibel hinsichtlich der Position auf der Grundplatte montiert werden können. Zusätzlich ist eine Schwingungsmessung mittels eingebauter Sensorik möglich.

Die Referenzierung dient der Bereitstellung eines gemeinsamen Koordinatensystems für die kombinierte Bearbeitung der Bauteile mittels der beiden Roboter sowie für die Bahnplanung.

Für die Bahnplanung wurde ein spezielles Softwarepaket mit dem Namen FlexiCAM erstellt. Hiermit ist es möglich, unter Verwendung geeigneter CAD-Geometrie u. a. Prozesse zu definieren, Maschinen und Werkzeuge zu laden und eine Bahnplanung durchzuführen und diese zu exportieren.

Die Datenübertragung auf die Robotersteuerungen sowie der Test des Programmes mit geringer Bewegungsgeschwindigkeit dienen der Überprüfung der Bahnplanung in Verbindung mit den Berechnungen der Robotersteuerungen.

Die Laserbearbeitung dient der Grobbearbeitung des Bauteils und trennt den größten Teil des Materials bis nahe zu den gewünschten Fertigteilabmessungen ab.

Die sich daran anschließende Fräsbearbeitung dient der Feinbearbeitung des Bauteils und stellt sicher, dass die gewünschten Fertigteilabmessungen sowie die gewünschte Oberflächengüte nach Beendigung der Nachbearbeitung erreicht werden.

4. BAUTEILBEARBEITUNG

Ausgehend von vorhandenem Plattenmaterial wurde mit diesem Material zunächst die technologischen

Parameter für die Laserbearbeitung und die Fräsbearbeitung bestimmt. Für die Laserbearbeitung wären hier die Fokusslage und die Vorschubgeschwindigkeit als wichtige Parameter zu nennen [5]. Für die Fräsbearbeitung wären hier die Schnittgeschwindigkeit v_c als Funktion der Drehzahl n , die Vorschubgeschwindigkeit v_f , die Schnitttiefe a_p sowie die radiale Zustellung a_e zu nennen. Für die Fräsbearbeitung kam hier das Gegenlaufräsen zum Einsatz. Hierbei sind die Temperatur- und Kräfteinwirkungen auf die spätere Schnittkante minimal [6].

Die Anordnung von Fräswerkzeug und Werkstück ist auf Bild 6 dargestellt.

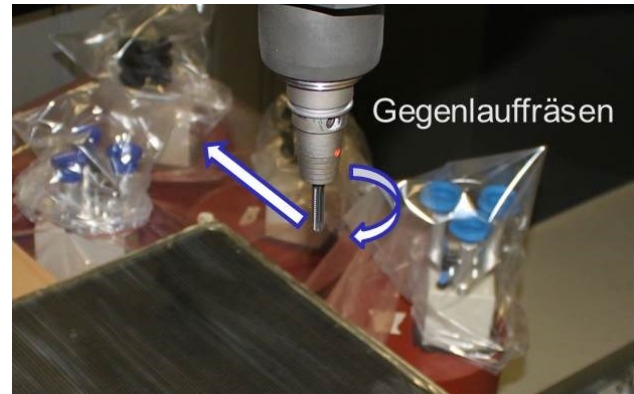


Bild 6: Anordnung von Werkzeug u. Werkstück.

Diese Versuche wurden unter Verwendung der flexiblen Spannvorrichtung (Bild 5) durchgeführt. Dies war insbesondere für die Fräsparemeter notwendig, da die Vorrichtung wesentlich das Schwingungsverhalten des Systems mitbestimmt und auch später für die Bearbeitung des Realbauteils (Bild 9) zum Einsatz kommt.

Anschließend wurden die gewonnen Erkenntnisse auf die Bearbeitung eines 2D-Bauteils übertragen (Bild 7).

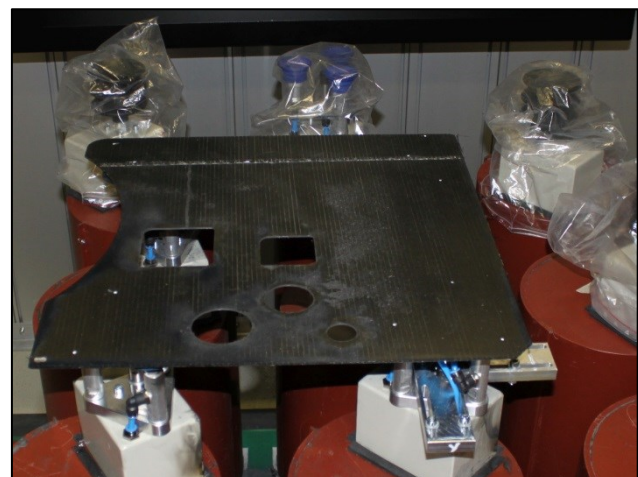


Bild 7: CFK-2D-Bauteil.

Es zeigte sich, dass der 2KW-Laser das 3mm dicke Material nicht mit einem Schnitt trennen konnte, aber eine Trennung nach Durchführung von Mehrfachüberfahrten problemlos möglich war. Durch die

Tatsache, dass jetzt nur noch ein geringes Zerspanungsvolumen der Wärmeeinflusszone durch Fräsen entfernt werden musste, konnte die Fräsbearbeitung mit hoher Vorschubgeschwindigkeit und geringen Prozesskräften erfolgen.

Diese Versuche am 2D-Bauteil bildeten außerdem die Basis für die nachfolgende Technologiebewertung [7].

Nach der Bearbeitung des oben dargestellten 2D-Bauteils wurde das auf Bild 8 dargestellte 3D-Bauteil bearbeitet.

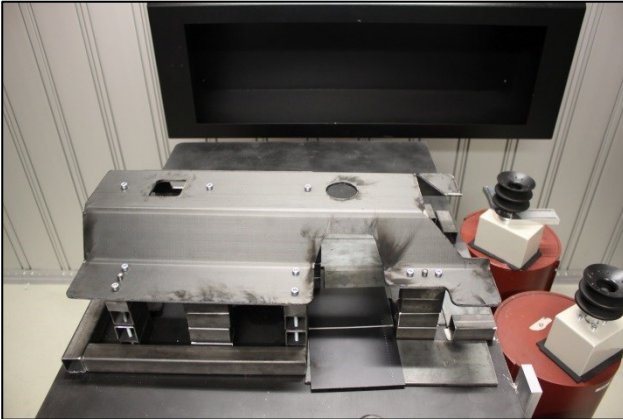


Bild 8: CFK-3D-Bauteil.

Bei einer Wandstärke von 3mm waren auch hier Mehrfachüberfahrten mit dem Laserstrahl für das Trennen des Materials notwendig. Auffallend war bei dieser Bearbeitung, dass an Ecken und engen Radien der Laserstrahl durch eine ungünstige Umorientierungsbewegung des Endeffektors am Roboter länger auf das Material einwirkte, was zu einer deutlich größeren Wärmeeinflusszone führte.

Wenn dies nicht vorher berücksichtigt wird, führt das dazu, dass nach der Fräsbearbeitung unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Wärmeeinflusszone an den Ecken Spuren dieser Zone verbleiben.

Abschließend wurde dann ein Realbauteil der Firma GKN bearbeitet, das vereinfacht auf Bild 9 dargestellt ist.

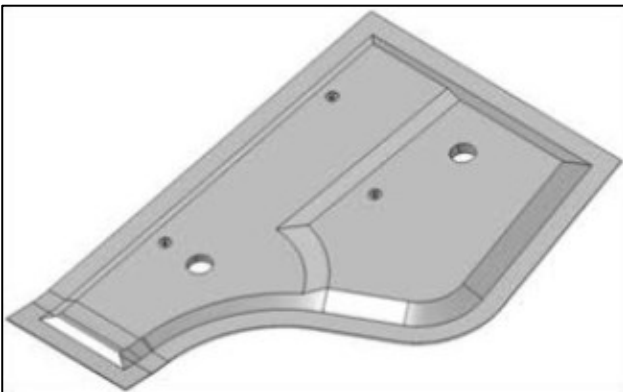


Bild 9: GKN-Realbauteil, schematisch.

Auch hier waren Mehrfachüberfahrten für das Tren-

nen des Werkstücks mittels Laserschnitt notwendig. Die Bearbeitungsqualität der Außenkontur nach Beendigung der Bearbeitung ist auf Bild 10 dargestellt.



Bild 10: Realbauteil - Bearbeitungsqualität.

Die Sichtprüfung des kombiniert bearbeiteten Realbauteils brachte keine Mängel hinsichtlich Faserüberstände, Delamination oder Schäden der Schnittkante zu Tage.

Beim Fräsen des Realbauteils auf Endkontur konnte im Hinblick auf die Bearbeitungszeit durch die Bearbeitung mittels Knickarmroboter im Vergleich zu einer bei GKN vorhandenen Oberfräse gezeigt werden, dass die robotergestützte Bearbeitung durchaus vergleichbare Vorschubgeschwindigkeiten realisieren kann.

Verglichen mit dem reinen Fräsprozess reduziert sich bei der kombinierten Bearbeitung des Realbauteils die Bearbeitungszeit beim Fräsen um -74% (von 5:06min auf 1:19min) aufgrund des Lasergrubzuzchnitts. Um die verkürzte Bearbeitung auf die gesamte Bearbeitungszeit der kombinierten Bearbeitung zu übertragen, ist die Produktivität des Laserprozesses mittels der Laserleistung auf den Prozess abzustimmen [7].

5. FAZIT

Die FlexiCut-Bearbeitungszelle hat generell durch die Bearbeitung des GKN-Realbauteils seine Funktionsfähigkeit unter Beweis gestellt, CFK-Bauteile unter Berücksichtigung luftfahrtspezifischer Anforderungen erfolgreich zu bearbeiten.

Weiterhin wurde aufgezeigt, dass eine Laserbearbeitung durchaus in Kombination mit einer Fräsbearbeitung in einer Zelle zur CFK-Bearbeitung eingesetzt werden kann.

Da es sich hier um eine prototypische Zelle handelt, muss diese Zelle den Anforderungen des jeweiligen Fertigungsumfeldes sowie der jeweiligen Kosten- und Produktstruktur angepasst werden, um wirtschaftlich sinnvoll arbeiten zu können. Hierbei ist insbesondere eine frühzeitige und sehr intensive

Zusammenarbeit mit den Lieferanten der Fräs- bzw. Laserhardware sinnvoll, damit diese Komponenten frühzeitig auf die aktuelle und die vorhersehbare zukünftige Produktpalette abgestimmt werden können.

Wie auf Bild 2 angedeutet, findet keine automatisierte Versorgung der Zelle mit Werkstücken statt, welche unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll sein könnte.

HINWEIS

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

BETREUT VOM



**PTKA
Projektträger Karlsruhe**

Karlsruher Institut für Technologie

QUELLEN

- [1] Airbus, „Airbus Global Market Forecast 2010 to 2029“, Airbus Group, 2010.
- [2] Dirk Biermann, Werner Hufenbach, und Guenther Seliger, „Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstaerkter Hochleistungswerkstoffe“, Technische Universitaet Dresden - Institut fuer Leichtbau und Kunststofftechnik, 2008.
- [3] Fraunhofer-Projektgruppe „Funktionsintegrierter Leichtbau“ des ICT u. a., „– FlexiCut – Flexible intelligente Bearbeitungstechnologien für komplexe Faserverbundbauteile; Rahmenplan“. 25-Aug-2011.
- [4] U. Berger, M. Halbauer, C. Lehmann, D. Euhus, und J. P. Städter, „Präzisionsfräsen mit Industrierobotern. Strategien zur Reduzierung und Kompensation von durch Prozesskräfte verursachten Genauigkeits-, Positionier- und Fertigungstoleranzabweichungen“, ZWF Online Artik. Zw110793, S. 533–536, 2012.
- [5] N. Speker, „Grundlagen der CFK-Laserbearbeitung“, gehalten auf der 4. Forum Leichtbau- und Verbundfasertechnik in der Produktion 2020, 5.3.2013, Noerdlingen, 03-Mai-2013.
- [6] J. Y. Sheikh-Ahmad, Machinability of Polymer Composites. New York: Springer Science + Business Media. LLC, 2009.
- [7] Fraunhofer-Projektgruppe „Funktionsintegrierter Leichtbau“ des ICT und FlexiCut-Konsortium, „– FlexiCut – Schlussbericht des BMBF Verbundprojektes: Flexible intelligente Bearbeitungstechnologien für komplexe Faserverbundbauteile (Entwurf)“. 28-Juli-2016.