

WIRTSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE GESICHTSPUNKTE DER BEARBEITUNG VON KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTEN BAUTEILEN DURCH ROBOTERBASIERTE KOMBINIERTE LASER- UND FRÄSBEARBEITUNG.

G. Braun 

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

R. Glück 

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

T. Stefani

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

L. Larsen 

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

Zusammenfassung

Auf dem DLRK-Kongress 2017 wurde im Rahmen des Beitrages „ENDBEARBEITUNG VON THERMOPLASTISCHEN, KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTEN BAUTEILEN DURCH EINE KOMBINIERTE LASER- UND FRÄSBEARBEITUNG“ eine prototypische Bearbeitungszelle vorgestellt und ihre Funktionsweise am Beispiel der Bearbeitung thermoplastischer Bauteile aufgezeigt. Dabei wurden sowohl die Anlagentechnik als auch die Bearbeitungsprozesskette ausführlich erläutert. Motivation hierfür war das steigende Interesse an Konzepten der automatisierten Nachbearbeitung von faserverstärkten Bauteilen im Kontext des erhöhten Preisdrucks und der Forderung nach einer gesteigerten Produktionsmenge pro Zeiteinheit.

Für die sinnvolle Umsetzung dieses Konzeptes in die Praxis sind neben den technischen auch wirtschaftliche Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Deshalb werden in diesem Beitrag neben den wichtigsten technischen Sachverhalten Überlegungen zu Kostengesichtspunkten der dargestellten Bearbeitungszelle angestellt. Dabei wird auf die Kosten- und Leistungsrechnung sowie deren Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit in Bezug auf diese Anlagenkonfiguration eingegangen. Aufbauend auf diesen Erläuterungen erfolgt dann am Beispiel der beschriebenen prototypischen Bearbeitungszelle exemplarisch die Darstellung des Maschinenstundensatzes basierend auf einem Anwendungsszenario.

Keywords

CFK, Kosten, Laserbearbeitung, Fräsbearbeitung, Kosten- und Leistungsrechnung, Automatisierung, Bearbeitungszelle.

1. EINLEITUNG

Zukünftig ist eine steigende Nachfrage nach Flugzeugen aufgrund erhöhter geforderter Mobilität zu erwarten [1]. Gleichzeitig zeichnet sich ein steigender Preiskampf zwischen den Fluglinien ab.

Dies verlangt von Teilezulieferern eine steigende Ausbringung pro Zeiteinheit, begleitet von steigendem Kostendruck.

Wichtige Stellschrauben für die Wirtschaftlichkeit eines Flugzeugs sind die wiederkehrenden Kosten im laufenden

Betrieb, sowie die Kosten beim Einkauf der Zulieferteile für die Produktion.

Um beide Möglichkeiten bestmöglich auszuschöpfen werden heute immer mehr Bauteile aus leichten Faserverbundkunststoffen (FVK) gefertigt deren Fertigung zunehmend automatisiert wird.

2. TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNGEN

Bei der hier betrachteten Bearbeitungszelle handelt es sich um eine prototypische Zelle für die Laser- und Fräsbearbeitung von faserverstärkten Bauteilen. Das Konzept der Bearbeitungszelle wurde im Rahmen des FlexiCut-Projektes entwickelt und an einem Realbauteil der Firma GKN erprobt. Im Rahmen dieses Projektes wurden ebenfalls die Kosten der Anlage erfasst und festgehalten [2].

2.1. Grundlagen

Die kombinierte Bearbeitung von Faserverbund-Kunststoffbauteilen durch eine vorbereitende Grobbearbeitung mittels Laser und eine abschließende Feinbearbeitung durch einen Fräser kann bei geeignetem Produktportfolio zu hohen Kosteneinsparungen führen.

Diese Einsparungen können dadurch erzielt werden, dass zunächst ein großer Teil des breiten Bauteilbereiches zwischen MEOP (Manufacturing Edge of Part) und EEOP (Engineering Edge of Part) durch Laserbearbeitung abgetrennt wird und nur der durch den Wärmeeinfluss veränderte Bereich zwischen Laserschnittkante und EEOP verbleibt. Durch den nachfolgenden Prozess der Feinbearbeitung mittels Fräsen im Teilschnitt wird dann die EEOP in der gewünschten Qualität und Genauigkeit hergestellt.

Im Rahmen des FlexiCut-Projektes (Laufzeit: 01.11.2011 bis 31.10.2015) wurde für dieses Bearbeitungskonzept eine prototypische Bearbeitungszelle entwickelt, realisiert und getestet. Ein Überblick über das Layout ist auf **BILD 1** zu sehen.

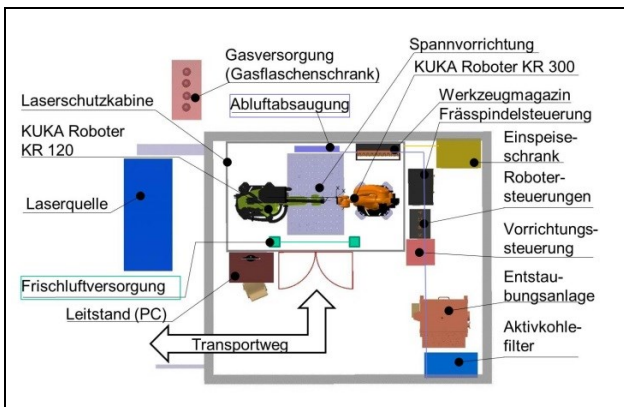


BILD 1: Zellenlayout der prototypischen Bearbeitungszelle

Diese kombinierte Bauteilbearbeitung wird im Rahmen dieses Papers nur in ihren Grundzügen beschrieben. Für detailliertere Informationen wird hier auf [2] und [3] verwiesen.

Die Bearbeitungsprozesskette für die Bauteilbearbeitung wird nachfolgend anhand der Darstellung auf **BILD 2** beschrieben.

Das Bauteil wird vor der Bearbeitung über den Transportweg zur Spannvorrichtung befördert und anschließend in

der gewünschten Soll-Form und in der geforderten Position und Orientierung auf der Vorrichtung gespannt.

Da es sich um eine prototypische Zelle handelt und keine automatisierte Einbindung in einen Produktionsprozess angestrebt wurde, wurden die Bauteile hier manuell eingebracht und anschließend gespannt.

Nach dem definierten Spannen des Bauteils wird das Bauteil **referenziert**. Das bedeutet, dass das Bauteil sowie die nebenstehenden Roboter hochgenau, in unserem Fall mittels Lasertracker, eingemessen werden. Dadurch ist eine exakte räumliche Zuordnung dieser Objekte zueinander möglich.

Diese geometrischen Informationen werden dann im Rahmen der **Bahnplanung** verwendet um das Bauteil im CAD-Modell entsprechend der hochgenauen Messwerte zu positionieren und orientieren.

Auf Basis dieses verbesserten CAD-Modells erfolgt dann die Offline-Bahnplanung an deren Ende dann ein Roboterprogramm steht.

Im Prozessschritt **Datenübertragung und Test** erfolgen die Programmübertragung zur Robotersteuerung und ein Test des Programms bei verminderter Robotergeschwindigkeit in der realen Zelle. Dies ist zum einen notwendig, da die Robotersteuerung Werte errechnen muss, welche in die aktuelle Bahnbewegung einfließen, und zweitens, da das CAD-Modell der Gesamtzelle nur eine Näherung an die Gegebenheiten der realen Zelle ist. Somit ist ein einmaliger Testlauf zur Absicherung der bis hierhin geleisteten Arbeiten sinnvoll.

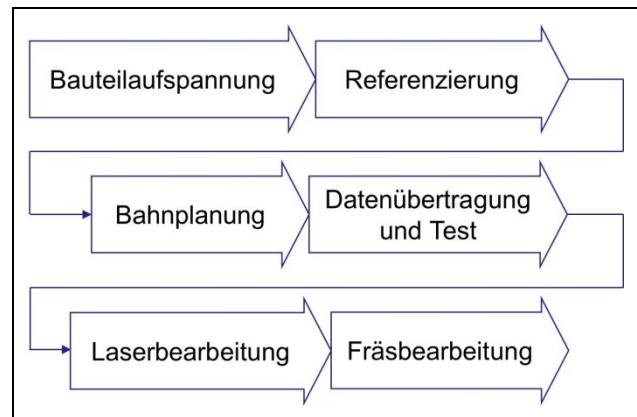


BILD 2: Bearbeitungsprozesskette nach [3].

Als nächster Schritt erfolgt die **Laserbearbeitung** mit dem Ziel einen möglichst großen Bereich zwischen MEOP und EEOP zu trennen. Hier wird vornehmlich eine saubere Trennung mit einer möglichst geringfügigen Bauteilbeeinflussung angestrebt. Auf diese technischen Details der Bearbeitung wird in **Kapitel 2.2** genauer eingegangen.

Die abschließende **Fräsbearbeitung** dient der Herstellung der EEOP mit den gewünschten Eigenschaften. Für technische Details wird auch hier auf **Kapitel 2.2** verwiesen.

2.2. Laser- und Fräsbearbeitung

Als Vorbereitung für eine sinnvolle Laser- und Fräsbearbeitung ist eine Bestimmung wichtiger Prozessgrößen im Vorfeld notwendig. Diese werden unter Verwendung einer Vorrichtung an einem Werkstück unter praxisnahen Bedingungen ermittelt. Ein Beispiel für eine solche Vorrichtung ist auf **BILD 3** dargestellt.

Als Basis für die Ermittlung der technologischen Kennwerte kann zunächst ein ebener Probekörper dienen. Dieser Probekörper sollte aus dem gleichen Werkstoff wie das Zielbauteil bestehen und die gleiche Bauteildicke aufweisen. Dies ist kostengünstiger und ausreichend, um erste Näherungswerte zu ermitteln.

Dadurch kann eine spätere Anpassung der Werte an ein wahrscheinlich kostenintensives, geometrisch komplexeres Bauteil mit geringerem Aufwand erfolgen.

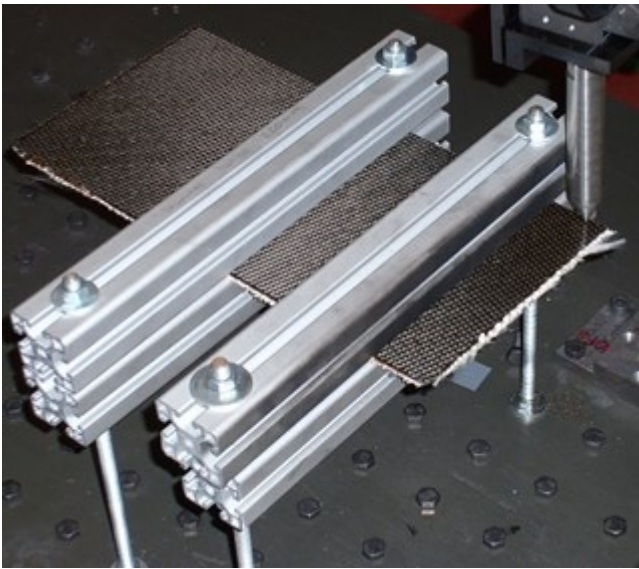


BILD 3: Vorrichtung zur Prozessgrößenermittlung.

Die wichtigsten zu ermittelnden Laserkenngrößen sind auf **BILD 4** dargestellt. Dabei wird der zuvor ermittelte Fokuspunkt des Laserendeffektors betrachtet.

Für die Parameterermittlung werden Schnittversuche durchgeführt, bei denen die Höhe h des Abstandes des Fokuspunktes zur Bauteiloberfläche und die Geschwindigkeit v des Fokuspunktes variiert werden. Das Ziel hierbei ist eine möglichst hohe Schnittgeschwindigkeit, bei der noch eine sichere Trennung des Bauteils gewährleistet werden kann.

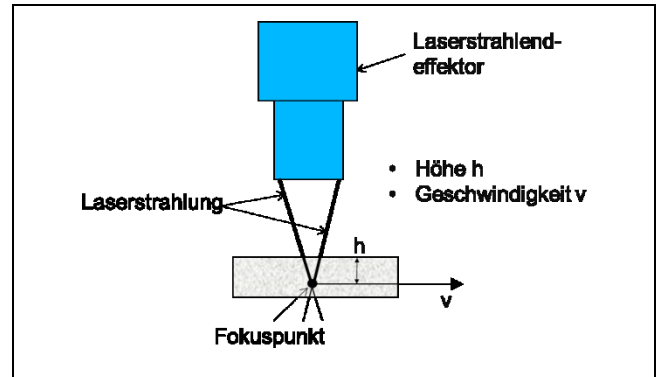


BILD 4: Laserbearbeitungsprozessgrößen

Nachfolgend ist ein Beispiel für solche iterativ ermittelten Laserparameter dargestellt. Dabei ist allerdings festzuhalten dass bei höheren Laserleistungen die Vorschubgeschwindigkeit v sehr viel höher, bei gleichzeitig sicherer Trennung des Werkstoffs, ausfallen kann.

Beispiel für so ermittelte Laserparameter

Fokuslage h : Fokuspunkt 1 Millimeter unter der Bauteiloberfläche.

Vorschubgeschwindigkeit $v = 1,5 \text{ m/min}$

Die in diesem Zusammenhang wichtigsten Kenngrößen zur Fräsbearbeitung bezüglich des hier verwendeten Gegenlauffräsens sind auf **BILD 5** dargestellt.

Bei diesen Vorversuchen werden Schnitte am ebenen Bauteil durchgeführt und geeignete Kombinationen von Vorschubgeschwindigkeit v_f ; Schnittgeschwindigkeit v_c und Arbeitseingriff a_e ermittelt. Auch diese Schnittversuche sind unter möglichst realitätsnahen Bedingungen bezüglich des späteren Einsatzszenarios zu ermitteln.

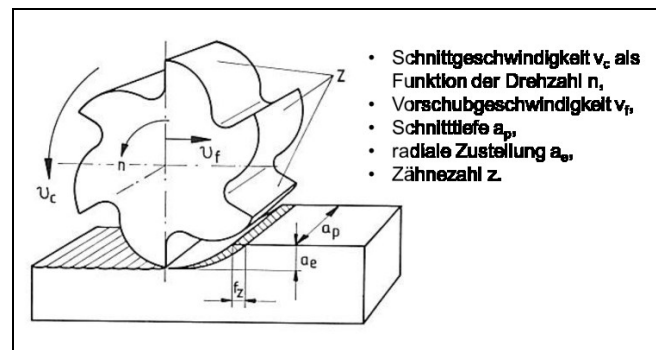


BILD 5: Fräsbearbeitungskenngrößen in Anlehnung an [4].

Auch die nachfolgend dargestellten Werte für die Fräsparemeter, die entsprechend der zur Verfügung stehenden Hardware sowie der Bauteileigenschaften stark variieren können, sind nur Beispielwerte.

Beispiel für so ermittelte Fräsparameter

Vorschubgeschwindigkeit $v_{f=}$ 2,5 m/min
 Schnittgeschwindigkeit $v_{c=}$ 251 m/min
 Arbeitseingriff $a_{e=}$ 3 mm

Danach erfolgt ein Spannen des Zielbauteiles mit komplexer Geometrie auf einer oftmals speziell hierfür entwickelten Vorrichtung (s. a. Beispiel auf **BILD 6**).

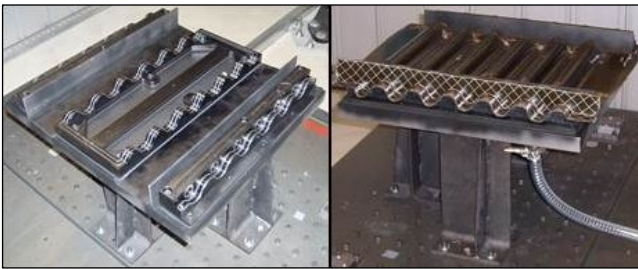


BILD 6: Spezielle Spannvorrichtung

Darauffolgend werden die Laserparameter und die Fräsparameter, basierend auf den zuvor am ebenen Teil ermittelten Startwerten, an das Zielbauteil angepasst.

Diese mit wenigen Schnittversuchen kostengünstig optimierten Werte werden dann nachfolgend für die Laserbearbeitung und die Fräsbearbeitung verwendet.

2.2.1. Wirtschaftliche Betrachtungen

2.2.1.1. Grundsätzliches

Im Rahmen der Kosten- und Leistungsrechnung (KLR) gibt es keine bindenden Vorgaben seitens des Gesetzgebers und es ist jedem Betrieb freigestellt ob sie eine KLR durchführt [5] und wie sie diese gestaltet. Dieses interne Rechnungswesen dient jedoch der Kontrolle des Betriebsgeschehens und ist dementsprechend betriebsspezifisch den Gegebenheiten anzupassen.

Im Rahmen dieser Betrachtungen soll **nicht** die Ertragsseite betrachtet werden sondern ausschließlich die Ausgaben- und Kostenseite. Dabei sollen im Rahmen dieses Beitrags nur die blau unterlegten Unterpunkte der Fertigungskosten betrachtet werden (s. a. **BILD 7**).

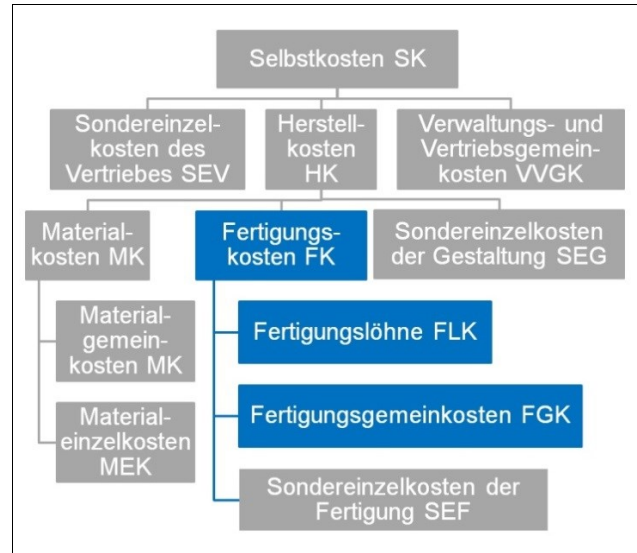


BILD 7: Struktur der Selbstkostenberechnung in Anlehnung an [6].

Dabei sollen neben den Investitionsausgaben auch die auf **BILD 8** dargestellten Bereiche der Kosten- und Leistungsrechnung betrachtet werden.

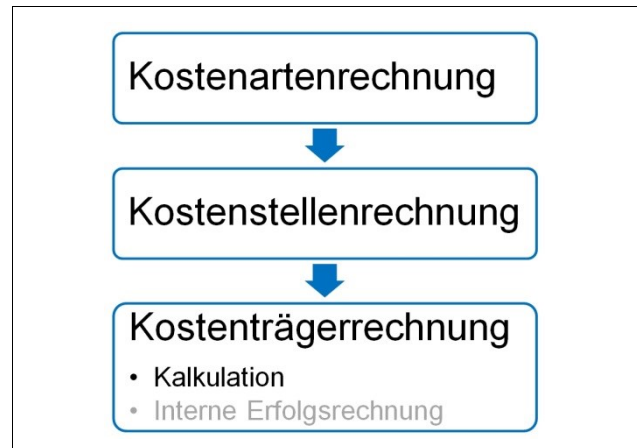


BILD 8: Bereiche der Betriebsabrechnung und Kalkulation in Anlehnung an [7].

2.2.1.2. Ausgaben und Kosten

Bei der **Kostenartenrechnung** handelt es sich um die werte- und mengenmäßige Erfassung der Kosten nach Kostenarten innerhalb einer Abrechnungsperiode (z. B. Wochen). Dabei werden nur solche bewerteten Verbräuche bzw. Verwertungen von Produktionsfaktoren erfasst die aus einem betriebsbedingten Werteverzehr resultieren.

An dieser Stelle sollen nur Kosten und Ausgaben erwähnt werden, welche aus der Entwicklung, dem Bau und dem Betrieb der Roboterzelle resultieren. Einige dieser Kostenarten und Ausgaben werden dann später für die Kalkulation herangezogen (s. a. **Kapitel 2.2.1.4**). Dabei werden die nachfolgend aufgeführten Kosten nicht nach dem Industriellen Kostenrahmen IKR o. ä. gegliedert, sondern nach technischen Gesichtspunkten basierend auf dem

oben beschriebenen Anwendungsfall der prototypischen Bearbeitungszelle.

- **Investitionsausgaben**

- Die **Ausgaben für Roboter- und Roboter-equipment** beinhalten den Basispreis des Roboters und der Steuerung sowie der für den Betrieb und die Programmierung grundlegend notwendigen Software. Weiterhin enthalten diese Kosten optionales Equipment des Roboterherstellers wie z. B. Werkzeugmagazin bis hin zum Endeffektor. In Bezug auf die beschriebene Fertigungszelle für die kombinierte Bearbeitung wären hier auch die Ausgaben für die KUKA-CNC-Frässpindelsteuerung einzubeziehen.
- **Konstruktions-, Entwicklungs- und die Zellen-Hardwareausgaben** für die Konstruktion und Entwicklung der Zelle, die Ausgestaltung des Layouts, die Beschaffung der notwendigen Hardware wie hier z. B. die Laserschutzkabine, Versorgung mit Zuluft in der Zelle, Abluftentsorgung in der Zelle, Entstaubungsanlage, Aktivkohlefilter u. s. w. .
- **Bau-, Installations- und Aufbauausgaben** für den Aufbau der Zelle. Hierzu gehören die Baukosten bspw. für Leitungsverlegung für Zuluft- und Abluft, die Bereitstellung von elektrischem Strom oder die Bereitstellung von Gasversorgungsleitungen für die Spülgasversorgung sowie die Sachkosten und die Lohnkosten für den Aufbau der Zelle.
- Weiterhin sind die **Werkzeugausgaben** zu berücksichtigen. Dazu gehören die Kosten des speziell an den Anwendungsfall angepassten Endeffektors, Vorrichtungen wie bspw. Spannvorrichtungen, Haltevorrichtungen und andere Werkzeuge die zum Betrieb der Anlage notwendig sind. An dieser Stelle ist auch die für die Werkzeuge notwendige Steuerungstechnik aufzuführen. Bei der oben beschriebenen prototypischen Bearbeitungszelle müssten hier noch die Ausgaben für den Fräseneffektor, den Laserendeffektor, die Laserquelle und den Gasflaschenschrank erfasst werden.
- Hinzugerechnet werden müssen die **Schulungsausgaben**, welche vor der Erstinbetriebnahme der Anlage getätigt werden müssen um ein späteres Arbeiten mit der Anlage zu ermöglichen.
- Der Sammelbegriff „**Verschiedene Ausgaben**“ beinhaltet Investitionen, welche nicht in die o. g. Kategorien eingeordnet werden können. Beispielsweise die Ausgaben für die Anschaffung einer Offline-Simulationssoftware für die Bahnplanung der Roboter, Ausgaben für die Zellenkamera u. a. .

- **Betriebskosten**

- **Fertigungslohnkosten FLK**, die aus dem Produktionsbetrieb der Zelle resultieren.
- **Raumkosten**
- **Energiekosten**
- **Instandhaltungskosten**
- Unter dem Begriff „**Verschiedene Kosten**“ werden die Kosten aufsummiert, die mit den o. g. Kategorien nicht abgedeckt wurden, aber dem Betrieb der Roboterzelle zugeordnet werden können.
Zu diesen Kosten gehören die Überwachung der Anlage, die Rüstzeiten, die Programmierung bzw. die Offline-Programmerstellung sowie die Programmanpassung in der Zelle sowie die Lizenzkosten für benötigte Software. Auch Schulungen während der Anlagenlebensdauer sind hier zu nennen. Weiterhin sind hier die Kosten für Hilfsstoffe, Betriebsstoffe u. s. w. zu berücksichtigen. Auch die Kosten für zusätzliche Vorrichtung die während des Betriebes bspw. zur Arbeitserleichterung beschafft werden, sind hier zu nennen.

2.2.1.3. Kostenstellenbetrachtung

Die Kostenstellenrechnung beantwortet die Frage an welcher Stelle Kosten anfallen.

Bei den Betrachtungen im Rahmen dieses Papers ist es sinnvoll, als Kostenstelle die gesamte Bearbeitungszelle sowie die für den Bearbeitungsprozess notwendige Peripherie festzulegen. Eine Untergliederung der Anlage in unterschiedliche Kostenstellen ist nicht sinnvoll unter der Voraussetzung dass stets eine kombinierte Bearbeitung der Bauteile stattfindet.

Allgemein wird der Zweck und das Ziel der Kostenstellenrechnung sinngemäß definiert wie nachfolgend beschrieben (in Anlehnung an [6]).

- **Kontrolle der Gemeinkostenentwicklung sowie der Wirtschaftlichkeit des Betriebsgeschehens** der einzelnen Kostenstellen, welche organisatorisch gegeneinander abgegrenzt sind.
- **Erstellung von Unterlagen für die Kalkulation und somit Unterstützung der Kalkulation.** Dabei werden die Produktionskosten und die innerbetrieblichen Leistungen nach dem Verursachungsprinzip erfasst und nach Kostenarten gegliedert. Nachfolgend werden diese Kosten (Gemeinkosten und Einzelkosten) auf Kostenstellen verteilt. Dadurch können Kalkulationssätze zur Weiterverrechnung auf Kostenträger festgelegt werden.

Da es sich in diesem Fall um eine prototypische Zelle handelt, welche in einem Forschungsumfeld betrieben wird, sowie dadurch, dass diese Zelle nicht an einen bestehenden Fertigungsprozess eines Betriebes angepasst werden musste soll auf den o. g. Punkt „**Kontrolle der Gemeinkostenentwicklung**“ nicht eingegangen werden.

In diesem Beitrag soll jedoch auf den Themenbereich Kalkulation (s. a. **BILD 8**) eingegangen werden. Deshalb wird in **Kapitel 2.2.1.4** auf die Berechnung des Maschinenstundensatzes eingegangen.

2.2.1.4. Kostenträgerrechnung / Kalkulation

Ein Nachteil der Zuschlagskalkulation auf Basis des Lohnes ist die dahinterstehende Annahme, dass die Fertigungsgemeinkosten und der Fertigungslohn sich proportional verhalten. Um die Genauigkeit der Kostenzurechnung bei anlagenintensiver Fertigung zu erhöhen, wird ein Maschinenstundensatz ermittelt (s. a. **Kapitel 2.2.2.7**), **[8]**. Bei der Kalkulation mit Maschinenstundensatz gliedert man aus den Fertigungsgemeinkosten die näherungsweise maschinenabhängigen Kosten aus und errechnet daraus einen Maschinenstundensatz. Die verbleibenden Restgemeinkosten werden dann über einen Zuschlagsatz den Fertigungslohnkosten zugeschlagen.

Die allgemeine Struktur der Maschinenstundensatzkalkulation **inklusive** der Fertigungskosten in Anlehnung an **[6]** wird nachfolgend dargestellt.

- Fertigungslohnkosten FLK
- Fertigungsgemeinkosten FGK
 - Kalkulatorische Abschreibungen,
 - Kalkulatorische Zinsen,
 - Instandhaltungskosten,
 - Raumkosten,
 - Energiekosten,
 - Kosten für Vorrichtungen, Werkzeuge und Hilfsstoffe z. B. Druckluft, Spülgas für Laserendeffektor u. s. w. .
- Restgemeinkosten
 - Gehälter,
 - Hilfslöhne,
 - Sozialkosten **[9]**, **[10]**,
 - Kosten für Innentransporte,
 - Anteilige Umlagekosten anderer Bereiche z. B. Arbeitsvorbereitung u. s. w. .

Auf die Bereiche Fertigungslohnkosten und Restgemeinkosten soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, da diese sehr stark von den innerbetrieblichen Gegebenheiten abhängen und in diesem Kontext betriebsintern individuell behandelt werden müssen. Eine Berechnung des Maschinenstundensatzes für die oben beschriebene prototypische Zelle ist in **Kapitel 2.2.2.7** dargestellt.

2.2.2. Technische Betrachtungen

In Bezug auf die bereits vorgestellte Fertigungszelle wird hier nochmals darauf hingewiesen, dass es sich hier um eine prototypische Zelle handelt bei der es um den Nachweis der Machbarkeit dieser Verfahrenskombination ging.

Im Rahmen der technisch-wirtschaftlichen Beurteilung der kombinierten Bearbeitung in der betrieblichen Praxis ist es, wie auch bei Automatisierungserwägungen, sinnvoll die hier vorgestellte Bearbeitungszelle mit mindestens einem Alternativszenario zu vergleichen.

Basis für einen solchen Vergleich ist zum einen eine genaue Kenntnis der zu vergleichenden Szenarien sowie des betrieblichen Umfeldes in welchem diese realisiert werden können. Zum anderen ist es notwendig sinnvolle Bewertungskriterien individuell festzulegen.

Beispiele für solche Bewertungskriterien, in Anlehnung an **[11]** und **[12]** werden nachfolgend aufgeführt.

- Anpassungsmöglichkeiten,
- Möglichkeiten der frühzeitigen Fehlererkennung,
- Möglichkeiten der frühzeitigen Reaktion auf Fehler,
- Arbeitsbedingungen für den Menschen,
- Flexibilität,
- Qualität,
- Erhöhung der Produktivität,
- Auswirkungen auf die Kostenstruktur.

Anhand dieser Kriterien sollen die Eigenschaften der oben beschriebenen prototypischen Bearbeitungszelle nachfolgend kurz beschrieben werden.

2.2.2.1. Anpassungsmöglichkeiten

Hinsichtlich der Anpassungsmöglichkeiten kann hier nur auf einige grundlegende Themen eingegangen werden, da eine umfassende Betrachtung im Rahmen dieses Papers nicht möglich ist.

Hier kann gesagt werden dass diese beschriebene Kombination der Fertigungsverfahren in den meisten Fällen in jedem Betrieb eingesetzt werden kann, in dem auch eine spanende Bearbeitung von CFK vorgenommen wird. Wie auch für die Bearbeitungsrückstände bei der spanenden CFK-Bearbeitung, so muss auch für die Bearbeitungsrückstände der Laserbearbeitung eine Ablufführung und Abluffreinigung vorhanden sein. Insgesamt sollte eine Ablufführung in der Zelle ausreichend sein. Für eine Filtrierung der Bearbeitungsrückstände der Laserbearbeitung ist allerdings ein zusätzlicher Filter notwendig.

Der Laserendeffektor der prototypischen Zelle wurde, um das Eindringen von Staub zu verhindern, von einem 99,9 %igem-Stickstoffgas durchströmt. Dieses verhinderte das Eindringen von Staub in den Endeffektor und die Verschmutzung der Optik. Sofern dieses Gas schon im Betrieb in Form einer zentralen 99,9 %igen N₂-

Gasversorgung, oder eines vergleichbaren zugelassenen Gases, durch Rohrleitungen vorhanden ist, kann die Investition für die Beschaffung, Montage und Inbetriebnahme eines Gasflaschenschrankes (s. a. **BILD 1**) entfallen. Auch die Kosten für die regelmäßig wiederkehrende Bestückung dieses Flaschenschrankes sowie die Beschaffung und Rückgabe der Flaschen können eingespart werden.

Auch eine automatische Beschickung der Fertigungszelle mit Bauteilen kann zur Anpassung an das bestehende Umfeld vorgenommen werden. Dies kann beispielweise mittels eines Drehtisches geschehen.

Eine zusätzliche Anpassung des Laserschneidequipments an das gegebene Bauteilspektrum ist ebenfalls möglich und notwendig. Dabei sind wirtschaftliche und technische Gesichtspunkte zu beachten. Wichtige technische Gesichtspunkte sind in **[13]** und **[14]** beschrieben. Wirtschaftlich wichtig ist die Entscheidung welche Bauteile laserbearbeitet werden woraus sich die Materialeigenschaften und als wichtige Kenngröße die maximale Bauteildicke ergeben. Dies hat in Verbindung mit der gewünschten Prozesszeit Auswirkungen auf das einzusetzende Laserequipment und kann die Anschaffungskosten erheblich beeinflussen.

2.2.2.2. Fehlererkennung / Reaktion auf Fehler

Die Fehlererkennung kann bei sehr kostenintensiven Bauteilen ein wesentlicher Punkt zur Reduzierung von Kosten sein. Es kann zum Beispiel sinnvoll sein ein Bauteil rechtzeitig nachzuarbeiten um Ausschuss zu vermeiden. Die beschriebene Zelle zur kombinierten Bearbeitung ermöglicht es durch entsprechende Meldungen des Leitstandes (s. a. **BILD 1**) sowie durch eine interne Zellenkamera Fehler zu erkennen und darauf zu reagieren. Weiterhin ist es möglich den Bearbeitungsprozess innerhalb der Laserschutzkabine (s. a. **BILD 1**), trotz der Verwendung von augenschädlicher, für das menschliche Auge unsichtbarer Laserstrahlung, gefahrlos zu beobachten.

2.2.2.3. Arbeitsbedingungen für den Menschen

Die Arbeitsbedingungen sind so zu gestalten, dass eine Gefährdung des Menschen ausgeschlossen ist bzw. entsprechend den Gesetzen und Vorgaben minimiert wird. Bei der hier beschriebenen Bearbeitungszelle werden die bei der Bearbeitung entstehenden Gase und Stäube mit geringer Dichte während des Bearbeitungsvorgangs und nach Beendigung der Bearbeitung für eine definierte Reinigungszeit abgesaugt um dem Werker später einen Zugang zu einem schadstoffarmen Zelleninneren zu ermöglichen. Wie bei jeder Fräsbearbeitung verbleiben allerdings Stäube mit hoher Dichte und hoher Korngröße im Raum, welche dann mittels Staubsauger entfernt werden können. Dieser ist Bestandteil der Entstaubungsanlage.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ist auch hier abzuwägen welche Ausbaustufe die Staub- und Gasabsaugung haben sollte um eine minimierte Zusatzreinigungszeit und die Wirtschaftlichkeit in Einklang zu bringen.

2.2.2.4. Flexibilität

Die roboterbasierte Bearbeitungszelle weist eine hohe Flexibilität hinsichtlich der zu bearbeitenden Geometrien der Bauteile auf. Die hohe Beweglichkeit der Werkzeuge an den Achsen 6 der Roboter (s. a. **BILD 9**) ermöglicht eine flexible Handhabung der Endeffektoren und somit auch eine Bearbeitung schwieriger Geometrien.

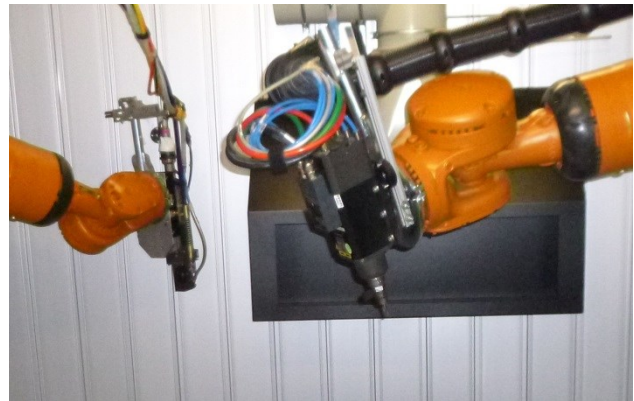


BILD 9: Roboterendeffektoren: Laserendeffektor links – Fräsendeffektor rechts.

Weitere wichtiger Bausteine für die Flexibilität der Fertigungszelle sind neben der Auswahl eines geeigneten Laserequipments auch die Auswahl bzw. Konstruktion von geeigneten Vorrichtungen sowie das Zellenlayout welches die Größe der zu bearbeitenden Bauteile ebenfalls limitiert.

2.2.2.5. Qualität

Nach DIN EN ISO 9000 ist Qualität der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmalanforderungen erfüllt wird. Einfacher ausgedrückt ist Qualität die Beschaffenheit einer Einheit (z.B. eines Bauteils) bezüglich ihrer Eignung, vorausgesetzte und festgelegte Anforderungen zu erfüllen **[15]**.

An diese Stelle soll nur auf die **Prozessqualität [16]** und die **Produktqualität [17]** eingegangen werden.

Hinsichtlich der **Prozessqualität** kann gesagt werden dass diese Bearbeitungszelle bewusst unter Verwendung handelsüblicher, hochwertiger und erprobter Hardware aufgebaut wurde und ein störungsarmer Prozess realisiert werden konnte.

Zur **Produktqualität** kann gesagt werden dass diese, wie bei den meisten Bearbeitungsprozessen, entscheidend von den ermittelten Kenngrößen (s. a. **Kapitel 2.2**) abhängt. Dies ist vor allem dahingehend wichtig, da jeder Faserverbundwerkstoff und jede Bauteilgeometrie eine Konstruktion mit eigenen Eigenschaften (z. B. Faserrichtungen) darstellt.

Wichtige Einflussgrößen sind auch die sachgerechte Programmierung sowie die Möglichkeiten der verwendeten Hardware. Weiterhin kann es notwendig sein Bearbeitungsgenauigkeit als wichtiges Kriterium anzupassen. Hierfür sind in der Literatur verschiedene Ansätze beschrieben **[18]**, **[19]** und **[20]**.

2.2.2.6. Erhöhung der Produktivität

Als Produktivität wird das Verhältnis von Produktionsergebnis (Output) und an seiner Erstellung beteiligten Inputs [21] bezeichnet.

Ob eine Erhöhung der Produktivität vorliegt, basiert auf dem Vergleich der Daten des Ist-Zustandes mit dem des Soll-Zustandes.

Verglichen mit dem reinen Fräsprozess reduzierte sich bei der Bearbeitung des Realbauteils mit der prototypischen Bearbeitungszelle die Bearbeitungszeit beim Fräsen um - 74% (von 5:06min auf 1:19min) aufgrund des vorhergehenden Lasergrobzschmitts. Inwieweit diese Zeitersparnis beim Fräsen im Teilschnitt genutzt werden kann in Summe mit dem Zeitbedarf des Lasergrobzschmittes hängt allerdings von der Auswahl eines geeigneten Laserequipments ab.

2.2.2.7. Auswirkungen auf die Kostenstruktur

Im Rahmen des FlexiCut-Projektes wurde auch eine Kostenbetrachtung durchgeführt [2]. Dabei wurde aus Vereinfachungsgründen und aus Gründen der eher begrenzten Aussagekraft im Hinblick auf die betrieblichen Gegebenheiten auf die Kostenbetrachtung hinsichtlich Konstruktion, Projektierung, CE-Kennzeichnung, Dokumentation, Schulungen und Inbetriebnahme sowie die in Kapitel 2.2.1.4 erwähnten Fertigungslohnkosten und Restgemeinkosten verzichtet.

Bei der Berechnung des reinen Maschinestundensatzes in [2] wurde eine Nutzungsdauer von 6 Jahren, ein Zweischichtbetrieb und ein Kalkulationszinssatz nach VDMA von 7,5 % bei ca.16000 Stunden Nutzungszeit zu Grunde gelegt. Weiterhin wurden nachfolgend aufgeführte Kosten ermittelt (s. a. Tabelle 1).

Tabelle 1:

| | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Gesamtkomponentenwert | 655 800€ |
| Kostenbestandteile | Kosten in € pro Jahr |
| Energiekosten | 9587 |
| Raumkosten | 13140 |
| Kalkulatorische Zinsen | 27695 |
| Instandhaltungskosten | 30772 |
| Kalkulatorische Abschreibungen | 123090 |
| Maschinenkosten | 204284 |

Daraus wurde ein reiner Maschinestundensatz von 76,80 € pro Stunde berechnet.

Betrachtet man allgemein die Kosten die Kostenverläufe bei steigendem Automatisierungsgrad [22] in Abhängigkeit von der produzierten Stückzahl (s. a. BILD 10) so kann

man deutlich erkennen das ein, nicht näher spezifiziertes, höher automatisiertes Szenario 2 im Gegensatz zu einem, nicht näher spezifiziertem, geringer automatisierten Szenario 1 einen höheren Break-Even-Punkt aufweist. Daher steigt die Mindeststückzahl an, ab dem das Szenario 2 kostendeckend arbeiten kann. In unserem Fall würde beispielsweise neben der roboterbasierten Bearbeitung der Bauteile eine weitere Automatisierung durch eine automatische Bestückung der Bearbeitungszelle mit Bauteilen diese Fixkosten und damit den Break-Even-Punkt weiter erhöhen.

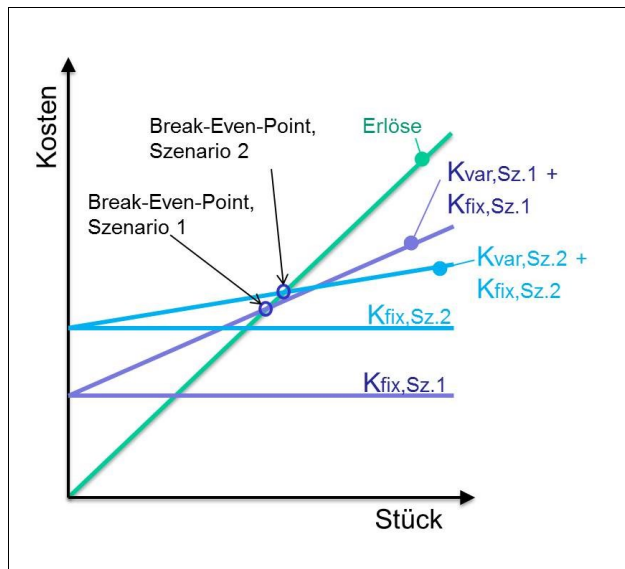


BILD 10: Veränderung der Kostenstruktur bei zunehmender Automatisierung.

Diese o. g. Zusammenhänge sind bei der Wahl des Automatisierungsgrades [22] zu berücksichtigen.

3. FAZIT

Wie in Kapitel 2.2.2.6 beschrieben ist eine Einsparung der Bearbeitungszeit beim Fräsvorgang im Vergleich mit einer real existierenden Fräsmaschine an einem Realbauteil nachgewiesen worden. Weitere Einsparpotentiale wurden in [2] beschrieben.

Aufgrund der komplexen physikalischen Zusammenhänge bei der Laserbearbeitung von Bauteilen ([14], [13]) ist auf die Auswahl eines geeigneten Laserequipments besonderer Wert zu legen. Die Investitionsausgaben für das Laserequipment (Laserlichtkabel, Bearbeitungsoptik und Laserquelle) betrug in der oben beschriebenen prototypischen Bearbeitungszelle ca. 22,5 % des Gesamtkomponentenwertes [2]. Daher ist es sinnvoll sich zunächst über sein aktuell zu bearbeitendes Bauteilspektrum oder wenn möglich auch zukünftige zu bearbeitende Bauteile und deren Eigenschaften klar zu werden. Als nächsten Schritt ist dann abzuwägen, welche Bauteile man mit einem Laserequipment bearbeiten kann um hier einen definierten Kostenvorteil zu erzielen und welche Investitionsausgaben dies erfordert. Danach kann dann unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit und technischen Aspekten eine sinnvolle Lösung gewählt werden.

Für eine möglichst wirtschaftliche Fräsbearbeitung ist es sinnvoll den Arbeitseingriff a_e (s. a. **BILD 5**) möglichst gering zu halten. Da dieser Arbeitseingriff maßgebliche von der Wärmeeinflusszone der vorgeschalteten Laserbearbeitung abhängt ist ein schneller Laser-Trennvorgang, der eine Wärmeeinflusszone mit geringer Breite hinterlässt, anzustreben und das Laserequipment entsprechend auszuwählen.

Die Qualität des Lasertrennschnittes ist ebenfalls von der korrekten Einhaltung der auf **BILD 4** dargestellten Größen abhängig was ggf. einen höheren Arbeitsaufwand erfordert. Jede geometrische Ungenauigkeit zwischen Fokuspunkt des Laserendeffektors und Bauteiloberfläche kann zu einer Änderung der Wärmeeinflusszone und somit zu einer Änderung des notwendigen Arbeitseingriffes a_e und der Vorschubgeschwindigkeit v_f (s. a. **BILD 5**) des Fräswerkzeuges führen.

Hinsichtlich der Kostenstruktur kann festgestellt werden das für eine solche Fertigungszelle, je nachdem welche Eigenschaften die zu bearbeitenden Bauteile aufweisen, nennenswerte finanzielle Mittel notwendig werden, um das oben beschriebene Konzept der kombinierten Bearbeitung technisch und wirtschaftlich sinnvoll zu realisieren. Erhöht man den Automatisierungsgrad der Zelle beispielsweise durch die in **Kapitel 2.2.2.7** kurz angesprochene Automatisierung der Bauteilzuführung oder durch eine Erhöhung der Roboter Genauigkeit wie sie in **Kapitel 2.2.2.5** angesprochen wurde so verschieben sich die Gesamtkostenkurven und somit der Break-Even-Point weiter nach oben und rechts was eine erhöhte Mindeststückzahl zur Folge hat (s. a. **BILD 10**). Damit geht dann auch eine schnell ansteigende Erhöhung der Differenz zwischen Erlös und Gesamtkosten ($K_{fix} + K_{var}$) einher.

Bedingt durch das begrenzte Projektbudget des FlexiCut-Projektes war die Leistung der Laserquelle des Laserequipments für eine wirtschaftliche Bearbeitung des o. g. Realbauteils mit hoher Schnittgeschwindigkeit nicht ausreichend. Es können durchaus höhere Ausgaben für die Anschaffung des Laserequipments entstehen bei dickwandigen Bauteilen. Dementsprechend werden die in **Kapitel 2.2.1.2** erwähnten Ausgaben ansteigen und somit der Betrag der zu verrechnenden kalkulatorischen Zinsen und Abschreibungen. Dies wiederum wird Auswirkungen auf den Maschinenstundensatz haben.

Kostensenkend kann sich auswirken das im Rahmen einer solchen kombinierten Bearbeitungszelle auch die Möglichkeit besteht beide Roboter gleichzeitig bearbeiten zu lassen.

Dies kann, abhängig von den Bauteilabmessungen und den Zellenabmessungen, zum einen durch die gleichzeitige Bearbeitung eines Bauteils geschehen oder zum anderen durch getrennte Bearbeitung zweier Bauteile durch jeweils einen Roboterendeffektor. Diese Bauteile können dann auf einem Drehtisch (engl. Turntable) positioniert, orientiert und fixiert werden und mittels einer entsprechenden Drehung des Tisches dem jeweiligen Roboter zugänglich gemacht werden.

Grundsätzlich kann gesagt werden das bei einer technisch und wirtschaftlich sinnvoll ausgestalteten kombinierten Fertigungszelle durch die hohe Schnittgeschwindigkeit des Laser-Trennschnittes vor der Fräsbearbeitung wesentlich Prozesszeit eingespart werden kann. Weiterhin können Werkzeugkosten reduziert werden durch den geringeren

Werkzeugverschleiß während der Fräsbearbeitung im Teilschnitt.

Schrifttum

- [1] P. Berster *et al.*, "Luftverkehrsbericht 2014: Daten und Kommentierungen des deutschen und weltweiten Luftverkehrs," Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Koeln, VEU II / Luftverkehrsbericht 2014, 2015.
- [2] K. Drechsler, "Flexible intelligente Bearbeitungstechnologien für komplexe Faserverbundbauteile," Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Schlussbericht eines BMBF-Projektes ISBN (Print): 978-3-8396-1088-6, 2015.
- [3] G. Braun, R. Glueck, F. Krebs und M. Schoenheits, "Projekt FlexiCut - Darstellung einer Bearbeitungszone für die kombinierte Bearbeitung von CFK-Bauteilen," präsentiert beim Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2016, Braunschweig, 2016.
- [4] E. Pauksch, *Zerspantechnik*. Braunschweig; Wiesbaden: Friedrich Vieweg und Sohn, 1993.
- [5] K. Nickenig, *Grundkurs Kosten- und Leistungsrechnung: schneller Einstieg in die unternehmerische Kalkulation*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2017.
- [6] W. Zimmermann, H.-P. Fries und G. Hoch, *Betriebliches Rechnungswesen: Bilanz und Erfolgsrechnung; Kosten- und Leistungsrechnung; Wirtschaftlichkeits- und Investitionsrechnung*, 8., ueberarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2003.
- [7] F. Eisenführ, *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre*, 3., ueberarb. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2000.
- [8] "Maschinenstundensatzrechnung," 2018. [Online]. Verfügbar: <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/maschinenstundensatzrechnung/maschinenstundensatzrechnung.htm>.
- [9] "Sozialkosten," 2018. [Online]. Verfügbar: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sozialkosten>.
- [10] G. Fandel, Ed., *Kostenrechnung: mit 40 Tabellen*, 2., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2004.
- [11] P. Scharf *et al.*, *Die automatisierte Montage mit Schrauben: Anforderungen, alternative Fügeverfahren, Wirtschaftlichkeit*. Renningen-Malmsheim: Expert Verlag, 1994.
- [12] B. Heinrich, P. Linke und M. Glöckler, *Grundlagen Automatisierung: Sensorik, Regelung, Steuerung*, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [13] P. Mucha, "Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK," Dissertation zum Dr.-Ing., Universität Stuttgart, Stuttgart, 2015.
- [14] A. Goeke, C. Emmelmann und W. Hintze, *Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen*, 1. Aufl. Goettingen: Cuvillier, 2011.
- [15] A. Boege (Hrsg.), *Handbuch Maschinenbau - Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2015.
- [16] "Prozessqualitaet," 2017. [Online]. Verfügbar: <http://www.wirtschaftslexikon24.com/e/prozessqualitaet/prozessqualitaet.htm>.
- [17] "Produktqualitaet," 2017. [Online]. Verfügbar: <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/produktqualitaet/produktqualitaet.htm>.
- [18] O. Roesch, "Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern," Dissertation zum Dr.-Ing., Universität München, München, 2014.
- [19] A. Puzik, "Genauigkeitssteigerung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern durch Fehlerkompensation mit 3D-Piezo-Ausgleichsaktorik," Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.), Universität Stuttgart, Stuttgart, 2011.
- [20] U. Berger, M. Halbauer, C. Lehmann, D. Euhus und J. P. Städter, "Präzisionsfraesen mit Industrierobotern. Strategien zur Reduzierung und Kompensation von durch Prozesskräfte verursachten Genauigkeits-, Positionier- und Fertigungstoleranzabweichungen," *ZWF Online Artik. Zw110793*, pp. 533–536, 2012.
- [21] "Produktivitaet," 2018. [Online]. Verfügbar: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/produktivitaet-46151/version-269437>.
- [22] "Automatisierung," 2018. [Online]. Verfügbar: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/automatisierung-27138/version-250801>.