

# Adaptive Produktion von Holzbauteilen mittels Part-to-Tool

Marten Stepputat, Florian Beuß, Uwe Pflötscher, Jan Sender, Wilko Flügge  
Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP, Albert-Einstein-Str. 30, 18059 Rostock

*Der Einsatz von Automatisierungstechnik zur Produktion von Einzelstücken ist in kleinen und mittleren Unternehmen derzeit häufig nicht wirtschaftlich. Gründe hierfür sind einerseits die hohen Investitionskosten und zusätzlich die notwendigen Umrüst- sowie Adaptionsvorgänge, welche in der Regel manuell vorgenommen werden müssen. Dagegen steht der aktuelle Fachkräftemangel, welcher eine effiziente Nutzung der vorhandenen Personalressourcen erforderlich macht. Durch einen Part-to-Tool-Ansatz wird im vorliegenden Beitrag ein Ansatz aufgezeigt, um die maschinelle Produktion von Einzelteilen für kleine Unternehmen im Holzbau praktikabel zu machen. Dabei wird ein 6-Achs-Knickarm-Roboter so ausgerüstet, dass dieser alle Produktionsschritte ausführen und gleichzeitig das Bauteilhandling zum Be- und Entladen übernehmen kann. Durch die Verbindung zu einer übergeordneten Steuerungsebene und der Anbindung an eine Mensch-Maschine-Schnittstelle können ungelernete Mitarbeiter Einzelteile konfigurieren und automatisiert fertigen lassen.*

*The use of manufacturing machines for the production of items in one-off is currently often not economical for small and medium enterprises. The reasons for this are, on the one hand, the high investment costs and, in addition, the necessary retooling and adaptation processes, which usually have to be carried out manually. On the other hand, there is the current shortage of skilled workers, which makes efficient use of the available human resources necessary. Using an innovative part-to-tool concept this article develops an approach to make the machine production of individual parts practicable for small companies in wood construction. A 6-axis articulated arm robot is equipped so that it can carry out all production steps and at the same time take over the component handling for loading and unloading. Through the connection to a higher-level control level and the connection to a user interface, unskilled workers can configure individual parts and have them manufactured automatically.*

## 1. Einleitung

In Deutschland sind Handwerksbetriebe besonders durch den fortschreitenden Fachkräftemangel betroffen. [1,2] Dagegen steht der hohe Personalbedarf durch die Spezialisierung auf Kleinserien oder Sonderanfertigungen. Insbesondere in kleinen Betrieben, wie Tischlereien müssen somit vorhandene Ressourcen so effektiv wie möglich eingesetzt werden.

Ein vielversprechender Ansatz ist hierbei der Einsatz von CNC-Maschinen zur automatisierten Fertigung von Frästeilen. Dabei werden hauptsächlich 3-Achs-Maschinen eingesetzt. Hierbei überwiegen die geringeren Investitionskosten sowie der geringere Platz- und Schulungsbedarf ggü. 5-Achs-Fräszentren und deren signifikant höheren Fertigungsoptionen. Somit sind für komplexe dreidimensionale Bauteile nach wie vor Umspannvorgänge notwendig, welche derzeit überwiegend manuell durchgeführt werden und somit personelle Arbeitszeit binden. Zusätzlich dazu ist, bedingt durch die Auftragsstruktur, der Anteil der Programmier- und Einrichtungszeit von der gesamten Fertigungszeit sehr hoch. Hierdurch wird der Einsatz von 5-Achs-Fräsmaschinen für kleine Tischlereien oft unwirtschaftlich.

Für die komplexe Freiform-Fertigung geht der aktuelle Trend hin zum Einsatz von Industrierobotern. Insbesondere für sehr große Strukturen stellt das Verfahren eine

alternative zu konventionellen manuellen Prozessschritten dar und steht aktuell im Fokus von Forschung und Entwicklung. [3-9]

Dagegen steht bei kleinen Freiformelementen, wie bspw. Dekorationsobjekten oder auch Komponenten aus dem Möbelbau, der Fertigungsraum der genutzten Schwerlast-Industrieroboter oft in keinem Verhältnis zu tatsächlich notwendigen Abmessungen. Zusätzlich dazu wird eine große Stell- und Bearbeitungsfläche notwendig, welche die Praxistauglichkeit für kleinere Werkstätten mit begrenztem Platzangebot stark verringert. Daher sind Ansätze zu finden, welche die geringen Prozesskräfte bei der Holzbearbeitung ausnutzen und auch kleine Industrieroboter mit entsprechend geringer Traglast befähigen Fräsaufgaben durchzuführen. [7,8] Unter der zusätzlichen Verwendung des Part-to-Tool-Ansatzes können insbesondere die genannten Komponenten somit ohne zeitaufwändige Umspannvorgänge gefertigt werden.

### 1.1. Anwendungsfall

Wie dargelegt können für die Fertigung von kleinen Holzbauteilen auch kompakte Industrieroboter mit geringer Traglast eingesetzt werden. Daher wird in diesem Beitrag ein Ansatz vorgestellt, in dem das dreidimensionale Freiformfräsen von Vollholzsouvenirs durch einen Roboter erfolgen kann. Hierbei werden die Objekte auf einem

Sockel positioniert, welcher als zusätzliche Option mit einem Schriftzug individualisiert werden kann. Sowohl das Objekt selbst, als auch die Holzsorte können hierbei aus vorgegebenen Optionen gewählt werden.

Die dabei abzubildenden Prozessschritte entsprechen denen der klassischen Holzbearbeitung und umfassen das Schruppen, zwei Schlichtprozesse und das Polieren bzw. Schleifen. Zusätzlich dazu wird noch der Gravurprozess integriert. Zwischen jedem Prozessschritt muss dabei ein Werkzeugwechsel erfolgen, wodurch entweder ein kostenintensives Wechselsystem oder manuelle Vorgänge notwendig werden. Notwendige Zu- bzw. Entladevorgänge bedürfen einer zusätzlichen Aktorik oder manueller Interaktion. Ebenfalls kann es auch bei der Bearbeitung mit Robotern notwendig werden, das Fertigungsteil in seiner Orientierung mindestens um eine Achse zu bewegen, da sonst einige Stellen nicht erreicht werden können. Dies erfordert ebenfalls eine zusätzliche Aktorik oder händische Umspannvorgänge.

Eine weitere Herausforderung stellt die Erstellung des Fräsprogrammes dar. Die wählbaren Individualisierungsoptionen, wie die Holzsorten, das Design oder der Schriftzug auf dem Sockel, machen eine programmatische Neuerstellung mit hohem personellen Aufwand erforderlich.

## 1.2. Ziele

In diesem Beitrag wird ein Ansatz entwickelt, der die Anforderungen von kleinen Tischlereien bei der automatisierten Fertigung von Holzbauteilen berücksichtigt. Dabei soll der Bedien- und Einrichtungsaufwand durch die Verwendung eines Industrieroboters und dem Part-to-Tool-Ansatz minimiert werden. Ein Werkstückhandling- sowie Spindelsystem soll die Durchführung aller notwendigen Bearbeitungsschritte automatisieren und ohne manuelle Umspannvorgänge ermöglichen. Die Minimierung des Platzbedarfes erfolgt durch die Integration einer Materialzu- bzw. abführung in das Gesamtlayout.

Durch eine zusätzliche Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Konfiguration der Frästeile sowie zur Interaktion mit der Fertigungszelle sollen die Mitarbeiter befähigt werden ohne Programmieraufwand Fertigungsaufträge zu erstellen und abarbeiten zu lassen. Durch die durchgehende Automatisierung des Prozesses werden die notwendigen personellen Ressourcen auf ein Minimum reduziert und können für wertschöpfende Tätigkeiten genutzt werden.

## 2. Hardwarekonzept

Im Vergleich zu Metall unterscheidet sich die Bearbeitung von Holz in zwei signifikanten Punkten. Zum einen ist der Werkstoff inhomogen und anisotrop, was zu einer geringeren erreichbaren Bearbeitungsgenauigkeit führt. [10] Bedingt durch die Inhomogenität können die Prozesskräfte nicht analytisch berechnet, sondern müssen

entweder abgeschätzt oder numerisch für die tatsächliche Anwendung ermittelt werden. [8] Zum anderen ist Holz im Vergleich zu Metall ein weiches Material. Dies führt zu wesentlich geringeren resultierenden Momenten in der Aktorik und ermöglicht die Verwendung von weicheren Mechaniken.

Aufgrund dieser Eigenschaften können hier die notwendigen Bearbeitungsschritte als auch die notwendigen Freiheitsgrade mit einem Roboter mit einer maximalen Traglast von 10kg erfüllt werden. [7]

### 2.1. Fräskonzept

Derzeitig am meisten genutzt werden Fräsvorgänge, bei denen das Werkzeug über ein fest eingespanntes Werkstück geführt wird. Herkömmliche CNC-Bearbeitungsmaschinen als auch roboterunterstützte Anwendungen arbeiten nach diesem Prinzip. Vorteile sind zum einen eine hohe Steifigkeit und Kompaktheit der Aktorik bei den CNC-Maschinen und der damit verbundenen hohen Genauigkeit und zum anderen die Möglichkeit mit Robotern große und schwere Bauteile zu bearbeiten. [11]

Da jedoch im Bereich der Holzbearbeitung beide Anforderungen nicht in allen Anwendungsfällen gegeben sind, sind verschiedene Bearbeitungszentren zu finden, welche nach dem Part-to-Tool-Ansatz arbeiten. Dabei wird das Werkstück relativ zu einem fest positionierten Werkzeug bewegt. Insbesondere hoch spezialisierte Systeme, wie bspw. zur Bohr- und Kantenbearbeitung sind so ausgelegt. Weiterhin werden auch Schleif- und Polierprozesse nach dem Ansatz erstellt, wie die Intec ABB-IRB2400 Robotic Finishing Cell [10].

Die Vorteile des Part-to-Tool-Ansatzes liegen, wie bereits dargestellt, auch in der Möglichkeit hoch spezialisierte Maschinen für präzise Operationen zu entwickeln und beispielsweise auch die automatisierte Bohrbearbeitung großer Bauteile zu ermöglichen. Weiterhin kann insbesondere unter Verwendung von Industrierobotern eine Anwendung konzipiert werden, in welcher der Roboter das Werkstückhandling im gesamten Prozess übernimmt. Gerade die Aufgaben der Materialzu- bzw. abführung des Prozesses, normalerweise durch zusätzliche Systeme bewerkstelligt, kann somit von der zentralen Aktorik im System ausgeführt werden und somit kostenintensive Erweiterungen obsolet machen.

Im vorliegenden Ansatz wird ein Roboter mit 10 kg Traglast über eine Greiferapplikation befähigt, das Werkstückhandling im gesamten Prozess zu übernehmen. Dies ermöglicht eine vollständige Automatisierung des gesamten Fertigungsprozesses von der Materialzuführung bis zur Ausgabe des Fertigteils.

Bedingt durch implementierte Greiferlösung am Roboter müssen weitere Prozessabschnitte anderweitig abgebildet werden. Dabei kann entweder eine spezielle Spindel mit einem Werkzeug-Wechselsystem kombiniert oder für jeden Schritt eine Spindel mit festem Werkzeug eingesetzt werden. Im vorliegenden Ansatz wird dem

Umstand Rechnung getragen, dass die notwendige Anzahl an unterschiedlichen Bearbeitungswerkzeugen sehr begrenzt ist. Dies macht den Einsatz zusätzlicher Aktorik zum Wechseln sowie die dazugehörigen preisintensiveren Bearbeitungswerkzeuge unwirtschaftlich. Daher wird für jeden Bearbeitungsschritt eine feststehende Hochfrequenz-Spindel verwendet. Durch die vorhandenen Freiheitsgrade des Roboters ist ebenfalls die in Abbildung 1 dargestellte kompakte Bauweise möglich.

Dabei sind die Spindeln für die Bearbeitungsschritte mit den höchsten zu erwartenden Prozesskräften, Schruppen (S1) und Schlichten (S2+S3), möglichst nah an der Roboterbasis platziert. Dies ermöglicht eine kompakte Pose und folglich eine hohe Gesamtsteifigkeit des Systems. Gleichzeitig reduziert diese Anordnung die resultierenden Momente in den einzelnen Gelenken. Die Spindeln für das Schleifen/Polieren (P) als auch für die Gravurarbeiten (G) sind weiter entfernt positioniert, da hier aufgrund der wesentlich geringeren Prozesskräfte eine gestrecktere Pose möglich ist.

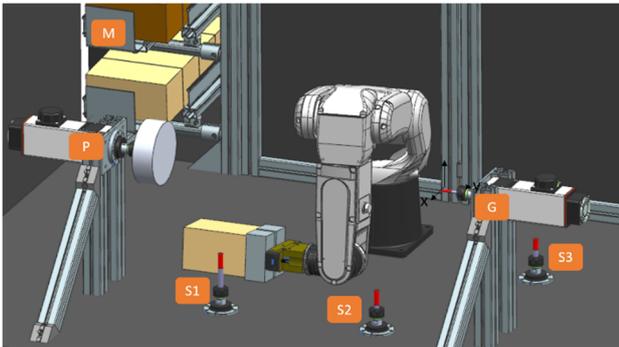


Abbildung 1: Fräskonzept - (S1) Schruppen, (S2) Schlichten, (S3) Schlichten, (G) Gravurfräsen, (P) Schleifen/Polieren, (M) Materialzuführung

### 2.3. Gesamtlayout

Damit die Materialzuführung bzw. die Ausgabe des Fertigteils ebenfalls vom Roboter übernommen wird, werden beide Komponenten direkt in die Fräszelle integriert.

Durch die möglichen Individualisierungsoptionen sind im Konzept insgesamt drei verschiedene Rohmaterialien zur Verfügung zu stellen. Durch die Verwendung von Schwerkraft-Rollenförderern, Abbildung 1 (M), kann ein fester Übergabepunkt für jede Holzsorte im Vorfeld definiert werden. Dabei sind die Förderer aus Platzgründen übereinander angeordnet und so ausgelegt, dass mindestens 20 Rohteile vorgehalten werden. Der Füllstand der einzelnen Förderer wird dabei elektronisch überwacht und entsprechende Personen benachrichtigt, sobald ein kritischer Wert unterschritten wird.

Die Materialausgabe ist als schiefe Ebene angelegt. Damit kann auch hier zusätzliche preisintensive Aktorik vermieden werden. Um die Kompaktheit der Gesamt-

zelle zu erhöhen ist die Ausgabe direkt unter der Materialzuführung implementiert. Mit dem Separieren der Auffüll- und Entnahmepunkte des Nutzers vom aktiven Teil der Zelle kann der Fräsvorgang auch während des Materialhandlings gefahrlos weitergeführt werden.

Mit der Anbindung an eine zentrale Werkstattabsaugung und einem gefüllten Rohteillager ist die Zelle somit in der Lage bis zu 60 Fertigungsaufträge völlig autonom abzuarbeiten.

### 3. Programmatisches Erstellen des Fräsprogramms und Nutzerinteraktion

Für die Erstellung von Fräsoptionen werden heutzutage vorrangig CAM-Applikationen eingesetzt. Jedoch bieten diese meist nur geschultem Personal unter hohem Adaptions- und Programmieraufwand entsprechende Ergebnisse. Zusätzlich dazu sind Part-to-Tool-Anwendungen außerhalb von spezialisierter Software wie SprutCAM Robot oder Robotmaster nicht implementiert. Ebenso würden die Individualisierungsoptionen, wie bspw. der Schriftzug auf dem Sockel des Souvenirs zu einem hohen Adaptions- bzw. Nachbearbeitungsaufwand in der Software selbst führen.

Um diese Hürden für den aktuellen Ansatz zu umgehen, wird eine einfache Bedienoberfläche implementiert, über welche die möglichen Anpassungen vorgenommen und der adaptierte Fräscod automatisch erzeugt wird.

#### 3.1. Erstellung der Roboterpfade

Den Ausgangspunkt bilden hierbei Fräsprogramme, welche im Vorfeld erzeugt wurden. Dafür wurden zunächst mit einer CAM-Software Tool-to-Part 5-Achs-Operationen erstellt und der entsprechende Automated-Programming-Tool Code (APT-Code) exportiert. Dieser beschreibt maschinenunabhängig die Bewegungen des Fräasers. Die im APT-Code beschriebenen Bahnen setzen sich dabei allein aus linearen und kreisförmigen Bewegungen zusammen. [13-14] Unter Betrachtung der Bewegungszusammenhänge aus Abbildung 2 kann somit ein Postprozessor für den eingesetzten Roboter erstellt werden. Dabei wird bspw. eine lineare Punkt-zu-Punkt-Bewegung durch einfache Koordinatentransformation konvertiert. Kreisbewegungen werden als Drehung des Werkstückes um den Mittelpunkt der entsprechenden Bahn dargestellt.

Die Abbildung der verschiedenen Prozessschritte erfolgt durch die Verwendung von unterschiedlichen Koordinatensystemen (KOS). So erhält jeder Prozessschritt ein eigenes KOS und der im APT-Code abgebildete Werkzeugwechsel wird als Wechsel des KOS übersetzt. Etwaige Bahnen für den Transfer von einer Spindel zur nächsten werden ebenfalls durch den Postprozessor integriert.

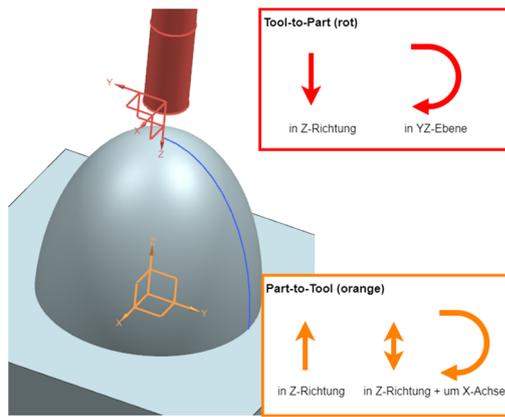


Abbildung 2: Bewegungskombination zum Fräsen der Bahn (blau)

Durch die Verwendung eines Roboters stehen in der aktuellen Anwendung sechs Bewegungsachsen zur Verfügung. Da der Ausgangscode jedoch lediglich mit einer 5-Achs-Maschine erzeugt wurde, ist das Zielsystem unterbestimmt. Dies kann jedoch genutzt werden um die Steifigkeit der jeweiligen Posen zu optimieren und etwaige Kollisionen im Bearbeitungsraum sowie Singularitäten in der Bahnplanung zu vermeiden. [15-17]

### 3.2. Nutzerinteraktion und Adaption der Fräsbahnen

Über eine einfache Bedienoberfläche erfolgt jegliche Nutzerinteraktion zur Erstellung der Fräsaufträge. Dabei werden durch eine geführte Schritt-für-Schritt Anleitung sämtlich mögliche Parameter abgefragt und in ein Vorschaumodell übersetzt. Mögliche Adaptionen sind bspw. die Wahl der Holzsorte, die Ausrichtung sowie diskrete Änderungen der Position und Größe des Objektes auf dem Sockel. Zusätzlich dazu erfolgt hierüber die Eingabe von Freitext oder Skizzen zur Individualisierung des Sockels. Eine beispielhafte Umsetzung ist dabei in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Beispielhaftes Designobjekt auf der Bedienoberfläche

Passend zum ausgewählten Designobjekt werden daraufhin die im Vorfeld erzeugten Roboterbahnen abgerufen und an die jeweiligen Parameter angepasst. Die Auswirkungen der Parameteränderungen wurden dabei ebenfalls im Vorfeld analysiert und in Algorithmen zur Adaption der Ausgangsbahnen übersetzt.

Da die Individualisierung des Sockels über Freihand-Eingaben erfolgt, können die resultierenden Bahnen nicht wie bei der Parameteradaption erzeugt werden. Hierbei wird ausgenutzt, dass die Kontur eine reine zweidimensionale Kontur ist und somit die resultierenden Roboterbewegungen nur in einer Ebene umgewandelt werden müssen. Dafür wird die erfolgte Eingabe zunächst in G-Code umgewandelt. Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen und in Abbildung 2 dargestellten Bewegungszusammenhänge können die resultierenden Roboterbahnen im Koordinatensystem der Gravurspindel ebenfalls mittels Postprozessor konvertiert werden.

Zusätzlich zur Erstellung von Fräsaufträgen kann der Gesamtzustand der Zelle über die Bedienoberfläche angezeigt werden. Dafür werden die erhobenen Parameter so aufbereitet, dass Fehler auch von nicht geschultem Personal identifiziert und behoben werden können. Dies ermöglicht den Betrieb der Fertigungszelle ohne erhöhten Schulungs- und somit Personalaufwand.

### 4. Ausblick

Das im vorliegenden Beitrag beschriebene Konzept wird derzeit in einer Tischlerei in Mecklenburg-Vorpommern umgesetzt. Ziel ist es hier, kundenindividuelle Souvenirs automatisiert und mit möglichst geringem Personaleinsatz zu fertigen. Dafür wird die Mensch-Maschine-Schnittstelle so aufbereitet, dass der Kunde sich selbstständig sein Designobjekt erstellen und in Auftrag geben kann. Durch eine zusätzliche abgesicherte Produktentnahme erfordert im gesamten Prozess lediglich das Auffüllen des Rohteillagers Personalressourcen.

Da nach aktuellem Kenntnisstand eine Forschungslücke im Bereich des Einsatzes von kleineren Industrierobotern bei Fräsaufgaben vorhanden ist, können keine belastbaren Angaben zur erreichbaren Genauigkeit oder zu realen Prozesszeiten gemacht werden. Hierfür ist geplant, dass mit der aufgebauten Zelle repräsentative Fräsvorgänge aufgenommen und hinsichtlich der angesprochenen Faktoren bewertet werden. Bei ausreichendem Kenntnisstand sollen die möglichen Fräsobjekte auf Funktionskomponenten im Möbelbau, beispielsweise Handgriffe oder auch Verbindungselemente erweitert werden. Dies würde die Einsatzmöglichkeiten des Systems erheblich erweitern.

Bedingt durch die derzeitige Erstellung der Fräsprogramme im Vorfeld und der einfachen Adaption auf die Individualisierungsoptionen kann der vollautomatisierte Ansatz des Gesamtprozesses noch nicht ausgereizt wer-

den. Hierfür ist es notwendig auch für unbekannte Bauteile eine automatisierte Pfadgenerierung zu implementieren. [18]

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesagentur für Arbeit, 2020. Fachkräfteengpassanalyse 2019, Nürnberg (Germany).
- [2] Brunello, G., Wruuck, P. Skill Shortages and Skill Mismatch in Europe: A Review of the Literature, Bonn. IZA, 2019(12346). <http://ftp.iza.org/dp12346.pdf>. Accessed 15 December 2020.
- [3] Brunete, A., Gambao, E., Koskinen, J., Heikkilä, T. et al., 2018. Hard material small-batch industrial machining robot, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 54, S. 185-199.
- [4] Çakır, M., Hekimoğlu, B., Deniz, C., 2019. Path Planning for Industrial Robot Milling Applications, *Procedia Computer Science* 158, S. 27-36.
- [5] Gołda, G., Kampa, A., 2014. Modelling of Cutting Force and Robot Load during Machining, *AMR (Advanced Materials Research)* 1036, S. 715-720.
- [6] Song, Y., Chen, Y.H., 1999. Feature-based robot machining for rapid prototyping, *Journal of Engineering Manufacture* 213, S. 451-459.
- [7] Leal-Muñoz, E., Diez, E., Marquez, J., Vizan, A., 2019. Feasibility of machining using low payload robots, *Procedia Manufacturing* 41, S. 594-601.
- [8] Ayari, O., Bouali, A., Méausoone, P.-J., 2020. Cutting forces and accuracy characterization during wood machining with serial robots, *European Journal of Wood and Wood Products* 78, S. 767-775.
- [9] Koch, J. Der eiserne Kollege: Tischlermeister Axel Eigenstetter arbeitet mit einem Fünf-Achs-Industrieroboter von Kuka. <https://www.bm-online.de/praxis-und-kollegentipps/zu-gast-beim-kollegen/der-eiserne-kollege/>. Accessed 9 December 2020.
- [10] Kollmann, F.F.P., Cote, Wilfried, A. Jr., 1968. *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [11] Dryba, S., Meißner, J., Wanner, M.-C., Wurst, O., 2017. Hochpräzises Bearbeiten von Schiffspropellern: High-precision machining of very large ship propellers, *wt Werkstattstechnik online* 107, S. 182-188.
- [12] Rileys Surface World. INTEC - ABB IRB 2400 ROBOTIC FINISHING CELL. <https://www.rileysurface-world.co.uk/live/machines2/25800.pdf>. Accessed 9 December 2020.
- [13] Deutsches Institut für Normung. DIN 66215-1:1974-08, Programmierung numerisch gesteuerter Arbeitsmaschinen; CLDATA, Allgemeiner Aufbau und Satztypen, Berlin. Beuth Verlag GmbH (66215).
- [14] Nof, S.Y., Editor, 2009. *Springer handbook of automation: With 149 tables*. Springer, Berlin.
- [15] Schneider, U., Diaz Posada, J.R., Verl, A., 2015 - 2015. Automatic pose optimization for robotic processes, in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, S. 2054-2059.
- [16] Xiong, G., Ding, Y., Zhu, L., 2019. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 55, S. 19-28.
- [17] Gonul, B., Sapmaz, O.F., Tunc, L.T., 2019. Improved stable conditions in robotic milling by kinematic redundancy, *Procedia CIRP* 82, S. 485-490.
- [18] Nagata, F., Okada, Y., Sakamoto, T., Kusano, T. et al., 2017. Preprocessor with spline interpolation for converting stereolithography into cutter location source data, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 69, S. 12115.