

Maschinenprototyp zur Bearbeitung gekrümmter Strangpressprofile (Quelle: wbk).

Vergleiche zweier Maschinenkonzepte für die Bearbeitung von Leichtmetallstrangpressprofilen

## Dünnwandige Leichtmetallteile präzise bearbeiten

**Am WBK Karlsruhe wurde eine Handhabungs- und Bearbeitungskinematik entwickelt, die sich aus einer seriellen Kinematik und einer Parallelkinematik zusammensetzt. Das ISF Dortmund befasst sich u. a. mit der mechanischen Bearbeitung von dünnwandigen Leichtbaustrukturen. Gemeinsame Untersuchungen zum Fräsen von Aluminiumstrangpressprofilen am neuen Maschinenkonzept und an einem konventionellen dreiachsigen BZ zeigen die aktuellen und künftig erreichbaren Möglichkeiten und Präzisionsgrenzen der Kinematik auf.**

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs Transregio 10 der DFG arbeiten die Technische Universität Dortmund, das Karlsruher Institut für Technologie und die Technische Universität München zusammen an der «Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen». Zu diesem Zweck wurde am Institut für Pro-

duktionstechnik (wbk) in Karlsruhe eine kombinierte Handhabungs- und Bearbeitungskinematik entwickelt, die sich aus einer seriellen Kinematik und einer Parallelkinematik zusammensetzt. Forschungsarbeiten am Institut für Spanende Fertigung (ISF) in Dortmund befassen sich u. a. mit der Prozessgestaltung bei der mechanischen Bearbeitung von dünnwandigen Leichtbaustrukturen. Gemeinsame vergleichende Untersuchungen zur frästechnischen Bearbeitung von Aluminiumstrangpressprofilen an dem neuartigen Maschinenkonzept und an einem konventionellen dreiachsigen Bearbeitungszentrum in Kreuzschlit-

tenbauweise zeigen die aktuellen Möglichkeiten und Grenzen der Kinematik sowie erreichbare Genauigkeiten bei einer Weiterentwicklung der prototypischen Maschinenteknik auf.

### Motivation und Zielsetzung

Die Untersuchungen sind Teil eines langfristig angelegten Forschungsprojekts zur produktflexiblen Methodentwicklung für die Kleinserienfertigung von dünnwandigen Tragwerkstrukturen. Diese finden vor allem in der Verkehrstechnik zur Herstellung von Aufbauten, Kabinen und Fahrstellen in stetig wachsender Anzahl Verwendung. Gemäss den technischen Anforderungen, die an derartige Bauteilgruppen gestellt werden, sollen diese leicht, hochbelastbar und steif sein, während ihre Fertigung kostengünstig in flexiblen Losgrößen erfolgen muss. Die mechanische Bearbeitung von Strangpressprofilen stellt einen unverzichtbaren Teil einer solchen Prozesskette dar. So erfolgt

### Autor

Timo Engbert, Dirk Biermann, Andreas Zabel, Martin Otter, Christian Munzinger und Gisela Lanza

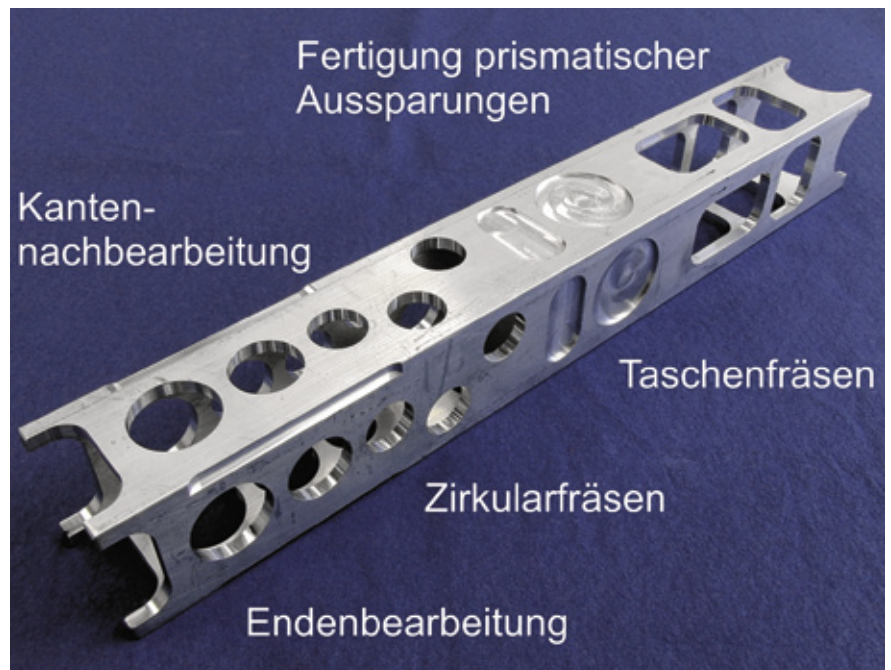
z. B. die Erzeugung von Funktionsflächen wie Führungs- oder Fügeflächen mittels spanender Bearbeitung. Existierende Maschinen- und Anlagenkonzepte in verketteten Prozessen sind dabei in der Regel auf mittlere bis grosse Serien ausgerichtet und in ihrer Flexibilität stark eingeschränkt. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen des Forschungsprojektes SFB/TR10 in Teilprojekt C4 «Kombinierte Handhabungs- und Bearbeitungskinematik» ein innovatives Maschinenkonzept entwickelt, mit dem unterschiedlichste Profilkonfigurationen ohne Rüstaufwand direkt nacheinander fertiggestellt werden können. Ansatz war hierbei die Integration von Handhabung und Bearbeitung, um synergetische Potenziale zu nutzen [1]. Im Gegensatz zu herkömmlichen Maschinenkonzepten erlaubt die umgesetzte Maschinenteknik, verschiedenste Profilarten einfach zu spannen und mittels spanender Fertigung zu bearbeiten. Darüber hinaus ist eine produktflexible Handhabung und Bearbeitung räumlich gekrümmter Profile möglich.

### Vergleich der eingesetzten Maschinenkonzepte

Zu den drei Grundkomponenten des neuartigen Maschinenkonzepts gehören ein Industrieroboter, eine Parallelkinematik und eine flexible Spannvorrichtung, die gegenüber der Parallelkinematik angeordnet ist.

Der Industrieroboter dient dazu, die aus der Prozesskette resultierenden Handhabungsaufgaben zu erfüllen [2]. Darüber hinaus verschiebt und positioniert er das Profil in der Spannvorrichtung, sodass die lokal zu bearbeitende Stelle stets im optimalen Aufspannpunkt liegt. Ein abwechselndes sequentielles Verschieben und Spannen des Profils ermöglicht die Bearbeitung des kompletten Werkstückes [3]. Die für die Zerspannung benötigte Relativbewegung der Werkzeugspindel wird von einer Parallelkinematik realisiert.

Die Untersuchungen zur mechanischen Bearbeitung dünnwandiger Aluminiumprofile wurden sowohl mittels der beschriebenen Kinematik als auch auf einem Bearbeitungszentrum mit einer 3-Achsen-CNC-Einheit in



Musterbauteil und Bearbeitungsoperationen.

Kreuzschlittenbauweise durchgeführt. Das Werkstück wird hier über einen Winkel auf dem Rundtisch manuell in einem Hydraulikschraubstock gespannt. Nach dem Positionieren des Profils durch den Industrieroboter wird das Profil in der Spanntechnik an zwei Stellen fixiert. Die pneumatischen Spannstifte passen sich dabei der Profilkontur an, sodass mit diesem System ein flexibles Spannen verschiedener Profiquerschnitte erfolgen kann. Um eine steifere Einspannung und somit eine Verbesserung des Schwingverhaltens des Werkstückes bzw. der lokal zu bearbeitenden Stelle während der Bearbeitung zu erreichen, kann der Abstand zwischen den Greiferbacken variiert werden. Für eine Bearbeitung möglichst vieler Funktionsflächen in einer Aufspannung wurde der Abstand der Greifer bei den vorliegenden Untersuchungen auf 200 mm eingestellt. Der eingestellte Wert stellt hierbei einen Kompromiss zwischen Bearbeitungsraum und erzielbarer Steifigkeit der Aufspannung dar. Gegenüber der stationären Aufspannung mit einem Hydraulikschraubstock besteht jedoch ein deutlicher Unterschied hinsichtlich der absolut erzielbaren Steifigkeit.

### Definition der Bearbeitungsaufgabe

Zur Untersuchung der Bearbeitungsgenauigkeit wurden auf beiden Maschinen Musterbauteile mit unterschiedlichen Schnittwerten aus Strangpressprofilen mit quadratischem Querschnitt gefertigt. Die Bauteile enthalten sowohl Bohrungen als auch Taschenelemente und Aussparungen. Darüber hinaus ist die Möglichkeit zur Enden- und Kantenbearbeitung gegeben. Sämtliche Funktionselemente wurden mit einem übermittigt schneidenden Einzahnfräser mit einem Durchmesser von  $d = 12$  mm erzeugt. Durch die Fertigung unterschiedlicher Bohrungsdurchmesser mit einem Fräser ergeben sich aus der Differenz zum konstanten Werkzeugdurchmesser verschiedene Bahnradien der Spindelbewegung [4]. Wird durch die Programmierung ein konstanter Vorschub vorgegeben, lassen sich aus der Genauigkeit des Bearbeitungsergebnisses Schlüsse auf das dynamische Verhalten der Maschinenachsen ziehen.

Um die Positioniergenauigkeit überprüfen zu können, sind die Mittelpunkte einiger Bohrungen versetzt angeordnet. Die Taschenelemente be-

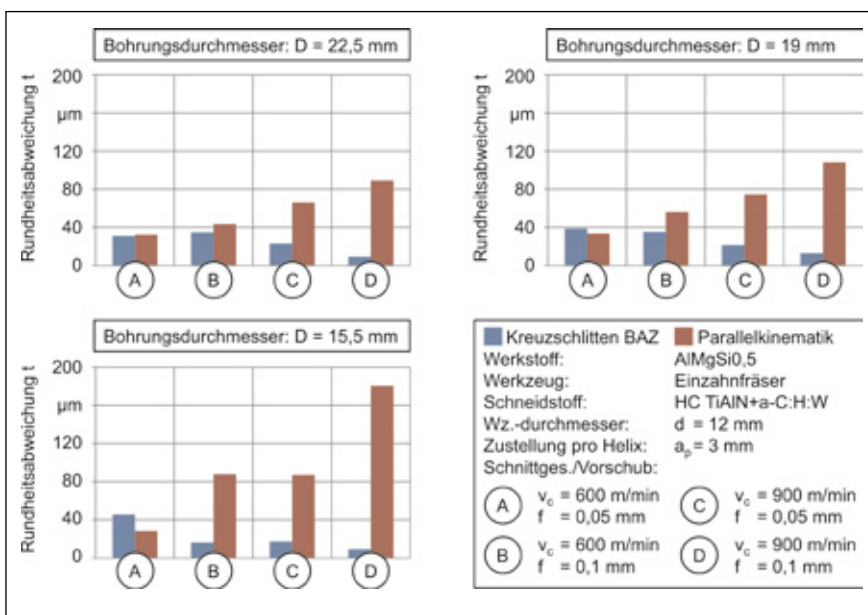
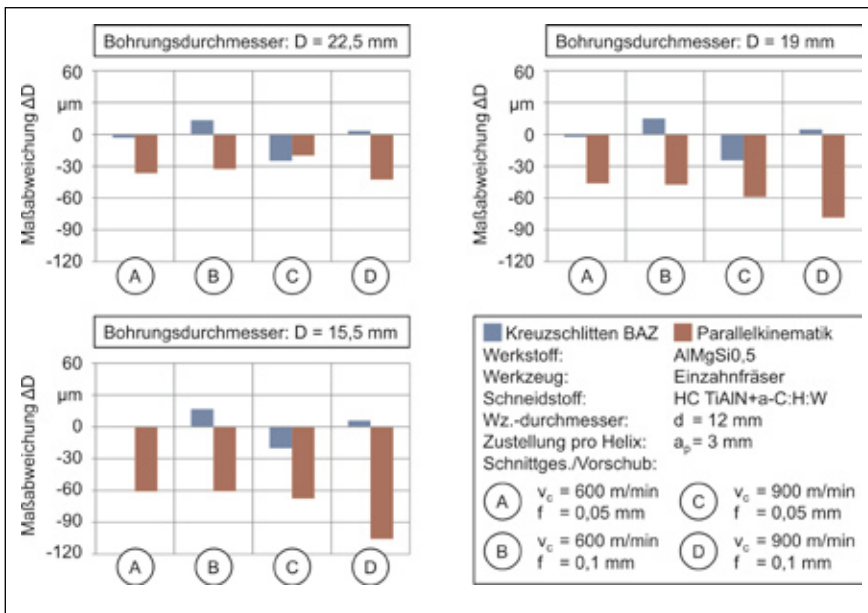
sitzen eine definierte Tiefe und geben somit Aufschluss über die Positioniergenauigkeit entlang der Werkzeugachse. Eine optische Kontrolle der erzeugten Oberflächen sowie die Messung der Oberflächenrauheit dient als Mass der Gleichmässigkeit der Bewegung der Spindel in der Ebene parallel zur Bauteiloberfläche. Die Funktionselemente werden im Anschluss an die Fertigung mittels 3D-Koordinatenmessung auf ihre

Masshaltigkeit überprüft. Das Musterbauteil bietet somit vielfältige Möglichkeiten, die Bearbeitungsgenauigkeit der beiden verwendeten Maschinenkonzepte zu untersuchen. Die Grenzen der beiden Konzepte lassen sich durch eine systematische Steigerung der Bearbeitungsparameterwerte Schnittgeschwindigkeit und Radialvorschub aufzeigen. Sämtliche Fräsoperationen wurden dabei im Gleichlauf ausgeführt, um Quetsch-

vorgänge zwischen der zur Adhäsion neigenden Aluminiumknetlegierung und dem Werkzeug auf ein Minimum zu reduzieren.

## Vergleichende Ergebnis-analyse

Die Auswertung der Bearbeitungsergebnisse erfolgt hier exemplarisch anhand von zirkulargefrästen Bohrungen. Bei der Bearbeitung auf einem dreiachsigen BAZ müssen die beiden Achsen senkrecht zur Spindelachse bei jeder vollständigen Umdrehung auf der Helixbahn zweimal stark beschleunigt werden, was die kreiszylindrische Form beeinflussen kann. Da bei einem parallelkinematischen Maschinenkonzept alle Achsen parallel am Tool Center Point angreifen, werden bei einer Zirkularfräsbewegung bzw. jeder beliebigen Relativbewegung alle Achsen beschleunigt. Die Beschleunigung ist dabei von der Vorschubgeschwindigkeit und der Differenz aus Bohrungs- und Werkzeugdurchmesser abhängig. Bei der Prozessauslegung muss daher die maximal mögliche Beschleunigung der Maschinenachsen berücksichtigt werden. Aus den Messergebnissen ist ersichtlich, dass für das parallelkinematische Maschinenkonzept mit einer Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 600$  m/min und einem Vorschub von  $f = 0,05$  mm die besten Ergebnisse im untersuchten Wertebereich für die jeweiligen Durchmesser erzielt werden konnten. Eine grössere Abweichung bei kleineren Durchmessern ergibt sich aus der höheren erforderlichen Dynamik der Achsen. Im Gegensatz dazu, sind beim Einsatz des BAZ auch bei gesteigerten Schnittwerten (Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 900$  m/min, Vorschub  $f = 0,05$  mm) geringe Massabweichungen zu beobachten. An dieser Stelle zeigt sich die aktuelle Limitierung des parallelkinematischen Maschinenkonzeptes. Bedingt durch die am Institut für Produktionstechnik entwickelte und prototypisch über dSpace umgesetzte Steuerungstechnik können nicht die gleichen Regeltakte wie bei kommerziell erhältlichen Maschinen gefahren werden. Hierdurch kommt es direkt zu



Rundheitsabweichung in Abhängigkeit von Maschinenkonzept und Prozessauslegung.

einer Limitierung der Dynamik sowie einer Begrenzung der Bahnge- nauigkeit des Maschinenkonzeptes. Einen weiteren Einflussfaktor stellt die Steifigkeit der Einspannung der Profile dar, welche in einem stationären Hydraulikschraubstock höher ist als bei der flexiblen Spanntechnik des parallelkinematischen Konzeptes. Die Trends aus der Auswertung der Massabweichung sind auch in der Rundheitsabweichung klar zu erkennen.

### Weiterer Entwicklungsaufwand nötig

Anhand der Auswertung der Untersuchungen wurde für das parallelkinematische Maschinenkonzept ein systematischer Fehler in Bezug auf die Absolutgenauigkeit erkannt. Mit Hilfe eines Korrekturwertes zur Kompensation des Fehlers konnte die Massabweichung um ca. 50 % reduziert werden. Für sämtliche betrachteten Durchmesser lagen die Massabweichungen aller zirkulargefrästen Bohrungen nach der Anpassung in einem Bereich zwischen  $16 \mu\text{m} \leq \Delta D \leq 36 \mu\text{m}$ . Ein weiterer Ansatz zur Reduzierung der Mass- und Rundheitsabweichungen ist eine Weiterentwicklung der Steuerungstechnik. Die Beschleunigung der Achsen ist bei dem aktuellen Stand des Prototyps auf  $10 \text{ m/s}^2$  beschränkt. Eine Steigerung und somit Verbesserung der Genauigkeit ist maschinenseitig möglich, erfordert jedoch einen weitgehenden Entwicklungsaufwand. Die Ergebnisse, die mit dem verwendeten Bearbeitungszentrum erreicht wurden, stellen dabei Referenzwerte entsprechend dem Stand der Technik dar. Bei angepasster Prozessgestaltung können jedoch auch derzeit bereits Strangpressprofile mit erheblich gesteigerter Flexibilität und vergleichbarer Genauigkeit unter Verwendung des vorgestellten parallelkinematischen Maschinenkonzeptes bearbeitet werden.

### Danksagung

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 10, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

### Literatur

- [1] Fleischer, J.; Lanza, G.; Munzinger, C.; Schmidt-Ewig, J.; Ruch, D.; Schneider, M.; Stengel, G.: Maschinenteknik zur flexiblen Herstellung räumlich gekrümmter Strangpressprofile, ZWF Jahrg. 101 (2006) 7/8, S. 426–430.
- [2] Munzinger, C.; Schmidt-Ewig, J.-P.; Ochs, A.; Gerbracht, T.: Kombinierte Handhabungs- und Bearbeitungs kinematik, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Tekkaya, E.-A.; Baier, H.; Biermann, D.; Löhe, D.; Schulze, V.; Zäh, M.; Marré, M.; Integration von Urformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen, Auflage 500, ISBN 978-3-18-366802-1, Reihe 2, S. 295–316.
- [3] Lanza, G.; Munzinger, C.; Fleischer, J.; Ruch, D.; Elser, J.: Flexible und intelligente Greiftechnik, VDI Verlag GmbH Düsseldorf, E.-A.; Baier, H.; Biermann, D.; Löhe, D.; Schulze, V.; Zäh, M.; Marré, M.; Integration von Urformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen, Auflage 500, ISBN 978-3-18-366802-1, Reihe 2, S. 275–294.
- [4] Weinert, K.; Hammer, N.: Analyse der spanenden Bohrbearbeitung an Space-Frame-Strukturen. Aluminium 80 (2004) 12, S. 1382–1387.

### Die Autoren

Dipl.-Ing. Timo Engbert, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund  
 Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann, Institutsleitung des ISF  
 Priv.-Doz. Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Andreas Zabel, Oberingenieur des ISF  
 Dipl.-Ing. Martin Otter, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
 Dr.-Ing. Christian Munzinger, Institutsleitung des wbk  
 Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, Institutsleitung des wbk

### Infos

Institut für Spanende Fertigung (ISF), Technische Universität Dortmund,  
 D-44227 Dortmund  
 Institut für Produktionstechnik (wbk), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
 D-76131 Karlsruhe