

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-05-41
Datum der Einreichung: 13.02.2026
Datum der Annahme: 21.05.2026
Datum der Veröffentlichung: 24.06.2026

Robotische Flexibilität trifft auf EDM-Präzision

Roboterassistiertes Endeffektorsystem zum Heißdrahtschneiden

T. Klein, A. Schwertner, A. Puchta, J. Fleischer

ZUSAMMENFASSUNG Die steigende Nachfrage nach individualisierten Produkten erfordert flexible Produktionssysteme. Hierbei stehen roboterassistierte Systeme im Fokus, diese weisen jedoch oft nicht die notwendige Steifigkeit für hochpräzise Bearbeitungsprozesse auf. Als flexibler Ansatz für Zahnräder und Getriebe wird das Drahterodieren mit zwei Robotern betrachtet. Hierfür wurde ein Endeffektorsystem entwickelt, wodurch ein Heißdraht am Roboter fixiert beziehungsweise variabel gestreckt und gestaucht werden kann. Das Schneiden beliebiger Geometrien in Polymer-schaum wurde nachgewiesen, wodurch das Potenzial zweier Roboter im Wire-EDM-Prozess gezeigt werden konnte.

STICHWÖRTER

Erodieren, Flexible Fertigungssysteme, Industrieroboter

Robot-assisted end effector system for hot wire cutting/Robotic flexibility meets EDM-precision

ABSTRACT The increasing demand for customized products requires flexible production systems. The focus here is on robot-assisted systems, but these often lack the necessary rigidity for high-precision machining processes. Wire EDM with two robots is considered a flexible approach for gears and gearboxes. An end effector system was developed for this purpose, allowing a hot wire to be fixed to the robot or variably stretched and compressed. The cutting of arbitrary geometries in polymer foam was demonstrated, showing the potential of two robots in the wire EDM process.

1 Motivation und Stand der Technik

Die Rahmenbedingungen in der industriellen Fertigung sind zunehmend durch eine steigende Nachfrage nach individualisierten Produkten sowie eine wachsende Variantenvielfalt geprägt. Produktionssysteme müssen daher neben hoher Produktivität insbesondere eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit aufweisen, um unterschiedliche Varianten wirtschaftlich herstellen zu können. Konventionelle, stark spezialisierte Maschinenkonzepte sind in vielen Fällen zwar leistungsfähig, jedoch häufig nur eingeschränkt für schnelle Umrüstungen sowie den Wechsel zwischen unterschiedlichen Prozessen ausgelegt. Somit führt Flexibilität in klassischen Fertigungsanlagen zu hohen Kosten. [1; 2]

Vor diesem Hintergrund adressiert das wbk, Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie, die Entwicklung roboterassistierter Fertigungssysteme im Rahmen des Themenbereichs „Wertstromkinematik“. Robotersysteme bieten aufgrund ihrer freien Programmierbarkeit und Rekonfigurierbarkeit grundsätzlich geeignete Voraussetzungen für flexible Produktionsketten [3]. Gleichzeitig sind Roboterkinematiken im Fertigungsbetrieb Prozesskräften ausgesetzt und müssen zur Einhaltung von Maß- und Oberflächenanforderungen eine ausreichende statische und dynamische Steifigkeit aufweisen [4]. Zwar wurde die grundsätzliche Eignung roboterassistierter Fertigungssysteme

zur Herstellung einer breiten Produktbandbreite gezeigt, jedoch werden beispielsweise Getriebekomponenten weiterhin überwiegend mit traditionellen Verfahren gefertigt. Ein wesentlicher Grund hierfür liegt in den hohen Anforderungen an Präzision und Steifigkeit, die insbesondere bei der spanenden Bearbeitung gehärteter Werkstoffe auftreten und daher überwiegend auf traditionelle Weise bearbeitet werden [5].

Eine mögliche Lösung für dieses Problem ist das Erodieren, auch als EDM (Electrical Discharge Machining) bezeichnet [6]. Beim EDM erfolgt der Materialabtrag durch elektrische Entladungen zwischen Elektrode und Werkstück, wodurch im Vergleich zu spanenden Verfahren nur geringe Prozesskräfte auftreten. Diese Eigenschaft macht EDM besonders interessant für den Einsatz in roboterassistierten Fertigungssystemen, da die Anforderungen an die mechanische Steifigkeit der Kinematik deutlich reduziert werden. Beim Drahterodieren (Wire-EDM) dient ein Draht als Elektrode, welcher entlang einer Bahn durch das Werkstück geführt wird. Während konventionelle Wire-EDM-Maschinen häufig durch begrenzte Freiheitsgrade in ihrer geometrischen Flexibilität eingeschränkt sind, kann die Kombination von EDM und Robotik die jeweiligen Nachteile beider Technologien ausgleichen und gleichzeitig ihre Stärken bündeln [7, 8]. Aktuelle Ansätze nutzen hierfür unter anderem bandsägenähnliche Endeffektoren mit lokaler Zufuhr des Dielektrikums, benötigen

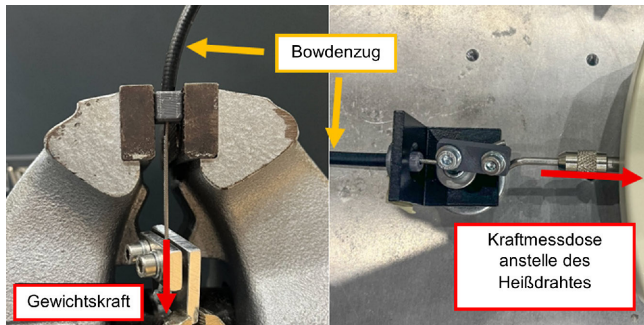


Bild 1 Darstellung des Versuchsaufbaus zur gewichtsbasierten Drahtspannung mithilfe eines Bowdenzugs als Umlenkung. Foto: wbk4

jedoch teilweise große Roboter und erhebliche Freiräume um das Werkstück herum, da nur ein Roboter verwendet wird [7, 9]. Darüber hinaus existieren Ansätze zum robotischen Heißdrahtschneiden, allerdings geht der Abstand der robotischen Endeffektoren mit einer Biegung des Drahts einher [10]. Demgegenüber verfolgt das Forschungsvorhaben einen kompakteren Ansatz, bei dem der Draht zwischen zwei Robotern gespannt wird und eine stufenlose Abstandsänderung der Roboter ohne Durchbiegung des Drahts einhergeht. Dadurch kann die Werkzeuggeometrie in zwei kompakte Endeffektoren aufgeteilt und der Aufbau insgesamt flexibler gestaltet werden.

Der Fokus der präsentierten Arbeit liegt insbesondere auf der mechanischen Architektur des Endeffektorsystems zum Spannen, Positionieren und Führen eines Drahtes zwischen zwei Robotern, die Bahnführung im Arbeitsraum, die Handhabung der Anlage sowie die Validierung der Computer-Aided Manufacturing-Prozesskette (CAM-Prozesskette). Aus diesem Grund wird ein vereinfachter Versuchsaufbau betrachtet, der mittels Heißdrahtschneidens Geometrien aus Polymerschäum erzeugt. Damit lassen sich zentrale systemische Fragestellungen unter deutlich reduzierten Sicherheits- und Integrationsrisiken untersuchen.

2 Endeffektor zum Heißdrahtschneiden

Für das Heißdrahtschneiden wird ein Endeffektor benötigt, welcher den Draht mechanisch vorspannen, seine räumliche Lage reproduzierbar definieren und eine prozessfähige elektrische Beheizung bereitstellen kann. Dabei sind insbesondere ein kompakter Aufbau, eine robuste und wartungsarme Ausführung sowie eine benutzerfreundliche Handhabung zu berücksichtigen.

2.1 Drahtvorspannung

Die Drahtspannung stellt eine zentrale Stellgröße für die Schnittqualität und Prozessstabilität des Heißdrahtschneidprozesses dar. Eine hohe Vorspannkraft reduziert die Drahtdurchbiegung unter Prozesslast und verbessert dadurch die Maßhaltigkeit und Wiederholgenauigkeit der erzeugten Konturen. Gleichzeitig steigt mit zunehmender Vorspannung die mechanische Beanspruchung des Drahtes, wodurch die Anfälligkeit für Drahtbruch zunimmt. Zusätzlich ist die Drahtspannung so auszulegen, dass Einflüsse aus dem Gesamtsystem, insbesondere Positionsabweichungen der Roboter, thermische Längenänderungen des Drahtes sowie der variierende Abstand der Endeffektoren, ohne unzulässige Spannungsspitzen kompensiert werden können. Diese Aus-

gleichsfunktion wird im vorliegenden Aufbau durch einen variablen Endeffektor realisiert.

Der Drahtdurchmesser von 0,2 mm wurde so gewählt, dass er im typischen Bereich des Drahtdurchmessers beim Wire-EDM-Prozess liegt, um den Umstieg auf den Prozess so einfach wie möglich zu gestalten [11]. Für die Realisierung der Drahtspannung wurden zwei Lösungsansätze betrachtet: eine federbasierte Drahtspannung sowie eine gewichtskraftbasierte Drahtspannung über einen Umlenkmechanismus in ein nicht bewegtes System.

Die gewichtskraftbasierte Drahtspannung bietet den Vorteil einer konstanten Kraft entlang des Weges und einer besonders einfachen Anpassbarkeit durch die Variation der Masse. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass sich das Gewicht in einem stationären, ruhenden Bezugssystem befindet, da Beschleunigungen und Orientierungsänderungen des Roboters andernfalls zu Zusatzkräften und damit zu unerwünschten Spannungsschwankungen führen würden. Um die Gewichtskraft dennoch nutzen zu können, wurde zunächst untersucht, ob sich die Vorspannkraft über den Roboterarm in einen ruhenden Bereich übertragen lässt. Hierfür wurden Versuche mit Bowdenzug-ähnlichen Kraftübertragungen durchgeführt.

Dazu wurde sowohl ein Bowdenzug genutzt, welcher in **Bild 1** zu sehen ist, als auch ein Polytetrafluorethylen (PTFE-) Schlauch, in dem der Draht direkt geführt wurde. Bild 1 stellt den Versuchsaufbau zur Kraftmessung dar. Dargestellt sind die Enden des Bowdenzugs und deren Adaption an Kraftmessmesseinheit (rechts) und Gewicht zur Kräfteerzeugung (links). Die Länge des Bowdenzugs zwischen den Enden beträgt ungefähr 2 m. In der Praxis erwies sich dieser Ansatz als ungeeignet: Bereits ohne ausgeprägte Krümmungen traten hohe Reibkräfte auf, insbesondere in Form ausgeprägter Haftreibung und zusätzlicher Gleitreibung. Die gemessene Reibkraft lag bei über 3 N, wodurch sich die resultierende Drahtspannung stark abhängig von der Bewegungsrichtung des Systems veränderte. Beim Vergrößern des Arbeitsraums (Auszug) führte die zusätzliche Reibung zu deutlich erhöhten Zugkräften, die bis zum Drahtbruch führten. Beim Verkleinern des Arbeitsraums (Einzug) bremste die Reibung die Gewichtsbewegung, was zum Absinken der Drahtspannung und damit zum Durchbiegen des Drahtes führte. Da am Roboterarm zwangsläufig eine Leitungsführung mit Krümmungen erforderlich ist, wäre im realen Betrieb mit noch größeren Reibeeinflüssen zu rechnen. Der gewichtskraftbasierte Ansatz wurde daher verworfen.

Als robuste und kompakte Lösung wurde eine federbasierte Drahtspannung umgesetzt. Zum Einsatz kommt eine Rolltorsionsfeder (circa 5 m Länge), die aufgrund ihrer großen wirksamen Federlänge einen hinreichend linearen Kraftverlauf über den betrachteten Arbeitsbereich ermöglicht. Die Rolltorsionsfeder ist in **Bild 2** im eingebauten Zustand zu sehen. Im Versuchsaufbau konnte ein Arbeitsbereich von bis zu 0,8 m Drahtweg ohne problematische Kraftsprünge abgedeckt werden; größere Arbeitswege wären ebenfalls realisierbar, sind für den vorliegenden Aufbau jedoch nicht erforderlich.

Die Rolltorsionsfeder wird zwischen das Federgehäuse und die Welle gewickelt, wobei die Welle als sich drehendes Bauteil die bewegte Seite der Feder bildet und das Gehäuse die statische. Auf der Antriebsseite der Welle wirkt die Torsionsfeder, die durch Vorspannen der Welle ein Drehmoment aufbaut. Auf der Abtriebsseite der Welle ist eine Spule angeordnet, auf der der Drahtabschnitt aufgewickelt wird, der aktuell nicht im Arbeits-

raum benötigt wird. Um thermische Einflüsse zu reduzieren, ist die Spule an der Außenseite mit Aluminium beschichtet, sodass ein eventuell noch warmer Draht beim Aufwickeln nicht zu einer Schädigung des Spulenkörpers, welcher aus Polyethylenterephthalat-Glykol (PETG) besteht, führt. Die resultierende Zugkraft am Draht hängt von der Spulengeometrie sowie vom Vorspannwinkel der Feder ab. Der finale Mechanismus zur Erzeugung der Drahtvorspannung ist in **Bild 3** zu sehen.

2.2 Drahteinspannung

Die Drahteinspannung hat die Aufgabe, den Heißdraht mechanisch sicher zu fixieren und gleichzeitig seine räumliche Lage mit hoher Wiederholgenauigkeit zu definieren. Da im vorliegenden Aufbau kein laufender Draht vorgesehen ist, muss der Draht an beiden Endeffektoren zuverlässig gehalten werden; aufgrund des variablen Endeffektorabstands ergibt sich dabei ein festes Bezugssystem (fixer Endeffektor) und ein variables Ende (variabler Endeffektor), welches die Spann- und Ausgleichseite darstellt. Die konstruktive Auslegung unterscheidet sich entsprechend zwischen beiden Enden.

2.2.1 Fixer Endeffektor

Am fixen Endeffektor (festes Ende), welcher links in **Bild 4** zu sehen ist, wurde zur Sicherstellung der axialen Zwangsbedingung (Zugrichtung des Drahtes) eine Klemmbacken-Einspannung realisiert. Diese Lösung ist konstruktiv einfach, robust und gewährleistet eine sichere Kraftübertragung in der Drahtlängsrichtung. Für die präzise räumliche Lage des Drahtes genügt die Klemmung allein jedoch nicht, da die radiale Position (quer zur Drahtachse) bei reinem Klemmen, trotz Einlegekerbe in der Klemmbacke, nur begrenzt reproduzierbar ist. Daher wird die Positionierung am Endeffektorausgang zusätzlich über eine Führungsbohrung definiert. Bei einem Bohrungsdurchmesser von 0,25 mm und einem Drahtdurchmesser von 0,2 mm ergibt sich ein radialer Freiheitsgrad von 0,05 mm. Dadurch wird die Drahtlage am Austritt geometrisch geführt, ohne die Montage durch eine zu enge Passung unnötig zu erschweren. Die Führungsbohrung wird beim Wire-EDM aufgrund des Abriebs durch den laufenden Draht mittels Keramikeinsatz realisiert. Da beim festen Ende keine Relativbewegung zwischen Draht und Bohrung stattfindet, ist dies nicht nötig. Stattdessen wurde eine Düse aus dem 3D-Druck verwendet.

2.2.2 Variabler Endeffektor

Am variablen Endeffektor, welcher rechts in **Bild 4** zu sehen ist, wird zunächst ebenfalls eine Führung über eine Bohrung analog zum festen Ende erprobt. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass diese Ausführung gegenüber Verschmutzungen, Oberflächenunebenheiten sowie Drahtfehlern (zum Beispiel Knicke) empfindlich ist. Das Risiko des Steckenbleibens führt hierbei zu instabiler Drahtführung und kann bis zum Drahtbruch beziehungsweise zu Kontaktproblemen führen. Aus diesem Grund wurde die Drahteinspannung am variablen Ende auf eine rollenbasierte Führung umgestellt.

Das Rollenprinzip wurde so ausgelegt, dass die beiden radialen Freiheitsgrade (x-/y-Richtung quer zur Drahtachse) über zwei orthogonal zueinander angeordnete Rollenstufen definiert wer-

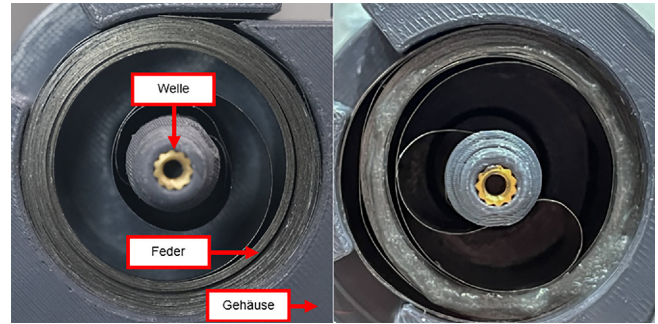


Bild 2 Die Rolltorsionsfeder bei verschiedenen Auslenkungen. Der Durchmesser der Welle beträgt circa 15 mm. Foto: wbk5

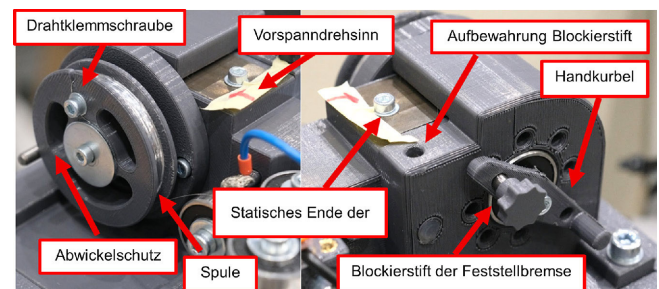


Bild 3 Federmechanismus zur Erzeugung der Drahtspannung, Vorder- und Rückseite. Foto: wbk5

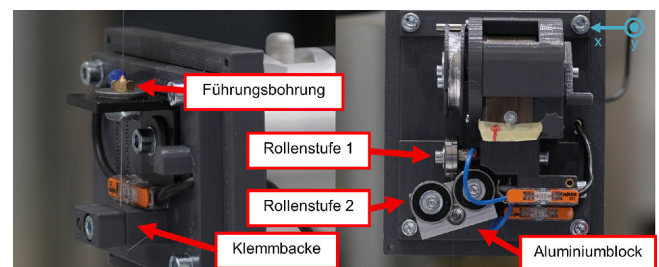


Bild 4 links: fixer Endeffektor, rechts: variabler Endeffektor. Der variable Endeffektor befindet sich auf einer circa 200 mm x 200 mm großen Platte, der fixe Endeffektor auf einer circa 100 mm x 150 mm großen Platte. Foto: wbk 6

den. In Drahtlängsrichtung (axial) erfolgt die Fixierung erst auf der Spulenseite nach einigen Wicklungen; dazu ist eine Klemmung mittels seitlicher Schraube vorgesehen, um den Draht bei Bedarf mechanisch fest einzuspannen und zu arretieren. Diese Drahtklemmschraube ist in **Bild 3** zu sehen. Als Umlenkrollen werden dabei direkt die Außenringe von Kugellagern genutzt. Dadurch kann an bauraumkritischen Stellen auf zusätzliche Wellenlagerungen verzichtet werden. Gleichzeitig vereinfacht dies die Justage: Die Lager werden auf einem Halter mit Langloch befestigt, sodass der Rollenabstand eingestellt werden kann.

Die finale Version der Rollenführung ist in **Bild 4** zu sehen. In der ersten Rollenstufe, welche die Position in Y-Richtung festlegt, wurde das zweite Lager entfernt, da der Draht aufgrund des Versatzes zur Spule ohnehin mit einem Umlenkwinkel von etwa 45° über eine Rolle geführt wird und somit ausreichend sicher anliegt. In der zweiten, dem Arbeitsraum vorgelagerten Rollenstufe wurde die Geometrie so angepasst, dass der Draht die beiden Rollen nicht mehr an derselben axialen Position berührt, sondern leicht S-förmig geführt wird. Dadurch wird der walzende Effekt



Bild 5 „Proxxon Heißdraht-Schneidebühl Termocut 650“ im eingebauten Zustand. Foto: wbk8

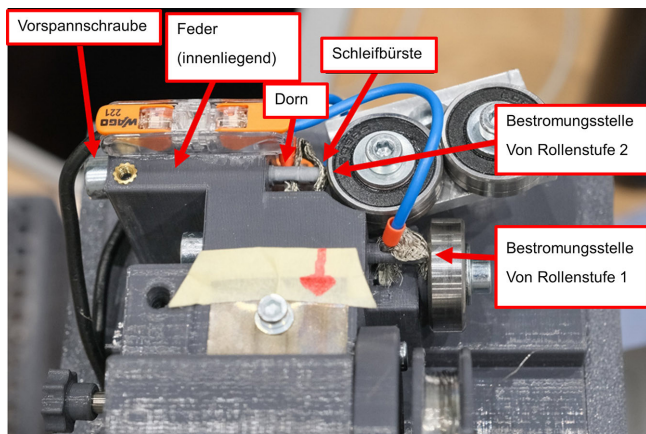


Bild 6 Drahtbestromung am variablen Endeffektor. Foto: wbk9

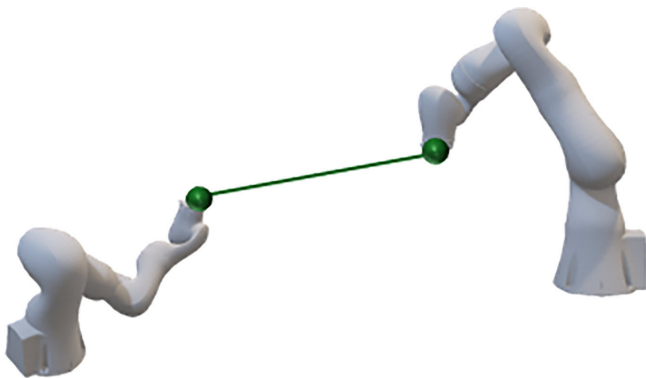


Bild 7 Prinzipskizze des Gesamtkonzepts. Grafik: wbk9

vermieden, da der Draht nicht mehr gleichzeitig zwischen zwei gegenüberliegenden Rollen eingeklemmt wird, sondern die Rollen den Draht lediglich führen. Zur zusätzlichen Stabilisierung der Drahtlage wurden in die Außenringe der Lager umlaufende Nuten eingebracht, in die der Draht geführt wird (Nutentiefe circa 0,15 mm). Der minimale Lagerabstand blieb bei circa 0,15 mm. Durch die beidseitigen Nuten ergibt sich jedoch eine deutlich größere effektive Führungsfreiheit ($\approx 0,45$ mm), wodurch kleinere Verschmutzungen und Drahtunregelmäßigkeiten toleriert werden, ohne dass der Drahtlauf blockiert oder instabil wird. Somit ist auch die axiale Positionierung in X-Richtung definiert.

2.3 Elektrische Energieübertragung auf den Draht

Für die elektrische Energiezufuhr und -regelung wurde die Stromversorgung eines kommerziellen Heißdrahtschneiders gewählt. Das verwendete Handgerät ist in **Bild 5** zu sehen.

Für die Übertragung auf den Draht wurde am festen Endeffektor eine Klemmvorrichtung zur mechanischen Fixierung und zur elektrischen Kontaktierung des Drahtes eingesetzt. In Kombination mit einer Führungsbohrung zeigte sich, dass der metallische Kontakt zu lokaler Wärmeabfuhr sowie ausgeprägten Temperaturgradienten führte. Experimentell trat dabei eine lokale Überhitzung in der Nähe der Kontaktstelle auf, die den Draht schwächte und das Risiko eines Drahtbruchs erhöhte. Daher wird die elektrische Einspeisung so ausgelegt, dass sie am letzten Berührungspunkt des Endeffektors erfolgt und zusätzliche metallische Kontaktstellen im erhitzten Drahtbereich vermieden werden. Die Bestromung erfolgt über die Führungsbohrung, die das letzte berührende Bauteil vor dem Bauraum darstellt (vgl. Bild 4).

Am variablen Endeffektor wurde eine Rollenführung realisiert. Die Rollen bilden zugleich den letzten Kontaktpunkt des Positionierungssystems. Folglich wird die elektrische Energieübertragung an dieser Stelle umgesetzt. Die eingesetzten Rollen basieren auf kugelgelagerten Umlenkrollen und sind elektrisch leitfähig. Ein zunächst untersuchter Ansatz stellt die Einspeisung über den feststehenden Innenring des Lagers dar, um eine Kontaktierung ohne eine bewegte Übergangsstelle zu realisieren. Dieser Ansatz erweist sich jedoch als nicht ausreichend reproduzierbar: Der elektrische Übergangswiderstand zwischen Innen- und Außenring zeigt starke Schwankungen in Abhängigkeit von Lagerbelastung, Schmierung und vermutlich auch der Verschmutzung und Korrosion. Messungen zeigten Widerstände von wenigen Ohm bis hin zu Größenordnungen im k Ω -Bereich. Aufgrund dieser Inkonstanz wurde der Ansatz verworfen.

Stattdessen wird eine kompakte Schleifkontaktlösung entwickelt, die ohne zusätzliche, platzintensive Wellen- und Schleifringssysteme auskommt. Dieses Konzept wird im Folgenden erläutert und in **Bild 6** dargestellt. Hierzu wird ein feder-vorgespannter Dorn auf die Außenfläche des Außenrings (Umlenkrolle) gedrückt. Am Dorn ist eine Schleifbürste (Kohlebürstenprinzip) befestigt, die den elektrischen Kontakt zum Kabel herstellt. Die Bürsten sind auf den Dorn aufgeklebt. Der Strom wird somit über das Kabel zur Bürste, von dort in den Außenring und schließlich in den Draht übertragen. Durch den axialen Hub des Dorns von etwa 3 mm können kleine Rundlauffehler sowie Montage- und Positionsabweichungen ausgeglichen werden.

2.4 Gesamtkonzept

In **Bild 7** ist eine Prinzipskizze des Gesamtkonzepts dargestellt. Die grünen Punkte stellen jeweils den festen beziehungsweise den variablen Endeffektor dar. Diese sind jeweils an den Enden der in weiß dargestellten Roboter montiert und spannen den in grün dargestellten Draht. Im Ergebnis liegt das System nicht mehr als Kombination einzelner aufschraubarer Funktionsblöcke vor, sondern als einheitliches, funktionsintegriertes Design, in dem die zuvor getrennt entwickelten Funktionen konstruktiv zusammengeführt sind. Die Fertigung der Funktionsmodule kann durch den Einsatz additiver Fertigung weitgehend in einem Bauteil realisiert werden. Ausgenommen sind thermisch beziehungsweise mechanisch hochbeanspruchte Komponenten,



Bild 8 links: Adapterflansch UR auf Funktionsmodul, mitte: montierter Endeffektor, rechts: montierter Endeffektor mit aufgestecktem Gehäuse. Foto: wbk10

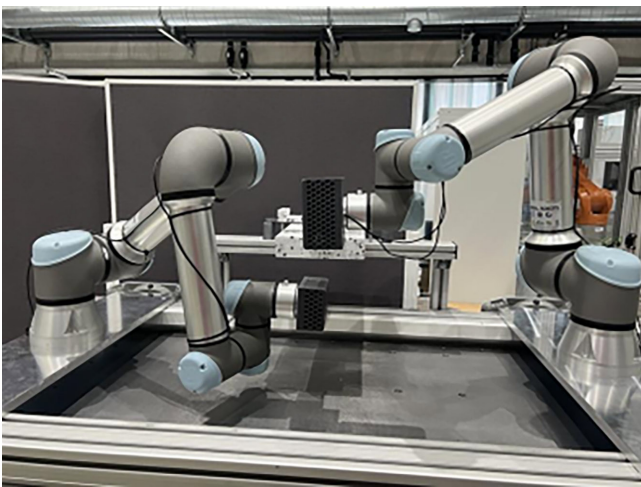


Bild 9 Roboterpositionierung. Die Basen der Roboter befinden sich circa 1,15 m voneinander entfernt. Foto: wbk11

die aus geeigneten Werkstoffen gefertigt sind. Dadurch wird eine hohe Funktionsintegration bei gleichzeitig kurzer Fertigungs- und Iterationszeit erreicht. Das Gesamtkonzept ist in **Bild 8** dargestellt. Zum Schutz der Endeffektoren ist im rechten Bild ein Gehäuse vorgesehen.

3 Validierung

Um das entwickelte Endeffektorsystem experimentell zu erproben, wird eine entsprechende Versuchsanlage aufgebaut. Wie in **Bild 9** dargestellt, sind zwei kollaborierende Industrieroboter des Typs Universal Robots „UR5e“ auf einem Gestell einander zugewandt positioniert. Der Abstand der Roboter ist so gewählt, dass sich die jeweiligen Reichweiten überlappen und dadurch ein gemeinsamer Arbeitsbereich entsteht. Der Abstand beträgt 1,15 m. Eine Variation ist aufgrund der Montage auf item-Aluprofilen ohne großen Aufwand möglich.

Bild 10 zeigt die Fertigung eines Probewerkstücks. Links ist das Endeffektorsystem zu sehen, welches rechtwinklig zum Werkstück eine Bahn abfährt und somit zweidimensional trennt. Im rechten Bild verkippt das Endeffektorsystem, sodass der Draht einen Winkel von 45° zum Werkstück aufweist. Um diese Verkipfung ohne Kollision mit dem Bauteil durchzuführen, muss der Endeffektorabstand erhöht werden. Diese Abstandsvergrößerung

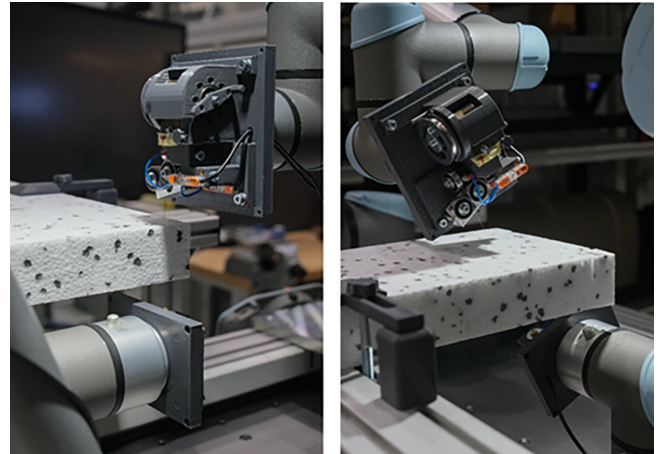


Bild 10 links: gerader Schnitt durch Polymerschaum, rechts: dreidimensionaler Schnitt durch Schnittwinkelverstellung. Foto: wbk11

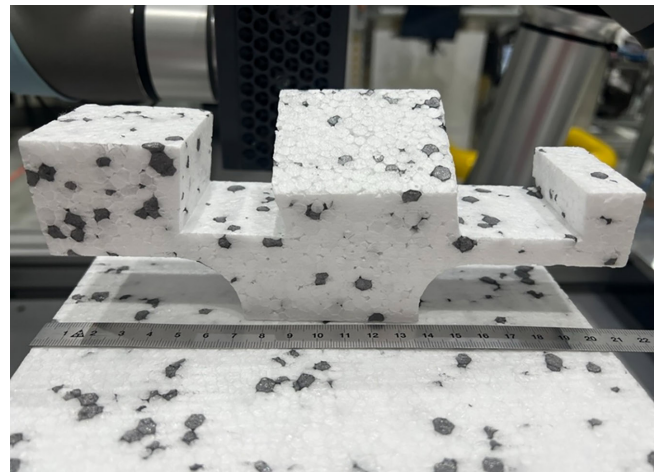


Bild 11 Probewerkstück als Resultat des Demoprogramms. Die Länge beträgt circa 200 mm (siehe Lineal). Foto: wbk12

wird während der Verkipfung im aktiven Schnittprozess durchgeführt, sodass der Abstand zwischen Bauteil und Endeffektor immer möglichst gering bleibt. Somit können auch dreidimensionale Schnitte durchgeführt werden.

Zur Funktionsdemonstration dient ein Versuchsprogramm, das mehrere typische Geometrielemente abbildet. Dabei wird insbesondere das Abtrennen eines Blocks, das Schneiden von Rundungen, das Ausbilden rechtwinkliger Ecken sowie das Schneiden einer Schräge von etwa 45° erprobt. Das dabei entstandene Probewerkstück ist in **Bild 11** zu sehen.

Zur Validierung der Präzision des Endeffektorsystems werden aus einem EPS-Block dünne Scheiben getrennt. Dabei werden gerade Schnitte (vgl. Bild 10 links) durch den Block gefahren, wobei die Schnittstärke möglichst klein gewählt wird. Mit dem vollständig aufgebauten Endeffektorsystem können Schnittstärken bis zu 0,3 mm realisiert werden (vgl. **Bild 12**). Eine weitere Reduktion der Schnittstärke ist nicht möglich, da die entstehende Scheibe dann nicht mehr ausreichend stabil wäre und während des Prozesses zerfallen würde. Die Abnahme noch geringerer Materialmengen ist jedoch grundsätzlich möglich und entspricht einem Nachschnitt im Sinne der Drahterosion.

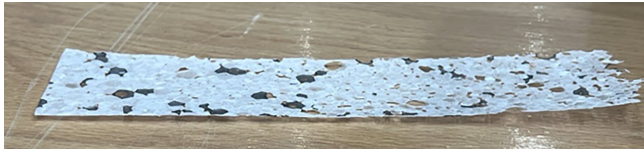


Bild 12 Präzisionsvalidierung: 0,3 mm dicke Scheibe. Die Länge beträgt circa 150 mm. Foto: wbk12

4 Diskussion und Bewertung

Die mechanischen Kernfunktionen des Endeffektors zur Drahtspannung, -führung und -positionierung sowie die elektrische Beheizung wurden integriert und im Laborbetrieb erfolgreich nachgewiesen.

Die Konzeption, Konstruktion und Auslegung der Endeffektoren wurden so gestaltet, dass der Draht geführt, gespannt und in seiner Lage definiert wird. Am fixen Endeffektor ist die Einspannung als sehr zuverlässig zu bewerten. Das verbleibende Spiel der Einspannung liegt bei etwa 0,05 mm und ermöglicht damit eine hohe Reproduzierbarkeit. Am variablen Endeffektor steigt die Einspann- beziehungsweise Lageabweichung dagegen mit dem Einlaufwinkel des Drahtes, da Winkeländerungen den effektiven Einspannpunkt über die Umlenkrollen beeinflussen können. Ein relevantes Fehlerpotenzial besteht bei ungünstigen Schnittparametern, insbesondere bei starkem Nachhängen des Drahtes oder schlechter Programmierung in Kombination mit einer Arbeitsraumverkleinerung: In diesen Fällen kann der Draht aufgrund von einem hohen relativen Einlaufwinkel aus der Kerbe der Rollenführung herausrutschen. Im Normalbetrieb trat dieses Verhalten nicht auf. Es bleibt jedoch ein relevantes Fehlerpotenzial, das die Prozessgrenzen des Demonstrators markiert. Hinsichtlich der Drahtspannung ist festzuhalten, dass diese über Arbeitsraumänderungen im projektrelevanten Bereich (circa 0,1 m bis 1 m) konstant genug ist, um stabile Schnitte zu ermöglichen. Kritisch ist hierbei allerdings die Einstellabhängigkeit: Eine fehlerhafte Bedienung des Vorspannmechanismus kann im Extremfall zum Versagen der Feder führen. Zudem kann es bei falscher Montage zum Verhaken der Feder im Betrieb kommen. Bei Geräuscentwicklung während Arbeitsraumänderungen ist außerdem eine Nachschmierung erforderlich. Abschließend ist zu erwähnen, dass im Falle eines Drahtbruchs, zum Beispiel infolge einer nicht synchronen Bewegung der Arme, der Draht erst wieder händisch neu vorgespannt, eingelegt und befestigt werden muss.

Die Bestromung ist im Betrieb stabil und zuverlässig, was auf die entwickelte Kontaktierungslösung zurückzuführen ist. Ein prinzipieller Abrieb der Schleifkontakte ist denkbar, jedoch trat in den Tests kein nennenswerter Verschleiß auf.

Für die experimentelle Validierung des Systems lässt sich festhalten, dass die Validierung insgesamt erfolgreich durchgeführt wurde. Über Dauerlauf- und Schnittversuche konnten geeignete Schnittparameter identifiziert werden. Mit diesen Parametern sind sowohl ein stabiler zweidimensionaler als auch ein dreidimensionaler Schnitt durch Verkipfung des Drahtes prinzipiell möglich. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Ergebnisqualität stark von einer passenden Kombination aus Parametern und korrekter Programmierung abhängt. Besonders herausfordernd sind Richtungswechsel, da Nachhängen hier zu Geometrieabweichungen

führt, was sich insbesondere an Ecken in Form von Verrundungen oder Abweichungen vom Sollverlauf bemerkbar macht.

Abschließend lässt sich eine Einordnung in Richtung Wire-EDM vornehmen. Geometrisch ist das Grundprinzip übertragbar. Der in dieser Arbeit umgesetzte Einspannmechanismus ist jedoch nicht direkt übertragbar, da beim EDM typischerweise ein laufender Draht eingesetzt wird und dadurch Anforderungen wie Drahtvorschub sowie eine Verschleiß- beziehungsweise Abbrandkompensation entstehen. Der Fokus lag daher vor allem auf der konsistenten Abstimmung von Bahn, Winkel, Abstand und Prozessführung sowie als Grundlage für zukünftige Drahteinspann- und Drahtführungsvorrichtungen, die näher an den Anforderungen des Wire-EDM liegen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Themenbereichs Wertstromkinematik konnte aufbauend auf dem Wire-EDM-Konzept ein Prototyp für das robotische Heißdrahtschneiden umgesetzt werden. Untersucht wurde dabei, ob sich ein zwischen zwei Robotern gespannter Schneiddraht mit einem dafür entwickelten Endeffektorsystem prozesssicher betreiben lässt und wie ein variabler Arbeitsraum (Endeffektorabstand beziehungsweise freie Drahtlänge) konstruktiv umgesetzt werden kann.

Hierzu wurde ein Endeffektorsystem entwickelt, in dem die mechanischen Funktionen (Drahtspannung, Einspannung und Führung) bei gleichzeitiger Stromzuführung in zwei kompakten Funktionsmodulen zusammengeführt sind. Durch den variablen Endeffektorabstand entsteht konzeptionell ein fixer Endeffektor als stabiles Bezugssystem beziehungsweise Gegenhalter sowie ein variabler Endeffektor, der Längenänderungen kompensiert und den Schnittbereich über den Spannweg anpasst. Die Drahtspannung wird am variablen Endeffektor über eine Rolltorsionsfeder aufrechterhalten, eine Spule dient als Drahtspeicher für nicht benötigte Drahtlänge. Die Drahtführung wird insbesondere am variablen Endeffektor über eine rollenbasierte Rollenführung realisiert, sodass der Draht definiert umlenkt und lagegeführt wird.

Zur Erprobung wurde eine Versuchsanlage mit zwei einander zugewandten montierten UR5e aufgebaut, bei der der Roboterabstand auf dem Gestell ohne großen Aufwand variiert werden kann. Im Rahmen der Validierung wurden typische Geometrielemente (unter anderem Blocktrennung, Rundungen, rechtwinklige Ecken und eine Schräge von circa 45° durch Verkipfung des Drahtes) praktisch umgesetzt. Insgesamt konnte damit die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Demonstrators im Laborbetrieb nachgewiesen werden. Zukünftige Arbeiten werden die automatisierte Bahnplanung sowie die Erweiterung des Endeffektors betrachten.

FÖRDERHINWEIS

Dr.-Ing. Willy Höfler-Stiftung

DANKSAGUNG

Wir danken dem Projektträger herzlich für die finanzielle Förderung und die Unterstützung dieses Forschungsvorhabens. Durch die Begleitung und das Vertrauen in unsere Arbeit wurde die erfolgreiche Durchführung und Veröffentlichung dieser Arbeit maßgeblich ermöglicht.

Literatur

- [1] E. Mühlbeier, P. Gönnheimer, L. Hausmann, und J. Fleischer, „Value Stream Kinematics“, in *Production at the leading edge of technology*, B.-A. Behrens, A. Brosius, W. Hintze, S. Ihlenfeldt, und J. P. Wulfsberg, Hrsg., in *Lecture Notes in Production Engineering*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, S. 409–418. doi: 10.1007/978-3-662-62138-7_41.
- [2] G. Lanza, J. Rühl, und S. Peters, „Bewertung von Stückzahl- und Variantenflexibilität in der Produktion: Produktionskosten und Risiken abhängig von Varianten und Stückzahlen“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 104, Nr. 11, S. 1039–1044, Nov. 2009, doi: 10.3139/104.110193.
- [3] D. Steegmüller und M. Zürn, „Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft“, in *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, T. Bauernhansl, M. Ten Hompel, und B. Vogel-Heuser, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 103–119. doi: 10.1007/978-3-658-04682-8_5.
- [4] M. Goebels, J. Baumgärtner, T. Fuchs, E. Mühlbeier, A. Puchta, und J. Fleischer, „Milling using two mechatronically coupled robots“, *Procedia CIRP*, Bd. 130, S. 867–872, 2024, doi: 10.1016/j.procir.2024.10.177.
- [5] L. Hausmann, F. Wirth, und J. Fleischer, „Flexible Twisting Process of Stators with Hairpin Winding“, in *2022 12th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Regensburg, Germany: IEEE, Nov. 2022, S. 1–9. doi: 10.1109/EDPC56367.2022.10019760.
- [6] N. Mohd Abbas, D. G. Solomon, und Md. Fuad Bahari, „A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 47, Nr. 7–8, S. 1214–1228, Juni 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026.
- [7] S. T. Almeida, J. Mo, C. Bil, S. Ding, und X. Wang, „Conceptual Design of a High-Speed Wire EDM Robotic End-Effector Based on a Systematic Review Followed by TRIZ“, *Machines*, Bd. 9, Nr. 7, S. 132, Juli 2021, doi: 10.3390/machines9070132.
- [8] X. Yue, Z. Chen, Z. Xu, und J. Liu, „EDM milling based on a 6-DOF serial robot“, *Int J Adv Manuf Technol*, Bd. 123, Nr. 5–6, S. 1905–1912, Nov. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-10275-3.
- [9] S. T. Almeida, J. P. T. Mo, C. Bil, S. Ding, und X. Wang, „Servo Control Strategies for Vibration-Control in Robotic Wire EDM Machining“, *Arch Computat Methods Eng*, Bd. 29, Nr. 1, S. 113–127, Jan. 2022, doi: 10.1007/s11831-021-09570-1.
- [10] S. Duenser, R. Poranne, B. Thomaszewski, und S. Coros, „RoboCut: hot-wire cutting with robot-controlled flexible rods“, *ACM Trans. Graph.*, Bd. 39, Nr. 4, Aug. 2020, doi: 10.1145/3386569.3392465.
- [11] Funkenerosives Abtragen (EDM). In: *Fertigungsverfahren 3*, in *VDI-Buch*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 3–126. doi: 10.1007/978-3-540-48954-2_2.

Tim Klein, M.Sc. 

tim.klein@kit.edu

Aaron Schwertner

Alexander Puchta, M.Sc. 

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer 

wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
www.kit.edu

LIZENZ



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