

# Trajektorienplanung und -optimierung für die automatisierte Reparaturanwendung durch robotergeführtes Kaltgasspritzen

Marcel Lewke\*, Felix Gehlhoff  
 Institut für Automatisierungstechnik  
 Helmut-Schmidt-Universität/  
 Universität der Bundeswehr Hamburg  
 Hamburg, Deutschland  
 \*marcel.lewke@hsu-hh.de

Hongjian Wu\*, Alexander List, Frank  
 Gärtner, Thomas Klassen  
 Institut für Werkstofftechnik  
 Helmut-Schmidt-Universität/  
 Universität der Bundeswehr Hamburg  
 Hamburg, Deutschland  
 \*wuh@hsu-hh.de

Alexander Fay  
 Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
 Ruhr-Universität Bochum  
 Bochum, Deutschland  
 alexander.fay@rub.de

**Kurzfassung** – Das Kaltgasspritzen entwickelt sich zu einem Verfahren mit großem Potenzial für die Reparatur metallischer Bauteile, insbesondere für das Aufbringen von hitze- und oxidationsempfindlichen Materialien. In diesem Zusammenhang ermöglicht der Einsatz von Automatisierung und Robotik eine flexible Steuerung des Reparaturprozesses. Um einen optimalen Reparaturprozess zu gewährleisten, müssen die verschiedenen Anforderungen des robotergeführten Kaltgasspritzens bereits in der simulativen Planungsphase berücksichtigt werden. Herkömmliche Trajektorien zum Materialauftrag berücksichtigen jedoch oft nicht die bei Reparaturen zu beachtenden geometrischen Randbedingungen des Materialaufbaus, den effizienten Materialeinsatz und die zugrundeliegenden Einschränkungen der Roboterkinematik. In dieser Arbeit wird daher ein Konzept zur automatisierten Trajektorienplanung und anschließenden Trajektorienoptimierung zur Reparatur durch robotergeführtes Kaltgasspritzen beschrieben. Das Ziel ist es, eine optimierte Trajektorie zu erzeugen, die die Anforderungen des Kaltgasspritzens und der Roboterkinematik berücksichtigt, um eine qualitativ hochwertige Reparatur und einen effizienten Materialeinsatz zu gewährleisten. Dazu gehören die Minimierung des überschüssigen Materials und die Minimierung des Rucks bei der Roboterbewegung. Die Ergebnisse zeigen die erfolgreiche Anwendung der initialen Trajektorienplanung und der anschließenden Trajektorienoptimierung für die Bauteilreparatur durch Kaltgasspritzen.

**Stichworte** – Kaltgasspritzen, Reparatur, Robotik, Trajektorie, Optimierung

## I. EINLEITUNG

Der weltweite Ressourcenverbrauch und die Auswirkungen auf die Umwelt zählen zu den großen Herausforderungen unserer Zeit. Ressourceneffiziente Verfahren zur Herstellung und Reparatur von Bauteilen sind damit unerlässlich, um diese Herausforderungen zu bewältigen. Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren ermöglicht dabei neue Wege der Reparatur, um lokal beschädigte Bereiche von Bauteilen mit minimalem Ressourceneinsatz wiederherzustellen. Das Verfahren des Kaltgasspritzens (KGS) erweist sich hierbei als vorteilhaft für Reparaturanwendungen. KGS ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem pulverförmiges Material in einem erhitzten Gasstrom durch eine Lavaldüse auf Überschallgeschwindigkeit be-

schleunigt wird. Der Partikelauflaufprall auf die Substratoberfläche erfolgt im festen Zustand, d. h. die Temperatur des Materials bleibt dabei unterhalb der Schmelztemperatur des Pulvers. Dies bietet bei dem Auftrag wärme- und oxidationsempfindlicher Materialien erhebliche Vorteile gegenüber thermischen Verfahren [1]. Der geringe thermische Einfluss zeichnet KGS als geeignetes Verfahren für Reparaturanwendungen und zur additiven Fertigung aus, wie in verschiedenen Übersichtsstudien hervorgehoben wird [2], [3], [4]. Für die Reparatur komplexer Geometrien werden Industrieroboter benötigt, was im Folgenden als *robotergeführtes KGS* bezeichnet wird. Dabei ist die Handhabung des Spritzstrahls ein wesentlicher Aspekt des KGS, da die Pulverzufuhr nicht abrupt gestoppt oder dynamisch gesteuert werden kann [5]. Darüber hinaus müssen, insbesondere bei hochfesten Werkstoffen, alle Prozessparameter hinreichend erfüllt werden, um die notwendigen Materialeigenschaften durch KGS zu gewährleisten. Dazu gehören sowohl die primären Prozessparameter wie Prozessgas-temperatur und -druck als auch die sekundären Prozessparameter, die durch den handhabenden Industrieroboter gesteuert werden. Die sekundären Prozessparameter, die im Folgenden nach der Norm EN ISO 14917 [6] benannt sind, umfassen den Spritzwinkel, den Spritzabstand, die Spritzgeschwindigkeit und die Spritzstrahlüberdeckung (im Folgenden als Spritzspurabstand bezeichnet), welche entscheidend sind für einen erfolgreichen Materialauftrag [4]. Diese sekundären Prozessparameter beschreiben die Bewegung der KGS-Düse relativ zum Substrat und wirken sich direkt auf die Auftragseigenschaften aus. Für einen kontrollierten Materialauftrag ist somit eine systematische Trajektorienplanung unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen des KGS erforderlich. Um die verschiedenen Anforderungen und Einschränkungen des KGS effektiv zu bewältigen und schließlich eine optimale Trajektorie für die Reparatur zu generieren, ist der Einsatz von mathematischer Optimierung erforderlich.

In dieser Arbeit wird ein Konzept zur initialen Trajektorienplanung und zur Trajektorienoptimierung durch mathematische Optimierung für die Reparatur mittels robotergeführten KGS vorgestellt. Die Initialtrajektorie liefert eine akzeptable Startlösung und dient als Referenz für die nachfolgende Trajektorienoptimierung.

Das Konzept beginnt mit der Extraktion des zu füllenden Volumens durch den Vergleich von Soll- und Ist-Bauteil. Zur Erzeugung des extrahierten Volumens wird dieses in geeignete, adaptiv gekrümmte Schichten unterteilt und in Punktwolken für die Pfadplanung umgewandelt. Der Pfad wird dann in eine Trajektorie umgewandelt, indem eine geeignete Geschwindigkeitsverteilung für die Spritzgeschwindigkeit hinzugefügt wird, um die erforderliche lokal variierende Schichtdicke zu erzeugen. Nach dieser initialen Trajektorienplanung werden für die anschließende Trajektorienoptimierung Entscheidungsvariablen, Zielfunktion, Rand- und Nebenbedingungen und ein Materialauftragsmodell formuliert, um die Menge des aufgetragenen Materials entsprechend zu steuern.

Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Arbeiten aus [7] und [8]. Der Abschnitt II stellt relevante Arbeiten aus der Literatur vor. Das Konzept zur initialen Trajektorienplanung und die Formulierung des Optimierungsproblems werden in Abschnitt III erläutert. Die Anwendung des Konzepts für einen Anwendungsfall und die dabei erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt IV vorgestellt. Schließlich schließt Abschnitt V diese Arbeit mit einer Zusammenfassung ab und gibt einen Ausblick über zukünftige Forschungsaktivitäten.

## II. ÜBERSICHT ZU RELEVANTEN ARBEITEN

Für Anwendungen in der KGS-Reparatur schlugen die Autoren Chen et al. [9] eine adaptive Spiraltrajektorie vor. Es wird eine archimedische Spirale verwendet, um einen konstanten Abstand zwischen zwei benachbarten Spritzspuren zu gewährleisten. Die Trajektorie setzt sich aus zwei symmetrischen archimedischen Spiralen zusammen. Diese werden durch lineare Transformation an die Schadenskontur angepasst. Für jeden Zielpunkt wird die Spritzgeschwindigkeit an die entsprechende Tiefe der Kratergeometrie angepasst, indem eine ungefähre lineare Korrelation zwischen Spritzgeschwindigkeit und Schichtdicke angewandt wurde. Die Ergebnisse zeigen eine erfolgreiche Reparatur des Bauteils mit ausreichender Qualität hinsichtlich Porosität und Haftfestigkeit. Allerdings weist die vorgeschlagene Spiraltrajektorie Abweichungen vom orthogonalen Spritzwinkel zur lokalen Oberfläche auf. Im gegebenen Beispiel war die Trajektorie für den Anwendungsfall funktional, da die Oberfläche nur kleine Neigungswinkel aufwies. Bei möglicherweise größeren Neigungen muss jedoch der lokale Spritzwinkel berücksichtigt werden. Außerdem wurde die Trajektorie 30 Mal mit einem konstanten Abstand zwischen KGS-Pistole und Bauteil wiederholt, was zu einem stetig abnehmenden effektiven Spritzabstand führt. Es werden keine Angaben zur Berechnung der erforderlichen Anzahl von Wiederholungen gemacht. Um optimale KGS-Bedingungen aufrechtzuerhalten, wäre ein schichtweiser Ansatz erforderlich, der die erforderliche Anzahl von Schichten mit individuell angepasstem Spritzabstand berücksichtigt.

Spiralförmige Trajektorien werden auch von Wu et al. [10] verwendet. Die Autoren schlugen ein Konzept für einen vollständigen Reparaturprozess durch KGS vor. Dieses Konzept umfasst ein 3D-Scansystem zur Schadensanalyse und -erkennung, eine Schadensmusterdatenbank und ein robotergeführtes KGS-Reparatursystem. Die mit dem 3D-Scansystem gewonnenen Daten des Bauteils werden mit vorhandenen Schadensmustern aus der Datenbank abgeglichen, um Standardfehler zu identifizieren. Diese Informationen werden verwendet, um eine Reparaturstrategie festzulegen und eine geeignete KGS-Spiraltrajektorie für den Materialauftrag zu erstellen. Al-

lerdings bestehen bei der oben genannten Methode der Spiraltrajektorie die erwähnten Einschränkungen in Bezug auf den Spritzwinkel und den Spritzabstand.

Hinsichtlich der Trajektorienoptimierung schlugen Kout und Müller [11] eine Optimierung durch Gradientenabstieg zur Minimierung des Schichtdickenfehlers unter Einbeziehung eines Materialauftragsmodells vor. Dieses Konzept bestimmt zur Zielerreichung die erforderlichen Spritzpistolenpositionen und -ausrichtungen in Bezug auf das Substrat, anstatt sich initial auf die rechnerunterstützte Design-(CAD)-Geometrie zu konzentrieren. Obwohl die Ergebnisse gute Annäherungen an die gewünschten Beschichtungen erzielen, vernachlässigt dieser Ansatz die Trajektorienplanung des Roboters und die resultierende Roboterbewegung vollständig.

Ren et al. [12] untersuchten die Optimierung der Schichtdicke für thermisch gespritzte Schichten. Auf Grundlage eines Materialauftragsmodells wurde in dieser Arbeit die Nelder-Mead-Methode zur Lösung der Optimierung verwendet, was zu optimalen sekundären Prozessparametern für einen Zickzack-Pfad führte. Das Konzept wurde dann für einen Anwendungsfall implementiert, um die optimierte Trajektorie zu validieren. In dieser Arbeit wurden jedoch nur flache Substrate und keine komplexen Geometrien untersucht.

Bei Reparaturanwendungen gilt es das zu reparierende Volumen systematisch durch schichtweisen Aufbau wiederherzustellen. Da der beschädigte Bereich für die Reparatur vorbearbeitet werden muss, haben die Vertiefungen konkave Oberflächen, bei denen eine gleichmäßige Schichtdicke für eine effiziente Materialnutzung nicht ausreicht. Die Materialeffizienz ist definiert als die Differenz zwischen dem tatsächlich für die Reparatur benötigten Materialvolumen und der tatsächlich aufgetragenen Materialmenge. Anstatt sich auf die Optimierung des Pfades zur Aufrechterhaltung einer konstanten Spritzgeschwindigkeit zu konzentrieren, wird in dieser Arbeit die Spritzgeschwindigkeit als Entscheidungsvariable in die Optimierung einbezogen. Ziel ist die Nutzung der durch den Pfad und die Spritzgeschwindigkeit gegebenen Freiheitsgrade, um den angestrebten Materialauftrag bei der Reparatur zu erreichen und dabei die Einschränkungen der Roboterkinematik zu berücksichtigen. Aufgrund der stochastischen Natur nicht-deterministischer Optimierungsmethoden (z. B. evolutionäre Algorithmen) wird in dieser Arbeit ein deterministischer Ansatz verfolgt, um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, die für industrielle Anwendungen entscheidend ist.

## III. KONZEPT ZUR INITIALEN TRAJEKTORIENPLANUNG UND TRAJEKTORIENOPTIMIERUNG FÜR DAS ROBOTERGEFÜHRTE KALTGASSPRITZEN

In diesem Abschnitt wird das Konzept zur initialen Trajektorienplanung und der anschließenden Trajektorienoptimierung vorgestellt. Die Implementierung des Konzepts erfolgte in FreeCAD (Version 0.20) [13] und RoboDK (Version 5.5.0) [14]. FreeCAD ist eine parametrische 3D-Open-Source-Software für CAD, die einen auf der Programmiersprache Python basierenden Interpreter enthält. Das vorgestellte Konzept wurde mit Python-Skripten implementiert. Es wurde eine Verbindung zur Roboterprogrammier- und Simulationssoftware RoboDK hergestellt. Dies ermöglicht eine Offline-Simulation der generierten Roboterprogramme, so dass die Programme getestet werden können, bevor sie in Robotersteuerungscode für den realen Prozess umgewandelt werden.

### A. Initiale Trajektorienplanung

In diesem Abschnitt wird die initiale Trajektorienplanung beschrieben. In Hinblick auf die Anforderungen an einen orthogonalen Spritzwinkel und die Materialeffizienz werden zunächst das zu reparierende Volumen bestimmt und geeignete adaptiv gekrümmte Schichten für den Materialauftrag definiert. Darüber hinaus bedingen konkave Oberflächen Unterschiede in der erforderlichen Schichtdicke. Es gibt Bereiche, an denen mehr Material benötigt wird, und andere, an denen weniger Material zum Wiederaufbau des Volumens erforderlich ist. Zur Einsparung des aufzutragenden Materials und unter dem Ziel für einen nahezu endkonturnahen Materialauftrag sind variable Schichtdicken vorgesehen. Zusammenfassend ergibt sich daraus der Ansatz eines Algorithmus zum adaptiven „Slicen“ von gekrümmten Schichten. Anschließend erfolgt die automatische Pfadplanung für jede einzelne Schicht unter Verwendung von Punktwolken und Normalenvektoren. Der Pfad entspricht der geometrischen Darstellung der Bewegung. Dieser Schritt erlaubt es, verschiedene Pfadalgorithmen zu integrieren. Danach erfolgt die Generierung der Trajektorie durch Hinzufügen einer Spritzgeschwindigkeitsverteilung zum generierten Pfad. In diesem Schritt wird der geplante Pfad in eine Trajektorie umgewandelt. Der relevante, zu berechnende Parameter, ist die Spritzgeschwindigkeit. Ausgehend von der gewünschten Schichtdicke an einem Punkt ergibt sich die erforderliche Spritzgeschwindigkeit. Die Spritzgeschwindigkeit ist somit der Parameter zur Gewährleistung variabler Schichtdicken. Dies ermöglicht es, die Menge des Materialauftrags pro Fläche durch eine kontrollierte Materialauftragszeit zu steuern.

Für eine detaillierte Beschreibung der initialen Trajektorienplanung wird auf die Arbeit in [7] verwiesen. Nach der erfolgreichen initialen Trajektorienplanung erfolgt die anschließende Trajektorienoptimierung.

### B. Trajektorienoptimierung

In diesem Abschnitt wird das Konzept der Trajektorienoptimierung vorgestellt. Um einen überschaubaren Suchraum für die mathematische Optimierung zu erhalten, basiert die Trajektorienoptimierung auf einer initialen Trajektorie. Diese Initialtrajektorie liefert eine akzeptable Startlösung und dient als Referenz für die nachfolgende Optimierung. In diesem Konzept erfolgt die Erzeugung der Initialtrajektorie entsprechend des Abschnitts III A. Das Slicing der gekrümmten Schichten wird zusätzlich durch eine adaptive Verkleinerung der Flächen verbessert, um zu verhindern, dass der Spritzstrahl Bereiche überfährt, in denen bereits ausreichend Material vorhanden ist. In dieser Arbeit wird eine spiralförmige Trajektorie verwendet, um unnötigen Materialauftrag außerhalb des relevanten Bereichs zu reduzieren, die Materialeffizienz zu erhöhen und den Aufwand für die Nachbearbeitung zu verringern.

Die Beschreibung des Problems beginnt mit der Darstellung der Startoberfläche der zu füllenden Kavität. Die Startoberfläche der Kavität in CAD wird von der Points Workbench von FreeCAD in eine diskrete Punktwolke umgewandelt, die die Oberfläche durch Punkte im dreidimensionalen Raum darstellt. Durch die Einstellung des euklidischen Abstands kann die räumliche Auflösung der Punktwolke angepasst werden. Darüber hinaus werden jedem Punkt der Punktwolke entsprechende Normalenvektoren zugewiesen, die die Orthogonalität zur darunter liegenden Oberfläche gewährleisten. Die gewünschte Endkontur der zu füllenden Kavität ist durch die Soll-Schließfläche der Kavität in CAD gegeben. Das

eingeschlossene Volumen zwischen der Kavitäten-Startoberfläche und der nominalen Kavitäten-Schließfläche entspricht somit dem mit KGS herzustellenden Volumen. Die Initialtrajektorie wird mit Werten für die Pose und die Spritzgeschwindigkeit als Referenz angenommen. Um die Bewegung der KGS-Pistole für die Trajektorienoptimierung vollständig darzustellen, werden die Pose und die Spritzgeschwindigkeit als Entscheidungsvariablen definiert. Zur Modellierung des Materialauftrags wird in dieser Arbeit eine Überlagerung von zweidimensionalen Gaußfunktionen definiert. Um das Ziel einer optimierten Trajektorie zu erreichen, die die Anforderungen des KGS und der Roboterkinematik berücksichtigt, ist eine Zielfunktion erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Ziele der Minimierung des Materialüberschusses an der Reparaturstelle und der Minimierung des Rucks der Roboterkinematik formuliert, um einen effizienten Materialeinsatz und eine qualitativ hochwertige Reparatur durch gleichmäßigen Materialauftrag zu gewährleisten. Schließlich werden alle Teilziele durch die Methode der gewichteten Summe zu einer multikriteriellen Optimierungsfunktion zusammengefasst, die es zu minimieren gilt. Nicht-negative skalare Gewichtungsfaktoren werden verwendet, um sicherzustellen, dass alle Teilziele in ähnlichen Größenordnungen liegen. Die Gewichtungsfaktoren dienen auch dazu, die Teilziele zu priorisieren. Es werden Rand- und Nebenbedingungen für die Roboterkinematik formuliert, um die Spritzgeschwindigkeit und die Beschleunigung zu limitieren. Zusätzlich wird die Bedingung formuliert, eine vollständige Füllung der Kavität zu gewährleisten. Darüber hinaus wird die Anforderung eines zur Oberfläche orthogonalen Spritzwinkels durch Verwendung der entsprechenden Normalenvektoren berücksichtigt. Der Spritzabstand wird adaptiv an bereits aufgetragenes Material angepasst.

Für eine detaillierte Beschreibung der Trajektorienoptimierung wird auf die Arbeit in [8] verwiesen. Folgend zur initialen Trajektorienplanung und der anschließenden Trajektorienoptimierung wird im Folgenden die Anwendung des Konzepts für ein Anwendungsbeispiel vorgestellt.

## IV. ERGEBNISSE

Um die Gültigkeit des Konzepts zu testen, wird eine Kavität in einem ebenen Bauteil als repräsentativer Anwendungsfall verwendet. Die Kavität hat eine Länge von 14,4 mm, eine Breite von 13,8 mm und eine Tiefe von 1,2 mm, woraus sich aus der geplanten Initialtrajektorie 3 Schichten für den Materialaufbau ergeben. Der Durchmesser des KGS-Spritzflecks wird zu 8 mm angenommen. Als Pulvermaterial wird die Aluminiumlegierung 6061 mit einer Dichte von 2,7 g/cm<sup>3</sup> verwendet. Die Pulverfördertrate wird auf 20 g/min und der Spritzspurabstand auf 2 mm eingestellt. Der Auftragswirkungsgrad wird mit 70 % angenommen. Die Anzahl der Elemente in der Initialtrajektorie beträgt 162. Bei der Trajektorienoptimierung werden die Grenzen für die Spritzgeschwindigkeit und die Beschleunigung auf 50-500 mm/s bzw. ±5000 mm/s<sup>2</sup> festgelegt. Der Toleranzbereich für überschüssiges Material wird beispielhaft auf 0 mm festgelegt. Für die Optimierung werden dabei folgende Gewichtungsfaktoren gewählt: 1 für den Materialauftrag, 0,1 für den Pfad und 1e-8 für den Ruck. Die Ergebnisse der Optimierung sind in Abb. 1 dargestellt. Die Optimierung gewährleistet eine deutliche Glättung der Spritzgeschwindigkeiten durch Verringerung der Beschleunigung und des Rucks. Die final erzeugte Oberfläche nach dem Materialauftrag berücksichtigt die Anforderung, dass die Kavität vollständig gefüllt wird. Das Ergebnis für den

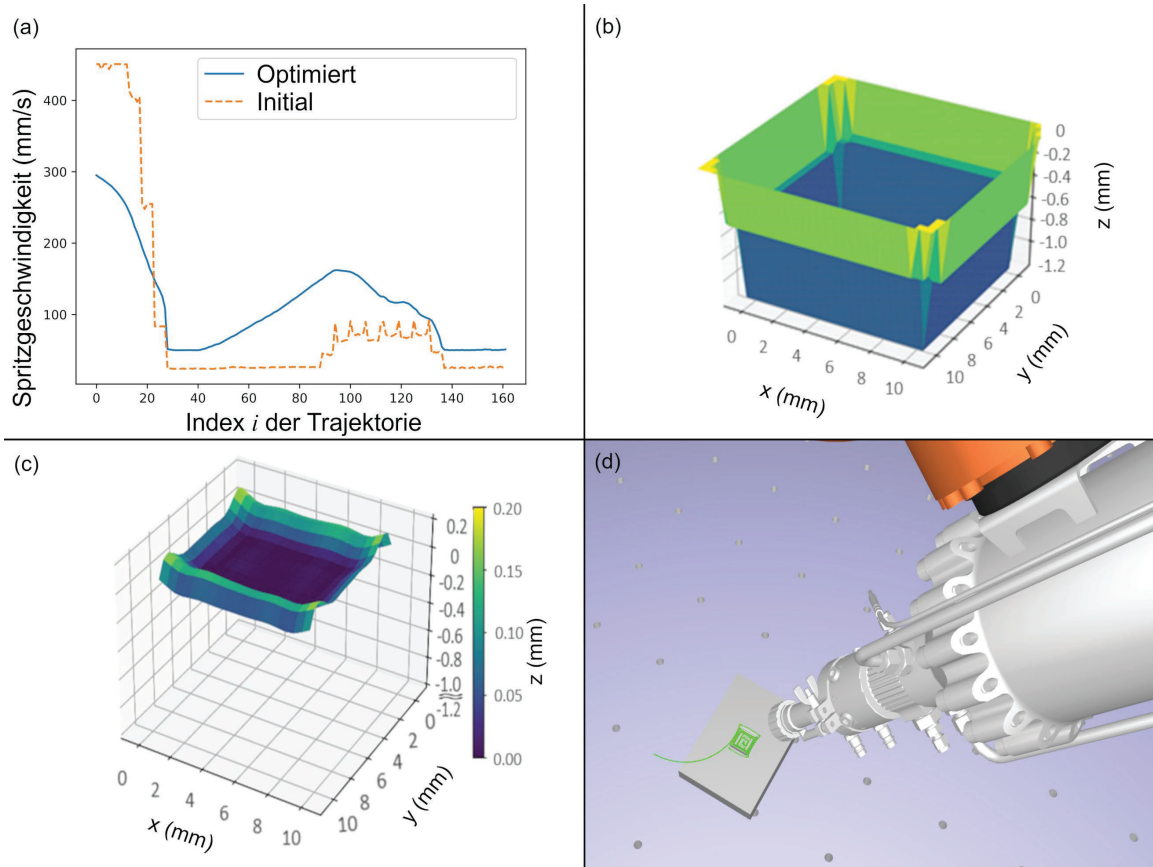


ABBILDUNG 1: SIMULATIONSERGEBNIS DER TRAJEKTORIENOPTIMIERUNG FÜR DIE EBENE KAVITÄT, (A) SPRITZGESCHWINDIGKEITEN VOR UND NACH DER OPTIMIERUNG, (B) KAVITÄT VOR DEM MATERIALAUFTRAG, (C) MATERIALAUFTRAG IN DER KAVITÄT NACH DER OPTIMIERUNG, (D) OPTIMIERTE TRAJEKTORIE IN DER ROBOTERSIMULATIONSUMGEBUNG ROBODK. BITTE BEACHTEN SIE DIE UNTERSCHIEDLICHEN MAßSTÄBE DER X-Y-EBENE UND DER Z-ACHSE IN (B) UND (C). NACH [8]

Materialauftrag zeigt eine mittlere Abweichung von 0,16 mm von der nominalen Kavitäten-Schließfläche, was einer hinreichend geringen Abweichung entspricht und mit dem nur leichten Überschuss eine hohe Materialeffizienz gewährleistet. Basierend auf der optimierten Trajektorie ermöglicht das vorgestellte Konzept nun die Generierung eines Roboterprogramms und dessen Übertragung auf die reale Robotersteuerung.

## V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das robotergeführte Kaltgasspritzen ermöglicht eine flexible Steuerung und Automatisierung des Materialauftrags. Dies ermöglicht die Anwendung des Kaltgasspritzen als Reparaturverfahren für lokal beschädigte Bauteile. Für den erfolgreichen Einsatz als Reparaturverfahren des robotergeführten Kaltgasspritzen ist allerdings unerlässlich, die prozessbedingten Anforderungen zu berücksichtigen. Dies erfordert ein umfassendes Konzept, um den Reparaturprozess optimal zu planen, zu simulieren und auszuführen. In dieser Arbeit wird ein Konzept zur automatisierten initialen Trajektorienplanung und Trajektorienoptimierung mittels mathematischer Optimierung für die Reparatur durch robotergeführtes Kaltgasspritzen vorgestellt. Die mathematische Optimierung wird eingesetzt, um die Ziele und Einschränkungen des Reparaturprozesses im Hinblick auf die geometrischen Einschränkungen des Materialauftrags, den effizienten Materialeinsatz und die Einschränkungen der Roboterkinematik effektiv zu handhaben. In diesem Zusammenhang werden Entscheidungsvariablen, Zielfunktion, Rand- und Nebenbedingungen und ein Materialauftragsmodell definiert, um den Materialauftrag und die

Roboterbewegung entsprechend zu steuern. Die Ergebnisse zeigen am Beispiel eines Anwendungsfalls die erfolgreiche Umsetzung dieses Konzepts. Unter Berücksichtigung der Roboterkinematik und der sekundären Prozessparameter des Kaltgasspritzen wird eine optimierte Trajektorie erzeugt, die einen minimalen Ruck und einen minimalen Materialüberschuss gewährleistet. Die nächsten Schritte umfassen die Integration dieses Konzepts in ein umfassendes robotergeführtes Kaltgasspritz-Reparatursystem und die Durchführung von Laborexperimenten zur praktischen Validierung. Experimente und die anschließenden Analysen sind erforderlich, um die Einflüsse der Trajektorie auf die Mikrostrukturen und Eigenschaften des Materialauftrags zu untersuchen. Neben der Reparatur kann dieses Konzept auch für Anwendungen in der additiven Fertigung durch Kaltgasspritzen adaptiert werden.

## DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich im Rahmen des Forschungsprojekts „CORE - Computergesteuerte Bauteilbearbeitung“ für die Förderung bei dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr. Das dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr – ist ein von den Universitäten der Bundeswehr Hamburg und München gemeinsam getragenes wissenschaftliches Zentrum und Bestandteil des Konjunkturprogramms der Bundesregierung zur Überwindung der COVID-19- Krise. Es unterliegt der akademischen Selbstverwaltung. Die Mittel, mit

dem das dtec.bw ausgestattet wurde, werden an beiden Universitäten der Bundeswehr zur Finanzierung von Forschungsprojekten und Projekten zum Wissens- und Technologietransfer eingesetzt. dtec.bw wird von der Europäischen Union – NextGenerationEU finanziert.

#### LITERATUR

- [1] H. Assadi, H. Kreye, F. Gärtner, and T. Klassen, "Cold spraying – A materials perspective," *Acta Mater.*, vol. 116, pp. 382–407, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.06.034.
- [2] R. N. Raoelison, C. Verdy, and H. Liao, "Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications," *Mater. Des.*, vol. 133, pp. 266–287, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.07.067.
- [3] W. Li, K. Yang, S. Yin, X. Yang, Y. Xu, and R. Lupoi, "Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 3, pp. 440–457, 2018, doi: 10.1016/j.jmst.2017.09.015.
- [4] S. Yin *et al.*, "Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications," *Addit. Manuf.*, vol. 21, pp. 628–650, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.04.017.
- [5] I. M. Nault, G. D. Ferguson, and A. T. Nardi, "Multi-axis tool path optimization and deposition modeling for cold spray additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 38, 2021.
- [6] *Thermisches Spritzen – Begriffe, Einteilung*, 14917, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Aug. 2017.
- [7] M. Lewke, H. Wu, A. List, F. Gärtner, T. Klassen, and A. Fay, "Automated Path and Trajectory Planning for Automated Repair of Damaged Components by Cold Spray," in *Thermal Spray 2023: Proceedings from the International Thermal Spray Conference*, Québec City, Canada, 2023, pp. 436–442.
- [8] M. Lewke, H. Wu, A. List, F. Gärtner, T. Klassen, and A. Fay, "Trajectory Optimization for Repair by Robot-guided Cold Spray," in *Thermal Spray 2024: Proceedings from the International Thermal Spray Conference*, Milan, Italy, 2024, pp. 123–129.
- [9] C. Chen *et al.*, "A novel spiral trajectory for damage component recovery with cold spray," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 309, pp. 719–728, 2017.
- [10] H. Wu, S. Liu, X. Xie, Y. Zhang, H. Liao, and S. Deng, "A framework for a knowledge based cold spray repairing system," *J. Intell. Manuf.*, vol. 33, pp. 1639–1647, 2022, doi: 10.1007/s10845-021-01770-7.
- [11] A. Kout and H. Müller, "Parameter optimization for spray coating," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, no. 10, pp. 1078–1086, 2009, doi: 10.1016/j.advengsoft.2009.03.001.
- [12] J. Ren, Y. Sun, J. Hui, R. Ahmad, and Y. Ma, "Coating thickness optimization for a robotized thermal spray system," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 83, 2023, doi: 10.1016/j.rcim.2023.102569.
- [13] The FreeCAD Team, *FreeCAD (Version 0.20)*. [Online]. Available: <https://www.freecadweb.org/> (accessed: Nov. 3 2022).
- [14] RoboDK Inc., *RoboDK (Version 5.5.0)*. [Online]. Available: <https://robodk.com/> (accessed: Nov. 3 2022).