

Abschlussbericht

Verbundvorhaben

KiRo3D²

Künstliche Intelligenz für den Roboter 3D Druck

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

| | |
|---|---|
| Zuwendungsempfänger: | Förderkennzeichen: |
| ICARUS Consulting GmbH | 01IS21048A |
| Titel des Teilvorhabens: | |
| Künstliche Intelligenz für den Roboter 3D Druck (KiRo3D²) | |
| Projektleiter: | Tel.: |
| Dipl. Inf. FH Jan-Peter Schulz | +49 4131 24660-0 |
| Laufzeit des Vorhabens: | Fax: |
| von: 01.09.2021 bis: 29.02.2024 | +49 4131 24660-29 |
| Berichtszeitraum des Vorhabens: | E-mail: |
| von: 01.09.2021 bis: 29.02.2024 | jan-peter.schulz@icarus-consult.de |

Projektpartner:

1. ICARUS Consulting GmbH
2. Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT

Inhalt

| | |
|--|----|
| 1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse | 3 |
| 2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises | 5 |
| HAP 0: Management und Controlling | 5 |
| HAP 1: Konzeption und Datenengineering | 7 |
| HAP 2: Entwicklung eines parallelen Bahnrechnungsmoduls | 7 |
| HAP 3: Automatisierung der optimierten Roboterbahngenerierung | 8 |
| HAP 4: Erzeugung der Datengrundlage durch Optische Sensoren | 17 |
| HAP 7: Testen des gesamten Systems | 18 |
| 3. Verwertbarkeit und Planungen für die nähere Zukunft | 21 |
| 4. Im Laufe der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen | 21 |
| 5. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses | 21 |

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Das Projekt KiRo3D² demonstriert die Machbarkeit und Effizienz vollautomatisierter Roboter-Programmierung in der Additiven Fertigung. Zwecks realitätsgetreuer Robotersimulation wurde eine Bibliothek und ein Webserver entwickelt, mithilfe derer die Robot Controller Simulation (RCS)-Module verschiedener Roboterhersteller über das Realistic Robot Simulation (RRS) Interface angesprochen und gesteuert werden können. Somit muss für Simulationen nicht auf eine bestehende OLP-Software wie Process Simulate (PS) zurückgegriffen werden. In der Folge können Simulationen schneller und gegebenenfalls parallel durchgeführt werden.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist die automatisierte Bahnplanung, die auf Slicer-Daten basiert. Diese Daten geben lediglich den Ort von Schweißpunkten relativ zu einem bauteilfesten Koordinatensystem vor. Die automatisierte Bahnplanung platziert das Objekt auf einem Dreh-Kipp-Tisch vor dem Roboter und bestimmt die Tisch- und Tool-Orientierung sowie die Achskonfiguration des Roboters für jeden Punkt. Zusammen mit der Erstellung angemessener Umfahrpunkte und weiterer Anpassungen entstand so ein robuster Algorithmus zur Erstellung von abfahrbaren, geschwindigkeitsoptimierten und kollisionsfreien Roboterprogrammen für den Druck.

Der ursprüngliche Ansatz, die Bahnplanung durch die Drehung von Pfadpunkten mittels künstlicher Intelligenz zu generieren, ergab leider keine belastbaren Ergebnisse. Es konnte zwar ein messbarer Lernerfolg erzielt werden, allerdings wurden die Ergebnisse von einem naiven Algorithmus übertroffen und blieben damit hinter den Erwartungen zurück. Als Hauptursache stellte sich der sehr kleine Abstand von 1mm zwischen den Pfadpunkten, der charakteristisch für den Anwendungsbereich der additiven Fertigung ist, heraus.

Diese Entwicklungen wurden in eine robotergestützte Laser-Pulver-Auftragschweißanlage des Fraunhofer IAPT integriert und erfolgreich getestet. Dies ermöglichte eine vollständige Automatisierung der Prozessvorbereitung und führte zur Erstellung eines Technologiedemonstrators, der in verschiedenen Produktionsstufen validiert wurde.

Die enge Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAPT war entscheidend für den Erfolg des Projekts. Gemeinsam wurden Datenpipeline-Konzepte entwickelt und durch regelmäßige Abstimmungen die Implementierung vorangetrieben. Die Fortschritte des Projektteams wurden auf führenden Fachmessen wie der Formnext in Frankfurt präsentiert.

Diese Ergebnisse legen den Grundstein für zukünftige Anwendungen im Gebiet der automatisierten Roboterpfadplanung und bieten eine Basis für Optimierungslösungen sowohl in der additiven Fertigung wie auch in anderen Bereichen, in denen Industrieroboter eingesetzt werden. Dadurch haben sie das Potenzial, die Produktivität in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) signifikant zu erhöhen.

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Projektverlauf wurden die geplanten, in Abbildung 1 aufgeführten Arbeitspakete abgearbeitet.

| AP | Beschreibung | Zust. | Projektverlauf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--|--------|----------------|---|---|---|---|---------------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|------|------|------|--|
| | | | Projektjahr 1 | | | | | Projektjahr 2 | | | | | | | | | | Projektjahr 3 | | | | | | | | | | 4 | | | | | | | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | |
| HAP 0 | Management und Controlling | ICARUS | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | J | F | | | | | |
| AP 0.1 | Definitionen der Schnittstellen & Anforderungen | Alle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 0.2 | Projektmanagement | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 0.3 | Durchführung Workshop | Alle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HAP 1 | Konzeption und Datenengineering | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 1.1 | Konzeption der Datenpipeline | Alle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 1.2 | Bereitstellung des Offline-Slicing-Tools zur Integration mit der Bahnplanung | Alle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MS 1 | Konzeptentwicklung und Datenpipeline abgeschlossen | | MS 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HAP 2 | Entwicklung eines parallelen Bahnberechnungsmoduls | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 2.1 | Bereitstellung von Hard- und Software für die Parallelberechnung | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 2.2 | Erweiterung der RCS Schnittstelle für die Bahnplanungsmodulare | Alle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HAP 3 | Automatisierung der optimierten Roboterbahngenerierung | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 3.1 | Entwicklung eines KI-Modells zur Optimierung der Erreichbarkeit | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 3.2 | Automatisierung der Erstellung der Umfahrpunkte | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 3.3 | Entwicklung eines KI-Modells Optimierung der Geschwindigkeit und Konfiguration | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 3.4 | Vermeidung von Kollisionen | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 3.5 | Integration der Bahnplanungsmodulare zu einem Komplettsystem | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MS 3 | Bahnplanungs KI Einheit entwickelt | | MS 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HAP 4 | Erzeugung der Datengrundlage durch Optische Sensoren | IAPT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 4.1 | Einrichtung von LPA-Hard- und Software-Systemschnittstellen | IAPT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 4.2 | Erzeugung der Datengrundlage | Alle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 4.3 | Automatisierung der Datenerfassung | IAPT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MS 2 | Sensorintegration abgeschlossen | | MS 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HAP 5 | Entwicklung und Training des Auftragsanalyse KI Einheit | IAPT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 5.1 | Entwicklung eines Software-Agenten | IAPT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 5.2 | Training und Validierung des software-Agenten | IAPT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MS 4 | Auftragsanalyse KI Einheit entwickelt | | MS 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HAP 6 | Automatisierung der Prozess Überwachungssystem | IAPT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 6.2 | Integration mit dem entwickelten software-Agenten (AP5) | IAPT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 6.3 | Testing und Integration mit dem Automatisierungstool (AP3) | IAPT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HAP 7 | Testen des gesamten Systems | ICARUS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 7.1 | Testen des vortrainierten Modelle und Systeme | Alle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP 7.2 | Optimierung des vortrainierten Modells und Performanz-Prüfung | Alle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MS 5 | Integration von zwei KI-Einheiten in Demonstrator-Prototyp abgeschlossen | | MS 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Abbildung 1: Arbeitspakete KiRo3D²

Im Rahmen des übergreifenden Austauschs hat sich ICARUS zudem an folgenden Veranstaltungen beteiligt:

| Nr. | Datum | Veranstaltung | Ort | Teilnehmer (ICARUS) |
|-----|--------------|--|-----------|---------------------------------------|
| 1 | 03.03.2022 | The Potential of AI for Robotics Innovations | Toronto | Jan-Peter Schulz |
| 2 | 08.09.2022 | 3. Jahrestagung „KI in der industriellen Produktion“ | Hannover | Fabian Neuschmidt |
| 3 | 08/9.11.2023 | Formnext Messe | Frankfurt | Jan-Peter Schulz Fabian Neuschmidt |

HAP 0: Management und Controlling

AP 0.1 Definitionen der Schnittstellen & Anforderungen

Aufgrund der interdisziplinären Wissensverteilung wurden zu Beginn die verschiedenen Anforderungen aus den Teilbereichen abgestimmt.

Die Hardware und Softwarekomponenten für das Training der KI wurden diskutiert und festgelegt.

Für den Empfang von 3D-Daten vom Slicing-Programm des Fraunhofer IAPT wurde ein XML-Format abgestimmt.

Die Parameter, die für die Prozessstabilität durch das KI-Modell geregelt werden sollen, wurden definiert. Die Eingangsparameter sind im Wesentlichen die Bahnvektoren aus dem Slicer-Modul sowie die erlaubten Abweichungen in den Rotationen der Anfahrpunkte. Die Zielloptimierung betrifft die Minimierung der Beschleunigungen in den Roboterachsen. Diese Minimierung bedingt sowohl eine gleichbleibende Applikationsgeschwindigkeit als auch eine Minimierung der Schwingungen.

AP 0.2 Projektmanagement

Die Firma ICARUS koordinierte das hier vorgestellte Forschungsprojekt. Neben der Moderation von Projekttreffen und zweiwöchiger Telefonkonferenzen fungierte ICARUS als zentraler Ansprechpartner für den Projektträger.

Am 22.09.2022 wurde ein Projekttreffen am Fraunhofer Institut abgehalten.

Inhalte waren die weitere grundsätzliche Abstimmung sowie ein Hands-on am 3D druckenden Roboter.

Am 16.02.2023 wurden in einem Projekttreffen einfache 3D-Drucke auf Basis von Roboterprogrammen erstellt, die von der durch ICARUS bereitgestellten 3D-Druck-Software generiert und exportiert wurden.

Am 30.08.2023 wurde in einem weiteren Treffen zum ersten Mal ein einzelner Layer einer Freiformgeometrie auf ein nicht-planares Bauteil aufgetragen.

In der Folge ist ein Fehler in der Geschwindigkeitssteuerung des Dreh-Kipp-Tisches aufgefallen.

Am 11.10.2023 fand ein investigatives Treffen mit weiteren Experten von ICARUS statt, in dem die Ursache und Lösungen sowohl in der Simulation wie auch in der Roboterprogrammierung ermittelt werden konnten.

Im November 2023 nahm das Projektteam an der Formnext Messe in Frankfurt teil, einer der führenden globalen Messen für Additive Manufacturing und die nächste Generation der intelligenten industriellen Produktion. Diese Veranstaltung bot eine Plattform zur Präsentation der Arbeit und eröffnete Wege für zukünftige Kooperationen und Geschäftsmöglichkeiten.

Am 5. März 2024 fand der finale Test in Kombination mit dem Abschlusstreffen am Fraunhofer Institut statt. Es konnten erfolgreich mehrere Layer auf einem nicht planaren Bauteil mittels Kiro3D gedruckt werden.

AP 0.3 Durchführung Workshops

Im Jahr 2021 wurde das Kickoff Treffen bei ICARUS veranstaltet. Weiterhin gab es über die komplette Projektlaufzeit kleine online Workshops zu den Teilthemen, um die Schnittstellen abzustimmen.

HAP 1: Konzeption und Datenengineering

Aufgrund der Integration und Kommunikation der beiden Planungs-Einheiten und der Anbindung an die Simulationsumgebung sowie an den Roboter wurde ein übergreifendes Gesamtkonzept für das Verbundvorhaben KiRo3D2 entwickelt. Ausgehend von den internen Anforderungen wurde eine skalierbare und modulare Gesamtarchitektur entwickelt, welche die Basis für die zielgerichtete Zusammenarbeit der Teilfunktionalitäten darstellt.

AP 1.1 Konzeption der Datenpipeline

Da die Bahnplanung und Prozesssteuerung datengetrieben ist und das Training auf den gespeicherten Daten aufbaut, wurde ein robustes Datenpipeline-Konzept entwickelt, um Sensordaten effizient zu verarbeiten. Die erste Schicht stellt das abgestimmte XML-Format zwischen Slicer und Bahnplanungs-Modul dar. Für die weitere Kommunikation mit dem RCS Modul des Roboterherstellers wurde ein RCS Client auf Basis des RRS Protokolls entwickelt.

AP 1.2 Bereitstellung des Offline-Slicing-Tools zur Integration mit der Bahnplanung

Die bereits entwickelten Slicing-Algorithmen zur Datenaufbereitung wurden als Plug-in-Modul für die zu entwickelnde 3D-Druck-Suite bereitgestellt. Die notwendigen Daten, um den aus mehreren Schichten bestehenden Druckauftrag zu definieren, wurden diskutiert und zwischen FRAUNHOFER und ICARUS abgestimmt. Die darauffolgende Datenübergabe an die Bahnplanung wurde konzeptioniert.

MS 1 Konzeptentwicklung und Datenpipeline abgeschlossen

Der Meilenstein 1 wurde wie geplant im ersten Quartal 2022 erreicht.

HAP 2: Entwicklung eines parallelen Bahnberechnungsmoduls

Das Bahnberechnungsmodul spricht mehrere *Robot Controller Software* (RCS) Module parallel an, um eine schnelle und originalgetreue Simulation sicherzustellen. Das Modul ermöglicht die effiziente Berechnung von Bahnen für den Industrieroboter und wurde erfolgreich implementiert. Ziel war es, eine hohe Rechenleistung zu erreichen und gleichzeitig eine hohe Qualität der simulierten Bewegungen sicherzustellen. Das Bahnberechnungsmodul wurde in die Gesamtarchitektur des KiRo3D2-Systems integriert und spielt eine wichtige Rolle für die Optimierung der Bewegungsabläufe des Industrieroboters.

AP 2.1 Bereitstellung von Hard- und Software für die Parallelberechnung

Die im HAP 1 definierte Hard und Software für die Bahnplanung und das Training der KIs wurde durch einen eigenen Server sowie Lizenzen für das Bahnplanungsmodul des Roboterherstellers gestellt. Es gab keine Performance-Engpässe, die eine Cloudlösung notwendig gemacht hätten. Zusätzlich wurde die automatische Erstellung von Trainingsdaten für das Bahnplanungsmodul konzeptioniert.

AP 2.2 Erweiterung des RCS Clients für die Bahnplanungsmodule

Es wurde ein RCS-Client entwickelt, der eine Anbindung an die Simulationsmodule von KUKA ermöglicht. Hierfür wurde das herstellerübergreifend verwendete *Realistic Robot Simulation* (RRS) Protokoll implementiert. Der RCS-Client kann dadurch auf das Bahnplanungsmodul des Roboterherstellers zugreifen und die Bahnen des Industrieroboters realitätsgetreu simulieren.

HAP 3: Automatisierung der optimierten Roboterbahngenerierung

Für die automatische Optimierung und Generierung von Roboterbahnen wurde eine Softwarelösung (Kiro Print App) entwickelt, die auf Basis des Inputs des Slicer-Programms im XML-Format eine Roboterbahn generieren kann. Aus jedem zu druckenden Layer wird dabei ein eigenes Programm in der KUKA Robot Language geschrieben. Die Software nutzte initial Deep-Learning-Verfahren, um bestmögliche Bahn für den Industrieroboter zu planen. Die Kiro Print App wurde in 2023 auf konventionelle Algorithmen umgestellt und erhielt die Fähigkeit zur Kollisionskontrolle und zur Überprüfung der Applikationsgeschwindigkeit sowie einen komplett überarbeiteten Ansatz zur Bahnplanung mit kontinuierlicher Drehung des vor dem Roboter angebrachten Dreh-Kipp-Tisches. Das Format der ausgegebenen Roboterprogramme wurde im weiteren Projektverlauf überarbeitet, um Speicherplatz auf dem Roboter zu sparen und so Problemen bei längeren Programmen vorzubeugen.

AP 3.1 Entwicklung eines KI-Modells zur Optimierung der Erreichbarkeit

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem das Platzieren der zu druckenden Objekte mittels *Supervised Learning* trainiert werden kann. Die Bewertung einer Platzierung erfolgt anhand des Abstandes der einzelnen Achsen des Roboters von Achsgrenzen und Singularitäten.

AP 3.2 Automatisierung der Erstellung der Umfahrpunkte

Jeder Layer besteht aus mehreren, voneinander getrennten Bahnen, auf denen durchgehend geschweißt wird. Zwischen den Bahnen wird mit ausgeschaltetem Laser verfahren. Die

Kiro Print App generiert Umfahrpunkte zwischen den Bahnen, um die Einhaltung geeigneter Orientierungs- und Geschwindigkeitsprofile sicherzustellen und den Laser an angemessenen Stellen an- und auszuschalten. Die Strategie für die Erstellung der Umfahrpunkte ist variabel.

AP 3.3 Entwicklung eines KI-Modells für die Optimierung der Geschwindigkeit und Konfiguration

Der initial verfolgte Ansatz basierte darauf, Roboterbahnen in *Tripel* aus jeweils drei aufeinander folgenden Punkten zu zerlegen. Ein mittels *Reinforcement Learning* trainierter *Agent* lernt dann, den jeweils mittleren Punkt des *Tripels* so zu drehen, dass die diesen Punkt umfahrende Kurve im Achsraum des Roboters optimiert wird. Abbildung 2 zeigt, wie sich eine Änderung im Wesentlichen auf den Bereich innerhalb eines solchen Tripels auswirkt. Durch die Verbesserung sich kontinuierlich überlappender Tripel mit dem trainierten Agenten soll so eine gesamte Bahn so optimiert werden.

Ziel der Optimierung ist die Minimierung auftretender Achsbeschleunigungen. Die Pfadsimulation eines *Tripels* mit 3 Zielpunkten liefert für jeden Interpolationszeitschritt die Achskonfigurationen der 6 Roboterachsen. Daraus wird für die einzelnen Zeitschritte erst die Geschwindigkeit und dann die Beschleunigung der jeweiligen Achsen ermittelt.

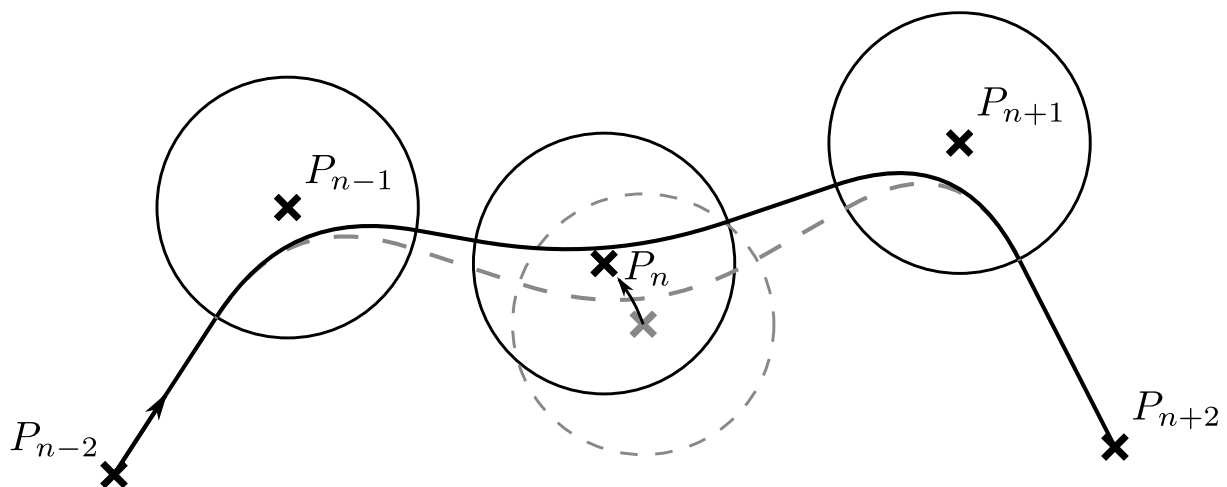


Abbildung 2: Lokale Auswirkung einer Punktänderung auf die umgebenden Bahnabschnitte

Um Ausreißer stärker zu bestrafen, wurde dann für gesamte Roboterpfade die mittlere quadratische Abweichung der Beschleunigungswerte von 0 als zu minimierende Bewertungsfunktion verwendet. Abbildung 3 zeigt beispielhaft das Beschleunigungsprofil eines *Tripels* vor und nach der Optimierung anhand der beschriebenen Bewertung durch Drehung des mittleren Pfadpunktes. Deutlich zu sehen sind die Beschleunigungsspitzen am Anfang und am Ende der Bewegung, die aus der Beschleunigung aus dem Stillstand sowie dem Abbremsen am Ende entstammen. Diese Beschleunigungen treten so im Gesamtpfad nicht auf, da an den entsprechenden Zielpunkten verschliffen wird, solange es sich nicht um den ersten oder

letzten Punkt des Gesamtpfades handelt (vgl. Abbildung 2). Aus diesem Grund werden einige Zwischenpunkte, die sich in der Beschleunigungs- oder Verzögerungsphase befinden, bei der Bewertungsfunktion von Pfadtripeln ignoriert.

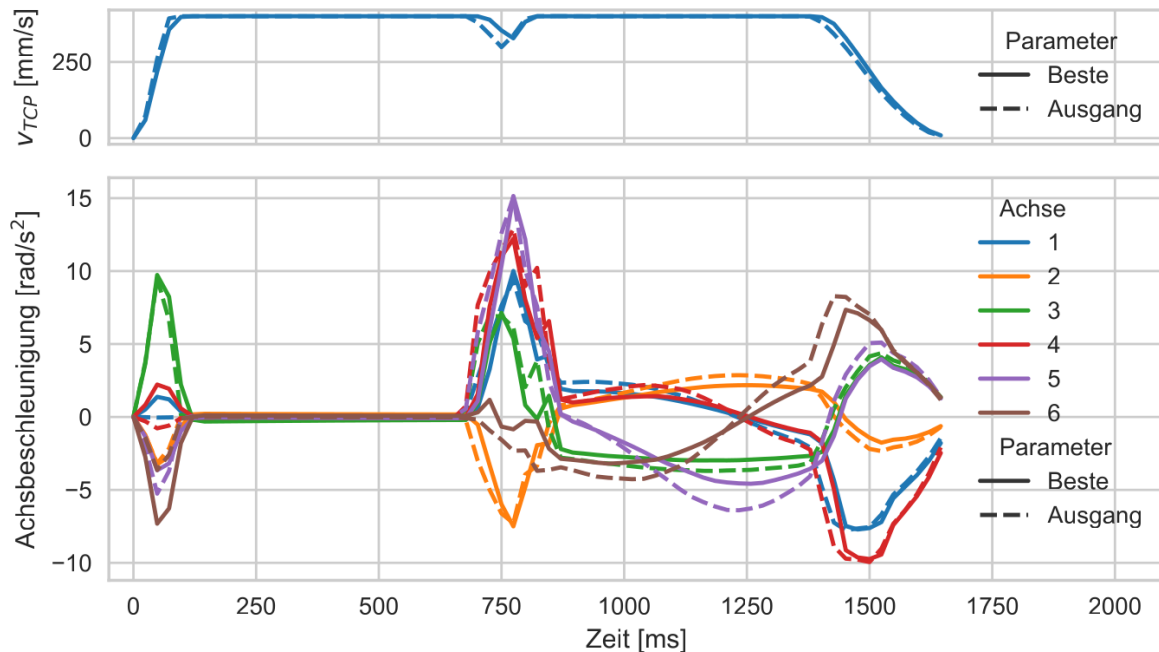


Abbildung 3: Vergleich der besten Orientierung des Mittelpunktes eines Pfadtripels mit der Ausgangslage

Der Lernprozess des *Reinforcement Learning* wurde mithilfe der Python-Bibliotheken RLLib und Tune umgesetzt. Beide sind Teil des quelloffenen Ray-Projektes für verteiltes Rechnen. Mit Tensorflow und PyTorch unterstützt und abstrahiert RLLib zwei verbreitete Bibliotheken für die Erstellung und das Training von Machine-Learning-Modellen. Tune erlaubt das automatisierte Tuning von Hyperparametern anhand verschiedener Strategien. Durch die Verwendung von RLLib und Tune können bewährte Lernalgorithmen einfach und automatisiert verwendet werden. Dafür musste eine virtuelle *Umwelt* erstellt werden, in der sich der anzulernende *Agent* entwickelt. Im Laufe des iterativen Lernprozesses erfährt der Agent wiederholt den Zustand der Umwelt, und wählt anschließend eine von mehreren ihm zur Verfügung stehenden Aktionen. Anschließend erhält er eine Belohnung. Im Verlaufe des Trainings ändert der Agent sein Verhalten so, dass die erhaltenen Belohnungen steigen. Abbildung 4 zeigt den Prozess.

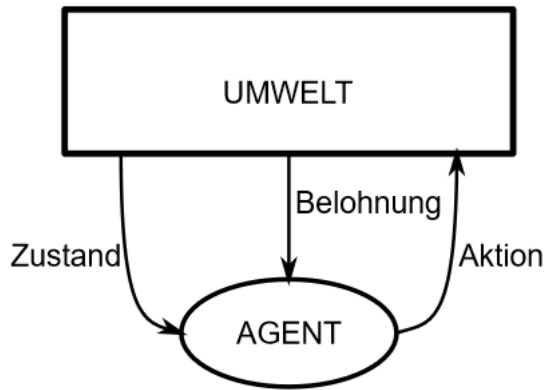


Abbildung 4: Rolle des Agenten beim Reinforcement-Learning

Im Rahmen des Projektes wurde ein Lernprozess aufgebaut, dessen Kern die Bereitstellung einer geeigneten *Umwelt* für das Training von *Agenten* für die Pfadoptimierung von Robotern ist. Einen Überblick über den Trainingsprozess bietet Abbildung 5. *Trainer* generiert mithilfe eines Moduls für die Testpfaderstellung immer neue Kombinationen aus *Tripeln*, die sich im Arbeitsbereich des Roboters und in unmittelbarer Nähe des Dreh-Kipp-Tisches für den 3D-Druck befinden. Der in HAP2 entwickelte Client für die Anbindung an die RCS-Robotersimulationsmodule von Industrieroboterherstellern wurde verwendet, um realitätsgetreue Robotersimulationen entlang der *Tripel* zu berechnen. Basierend auf den Simulationsergebnissen wird eine Bewertung für das *Tripel* vergeben, die maßgeblich auf der gewichteten quadrierten Beschleunigung der verschiedenen Roboterachsen basiert. Höhere Achsbeschleunigungen verschlechtern die Bewertung.

Das Training von Agenten wird in einem separaten Python Prozess koordiniert, der RLlib nutzt. In mehreren Arbeitsprozessen wird eine *Umwelt* bereitgestellt, um parallel mehrere Agenten zu trainieren. Die *Umwelt* kommuniziert über eine Shared-Memory-Verbindung mit dem zuvor beschriebenen *Trainer*, um *Tripel* und Bewertungen auszutauschen. Die im Trainer erstellten *Tripel* werden als Zustand an die *Agenten* weiterzugeben. Die Aktion eines *Agenten* ist es, das *Tripel* durch Rotation des Mittelpunktes zu verändern. Die Belohnung des Agenten erfolgt anhand der Bewertung, die der *Trainer* auf Basis von der Achsbeschleunigungen für das vom *Agenten* veränderte *Tripel* vergibt.

Kiro3D Trainingsprozess

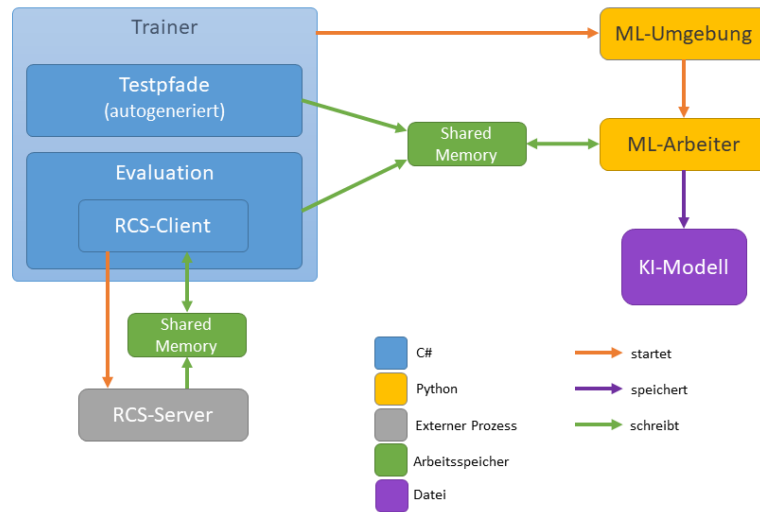


Abbildung 5: Trainingsprozess der Pfadoptimierung

Im Projektverlauf wurden Agenten mit den Trainingsalgorithmen DDPG und SAC und einer Vielzahl von Hyperparameterkombinationen getestet. Dabei wurde bei beiden Verfahren ein messbarer Lernerfolg erzielt. In Abbildung 6 und Abbildung 7 wird für zwei beispielhafte Testläufe jeweils die im Verlauf des Trainings zunehmende Belohnung für mehrere Parameterkombinationen gezeigt. Beide Verfahren und alle Parameterkombinationen wurden mit dem gleichen Satz an Pfadtripeln trainiert. Das bessere Ergebnis wurde bei der Verwendung von DDPG erhalten.

Im Anschluss an das Training konnte die Performanz der Agenten im Rahmen eines Auswertungsschrittes validiert werden. In einem Test mit 2000 *Tripeln* veränderte ein mit DDPG trainierter *Agent* diese signifikant besser als ein untrainierter *Agent*, der zufällige Veränderungen vornahm.

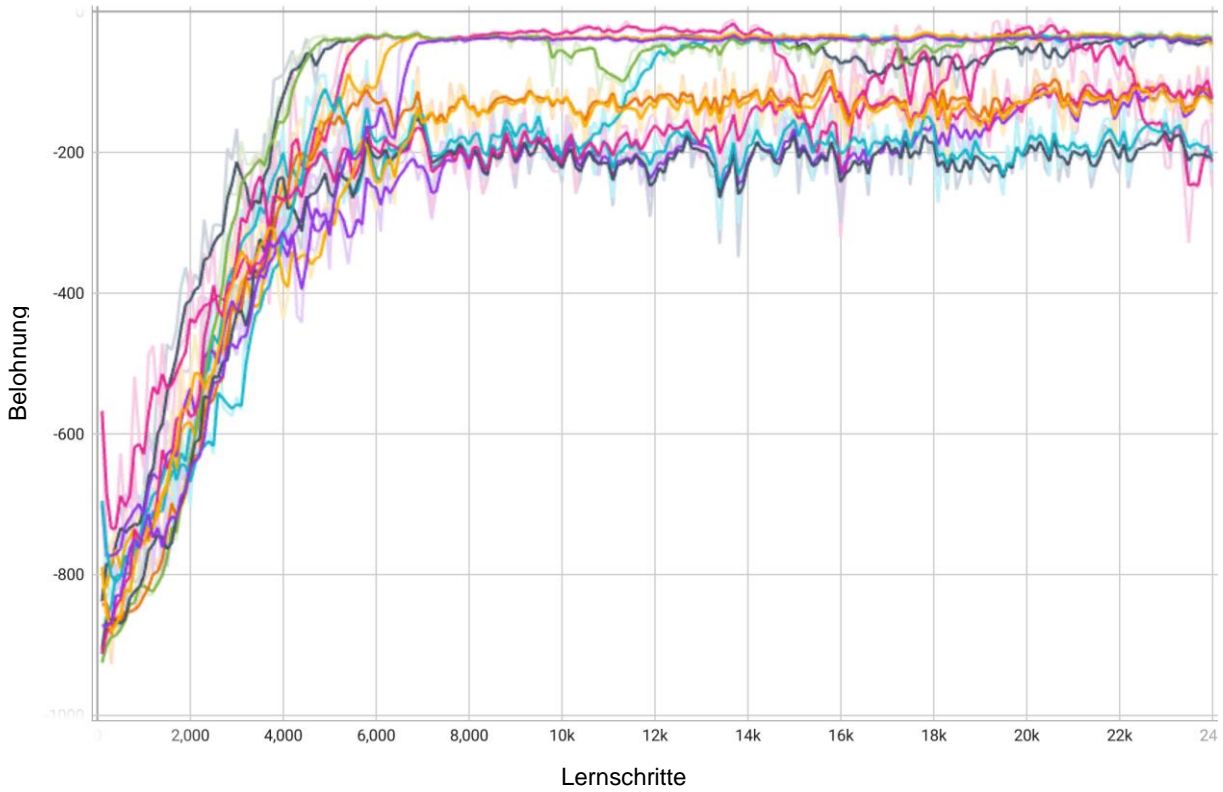


Abbildung 6: Lernerfolg mit SAC und verschiedenen Hyperparametern.

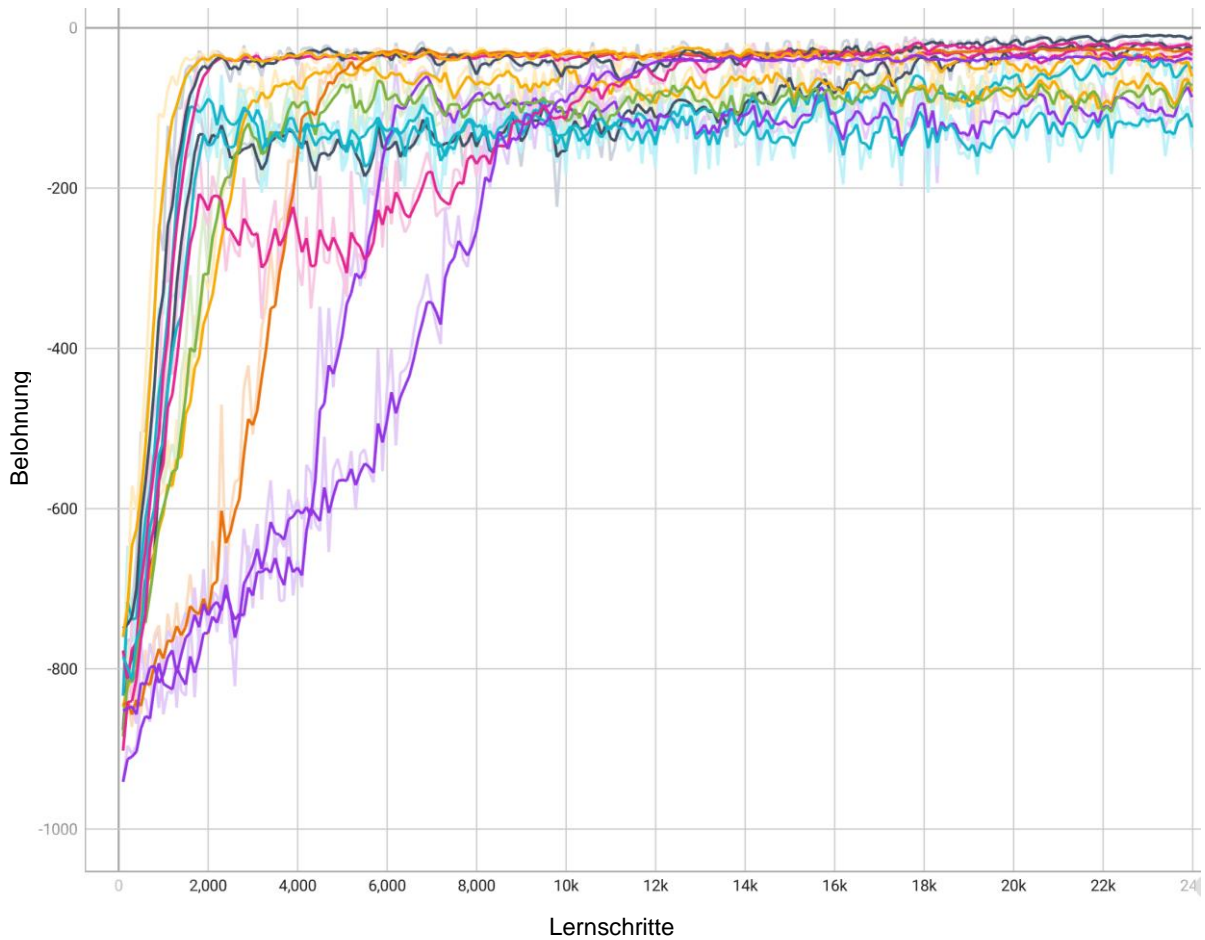


Abbildung 7: Lernerfolg mit DDPG und verschiedenen Hyperparametern.

Allerdings konnte die Performance noch einmal deutlich von einem naiven *Agenten* übertroffen werden, der kein Reinforcement Learning verwendete und die Tripel stattdessen mithilfe einer auf SLERP-Interpolation basierender Vorschrift veränderte.

Schlussendlich blieben die Lernerfolge damit hinter den Erwartungen zurück.

Ein wichtiger Grund dafür ist die Nähe, in der Pfadpunkte beim 3D-Druck zueinander liegen. In den vom Fraunhofer IAPT geslicten 3D-Daten liegen aufeinanderfolgende Pfadpunkte mit einem Abstand von jeweils 1mm. In der Folge führt jede Verdrehung von aufeinanderfolgenden Pfadpunkten gegeneinander zu einer notwendigen Achsbewegung des Roboters. Ein optimierter Roboterpfad zeichnet sich deshalb oft dadurch aus, dass alle Pfadpunkte gleich orientiert sind. Sollte eine Drehung aufgrund der Bauteilgeometrie notwendig sein, bietet sich die SLERP-Interpolation für eine gleichmäßige Rotation über mehrere Pfadpunkte hinweg an. Die trainierten *Agenten* waren nicht in der Lage, diese schlichte Lösung für das Pfadoptimierungsproblem zu reproduzieren.

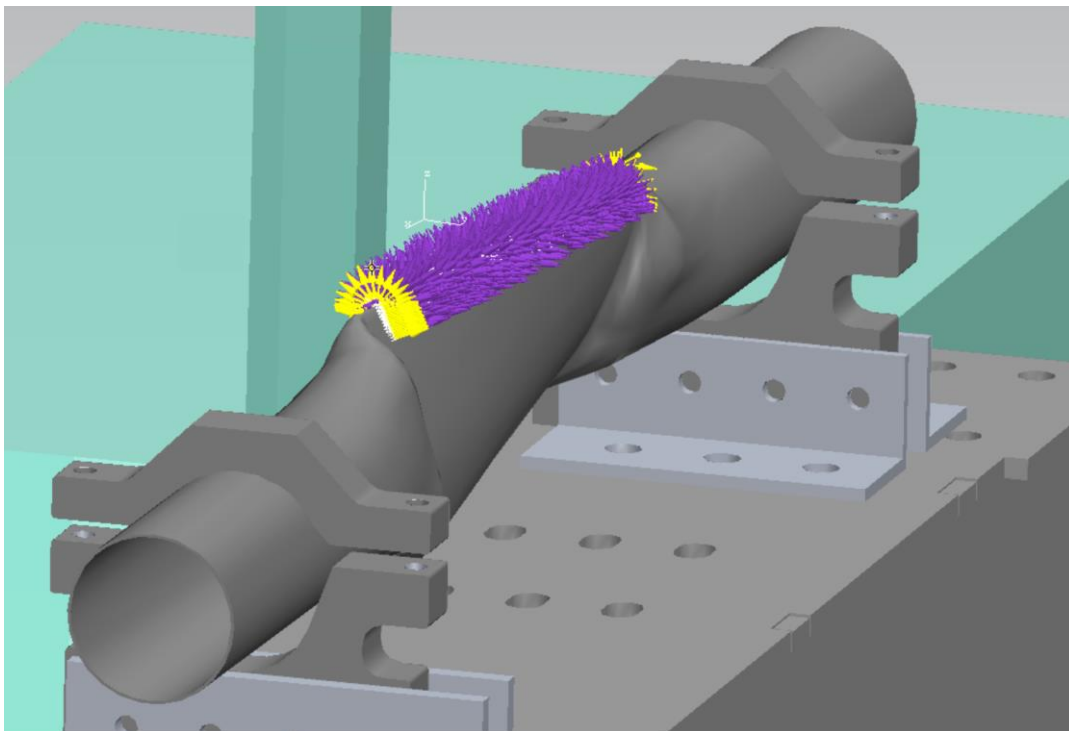


Abbildung 8: Mit dem neuen Ansatz generiertes Programm für eine Freiformgeometrie.

In der Folge wurde ein weiterhin automatischer Prozess für die Generierung und Optimierung von Roboterpfaden entwickelt, der die geometrischen Randbedingungen mithilfe von herkömmlichen Algorithmen löst. Dieser kann maßgeblich von den zuvor vorgestellten Modulen für die Simulation und Auswertung von Roboterpfaden und Pfadabschnitten profitieren und unterstützt einen vor dem Roboter platzierten Dreh-Kipp-Tisch, der im Programmablauf auch während der Applikation kontinuierlich gedreht werden kann. In der initialen Phase des Prozesses wird an jedem Punkt des geslicten Modells, welches ausschließlich aus

translatorischen Koordinaten besteht, ein Pfadpunkt erstellt, der sowohl Koordinaten als auch Ausrichtungsinformationen umfasst. Dabei ist die Z-Achse jeweils in Richtung der Normalen der entsprechenden Fläche ausgerichtet. Anschließend erfolgt die Ermittlung der optimalen Rotation des Dreh-Kipp-Tisches für jeden dieser Punkte, um die Z-Achse senkrecht nach oben auszurichten. Im letzten Schritt wird eine Abstimmung zwischen den Bewegungsgrenzen des Roboters und des Tisches vorgenommen. Diese Balance ermöglicht es, den Kopf des Roboters in Relation zur Vertikalen oder zum Tisch zu neigen, um so überhöhte Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Achsen zu vermeiden. Dadurch kann die Applikationsgeschwindigkeit konstant gehalten werden.

Abbildung 8 zeigt ein mit diesem Ansatz erstelltes Programm.

AP 3.4 Vermeidung von Kollisionen

Zur Vermeidung von Kollisionen wurde ein Prüfalgorithmus entwickelt, der eine Kollision des Roboterkopfes mit dem Tisch oder dem im Druck befindlichen Bauteil vermeidet. Eine Kollision von anderen Teilen des Roboters wird durch Vorgabe geeigneter Konfigurationen ausgeschlossen. Für die Kollisionskontrolle wurde mittels Photogrammetrie ein 3D-Modell des Roboterkopfes erstellt. Der Algorithmus nutzt Octrees, um eine Kollision mit dem Tisch oder zuvor gedruckten Layern des Modells zu vermeiden. Diese Prüfung kann bereits zum Zeitpunkt der Programmerstellung in der Kiro Print App und damit vor einem Export zu Process Simulate angewendet werden. Zur manuellen Prüfung der Ergebnisse können die Kollisionspunkte in PS angezeigt werden, siehe Abbildung 9.

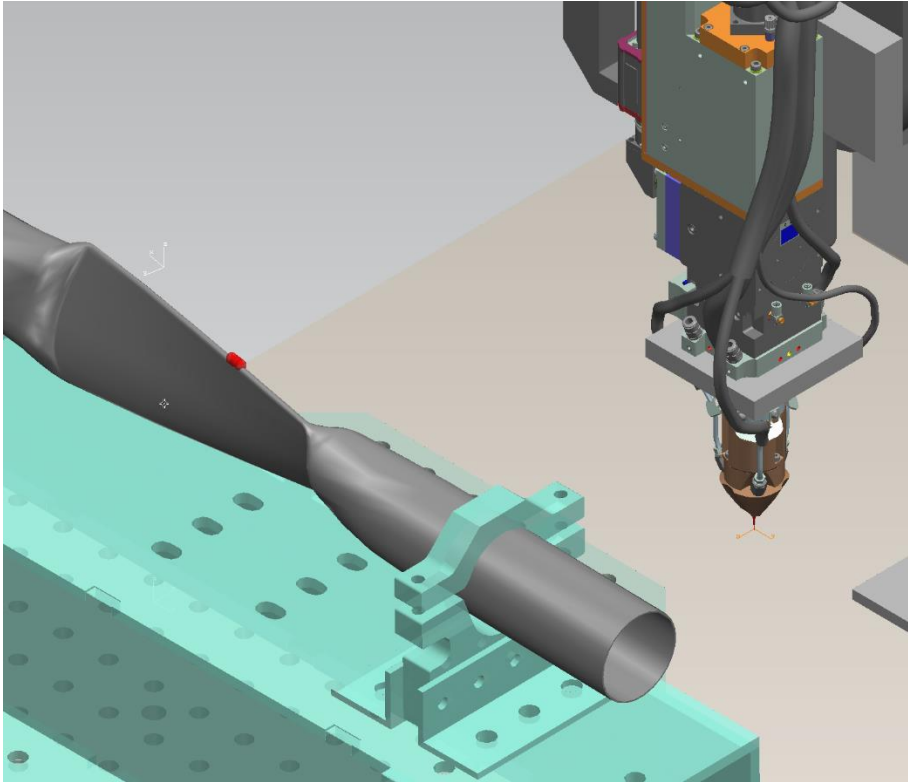


Abbildung 9: Import von Kollisionshinweisen in Process Simulate. Die Roten Punkte auf der Bauteilkante weisen auf eine Kollision hin.

AP 3.5 Integration der Bahnplanungsmodule zu einem Komplettsystem

Die zuvor beschriebenen Algorithmen für die Generierung, Platzierung und Optimierung von Roboterbahnen wurden in der Kiro Print App zusammengefasst. Die Print App ist eng mit der Robotersimulationssoftware Process Simulate verknüpft, die einen digitalen Zwilling der für den 3D-Druck verwendeten Roboterzelle darstellen kann.

Die Print App kann von PS aus gestartet werden und erlaubt direkt nach dem Start die Auswahl des zu verwendenden Roboters durch einen Click in PS. Nach der Auswahl des zu verwendenden Tool- und Objektkoordinatensystems öffnet sich dann die Hauptseite der App. Hier kann ein dem Datenaustauschformat aus HAP 1 entsprechendes XML eingelesen werden, wobei optimierte Roboterpfade für alle Layer erstellt werden.

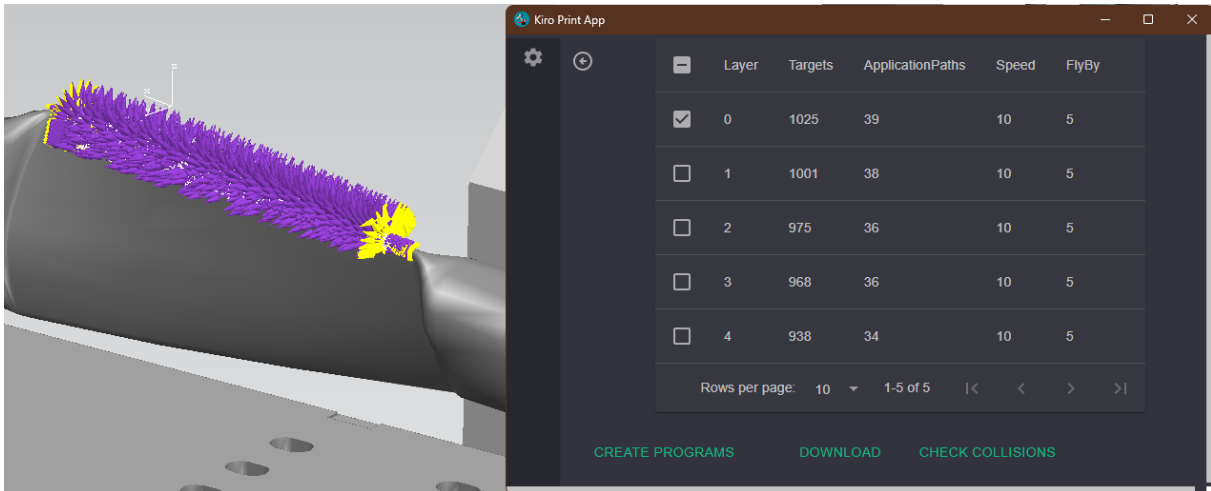


Abbildung 10: Hauptseite der Kiro Print App sowie eines erstellten und importierten Pfades.

Die Print App, hier in Abbildung 10 dargestellt, ermöglicht die visuelle Überprüfung von Roboterbewegungen und TCPF-Geschwindigkeitsprofil sowie den direkten Download von Roboterprogrammen aus der Print App. Letzterer kann durch umfangreiche Einstellungen wie z. B. Laserleistung, Steuerbefehle für die Pulverförderung etc. an die Bedürfnisse der Roboter- und Lasersteuerung angepasst werden. Weiterhin können die Roboterprogramme sowie mögliche Kollisionspunkte in PS hineingeladen werden, um eine manuelle Prüfung und oder erneute Simulation zu ermöglichen.

MS 3 Bahnplanungs KI-Einheit entwickelt

Alle Bestandteile von HAP 3 sind in einem intuitiven 3D-Druck-Bahnplanungs-Suite Demonstrator zusammengefasst. Mittels der Kiro Print App können automatisch optimierte Roboterpfade für geslicte 3D-Modelle erstellt werden.

HAP 4: Erzeugung der Datengrundlage durch Optische Sensoren

AP 4.2 Erzeugung der Datengrundlage

Für die Erzeugung der Datengrundlage durch die optischen Sensoren wurden verschiedene Programme gerechnet, um Schweißversuche mit unterschiedlichen Prozessparamater wie Laserleistung oder Verfahrensgeschwindigkeit durchzuführen.

Auf Basis dieser Programme konnten Bilder aufgenommen werden, welche später den Software-Agenten trainieren.

HAP 7: Testen des gesamten Systems

AP 7.1 Testen der vortrainierten Modelle und Systeme

Am 16. Februar wurde ein erster Systemtest durchgeführt, um die grundsätzliche Robotersteuerung, die Syntax des von der Kiro Print App erstellten Programms sowie erste Bestandteile des Pfadgenerierungsalgorithmus zu testen. Hierbei wurde der in Abbildung 11 gezeigte KiRo3D-Schriftzug mit zwei Layern auf eine ebene Platte aufgedruckt. Dieser Test verlief erfolgreich, wenngleich verschiedene Fehler in der Programmgenerierung gefunden wurden, die im weiteren Projektverlauf behoben werden mussten.



Abbildung 11: Gedruckter KiRo3D-Schriftzug

Ein zweites Drucktreffen erfolgte am 30. August. Hier wurde erstmalig versucht, unter Zuhilfenahme der neuen Pfadgenerierungsstrategie eine Freiformgeometrie auf eine Freiformoberfläche aufzudrucken. Als größtes Hindernis stellte sich das Einmessen des auf dem Tisch festgeschraubten Werkstücks heraus.

Durch Verwendung einer Einmessvorrichtung mit nur einem Referenzpunkt konnte eine Verdrehung des Werkstücks nicht korrigiert werden. In der Folge variierte der Abstand zwischen Druckkopf und Werkstück an verschiedenen Stellen des zu druckenden Objektes stark,

wodurch die Druckqualität beeinflusst wurde. Daher konnte der erste Layer nicht vollständig gedruckt werden.

Durch die gedruckten Bahnen und einen Trockendurchlauf des gesamten Programms ohne Verwendung des Lasers konnte der neue Pfadplanungsansatz trotzdem validiert werden. Das generierte Programm erreichte die Zielvorgaben zur Roboterkonfiguration, Erreichbarkeit und Kollisionsfreiheit.

Abbildung 12 zeigt den Druckvorgang. Im generierten Programm fiel ein Fehler in der Geschwindigkeitssteuerung des Dreh-Kipp-Tisches auf, der bei einem späteren Treffen isoliert und behoben wurde. Durch ein falsches Setzen der Geschwindigkeit bei Linearbewegungen wurde die Tischdrehung durch die vorher für achsweise Bewegungen festgelegte Geschwindigkeit eingeschränkt. Gelöst werden konnte dieses durch die Nutzung anderer Befehle für das Setzen von Geschwindigkeiten.

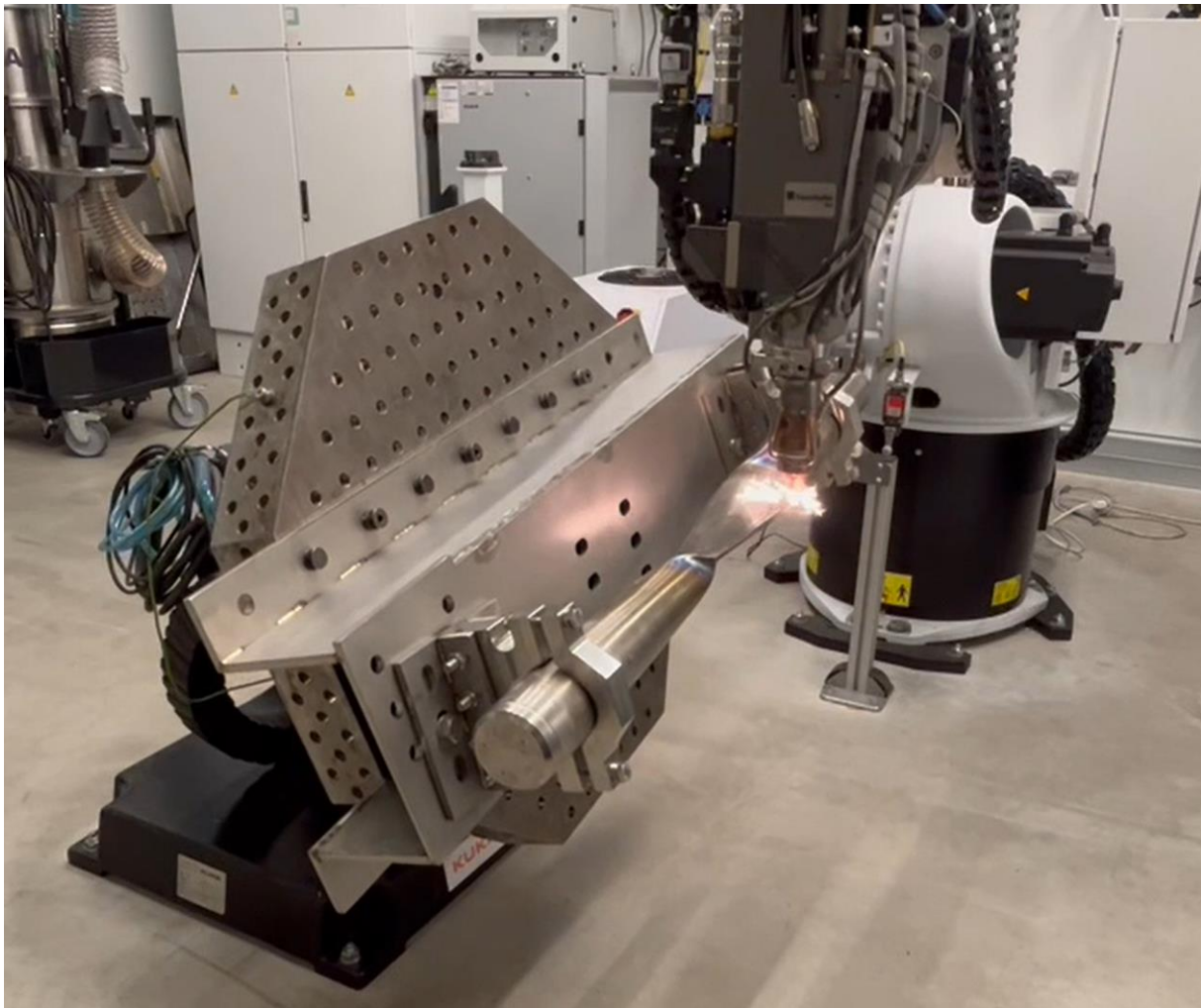


Abbildung 12: Druck der Freiformgeometrie auf eine unebene Oberfläche

Am 5. März 2024 wurde schließlich ein erfolgreicher Komplett-Test der 3D-Druck Suite und aller entwickelten Komponenten durchgeführt. Die Position des Werkstückes konnte mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Mittels der 3D-Druck Suite wurden automatisiert

Programme für alle Layer generiert, die im Anschluss ohne manuelle Veränderung gedruckt werden konnten. Abbildung 13 zeigt einen Zwischenstand im Verlauf des Druckprozesses.



Abbildung 13: Auftrag mehrerer Layer der Freiformgeometrie auf die Kante eines Werkstücks

AP 7.2 Optimierung des vortrainierten Modells und Performanz-Prüfung

Die Performanz der implementierten Ansätze im Bereich Pfadplanung und Kollisionskontrolle erfüllen die Performanz-Anforderungen auf herkömmlichen Laptops. Durch den Wegfall von maschinellem Lernen in der Pfadplanung erübrigt sich die Notwendigkeit von CPU- oder GPU-Clustern für rechenintensives Training von Modellen.

Stattdessen wurde viel Zeit in den Ausbau der Simulation und die Kommunikation mit RCS-Modulen gesteckt. Insbesondere wurde die Schnittstelle so erweitert, dass Roboter verschiedener Steuerungsgenerationen der Hersteller ABB und KUKA unterstützt werden. Die Simulationen wurden detailgenau mit den von Process Simulate durchgeführten Simulationen verglichen und verbessert.

Die Simulationsmodule wurden in ein eigenes, Robotion genanntes Softwaremodul ausgelagert. Robotion ist nach dem Client-Server Prinzip strukturiert, und wird ICARUS in Zukunft erlauben, neben KiRo3D auch andere UseCases auf Basis eigener Simulationen umzusetzen.

MS 5 Demonstrator-Prototyp abgeschlossen

Der Meilenstein 5 wurde zum Projektende erreicht. Mittels der entwickelten 3D-Druck Suite konnten Programme für einen mehrlagiger Druck einer Freiformgeometrie auf eine unebene Oberflächengeometrie erzeugt und später durchgeführt werden. Wie im Abschnitt zu AP 3.3 beschrieben, musste für die Pfadplanung im Projektverlauf Abstand von einer KI-basierten Lösung genommen werden.

3. Verwertbarkeit und Planungen für die nähere Zukunft

Der Vertrieb einer kompletten Roboter 3D Druck Suite ist aufgrund des Konkurrenzdrucks nicht mehr umsetzbar. Für die im Rahmen des Projektes entwickelte Anbindung der RCS-Module für die realistische Robotersimulation wurden mehrere potentiell vermarktbare Verwendungszwecke identifiziert, die sich aktuell im Ausbau befinden.

Seit April 2024 wird im Rahmen einer Bachelorarbeit eine automatische Optimierung entwickelt, die mehrfache RRS-Simulationen nutzt, um Roboterbahnen im Hinblick auf Energieeffizienz und reduzierte Schwingungen zu optimieren. Die Optimierung soll in Form eines Erweiterungspaketes für die Offlineprogrammierungssoftware Process Simulate in der Automobilindustrie vertrieben werden.

Zudem wird die Entwicklung eines Webservices für Robotersimulationen untersucht, der beispielsweise von den aktuell am Markt befindlichen 3D-Druck Suites genutzt werden kann.

4. Im Laufe der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Zuge der Vertriebstätigkeiten, insbesondere durch den Besuch der Formnext 2023 wurde klar, dass mehrere fertige Roboter 3D-Druck Suites existieren, welche den Markt unter sich aufgeteilt haben.

Diese Lösungen bieten eine konfigurierbare Pfadgenerierung für unterschiedlich ausgestattete Roboterzellen. Eine Laufzeitanpassung der Druckparameter durch ein Überwachungssystem wird nicht angeboten. Bewegungseinschränkungen des Roboters werden statisch vorgegeben, eine Kontrolle der erstellten Bahnen mittels realistischer RRS-Simulationen findet nicht statt.

5. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Ein Verfahren zur Platzierung von zu druckenden Objekten mittels Supervised Learning wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „*Optimizing reachability of a 6-axis Robot in 3D Printing using Machine Learning*“ von Ali Kiani an der Technischen Universität Hamburg entwickelt.

Darüber hinaus hat der Projektpartner Fraunhofer IAPT mehrere weitere Veröffentlichungen zu dem im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnissen getätigt.

Kurzbericht: Forschungsprojekt KiRo3D²

1. Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischer Kontext

Das Projekt KiRo3D² zielte darauf ab, die Automatisierung und Digitalisierung in KMUs durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz und Automatisierung bei roboterbasierten Additive Manufacturing (AM) Prozessen zu revolutionieren. Der aktuelle Stand der Technik in der Offline-Programmierung (OLP) von Industrierobotern, insbesondere bei KMUs, ist weitgehend manuell und sehr zeitaufwendig. Während große Unternehmen bereits grafikgesteuerte Softwareplattformen für die OLP einsetzen, sind kleinere Unternehmen oft auf die Fähigkeiten und das Wissen ihrer Techniker angewiesen. Diese umfangreichen Plattformen wie Tecnomatix Process Simulate (PS) oder Siemens NX ermöglichen jedoch keine oder keine zuverlässige, vollständig automatisierte Erstellung von Bahnapplikationen für die komplexe Kinematik von Industrierobotern mit 6 Achsen. Das KiRo3D²-Projekt knüpfte an diese Technologien an und strebte durch den Einsatz fortschrittlicher KI-Methoden eine vollautomatisierte Lösung an, die sowohl die Roboterdatenvorbereitung als auch die Prozessüberwachung und -steuerung verbessern würde.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Projekt durchlief mehrere Phasen, die von der Konzeptentwicklung und dem Datenengineering über die Entwicklung paralleler Bahnrechnungsmodul und Überwachungsprozesse bis hin zur automatischen Erstellung und Optimierung von Roboterbahnen reichten. Jede Phase umfasste spezifische Arbeitspakete, die darauf abzielten, die Ziele des Projekts schrittweise zu erreichen. Durch regelmäßige Abstimmungen und Austausch mit dem Projektpartner Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien (IAPT) sowie durch Teilnahme an relevanten Fachveranstaltungen konnte der Fortschritt des Projekts kontinuierlich evaluiert und angepasst werden.

3. Wesentliche Ergebnisse und Kooperationen

Die Entwicklung des Projekts KiRo3D² führte zu mehreren bedeutenden Ergebnissen:

- **Realistische Robotersimulation:** Zwecks realitätsgetreuer Robotersimulation wurde eine Bibliothek und ein Webserver entwickelt, mithilfe derer die Robot Controller Simulation (RCS)-Module verschiedener Roboterhersteller über das Realistic Robot Simulation (RRS) Interface angesprochen und gesteuert werden können. Somit muss für Simulationen nicht auf eine bestehende OLP-Software wie PS zurückgegriffen werden. In der Folge können Simulationen schneller und gegebenenfalls parallel durchgeführt werden.
- **Automatisierte Bahnplanung:** Basierend auf Slicer-Daten, die lediglich den Ort von Schweißpunkten relativ zu einem bauteilfesten Koordinatensystem vorgeben, wurde eine automatisierte Bahnplanung entwickelt. Der erste Ansatz, eines voll KI gestützten Algorithmus, ergab leider keine stabile Bahnplanung.

Die alternative Lösung mit konventionellen Algorithmen platziert das Objekt auf einem Dreh-Kipp-Tisch vor dem Roboter und bestimmt für jeden Punkte die Tisch- und Tool-Orientierung sowie die Achskonfiguration des Roboters. Zusammen mit der Erstellung angemessener Umfahrpunkte und weiterer Anpassungen entstand so ein robuster Algorithmus für die Erstellung von abfahrbaren, geschwindigkeitsoptimierten und kollisionsfreien Roboterprogrammen für den Druck.

- **Entwicklung einer Prozessüberwachung:** Durch das Fraunhofer IAPT wurde eine KI-gestützte Prozessoptimierung entwickelt, die Kamera- und Temperaturdaten des Schmelzbades nutzt, um die lokal notwendige Laserleistung im Verlauf des Druckprozesses anzupassen.
- **Integration und Tests:** Die entwickelten Technologien wurden in eine roboterassistierte Laser-Pulver-Auftragschweißanlage integriert und erfolgreich getestet. Dies ermöglichte eine vollständige Automatisierung der Prozessvorbereitung und -steuerung und dient als Technologiedemonstrator.
- **Kooperationen und Fachveranstaltungen:** Eine enge Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAPT trug entscheidend zum Erfolg des Projekts bei. Gemeinsam wurden Datenpipeline-Konzepte entwickelt und durch regelmäßige Abstimmungen die Implementierung vorangetrieben. Das Projektteam präsentierte seine Fortschritte auf führenden Fachmessen wie der Formnext in Frankfurt.

Diese Ergebnisse demonstrieren nicht nur die Machbarkeit der vollautomatisierten Robotersteuerung in der Additiven Fertigung, sondern sie legen auch den Grundstein für zukünftige Anwendungen dieser Technologie in der Industrie. Die durch KiRo3D² entwickelten Methoden und Systeme bieten eine robuste Basis für die Weiterentwicklung und Anpassung an verschiedene Fertigungsumgebungen, wodurch sie das Potenzial haben, die Produktivität in KMUs signifikant zu erhöhen.

4. Zusammenfassung

Das KiRo3D²-Projekt hat wesentlich zur Automatisierung und Digitalisierung in der roboterassistierten Fertigung beigetragen, insbesondere in KMUs. Durch die erfolgreiche Integration künstlicher Intelligenz in den DED-Prozess und die Implementierung eines umfassenden Planungs- und Überwachungssystems wurden nicht nur die Effizienz und Qualität der Fertigungsprozesse verbessert, sondern auch die Grundlagen für den weiteren Einsatz dieser Technologien in der Industrie geschaffen. Die Ergebnisse des Projekts bieten eine solide Basis für weitere Forschung und Entwicklung in diesem schnell wachsenden Bereich.