

Kurzbericht

FKZ: 16IS23005A-B (ehemals 01IS23005A-B)

Projekt: **OptiPath**

Vorlagefrist:

30.11.2025

Kurzdarstellung des Schlussberichts:

Das Forschungsprojekt „OptiPath“ der cellumation GmbH und des OFFIS – Instituts für Informatik zielte auf die Entwicklung innovativer Verfahren zur robusten und effizienten Pfadplanung für Materialflusssysteme ab. Ausgangspunkt ist der steigende Bedarf an leistungsfähiger Paketlogistik infolge des rasant wachsenden E-Commerce-Markts. Insbesondere die zunehmende Paketmenge – verstärkt durch pandemiebedingte Entwicklungen – stellt Logistikunternehmen vor erhebliche Herausforderungen. Hier setzt das Projekt mit seiner Technologieplattform celluveyor an: einem modularen, individuell steuerbaren Fördersystem, das dezentrale Logistiklösungen ermöglicht und durch Mikro-Hubs eine Entlastung des innerstädtischen Lieferverkehrs verspricht.

Ziel des Projekts war es, neuartige Methoden der Pfadplanung und Pfadausführung zu entwickeln, die insbesondere in Multi-Agenten-Szenarien mit hoher Dichte von Transportobjekten eine stabile, kollisionsarme Steuerung ermöglichen. Im Fokus stand die nutzerfreundliche Gestaltung komplexer Verfahrensfunktionen, sodass Techniker und Integratoren Pfade intuitiv planen und anpassen können. Dafür wurden geometrische, klar visualisierbare Steuerelemente konzipiert, die als Grundlage für die Pfadplanung dienen. Diese wurden durch Verfahren zur numerischen Optimierung einzelner Pfade sowie durch lernbasierte Ansätze mittels Reinforcement Learning ergänzt, um sowohl statische als auch dynamische Bedingungen berücksichtigen zu können.

Die Projektergebnisse adressieren zwei zentrale Innovationsfelder. Erstens gibt es bislang kaum marktreife Multi-Agenten-Systeme, die zuverlässig mit einer Vielzahl kollidierender Transportpfade umgehen können. OptiPath schließt hier eine Lücke durch Verfahren, die sowohl Effizienz als auch Robustheit signifikant steigern. Zweitens werden durch die entwickelten Steuerungsansätze Planungs- und Einrichtungsprozesse erheblich vereinfacht, was eine breitere Einsetzbarkeit der Technologie auch für kleinere Logistiklösungen ermöglicht. Dies bietet vor allem für urbane Logistik neue Perspektiven – beispielsweise durch flexible Umschlagpunkte und den Einsatz emissionsarmer Transportmittel.

Im Verlauf des Projekts wurden neuartige Algorithmen zur Pfadplanung implementiert, die eine verbesserte Trajektorienführung sowie eine ressourcenschonende Nutzung der Fördermodule ermöglichen. Durch die Kombination geometrischer Bedingungen mit lernbasierten Steuerungsansätzen konnte die Planungszeit reduziert und die Systemleistung gesteigert werden. Dabei spielten insbesondere adaptive Mechanismen eine Rolle, die es erlauben, das Verhalten des Systems dynamisch an wechselnde Anforderungen anzupassen. Ergänzend wurden Simulations- und Visualisierungstools entwickelt, die eine intuitive Parametrierung und Überwachung der Fördersysteme unterstützen.

Ein wesentliches Ergebnis des Projekts ist der Nachweis, dass durch den kombinierten Einsatz von Optimierungs- und Lernverfahren eine deutliche Reduzierung von Engpässen und Kollisionen erreicht werden kann. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die entwickelten Methoden flexibel skalierbar sind – sowohl für kleinere Anwendungen in Mikro-Hubs als auch für größere Sortieranlagen in Verteilzentren. Dies trägt maßgeblich zur Verbesserung der Effizienz und Nachhaltigkeit logistischer Prozesse bei.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Mit OptiPath wurde ein wegweisender Ansatz für die interaktive, effiziente und robuste Pfadplanung im Bereich der Förder- und Sortiertechnik realisiert. Die entwickelte Lösung schafft die Grundlage für eine breitere, marktfähige Nutzung modularer Fördersysteme und leistet einen wichtigen Beitrag zur Bewältigung zukünftiger Herausforderungen in der urbanen und dezentralen Logistik.

Schlussbericht

„OptiPath - Interaktive Pfadoptimierung für omnidirektionale Paketflüsse“

Förderkennzeichen: 16IS23005A-B (*ehemals 01IS23005A-B*)

Laufzeit des Vorhabens:

01.05.2023 – 31.05.2025

Berichtszeitraum:

01.05.2023 – 31.05.2025

Durchführende Institutionen:

cellumation GmbH Kleiner Ort 7 28357 Bremen	OFFIS e. V. Escherweg 2 26121 Oldenburg
Autoren: Dr.-Ing. Melvin Isken (cellumation GmbH) Janosch Machowinski (cellumation GmbH) Thiemo Kort (cellumation GmbH) Simon Stock (cellumation GmbH)	Autoren: Dr. Tim C. Stratmann (OFFIS e. V., Oldenburg) Stanislav Ott (OFFIS e. V., Oldenburg) Henning Sander (OFFIS e. V., Oldenburg) Harald Roesen (OFFIS e. V., Oldenburg)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 16IS23005A-B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
I. Kurze Darstellung	3
1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	5
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
II. Eingehende Darstellung	8
1. Erzielte Ergebnisse.....	8
2. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	25
3. Während der Durchführung bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	26
4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	26

Abbildungsverzeichnis

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung



Abbildung 1: Omnidirektionales Transportsystem celluveyor der Firma cellumation GmbH.

Die cellumation GmbH stellt innovative Fördertechnik her, auf deren Basis komplett neue Anwendungen im Bereich der Materialflusssysteme erzeugt werden können. Ein Anwendungsfall ist die Sortierung von Paketsendungen sowohl in Verteilzentren als auch auf der „Letzten Meile“. Durch die Entwicklung des e-Commerce in den letzten Jahren mit stark steigenden Zahlen im Bereich des Paketversands, u.a. Pandemie-bedingt, wird die Notwendigkeit, diese Paketflut handhaben zu können, offensichtlich. Der celluveyor kann als modulares, individuell steuerbares System einen Beitrag zur Entlastung der Innenstädte von Lieferverkehr durch Schaffung von lokalen Verteilzentren (Mikro-Hubs) und Anbindung von Lastenrad-Dienstleistern leisten.

Ziel des Projekts OptiPath ist, die Pfadplanung und -ausführung robuster und effizienter sowie die Einrichtung der komplexen Verfahrfunktionen für Techniker und Integratoren nutzbar und anpassbar zu machen. Zum einen sollen klare geometrische und daher intuitiv visualisierbare Steuerelemente (Bedingungen) für die Pfadplanung entworfen werden. Zum anderen sollen durch neuartige Pfadplanungs- und Pfadausführungsmethoden basierend auf numerischer Optimierung von Einzelpfaden und Reinforcement Learning entwickelt und integriert werden, welche die geometrischen Bedingungen berücksichtigen können.

Die geplanten Projektergebnisse zielen in zwei Richtungen. Zum einen gibt es kaum marktreife Multi-Agenten-Systeme, die mit vielen oft kollidierenden Pfaden umgehen können. Dies ist dann ein Alleinstellungsmerkmal für den celluveyor. Zum anderen ist diese Art Systeme im Bereich Fördertechnik gänzlich unbekannt, da es noch kaum omnidirektionale Fördertechnik gibt, und verschaffen daher der cellumation GmbH einen entscheidenden innovationsgetriebenen Marktvorteil.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

cellumation ist ein innovatives High-Tech-Unternehmen, das modulare flexible Materialflusssysteme für Produktions- und Logistikmärkte anbietet und seinen Sitz in Bremen hat. Das Unternehmen ist eine Ausgründung aus dem Forschungsinstitut BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen und wurde im Mai 2017 gegründet. Die Gründer arbeiteten mehrere Jahre u.a. im BIBA zusammen und entwickelten innovative Robotiklösungen mit dem Schwerpunkt auf der Verbesserung der Effizienz und Flexibilität von Produktions- und Logistikprozessen. Mit dem Produkt celluveyor bietet cellumation eine neuartige Möglichkeit, Transportgut im Rahmen von Intralogistiksystem flexibel zu fördern und bietet damit eine Kosten- und Platzersparnis im Vergleich zu herkömmlichen Systemen an. Dies reicht von einfachen Sortier-Bausteinen bis hin zu komplexen Depalletiersystemen. Kunden von cellumation sind Systemintegratoren, die mit dem celluveyor ihren Baukasten zur Entwicklung neuer Intralogistiklösungen entscheidend erweitern können. Gegenwärtig ist cellumation für die gesamte Prozesskette von Konstruktion über Montage bis zur Inbetriebnahme zuständig, zukünftig wird sich cellumation noch stärker auf die Entwicklung und Konstruktion neuer Technologien konzentrieren.

Das Institut OFFIS erforscht als An-Institut der Universität Oldenburg neue Formen computergestützter Informationsverarbeitung in Hard- und Softwaresystemen und setzt die Ergebnisse in anwendungsnahe Entwicklungen um. Es beschäftigt sich seit vielen Jahren mit dem Thema innovative Nutzungsschnittstellen in den Domänen Gesundheit, Mobilität und Arbeitswelt. OFFIS entwickelt im Gebiet MTI (Mensch-Technik Interaktion) in regionalen, nationalen und internationalen Forschungsprojekten neue Interaktionsformen zur Verbesserung der Zugänglichkeit, Gebrauchstauglichkeit und User Experience.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Gesamtzeitplan	2022			2023												2024									OFFIS	GM	SUMME
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
AP1 Projektmanagement und Qualitätskontrolle																								5,5	6,0	11,5	
1.1 Projektkoordination, Kooperation mit externen Partnern																								2,5	4,0	6,5	
1.2 Überwachung des Projektfortschritts und der technischen Arbeiten																								2,0	2,0	4,0	
1.3 Öffentlichkeitsarbeit																								1,0	0,0	1,0	
AP2 Anforderungen, Systemkonzept																								5,0	7,0	12,0	
2.1 Anforderungserhebung und -analyse																								1,0	1,0	2,0	
2.2 Funktionale Spezifikation des Systems																								1,0	1,5	2,5	
2.3 Lösungskonzepte, Pflichtenheft																								1,0	1,5	2,5	
2.4 Spezifikation der Anwendungsfälle für die Evaluation																								2,0	3,0	5,0	
AP3 Modulares Pfadplanungs- und -ausführungssystem																								2,0	10,0	12,0	
3.1 Frameworkarchitektur																								1,0	4,0	5,0	
3.2 Schnittstellen zum celluveyor-System																								0,0	4,0	4,0	
3.3 Schnittstellen für modulare Planungs- und Ausführungsplugins																								1,0	2,0	3,0	
AP4 Intelligente Pfadplanungskonzepte																								18,0	4,0	22,0	
4.1 Räumliche und zeitliche Pfadbedingungen																								1,0	2,0	3,0	
4.2 Selbstlernende Methoden																								7,0	0,5	7,5	
4.3 Optimierungsbasierte Methoden																								7,0	0,5	7,5	
4.4 Visualisierungskonzepte für No-Code-Konfiguration																								3,0	1,0	4,0	
AP5 Integration																								2,0	5,0	7,0	
5.1 Testsuite für Pfadplanungskonzepte																								2,0	3,0	5,0	
5.2 Integration des Frameworks in das celluveyor-System																								0,0	2,0	2,0	
AP6 Demonstrator, Evaluation																								4,5	10,0	14,5	
6.1 Design und Entwicklung des Demonstrators aufgrund der Anwendungsfälle																								2,0	3,0	5,0	
6.2 Technische Evaluation																								1,0	2,0	3,0	
6.3 Abschlussevaluation																								1,0	3,0	4,0	
6.4 Auswertung																								0,5	2,0	2,5	
																								37,0	42,0	79,0	

Abbildung 2: Gantt-Chart der Arbeitspakete und Zeitplanung von OptiPath. Die Sterne bezeichnen Meilensteine und repräsentieren jeweils einen fertiggestellten Demonstrator.

Im Projektverlauf gab es auf OFFIS Seite eine Änderung in der Geräteliste, Laufende Nummer 2 der Geräteliste (Steuerrechnerduplikat) wurde gestrichen und stattdessen eine größere Konfiguration des celluveyor Go (Lfd.Nr. 3) angeschafft. Im Rahmen der Anforderungsanalyse im Projekt hat sich herausgestellt, dass die zu betrachtenden Use Cases eine größere Fläche auf dem celluveyor benötigen als zuvor geplant.

Die Anschaffung eines 10 Zellen anstatt 6 Zellen celluveyors reicht für die kritischen Use-Cases aus, sodass die Entwicklung, Tests und Demonstration integriert in die OFFIS Modellfabrik wie geplant erfolgen konnten. Die Anschaffung wurde kostenneutral durch Einsparungen für lfd. Nr. 2 finanziert. Die aktuelle Generation des cellueor Go benötigt keinen speziellen dedizierten Steuerrechner mehr und kann mit beliebig vorhandener Hardware angesteuert werden. Daher war die Anschaffung eines Rechners mit der exakt gleichen Konfiguration (bedingt durch Treiberanforderungen) nicht mehr nötig.

Ansonsten ist das Projekt planmäßig verlaufen.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Modulare Fördersysteme

Die große Mehrheit der derzeit verwendeten Fördersysteme bewegt Objekte auf vordefinierten Bahnen. Solche Systeme bestehen aus Hunderten von Elementen für lineare Bewegungen (d.h. Rollen- oder Bandförderer) und Knoten für Richtungsänderungen (d.h. Umlenkungen, Zusammenführungen), Drehungen (d.h. Wender) oder zum Hinzufügen von Funktionalität (d.h. Palettierung, Sequenzierung). Bemerkenswert ist, dass sich diese Systeme seit einem Jahrhundert kaum verändert haben. Sie sind zuverlässige Arbeitspferde für einfache, unveränderliche Aufgaben, aber sie können nicht die Multifunktionalität und Flexibilität bieten, die in modernen Produktionsanlagen und Logistikzentren erforderlich sind. Die Fähigkeit, sich auf beliebigen Bahnen zu bewegen und dabei eine Rotation zu ermöglichen, ist beim Aufbau hochflexibler und anpassungsfähiger Systeme äußerst wichtig. Maschinen, bei denen die Bewegungen „mechanisch gekoppelt“ sind, können für neue Anwendungen schlecht umprogrammiert oder umkonfiguriert werden. Eine Maschine, bei der Rotation und Translation „mechanisch entkoppelt“ sind, ist eine Universalmaschine, d.h. mit der richtigen Programmierung (in Software) kann diese Maschine für jede Transport-Anwendung eingesetzt werden („Software-defined Logistics“). Die cellueyor-Technologie von cellumation verfolgt daher diesen Ansatz in Kombination mit intelligenten Steuerungsstrategien für eine effiziente Routenplanung.¹

Konfiguration von Fördersystemen

Herkömmliche Fördersysteme werden in der Regel per Speicherprogrammierbarer Steuerung (SPS) gesteuert. Diese sind teuer, da sie aufwändig und kundenspezifisch programmiert und installiert werden müssen. Intralogistik-Anlagen werden selten zweimal identisch gebaut und weisen daher einen hohen kundenindividuellen Anteil (oftmals >50% des Anlagenpreises) auf. Daher sind auch Umbauten mit einem großen Aufwand verbunden. Die Programmierung ist so teuer/aufwändig, da zur SPS-Programmierung aufgrund der Komplexität der Steuerungssysteme besonderes Expertenwissen notwendig ist. Für große Anlagen ist die SPS-Technologie aufgrund der großen Anzahl an Komponenten und der Marktdurchdringung quasi alternativlos. Änderungen am Programmablauf können dabei nicht kurzfristig und ohne besonderes Domänenwissen durchgeführt werden, was diese Systeme gleichzeitig unflexibel macht. Mit der wachsenden Anzahl an komplexen Logistiksystemen wird es gleichzeitig aber schwieriger, ausreichend qualifiziertes Personal zu finden. Flexibel anpassbare Systeme kommen prinzipiell mit niedriger qualifizierten Anwendern aus. Somit steigt allerdings mit der Nachfrage nach flexibel anpassbaren Systemen auch die Notwendigkeit, die Konfiguration dieser Systeme zu vereinfachen.

¹ F. Bande et al. (2018): Decentralized omnidirectional route planning and reservation for highly flexible material flowsystems with small-scaled conveyor modules. International Conference Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), C. Uriarte et al. (2019): Control strategies for small-scaled conveyor modules enabling highly flexible material flow systems. Procedia CIRP, Elsevier B.V., S. 433–438

Pfadplanung und -ausführung

Die meisten Pfadplanungssysteme sind statisch. Das heißt, es wird einmal ein Pfad berechnet, z.B. für einen mehrachsigen Roboterarm² oder einen mobilen Roboter³, der danach abgefahren (ausgeführt) wird. Wird ein Hindernis oder eine Kollision erkannt, wird die Pfadplanungsmethode meistens noch einmal aufgerufen, ohne dass Informationen aus dem vorherigen Pfad wiederverwendet werden. Auch werden Pfade in diesen Systemen oft mit einem Ansatz gesucht, der zufällig nächste Schritte auswählt und diese dann numerisch beurteilt, um aus vielen guten Schritten einen guten Pfad zu erhalten (sampling-basiert). Dies macht in großen Räumen mit Hindernissen Sinn, aber nicht für den Anwendungsfall im Rahmen dieses Projekts, da wichtige dynamische Parameter, wie Geschwindigkeiten und Beschleunigungen nicht gleichzeitig geplant werden.

Ein interessanter und in diesem Projekt adressierter Ansatz ist, einen Pfad zwischen Startpunkt und Ziel nach verschiedenen Kriterien numerisch zu optimieren, sogenannte Elastic Bands, die bereits 1993 vorgeschlagen wurden. Mit diesen Ansätzen ist es möglich, vorherige Lösungen (Pfade) wieder zu benutzen und weiter zu optimieren, wenn sich die Umgebung ändert. Dies kann durch Fehler in den Modulen des celluveyor passieren oder durch absehbare Kollisionen mit anderen Paketen. In diesem Bereich gibt es diverse prototypische Systeme aus der Forschung, allerdings keine kommerziell erhältlichen. Die Besonderheit des celluveyor-Systems, dass viele Pfade gleichzeitig und ggfs. überschneidend in hoher Frequenz geplant werden müssen, stellt Herausforderungen über den Stand der Wissenschaft hinaus.

Ein weiterer bislang in diesem Bereich eher weniger betrachteter Ansatz ist Reinforcement Learning (RL). Neue Arbeiten zeigen, dass dezentral gesteuerte gleichzeitige Fahrten von mehreren Robotern zu verschiedenen Zielen mit Hindernisvermeidung mit RL möglich sind⁶. In diesen Arbeiten werden allerdings keine konkreten Pfadbedingungen außer Kollisionsvermeidung, z.B. maximale Geschwindigkeiten, berücksichtigt. Die nötige Interaktivität muss außerdem explizit in einem RL-System mit Deep Learning in der Architektur berücksichtigt werden, da sonst nach jeder Änderung erst lange trainiert werden müsste. Daher ging hier das Projektziel auch über den Stand der Wissenschaft hinaus.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundvorhaben wurde in enger Zusammenarbeit von zwei Partnern durchgeführt, deren Kompetenzen sich komplementär ergänzen. Innerhalb des Projektes hatten die Partner insbesondere die im Folgenden beschriebenen Rollen und Aufgaben. OFFIS arbeitet im Verbund mit der cellumation GmbH zusammen.

Die cellumation GmbH hat für sich und den Wirtschaftsstandort Deutschland ein wirtschaftliches Interesse, ihre Produkte kontinuierlich zu verbessern und weiterhin Innovationen auf den Weltmarkt zu bringen. Als junges Unternehmen sind der Innovationskraft Grenzen gesetzt, insbesondere an Ressourcen zur ergebnisoffenen Forschung. Bei der eingangs geschilderten Problemstellung handelt es sich um einen neuen Ansatz zur Pfadplanung der celluveyor-Systeme. Bedingt durch den Auftragsdruck ist die cellumation GmbH nicht in der Lage, bestehende Systeme von Grund auf neu zu denken. In der Regel ist ein iterativer Verbesserungsprozess das Mittel der Wahl.

Hieraus ergab sich logisch die Rollen des Partners OFFIS, der als wissenschaftlicher Akteur dabei unterstützen konnte, Prozesse neu zu denken und auch bisherige Pfade zu verlassen. Mit dem wissenschaftlichen Know-How konnte OFFIS dabei unterstützen, Ansätze zu testen, die im kommerziellen Alltag

² vgl. MoveIt: <https://moveit.ros.org/>

³ vgl. ROS Navigation: <https://navigation.ros.org/>

Förderkennzeichen: 16IS23005A-B

keinen Raum finden. Die neuen Lösungen können dabei im Anfangsstadium den herkömmlichen Systemen unterlegen sein, bieten aber das Potenzial, bei weiterer Ausentwicklung optimierte und kostengünstigere Systeme entwickeln zu können.

II. Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse von beiden Projektpartnern im Projekt „OptiPath“ kurz anhand der Arbeitspaketgliederung dargestellt. Anschließend folgt eine detailliertere Beschreibung der Arbeiten in den einzelnen Arbeitspaketen.

AP 1.1 Projektkoordination, Kooperation mit externen Partnern

Cellumation war verantwortlich für die Koordination des gesamten Verbundvorhabens und agiert als Ansprechpartner für den Projektträger und mögliche Verbindung mit externen Projekten. OFFIS brachte die Erfahrungen aus vergangenen Drittmittelprojekten ein und war unterstützend tätig.

Im Arbeitspaket 1 wurden die wesentlichen strukturellen Rahmenbedingungen des Projekts festgelegt. Neben den organisatorischen (u.a. Kommunikationsmittel, Netzlaufwerke etc.) Maßnahmen gehörte auch die Organisation von Projektmeetings dazu. Es wurden ein Kickoff und ein Abschlussmeeting mit den Projektpartnern ausgerichtet, zu denen auch der Projektträger eingeladen war. In diesen Meetings konnte der momentane Stand des Projektes kommuniziert werden und mögliche Fragen direkt mit dem Projektträger geklärt werden.

Im Juni 2023 wurde das Kick-off-Meeting bei cellumation abgehalten. Die Projektpartner vom OFFIS aus Oldenburg waren vor Ort, die Kollegen vom Projektträger konnten online teilnehmen. Im Treffen wurden die inhaltlichen Meilensteine in Erinnerung gerufen, die organisatorischen Rahmenbedingungen geklärt, sowie eine Werksführung bei cellumation angeboten.



Über die Teilnahme an der Mittelstandskonferenz 2023 konnten Kontakte geknüpft werden, die zur erfolgreichen Teilnahme von cellumation an einem EU-Projekt (Marie Skłodowska-Curie Actions Doctoral Networks) geführt hat und somit 2 Doktoranden die Möglichkeit eröffnet, sich mit der celluveyor-Technologie eingehender zu beschäftigen und schlussendlich sich auch in diesem Umfeld zu promovieren.

AP 1.2 Überwachung des Projektfortschritts und der technischen Arbeiten

Förderkennzeichen: 16IS23005A-B

Im Zuge des Projektverlaufs hat cellumation eine kontinuierliche Kommunikation gewährleistet, indem zweiwöchentliche Online Meetings organisiert und durchgeführt wurden. In diesen Meetings wurde der Stand des Projektfortschritts evaluiert und ein strukturierter Austausch der Projektpartner gewährleistet. Durch diese Meetings wurden frühzeitig mögliche Probleme erkannt und Lösungsstrategien entwickelt.

Des Weiteren wurden mehrere persönliche Treffen organisiert, um in effektiven Workshops die Schnittstellen im Projekt gezielt und effizient zu planen und zu entwickeln. Durch diesen Ansatz konnte eine kontinuierliche Entwicklung an den Arbeitspaketen gewährleistet werden. Die Workshops wurden nach Möglichkeit abwechselnd in Oldenburg und Bremen abgehalten, solange keine Notwendigkeit für einen Ort (beispielsweise Vorhandensein der Hardware, nur bei cellumation) vorhanden war.

AP 1.3 Öffentlichkeitsarbeit

Es wurde eine Projektwebseite erstellt, um über das Projekt zu informieren (<https://www.offis.de/offis/projekt/optipath.html>). Die Teilnahme an Konferenzen und die Präsentation der erarbeiteten Forschungsergebnisse während der Projektlaufzeit ermöglichten einen erfolgreichen Austausch mit projektexternen Forschungspartnern. Dieser Austausch ermöglichte es den aktuellsten Stand der Technik für das Projekt zu nutzen.

Das Projekt wurde auf der Mittelstandskonferenz 2023 durch die Projektleiter seitens OFFIS und cellumation präsentiert. Für diesen öffentlichkeitswirksamen Auftritt wurde ein Poster mit den wichtigsten Kenndaten zur Präsentation des Projektvorhabens erstellt und präsentiert.

Mittelstandskonferenz 2023
KMU stärken durch digitale Innovationen

cellumation OFFIS

OptiPath — Interaktive Pfadoptimierung für omnidirektionale Paketflüsse

Motivation
Die cellumation GmbH stellt innovative Fördertechnik her, auf deren Basis neuartige, vorher nicht realisierbare Anwendungen im Bereich der Materialflusssysteme erzeugt werden können. Hierbei kommen komplexe Steuerungsalgorithmen aus der Robotik zum Einsatz. Objekte können auf dem Fördersystem individuell kontrolliert und bewegt werden. Damit können auf kleinstem Raum individuelle Materialflüsse erstellt werden. Die Anforderungen an Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit steigen stetig. Zusammen mit dem Partner OFFIS e.V. soll das System optimiert und neue Planungsverfahren getestet werden.

Herausforderungen
Durch schnelle Bewegungen der Objekte ist die Verarbeitungszeit stark begrenzt. Daher müssen neue Methoden sehr effizient arbeiten. Die zu entwickelnden Pfadplanungs- und -ausführungsmethoden sollen zusätzlich ein automatisiertes Beheben von Paketstaus innerhalb des Systems ermöglichen und somit die Robustheit und Stabilität erhöhen.

Ziele und Vorgehen
Ziel des Projekts OptiPath ist es, die Pfadplanung und Pfadausführung robuster und effizienter zu gestalten. Es sollen neuartige Pfadplanungs- und Pfadausführungsmethoden basierend auf numerischer Optimierung von Einzelpfaden und Reinforcement Learning entwickelt und integriert sowie getestet werden. Neue geometrische Bedingungen sollen berücksichtigt werden, Anomalien erkannt und beseitigt werden können. Dadurch wird das Gesamtsystem schneller und flexibler als es jetzt bereits schon ist.

Projektkoordination
Dr. Melvin Isken / Dr. Tim Stratmann

Projektlaufzeit
01.05.2023 - 31.05.2025

Kontakt
cellumation GmbH
Kleiner Ort 7
28357 Bremen
Tel.: +49 421 33113531
E-Mail: isken@cellumation.com
tim.stratmann@offis.de

Förderkennzeichen
01IS23005

Akronym
OptiPath

Logo: Bundesministerium für Bildung und Forschung

Durch die Konferenz entstand Kontakt zu weiteren potenziellen Partnern, die an der Technologie und den Ergebnissen des Projektes Interesse zeigten.

Die Entwickler von cellumation nahmen an der ROSCon 2024 in Odense teil, wobei sie auch Teile der im Projekt entwickelten Funktionalitäten innerhalb der Community diskutieren konnten.

AP 2.1 Patentstudie

Im Rahmen der Forschungstätigkeiten für das Projekt ist eine kontinuierliche Überwachung des Marktes und der Mitbewerber entscheidend, um einerseits die Wettbewerbsfähigkeit und die Projektergebnisse zu sichern und gleichzeitig nicht am Markt vorbei zu entwickeln. Zur Überwachung der Patentsituation wird bei cellumation eine Patentdatenbank eingesetzt. Während der Laufzeit des ersten Projektjahrs stand cellumation ein eigener Patentingenieur zur Verfügung, der entsprechende Recherchen vorgenommen und überwacht hat. Dieser Mitarbeiter hat cellumation im Jahr 2024 verlassen, so dass ein Wechsel auf eine externe Agentur stattfinden musste.

Unter anderem konnten so zwei Analysen durchgeführt werden, um die eingesetzte celluveyor-Technologie von Wettbewerbern abzusetzen.

Das Projektergebnis selbst hat noch nicht den Reifegrad erreicht, um patentierbar zu sein, wird aber aktiv im Pool der Patentideen geführt und unterliegt damit stetiger Kontrolle sowohl bei der Marktbeobachtung als auch bei der Anmeldefähigkeit der eigenen Arbeiten.

AP 2.2 Anforderungserhebung und –analyse

In einem gemeinsamen Workshop wurden die Anforderungen an die Funktionalität der zu entwickelnden Software besprochen und seitens cellumation erklärt. Hier sind insbesondere die technischen Grenzen des celluveyors zum aktuellen Stand von Bedeutung. Es ergaben sich Anforderungen auf Basis bestehender Implementierungen des Systems und seiner physikalischen Gestalt.

Es ergaben sich die zwei übergeordneten und allgemeinen Anforderungen „Pfadplanung / Pfaderstellung“ und „Stauauflösung bei Systemblockade“.

Anforderungen	
Pfadplanung darf 1 Minute dauern, solange der Konflikt automatisch aufgelöst werden kann.	Sollte es zu einem Paketstau kommen, darf die Pfadplanung des Pfadgenerator bis zu einer Minute dauern, sofern der Konflikt damit automatisch gelöst werden kann und keine Person

Förderkennzeichen: 16IS23005A-B

	physisch von außen eingreifen muss. Erst wenn nach einer Minute keine automatische Lösung des Konflikts durch das System errechnet werden kann, soll eine Fehlermeldung gegeben werden.
Pfadergebnis muss nicht optimal sein.	Für eine Blockadeauflösung ist kein optimaler Pfad notwendig. Es ist hinreichend, wenn der Stau aufgelöst wird, obwohl das Paket einen ggf. längeren / langsameren Pfad ausführt.
Position und Orientierung am Übergang (Ausgang / Zielpunkt) muss eingehalten werden.	Die Blockadeauflösung muss beim Ausfahren der Pakete die von der Kunden-SPS gesendete Orientierung und Position auf dem Ausgangsförderer einhalten.
Vorbedingungen	
Der Zustand des Systems ist bekannt (statische und dynamische Objekte).	Für eine Stauauflösung ist vorausgesetzt, dass der gesamte Zustand des Systems und aller statischen und dynamischen Objekte bekannt ist.
System befindet sich im Stillstand.	Für eine Stauauflösung ist vorausgesetzt, dass sich das System im Stillstand aufgrund eines Paketstaus befindet.

AP 2.3 Funktionale Spezifikation des Systems

Aus der Anforderungserhebung wurde auf Basis der besprochenen Anforderungen an das System ein Lastenheft erstellt, welches die gewünschte Funktionalität unter Berücksichtigung einzuhaltender Einschränkungen beschreibt.

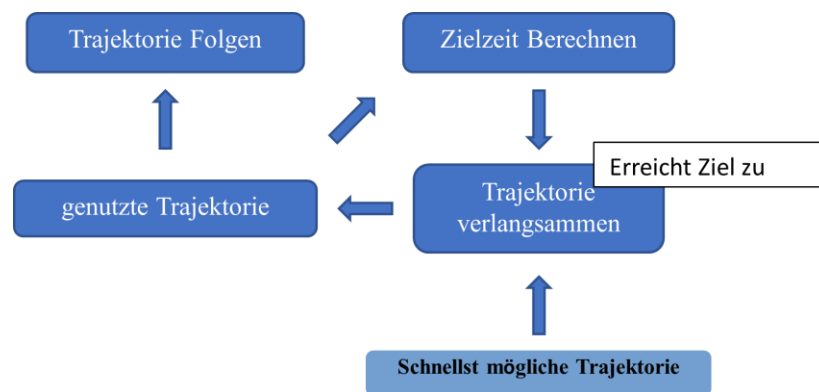
Der celluveyor kann genutzt werden, um Pakete von einem eingehenden Förderband oder von einer Position auf der Fläche des Systems zu einem ausgehenden Förderband zu bewegen. Dabei kann der Kunde bestimmen, in welcher Ausrichtung und in welchem zeitlichen Abstand zueinander die Pakete auf dem ausgehenden Förderband ausfahren.

Zum Befördern eines Paketes benötigt der celluveyor zwei für dieses Projekt relevante Subsysteme:

- (1) Ein Pfadplanungssystem und ein (2) System zur dynamischen Verlangsamung von Pfaden.

Sobald ein Paket vermessen wird und der Zielort des Pakets bestimmt wurde, wird das Pfadplanungssystem genutzt, um den schnellstmöglichen Pfad zu erstellen, der das Paket und den gewünschten Zielort befördert. Hierbei muss das Pfadplanungssystem bestimmte physikalische Grenzen, wie z.B. maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung, einhalten.

Der vom Pfadplanungssystem generierte Pfad, wird anschließend an die Pfadausführung übergeben. Aufgrund der externen Anforderung, dass zwei Pakete einen zeitlichen Mindestabstand zueinander einhalten müssen, muss dabei der Pfad des nachfolgenden Paketes dynamisch verlangsamt werden, um den zeitlichen Abstand zu halten. Da sich bei dem vorausfahrenden Paket aufgrund von Hindernisvermeidung, abgeschalteten Ausgängen oder ähnlichem seine Ankunftszeit verändern kann, muss der Pfad die nachfolgenden Pakete kontinuierlich dynamisch angepasst werden, um den zeitlichen Abstand möglichst genau zu halten.



Im Rahmen dieses Projektes wurden mögliche Verbesserungen für die oben genannten Subsystemen untersucht werden.

AP 2.4 Lösungskonzepte, Pflichtenheft

Auf Basis des Lastenheftes und der vereinbarten Anforderungen wurden die Lösungskonzepte für die übergeordneten Anforderungen im Detail formuliert. Es ergeben sich:

- Pfadplanung / Pfaderstellung: Es wurden alternative Planungsmethoden unter Verwendung eines Spline-Ansatzes erstellt. Für die Erstellung der Splines wurden sogenannte C- und B-Splines verwendet. Dabei wird der Pfad als zweidimensionale, parametrisierte Kurve auf der Oberfläche des celluveyor-Systems dargestellt und zur Erstellung der finalen Trajektorie verwendet. Die Trajektorie ergibt sich aus dem erstellten Pfad und einer zeitlichen Skalierung. Der finale Output der Planung und gleichzeitig Input der Pfadausführung des celluveyor-Systems sind mit einem Zeitstempel versehene diskrete Punkte auf dem geplanten Pfad. Für die korrekte Erstellung der Zeitstempel wird geprüft, ob eine durch den Nutzer oder das System selbst festgelegte Verfahrensgeschwindigkeit gefordert wird. Alternativ wird die maximal mögliche Geschwindigkeit des Systems herangezogen.
- Stauauflösung: Für dieses Szenario werden Reinforcement Learning Ansätze untersucht. Mithilfe bestehender Open Source Implementierungen soll eine Trainingsumgebung zum Trainieren von Strategien mit dem PPO-Algorithmus (Proximal Policy Optimization) erstellt werden.

AP 2.5 Spezifikation der Anwendungsfälle für die Evaluation

In einem gemeinsamen Workshop wurden Anwendungsfälle für die spätere Evaluation der zu entwickelnden Konzepte und Methoden für alternative Pfadplanungen definiert. Es wurden zwei Anwendungsfälle definiert:

- Dynamische Pfadverlangsamung: Hier soll eine ausgeführte Trajektorie dynamisch verlangsamt werden können, sofern die Zielzeit am Systemausgang unterschritten wird. Das bedeutet, dass die Verfahrensgeschwindigkeit angepasst werden muss.
- Blockadeauflösung: Das aktuelle System bietet keine Möglichkeit eine Blockade beziehungsweise einen Paketstau automatisch aufzulösen, sondern erfordert das physische Eingreifen eines Mitarbeiters zur Behebung des Problems. Dieser Anwendungsfall bietet die Möglichkeit für den Einsatz von Machine Learning, bei dem das System (Agent) einen Stau erkennt und diesen eigenständig auflöst.

AP 3.1 Frameworkarchitektur

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die Änderungen und Optimierungen am celluveyor-Framework vorgenommen, um die Integration der Projektergebnisse zu ermöglichen. Die Struktur der Architektur

wurde weiter angepasst, um neue Module aufnehmen zu können. Die aktuelle Architektur ist in folgendem Diagramm beispielhaft dargestellt:



Dabei konzentriert sich die Entwicklung in OptiPath in folgende Teilbereiche:



Innerhalb der Komponenten MFC (Material Flow Controller) und Navigation wurden Änderungen vorgenommen, um die einzelnen Algorithmen besser zu separieren und austauschbar zu machen.

AP 3.2 Schnittstellen zum celluveyor-System

Um die Kommunikation zwischen den Entwicklungen von OFFIS und der Code-Basis von cellumation zu ermöglichen, wurde eine Verbindungskomponente entwickelt. Diese Komponente ermöglicht es, den Nachrichtenbus des celluveyor von einer externen Komponente abzuhören und neue Nachrichten einzuleiten. Insbesondere war hier die Notwendigkeit gegeben, eine Umsetzung von Python-Code (Entwicklungsumgebung von OFFIS) und C++-Code (Grundlage der celluveyor-Architektur) zu ermöglichen.

Diese Komponente konnte erfolgreich eingesetzt und getestet werden. Hiermit konnten die späteren Tests durchgeführt werden. Eine Verlangsamung der Ausführung durch den Python-Code ist allerdings aufgetreten, da die Ausführung von C++-Code effizienter ist.



Beispiel-Screenshot aus einem der Repositories, die auf Seiten von cellumation angelegt wurden, um den Code mit OFFIS kontinuierlich auszutauschen.

AP 3.3 Schnittstellen für modulare Planungs- und Ausführungsplugins

In gemeinsamer Absprache wurde eine Schnittstelle auf Basis von ROS-Kommunikationsnachrichten in die bestehende Frameworkarchitektur von cellumation implementiert, die es ermöglicht, andere Implementierungen der Pfadplanungs- und Ausführungsmodule zu integrieren. Die Verwendung von ROS als Middleware vereinfacht die Verwendung von Applikationen verschiedener Programmiersprachen (hier: C++ und Python).

Die Schnittstelle (ROS-Nachrichten) definiert benötigte Eingangswerte und geforderte Ausgangswerte, sodass ein nahtloser Austausch von Modulen möglich ist.



Beispiel-Screenshot aus einem der Interface-Packages. Quellcode-Ausschnitte können nicht öffentlich zur Verfügung gestellt werden.

AP 4.1 Räumliche und zeitliche Pfadbedingungen

In einem gemeinsamen Workshop zur Anforderungserhebung wurden die räumlichen und zeitlichen Pfadbedingungen aus den Anforderungen abgeleitet. Sie definieren die technischen und physischen Begrenzungen (Constraints) für mögliche Pfade, die mit alternativen Methoden erzeugt werden sollen.

Pfadbedingungen	
Globale Pfadbedingungen für Nicht-Punktmassen	
max. Translationsbeschleunigung: 8 m/s ²	Die maximale Beschleunigung für jeden Punkt des zu verfahrens Pakets darf die maximale Beschleunigung nicht überschreiten. Das Augenmerk liegt insbesondere auf den äußersten Punkten (bspw. Eckpunkte) des zu verfahrens Pakets.
max. Translationsgeschwindigkeit: 1.15 m/s	Die maximale Geschwindigkeit für jeden Punkt des zu verfahrens Pakets darf die maximale Geschwindigkeit nicht überschreiten. Das Augenmerk liegt insbesondere auf den äußersten Punkten (bspw. Eckpunkte) des zu verfahrens Pakets.
max. Rotationsbeschleunigung: 360°/s ²	Die maximale Rotationsbeschleunigung ergibt sich aus dem Minimum durch die Diagonale des Objektes, und der maximalen Translationsbeschleunigung resultierenden Rotationsbeschleunigung, oder aus dem maximal erlaubten Wert.
max. Rotationsgeschwindigkeit: 360°/s	Die maximale Rotationsgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Minimum durch die Diagonale des Objektes, und der maximalen Translationsgeschwindigkeit resultierenden Rotationsgeschwindigkeit, oder aus dem maximal erlaubten Wert.
Bedingungen für einzelne Wegpunkte	
definierte Geschwindigkeit, Position und Rotation	Wegpunkte, die vom Startpunkt bis zum Zielpunkt passiert werden sollen, definieren die Geschwindigkeit, die Position und die Rotation des zu verfahrens Pakets. Die Position des Wegpunktes stimmt dabei mit der Position des Mittelpunktes des zu verfahrens Pakets überein (bei Draufsicht auf das gesamte System, sodass die Verschiebung in z-Richtung vernachlässigt werden kann).
Kollisionsfreiheit	Der Pfad des zu verfahrens Pakets darf nicht mit anderen Objekten innerhalb des Systems oder dem Systemrand kollidieren. Dazu zählen auch sogenannte "no-go"-Bereiche auf der Systemfläche, die nicht passiert werden dürfen. Für Nicht-Punktmassen muss zudem sichergestellt sein, dass die Trajek-

Förderkennzeichen: 16IS23005A-B

	torie einen Sicherheitsabstand in Abhängigkeit der Abmessungen des zu verfahrenen Pakets zu anderen Objekten und dem Systemrand hat.
[OPTIONAL] Pfad ist “ruckfrei”	Der Pfad ist “ruckfrei” (engl.: <i>jerk</i>), d.h., dass die Trajektorie mindestens 3-fach kontinuierlich differenzierbar ist.

AP 4.2 Selbstlernende Methoden

Es wurden zwei aufeinanderfolgende Ansätze untersucht. Im ersten Ansatz wurde eine Multi-Agenten-Umgebung mit *RLLib* von *ray* implementiert. In diesem Szenario ist es möglich, mehrere Objekte (hier: Pakete), also Agenten, in demselben System von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt zu verfahren. Bei diesem Ansatz steuert eine einzige Policy alle Agenten (Pakete) zur selben Zeit.

Im zweiten Ansatz wurde mithilfe des Frameworks *Gymnasium*, einem API Standard für Reinforcement Learning Umgebungen von Farama, und mithilfe von *StableBaselines3*, einer Implementierung von in der Wissenschaft bekannten Algorithmen, eine Single-Agent-Umgebung aufgesetzt, bei der ein Objekt (hier: Paket), also der Agent von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt verfährt und dabei Kollisionen mit dem System und weiteren Paketen vermeiden soll.

Beide Modelle zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, Objekte entsprechend der Funktionalität des *celluveyors* zu bewegen. Die Modelle sind in der Lage, sowohl die Verschiebung und Orientierung als auch die Geschwindigkeit des Objektes so anzupassen, dass die gesetzten Zielorte auf dem System von allen Agenten erreicht werden und Kollision zwischen den Objekten vermieden wird.

Die Methoden bieten sich nicht zur generellen Generierung von Pfaden an, sondern nur zur direkten Realzeitsteuerung der Pakete auf einem System. Es hat sich gezeigt, dass die Erstellung einer Single-Agent-Umgebung zum Trainieren einer globalen Policy anbietet. Hierbei wird ein einzelner Agent mit Proximal Policy Optimization auf die gewünschte Strategie trainiert. Die trainierte Policy kann anschließend zur Generierung von Bewegungsaktionen einzelner Agenten (Pakete) im Gesamtkontext verwendet werden. Das bedeutet, dass dieselbe Policy für die Generierung von Bewegungsaktionen aller sich im System befindlicher Agenten (Pakete) verwendet werden kann, in dem sequentiell für jeden einzelnen Agenten eine Bewegungsaktion durch die Policy bestimmt wird.

Die Qualität der Policy (Auswählen geeigneter Bewegungsaktionen für die Agenten) ist sehr stark von der gewählten Strategie abhängig. Je nach Festlegung der Strategie (Bewertung einzelner Aktionen während des Trainingsprozesses) ergeben sich unterschiedliche Rewards (vgl. Abbildung 3).



Abbildung 3: Reward über Step einiger beispielhaft ausgewählter Trainingsläufe

AP 4.3 Optimierungsbasierte Methoden

Als Alternative zur bestehenden Pfadplanung werden B-Splines zur Generierung des Pfades eingesetzt. Eine anschließende Bestimmung diskreter Punkte auf dem Pfad (Sampling, vgl. Abbildung 5) und Versehen dieser Punkte mit Zeitstempeln ergibt die Trajektorie (vgl. Abbildung 6).

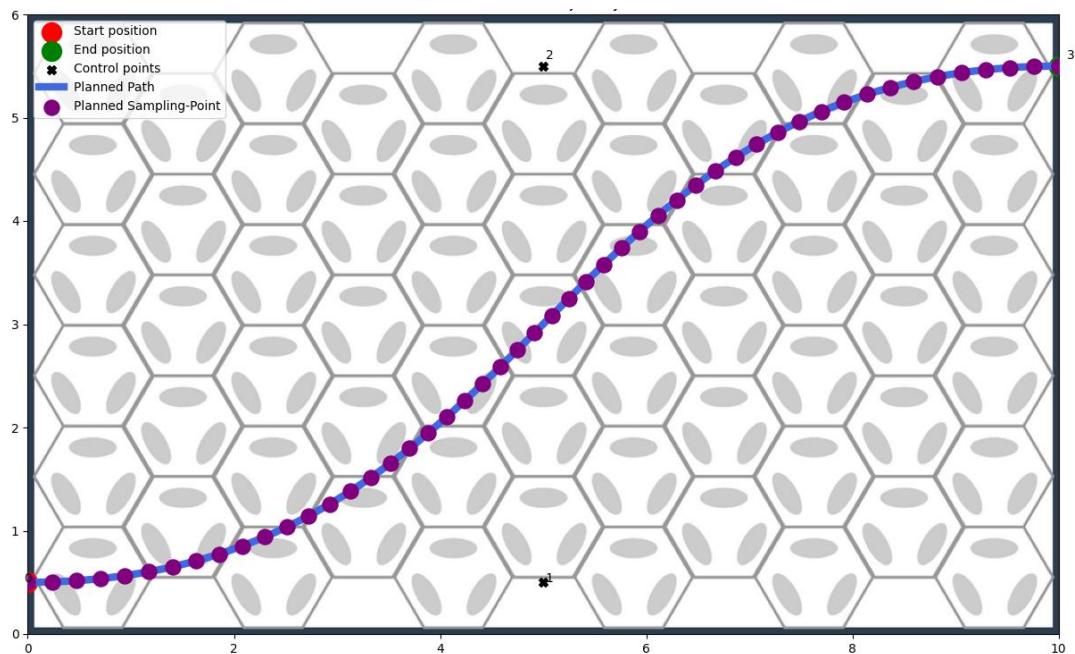


Abbildung 4: Beispiel eines diskretisierten Pfades auf Basis einer B-Spline

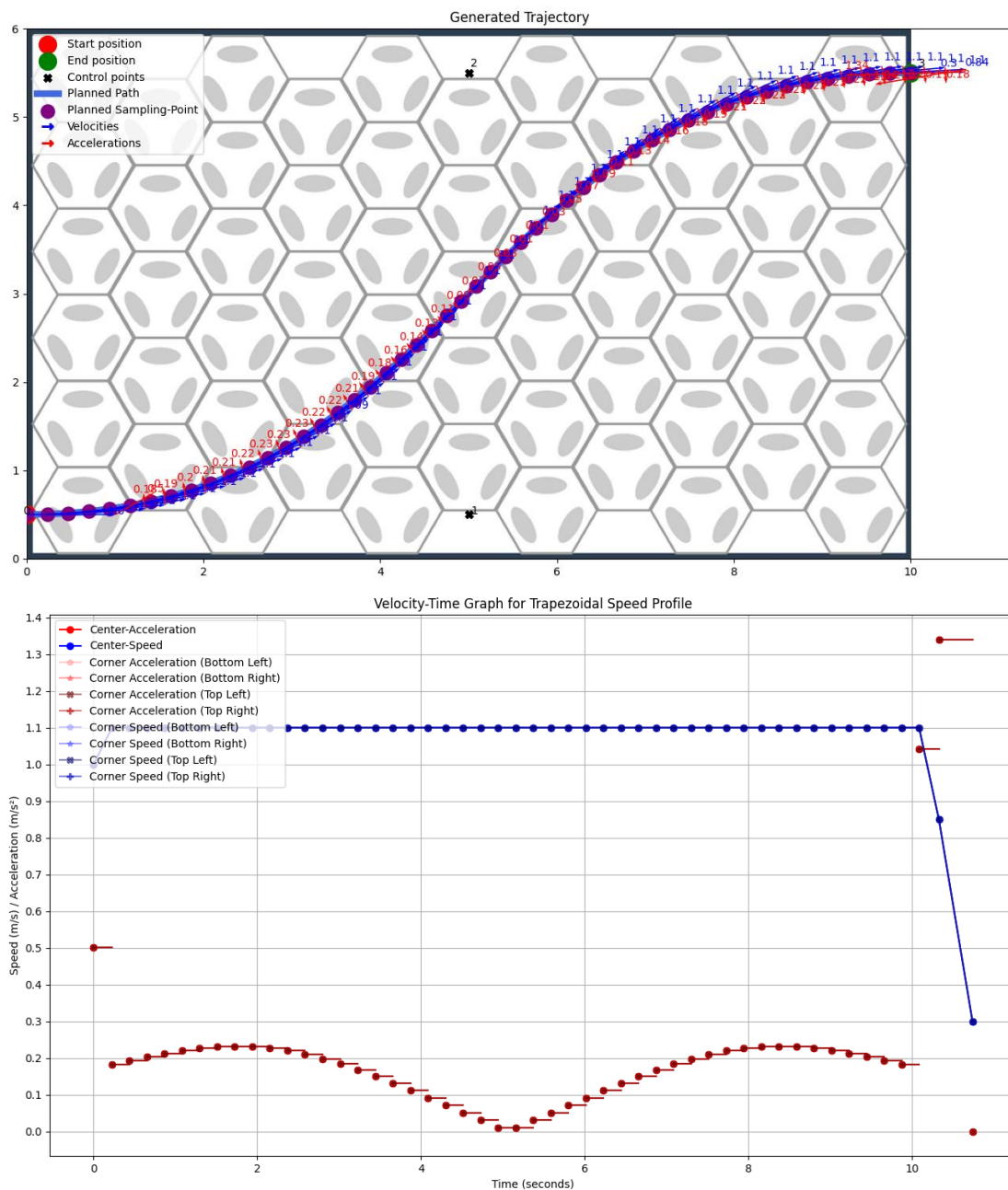


Abbildung 4: Beispiel einer diskretisierten Trajektorie auf Basis einer B-Spline mit Zeitstempeln und berechneten Geschwindigkeiten sowie Beschleunigungen zum Erreichen des gewünschten Pfades bei Einhaltung der gesetzten Systemeinschränkungen

Dafür dienen zwei Methoden, die unterschiedlich performant sind:

- Es wird ein Lineares Gleichungssystem aufgestellt, welches numerisch mit *fsolve* von *scipy.optimize* (SciPy) gelöst wird. Es zeigt sich jedoch, dass die Einhaltung der Pfadbedingungen und Systemeinschränkungen für die Eckpunkte der Objekte (hier: Pake) aktuell zu keiner für das System von cellumation verwertbaren Lösung kommt.

- Es wird ein Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP) als Ungleichungssystem aufgestellt und mithilfe von *Gurobi* gelöst. Es zeigt sich, dass dieser Ansatz zu verwertbaren Lösungen für das System von cellumation führt, bei denen der Ansatz eines linearen Gleichungssystems scheitert, jedoch ist die Berechnungszeit signifikant höher und gegebenenfalls nicht einsetzbar.

Das Modul mit den „optimierungsbasierten Methoden“ dient als direkter Ersatz zum bestehenden Modul zur Generierung der Trajektorie seitens cellumation.

AP 4.4 Visualisierungskonzepte für No-Code-Konfiguration

Die graphische Anwendung zur No-Code-Konfiguration bietet eine Vielzahl von Funktionen für die interaktive Eingabe, Speicherung und Verwaltung von Randbedingungen zur Pfadgenerierung. Hierbei kann der Benutzer interaktiv graphische Eingaben vornehmen, diese speichern und laden, um sie bei Bedarf wieder zu verwenden. Ein wichtiger Aspekt ist das Anlegen, Aktualisieren und Löschen von Start- und Endpositionen, die für die Definition des Pfades essentiell sind.

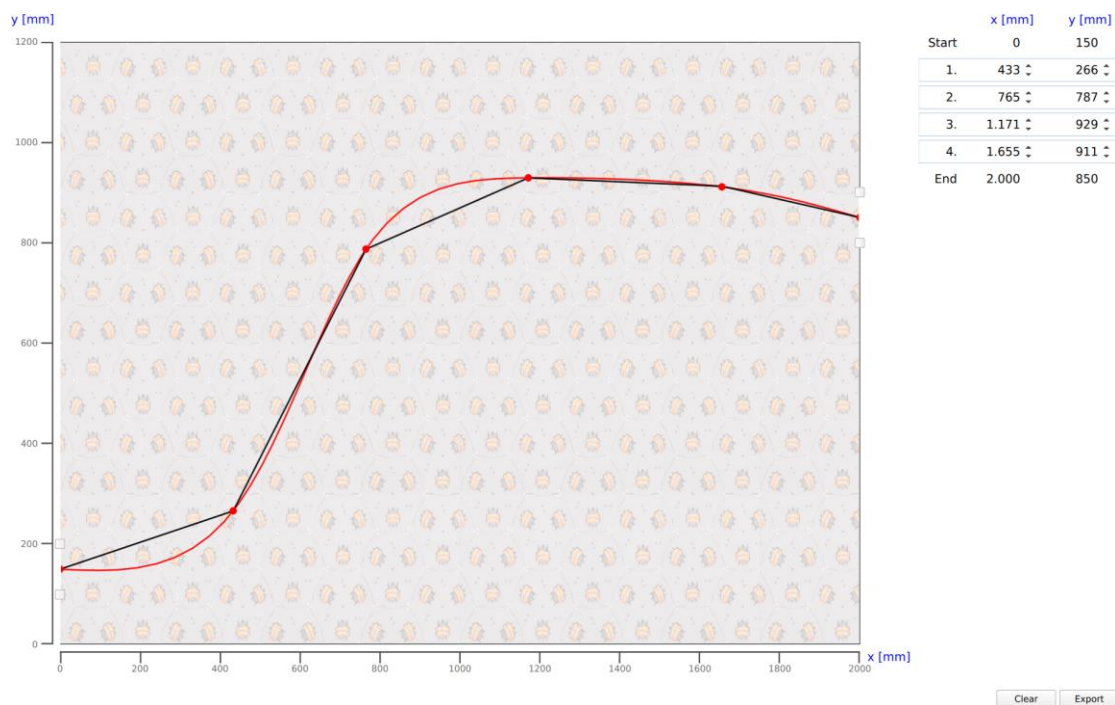


Abbildung 5 Graphische Benutzeroberfläche

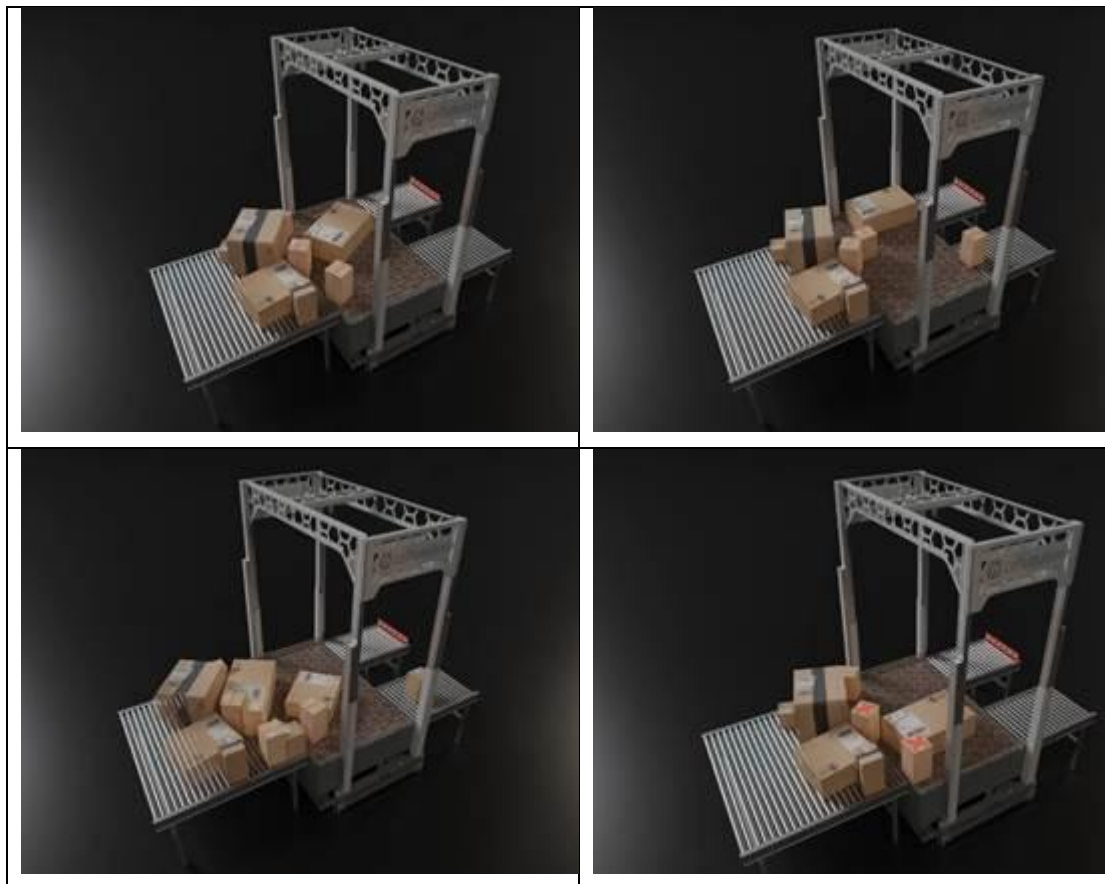
Weiterhin ermöglicht die Anwendung das Anlegen, Aktualisieren und Löschen von Orts- bzw. Kontrollpunkten, die den Verlauf des Pfades genauer bestimmen können. Darüber hinaus kann der Benutzer die Reihenfolge dieser Punkte ändern, um den generierten Pfad an bestimmte Anforderungen anzupassen.

Für eine präzise Steuerung des Pfades bietet die Anwendung auch die Möglichkeit, Start- und Endgeschwindigkeiten sowie die maximale Beschleunigung und Geschwindigkeit zu setzen und bei Bedarf zu aktualisieren. Sobald alle Parameter eingestellt sind, kann der Benutzer den Prozess der Pfadgenerierung anstoßen, um basierend auf den aktuellen Einstellungen einen entsprechenden Pfad zu erzeugen.

Abschließend ermöglicht die Anwendung eine Visualisierung des generierten Pfades, sodass der Benutzer direkt überprüfen kann, ob der erzeugte Pfad den Anforderungen entspricht. Durch diese umfassende Funktionalität bietet die Anwendung eine effiziente und flexible Lösung für die Erstellung und Verwaltung von Pfaden unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen.

AP 5.1 Testsuite für Pfadplanungskonzepte

Es wurden die Quellen und Konfigurationen für die Simulation an OFFIS übergeben und gemeinsam so weit integriert, dass erste Tests stattfinden können. Zusätzlich wurden Simulationen durchgeführt und als Quelldaten an OFFIS übergeben.



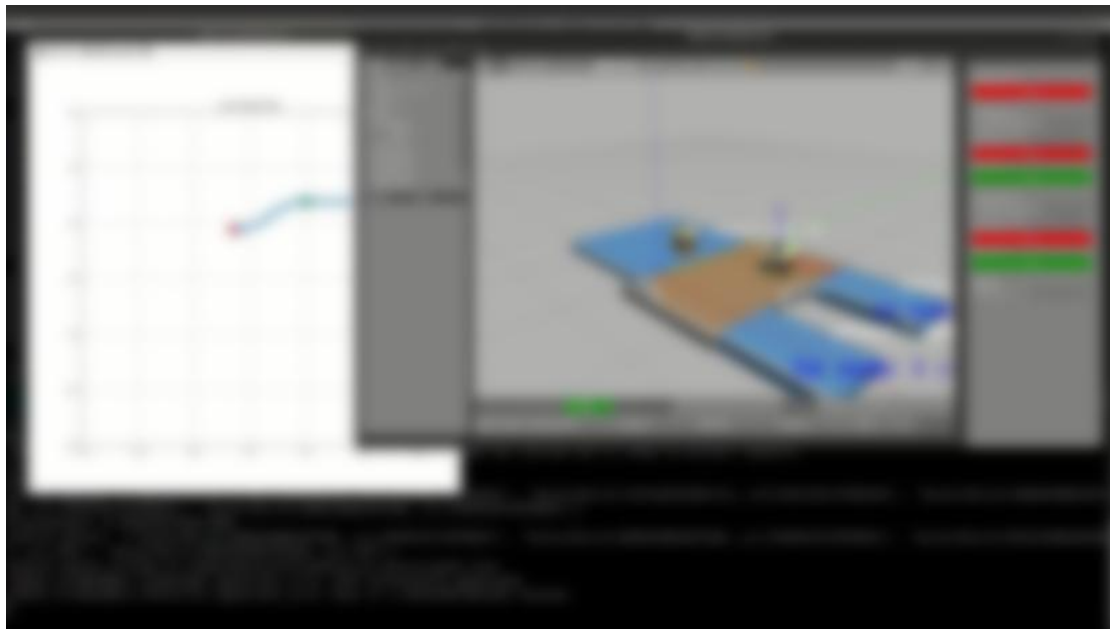
Beispiele aus Simulationen zur Erzeugung von Anomalien.

Durch die Erweiterungen und Änderungen am Software-Stack wurden ebenfalls Änderungen am übergebenen Code durchgeführt. Hierbei wurde in Kooperation mit dem OFFIS die Schnittstelle so angepasst, dass eine Verbindung der Systeme möglichst einfach wird.

AP 5.2 Integration des Frameworks in das celluveyor-System

Durch die in vorigen Arbeitspaketen entwickelten Schnittstellen war es im Anschluss möglich, die Systeme von cellumation mit den Komponenten, die von OFFIS entwickelt wurden, zu verknüpfen.

Dies stellt einen der herausragenden Ergebnisse aus dem Projekt dar, da cellumation und OFFIS die Infrastruktur geschaffen haben, um externe Algorithmen mit dem celluveyor-Framework zu nutzen. Zukünftige Entwicklungen können darauf aufsetzen und weitere, neue Ansätze können schnell entwickelt und getestet werden.



Darstellung der Simulationssoftware von cellumation in Kombination mit entwickelten Algorithmen / Nodes von OFFIS.

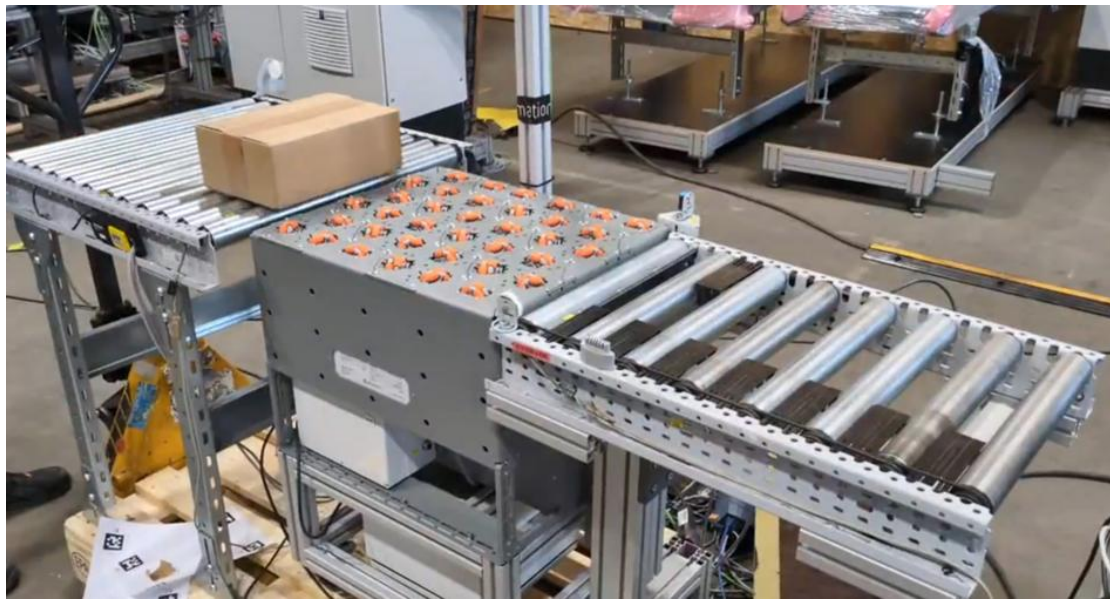
AP 6.1 Design und Entwicklung des Demonstrators aufgrund der Anwendungsfälle

Durch die Entwicklung und Tests mit der Gazebo Simulation des celluveyors von cellumation wird die Kompatibilität und die leichte Integration der OFFIS Entwicklungen in den Demonstrator sichergestellt. Zusätzlich wurde eine Demonstrator-Hardware basierend auf einem cellueor.Go aufgebaut, die zur Demonstration der Projektergebnisse in der OFFIS Modellfabrik TIPI und mobil auf Messen größenbedingt in reduziertem Rahmen ermöglicht.

Ursprünglich war eine kompatible vorhandene Tiefenkamera für den Demonstrator vorgesehen (Azure Kinect). Aufgrund von Weiterentwicklungen seitens cellumation, ist diese aber nicht mehr mit dem aktuellen System kompatibel, sodass für OFFIS eine kompatible Industriekamera (SICK Visionary-T Mini) angeschafft werden musste.

Die Software-Entwicklung verfügt über ein Testsystem eines celluveyors zur Prüfung der entwickelten Funktionen. Dieses System war nicht auf die speziellen Anforderungen von OptiPath ausgelegt, so dass hier entsprechende Änderungen am Aufbau und der umgebenen Technik durchgeführt wurden.

Parallel dazu wurde ein zweites Testsystem in Betrieb genommen, das ebenfalls für Tests im OptiPath-Projekt genutzt werden kann. Somit können die neuen Algorithmen auf verschiedenen Layouts und Maschinenkonstellationen getestet werden.



AP 6.3 Abschlussevaluation

Das Testsystem konnte bei OFFIS noch nicht abschließend in Betrieb genommen werden, da die Modell-Fabrik nach einem Wasserschaden im Verlauf des Projektes anders als erwartet noch nicht in Betrieb genommen werden konnte. Daher wurde die Maschine als einzelnes Bauteil aufgestellt, was aber für tiefer gehende Tests nicht optimal ist. Daher wurde der kleine Demonstrator bei cellumation aufgestellt, um eine realistische Umgebung schaffen zu können. Wenn die Modell-Fabrik wieder aufgebaut ist, kann der Demonstrator dann mit wenig Aufwand integriert werden.

Es wurde ein zweites Testsystem entwickelt / genutzt, um die Algorithmen auf einer komplexen Maschine testen zu können. Dabei handelt es sich um einen cv.Classic, also ein klassischen celluveyor mit Kameraüberwachung und großer Anzahl an Zellen. Hiermit ist es möglich, auch komplexere Pfade und Abläufe auf dem System zu testen. Auch ist hierbei in der Regel ein Loop installiert, so dass das System über längere Zeit laufen kann, ohne neu bestückt zu werden.

Zusätzlich wurden die Algorithmen Simulationen getestet. Simulationen erlauben einen deutlich längeren Testzeitraum und eine größere Streuung von Objekten, als es mit händischen Tests möglich ist.





AP 6.4 Auswertung

Hier ist eine überarbeitete Version des Textes, die die Kernaussagen beibehält, aber prägnanter und flüssiger formuliert ist:

Ergebnisse der Algorithmen-Tests

Die neu entwickelten Algorithmen wurden sowohl in Simulationen als auch auf realen Testsystemen erprobt. Ursprünglich sollte ein direkter Vergleich zwischen den herkömmlichen Pfadplanungsverfahren und den neuen Ansätzen erfolgen. Dabei zeigte sich jedoch, dass die etablierten Algorithmen nicht nur einen erheblichen Entwicklungsvorsprung aufweisen, sondern auch auf einer optimierten Architektur laufen. Ein fairer Vergleich war daher nicht möglich.

Ein weiterer Faktor war die Implementierungssprache: Python-basierte Algorithmen sind grundsätzlich langsamer als solche in C++. Insgesamt führte dies zu einer etwa zehnfach geringeren Effizienz der neuen Verfahren. Ein direkter Vergleich erwies sich somit als nicht sinnvoll.

Erfolge trotz Herausforderungen

Trotz der Effizienz Nachteile konnten die neuen Algorithmen erfolgreich im **celluveyor-Framework** integriert und getestet werden. Dies eröffnet **cellumation** entscheidende Vorteile: Neue Verfahren lassen sich nun deutlich schneller entwickeln, testen und vorab in das System einbinden. Vielversprechende Ansätze können anschließend gezielt optimiert werden – etwa durch Portierung in performanteren Code oder mathematische Verbesserungen.

Strategische Vorteile für cellumation

Vor diesem Projekt war eine solche Flexibilität nicht gegeben. Die Fähigkeit, Innovationen rascher in die Produkte zu integrieren, stärkt die Wettbewerbsposition von **cellumation** deutlich. Während Hardware relativ einfach kopiert werden kann, liegt der entscheidende Unterschied in der **Intelligenz der Software**. Mit einem Innovationsvorsprung in der Softwareentwicklung bleibt **cellumation** Vorreiter in der modularen, omnidirektionalen Fördertechnik.

Ausblick

Obwohl die neuen Verfahren aktuell noch nicht mit etablierten Lösungen konkurrieren können, wurden vielversprechende Ansätze identifiziert und bereits in die Entwicklungspipeline aufgenommen. Dies bildet eine solide Grundlage für zukünftige Fortschritte.



Beispiel von Simulationen, die automatisiert ausgeführt und verglichen werden können.

2. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Als eine bedeutende Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der Mensch-Technik Interaktion wird das OFFIS die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen von Veröffentlichungen und Präsentationen in der Forschungsgemeinschaft verbreiten. Auch in die universitären Lehrtätigkeiten des OFFIS sollen Ergebnisse und „Know-How“ einfließen. Dies geschieht im Rahmen von Vorlesungen und Praktika, welche besonders von anwendungsorientierten Inhalten profitieren. Damit ergänzt OFFIS einen wichtigen Teil der forschungsorientierten Lehre an der Uni Oldenburg.

Für das OFFIS als Forschungsdienstleister stellen die Ergebnisse darüber hinaus einen wichtigen Beitrag zum Ausbau des eigenen „Know-Hows“ und Portfolios dar. Teilergebnisse aus OptiPath dienen u.a. als Demonstratoren für Besucher*innen des Instituts. Die Projektergebnisse werden in Zukunft auch in Projekten des OFFIS weiteren wertvollen Input liefern können.

Entstandene wissenschaftliche Forschungsfragen und anwendungsinspirierte Aufgabenstellungen zum Projekt flossen bereits in einige studentische Projekte und Abschlussarbeiten ein und wurden dort bearbeitet.

Die durchgeführten Tests und die Integration der neuen Algorithmen in das celluveyor-Framework eröffnen cellumation langfristig erhebliche strategische und operative Vorteile:

1. Beschleunigte Innovationszyklen Die Ergebnisse zeigen, dass neue Pfadplanungsverfahren nun schnell entwickelt, getestet und vorab integriert werden können. Dies verkürzt die Zeit von der Idee bis zur praktischen Erprobung deutlich. Vielversprechende Ansätze lassen sich gezielt optimieren – etwa durch die Portierung in performantere Programmiersprachen oder mathematische Feinjustierung. Dadurch wird die Entwicklungsgeschwindigkeit für zukünftige Algorithmen maßgeblich gesteigert.

2. Flexibilität und Wettbewerbsvorsprung Die Fähigkeit, Software-Innovationen rascher in Produkte zu überführen, ist ein zentraler Erfolgsfaktor. Während Hardware-Lösungen leicht kopiert werden können, liegt der entscheidende Wettbewerbsvorteil in der Intelligenz der Software. cellumation positioniert sich damit als Vorreiter in der modularen, omnidirektionalen Fördertechnik – insbesondere durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Algorithmen.

Förderkennzeichen: 16IS23005A-B

3. Langfristige Effizienzsteigerung: Auch wenn die aktuellen Prototypen noch nicht die Effizienz etablierter Verfahren erreichen, wurden vielversprechende Ansätze identifiziert, die bereits in die Entwicklungspipeline eingeflossen sind. Durch die neue Testumgebung können Algorithmen schrittweise optimiert werden, bis sie die geforderte Performance erreichen. Dies sichert nicht nur die technologische Führerschaft, sondern ermöglicht auch kostengünstigere und adaptivere Lösungen für Kunden.

4. Praktische Verwertbarkeit: Die Ergebnisse fließen direkt in die Produktentwicklung ein: Neue Verfahren können künftig agiler erprobt und skaliert werden. Zudem bietet das Framework eine standardisierte Testumgebung, die die Qualitätssicherung beschleunigt und Risiken bei der Einführung neuer Algorithmen minimiert.

Fazit

Die Projektergebnisse schaffen die Grundlage, um cellumation nachhaltig als Innovationsführer zu etablieren. Durch die Kombination aus schnellerer Entwicklung, flexibler Integration und gezielter Optimierung von Algorithmen wird das Unternehmen in die Lage versetzt, marktreife Lösungen schneller und effizienter bereitzustellen – ein entscheidender Hebel für den zukünftigen Markterfolg.

3. Während der Durchführung bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Konkrete Vorhaben oder ähnliche Systeme sind den Autoren während der Laufzeit nicht bekannt geworden.

4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Folgende erfolgte Veröffentlichungen sind bereits durchgeführt worden:

Die Entwickler von cellumation nahmen an der ROSCon 2024 in Odense teil, wobei sie auch Teile der im Projekt entwickelten Funktionalitäten innerhalb der Community diskutieren konnten.

Wie oben bereits erwähnt, wurden die (damals ersten) Projektergebnisse und –Ideen auf der Mittelstandskonferenz in Berlin präsentiert. Hier konnten OFFIS und cellumation das Interesse der Besucher wecken und in einem konkreten Fall ein Kontakt hergestellt werden, über den ein EU-Antrag im Rahmen eines Marie Skłodowska-Curie Actions Doctoral Networks mit der Beteiligung von cellumation eingereicht wurde. Dieser Antrag wurde in 2025 positiv beschieden und schafft damit die Möglichkeit für einen Doktoranden ab dem Jahr 2026 bei cellumation an der Technologie der cellulveyor zu forschen und zu entwickeln. Somit hat das Projekt einen direkten Einfluss auf die weiteren Forschungstätigkeiten von cellumation und für den Wissenschaftsstandort Deutschland gebracht.

Folgende projektrelevante Veröffentlichungen wurden bereits publiziert oder sind geplant:

Die Ergebnisse des Projekts sind in seiner Rohform für cellumation nicht publizierbar. Die Veröffentlichung von internen Funktionalitäten der Maschinen ist nicht möglich, um den Wettbewerbsvorteil zu erhalten. Allerdings werden die mit den Projektergebnissen erreichbaren Verbesserungen in die Produktkommunikation aufgenommen. Da die Entwicklung noch nicht vollständig in ein Serienprodukt integriert ist, wird diese Veröffentlichung frühestens im Verlauf des Jahres 2026 erwartet. Und auch in diesem Fall werden die Projektergebnisse nicht als solches sichtbar sein, da es sich um klassische „Werbe“-Medien handelt.

Förderkennzeichen: 16IS23005A-B

Allerdings wird die Forschungstätigkeit von cellumation in die Außendarstellung aufgenommen, so dass die öffentliche Sichtbarkeit und Innovationstätigkeit von cellumation gestärkt wird. Hierbei ist auch geplant, einen Projektbericht zu veröffentlichen, der im Forschungsprofil von cellumation einsehbar ist. So wird zum einen das Projektergebnis im wissenschaftlichen Kontext sichtbar, zum anderen profitiert cellumation über die dargestellte Innovationstätigkeit.