

Bachelor-Thesis

Lukas Lux

Matrikelnummer: 1080 18 240012

Prüfungsordnung: BPO Sales Engineering and Product Management 2013

Thema: Entwicklung eines Frameworks zur simulationsbasierten Validierung LLM-generierten RoboterCodes in Unity

Die Programmierung von Robotern ist derzeit ein komplexer und zeitintensiver Prozess, der in der Regel spezielles Fachwissen erfordert. Um diese Hürde zu verringern, erforscht die Wissenschaft neue Ansätze zur Beschleunigung der Arbeitsprozesse. Generative KI-Systeme, insbesondere Large-Language-Modelle (LLMs), bieten dabei ein vielversprechendes Potenzial. Eine zentrale Herausforderung besteht jedoch im sicheren Einsatz von KI-generiertem Quellcode. Am LPS wird deshalb untersucht, wie Simulationstools genutzt werden können, um generierte Lösungen zunächst virtuell zu erproben. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen wiederum in die KI-Systeme zurückgeführt werden. Damit dies gelingt, ist eine Überführung der Simulationsergebnisse in eine für LLMs verständliche, textuelle bzw. natürlichsprachliche Form erforderlich.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine solche Überführung anhand eines Beispielprozesses und ausgewählter Simulationsparameter zu entwickeln, zu implementieren und methodisch zu evaluieren.

Im Einzelnen sollen folgende Punkte bearbeitet werden:

- Analyse des aktuellen Stands der Technik in den Bereichen Roboterprogrammierung sowie Bewertung von Robotersimulationen.
- Konzeption einer Basis-Architektur zur Übertragung von Erkenntnissen aus Simulationen in eine geeignet weiterzuverarbeitende Form (z. B. JSON).
- Programmiertechnische Umsetzung der Architektur in Unity für ein definiertes Beispielszenario.
- Methodische Erprobung der entwickelten Lösung und Bewertung der erzielten Ergebnisse.

Die Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag zu diesem Forschungsbereich vom Lehrstuhl für Produktionssysteme.

Ausgabedatum: 16.06.2025

Betreuer: M. Sc. Daniel Syniawa

Zusammenfassung

Die Programmierung von Industrierobotern erfordert bislang detaillierte Kenntnisse in herstellerspezifischen Programmiersprachen sowie tiefgehendes kinematisches Fachwissen. Mit der Verfügbarkeit generativer Sprachmodelle (engl. Large Language Models, LLMs) ergibt sich die Möglichkeit, Roboterprogramme aus natürlichsprachlichen Beschreibungen zu erzeugen. Ein direkter Einsatz solcher Ansätze im industriellen Umfeld ist jedoch mit erheblichen Risiken verbunden, da fehlerhafte Bewegungsabläufe oder Prozesslogiken zu Kollisionen, Produktionsausfällen oder sicherheitskritischen Zuständen führen können. Eine simulationsbasierte Validierung stellt daher einen notwendigen Zwischenschritt dar, um generierten Code zunächst virtuell zu prüfen und Risiken vor einer Übertragung auf reale Systeme zu minimieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Framework zur simulationsbasierten Validierung von LLM-generiertem Robotercode entwickelt, implementiert und evaluiert. Die Realisierung erfolgt in Unity3D unter Einbindung eines ABB IRB 6700 als virtuellen Testroboter. Das Framework basiert auf einer modularen, ereignisgesteuerten Architektur und integriert Überwachungsmechanismen, die Prozessfolgen prüfen, Kollisionen detektieren, kinematische Singularitäten identifizieren sowie Gelenkwinkel, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen überwachen. Alle erfassten Abweichungen werden systematisch aufgezeichnet und mit zeitlichen sowie kontextbezogenen Informationen ergänzt, um eine spätere Auswertung zu ermöglichen.

Die Funktionalität wurde anhand eines realitätsnahen Pick-and-Place-Szenarios untersucht, in dem gezielt fehlerhafte Sequenzen und kritische Roboterzustände provoziert wurden. Ergänzend erfolgte eine qualitative Reflexion im Rahmen eines Experteninterviews. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Prozessabweichungen, Kollisionen, Singularitäten und Grenzwertverletzungen zuverlässig erkennen und reproduzierbar dokumentieren lassen. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur sicheren Integration von LLMs in die industrielle Robotik, indem sie eine methodische Grundlage für die Validierung generierten Codes bereitstellt und eine Perspektive für die Rückkopplung von Simulationsergebnissen an Sprachmodelle eröffnet.

Abstract

The programming of industrial robots traditionally requires detailed knowledge of vendor-specific programming languages as well as a profound understanding of kinematics. With the availability of generative language models (LLMs), the possibility arises to generate robot programs from natural language descriptions. However, directly applying such approaches in industrial environments entails considerable risks, as faulty motion sequences or process logic may lead to collisions, production downtime, or safety-critical situations. Simulation-based validation therefore represents a necessary intermediate step to virtually test generated code and reduce risks before transferring it to real systems.

Within the scope of this thesis, a framework for simulation-based validation of LLM-generated robot code is developed, implemented, and evaluated. The framework is realized in Unity3D using an ABB articulated robot as test system. It follows a modular, event-driven architecture and integrates monitoring mechanisms that validate process flows, detect collisions, identify kinematic singularities, and monitor joint positions, velocities, and accelerations. All detected deviations are systematically recorded and enriched with temporal and contextual information to enable subsequent analysis.

The functionality was examined in a realistic pick-and-place scenario, in which faulty sequences and critical robot states were deliberately provoked. In addition, a qualitative reflection was carried out in the form of an expert interview. The results demonstrate that process deviations, collisions, singularities, and limit violations can be reliably detected and reproducibly documented. Thus, this work contributes to the safe integration of LLMs into industrial robotics by providing a methodological basis for the validation of generated code and by outlining a perspective for feeding simulation results back into language models.

A Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	II
Abstract	III
A Inhaltsverzeichnis	IV
B Abkürzungsverzeichnis	VII
C Abbildungsverzeichnis	VIII
D Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Relevanz	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Roboterprogrammierung	3
2.1.1 Verfahren der Roboterprogrammierung	3
2.1.2 Landschaft gängiger Programmierumgebungen	4
2.1.3 Physik-Engines zur Simulation von Robotern	5
2.2 Large Language Models	6
2.2.1 Funktionsweise und Architektur	6
2.2.2 Programmcodegenerierung durch Large Language Models	7
2.3 LLMs in der Robotik	8
2.3.1 Aktuelle Forschungsansätze	8
2.3.2 Herausforderungen in der Integration	9
2.3.3 Bestehende Frameworks und Tools	9
2.4 Zwischenfazit und Forschungsfrage	10

3	Implementierung des Frameworks zur simulationsbasierten Validierung	11
3.1	Architektur des Frameworks	11
3.1.1	Funktionale Anforderungen	11
3.1.2	Zielsetzung und architektonische Anforderungen	12
3.1.3	Unity3D als Simulationsplattform	13
3.1.4	Systemarchitektur	13
3.1.5	Robot Communication Layer	16
3.1.6	Event-Driven Architecture	18
3.1.7	SafetyEvent und RobotStateSnapshot	18
3.2	Implementierung der Monitore zur Fehlererkennung	19
3.2.1	Process Flow Monitor	19
3.2.2	Collision Detection Monitor	21
3.2.3	Singularity Detection Monitor	23
3.2.4	Joint Dynamics Monitor	29
3.3	Testumgebung und -setup	31
3.3.1	Flange als Visualisierungstool	34
3.3.2	Modellierung in Unity	35
3.4	Datenaufzeichnung und Logging	35
4	Validierungsergebnisse der Testszenarien	37
4.1	Überblick und Zielsetzung	37
4.2	Auswertung der Prozessflussüberwachung	37
4.2.1	Darstellung des korrekten Prozessflusses	38
4.2.2	Darstellung des abgewandelten Prozessflusses	38
4.2.3	Simulationsergebnis	39
4.3	Auswertung der Kollisionserkennung	40
4.3.1	Darstellung des Kollisionspfades	40
4.3.2	Simulationsergebnis	41
4.4	Auswertung der Singularitätserkennung	43
4.4.1	Darstellung einer singulären Roboterpose	43

4.4.2	Simulationsergebnis	44
4.5	Auswertung der Gelenkdynamiküberwachung	45
4.5.1	Erzeugung überhöhter Gelenkgeschwindigkeiten	45
4.5.2	Simulationsergebnis	45
4.6	Validierung der Ergebnisse durch Experteninterview	48
4.6.1	Vorgehen und Gegenstand	48
4.6.2	Beobachtungen	48
4.6.3	Hinweis zur Evaluationsmethodik	48
4.6.4	Einordnung des Robotersimulations-Ökosystems	48
4.6.5	Zusammenfassung	49
4.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	49
5	Diskussion	50
5.1	Diskussion des Frameworks	50
5.1.1	Prozessfolgenüberwachung	51
5.1.2	Kollisionserkennung	51
5.1.3	Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen	51
5.1.4	Singularitätserkennung	52
5.2	LLM-gestützte Rückkopplung der Simulationsergebnisse	52
5.3	Reflexion des eigenen Vorgehens	53
5.4	Grenzen und Generalisierbarkeit	53
6	Fazit und Ausblick	54
	Literatur	55

B Abkürzungsverzeichnis

AABB	Axis-Aligned Bounding Box
ABB	Asea Brown Boveri (Hersteller von Industrierobotern)
API	Application Programming Interface
CAD	Computer-Aided Design
DES	Discrete Event System
DH	Denavit-Hartenberg
EMA	Exponential Moving Average
GJK	Gilbert-Johnson-Keerthi (Algorithmus)
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
JSON	JavaScript Object Notation
KRL	KUKA Robot Language
LLM	Large Language Model
MCP	Model Context Protocol
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
OLP	Offline-Programmierung
RAPID	Robot Application Programming Integrated Development
ROS	Robot Operating System
RWS	Robot Web Services
TCP	Tool Center Point
VLA	Vision-Language-Action

C Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schichtenarchitektur des Frameworks. Orange umrandete Module implementieren formalisierte Interfaces (IRobotSafetyMonitor, IRobotConnector). Das RobotState-Objekt dient als gemeinsame Datenstruktur zwischen den Schichten.	14
Abbildung 2:	Implementierung der IRobotConnector-Interface als Verbindung zwischen RobotState und Roboter-Controller	17
Abbildung 3:	Algorithmus zum Ermitteln kinematisch benachbarter Mesh-Collider	22
Abbildung 4:	Screenshot einer Handgelenksingularität in Unity mit farbig dargestellten Koordinatensystemen der Denavit-Hartenberg-Transformationen	26
Abbildung 5:	Vorwärtskinematik zur Positionsberechnung	28
Abbildung 6:	Mehrstufige Smoothing-Pipeline zur Geschwindigkeitsberechnung	31
Abbildung 7:	Arbeitsraum-Layout des Roboters in der Draufsicht mit Roboter in Home-Position	32
Abbildung 8:	Technische Zeichnung des verwendeten Zylinderkopfes, dargestellt mithilfe von Autodesk Fusion 360	33
Abbildung 9:	Technische Zeichnung des ausgelegten Parallelgreifers, dargestellt mithilfe von Autodesk Fusion 360	34
Abbildung 10:	SafetyEvent-Klasse mit Zuordnung zum Monitor und Kritikalität .	36
Abbildung 11:	RobotStateSnapshot-Klasse mit formalisieren Attributen	36
Abbildung 12:	Visuelle Darstellung des Prozessflusses durch Konfiguration der Parts und Stations	38
Abbildung 13:	JSON-Log zum Prozessfolgenfehler, Achswinkel wurden im Nachhinein entfernt.	39
Abbildung 14:	Kollision in Unity3D (links) und zugehörige Position auf Pfad in RobotStudio (rechts). Gelenk 4, 5 und 6 sowie Greifer befinden sich innerhalb der Säulengeometrie.	40
Abbildung 15:	JSON-Log zur Kollisionserkennung. Sich wiederholende Key-Value Paare wurden verkürzt	42
Abbildung 16:	Pose in Unity, bei der eine Handgelenks-Singularität mit ($\theta_5 \approx 0^\circ$) entsteht	43
Abbildung 17:	Gekürzter Auszug der in Unity aufgezeichneten Safety Events zur Wrist-Singularität. Zusätzliche Informationen wurden mit "[...]abgekürzt.	44

Abbildung 18: Gekürzter Auszug der in Unity aufgezeichneten Safety Events des Joint Dynamics Monitor, Ereignis wiederholt sich	46
Abbildung 19: Achswinkel (oben) und Achsgeschwindigkeiten (unten) mit mar- kierten Bereichen (rot: Schwellenübertritte in den Rohdaten, blau: Safety Events aus Unity).	47

D Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Robotik-Simulationsplattformen, nach Bilancia 6

Tabelle 2: Überblick über die implementierten Monitore im Framework 19

Tabelle 3: Singularitätsschwellwerte und Detektionsbedingungen 27

Tabelle 4: Zeitintervalle und Zustände der Joint-Dynamics-Auswertung 47

Tabelle 5: Übersicht der getesteten Monitore, Szenarien und erkannten Ereignisse
im Ergebnisteil 49

1 Einleitung

1.1 Motivation und Relevanz

Die technologische Entwicklung und die zunehmende Vielfalt an Produkt- und Variantenvielfalt in der Fertigungsindustrie führt dazu, dass industrielle Produktionsanlagen immer häufiger neu eingerichtet oder umgerüstet werden müssen. In der Robotik erfordert dies die Erstellung und Anpassung von Programmen, die Bewegungsabläufe, Bearbeitungsschritte und Sicherheitsfunktionen eines Roboters definieren.¹ Traditionelle Programmiermethoden und -sprachen sind komplex, herstellersistezifisch und setzen ein tiefes Verständnis der jeweiligen Kinematik und proprietären Sprachen voraus.² Gleichzeitig halten generative Sprachmodelle Einzug in die Softwareentwicklung. Sie können aus natürlichsprachlichen Beschreibungen ausführbaren Code erzeugen und versprechen so Potenzial, die Hürden der Roboterprogrammierung zu senken.³ In der Praxis ist der direkte Einsatz von Large Language Models (LLMs) zur Generierung von Roboterprogrammcode im industriellen Kontext jedoch problematisch: Fehlerhafte Bewegungssequenzen oder fehlerhafte Prozesslogiken können zu Kollisionen, Schäden und Produktionsausfällen führen.⁴ Daher ist eine sorgfältige Validierung des generierten Codes unerlässlich. Darüber hinaus stellt das Fehlen des Verständnisses der physikalischen Welt eine signifikante Hürde für die Generierung von funktionalem Roboterprogrammcode durch LLMs dar.⁵

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption, Umsetzung und Evaluation eines Frameworks zur simulationsbasierten Validierung von mit LLMs generiertem Robotercode. Kernidee ist, durch die simulierte Ausführung von Roboterprogrammcode in einer modellierten, der avisierten Arbeitsumgebung des Roboters entsprechenden Simulation auftretende unerwünschte Ereignisse aufzuzeichnen und formalisiert zu dokumentieren. So kann Roboterprogrammcode getestet werden und fehlerhaftes Verhalten wie falsche Prozessabfolgen, Kollisionen, Singularitäten sowie Gelenkgeschwindigkeits- und Beschleunigungsüberschreitungen frühzeitig erkannt und berichtet werden. Erkannte Fehlerereignisse sollen mit weiteren, der Analyse und Fehlersuche behilflichen Daten angereichert werden.

Dazu wird in Kapitel 2 zunächst der Stand der Technik zu Robotersimulation, Offline-Programmierung und LLMs zusammengefasst und herausgestellt, inwiefern die Notwendigkeit

¹Vgl. Pine 1993; ElMaraghy 2005; Wiendahl et al. 2007; Koren et al. 1999; Biggs und MacDonald 2003

²Vgl. Lambrecht et al. 2011, S. 116

³Vgl. Salimpour et al. 2025; Brohan et al. 2023; Liang et al. 2023

⁴Vgl. Bilancia et al. 2023, S. 4

⁵Vgl. Cohen et al. 2024, S. 1/psqq

des Aufbaus eines solchen Frameworks besteht und welche Rahmenbedingungen dazu zu beachten sind.

Auf dieser Basis erfolgt in Kapitel 3 die Darstellung der Implementierung des Frameworks zur simulationsbasierten Validierung. Dazu wird zunächst in Abschnitt 3.1 die Architektur des zu entwickelnden Frameworks beschrieben, welches die Einbindung einer virtuellen Robotersteuerung in der Entwicklungs- und Modellierungsumgebung Unity3D vorsieht. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 3.2 vier verschiedene Module zur Fehlererkennung des Roboterhaltens implementiert. Dabei beschränkt sich diese Arbeit auf die Erkennung von falschen Prozessfolgen innerhalb eines Roboterprogramms, der Kollisionserkennung des Roboters mit seiner Umgebung, der Singularitätserkennung sowie der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsüberschreitung von Roboter Gelenken. In Abschnitt 3.3 wird eine modellierte Testumgebung mit einem realitätsnahen Pick-and-Place-Szenarios vorgestellt, innerhalb dessen die Funktionalitäten des Frameworks getestet werden sollen.

Anschließend wird in Kapitel 4 dargestellt, inwiefern sich durch Veränderung des Roboterprogrammcodes innerhalb der Testumgebung fehlerhaftes Roboterverhalten provozieren lässt. Zusätzlich wird im Rahmen eines Experteninterviews ergänzt, inwiefern der Ansatz in der Praxis nutzbare Ergebnisse liefert.

Im Rahmen von Kapitel 5 werden die gewonnenen Erkenntnisse diskutiert, Limitationen des entwickelten Frameworks aufgezeigt und in Zusammenhang mit einer Nutzung von LLMs zur Generierung und Verbesserung von Roboterprogrammcode gebracht. Dazu werden die Stärken und Schwächen des Ansatzes diskutiert sowie die Generalisierbarkeit und Weiterentwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und Fazit in Kapitel 6 ab.

2 Stand der Technik

2.1 Roboterprogrammierung

Die Roboterprogrammierung kann als die Programmierung von industriellen Manipulatoren verstanden werden, die sich durch ihre programmierbaren und anpassungsfähigen Eigenschaften von anderen Maschinen abheben. Roboterprogramme enthalten präzise Anweisungen und Spezifikationen für die Bewegung des Roboters. Der entscheidende Vorteil der Roboterprogrammierung ist somit Flexibilität: Roboter können durch einfache Software-Umprogrammierung für völlig unterschiedliche Aufgaben eingesetzt werden, während herkömmliche Steuerungstechnik meist auf vordefinierte starre Abläufe beschränkt ist.⁶

2.1.1 Verfahren der Roboterprogrammierung

Grundsätzlich wird bei der Roboterprogrammierung zwischen manuellen und automatischen Verfahren unterschieden.⁷ Manuelle Systeme erfordern die explizite Erstellung des Programms durch den Anwender, wobei textbasierte Programmiersprachen (z. B. herstellerspezifische Sprachen wie KUKA Robot Language (KRL) oder ABB RAPID) sowie grafische Oberflächen genutzt werden. Textbasierte und im eingeschränkten Umfang auch grafische Verfahren bieten die Möglichkeit, robotspezifische Datentypen zu deklarieren, einfache Bewegungen zu spezifizieren und mit Werkzeugen und Sensoren zu interagieren. Zur Ausführung von erstelltem Roboterprogrammcode wird dieser an die Robotersteuerung übertragen und unter Einhaltung von Echtzeitbeschränkungen ausgeführt.⁸

Automatische Systeme der Programmierung werden hingegen in lernende Systeme, instruktive Systeme sowie demonstrative Systeme unterteilt. Ein typisches Verfahren demonstrativer Programmierung ist das Führen des Roboters über ein Teach Pendant oder durch die direkte Führung der Roboterhand durch den Arbeitsbereich, wobei die dabei entstehenden Gelenkwinkel oder kartesische Tool Center Point Positionen (TCP-Positionen) aufgezeichnet und im Programm hinterlegt werden. Lernende und instruktive Systeme nutzen Methoden des maschinellen Lernens (z. B. Reinforcement Learning) sowie computerbasiertem Sehens (engl. Computer-Vision) zum Verständnis der Intention und der Umwelt, oft in Rahmen der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK).⁹

Ergänzend zur methodischen Einordnung wird bei der Roboterprogrammierung zwischen zwei Durchführungsmodi unterschieden: Online-Programmierung am realen System (z. B. Teachen per Teach Pendant oder Handführung), bei der Wegpunkte und Ablauflogik unmittelbar auf der

⁶Vgl. Nilsson 1996, S. 1 ff.

⁷Vgl. Biggs und MacDonald 2003, S. 1

⁸Vgl. Mühe et al. 2010, S. 1

⁹Vgl. Biggs und MacDonald 2003, S. 4 ff.

Steuerung aufgezeichnet werden, und Offline-Programmierung (OLP), bei der Programme in virtuellen Zellen entworfen, geprüft und erst anschließend auf die reale Steuerung übertragen werden.¹⁰

Online-Verfahren sind im industriellen Alltag verbreitet, verursachen jedoch Stillstandszeiten und bergen Test-Risiken.¹¹ Hierbei können Beschädigungen am Roboter, Maschinen, Werkstücken und Umwelt durch Kollisionen oder fehlerhafter Konfiguration des Roboters auftreten. OLP verlagert Entwurf, Kollisionsprüfung und Taktzeitabschätzung in die Simulation und reduziert so Risiken und Anlagenstillstand.¹² Somit wird die Entwicklung und Evaluierung von Roboterprogrammen ohne physischen Roboter ermöglicht: Programme werden in einer virtuellen Umgebung erstellt, getestet und iterativ verfeinert. Hierfür werden originalgetreue dreidimensionale Computer Aided Design Modelle (3D-CAD-Modelle) des Roboters und seiner Umgebung benötigt, welche teilweise vom Hersteller bereitgestellt werden oder nachmodelliert werden müssen, um den Zielkontext möglichst realitätsnah abzubilden. Ziel ist es durch die OLP problematische Stellen des Roboterprogramms, Ablaufprobleme sowie Nebenwirkungen des direkt und indirekt beeinflussten Prozesses früh zu erkennen.¹³ Externe Faktoren wie verformbare Objekte, Fluide oder Personen bei der MRK erhöhen im Rahmen solcher Simulationen maßgeblich die Komplexität. In realitätsnahen Szenarien (z. B. automatisierte Steckverbindungen in Schaltschränken oder Gießen von Schmelzen) treten materialbedingte Nichtidealitäten auf, die zu Wechselwirkungen mit dem Roboter führen. Eine hinreichend genaue physikalische Modellierung des Zielsystems ist daher Voraussetzung.

2.1.2 Landschaft gängiger Programmierumgebungen

Im Gegensatz zur Werkzeugmaschinenprogrammierung, die auf standardisierten Sprachen wie G-Code basiert, erschwert das Fehlen einer universellen, herstellerunabhängigen Programmiersprache die Integration verschiedener Robotertechnologien in einer Produktionsanlage.¹⁴ Industrielle Roboterhersteller, beispielsweise KUKA, ABB, Fanuc oder Stäubli, bieten und unterstützen lediglich eigene, proprietäre Programmiersprachen und Programmierschnittstellen, wobei diese sich in Komplexität, Syntax und Semantik unterscheiden.¹⁵ Zudem müssen Roboterprogrammierer mit eingeschränkten Basisbefehlen und Bibliotheken arbeiten. Diese decken zwar die meisten Standardanforderungen ab, ermöglichen jedoch keine fortgeschrittenen Berechnungen oder komplexen Steuerungsstrategien. Offline-Programmierungswerkzeuge wie RoboDK oder Siemens Process Simulate übersetzen 3D-Modellierungsbefehle mithilfe spezifischer Postprozessoren in herstellereigenspezifische Robotercode. Allerdings unterstützen diese Werkzeuge nicht die vollständigen Funktionsbibliotheken der kommerziellen Robotersprachen und können erfahrene Programmierer

¹⁰Vgl. Biggs und MacDonald 2003, S. 1; Holubek et al. 2014, S. 62 ff.

¹¹Vgl. Bilancia et al. 2023, S. 4

¹²Vgl. Holubek et al. 2014, S. 62 ff.

¹³Vgl. Holubek et al. 2014, S. 62 ff.

¹⁴Vgl. Bilancia et al. 2023, S. 4

¹⁵Vgl. Lambrecht et al. 2011, S. 116; Bilancia et al. 2023, S. 4

bei komplexen Programmerroutinen nicht ersetzen.¹⁶ Der Versuch, eine einheitliche, standardisierte Programmiersprache für alle Industrieroboter zu definieren und zu verbreiten, scheitert dabei bislang an der mangelnden Kooperation der Hersteller industrieller Roboter.¹⁷

Einen entsprechenden Ansatz verfolgt das open-source Projekt Robot Operating System (ROS). ROS ist ein quelloffenes Middleware-Framework, das Bibliotheken und Werkzeuge für Nachrichtenübertragung, Paketverwaltung und Hardwareabstraktion bereitstellt und damit eine hersteller- und plattformunabhängige Integrationsschicht anstrebt.¹⁸ In der industriellen Praxis wird ROS/ROS 2 primär als Integrations-/Orchestrierungsebene eingesetzt (z. B. Wahrnehmung, Planung, Zellenkoordination). Echtzeitkritische Bewegungs- und Sicherheitsfunktionen verbleiben üblicherweise auf herstellerseitig eingesetzten Robotersteuerungen, und der dokumentierte industrielle Einsatz bleibt anwendungs- und treiberabhängig.¹⁹ Da ROS 1 keine harten Echtzeitanforderungen der Robotersteuerung erfüllen kann, soll ROS 2 dieses Defizit erfüllen. Das erfordert in der Praxis jedoch ein echtzeitfähiges Betriebssystem sowie sorgfältiges Systemtuning, sodass ein reproduzierbares, deterministisches Ausführungsverhalten weiterhin von Konfiguration und Implementierung abhängt.²⁰

2.1.3 Physik-Engines zur Simulation von Robotern

Aufgrund der herstellerabhängig begrenzten Möglichkeiten der realistischen Abbildung eines Szenarios bei der OLP, bietet es sich an, auf Programme zur physikalischen Simulation von Körpern und Prozessen zurückzugreifen. Mit dem Einsatz von Physik-Engines soll eine virtuelle Umgebung geschaffen werden, in dem die Realität nahezu realgetreu digital abgebildet werden kann und so eine Simulation des Roboters und seiner Umgebung geschaffen werden. Sie modellieren dynamische Interaktionen wie Kollisionen, Schwerkraft und Reibung, was für die präzise Nachbildung des Roboterhaltens entscheidend ist. Obwohl die Genauigkeit dieser Engines als nicht perfekt angesehen wird, da sie die reale Welt nicht exakt abbilden²¹, sind sie für Forschung und Entwicklung essenziell, um physikalisch anspruchsvolle Prozesse zuverlässig simulieren zu können. Die Wahl der Physik-Engine beeinflusst die Stabilität und Wiederholbarkeit der Simulation. Häufig genutzte Physik-Engines sind PhysX, Bullet und ODE. In Tabelle 1 werden gängige Simulationsprogramme im Hinblick auf die verwendeten Physik-Engines, ROS-Kompatibilität und deren Möglichkeit der Integration verglichen. In der Praxis besteht ein Zielkonflikt zwischen numerischer Stabilität, Reproduzierbarkeit (Determinismus) und physikalischer Genauigkeit. Die Wahl der Engine beeinflusst daher nicht nur die Plausibilität der Dynamik, sondern auch die Vergleichbarkeit von Simulationsergebnissen.²²

¹⁶Vgl. Bilancia et al. 2023, S. 4

¹⁷Vgl. Lambrecht et al. 2011, S. 116

¹⁸Vgl. Quigley et al. 2009, S. 1

¹⁹Vgl. Bonci et al. 2023, S. 3-6

²⁰Vgl. Maruyama et al. 2016, S. 1; Bonci et al. 2023, S. 3-5

²¹Vgl. Audonnet et al. 2022, S. 1 ff.

²²Vgl. Audonnet et al. 2022, S. 1 ff.

Name	Physik-Engine	Open Source	ROS-Integration	ML-Support
Gazebo	Bullet, DART, ODE, Simbody	Ja	Ja	Extern
Ignition	DART	Ja	Ja	Extern
Webots	ODE	Ja	Ja	Extern
Isaac Sim	PhysX	Nein	Ja	Integriert
Unity	Havok, PhysX, RaiSim	Nein	Nein	Extern
PyBullet	Bullet	Ja	Nein	Extern
CoppeliaSim (V-rep)	Newton, Bullet, ODE, Vortex Dynamics	Nein	Ja	Extern
Mujoco	Mujoco	Ja	Nein	Extern

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Robotik-Simulationsplattformen, nach Bilancia

2.2 Large Language Models

Aufgrund kürzlicher Entwicklungen im Bereich der LLMs bieten diese durch ihre Fähigkeit der Generierung textueller Inhalte eine vielversprechende Möglichkeit, bei der Programmierung von Robotern zu unterstützen.

2.2.1 Funktionsweise und Architektur

Bei großen Sprachmodellen (LLMs) handelt es sich um statistische Modelle, welche in der Lage sind textuelle Inhalte zu übersetzen, zusammenzufassen, Informationen abzurufen und Konversation zu betreiben. Historisch sind LLMs aus der Möglichkeit, neuronale Netze im Modus des self-supervised learning (deutsch: selbst überwachtes Lernen) und anhand großer Mengen textueller Trainingsdaten zu trainieren, entstanden. Dabei haben sich LLMs innerhalb der letzten 10 Jahre aufgrund der hohen Verfügbarkeit digitaler textueller Daten sowie Innovationen im Bereich der Hardware-Technologie zur wichtigsten Technologie im Bereich Künstliche Intelligenz (KI) entwickelt.²³

Den entscheidenden Durchbruch für moderne LLMs lieferte die Transformer-Architektur, die sequenzielle Abhängigkeiten durch parallele Attention-Mechanismen ersetzt.²⁴ Mithilfe des Self-Attention-Mechanismus wird für jedes Token die Relevanz zu allen anderen Tokens einer Sequenz berechnet, wodurch ein Modell kontextuelle Beziehungen direkt erfasst, ohne Informationen sequenziell durch versteckte Schichten propagieren zu müssen. Diese Parallelisierung ermöglicht nicht nur schnelleres Training auf den erwähnten großen Datensätzen, sondern schafft auch die

²³Vgl. Naveed et al. 2024, S. 1 f.

²⁴Vgl. Vaswani et al. 2023, S. 1 ff.

Grundlage für das Skalierungsverhalten moderner Sprachmodelle. Folglich basieren aktuelle LLMs wie GPT-4 oder Claude auf dieser Architektur.

2.2.2 Programmcodegenerierung durch Large Language Models

LLMs haben bemerkenswerte Fortschritte in der automatischen Code-Generierung erzielt und revolutionieren damit die Softwareentwicklung. Code-LLMs sind in der Lage erfolgreich Quellcode aus natürlichsprachlichen Beschreibungen zu generieren. Aktuelle LLMs demonstrieren anhand von empirischen Benchmarks zur Evaluation der Qualität von Programmiercode (z. B. HumanEval, MBPP und BigCodeBench), dass sie in der Lage sind progressiv bessere Leistungen bei verschiedenen Schwierigkeitsgraden und Programmieraufgaben zu erzielen.²⁵ Voraussetzungen für die erfolgreiche Programmierung mithilfe von LLMs sind die Miteinbeziehung von Programmiersprachen und dessen technische und syntaktische Dokumentation in die Trainingsdaten des jeweiligen Modells.

Domänenspezifische Code-Generierung stellt LLMs vor besondere Herausforderungen, die deren praktische Anwendbarkeit erheblich einschränken. Neue und weniger populäre Programmiersprachen (engl.: low-ressource languages) sowie domänenspezifische Programmiersprachen sind in offen abrufbaren Datensätzen oft unterrepräsentiert, was zu einem Mangel verfügbarer Trainingsdaten und erhöhten Hürden durch spezialisierte Syntax führt.²⁶ LLMs zeigen zudem schwächere Leistungen beim Umgang mit domänenspezifischen Bibliotheken²⁷ – zusätzlicher Kontext (z. B. Repository-Code, Schnittstellenbeschreibungen) ist hier erforderlich. Diese Problematik betrifft Millionen von Entwicklern: Beispielsweise 3,5 Millionen Rust-Nutzer, einer performanten und vergleichsweise neuartigen Programmiersprache, können LLM-Funktionen nicht vollständig ausschöpfen.

Agentische KI-Systeme entwickeln sich zu einer neuen Generation autonomer Softwareagenten, die komplexe Aufgaben selbstständig ohne kontinuierliche menschliche Anleitung ausführen können. Diese Systeme adressieren teilweise die zuvor beschriebenen Herausforderungen bei domänenspezifischer Code-Generierung, indem sie über Command-Line-Interfaces und externe Tools Zugang zu spezialisierten Bibliotheken und Application Programming Interfaces (APIs) erhalten. Das Model Context Protocol (MCP) etabliert sich als offener Standard zur Verbindung von AI-Assistenten mit Datensystemen, Business-Tools und Entwicklungsumgebungen.²⁸ Viele Softwareentwicklungstools bieten bereits MCP-Unterstützung, um KI-Agenten besseren Zugang zu domänenspezifischen Kontextinformationen und Code-Repositories zu ermöglichen. Die Standardisierung solcher Protokolle kann eine Lösung für die Datenmangel-Problematik bei low-ressource languages und domänenspezifischen Programmiersprachen darstellen, wobei die praktische Wirksamkeit noch evaluiert werden muss. Für Robotik-Anwendungen ist dabei

²⁵Vgl. Jiang et al. 2024, S. 1

²⁶Vgl. Joel et al. 2024, S. 1

²⁷Vgl. Gu et al. 2025, S. 1

²⁸Vgl. Anthropic 2024

entscheidend, dass agentische Systeme nicht nur natürlichsprachliche Spezifikationen interpretieren, sondern deterministische, zeitkritische Ausführungspfade erzeugen und an bestehende Steuerungsstacks andocken können.

2.3 LLMs in der Robotik

Die Integration von LLMs in die Robotik verfolgt drei komplementäre Paradigmen: Vision-Language-Action Modelle, Code-Generation und Embodied Reasoning.²⁹

Die zentralen Linien lassen sich knapp gliedern:

- **Vision-Language-Action (VLA):** Gemeinsame Repräsentation von Wahrnehmung, Sprache und Aktion.
- **Code-Generierung:** Synthese ausführbarer Kontrollprogramme aus natürlichsprachlichen Spezifikationen.
- **Embodied Reasoning:** Multimodale Modelle mit kontinuierlichen Sensordaten und Weltmodellen.

2.3.1 Aktuelle Forschungsansätze

Google DeepMinds RT-2 repräsentiert den Vision-Language-Action Ansatz, bei dem Roboter-Aktionen als Text-Token behandelt und gemeinsam mit visuellen und sprachlichen Daten trainiert werden. Dieser Ansatz ermöglicht emergente Fähigkeiten wie das Verstehen von Zahlen oder Icons ohne explizites Training.³⁰ Code as Policies verfolgt hingegen die direkte Generierung von ausführbarem Python-Code aus natürlichsprachlichen Befehlen, wobei durch hierarchische Code-Generation komplexe Kontrollstrukturen wie Schleifen und Bedingungen erzeugt werden.³¹ Das Modell PaLM-E demonstriert einen dritten Weg durch multimodale Embodied Language Models, die Sprache, Vision und kontinuierliche Sensordaten in einem gemeinsamen Embedding-Raum verarbeiten³². Parallel entwickeln Forscher Brain-Body-Problem Ansätze, die kognitive Architekturen mit physischen Roboterkörpern verbinden sowie Prompt-basierte Methoden, bei denen LLMs direkt Low-Level-Kontrollaktionen vorhersagen.³³ Diese Vielfalt der Ansätze zeigt, dass die Forschung noch keine dominante Architektur etabliert hat und verschiedene Wege zur Integration von Sprache und Robotik exploriert.³⁴

²⁹Vgl. Salimpour et al. 2025, S. 2 ff.

³⁰Vgl. Brohan et al. 2023, S. 1 ff.

³¹Vgl. Liang et al. 2023, S. 1 ff.

³²Vgl. Driess et al. 2023, S. 2 f.

³³Vgl. Wang et al. 2024, S. 1; Bhat et al. 2024, S. 2

³⁴Vgl. Salimpour et al. 2025, S. 3 ff.

2.3.2 Herausforderungen in der Integration

Die Verankerung abstrakter Sprachkonzepte in physischen Robotersystemen scheitert an drei fundamentalen Problemen. Erstens müssen Roboter symbolische Repräsentationen mit sensorischen Erfahrungen verknüpfen - das von Harnad definierte Symbol-Grounding-Problem bleibt trotz jahrzehntelanger Forschung ungelöst³⁵. Zweitens fehlen standardisierte Schnittstellen zwischen hochabstrakten Sprachbefehlen und niedere, hardwarenahe Motorkommandos, wodurch jede Roboterplattform individuelle Übersetzungsmechanismen benötigt. Drittens limitieren Echtzeitanforderungen die Komplexität der Verarbeitung, da Roboter innerhalb von Millisekunden auf Umweltveränderungen reagieren müssen. Moderne Systeme versuchen diese Herausforderungen durch die Integration dreier Wahrnehmungsebenen zu lösen: Interozeption erfasst interne Zustände, Propriozeption überwacht Gelenkstellungen und Bewegungen, während Exterozeption die Umgebung durch Kameras und Sensoren interpretiert³⁶. Jedoch führt diese Komplexität zu erhöhtem Rechenaufwand und erschwert die Fehlerdiagnose bei unerwarteten Verhaltensweisen. Folglich benötigen robotische Systeme neue Architekturen, die effizient zwischen abstrakten Sprachmodellen und konkreten Aktionsräumen vermitteln. In der Literatur werden deshalb hybride Architekturen diskutiert, die symbolische Planung, differenzierbare Wahrnehmung und reaktive, zeitkritische Kontrolle kombinieren. Für industrielle Szenarien bleibt die Frage zentral, wie viel Autonomie ein LLM-gestütztes System erhalten kann, ohne Validierbarkeit und Betriebssicherheit zu kompromittieren.

2.3.3 Bestehende Frameworks und Tools

Aktuelle Frameworks standardisieren die Integration von LLMs in robotische Systeme durch modulare Architekturen. ROS-LLM verbindet das Robot Operating System mit verschiedenen Sprachmodellen und transformiert natürlichsprachliche Befehle automatisch in ausführbare Aktionssequenzen³⁷. Das Framework implementiert drei Ausführungsmodi: sequenzielle Abarbeitung für einfache Aufgaben, Verhaltensbäume für reaktive Systeme und Zustandsautomaten für komplexe Ablaufsteuerungen. Entwickler konfigurieren atomare Aktionen wie das Greifen eines Objektes oder bestimmte Pfadnavigationen, die das LLM dann zu komplexen Verhaltensketten kombiniert. Simulationsumgebungen beschleunigen parallel die Entwicklung durch massiv-parallele GPU-Berechnungen – mit Isaac Sim von NVIDIA lassen sich beispielsweise Tausende Roboterinstanzen gleichzeitig simulieren.³⁸ Solche Plattformen ermöglichen einen theoretischen Zero-Shot-Transfer von der Simulation zur Realität durch systematische simulierte Domänenrandomisierung von Physikparametern, Sensorrauschen und Umgebungsvariationen.³⁹ Die Standardisierung solcher Werkzeugketten soll Entwicklungszeiten in Zukunft reduzieren und die Programmierung von Robotern niederschwelliger machen.

³⁵Vgl. Cohen et al. 2024, S. 1 ff.

³⁶Vgl. Valenzo et al. 2022, S. 3,13

³⁷Vgl. Mower et al. 2024, S. 1 f.

³⁸Vgl. NVIDIA Corporation 2018

³⁹Vgl. Fickinger et al. 2025, S. 1

2.4 Zwischenfazit und Forschungsfrage

Die bisherigen Grundlagen zeigen: Simulation und Offline-Programmierung sind zentrale Bausteine, um Robotikprozesse vorab sicher und nachvollziehbar zu prüfen. LLMs eröffnen dabei die Möglichkeit, Roboterprogrammcode aus natürlicher Sprache zu generieren, stoßen in industriellen Kontexten jedoch auf die Anforderung, Ergebnisse systematisch und reproduzierbar zu validieren.

Daraus leitet sich die zentrale Frage ab, wie gut sich von LLMs erzeugter Robotercode in einer simulationsbasierten Umgebung hinsichtlich prozessrelevanter Aspekte prüfen und bewerten lässt.

Zur Beantwortung wird in den folgenden Kapiteln eine geeignete Umgebung zur Simulation eines Roboters aufgebaut und an einem kompakten, realitätsnahen Szenario erprobt. Ziel ist das Ausführen von Robotercode innerhalb dieser Umgebung und belastbare Prüfung nach definierten möglichen Fehler im Programmablauf mit nachvollziehbarer Dokumentation der Ergebnisse. Dazu beschreibt Kapitel 3 die Architektur des Frameworks, die verschiedenen zu prüfenden Fehlerarten sowie das Testszenario. Weiterführend wird durch Anwendung des Frameworks in Kapitel 4 ausgewertet, inwiefern Fehler im Roboterprogrammcode erkannt werden sowie welche strukturierte Ausgabe und Dokumentation der Simulationsergebnisse möglich ist.

3 Implementierung des Frameworks zur simulationsbasierten Validierung

Kern der Arbeit ist die Entwicklung eines Frameworks zur Detektion von Fehlern bei der Ausführung von Roboterprogrammcode. In diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen sowie das Vorgehen zur Implementierung des Frameworks beschrieben und anschließend ein Testszenario entwickelt, welches zur Validierung des entwickelten Frameworks dienen soll.

3.1 Architektur des Frameworks

Das entwickelte Framework wird innerhalb der Laufzeit- und Entwicklungsumgebung der Software Unity3D des Unternehmens Unity Technologies implementiert. Es basiert konzeptuell auf der simulierten Ausführung von Roboterprogrammcode mittels eines virtuellen Controllers innerhalb der Software RobotStudio des Unternehmens ABB und der Übertragung relevanter Bewegungs- und Zustandsdaten in Unity3D. Dort wird ein baugleicher Roboter mittels eines 3D-CAD-Modells abgebildet, welcher so den in RobotStudio simulierten Roboter in annähernder Echtzeit abbildet. Darauf aufbauend werden die Überwachungsmodule (Monitore) integriert, welche unterschiedliche Aspekte des Roboterhaltens beobachten und Abweichungen vom gewünschten Verhalten erkennen und dokumentieren.

Im Folgenden wird erläutert, wie das Framework funktional, architektonisch und algorithmisch aufgebaut und implementiert ist. Grundlegend werden dabei für das Framework folgende Festlegungen vorgenommen, welche sich in Abschnitt 3.3 wiederfinden: Als Testobjekt wird ein ABB IRB 6700-235/2.65 Roboter verwendet. Dabei handelt es sich um einen Knickarmroboter mit 6 Freiheitsgraden und 6 Gelenken.⁴⁰ Dieser wird in RobotStudio Version 2025.3 simuliert und mittels eines OmniCore-Controllers gesteuert.

3.1.1 Funktionale Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen an das Framework lassen sich in zwei Hauptkategorien unterteilen: die Echtzeitüberwachung kritischer Roboterzustände und Programmablaufereignisse sowie die systematische Protokollierung der auftretenden Ereignisse.

Überwachung kritischer Roboterzustände

Das Framework soll vier zentrale Überwachungsfunktionen implementieren:

⁴⁰Vgl. ABB Robotics 2025

1. **Kollisionserkennung:** Identifikation von Kontakten zwischen Roboterkomponenten und Objekten in der Arbeitsumgebung sowie Selbstkollisionen zwischen benachbarten Gliedern der kinematischen Kette.
2. **Singularitätserkennung:** Frühzeitige Erkennung kinematischer Singularitäten (Handgelenk-, Schulter- und Ellbogensingularitäten), die zu Kontrollverlust oder undefinierten Bewegungen führen können.
3. **Prozessflussüberwachung:** Validierung der korrekten Abfolge von Bearbeitungsstationen für Werkstücke und Erkennung von Abweichungen von der spezifizierten Sequenz.
4. **Gelenkdynamiküberwachung:** Kontinuierliche Überprüfung von Gelenkwinkeln, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen auf Grenzwertüberschreitungen, insbesondere während der Handhabung von Werkstücken.

Systematische Ereignisprotokollierung

Mithilfe des Frameworks soll es möglich sein, die genannten Fehlerarten systematisch debuggen zu können und die Fehlersuche in Roboterprogrammcode zu vereinfachen. Neben der reinen Erkennung ist zur späteren Analyse und Fehlersuche die formalisierte Dokumentation der Fehlerereignisse notwendig. Bei der Dokumentation soll jedes detektierte Ereignis um entsprechende Metadaten zum aktuellen Status sowie hilfreiche Daten zur weiteren Fehleranalyse des Roboters ergänzt werden. Folgende Metadaten lassen sich nach initialem Testen mithilfe der zur Verfügung stehenden Tools extrahieren:

- **Zeitlicher Kontext:** Präziser Zeitstempel des Ereignisses mit Millisekunden-Auflösung
- **Räumlicher Kontext:** Vollständige Gelenkwinkelkonfiguration und TCP-Position zum Ereigniszeitpunkt
- **Programmkontext:** Aktuelles Modul, Routine und Programmzeile der Robotersteuerung
- **Ereignisspezifische Daten:** Je nach Ereignistyp relevante Zusatzinformationen (Kollisionspunkt, Singularitätstyp, Sequenzabweichung, Grenzwertüberschreitung)

Diese strukturierte Erfassung ermöglicht die nachgelagerte genaue Auswertung der vorhandenen Daten und soll das Fehlersuchen (Debuggen) im Roboterprogrammcode erleichtern.

3.1.2 Zielsetzung und architektonische Anforderungen

Der Stand der Technik aktueller Simulationsplattformen für Roboter zeigt, dass virtuelle Steuerungen und damit zusammenhängende Simulationsplattformen herstellerspezifisch entwickelt und mit Ausnahme von ROS keine einheitliche Schnittstelle zur Kommunikation mit externen Plattformen oder Physik-Engines bieten. Somit muss für jeden Robotertyp ein designierter Konnektor genutzt werden, um diesen mit einer externen, herstellerunabhängigen Simulationsplattform zu

verbinden. Um eine herstellerunabhängige und erweiterbare Plattform zu entwickeln, sollte also eine gemeinsame Schnittstelle implementiert werden.

Um dies zu ermöglichen, verfolgt die Architektur des Frameworks drei zentrale Ziele:

1. **Vendor-Agnostik:** Abstraktion verschiedener Roboterhersteller durch einheitliche Interface-basierte Architektur ohne herstellerspezifische Abhängigkeiten im Kern-Framework
2. **Modulare Erweiterbarkeit:** Plugin-System für Safety Monitoring Module und Kommunikationsprotokolle ohne Änderungen der bestehenden Architektur
3. **Echtzeitfähige Kommunikation:** Latenzarme Datenübertragung für Motion Control und ereignisbasierte Sicherheitsüberwachung

3.1.3 Unity3D als Simulationsplattform

Unity3D wird in dieser Arbeit ausschließlich als Simulationslaufzeit verwendet. Die Engine stellt Szene, Physik und Rendering bereit und bietet aufgrund ihrer 3D/Physik-Infrastruktur eine plattformübergreifende Grundlage für den digitalen Abschnitt des Roboters.⁴¹ Die eigentliche Anwendungslogik wird durch klar definierte Adapter von der Engine entkoppelt, wodurch eine strikte Trennung zwischen Simulation und Domäne gewahrt bleibt. Asynchrone Abläufe im Update-Loop dienen lediglich der Taktung und greifen nicht direkt auf Unity-APIs zu. Die Wahl von Unity begründet sich zudem durch die breite Tooling-Unterstützung und die Möglichkeit, sowohl visuelle als auch programmatische Arbeitsabläufe zu kombinieren.⁴²

3.1.4 Systemarchitektur

Das entwickelte Framework implementiert eine vierschichtige Architektur, die eine klare Trennung der Verantwortlichkeiten gewährleistet (vgl. Abbildung 1). Diese Strukturierung folgt etablierten Software-Engineering-Prinzipien, um Wartbarkeit und Erweiterbarkeit zu gewährleisten.

⁴¹Vgl. Andaluz et al. 2016, S. 247

⁴²Vgl. Bartneck et al. 2015, S. 431

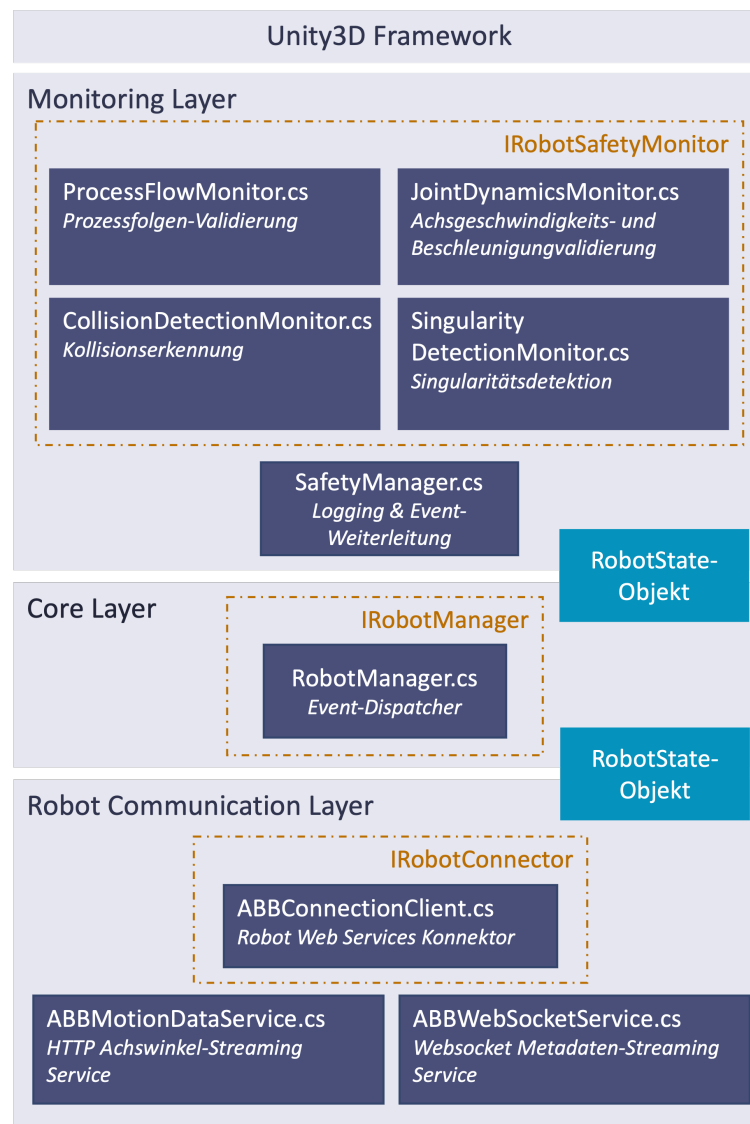


Abbildung 1: Schichtenarchitektur des Frameworks. Orange umrandete Module implementieren formalisierte Interfaces (IRobotSafetyMonitor, IRobotConnector). Das RobotState-Objekt dient als gemeinsame Datenstruktur zwischen den Schichten.

Die Architektur gliedert sich in vier logisch getrennte Schichten:

1. **Unity3D Framework**: Bereitstellung der Simulationsumgebung und Physik-Engine
2. **Monitoring Layer**: Implementierung der Sicherheitsmonitore
3. **Core Layer**: Zentrales State-Management und Event-Koordination
4. **Robot Communication Layer**: Adapter für herstellerepezifische Robotersteuerungen

Unity3D Framework (Simulationsschicht)

- **Zweck**: Bereitstellung der Simulationslaufzeit.

- **Funktion:** Taktung des Systems (Update-Loop), Szenenhosting und Bootstrap der Adapter. Abseits des Szenenlayouts und der Darstellung der Objekte soll hier keine tiefergehende Prozesslogik implementiert werden.
- **Schnittstellen:** Registrierung der Adapter über ein Dependency-Injection-Konzept; Monitore greifen nicht direkt auf Engine-APIs, lediglich Collider-Objekte werden weitergegeben.

Core Layer

- **Zweck:** Domänenkern für den Roboterzustand und die Ereignisverteilung.
- **Funktion:** Aktualisierung des RobotState, Verteilung von Zustandsänderungen an registrierte Monitore (Observer) und Aggregation von SafetyEvents.
- **Schnittstellen:** RobotManager, RobotSafetyManager und RobotState bilden die Kernklassen für Dispatch und Aggregation ⁴³.

Monitoring Layer

- **Zweck:** Kapselung der Prüfredeln als Policies für einzelne Fehlertypen (Kollision, Prozessfolge, Singularität, Dynamik).
- **Funktion:** Erzeugung normalisierter SafetyEvents und Meldung von Grenzverletzungen.
- **Schnittstellen:** Einheitliches Kerninterface IRobotSafetyMonitor definiert die Bindung für alle Monitore.

Der RobotManager im Core Layer fungiert als zentraler Event-Dispatcher, der Zustandsänderungen an alle registrierten Monitoring-Komponenten propagiert. Diese Implementierung des Observer Patterns ermöglicht eine lose Kopplung zwischen den Komponenten⁴⁴: Die Sicherheitsmonitore müssen lediglich das IRobotSafetyMonitor-Interface implementieren und können zur Laufzeit dynamisch registriert oder entfernt werden, ohne andere Systemteile zu beeinflussen.

Die in Abbildung 1 orange markierten Module definieren standardisierte Interfaces, die als Verträge zwischen den Schichten dienen. Diese Interface-basierte Abstraktion realisiert das Open-Closed-Prinzip, welches festlegt, dass Komponenten einerseits offen für Erweiterung sein sollen, andererseits geschlossen für Veränderung⁴⁵: Neue Robotertypen können durch Implementierung des IRobotConnector-Interfaces integriert werden, ohne den Core Layer zu modifizieren. Analog können zusätzliche Sicherheitsmonitore über das IRobotSafetyMonitor-Interface hinzugefügt werden. Diese Architekturentscheidung gewährleistet, dass das System für Erweiterungen offen bleibt, während die Kernfunktionalität stabil und unverändert bleibt.

⁴³Vgl. Gamma et al. 1994, S. 293 f.

⁴⁴Vgl. Gamma et al. 1994, S. 293-303

⁴⁵Vgl. Martin 2003

Die Kommunikation zwischen den Schichten erfolgt ereignisgesteuert über das `RobotState`-Objekt als gemeinsame Datenstruktur. Die `Communication Layer` aktualisiert kontinuierlich den Roboterzustand durch `WebSocket`-Events für Zustandsdaten der Robotersteuerung und `HTTP`-Polling für Bewegungsdaten. Der `RobotManager` verteilt diese Zustandsänderungen asynchron an alle registrierten Observer. Diese Event-Driven Architecture adressiert die Anforderungen an ein erweiterbares und gleichzeitiges Messaging-Modell. So lassen sich Events an mehrere Teilnehmer gleichzeitig weitergeben und verarbeiten, ohne dabei auf den Processing-Zyklus zu warten. Weiterführend werden Events getrennt voneinander verarbeitet, das heißt der `Main-Thread` muss nicht auf die Fertigstellung der Abarbeitung von Events durch Empfänger warten.⁴⁶

Der `SafetyManager` aggregiert die von den Monitoren generierten Sicherheitsereignisse und implementiert eine kontextabhängige Logging-Strategie. Bei laufendem Roboterprogramm werden detaillierte Logs im Format JavaScript Object Notation JSON-Logs zur späteren Analyse erstellt, während im Leerlauf-Zustand nur kritische Ereignisse in die Konsole geloggt werden. Diese Differenzierung optimiert sowohl die Performance als auch die Nachvollziehbarkeit von Sicherheitsvorfällen.

Die gewählte Schichtenarchitektur ermöglicht die unabhängige Entwicklung und Testung einzelner Komponenten. Horizontale Erweiterungen (neue Monitore) und vertikale Erweiterungen (neue Robotertypen) können ohne ungewollte Seiteneffekte auf bestehende Komponenten implementiert werden.

3.1.5 Robot Communcation Layer

Das `Robot Communication Layer` organisiert die Kommunikation mit der zugrundeliegenden Robotersteuerung und implementiert das Interface des Typs `IRobotConnector`. Als Verbindungsclient zwischen `Unity3D` und externer Schnittstelle des Robotersystems implementiert dieser das `IRobotConnector` Interface, welches als Vorlage für eine Anbindung an eine Robotersteuerung jeden Typs fungiert und standardisierte Methoden implementiert (vgl. Abbildung 2).

⁴⁶Vgl. Hohpe 2006, S. 1 ff.

```
namespace RobotSystem.Interfaces
{
    public interface IRobotConnector
    {
        event System.Action<RobotSystem.Core.RobotState> OnRobotStateUpdated;
        event System.Action<bool> OnConnectionStateChanged;

        bool IsConnected { get; }
        RobotSystem.Core.RobotState CurrentState { get; }

        void Connect();
        void Disconnect();
    }
}
```

Abbildung 2: Implementierung der IRobotConnector-Interface als Verbindung zwischen RobotState und Roboter-Controller

Ein Interface lässt sich anhand dieses Beispiels in 3 Funktionsbereiche aufteilen: Events, Attribute und Methoden.

Das Interface definiert Events (Aktionen) die bei definierten Zustandsänderungen in der Laufzeit ausgeführt werden. Andere Bestandteile des Frameworks sind in der Lage, ein Event zu abonnieren und eine Methode zu registrieren, welche ausgeführt werden soll, wenn dieses Event auftritt. Ist dies der Fall, wird das entsprechende Modul über die Änderung benachrichtigt und bekommt gegebenenfalls neue Daten zur Verfügung gestellt. Diese eventgetriebene Kommunikation sorgt dafür, dass einerseits alle Komponenten proaktiv auf den neusten Stand der Daten gebracht und gehalten werden, andererseits aber keine ressourcenblockierenden Prozesse ausgeführt werden müssen, um gegebenenfalls Statusänderungen abzufragen.

Weiterführend definiert das Interface IRobotConnector Attribute, welche den aktuellen Verbindungsstatus (verbunden = true, getrennt = false) speichern sowie das State-Objekt des Roboters. Definiert durch die schreibgeschützten, automatisch implementierte Eigenschaft mit einem Getter können Attribute auch von außerhalb des RobotConnectors abgefragt werden, jedoch nicht überschrieben.

Zuletzt gibt das Interface die Methoden Connect und Disconnect vor, welche hier die wichtigsten Methoden zum Verbinden und Trennen von der jeweiligen Robotersteuerung darstellen.

Als initiale Komponente wird eine Verbindung zum Controller eines Roboters benötigt, um den Roboter in Unity emulieren zu können und Daten zu verarbeiten. Dazu wird hier mittels eines HTTP-Clients zur Schnittstelle des RobotStudioSDKs über die API RobotWebServices (RWS) eine Verbindung aufgebaut. Die Verbindung zu RobotWebServices entsteht durch einen HTTP-Client und der Authentifizierung mit in RobotStudio festgelegten Zugangsdaten. Anschließend kann über einen erhaltenen Cookie die Verbindung aufrechterhalten werden und aktuelle Daten über den Roboter sowohl abgefragt, also auch der Roboter selbst gesteuert werden.⁴⁷

⁴⁷Vgl. ABB

Die RWS-Schnittstelle bietet einerseits die Möglichkeiten, aktuelle Achswinkel und TCP-Werte abzurufen, als auch weitere Zustandsdaten der Steuerung, wie das aktuell laufende Programm, den aktuellen Motorstatus oder auch die Codezeile, welche aktuell vom Programmzeiger ausgeführt wird. Weiterführend bietet RWS die Möglichkeit, aktuelle analoge und digitale Signale abzurufen, was nötig ist, um den Greifer steuern zu können.

Bei den oben genannten Daten mit Ausnahme der Achswinkel handelt es sich um Parameter, welche sich im Laufe eines Programmablaufs vergleichsweise selten verändern. Daher wird hier auf den Websockets-Endpunkt von RWS zugegriffen, um innerhalb einer Duplex-Kommunikation sich verändernde Signale oder auch Programmstatus zu empfangen. Dazu wird mithilfe des HTTP-Clients eine Anfrage zur Subscription auf verschiedene Parameter (bspw. den ProgrammPointer) gestellt, und anschließend eine Websockets-Session aufgebaut. Die Achswinkel werden zeitgleich über eine asynchron endlosen Task in einer in Unity definierbaren Frequenz abgefragt.

Der Client implementiert dabei das Interface `IRobotConnector` und gibt ein `RobotState`-Objekt mit den empfangenen Daten an den `RobotManager` weiter, welcher hier als zentraler Koordinator des aktuellen `RobotState` fungiert.

3.1.6 Event-Driven Architecture

Das System nutzt ein durchgängiges Event-System für lose Kopplung:

- `OnRobotStateUpdated`: Zustandsänderungen
- `OnConnectionStateChanged`: Verbindungsstatus
- `OnSafetyEventDetected`: Sicherheitsereignisse
- `OnMotorStateChanged`: Motorstatusänderungen

3.1.7 SafetyEvent und RobotStateSnapshot

Als für die Auswertung der Simulationsergebnisse relevantes Teil des Frameworks wird die `SafetyEvent`-Klasse implementiert. Jedes Mal, wenn ein Ereignis, welches mit der tatsächlichen Simulation eines Roboterprogramms zusammenhängt, auftritt, wird ein `SafetyEvent` instanziiert. Dieses wird initial von der jeweiligen überwachenden Komponente (einem `SafetyMonitor`) instanziiert und mit dem aktuellsten `RobotState` als unveränderliches Objekt (`RobotStateSnapshot`) befüllt. Weiterführend erhält es vom jeweiligen `SafetyMonitor` variierende Kontextinformationen, die später für die Auswertung des Ereignisses verwendet werden. Zusammenfassend besteht ein `SafetyEvent` aus folgenden Komponenten:

- **SafetyEvent**: Unveränderliches Value Object für Sicherheitsereignisse
- **RobotStateSnapshot**: Immutable Zustandserfassung zum Ereigniszeitpunkt
- **Ereignistypen**: Info, Warning, Critical mit konfigurierbaren Schwellwerten

- **Kontextdaten:** Vollständige Roboterzustandserfassung für Forensik

Basierend auf den dargestellten Schichten erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten die Implementierung der vier Monitore auf Basis der zuvor skizzierten Schichten.

3.2 Implementierung der Monitore zur Fehlererkennung

Zur Orientierung sind die im Framework implementierten Monitore in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Tabelle zeigt Ziel, Eingabedaten und Art der generierten Events.

Monitor	Ziel	Eingabedaten / Events
Prozessfolgen	Einhaltung der definierten Abfolge von Arbeitsschritten	Aktuelle Sequenz, Soll-Sequenz / Event bei Abweichung
Kollisionen	Erkennung von Zusammenstößen zwischen Roboter und Umgebung	Geometrieinformationen / Event mit Schweregrad und beteiligten Objekten
Singularitäten	Detektion von Handgelenks-, Ellbogen- und Schulter-Singularitäten	Gelenkwinkel, Jacobi-Matrix / Entering- und Exiting-Events mit Manipulierbarkeit
Gelenkgeschwindigkeiten	Überwachung von Winkel-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgrenzen	Gelenkwinkel / exceeded- und resolved-Events bei Grenzwertverletzung

Tabelle 2: Überblick über die implementierten Monitore im Framework

3.2.1 Process Flow Monitor

Im Folgenden wird die Implementierung des Process Flow Monitors zur Erkennung von Fehlern im Prozessablauf, genauer der Einhaltung der definierten Abfolge von Arbeitsschritten, dargestellt. Ziel ist es, Abweichungen festzustellen und darauf basierende Events mit aktuellem Sequenzschritt, Soll-Sequenz sowie relevanten Zustandsinformationen des Roboters auszugeben.

Theoretische Grundlagen der Prozessflussüberwachung

Die Überwachung von Produktionsabläufen in der Robotik basiert auf der Validierung deterministischer Werkstückpfade durch diskrete Fertigungsstationen. In der Literatur werden solche Systeme als Discrete Event Systems (DES) modelliert, bei denen Zustandsübergänge durch definierte Ereignisse ausgelöst werden.⁴⁸

⁴⁸Vgl. Cassandras und Lafortune 2021, S. 39 f.

Praktisches Vorgehen

Das System modelliert den Fertigungsprozess durch zwei zentrale Domänenobjekte. Die *Part*-Klasse repräsentiert Werkstücke mit eindeutiger ID, Name und Typ. Jedes Werkstück speichert seine erforderliche Bearbeitungssequenz als Array von Station-Referenzen und verfolgt seinen aktuellen Fortschritt durch einen Sequenzindex. Die *Station*-Klasse definiert Bearbeitungsbereiche durch Trigger-Collider an den physischen Positionen der Arbeitsstationen. Jede Station besitzt einen eindeutigen Namen und numerischen Index zur Sortierung.

Die Prozesspfade werden deklarativ im Unity-Inspector durch Zuweisung der Station-Referenzen definiert. Diese Konfiguration ermöglicht die flexible Modellierung verschiedener Fertigungsabläufe ohne Programmänderungen. Zur Laufzeit validiert das System automatisch die Einhaltung der definierten Sequenzen und protokolliert jeden Stationsbesuch mit Zeitstempel für spätere Analysen.

Trigger-Events unter Berücksichtigung der dynamischen Objekthierarchie. Wenn ein Werkstück gegriffen wird, wechselt es in Unity3D vom Weltkoordinatensystem in das lokale Koordinatensystem des Greifers. Diese Hierarchieänderung erzeugt scheinbare Ein- und Austritts-Events an Stationen, die nicht als Prozessübergänge interpretiert werden dürfen.

Der Monitor implementiert daher eine Grip-State-Awareness, die vier relevante Zustandsübergänge unterscheidet: Ablegen (Validierung der Zielstation), Aufnehmen (Protokollierung der Quellstation), Transport (wird ignoriert) und nicht erfolgreich gegriffene Bewegungen (Fehlererkennung). Diese Unterscheidung erfolgt durch hierarchische Analyse der Transform-Komponente - ein Werkstück gilt als gegriffen, wenn es Kind-Objekt des Roboters ist.

Die Implementierung nutzt ein Layer-System zur Ereignisfilterung. Werkstücke operieren auf Layer 30 (Parts), Stationen auf Layer 31 (ProcessFlow). Diese Trennung ermöglicht selektive Trigger-Erkennung ohne Interferenz mit der physikalischen Kollisionserkennung des Roboters.

Konkrete Implementierung

Der *ProcessFlowMonitor* koordiniert die Überwachung durch Subscription auf Station-Events. Bei jedem Trigger-Event korreliert er den Grip-State mit der Werkstückbewegung und validiert Transitionen gegen die definierte Sequenz. Der Monitor klassifiziert drei Fehlertypen: *WrongSequence* für nicht-sequenzielle Bewegungen, *SkippedStation* für übersprungene Stationen und *UnknownStation* für undefinierte Ziele.

Bei Erkennung eines Prozessfolgenfehlers generiert der Monitor ein *SafetyEvent* mit vollständigen Metadaten. Die Schweregrade sind konfigurierbar - standardmäßig werden falsche Sequenzen als kritisch und übersprungene Stationen als Warnungen klassifiziert. Ein Cooldown-Mechanismus verhindert mehrfache Meldungen identischer Verletzungen. Das Event wird an den *RobotSafetyManager* weitergeleitet, der es mit dem aktuellen Roboterzustand anreichert und gemäß der konfigurierten Logging-Strategie verarbeitet.

Die Überwachung der Prozessfolgen ist insbesondere in realen Produktionsszenarien relevant, da eine fehlerhafte Reihenfolge zu Sicherheitsrisiken oder Ausschuss führen kann. In Abschnitt 4.2 wird ein Beispiel gezeigt, in dem eine bewusst abweichende Abfolge simuliert wurde.

3.2.2 Collision Detection Monitor

Im Folgenden wird die Implementierung des Collision Detection Monitors zur Erkennung von Zusammenstößen zwischen Roboter und Umgebung dargestellt. Ziel ist es, Kollisionen des Roboters mit seiner Umgebung festzustellen und darauf basierende Events mit Geometrieinformationen zur Kollision, Schweregrad und beteiligten Objekten auszugeben.

Theoretische Grundlagen der Kollisionserkennung

Die Kollisionserkennung in Unity basiert auf einem zweistufigen Verfahren, das von der integrierten PhysX 5.1 Engine implementiert wird⁴⁹. In der Broad Phase werden zunächst Axis-Aligned Bounding Boxes (AABB) aller Objekte auf mögliche Überlappungen geprüft. Dieser Schritt reduziert die Anzahl der detaillierten Prüfungen von $O(n^2)$ auf $O(n \log n)$ durch räumliche Partitionierung⁵⁰. Nur Objektpaare mit überlappenden Bounding Boxes werden an die Narrow Phase weitergereicht, wo der präzise GJK-Algorithmus (Gilbert-Johnson-Keerthi) die tatsächliche Kollision zwischen konvexen Geometrien ermittelt.⁵¹

Unity3D unterscheidet dabei zwischen physikalischen Kollisionen und Trigger-Events. Während physikalische Kollisionen Reaktionskräfte berechnen, detektieren Trigger lediglich Überlappungen und generieren entsprechende Events⁵². Hier kommen lediglich Trigger-Collider zum Einsatz, da sich sonst die Umgebung durch physikalische Wechselwirkungen während der Simulation verändern würde. Die Layer-Matrix ermöglicht zusätzlich eine selektive Kollisionserkennung, indem bestimmte Layer-Kombinationen von der Prüfung ausgeschlossen werden können. Dies reduziert sowohl die Rechenlast als auch unerwünschte Kollisionsmeldungen zwischen semantisch nicht relevanten Objekten.

Praktisches Vorgehen

Für die Kollisionserkennung eines Roboterarms mit sechs Freiheitsgraden müssen spezielle Anpassungen vorgenommen werden: Da benachbarte Glieder der kinematischen Kette konstruktionsbedingt immer in Kontakt stehen, würden diese ohne Filterung kontinuierlich Kollisionen melden. Unity3D ermöglicht mittels nativer Funktionen der API die Möglichkeit des expliziten Ausschließens solcher Kollisionspaare.

⁴⁹Vgl. NVIDIA Corporation 2023

⁵⁰Vgl. Ericson 2004, S. 14

⁵¹Vgl. Ericson 2004, S. 399 ff.

⁵²Vgl. Unity Technologies 2025

Das Layer-System wird zur semantischen Trennung verschiedener Objektkategorien genutzt. Der Roboter operiert auf dem Standard-Layer, während Werkstücke auf Layer 30 (Parts) und Stationen auf Layer 31 (ProcessFlow) (siehe Kapitel 3.2.1) platziert werden. Durch Konfiguration der Collision Layer Matrix wird sichergestellt, dass nur sicherheitsrelevante Kollisionen zwischen Roboter und Hindernissen detektiert werden, während Process Flow Trigger-Events separat behandelt werden.

Konkrete Implementierung

Die Implementierung nutzt Trigger-Collider für berührungslose Detektion. Jedes Roboterglied erhält einen konvexen Mesh-Collider mit einem dedizierten Detector-Komponenten. Die Filterung benachbarter Glieder erfolgt durch hierarchische Analyse der Roboterstruktur, dargestellt in Abbildung 3.

```
private void SetupAdjacentFrameIgnoring()
{
    // Dynamically ignore collisions between adjacent frames in the kinematic chain
    Frame[] frames = GetComponentsInChildren<Frame>();

    // Sortieren der Hierarchie der Frame
    System.Array.Sort(frames, (a, b) =>
        ↪ GetHierarchyDepth(a.transform).CompareTo(GetHierarchyDepth(b.transform)));

    for (int i = 0; i < frames.Length - 1; i++)
    {
        Transform currentFrame = frames[i].transform;
        Transform nextFrame = frames[i + 1].transform;
        // Methode sucht nach Collidern im GameObject und setzt
        // Physics.IgnoreCollision
        IgnoreCollisionsBetweenParts(currentFrame, nextFrame);
    }
}
```

Abbildung 3: Algorithmus zum Ermitteln kinematisch benachbarter Mesh-Collider

Tritt nun eine Kollision mit einem der vordefinierten Objekte auf, wird die `OnRobotPartCollision()`-Methode des Monitors aufgerufen. Diese prüft zunächst, ob es sich um ein gegriffenes Werkstück handelt – solche Kollisionen werden ignoriert, da das Werkstück temporär Teil des Roboters ist. Anschließend wird durch einen Cooldown-Mechanismus verhindert, dass dieselbe Kollision innerhalb kurzer Zeit mehrfach gemeldet wird.

Die Kollisionserkennung unterscheidet zwischen kritischen und unkritischen Ereignissen basierend auf konfigurierbaren Tags. Objekte mit Tags wie `Machine` oder `Obstacles` lösen kritische Safety Events aus, während andere Kollisionen als Warnungen klassifiziert werden. Der Monitor generiert dabei ein `SafetyEvent`-Objekt mit vollständigen Metadaten über die Kollision,

einschließlich der beteiligten Roboterglieder, des Kollisionspunkts in Weltkoordinaten und der Distanz zwischen den Objekten.

Diese Ereignisse werden an den zentralen RobotSafetyManager weitergeleitet, der sie mit dem aktuellen Roboterzustand anreichert und entsprechend der konfigurierten Logging-Strategie verarbeitet. Durch diese Architektur bleibt der Collision Detection Monitor unabh Robotertyp und kann flexibel in verschiedenen Simulationsszenarien eingesetzt werden.

Die protokollierten Events bestehen jeweils aus dem Namen des Monitors, einer textuellen Beschreibung, den beteiligten Objekten sowie einem Schweregrad (critical oder warning). Diese Struktur ermöglicht eine klare Einordnung der Ereignisse in Kapitel 4.3 des Ergebnisteils.

3.2.3 Singularity Detection Monitor

Im Folgenden wird der Singularity Detection Monitor zur Erkennung von singulären Gelenkpositionen des Roboters näher erläutert. Ziel ist es, Handgelenks-, Ellbogen- und Schulter-Singularitäten festzustellen und beim Auftreten Events mit relevanten Informationen wie Achswinkeln, Nähe zur Singularität sowie verbleibende Manipulierbarkeit des Roboters auszugeben.

Theoretische Grundlagen der Singularitätsdetektion

Kinematische Singularitäten stellen ein fundamentales Problem in der Robotersteuerung dar und treten auf, wenn die Jacobi-Matrix des Roboters ihren vollen Rang verliert. In diesen Konfigurationen verliert der Roboter die Fähigkeit, sich in bestimmte Richtungen im kartesischen Raum zu bewegen, was zu Kontrollverlust und potentiell gefährlichen Situationen führen kann.⁵³

Eine kinematische Singularität tritt auf, wenn die Jacobi-Matrix $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$, welche des Roboters ihren vollen Rang verliert:

$$\text{rank}(\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})) < \min(m, n) \quad (1)$$

wobei $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ die Jacobi-Matrix, $\boldsymbol{\theta}$ der Gelenkwinkelvektor, m die Anzahl der Freiheitsgrade im kartesischen Raum und n die Anzahl der Robotergelenke darstellt.

Die Jacobi-Matrix beschreibt die Beziehung zwischen Gelenkgeschwindigkeiten $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ und kartesischen Geschwindigkeiten des TCP \mathbf{v} :

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2)$$

Tritt eine Singularität auf, so wird die Jacobi-Matrix singulär:

$$\det(\mathbf{J}) = 0 \quad (3)$$

⁵³Vgl. Siciliano und Khatib 2016

Dadurch wird die inverse Kinematik nicht eindeutig lösbar ist und es können theoretisch unendliche Gelenkgeschwindigkeiten auftreten.⁵⁴

Frameworkspezifisches Vorgehen

Im Rahmen der praktischen Implementierung wird hier ein auf Schwellwerten und absoluten sowie winkelbasierten Entfernungen zur Singularität angewendet. Durch die Anwendung der rein mathematischen Definition ließe sich zwar jede beliebige Singularität in einer seriellen Kinematik erkennen, jedoch bleiben die betroffenen Gelenke und Art der Singularität ungewiss und müssten iterativ bestimmt werden. Daher wird hier eine pragmatische Berechnungsmethodik verwendet.

Für serielle Roboter manipulatoren mit sechs Freiheitsgraden, wie den hier verwendeten ABB IRB 6700, können drei primäre Singularitätstypen unterschieden werden: Schulter singularitäten, Ellbogensingularitäten und Handgelenksingularitäten.⁵⁵

Schulter singularitäten treten auf, wenn sich das Handgelenkszentrum (Schnittpunkt der Achsen 4, 5, 6) direkt über oder nahe der Rotationsachse des ersten Gelenks befindet:

$$\sqrt{x_{wc}^2 + y_{wc}^2} < \epsilon \quad (4)$$

wobei (x_{wc}, y_{wc}) die Position des Handgelenkszentrums in der XY-Ebene und ϵ der Singularitätsschwellenwert ist.

Ellbogensingularitäten treten auf, wenn der Roboter die Grenzen seines Arbeitsraums erreicht. Dies geschieht typischerweise bei vollständig ausgestreckter oder eingeklappter Konfiguration. Beim Knickarmrobotern wie dem IRB 6700 verläuft die Rotationsachse des vierten Gelenks nicht direkt durch den Ursprung vom dritten Gelenk, sondern ist durch eine Translation verschoben. Das impliziert, dass die vollständige Streckung des Armes nicht durch einen Winkel von 0° bzw. 180° auftritt. Hier lässt sich allgemeiner der Zusammenhang der Vektoren zwischen Gelenk 2 und 3 sowie 2 und 5 anwenden:

$$\theta = \angle(\vec{v}_{23}, \vec{v}_{25}) \approx 0^\circ \text{ oder } \theta \approx 180^\circ \quad (5)$$

wobei:

$$\vec{v}_{23} = \vec{p}_3 - \vec{p}_2 \quad (6)$$

$$\vec{v}_{25} = \vec{p}_5 - \vec{p}_2 \quad (7)$$

⁵⁴Vgl. Nakamura 1991

⁵⁵Vgl. Spong et al. 2006

mit \vec{p}_i als Position des Gelenks i . Die Singularitätsbedingung lautet:

$$\theta < \epsilon \quad \text{oder} \quad \theta > 180^\circ - \epsilon \quad (8)$$

Handgelenksingularitäten treten auf, wenn die Rotationsachsen der letzten drei Gelenke (Gelenke 4, 5, 6) kollinear werden. Dies tritt typischerweise auf, wenn $\theta_5 = 0^\circ$ oder $\theta_5 = 180^\circ$. Mathematisch beschrieben durch:

$$\mathbf{z}_4 \parallel \mathbf{z}_6 \quad \text{oder} \quad |\mathbf{z}_4 \cdot \mathbf{z}_6| \approx 1 \quad (9)$$

wobei \mathbf{z}_i die Rotationsachse (Z-Achse) des i -ten Gelenks im Weltkoordinatensystem darstellt. Beispielhaft ist das Auftreten einer Handgelenkssingularität in Abbildung 4 in Unity3D.

Manipulierbarkeitsindex (Yoshikawa-Maß)

Der von Yoshikawa Yoshikawa 1985 eingeführte Manipulierbarkeitsindex ist eine der am häufigsten verwendeten Metriken:

$$\mu(\boldsymbol{\theta}) = \sqrt{\det(\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}))} \quad (10)$$

Für quadratische Jacobi-Matrizen vereinfacht sich dies zu:

$$\mu(\boldsymbol{\theta}) = |\det(\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}))| \quad (11)$$

Der Index nimmt Werte zwischen 0 (Singularität) und einem maximalen Wert an, wobei höhere Werte bessere Manipulierbarkeit indizieren. Die Robotik-Literatur bietet verschiedene Ansätze zur Behandlung von Singularitäten, die sich in präventive und reaktive Strategien unterteilen lassen. Um diese in der Praxis anzuwenden, müssen jedoch teilweise numerische Auswertungen durchgeführt werden, um Schwellwerte zu erfassen. Daher kommen diese hier nicht zum Einsatz. Zur zusätzlichen Charakterisierung wird jedoch die Yoshikawa-Manipulierbarkeit berechnet, da der Wert als Kennzahl für die Nähe zu einer Singularität verwendet werden kann. Er wird in den Ergebnissen in Kapitel 4.4 aufgeführt.

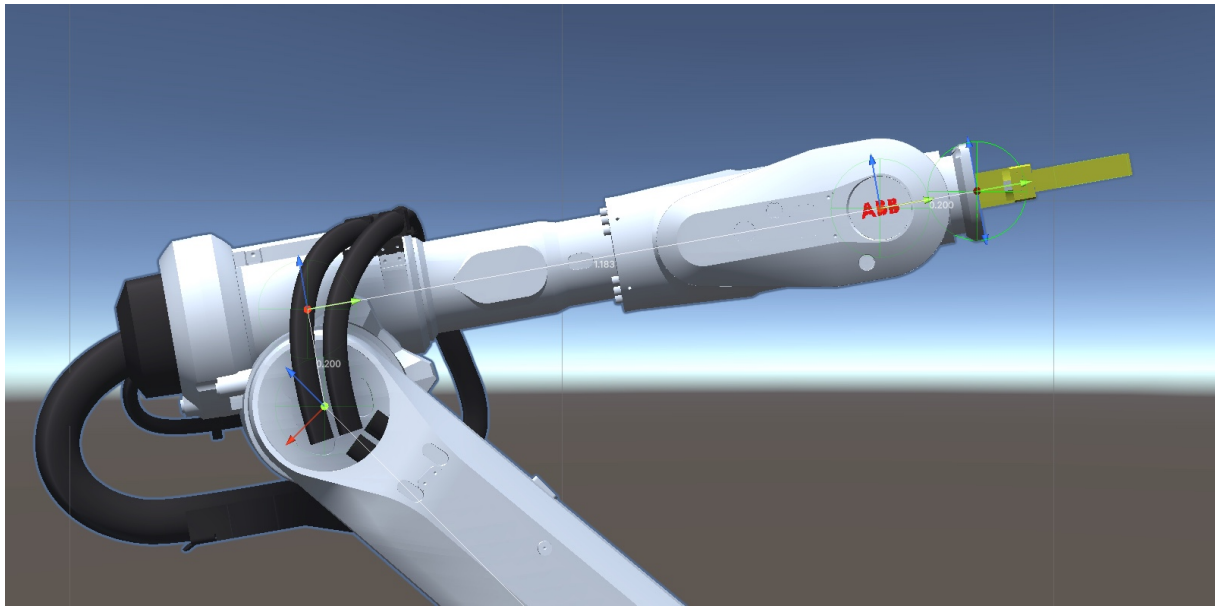


Abbildung 4: Screenshot einer Handgelenksingularität in Unity mit farbig dargestellten Koordinatensystemen der Denavit-Hartenberg-Transformationen

Praktisches Vorgehen

Nachfolgend werden die Schritte 1 bis 4 zur Prüfung des Vorliegens einer Singularität dargestellt.

Schritt 1: Positionsrechnung und Achsentransformation

Die Positionen der relevanten Gelenke werden durch die Anwendung der Vorwärtstransformation nach Denavit-Hartenberg (DH) berechnet⁵⁶:

$$\vec{p}_i = \text{DH}(\theta_1, \dots, \theta_i) \quad \text{für } i = 2, 3, 5 \quad (12)$$

Die Rotationsachsen werden aus den Transformationsmatrizen extrahiert:

$$\mathbf{z}_i = \mathbf{T}_i[:, 2] \quad \text{für } i = 1, 4, 6 \quad (13)$$

Schritt 2: Singularitätsanalyse

Für jeden Singularitätstyp wird die entsprechende Bedingung überprüft:

- **Schulteringularität:**

$$d_{wc} = \sqrt{x_{wc}^2 + y_{wc}^2} \quad (14)$$

wobei (x_{wc}, y_{wc}) die Position des Handgelenkszentrums in der XY-Ebene ist.

- **Ellbogensingularität:**

$$\theta_{elbow} = \angle(\vec{p}_3 - \vec{p}_2, \vec{p}_5 - \vec{p}_2) \quad (15)$$

⁵⁶Vgl. Denavit und Hartenberg 2021

- **Handgelenksingularität:**

$$c_{46} = |\mathbf{z}_4 \cdot \mathbf{z}_6| \quad (16)$$

Schritt 3: Schwellwertvergleich

Singularitätstyp	Beispiel-Schwellwert	Bedingung
Schulter	$\tau_{\text{shoulder}} = 100 \text{ mm}$	$d_{wc} < \tau_{\text{shoulder}}$
Ellbogen	$\tau_{\text{elbow}} = 5^\circ$	$\theta_{\text{elbow}} < \tau_{\text{elbow}}$ oder $\theta_{\text{elbow}} > 180^\circ - \tau_{\text{elbow}}$
Handgelenk	$\tau_{\text{wrist}} = 5^\circ$	$c_{46} > \tau_{\text{wrist}}$

Tabelle 3: Singularitätsschwellwerte und Detektionsbedingungen

Schritt 4: Manipulierbarkeitsberechnung

Für detektierte Singularitäten wird ein approximierter Manipulierbarkeitsindex nach Yoshikawa berechnet:

$$w = \sqrt{\det(\mathbf{J}(\theta)\mathbf{J}^T(\theta))} \quad (17)$$

Ein kleiner Wert von w indiziert die Nähe zu einer singulären Konfiguration. Das entwickelte Framework implementiert eine winkelbasierte Singularitätsdetektion, die geometrische Eigenschaften der Roboterkinematik direkt nutzt, anstatt auf rechenintensive Jacobi-Matrix-Berechnungen angewiesen zu sein. Die achsenbasierte Methode basiert auf der Erkenntnis, dass Handgelenks- und Ellbogensingularitäten geometrisch durch die Kollinearität von Rotationsachsen charakterisiert werden können. Schulter singularitäten werden analog durch die Entfernung des ersten Gelenks zum Handgelenkzentrum in der XY-Ebene festgestellt.

Konkrete Implementierung der Detektionsmethoden

Die Implementierung des SingularityDetectionMonitor nutzt die Vorwärtskinematik des Preliy Flange Frameworks zur Berechnung der Gelenkpositionen. Die zentrale Methode ComputeJointPosition berechnet die kartesische Position eines beliebigen Gelenks durch sukzessive Anwendung der Denavit-Hartenberg-Transformationsmatrizen (vgl. Abbildung 5).

```

private Vector3 ComputeJointPosition(float[] jointAngles, int jointIndex)
{
    Matrix4x4 baseTransform = Matrix4x4.identity;

    // Apply joint transformations to get to desired joint position
    // To get joint N position, apply transformations 0 to N-1
    for (int i = 0; i < jointIndex - 1 && i < robotFrames.Length - 1; i++)
    {
        var frame = robotFrames[i + 1]; // Frame i+1 corresponds to joint i
        var config = frame.Config;

        // Create transformation matrix using DH parameters
        float theta = jointAngles[i] * Mathf.Deg2Rad + config.Theta;
        Matrix4x4 dhTransform = HomogeneousMatrix.CreateRow(new FrameConfig(
            config.Alpha, config.A, config.D, theta
        ));

        baseTransform = baseTransform * dhTransform;
    }

    return baseTransform.GetPosition();
}

```

Abbildung 5: Vorwärtskinematik zur Positionsberechnung

Die Methode `ComputeJointPosition` in Abbildung 5 implementiert die klassische Vorwärtskinematik durch Multiplikation homogener Transformationsmatrizen. Jede Matrix T_i wird aus den DH-Parametern $(\alpha_i, a_i, d_i, \theta_i)$ konstruiert, wobei θ_i der aktuelle Gelenkwinkel plus einem konstanten Offset ist. Die resultierende Transformationsmatrix beschreibt die Position und Orientierung des Gelenks im Basiskoordinatensystem.

Das Framework nutzt Unitys `Matrix4x4`-Klasse für die Transformationsberechnungen und die `GetPosition()`-Methode zur Extraktion der Translationskomponente. Die Koordinatentransformation zwischen dem DH-Parametersystem und Unitys linkshändigem Y-up Koordinatensystem wird dabei durch die Methode `HomogeneousMatrix.CreateRow()` des Flange-Frameworks transparent gehandhabt. Das ermöglicht eine nahtlose Integration der mathematischen Robotik-Konzepte in die Unity-Umgebung, während die Echtzeitfähigkeit durch eventgetriebene Berechnung gewährleistet ist. Bei der Detektion einer Singularität bzw. dem Unterschreiten des im Unity-Editor definierten Grenzwertes wird ein `SafetyEvent`-Objekt instanziiert und an die `SafetyMonitor` Klasse weitergegeben. Darin werden zusätzlich Event-Metadaten zu den Daten der Gelenkwinkelabstände ausgegeben. Sobald der kritische Bereich verlassen wurde, wird ein weiteres `SafetyEvent` ausgegeben, um den Bereich, in welcher die Singularität auftritt, abstecken zu können.

3.2.4 Joint Dynamics Monitor

Im Folgenden wird der Joint Dynamics Monitor, welcher als Aufgabe die Erkennung zu hoher Gelenkgeschwindigkeiten und Beschleunigungen hat, erläutert. Ziel ist es, Überschreitungen von Gelenkgeschwindigkeiten und -beschleunigungen festzustellen und Events, welche relevante Zustandsdaten wie das Roboter gelenk, Position und Zeitpunkt der Überschreitung enthalten, ausgeben.

Theoretische Grundlagen

Die Überwachung kinematischer Grenzwerte während der Werkstückhandhabung stellt eines der zentralen Ziele des Frameworks dar. Die besondere Herausforderung in HTTP-basierten Systemen liegt in der diskreten Datenakquisition mit Polling-Intervallen von 50-1000ms, wodurch die numerische Differentiation zu erheblichen Instabilitäten führt.

Geschwindigkeit $\dot{\theta}_i$ und Beschleunigung $\ddot{\theta}_i$ können folgendermaßen aus der diskreten Zeitreihe approximiert werden:

$$\dot{\theta}_i[k] = \frac{\theta_i[k] - \theta_i[k-1]}{\Delta t_k}, \quad \ddot{\theta}_i[k] = \frac{\dot{\theta}_i[k] - \dot{\theta}_i[k-1]}{\Delta t_k} \quad (18)$$

In der Praxis und nach initialem Testen hat sich herausgestellt, dass die Berechnung dessen durch die unstetige Bewegung unrealistische Werte liefert. Das hängt damit zusammen, dass der HTTP-Endpunkt des Robotercontrollers in festgelegten Zeitabständen abgefragt wird und so die Gelenkpositionen des Roboters erneuert werden. Bewegt sich der Roboter über eine bestimmte Strecke, wird die von Unity lediglich als unstetige Bewegung mit theoretisch unendlich großer Geschwindigkeit wahrgenommen. Daher ist hier eine Glättung der Werte nötig, um eine stetige Bewegung zu simulieren.

Zur Stabilisierung implementiert das Framework einen dreistufigen Filteransatz:

1. Exponential Moving Average (EMA):

$$\dot{\theta}_{i,EMA}[k] = \alpha \dot{\theta}_{i,raw}[k] + (1 - \alpha) \dot{\theta}_{i,EMA}[k-1], \quad \alpha = 0.2 \quad (19)$$

2. Moving Window Average:

$$\dot{\theta}_{i,MW}[k] = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \dot{\theta}_{i,EMA}[k-j], \quad N = 8 \quad (20)$$

3. Outlier Rejection:

$$\left| \dot{\theta}_{i,final}[k] - \dot{\theta}_{i,final}[k-1] \right| \leq \tau_v \cdot \dot{\theta}_{i,max}, \quad \tau_v = 0.2 \quad (21)$$

Durch die verwendete Glättung werden schnelle Änderungen in den Gelenkwerten erst zeitverzögert sichtbar. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Erkennung von Geschwindigkeitsverletzungen aus, da der Monitor die Ereignisse nicht exakt im Moment des Überschreitens ausgibt, sondern nach einigen Abtastungen.

Grenzwertdefinition

Die Grenzwerte werden aus den Flange-Framework-Konfigurationen extrahiert oder manuell spezifiziert. Ein Sicherheitsfaktor $\lambda = 0.8$ reduziert die nominellen Maximalwerte präventiv. Für den ABB IRB 6700 ergeben sich beispielsweise Geschwindigkeitsgrenzen von $88^\circ/\text{s}$ für die Hauptachsen und bis zu $168^\circ/\text{s}$ für das Handgelenk.

Implementierung der Smoothing-Pipeline

Die zentrale Smoothing-Methode kombiniert die Filteransätze, dargestellt in Abbildung 6.

Als weiteres Feature implementiert der Monitor eine Methode, welche sich an die Update-Rate der State-Updates (also die Rate neuer Gelenkdaten) anpasst. So kann garantiert werden, dass ein State nicht doppelt verarbeitet und so beispielsweise die Geschwindigkeit falsch interpretiert wird, da es sich um den immer gleichen State des Roboters handelt.

Bei der Überschreitung der Schwellwerte wird der `SafetyMonitor` mittels eines `SafetyEvents` benachrichtigt. Als zusätzliche Metadaten enthält diese Meldung die Eventart (Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsüberschreitung) und die damit zusammenhängenden Schwellwerte und aktuellen Werte. Da es in dem Rahmen vorkommen kann, dass hier die Geschwindigkeit über einen längeren Zeitraum überschritten wird, gibt der Monitor ebenfalls ein `SafetyEvent` aus, wenn die Geschwindigkeit unter den gegebenen Schwellwert sinkt.


```

private float[] SmoothVelocities(float[] rawVelocities)
{
    // Hinzufügen der neuen Geschwindigkeiten zum Buffer und Buffer anpassen
    velocityBuffer.Add((float[])rawVelocities.Clone());
    if (velocityBuffer.Count > smoothingWindowSize) {
        velocityBuffer.RemoveAt(0);
    }
    float[] result = new float[6];
    for (int i = 0; i < 6; i++) {
        // Glatetten mit dem EMP
        smoothedVelocities[i] = (smoothingAlpha * rawVelocities[i]) + ((1f -
        ↪ smoothingAlpha) * smoothedVelocities[i]);
        // Anwenden des Moving Window Average
        if (velocityBuffer.Count >= smoothingWindowSize) {
            float windowSum = 0f;
            for (int j = 0; j < velocityBuffer.Count; j++)
            {
                windowSum += velocityBuffer[j][i];
            }
            result[i] = windowSum / velocityBuffer.Count;
        }
        else
        { result[i] = smoothedVelocities[i]; }
        // OutlierRejection
        float maxChange = maxJointVelocities[i] * velocityOutlierThreshold;
        if (velocityBuffer.Count > 1) {
            // GetMovingAverage berechnet den gleitenden Durschnitt zwischen der
            // letzten und vorletzten Bufferposition
            float previousSmoothed = velocityBuffer.Count >= 2 ?
                GetMovingAverage(velocityBuffer, i, velocityBuffer.Count - 1) :
                ↪ smoothedVelocities[i];
            float change = Mathf.Abs(result[i] - previousSmoothed);
            // Überschreitet die Änderung der Geschwindigkeit den Schwellwert,
            // wird er auf den maximalen positiven oder negativen Wert begrenzt
            if (change > maxChange) {
                result[i] = previousSmoothed + Mathf.Sign(result[i] - previousSmoothed) *
                ↪ maxChange; }
        }
    }
    return result;
}

```

Abbildung 6: Mehrstufige Smoothing-Pipeline zur Geschwindigkeitsberechnung

3.3 Testumgebung und -setup

Die Roboterzelle ist im Rahmen dieses Testszenarios als isolierter Arbeitsraum mit mehreren Hindernissen, Begrenzungen und 3 semantischen Stationen aufgebaut. Die vom Roboter zu bewältigenden Aufgaben beschränken sich dabei auf ein Pick-and-Place-Szenario von Zylinderköpfen, dargestellt in Abbildung 7.

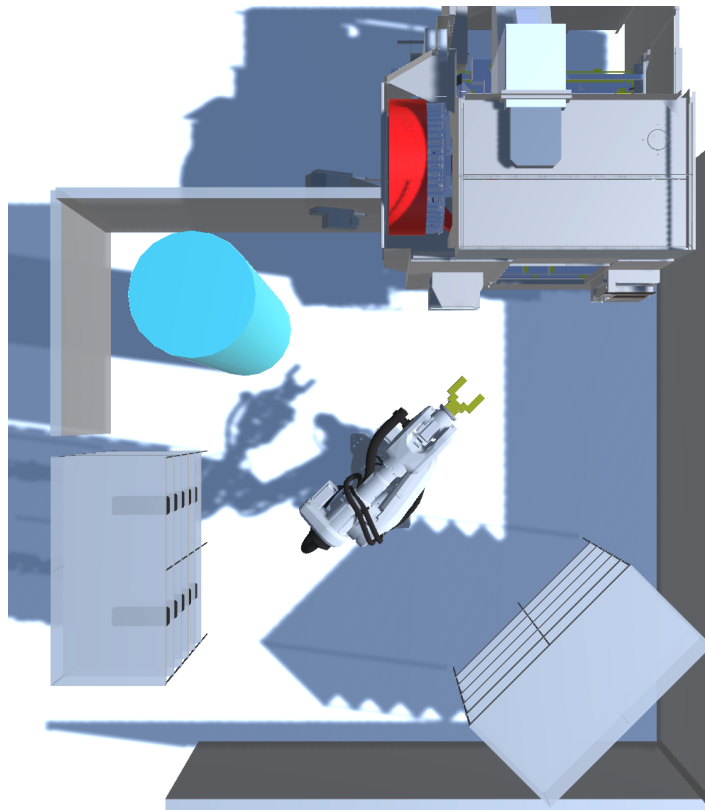


Abbildung 7: Arbeitsraum-Layout des Roboters in der Draufsicht mit Roboter in Home-Position

Das hierfür erstellte Layout sieht den Roboter in Zentrum des Arbeitsraumes auf dem Boden stehend vor. Hindernisse, Begrenzungen und Stationen sind kreisförmig um den Roboter angeordnet. In Abbildung 7 blau markiert, befindet sich eine Säule als künstliches Hindernis. Links und rechts unten vom Mittelpunkt der Zelle aus befinden sich zwei Regale als Teilelager. Oben befindet sich eine 5-Achs-Fräsmaschine mit einer offenen Teileablage durch Entfernung der Schutztür zu Vereinfachungszwecken dieses Szenarios. Der Arbeitsraum ist begrenzt durch halbdurchsichtige Wände. Der Prozessablauf sieht vor, dass der Roboter Zylinderköpfe aus dem linken Regal aufnimmt, diese in der Maschine ablegt, in einer Warteposition auf die Beendigung der Bearbeitung wartet und anschließend das bearbeitete Teil aufnimmt, um es im rechten Regal abzulegen. Ein beispielhafter Bearbeitungsprozess mit der 5-Achs-Fräsmaschine ist hier das Bohren und Schneiden von Gewinden in die Zylinderköpfe.

Der Aufbau und die Anordnung des Arbeitsraums ergibt sich aus den funktionalen Anforderungen, die das Framework abdecken soll. Durch den relativ begrenzten Raum müssen Bewegungspfade des Roboters an Hindernissen, beispielsweise der Säule, vorbei geplant werden und etwaige durch den Roboter gegriffene Werkstücke mitberechnet werden. Weiterführend verringern die Regale den Bewegungsraum für den Roboter zur Umorientierung vor sowie nach dem Aufnehmen und Ablegen der Teile, was zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Singularitäten führt. Die drei semantischen Stationen sorgen dafür, dass sich hier Fehler im Prozessablauf abbilden lassen. Die Achsgeschwindigkeiten lassen sich in diesem Szenario ebenfalls beliebig variieren. Somit lassen

sich alle funktionalen Anforderungen des Frameworks innerhalb dieses vereinfachten Szenarios abbilden.

Zylinderköpfe als Werkstücke

Als Werkstücke werden hier Zylinderköpfe für V6-Motoren gewählt. Das Werkstück bringt ein mit den Spezifikationen des ABB IRB 6700 übereinstimmendes Gewicht mit und ist an den Seitenflächen durch einen Parallelgreifer gut greifbar. Die Abmaße, des Zylinderkopfes sind Abbildung 8 zu entnehmen.

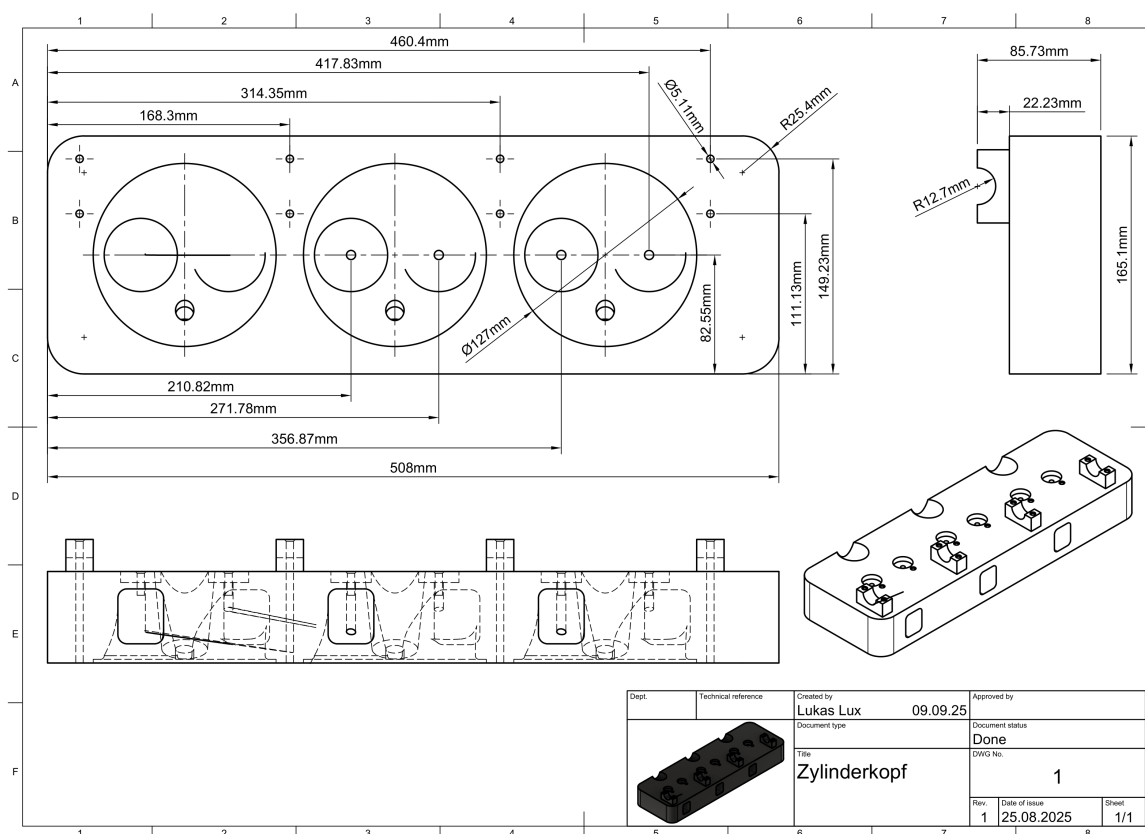


Abbildung 8: Technische Zeichnung des verwendeten Zylinderkopfes, dargestellt mithilfe von Autodesk Fusion 360

Greiferauslegung

Um das Werkstück sicher handhaben zu können, wird zusätzlich zum Roboter ein End-Effektor benötigt, welcher das Werkstück sicher durch den Arbeitsraum bewegen kann. Hierzu wird ein Parallelgreifer verwendet, welcher speziell zu Handhabung des Zylinderkopfes ausgelegt wurde. Da das Anforderungsprofil von End-Effektoren kaum normierbar und werkstückabhängig ist, ist die Auslegung eines spezifischen Greifers für die Handhabung individueller Werkstücke gängige Praxis.⁵⁷

⁵⁷Vgl. Hesse 2011, S. 91

Mithilfe eines Online-Konfigurationstools der Firma SCHUNK⁵⁸ ist es möglich, einen parametrisierten Greifer auszulegen und als 3D-CAD-Modelle in verschiedenen Formaten herunterzuladen. Hier wurde aufgrund der Werkstückdimensionen ein Parallelgreifer der Baureihe PGN-Plus-P gewählt und die Form der Greifbacken dem Werkstück entsprechend angepasst (siehe Abbildung 9).

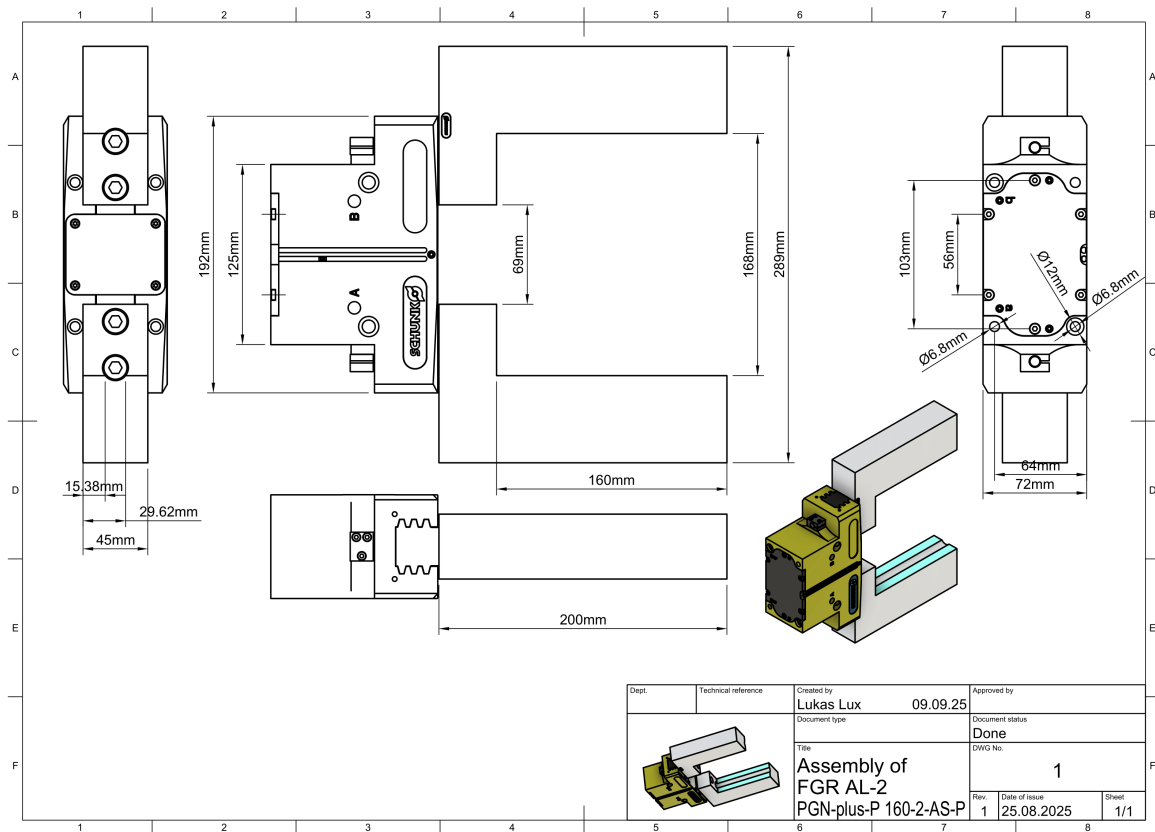


Abbildung 9: Technische Zeichnung des ausgelegten Parallelgreifers, dargestellt mithilfe von Autodesk Fusion 360

3.3.1 Flange als Visualisierungstool

Im Rahmen dieses Frameworks wird das Unity-Package *Flange* genutzt. Implementiert durch GitHub-User *Preliy* und frei verfügbar im Rahmen einer BSD 3-Clause Lizenz, bietet ein spezialisiertes Framework für die Robotersteuerung in Unity mit modularer Architektur, die Gelenksteuerung, Kinematik, Koordinatentransformationen und Echtzeitüberwachung als separate Komponenten organisiert. Das System unterstützt sowohl direkte Gelenkmanipulation auf niedriger Ebene als auch kartesische Steuerung auf höherer Abstraktionsebene, wodurch es für verschiedene Roboteranwendungen einsetzbar ist.⁵⁹ Im Kontext dieser Entwicklungsarbeit wird *Flange* zur Implementierung und Visualisierung der Denavit-Hartenberg-Parameter und damit einhergehender Achstransformationen eingesetzt. Die Notation nach Denavit-Hartenberg ermög-

⁵⁸Vgl. Schunk 2025

⁵⁹Vgl. Preliy 2024

licht als fundamentales Werkzeug der Robotik eine systematische Beschreibung der Geometrie serieller Robotermechanismen und somit die Anwendung etablierter algorithmischer Verfahren für kinematische Berechnungen, Berechnung von Jacobi-Matrizen sowie Bewegungsplanung.⁶⁰

Flange ermöglicht eine direkte Konfiguration des Roboters über *Frame* und *JointTransformation* Scripts. Ein *Frame* definiert dabei die Denavit-Hartenberg-Parameter für einen Teil der kinematischen Kette, eine *JointTransformation* die Parameter des Gelenks, also möglicher maximaler Ausschlag in positive und negative Achsrotationsrichtung sowie maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung. Diese Funktionen werden im Rahmen dieser Implementierung genutzt, um den zu simulierenden Roboter theoretisch nachvollziehbar im Raum bewegen zu können.

3.3.2 Modellierung in Unity

Der Arbeitsraum wurde der vorangegangenen Darstellung entsprechend in Unity modelliert. Dabei wurden die von Unity standardmäßig gewählten Einstellungen verwendet, sowohl bei der Modellierung als auch im Kontext der Physik-Engine. Jegliche Hindernisse wurden dabei mit Collidern versehen und dem Tag *Obstacle* und respektive *Machine* für die Maschine, um diese bei der späteren Auswertung als Hindernisse kenntlich zu machen. Weiterführend wurden den einzelnen Stationen (linkes und rechtes Regal, Maschine) das Script *Station.cs* angehängt und dort im Sinne des bereits beschriebenen Arbeitsablaufs ein steigender Index zugewiesen. Analog dazu wird allen Zylinderkopf-Objekten das Script *Part.cs* zugewiesen, welche diese als Werkstücke identifiziert und mit dem durch Drag-and-Drop im Unity Inspector die Reihenfolge der einzelnen Stationen definiert wird, welche das Teil durchlaufen muss.

Alle Monitore wurden in einer einheitlichen Unity-Testumgebung ausgeführt. Die Simulationen basieren auf einem Abbild des Roboters, der kontinuierlich seine Gelenkwinkel und Zustände an die Monitore übermittelt. Die erkannten Ereignisse werden unmittelbar protokolliert und in eine JSON-Logdatei geschrieben. Auf diese Weise sind die Ergebnisse der verschiedenen Monitore konsistent dokumentiert und in Kapitel 4 direkt vergleichbar.

3.4 Datenaufzeichnung und Logging

Als zentrales Aufzeichnungsformat implementiert der *SafetyMonitor* eine JSON-Struktur für die durch die einzelnen Module erzeugten Ereignisse. Die Key-Value-Paare dieser Objekte sind durch die Klassen *RobotStateSnapshot* und *SafetyEvent* vordefiniert. Wird ein Ereignis ausgelöst, so wird ein neues *SafetyEvent* instanziiert (vgl. Abbildung 10).

⁶⁰Vgl. Corke 2007, S. 590

```

public SafetyEvent(string monitorName, SafetyEventType eventType, string description,
    ↪ RobotState currentState)
{
    this.monitorName = monitorName;
    this.eventType = eventType;
    this.description = description;
    this.timestamp = DateTime.Now;
    this.robotStateSnapshot = currentState != null ? new
    ↪ RobotStateSnapshot(currentState) : null;
}

```

Abbildung 10: SafetyEvent-Klasse mit Zuordnung zum Monitor und Kritikalität

Der RobotStateSnapshot kann initial leer sein, da durch Multithreading nicht in jedem Fall eine direkte Referenz zum aktuellen Roboterzustand vorliegt. Über die Methode SetEventData() der SafetyEvent-Klasse werden anschließend die spezifischen Daten ergänzt, beispielsweise die Kollisionsposition bei einer Kollisionserkennung.

Der SafetyMonitor ergänzt das Ereignis um den aktuellen RobotStateSnapshot, der zusätzliche Informationen wie aktuelle Achswinkel, Motordaten, Programmzeiger und Programmname enthält (vgl. Abbildung 11). Die Events werden zwischengespeichert und am Ende der Ausführung gesammelt als JSON-Datei in einem vordefinierten Ordner abgelegt.

```

public RobotStateSnapshot(RobotState state)
{
    if (state != null)
    {
        captureTime = DateTime.Now;
        // Program info
        isProgramRunning = state.isRunning;
        currentModule = state.currentModule ?? "";
        currentRoutine = state.currentRoutine ?? "";
        currentLine = state.currentLine;
        currentColumn = state.currentColumn;
        executionCycle = state.executionCycle ?? "";
        motorState = state.motorState ?? "";
        controllerState = state.controllerState ?? "";
        // Abrufen der aktuellen Achswinkel
        jointAngles = state.GetJointAngles();
        hasValidJointData = state.hasValidJointData;
        motionUpdateFrequencyHz = state.motionUpdateFrequencyHz;
        // IO Signale
        gripperOpen = state.GripperOpen;
        // Verbindungsinformationen
        robotType = state.robotType ?? "";
        robotIP = state.robotIP ?? "";
    }
}

```

Abbildung 11: RobotStateSnapshot-Klasse mit formalisieren Attributen

4 Validierungsergebnisse der Testszenarien

Die Architektur des Frameworks besteht somit aus den genannten Modulen, die in Kapitel 3 im Detail beschrieben werden. Ihre Funktionsweise wird in Abschnitt 4 anhand von Testszenarien überprüft und ausgewertet.

4.1 Überblick und Zielsetzung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der im vorherigen Kapitel beschriebenen Implementierung vorgestellt. Im Fokus steht die Überprüfung der vier entwickelten Safetymodule – Prozessfolgenüberwachung, Kollisionserkennung, Achsgeschwindigkeits- und Beschleunigungsüberwachung sowie Singularitätserkennung – innerhalb der aufgebauten Simulationsumgebung. Ziel ist es zu überprüfen, inwiefern im gewählten Testsetup eine Detektion von Fehlern in der Roboterbewegung und Interaktion, welche mit den vier untersuchten Parametern zusammenhängen, auftreten. Ziel ist es zu überprüfen, inwiefern im gewählten Testsetup eine Erkennung von Fehlern in der Roboterbewegung und Interaktion, welche mit den vier untersuchten Parametern zusammenhängen, auftreten.

Für jedes Modul wurden gezielte Testfälle definiert, die sowohl korrekte als auch fehlerhafte Szenarien abbilden, um die Funktionsweise und Zuverlässigkeit der Module zu überprüfen. Die Ergebnisse werden anhand von Beobachtungen aus der Simulation, gespeicherten Zustands- und Ereignisdaten sowie grafischen Darstellungen aufgezeigt. Die Testfälle wurden dabei als Pfade in RobotStudio definiert. Diese Pfade werden von RobotStudio in RAPID-Code umgewandelt und gespeichert. Durch die Synchronisation mit dem Controller und dem Setzen des aktuellen Programms als Standardprogramm lässt sich das Programm in RobotStudio simulieren. So wurde für jedes Szenario vorgegangen.

Zur zusätzlichen Validierung wurde ein Experteninterview durchgeführt, in dem die Testcases vorgestellt und die Funktionsweise des Frameworks diskutiert wurden. Die Aussagen des Experten werden an geeigneter Stelle in diesem Kapitel dargestellt und in Kapitel 5 kritisch eingeordnet.

4.2 Auswertung der Prozessflussüberwachung

Die Validierung der Prozessflussüberwachung erfolgt über die Ausführung eines korrekten Szenarios als auch eines fehlerhaften Szenarios. Der Fehler soll provoziert werden, in dem das Werkstück abweichend zum in Abbildung 12 gezeigten gewünschten Ablauf direkt in das zweite Regal bewegt wird. Semantisch bedeutet dies ein Überspringen der Station *Machine*. Das soll ein SafetyEvent triggern, sobald das Werkstück im falschen Regal abgelegt wird.

4.2.1 Darstellung des korrekten Prozessflusses

1. Bewegung von Home-Position zu linkem Regal
2. Greifen des Werkstücks
3. Bewegung zu Maschine
4. Platzieren des Werkstücks in Maschine
5. Warten auf Beendigung des Bearbeitungsprozesses in Warteposition (Bearbeitung hier nur simuliert)
6. Bewegen zum Werkstück und Greifen aus Maschine
7. Bewegung zu rechtem Regal
8. Platzieren des Objekts in rechtem Regal
9. Rückkehr zur Home-Position

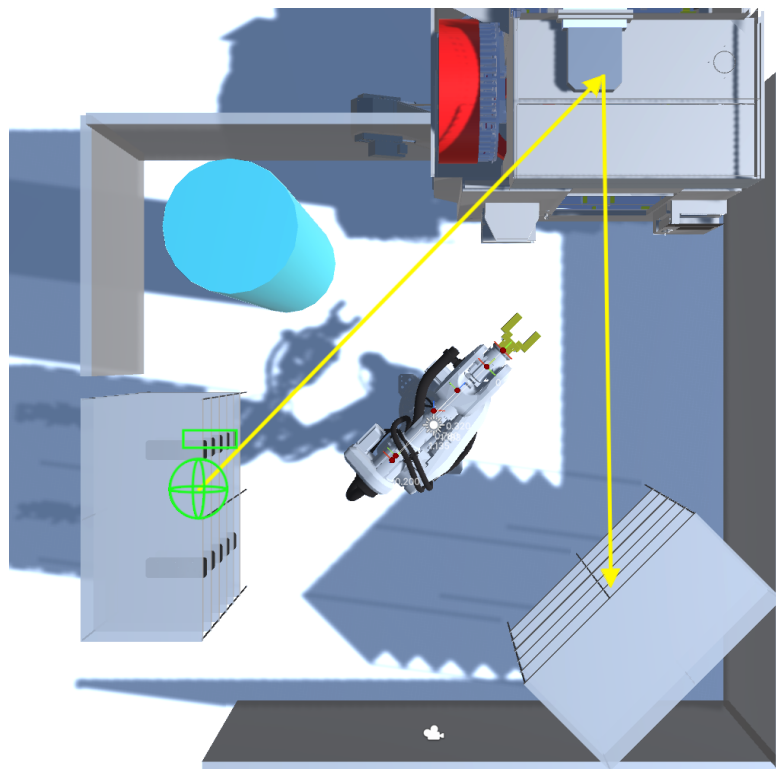


Abbildung 12: Visuelle Darstellung des Prozessflusses durch Konfiguration der Parts und Stations

4.2.2 Darstellung des abgewandelten Prozessflusses

Im veränderten Prozessfluss wird nun der Schritt der Bearbeitung übersprungen. Dies kann in der Praxis durch eine inkorrekte Abfolge im Roboterprogrammcode passieren. Somit ist der veränderte Prozessfluss wie folgt definiert.

1. Bewegung von Home-Position zu linkem Regal
2. Greifen des Werkstücks
3. Bewegung zu Maschine
4. Bewegung zu rechtem Regal
5. Platzieren des Objekts in rechtem Regal
6. Rückkehr zur Home-Position

4.2.3 Simulationsergebnis

Wird der korrekte Prozessfluss durchlaufen, werden in Bezug auf den ProcessFlowMonitor keine Ereignisse protokolliert. Bei der Ausführung des RoboterCodes mit verändertem Prozessfluss findet sich in der nach Beendigung des Programms ein JSON-Log, benannt nach Zeitstempel und Name des Moduls, welcher einen durch das aufgetretene SafetyEvent des Process Flow Monitors erstellten Eintrag enthält (vgl. Abbildung 13.)

```
{
  "programName": "Module1",
  "totalSafetyEvents": 1,
  "safetyEvents": [
    {
      "monitorName": "Process Flow Monitor",
      "eventType": 1,
      "description": "Process flow violation: Part 'CylinderHead1' attempted invalid
↪ transition from StorageIn to StorageOut. Expected: Machine. Violation type:
↪ SkippedStation",
      "robotStateSnapshot": {
        "isProgramRunning": true,
        "currentModule": "Module1",
        "currentRoutine": "PlaceinStorageOut",
        "currentLine": 99,
        "currentColumn": 9,
        "executionCycle": "once",
        "motorState": "running",
        "controllerState": "motoron",
        "jointAngles": [
          "...",
        ],
        "hasValidJointData": true,
        "motionUpdateFrequencyHz": 18.038461607840238,
        "gripperOpen": true,
        "robotType": "ABB",
        "robotIP": "127.0.0.1"
      }
    }
  ]
}
```

Abbildung 13: JSON-Log zum Prozessfolgenfehler, Achswinkel wurden im Nachhinein entfernt.

In Abbildung 13 ist abzulesen, dass der Fehler hier korrekt erkannt und klassifiziert wurde. Dabei zeigt das Feld `description` den genauen Hergang des Events an. Hier wurde eine invalide Transition von `StorageIn` zu `StorageOut` versucht. Das Framework erkennt ebenfalls, welcher Prozessschritt der Richtige gewesen wäre. Außerdem wird hier als `Violation Type` der Type `SkippedStation` angegeben. Dieser ist als übersprungene Station zu klassifizieren, was in diesem Fall korrekt ist. Zusätzlich werden weitere Parameter der Simulation und des Controllers weitergegeben, unter anderem welches Modul und welche Routine des Moduls zum Zeitpunkt des Auftretens ausgeführt wurde sowie welcher Programmzeile der `ProgramPointer` sich zum Zeitpunkt der Event-Auslösung befand. Durch den Wert des Keys `totalSafetyEvents` ist zu erkennen, wie viele Ereignisse bei der Ausführung vom Programm getriggert wurden. Hier ist es lediglich der oben Genannte.

4.3 Auswertung der Kollisionserkennung

4.3.1 Darstellung des Kollisionspfades

Zur Auswertung der Kollisionserkennung wurde der in Abschnitt 4.2.1 bereits genannte Prozess genutzt. Anschließend wurde der Pfad, auf dem sich der Roboter zwischen seiner Home-Position und dem linken Regal, in dem er ein Werkstück greifen soll, verändert. Rechts dargestellt in Abbildung 14, führt der Pfad im Gegensatz zum kollisionsfreien, näher am Roboter verlaufenden Pfad aufgrund des ausladenden Umschwungs durch die Säulengeometrie. Durch das Abfahren des Pfades gegen den Uhrzeigersinn wird provoziert, dass der Roboter sich durch die in Abbildung 14 links blau eingefärbte Säule hindurch bewegen muss. Die Säule ist der Tag `Obstacle` zugewiesen – sie wird durch einen vorhandenen Collider, welcher den Dimensionen der Säule entspricht, zum Kollisionshindernis.

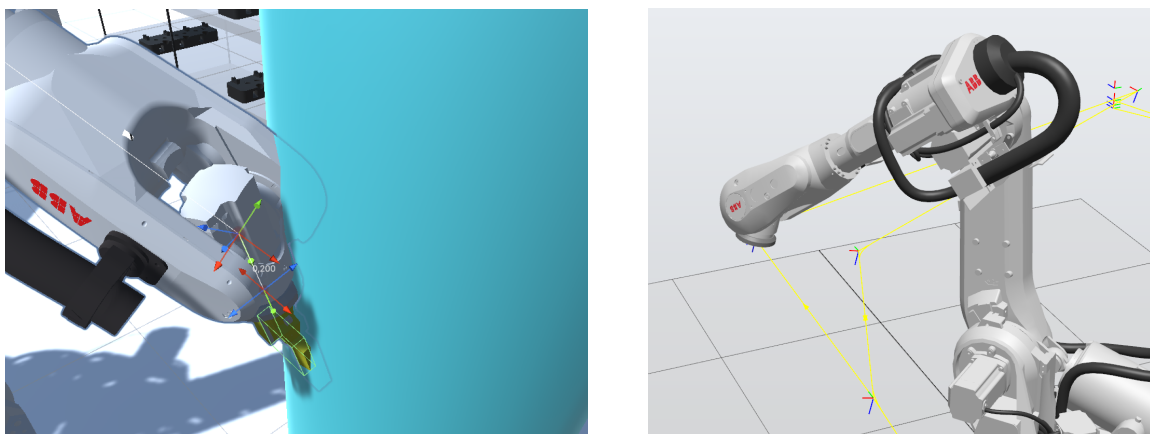


Abbildung 14: Kollision in Unity3D (links) und zugehörige Position auf Pfad in RobotStudio (rechts). Gelenk 4, 5 und 6 sowie Greifer befinden sich innerhalb der Säulengeometrie.

4.3.2 Simulationsergebnis

In Abbildung 15 ist der Output nach Kollision mit der Säule dargestellt. Dem Event wurden zusätzlich Eventdaten angefügt, welche hier den Punkt der Kollision im Unity Koordinatensystem als auch die Entfernung zum Zentrum des kollidierenden Objekts darstellen. Die Kollision wird somit zuverlässig erkannt. Wichtig ist dabei zu erwähnen, dass die Kollisionserkennung stark von den verwendeten Collidern abhängt. Hier verwendet das Framework Mesh-Collider zur genauen Abbildung der Robotergeometrie, das Kollisionobjekt wird durch einen primitiven zylindrischen Collider definiert. Beim Outputformat der eventDataJson handelt es sich um string-escaped JSON. Die Daten sind also als Event-Daten in einem String komprimiert.

```
[
  {
    "monitorName": "Collision Detector",
    "eventType": 2,
    "description": "CRITICAL COLLISION: Gripper -> Saele",
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "{\"robotLink\":\"Gripper\",\"collisionObject\":\"Saele\",\"collisionPoint\":{\"x\":-1.146544337272644,\"y\":0.038220398128032687,\"z\":1.1465449333190919},\"distance\":1.6219075918197632}"
  },
  {
    "monitorName": "Collision Detector",
    "eventType": 2,
    "description": "CRITICAL COLLISION: Joint_4 -> Saele",
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "{\"robotLink\":\"Joint_4\",\"collisionObject\":\"Saele\",\"collisionPoint\":{\"x\":-1.146544337272644,\"y\":0.038220398128032687,\"z\":1.1465449333190919},\"distance\":1.6219075918197632}"
  },
  {
    "monitorName": "Collision Detector",
    "eventType": 2,
    "description": "CRITICAL COLLISION: Joint_6 -> Saele",
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "{\"robotLink\":\"Joint_6\",\"collisionObject\":\"Saele\",\"collisionPoint\":{\"x\":-1.146544337272644,\"y\":0.038220398128032687,\"z\":1.1465449333190919},\"distance\":1.6219075918197632}"
  },
  {
    "monitorName": "Collision Detector",
    "eventType": 2,
    "description": "CRITICAL COLLISION: Joint_5 -> Saele",
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "{\"robotLink\":\"Joint_5\",\"collisionObject\":\"Saele\",\"collisionPoint\":{\"x\":-1.146544337272644,\"y\":0.038220398128032687,\"z\":1.1465449333190919},\"distance\":1.6219075918197632}"
  },
  {
    "monitorName": "Collision Detector",
    "description": "Collision detected between Gripper and CylinderHead (8)",
    "eventType": 1,
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "{\"robotLink\":\"Gripper\",\"collisionObject\":\"CylinderHead (8)\",\"collisionPoint\":{\"x\":-1.9333001375198365,\"y\":0.5249927043914795,\"z\":-1.1674463748931885},\"distance\":2.3186628818511965}"
  }
]
```

Abbildung 15: JSON-Log zur Kollisionserkennung. Sich wiederholende Key-Value Paare wurden verkürzt

Weiterführend ist zu erkennen, dass die Kollision mit verschiedenen Gliedern des Roboters sequentiell erkannt wird. Sobald der Roboter sich visuell weiter in die Säule bewegt, wird jeweils bei der Kollision mit einem weiteren Glied eine weitere Kollision erkannt und ein eigenes Event getriggert. Die Reihenfolge der Joints in diesem Szenario ist nach eingehender Überprüfung als korrekt zu bewerten, da die Robotergeometrie dafür sorgt, dass Gelenk 4 deutlich breiter

ist als 5 und 6. Gelenk 5 und 6 sind in die Geometrie von Gelenk 4 eingefasst, daher kollidiert der Roboter initial mit Gelenk 4, bevor eine Kollision an den kinematisch dahinterliegenden Gelenken erkannt wird.

Zusätzlich dazu lässt sich beim Greifen des Werkstücks feststellen, dass hier ebenfalls eine Kollision erkannt wird: Durch das Greifen des Werkstücks wird eine falsch-positive Kollision getriggert, da bevor das Werkstück gegriffen wird und semantisch in die kinematische Kette des Roboters verschoben wird, für einen kurzen Zeitpunkt eine Kollision stattfindet. Ein Beispiel dazu findet sich im letzten Block von Abbildung 15. Gleiches lässt sich beim Ablegen des Werkstücks beobachten. Wichtig zu erwähnen ist der unterschiedlichen Eventtypen, da das Werkstück aufgrund von fehlendem Tag nicht als kritisch eingestuft wird.

4.4 Auswertung der Singularitätserkennung

4.4.1 Darstellung einer singulären Roboterpose

Zur Untersuchung der Singularitätserkennung wurde in RobotStudio ein Szenario erstellt, das gezielt eine Handgelenks-Singularität provoziert. Dabei wurde der Roboter in eine Pose geführt, in der die Achsen 4 und 6 nahezu kollinear verlaufen und somit die Bedingung $\theta_5 \approx 0^\circ$ erfüllt ist. Die Pose ist in Abbildung 16 zu erkennen, hier befindet sich der Roboter nach dem Greifen des Werkstücks auf dem Weg zum rechten Regal, muss sich für das Platzieren des Werkstücks im Regal jedoch umorientieren. So kommt die Singularität zustande.

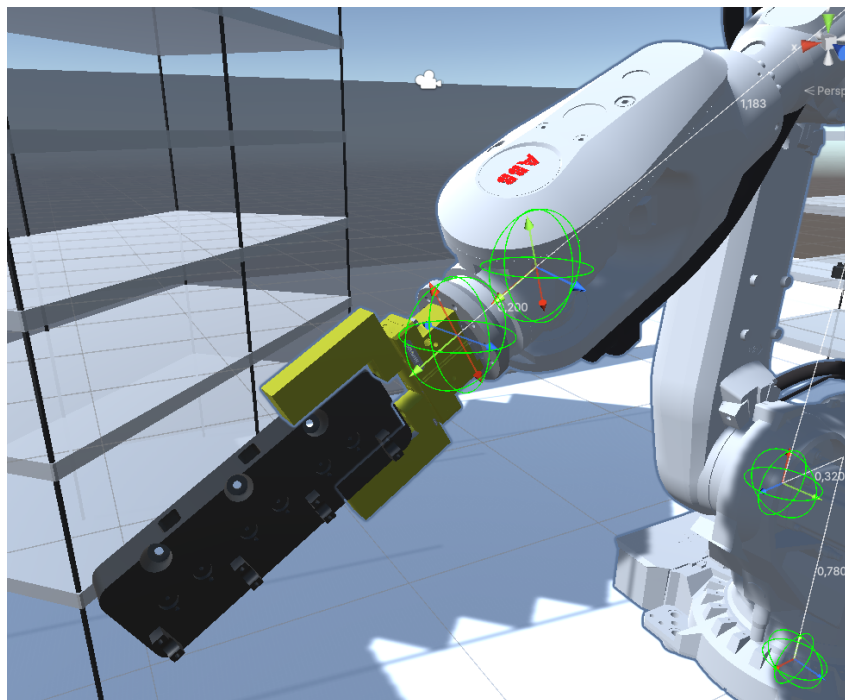


Abbildung 16: Pose in Unity, bei der eine Handgelenks-Singularität mit ($\theta_5 \approx 0^\circ$) entsteht

4.4.2 Simulationsergebnis

Die vom Monitor in Unity aufgezeichneten Safety Events sind in Abbildung 17 als gekürzter Auszug dargestellt. Es werden sowohl das „Entering“- als auch das „Exiting“-Ereignis erfasst, jeweils mit den zugehörigen Gelenkwinkeln und einem berechneten Manipulierbarkeitswert. Nicht relevante Felder des Snapshots wurden entfernt, da die Gelenkwinkel bereits im eventDataJson enthalten sind.

```
[
  {
    "monitorName": "Singularity Detector",
    "eventType": 2,
    "description": "Entering Wrist Singularity (\u03B85 \u2248 0\u00B0)",
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": {
      "singularityType": "Wrist Singularity (theta_5 approx 0 deg)",
      "jointAngles": [
        -82.7,
        -6.9,
        36.6,
        -112.8,
        -4.9,
        -153.5
      ],
      "wristThreshold": 5.0,
      "manipulability": 0.191,
      "isEntering": true,
      "[...]": "[...]"
    }
  },
  {
    "monitorName": "Singularity Detector",
    "eventType": 1,
    "description": "Exiting Wrist Singularity (\u03B85 \u2248 0\u00B0)",
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "[...]"
  }
]
```

Abbildung 17: Gekürzter Auszug der in Unity aufgezeichneten Safety Events zur Wrist-Singularität. Zusätzliche Informationen wurden mit „[...]“ abgekürzt.

Die Analyse der Ereignisse zeigt, dass der Monitor den Eintritt in die Wrist-Singularität bei einer Gelenkkonfiguration von etwa $[-82.7, -6.9, 36.6, -112.8, -4.9, -153.5]^\circ$ registrierte. Der berechnete Manipulierbarkeitswert lag hier bei $w \approx 0.19$. Beim Verlassen der Pose ($[-91.8, -8.3, 37.8, -91.3, 5.2, -182.6]^\circ$) wurde das „Exiting“-Ereignis ausgegeben, wobei der Manipulierbarkeitswert mit $w \approx 0.20$ ebenfalls sehr niedrig blieb. Die Ereignisse decken sich mit dem in RobotStudio provozierten Szenario und markieren den Übergang in und aus einer singulären Konfiguration. Zur Detektion von Singularitäten anderen Typs (hier Schulter- und Ellbogensingularitäten) wird das gleiche Verfahren angewendet. Hier decken sich die Ergebnisse mit den oben Beschriebenen.

4.5 Auswertung der Gelenkdynamiküberwachung

4.5.1 Erzeugung überhöhter Gelenkgeschwindigkeiten

Der Joint Dynamics Monitor erfasst kontinuierlich die Dynamik der sechs Roboterachsen. Die Implementierung in Unity3D basiert auf den vom digitalen Abbild gestreamten Gelenkwinkeln, welche aus denen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen differenziell berechnet werden. Zur Signalanalyse werden mehrere Mechanismen kombiniert, darunter exponentielle Glättung sowie Fenster-basiertes Mittel zur Dämpfung von Ausreißern. Zusätzlich wird ein Sicherheitsfaktor von 0,8 auf die in RobotStudio spezifizierten Maximalwerte angewendet, sodass die Schwellwerte im Monitor niedriger liegen als die realen physikalischen Limits (vgl. Implementierung in `JointDynamicsMonitor.cs`). Hier wird mittels des Befehl `v7000` im RAPID-Code in RobotStudio die Geschwindigkeit auf den programmierbaren Maximalwert gesetzt. Dies wurde an zwei Stellen der Roboterbewegung umgesetzt: Bei der Bewegung von der Home-Position zum linken Regal und bei der Bewegung nach dem Greifen des Werkstücks zur Maschine. Als primäre Drehachse ist hier eine Überhöhung der Geschwindigkeit von Gelenk 1 (zentrale horizontale Drehachse des Roboters) zu erwarten.

4.5.2 Simulationsergebnis

Während der Testsimulation wurden durch den Monitor zwei Überschreitungen der Geschwindigkeitsgrenzen auf **Joint 1** registriert. Diese Ereignisse sind in der aus Unity aufgezeichneten Logdatei dokumentiert. Ein Auszug ist in Abbildung 18 dargestellt. Dort wird jeweils die Überschreitung der Geschwindigkeit und das nachfolgende „resolved“-Ereignis vermerkt, zusammen mit dem aktuellen Gelenkwinkelzustand des Roboters.

```
[
  {
    "monitorName": "Joint Dynamics Monitor",
    "eventType": 1,
    "description": "Joint 1 velocity limit exceeded: 53.95°/s",
    "robotStateSnapshot": {
      "jointAngles": [
        -2.12,
        -4.52,
        31.67,
        196.26,
        -57.86,
        -74.34
      ],
      "[...]": "[...]"
    }
  },
  {
    "monitorName": "Joint Dynamics Monitor",
    "eventType": 1,
    "description": "Joint 1 velocity limit resolved: 48.63°/s",
    "robotStateSnapshot": {
      "jointAngles": "[...]",
      "[...]": "[...]"
    }
  }
]
```

Abbildung 18: Gekürzter Auszug der in Unity aufgezeichneten Safety Events des Joint Dynamics Monitor, Ereignis wiederholt sich

Zum Vergleich wurden die Gelenkwinkel aus RobotStudio exportiert und anhand der berechneten Achsgeschwindigkeiten ausgewertet. Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse: Im oberen Diagramm sind die Achswinkel aller sechs Gelenke dargestellt (J1 hervorgehoben in rot), darunter die berechneten Geschwindigkeiten mit markierten Schwellwertbereichen. Die rot eingefärbten Abschnitte kennzeichnen Intervalle, in denen die aus RobotStudio exportierten Daten die definierte Grenze von $\pm 50^\circ/\text{s}$ überschreiten. Die blau markierten Bereiche repräsentieren die durch den Monitor in Unity ausgegebenen Safety Events. Zu erkennen ist eine starke Überschneidung der Bereiche. Weiterführend zeichnet sich vor allem in der zweiten Geschwindigkeitsüberschreitung eine Verzögerung beim Ein- und Austritt in den kritischen Zustand ab. Die Events in Unity werden hier zeitverzögert weitergegeben.

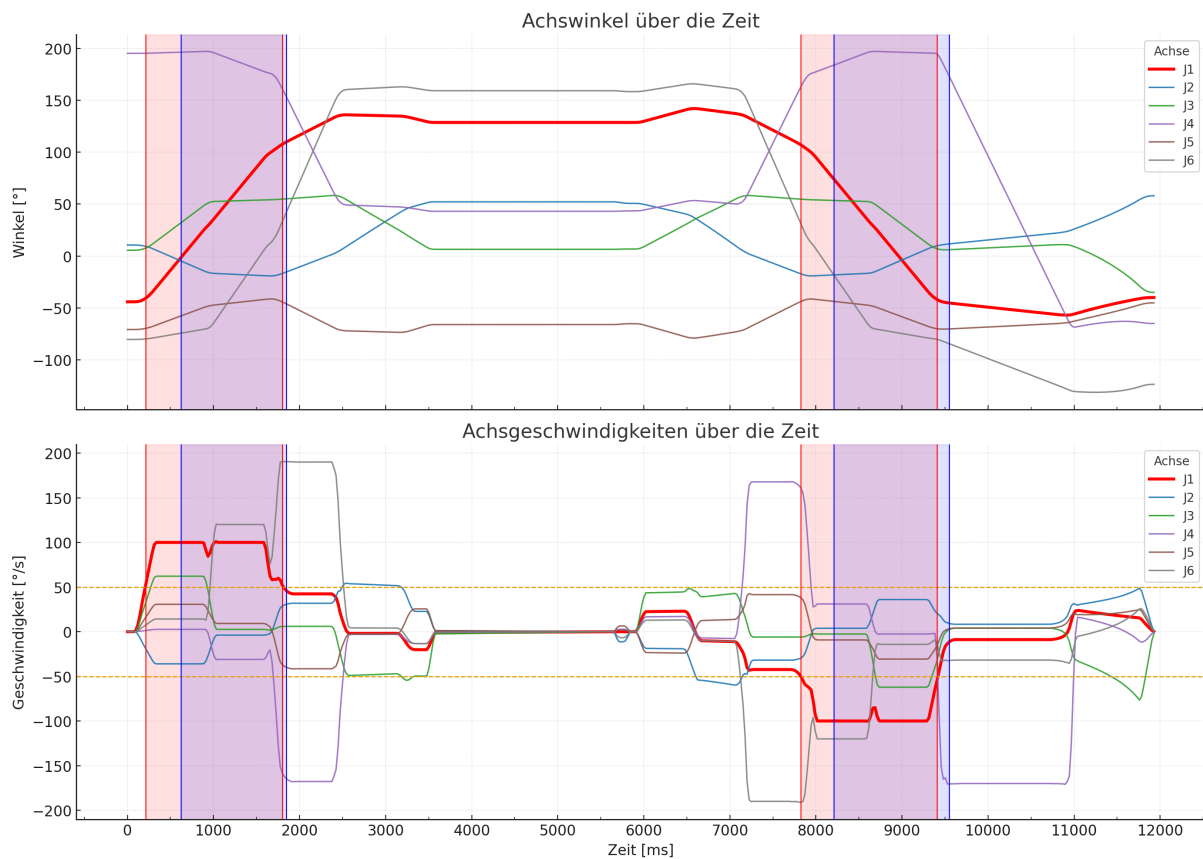


Abbildung 19: Achswinkel (oben) und Achsgeschwindigkeiten (unten) mit markierten Bereichen (rot: Schwellenübertritte in den Rohdaten, blau: Safety Events aus Unity).

Eine Gegenüberstellung der Zeitintervalle ist in Tabelle 4 enthalten. Dort werden die Start- und Endzeitpunkte der Abschnitte, die Dauer sowie die Gelenkwinkel und -geschwindigkeiten an diesen Punkten angegeben. Anhand dieser Darstellung wird sichtbar, dass die blau markierten Safety Events zeitlich nach den rot markierten Schwellenübertritten liegen. Die in Tabelle 4 und Abbildung 19 dargestellten Intervalle wurden ermittelt, indem die aus RobotStudio exportierten Gelenkwinkel mit den in den Safety Events gespeicherten Zuständen vergleichbar sind. Dazu wurde der euklidische Abstand zwischen den Vektoren der Achswinkel berechnet, um den jeweils nächstliegenden Zeitpunkt in den Referenzdaten zu bestimmen. Auf diese Weise lassen sich die vom Monitor in Unity3D gemeldeten Ereignisse mit den in den Rohdaten beobachteten Schwellenübertritten korrelieren.

Typ	Start [ms]	Ende [ms]	Dauer [ms]	Start J1 [°]	Ende J1 [°]
Dynamik (rot)	216	1800	1584	-40.35	107.62
Zielwinkel (blau)	624	1848	1224	-1.25	109.89
Dynamik (rot)	7824	9408	1584	107.08	-41.88
Zielwinkel (blau)	8208	9552	1344	74.15	-45.24

Tabelle 4: Zeitintervalle und Zustände der Joint-Dynamics-Auswertung

4.6 Validierung der Ergebnisse durch Experteninterview

Im Rahmen der Ergebnisdarstellung wurde ein Experteninterview mit Daniel Syniawa (M.Sc.) durchgeführt. Ziel war es, die Funktionsfähigkeit des Frameworks praxisnah zu validieren und Einschätzungen zur industriellen Einordnung zu gewinnen. Das Interview diente ausschließlich der deskriptiven Ergänzung der Ergebnisse; eine vertiefte Interpretation erfolgt in Kapitel 5.

4.6.1 Vorgehen und Gegenstand

Im Interview wurden die Software und ihre Architektur vorgestellt. Anschließend wurden die in Abschnitt 4 beschriebenen Testfälle gemeinsam in RobotStudio nachvollzogen: Der Roboter führte die Szenarien aus, während parallel beobachtet wurde, ob und wie die Module Ereignisse auslösen und ob diese im Logging erfasst werden. Damit wurde die grundsätzliche Funktionsweise des Frameworks demonstriert (Auslösen von Safety Events, Erzeugung von JSON-Logs mit Programmkontext).

4.6.2 Beobachtungen

Prinzipiell konnte ein schnelles Verständnis für die Anwendung des Frameworks und dessen Funktionsweise gewonnen werden. Bei der Testung der Fälle wurde der praktische Nutzen der abgespeicherten JSON-Logs hervorgehoben: Für jedes Ereignis liegen der aktuelle Programmzeiger, das aktuell ausgeführte Programm sowie die relevante Roboterpose bzw. Kontextinformationen vor. Dies erleichtert die Fehlersuche und macht die Analyse auch für weniger erfahrene Anwender nachvollziehbar.

4.6.3 Hinweis zur Evaluationsmethodik

Für eine belastbare Evaluation schlug Syniawa vor, die Leistung des Frameworks quantitativ gegen manuelle Verfahren zu vergleichen. Konkret: Wie schnell findet eine Person den Fehler (z. B. Auftreten einer Singularität) im RAPID-Code in RobotStudio im Vergleich zur Erkennung durch Ausführung und Logging im Framework? Ein solcher Vergleich wäre mit erheblichem Aufwand verbunden, würde aber die Einordnung der Wirksamkeit deutlich schärfen.

4.6.4 Einordnung des Robotersimulations-Ökosystems

Syniawa wies darauf hin, dass die aktuelle Werkzeuglandschaft stark proprietär geprägt ist und es nur wenige plattformübergreifende Lösungen mit integrierter Physik gibt. Häufig ist bereits die stabile Anbindung eines Roboters herausfordernd; Simulation in RobotStudio erfordert viel Expertenwissen und Zeit. Die Integration in RWS sei komplex und eher knapp dokumentiert – insgesamt sei die Nutzerbasis in diesem Bereich klein. Diese Beobachtungen unterstreichen die Relevanz eines modularen, erweiterbaren Ansatzes wie in dieser Arbeit umgesetzt.

4.6.5 Zusammenfassung

Das Interview bestätigte die grundsätzliche Funktionalität des Frameworks in den demonstrierten Testfällen und identifizierte einen klaren Pfad für eine zukünftige, quantitative Evaluation. Zudem wurde der praktische Mehrwert der strukturierten Logs (Programmzeiger, laufendes Programm, Pose/Kontext) betont. Die Einordnung der industriellen Robotersimulationslandschaft liefert den Rahmen, in dem die vorgestellten Ergebnisse zu sehen sind.

4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die in Unity implementierten Monitore in allen Testfällen die in RobotStudio provozierten Szenarien widerspiegeln konnten. Dabei wurde deutlich, dass sich für jedes Modul charakteristische Muster im Logging abzeichnen: Prozessabweichungen wurden sequenziell dokumentiert, Kollisionen mit Schweregraden versehen, Singularitäten mit Gelenkwinkeln und Manipulierbarkeitswerten erfasst, und Geschwindigkeitsverletzungen durch Event-Paare (exceeded/resolved) gekennzeichnet.

Monitor	Getestetes Szenario	Erkannte Ereignisse / Beobachtungen
Process Flow	Ablauf mit bewusst fehlerhafter Reihenfolge der Operationen	Abweichung von der erwarteten Sequenz korrekt erkannt, Events dokumentieren Verletzung der Prozessfolge.
Collision Detection	Simulation mit Kollision zwischen Greifer und Werkstück bzw. Störkörper	Mehrere Kollisionen aufgezeichnet, inklusive beteiligter Objekte; Events mit Schweregrad (critical/warning) unterschieden.
Singularity Detection	Pose in RobotStudio, die eine Wrist-Singularität ($\theta_5 \approx 0^\circ$) provoziert	Entering- und Exiting-Events erfasst; Gelenkwinkel und Manipulierbarkeitswerte im JSON protokolliert; Szenario deckt sich mit RobotStudio.
Joint Dynamics	Bewegung mit Überschreitung der Geschwindigkeitsgrenzen auf J1 ($\pm 50^\circ/\text{s}$)	Zwei Event-Paare (exceeded/resolved) aufgezeichnet; Verzögerung zwischen Schwellenübertritt (Rohdaten) und Event (Monitor) sichtbar.

Tabelle 5: Übersicht der getesteten Monitore, Szenarien und erkannten Ereignisse im Ergebnisteil

Die Übersicht in Tabelle 5 verdeutlicht die Unterschiede zwischen den Monitoren hinsichtlich Art der Szenarien und Form der erfassten Events. Auffällig ist, dass sich in einigen Fällen eine zeitliche Verzögerung zwischen den in den Rohdaten beobachteten Zuständen und den vom Monitor generierten Ereignissen zeigt. Diese Beobachtung ergibt sich aus den in Abschnitt 3 beschriebenen Mechanismen (z. B. Glättung, Abtastrate).

5 Diskussion

Im Folgenden werden die in Kapitel 4 präsentierten Ergebnisse kritisch reflektiert und in den fachlichen Kontext eingeordnet. Im Zentrum stehen die Gesamtarchitektur des Frameworks und die vier implementierten Safetymodule. Ergänzend wird ein Experteninterview mit Daniel Syniawa herangezogen, in dem die Software, die Architektur sowie konkrete Testfälle in RobotStudio gemeinsam betrachtet wurden. Ziel ist es, die Stärken und Grenzen der Arbeit transparent zu machen und konkrete Ansatzpunkte für zukünftige Arbeiten zu identifizieren.

5.1 Diskussion des Frameworks

Die Architektur hat sich als tragfähige Grundlage erwiesen: Durch den adapterbasierten Zugriff auf die Roboterschnittstelle (z. B. ABB Robot Web Services) und eine konsequent eventgetriebene Struktur konnten Safetymodule unabhängig voneinander entwickelt und über ein gemeinsames Interface in das RobotSystem integriert werden. Das Event-System (Observer-Pattern) entkoppelt Erkennung und Verarbeitung; die JSON-basierte Persistenz vereinfacht Nachvollziehbarkeit und Weiterverarbeitung. Positiv wirkte sich zudem die Nutzung der Denavit–Hartenberg-Parameter aus, die eine konsistente kinematische Modellierung verschiedener Robotermodelle erlaubt.

Gleichzeitig bleibt offen, inwiefern einzelne Simulationsparameter oder Modellierungsentscheidungen in Unity bei hochkomplexen Geometrien eine Limitation darstellen könnten. Die Unity-Engine bietet hier zwar eine Grundlage physischer Modellierung, abschließende Aussagen zur Genauigkeit in sehr dynamischen oder kleinschrittigen Prozessen können aber nicht getroffen werden. Diese Aspekte wurden nicht systematisch untersucht und markieren Raum für künftige Studien.

Das Experteninterview mit Daniel Syniawa ordnet die Arbeit in die Praxis ein: Er bestätigte, dass es insgesamt nur wenige plattformübergreifende Werkzeuge mit integrierter Physik gibt und dass die Tool-Landschaft stark proprietär geprägt ist. Nach seiner Erfahrung ist bereits die stabile Inbetriebnahme und Anbindung von Robotern für viele Firmen aufwendig; physikalische Simulation mit einer Modellierung des Arbeitsraumes in RobotStudio sowie die Auswertung der hier untersuchten Parameter ist nur in begrenztem Umfang möglich und benötigt beträchtliches Expertenwissen und Zeit. Syniawa wies außerdem darauf hin, dass Services proprietär Hersteller wie die RobotStudio-API (Robot Web Services) nicht trivial in der Anwendung sind, oft schlecht dokumentiert und auf eine insgesamt kleine Nutzerbasis trifft. Auch das lässt sich im Rahmen der Entwicklung dieses Frameworks bestätigen.

Als hilfreich lässt sich ausserdem der Output des JSON-basierten Loggings werten: Syniawa spricht hier vor allem von den mit einem SafetyEvent zusammen herausgegebenen Metadaten zum aktuellen Stand des Programmzeigers und der aktuellen ausgeführten Routine. Dies stellt einen

vielversprechenden Ansatz zum Debugging im Roboterprogrammcode dar, welcher manuell mit deutlich mehr Aufwand verbunden wäre. Hier gilt es weiter zu evaluieren, inwiefern sich dies quantitativ beschreiben lässt, so Syniawa.

5.1.1 Prozessfolgenüberwachung

Das Modul erkennt Abweichungen in der vorgesehenen Reihenfolge zuverlässig, sofern Stationen korrekt modelliert und ausgelöst werden. Nicht abgedeckt sind Konstellationen, in denen ein Werkstück zwischen zwei Stationen unbeabsichtigt abgelegt oder verloren wird, ohne dass eine Station detektiert wird. Die Praxistauglichkeit hängt damit von der Qualität der Prozessmodellierung und der Art des Prozesses ab. Im aktuellen Fokus stand hier ein sequentieller Prozess, die Literatur beschreibt hier im Kontext industrieller Fertigung jedoch mehrere Prozessarten und theoretische Modellierungsansätze.⁶¹ Im Interview wurde die grundsätzliche Relevanz dieses Moduls bestätigt – zugleich wird deutlich, dass die industrielle Praxis oft komplexere Ablaufmodelle erfordert.

5.1.2 Kollisionserkennung

In der Simulation wurden die vorgesehenen Kollisionsfälle erkannt. Zugleich traten Fehlalarme auf, insbesondere beim Greifen und Loslassen von Werkstücken. Wie stark Modellierungsdetails oder Simulationsparameter das Verhalten in Grenzfällen beeinflussen, wurde in dieser Arbeit nicht systematisch untersucht und ist als potenzielle Limitation zu betrachten. Weiterführend ist die Genauigkeit der Modellierung der Meshes des Roboters und der Umgebung hier essenziell: Unity modelliert konvexe Meshes, welche die räumlichen Grenzen darstellen mit maximal 255 Kanten. Daher kann es passieren, dass die tatsächliche Topologie des Robotermodells vom Kollisionskörper abweicht. Insgesamt liefert das Modul einen belastbaren Proof-of-Concept, dessen Generalisierung im Rahmen weiterführender Evaluierungen zu prüfen ist.

5.1.3 Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen

Grenzwertverletzungen wurden zuverlässig detektiert. In den Ergebnissen zeigte sich allerdings ein zeitlicher Versatz zwischen den in RobotStudio vorliegenden Referenzdaten und der Detektion in Unity3D. Dies ist plausibel auf Aktualisierungsrate und eingesetzten Glättungsalgorithmus zurückzuführen, dessen Parameter konfigurierbar sind. Ob dadurch ein Versatz mit den in der Praxis vom Roboter gefahrenen Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen entsteht, lässt sich hier nicht abschließend bewerten.

⁶¹ Vgl. Cassandras und Lafortune 2021, S. 39 f.

5.1.4 Singularitätserkennung

Die gewählte, winkelbasierte Heuristik funktionierte für den betrachteten Roboter, ist jedoch nicht universell. Alternativ bieten sich Kennzahlen an, die näher an der Kinematik operieren, etwa das Manipulierbarkeits-Maß nach Yoshikawa oder der kleinste Singulärwert der Jacobi-Matrix als Abstandsmaß zur Singularität. Eine generische, Jacobi-basierte Methode zur Erkennung von Freiheitsgradverlusten wurde implementiert, im Rahmen der vorliegenden Tests jedoch nicht eingesetzt; eine Erweiterung auf andere Roboter wäre möglich, wurde aber nicht vorgenommen.

Im Interview formulierte Syniawa einen pragmatischen Maßstab für die Evaluation: Für eine belastbare Beurteilung wäre ein direkter Vergleich mit manuellem Debugging in RobotStudio sinnvoll, also ein Messaufbau, der die Zeit bis zur Fehlerlokalisierung im RAPID-Code der Zeit gegenüberstellt, die das Framework über Ausführung und Logging benötigt. Zugleich hob er hervor, dass die automatische Bereitstellung von Programmzeiger, aktueller Pose und Kontext im Event-Log eine erhebliche Arbeitserleichterung darstellt und die Analyse prinzipiell auch weniger erfahrenen Anwendern ermöglicht.

5.2 LLM-gestützte Rückkopplung der Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass das Framework Fehlerzustände konsistent und kontextreich protokolliert: Für jedes Ereignis liegen Aktuelle Bewegungs- und Programmdate, beispielsweise das aktuelle Modul, Routine, Programmzeile sowie Motordaten und Achswinkel vor. Hinzu kommen event-spezifische Felder im `eventDataJson`, etwa Kollisionspunkt und Distanz oder Gelenkwinkel und Manipulierbarkeitswert bei Singularitäten. Diese maschinenlesbare Struktur eignet sich unmittelbar als gezielter Eingabekontext für generative Modelle: Der Fehler wird präzise beschrieben, der relevante Zustandsausschnitt ist enthalten, und die Semantik stammt aus den domänenspezifischen Monitoren. Das bietet eine gute Basis, um Code- oder Pfadänderungen vorzuschlagen und anschließend identisch zu verifizieren.

Operativ lässt sich darauf ein kurzer Iterationszyklus aufbauen: Aus einem fehlgeschlagenen Lauf durch Nutzer- oder LLM-generierten Roboterprogrammcode wird ein kompakter Fehlerkontext gebildet und an ein LLM übergeben: Das LLM liefert einen minimalen Änderungsvorschlag am Robotercode bzw. an der Pfaddefinition und durch die Re-Simulation kann eine erneute Prüfung des Codes stattfinden. Die Akzeptanzkriterien für eine erfolgreiche Behebung des Fehlers, beispielsweise dem minimalen Achswinkel zur Vermeidung einer Singularität, liegen bereits im Rahmen der Eventdaten und Monitorlogik im System vor, wodurch die Bewertung reproduzierbar bleibt. Damit kann das Framework als Schnittstelle zwischen realitätsnaher Ausführung und LLM-gestützter Verbesserung dienen. Praktisch sind drei Punkte entscheidend und aus den Ergebnissen ableitbar: erstens ein schlanker, stabiler Prompt-Ausschnitt aus genau den Feldern, die im Logging ohnehin verfügbar sind (z. B. Programmpointer, Gelenkwinkel, Kollisionspunkt), zweitens feste Akzeptanzregeln in der Simulation, drittens Versionierung und

Wiederholbarkeit der Läufe. Auf Basis dieser Ergebnisse ließe sich in zukünftiger Forschung untersuchen, in welchem Umfang sich die Fehlerquote in generiertem Roboterprogrammcode tatsächlich reduziert und daraus resultierend auch die erforderliche Nachbearbeitungszeit des Programmcodes verringert wird.

5.3 Reflexion des eigenen Vorgehens

Die Entwicklung folgte bewusst einem iterativen Vorgehen: von einem kleinen Testfall hin zu einer breiteren Abdeckung, mit Zwischenstufen des Refactorings. Dieses Vorgehen erwies sich als geeignet, um Architekturentscheidungen (Adapter/Observer) empirisch zu validieren. Rückblickend entstanden stellenweise Komponenten, die für den unmittelbaren Use-Case komplexer waren als nötig – gleichwohl war die iterativ-explorative Herangehensweise im Kontext einer Framework-Entwicklung zweckmäßig und hat zu einer für die durchzuführenden Analysen geeigneten Struktur geführt.

5.4 Grenzen und Generalisierbarkeit

Die vorliegende Arbeit wurde innerhalb einer vorkonfigurierten Simulationsumgebung evaluiert. Echtzeitverhalten, Sensitivität gegenüber Simulationsparametern sowie Übertragbarkeit auf weitere Roboter wurden nicht systematisch untersucht. Darüber hinaus beschränkt sich die Implementierung der Adapter auf die RWS API. Das Interview verdeutlicht, dass proprietäre Ökosysteme, komplexe Schnittstellen und eine kleine Nutzerbasis zusätzliche Hürden für Verallgemeinerung und Transfer darstellen. Diese Punkte markieren bewusste Grenzen des aktuellen Stands und leiten unmittelbar zu Folgestudien über.

6 Fazit und Ausblick

Das entwickelte Framework demonstriert die Machbarkeit eines modularen, eventgetriebenen Ansatzes für sicherheitsrelevante Überwachungsaufgaben in der Roboterprogrammierung. Die Module erfüllten ihre Kernfunktionen, zugleich wurden klare Erweiterungspfade sichtbar. Das Experteninterview mit Daniel Syniawa bestätigte Relevanz und Nutzen des Ansatzes und unterstrich die praktischen Hürden einer stark proprietären Werkzeuglandschaft. Insgesamt stellt die Arbeit einen belastbaren Proof-of-Concept dar, der durch quantitative Evaluationen und architektonische Erweiterungen in Richtung eines praxistauglichen Systems weitergeführt werden kann.

Aus den Diskussionen ergeben sich zwei unmittelbare Blickrichtungen: Erstens eine quantitative Evaluation, die die Leistungsfähigkeit des Frameworks systematisch gegen manuelle Verfahren stellt. Mögliche Metriken umfassen etwa Erkennungszeit, Zuverlässigkeit (Recall) der Detektion und Fehlalarmrate; für die Dynamiküberwachung sind zudem akzeptable Toleranzbänder zu definieren und transparent zu begründen. Zweitens ergibt sich eine architektonische Weiterentwicklung: engere Kopplung an Controllerschnittstellen, Erweiterung auf weitere Herstelleradapter sowie die Prüfung echtzeitnaher Ausführungsumgebungen.

Langfristig eröffnet die strukturierte JSON-Ausgabe eine Brücke zu automatisierten Analyse- und Korrekturprozessen. Eine naheliegende Linie ist die Einbindung von LLMs, die auf Basis von Logdaten und Layoutinformationen Roboterprogramme analysieren und Verbesserungsvorschläge generieren. In einem nächsten Schritt ließe sich dies als MCP-Server konzipieren, der Rückmeldungen zyklisch in das Framework einspeist und damit den Bedarf an tiefem Expertenwissen reduziert, ohne den Sicherheitsanspruch zu unterlaufen.

Literatur

- ABB (2025). *Robot Web Services API Documentation*. ABB. URL: <https://developercenter.abb.com/robotstudio.com/api/RWS> (besucht am 20. 08. 2025).
- ABB Robotics (2025). *Produktspezifikation IRB 6700 on OmniCore*. Product Specification 3HAC080365-003. S-721 68 Västerås, Sweden: ABB AB, Robotics & Discrete Automation.
- Andaluz, VH, FA Chicaiza, C Gallardo, WX Quevedo, J Varela, JS Sá nchez und O Arteaga (2016). „Unity3D-MatLab Simulator in Real Time for Robotics Applications“. In: *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*. Hrsg. von LT De Paolis und A Mongelli. Cham: Springer International Publishing, S. 246–263. ISBN: 978-3-319-40621-3.
- Anthropic (2024). *Introducing the Model Context Protocol*. URL: <https://www.anthropic.com/news/model-context-protocol> (besucht am 02. 09. 2025).
- Audonnet, FP, A Hamilton und G Aragon-Camarasa (2022). „A Systematic Comparison of Simulation Software for Robotic Arm Manipulation using ROS2“. In: *2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, S. 755–762.
- Bartneck, C, M Soucy, K Fleuret und EB Sandoval (2015). „The robot engine – Making the unity 3D game engine work for HRI“. In: *2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, S. 431–437. DOI: 10.1109/ROMAN.2015.7333561.
- Bhat, V, AU Kaypak, P Krishnamurthy, R Karri und F Khorrami (2024). *Grounding LLMs For Robot Task Planning Using Closed-loop State Feedback*. arXiv: 2402.08546.
- Biggs, G und B MacDonald (2003). „A Survey of Robot Programming Systems“. In: *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*. Brisbane, Australia, S. 1–9.
- Bilancia, P, J Schmidt, R Raffaelli, M Peruzzini und M Pellicciari (2023). „An Overview of Industrial Robots Control and Programming Approaches“. In: *Applied Sciences* 13.4. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app13042582.
- Bonci, A, A Di Biase, MC Giannini und S Longhi (2023). „Robot Operating System 2 (ROS2)-Based Frameworks for Increasing Robot Autonomy: A Survey“. In: *Applied Sciences* 13.24. DOI: 10.3390/app132412796.
- Brohan, A, N Brown, J Carbajal, Y Chebotar, X Chen, K Choromanski, T Ding, D Driess, A Dubey, C Finn, P Florence, C Fu, MG Arenas, K Gopalakrishnan, K Han, K Hausman, A Herzog, J Hsu, B Ichter, A Irpan, N Joshi, R Julian, D Kalashnikov, Y Kuang, I Leal, L Lee, TWE Lee, S Levine, Y Lu, H Michalewski, I Mordatch, K Pertsch, K Rao, K Reymann, M Ryoo, G Salazar, P Sanketi, P Sermanet, J Singh, A Singh, R Soricut, H Tran, V Vanhoucke, Q Vuong, A Wahid, S Welker, P Wohlhart, J Wu, F Xia, T Xiao, P Xu, S Xu, T Yu und B Zitkovich (2023). *RT-2: Vision-Language-Action Models Transfer Web Knowledge to Robotic Control*. arXiv: 2307.15818.

- Cassandras, CG und S Lafortune (2021). *Introduction to Discrete Event Systems*. 3. Aufl. Cham: Springer, S. XXVI, 804. ISBN: 978-3-030-72272-2. DOI: 10.1007/978-3-030-72274-6.
- Cohen, V, JX Liu, R Mooney, S Tellex und D Watkins (2024). *A Survey of Robotic Language Grounding: Tradeoffs between Symbols and Embeddings*. arXiv: 2405.13245.
- Corke, PI (2007). „A Simple and Systematic Approach to Assigning Denavit–Hartenberg Parameters“. In: *IEEE Transactions on Robotics* 23.3, S. 590–594. DOI: 10.1109/TR0.2007.896765.
- Denavit, J und RS Hartenberg (Juni 2021). „A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices“. In: *Journal of Applied Mechanics* 22.2, S. 215–221. ISSN: 0021-8936. DOI: 10.1115/1.4011045.
- Driess, D, F Xia, MSM Sajjadi, C Lynch, A Chowdhery, B Ichter, A Wahid, J Tompson, Q Vuong, T Yu, W Huang, Y Chebotar, P Sermanet, D Duckworth, S Levine, V Vanhoucke, K Hausman, M Toussaint, K Greff, A Zeng, I Mordatch und P Florence (2023). *PaLM-E: An Embodied Multimodal Language Model*. arXiv: 2303.03378.
- ElMaraghy, HA (2005). „Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms“. In: *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 17.4, S. 261–276. DOI: 10.1007/s10696-006-9028-7.
- Ericson, C (2004). *Real-Time Collision Detection*. 1. Aufl. CRC Press. ISBN: 978-1558607323.
- Fickinger, A, A Bendahi und S Russell (2025). *Provable Sim-to-Real Transfer via Offline Domain Randomization*. arXiv: 2506.10133.
- Gamma, E, R Helm, R Johnson und J Vlissides (1994). *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Gu, X, M Chen, Y Lin, Y Hu, H Zhang, C Wan, Z Wei, Y Xu und J Wang (2025). „On the Effectiveness of Large Language Models in Domain-Specific Code Generation“. In: *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology* 34.3, S. 1–22. ISSN: 1557-7392. DOI: 10.1145/3697012.
- Hesse, S (2011). *Greifertechnik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. DOI: 10.3139/9783446427419.
- Hohpe, G (2006). *Programming Without a Call Stack – Event-driven Architectures*. URL: <http://www.eaipatterns.com> (besucht am 13.08.2025).
- Holubek, R, DRD Sobrino, P Košťál und R Ružarovský (2014). „Offline Programming of an ABB Robot Using Imported CAD Models in the RobotStudio Software Environment“. In: *Applied Mechanics and Materials* 693, S. 62–67.
- Jiang, J, F Wang, J Shen, S Kim und S Kim (2024). *A Survey on Large Language Models for Code Generation*. arXiv: 2406.00515.
- Joel, S, JJ Wu und FH Fard (2024). *A Survey on LLM-based Code Generation for Low-Resource and Domain-Specific Programming Languages*. arXiv: 2410.03981.
- Koren, Y, U Heisel, F Jovane, T Moriwaki, G Pritschow, AG Ulsoy und H Van Brussel (1999). „Reconfigurable Manufacturing Systems“. In: *CIRP Annals* 48.2, S. 527–540. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63232-6.

- Lambrecht, J, M Chemnitz und J Krüger (2011). „Control layer for multi-vendor industrial robot interaction providing integration of supervisory process control and multifunctional control units“. In: *2011 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications*, S. 115–120. DOI: 10.1109/TEPRA.2011.5753492.
- Liang, J, W Huang, F Xia, P Xu, K Hausman, B Ichter, P Florence und A Zeng (2023). *Code as Policies: Language Model Programs for Embodied Control*. arXiv: 2209.07753.
- Martin, RC (2003). *Agile Software Development: Principles, Patterns, and Practices*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. ISBN: 978-0135974445.
- Maruyama, Y, S Kato und T Azumi (2016). „Exploring the Performance of ROS2“. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Software (EMSOFT)*. ACM. DOI: 10.1145/2968478.2968502.
- Mower, CE, Y Wan, H Yu, A Grosnit, J Gonzalez-Billandon, M Zimmer, J Wang, X Zhang, Y Zhao, A Zhai, P Liu, D Palenicek, D Tateo, C Cadena, M Hutter, J Peters, G Tian, Y Zhuang, K Shao, X Quan, J Hao, J Wang und H Bou-Ammar (2024). *ROS-LLM: A ROS framework for embodied AI with task feedback and structured reasoning*. arXiv: 2406.19741.
- Mühe, H, A Angerer, A Hoffmann und W Reif (2010). „On reverse-engineering the KUKA Robot Language“. In: *arXiv preprint*. arXiv: 1009.5004.
- Nakamura, Y (1991). *Advanced Robotics: Redundancy and Optimization*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company. ISBN: 978-0201151985.
- Naveed, H, AU Khan, S Qiu, M Saqib, S Anwar, M Usman, N Akhtar, N Barnes und A Mian (2024). *A Comprehensive Overview of Large Language Models*. arXiv: 2307.06435.
- Nilsson, K (1996). „Industrial Robot Programming“. In:
- NVIDIA Corporation (2018). *Reinforcement Learning Algorithm Helps Train Thousands of Robots Simultaneously*. NVIDIA Technical Blog. URL: <https://developer.nvidia.com/blog/nvidia-researchers-develop-reinforcement-learning-algorithm-to-train-thousands-of-robots-simultaneously/> (besucht am 12.07.2025).
- NVIDIA Corporation (2023). *PhysX SDK Documentation*. NVIDIA Corporation. URL: <https://developer.nvidia.com/physx-sdk> (besucht am 12.07.2025).
- Pine, BJ (1993). *Mass Customization: The New Frontier in Business Competition*. Boston, MA: Harvard Business School Press. ISBN: 978-0875843728.
- Preliy (2024). *Flange: Unity Package for Industrial Robots Simulation*. Kinematic solver with Denavit-Hartenberg parameter implementation. URL: <https://github.com/Preliy/Flange>.
- Quigley, M, B Gerkey, K Conley, J Faust, T Foote, J Leibs, E Berger, R Wheeler und AY Ng (2009). „ROS: an open-source Robot Operating System“. In: *ICRA Workshop on Open Source Software*, S. 1–6.
- Salimpour, S, L Fu, F Keramat, L Militano, G Toffetti, H Edelman und JP Queralta (2025). *Towards Embodied Agentic AI: Review and Classification of LLM- and VLM-Driven Robot Autonomy and Interaction*. arXiv: 2508.05294.

- Schunk (2025). *Schunk FGR Greiferauswahl-Tool*. SCHUNK SE und Co. KG. URL: <https://schunk.com/de/de/konfigurator-fgr> (besucht am 18. 07. 2025).
- Siciliano, B und O Khatib, Hrsg. (2016). *Springer Handbook of Robotics*. 2. Aufl. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. ISBN: 978-3319325507. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1.
- Spong, MW, S Hutchinson und M Vidyasagar (2006). *Robot Modeling and Control*. New York: John Wiley & Sons. ISBN: 978-0471649908.
- Unity Technologies (2025). *Use collisions to trigger other events*. Unity Technologies. URL: <https://docs.unity3d.com/6000.2/Documentation/Manual/collider-interactions-other-events.html> (besucht am 13. 08. 2025).
- Valenzo, D, A Ciria, G Schillaci und B Lara (2022). „Grounding Context in Embodied Cognitive Robotics“. In: *Frontiers in Neurorobotics* Volume 16 - 2022. ISSN: 1662-5218. DOI: 10.3389/fnbot.2022.843108.
- Vaswani, A, N Shazeer, N Parmar, J Uszkoreit, L Jones, AN Gomez, L Kaiser und I Polosukhin (2023). *Attention Is All You Need*. arXiv: 1706.03762.
- Wang, YJ, B Zhang, J Chen und K Sreenath (2024). *Prompt a Robot to Walk with Large Language Models*. arXiv: 2309.09969.
- Wiendahl, HP, HA ElMaraghy, P Nyhuis, MF Zäh, HH Wiendahl, N Duffie und M Brieke (2007). „Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation“. In: *CIRP Annals* 56.2, S. 783–809. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.003.
- Yoshikawa, T (1985). „Manipulability of Robotic Mechanisms“. In: *The International Journal of Robotics Research* 4.2, S. 3–9. DOI: 10.1177/027836498500400201.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt,

- dass ich die vorliegende fachwissenschaftliche Arbeit selbstständig angefertigt und mich ausschließlich der im beigefügten Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel bedient habe.
- dass diese fachwissenschaftliche Arbeit keiner anderen Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegt wurde.
- dass ich jegliche wörtlich und sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Quellen übernommenen Passagen eindeutig kenntlich gemacht habe.

Herne, 16.09.2025

.....

Vor- und Nachname

Erklärung zur Nutzung von KI-Tools

Hiermit erkläre ich (Zutreffendes bitte ankreuzen):

☐ dass ich keine Werkzeuge mit generativen Funktionen oder andere Hilfsmittel mit vergleichbaren automatisierten, datenbasierten Analyse- oder Generierungsfunktionen (sog. KI-Tools) verwendet und daher die nachfolgende Tabelle aus dem Dokument entfernt habe. Zudem habe ich mich vergewissert, dass die von mir eingesetzten Werkzeuge oder Hilfsmittel über keine automatisierten, datenbasierten Analyse- oder Generierungsfunktionen verfügen. Ich bin mir bewusst, dass ein Verstoß gegen diese Erklärung sowie gegen die Selbstständigkeitserklärung vorliegt, sollte nachgewiesen werden, dass ich derartige Werkzeuge oder Hilfsmittel verwendet habe.

☐ dass ich Werkzeuge mit generativen Funktionen oder andere Hilfsmittel mit vergleichbaren automatisierten, datenbasierten Analyse- oder Generierungsfunktionen (sog. KI-Tools) verwendet habe und über deren Möglichkeiten und Grenzen informiert bin. Ich erkläre weiterhin, dass ich die mit diesen Werkzeugen oder Hilfsmitteln erzeugten Ergebnisse auf ihre Korrektheit geprüft und etwaige Fehler eigenständig berichtigt habe. Ich erkenne an, dass die Verantwortung für die generierten Inhalte vollständig bei mir liegt und nicht bei den verwendeten Werkzeugen, Hilfsmitteln oder anderen Personen. Darüber hinaus erkläre ich, dass ich die Namen der von mir genutzten Werkzeuge oder Hilfsmittel, die Art und den Umfang ihrer Nutzung sowie die entsprechenden Stellen im Text, an denen ich diese Werkzeuge bzw. Hilfsmittel verwendet habe, in der nachfolgenden Tabelle vollständig und wahrheitsgemäß dokumentiert habe.

Art der Nutzung	Umfang der Nutzung	Name des verwendeten KI-Tools	Betroffene Stellen
Literaturrecherche und -analyse	Suche nach relevanter Literatur, Überprüfung potenziell relevanter Literatur	SemanticScholar, ConnectedPapers, Google	Neben den frei verfügbaren Datenbanken (z. B. RUB Primo), wurden zur Suche auch KI-unterstützte Suchmaschinen verwendet
Erstellung von Quellcode	Programmierung, Refactoring und Debugging von erstelltem Programmcode	Claude, ChatGPT	Zum Refactoring und Debugging sowie dem Verbessern kleinerer Code-Blöcke, außerdem Aktualisierung und Debugging der bereitgestellten LaTeX-Vorlage
Textübersetzung	Übersetzung von Text anderer Autor:innen	DeepL	Teilweise Verwendung bei der Übersetzung zwecks Verständnis von und Formulierung anderssprachiger Quellen

Herne, 16.09.2025

.....

Vor- und Nachname