

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
Kurzfassung/Abstract	vii
Abkürzungsverzeichnis	xv
Abbildungsverzeichnis	xix
Tabellenverzeichnis	xxiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	3
1.2 Problemstellung und Handlungsbedarf	6
1.3 Wissenschaftlicher Beitrag/Ziel der Arbeit	8
1.4 Struktur der Arbeit	11
2 Grundlagen zur Eingrenzung des Themas	13
2.1 Industrielle Steuerungssysteme in der Automatisierung	13
2.1.1 Automatisierbare Funktionen	15
2.1.2 Steuerung von einzelnen Funktionen - Bewegungssteuerung	16
2.1.3 Steuerung von Funktionsabläufen	18
2.1.4 Steuerungsebenen	19
2.1.5 Darstellungsform von Steuerungen	22
2.2 Virtuelle Inbetriebnahme - Test- und Entwicklungsmethode	23
2.2.1 Definition der virtuellen Inbetriebnahme	23

2.2.2	Vorteile der virtuellen Inbetriebnahme	25
2.2.3	X-in-the-Loop Simulation als Grundlage der VIBN .	27
2.3	Einführung Reinforcement Learning	30
3	Stand der Forschung	35
3.1	Zieldimensionen für die Untersuchung und Bewertung . .	36
3.1.1	Zieldefinition 1 - Eingliederung in den bestehenden Prozess und Organisation	37
3.1.2	Zieldefinition 2 - Integration in etablierte Werkzeuge und IT-Systeme	38
3.1.3	Zieldefinition 3 - Kopplung an bestehende virtuelle und physische Artefakte	39
3.1.4	Zusammenfassung Zieldimension und Bewertungs- kriterien	40
3.2	Lösungsansätze in der Forschung	41
3.2.1	Zinn et al. - Deep Reinforcement Learning	43
3.2.2	Gankin et al./Mayer et al. - Modulare Produktions- steuerung mit Deep Reinforcement Learning	46
3.2.3	Schmidl et al. - Energieoptimierung eines Förder- Hand- habungssystems	47
3.2.4	Plappert et al. - Mujoco Trainingsumgebung	49
3.2.5	Waschnek (et al.) - Optimierung der Halbleiterher- stellung	50
3.2.6	Dobrescu et al. - HiL Architektur	51
3.2.7	Zamora und Lopez et al. - gym-gazebo (1 und 2) .	52
3.2.8	Chebatar et al. - Sim-to-Real	54
3.2.9	Xie et al.	56
3.2.10	Fellbrich et al. - Additive Fertigung im Bauwesen .	57
3.3	Zusammenfassung und Handlungsbedarf	59

4	Lösungsansatz X-in-the-Loop Trainingsumgebung	63
4.1	Analyse Simulationsbasierte Lösungsprozesse	63
4.1.1	Allgemeiner Systemansatz (Ziel-, Handlungs-, Objektsystem) nach Albers	64
4.1.2	Domänenspezifische Entwicklungsmethodiken	66
4.1.3	Entwicklung als iterativer Problemlöseprozess nach Pahl/Beitz	68
4.1.4	Heuristischer Steuerungsentwurf nach Abel	70
4.2	Lösungsansatz X-in-the-Loop Trainingsumgebung	73
4.3	Anforderungen an den Lösungsansatz	75
4.3.1	Architektur	75
4.3.2	Methoden	76
4.3.3	Lösungen	77
4.3.4	Zusammenfassung	78
5	Architektur X-in-the-Loop Gym	79
5.1	Auswahl Reinforcement Learning Toolkit und Trainingsumgebung	80
5.1.1	Reinforcement Learning Algorithmen Bibliotheken	82
5.1.2	Trainingsumgebungs-Plattformen	84
5.1.3	Auswahl	86
5.2	Konzept der XiL-Gym Architektur	87
5.2.1	Anforderungen OpenAI Gym	88
5.2.2	Anforderungen VIBN Simulationswerkzeug	89
5.2.3	XiL-Gym Wrapper	90
5.3	Realisierung XiL-Gym	92
5.3.1	Kommunikation zwischen Agent und XiL-Gym	92
5.3.2	Validierung - Vergleich XiL-Gym und Original Gym	95
5.3.3	Erweiterung und Validierung - Skalierbarkeit	97
5.3.4	Bereitstellung als Austauschplattform	98

- 6 Methoden für anwendungsnahe Belohnungsfunktionen . . . 101**
 - 6.1 Herausforderungen 101
 - 6.2 Lösungsansätze für anwendungsnahe Belohnungsfunktionen 104
 - 6.3 Methode 1 - Curriculum Multi-Stage Reinforcement Learning 108
 - 6.3.1 Anwendungsszenario - IMS 109
 - 6.3.2 Beschreibung Curriculum Multi-Stage Reinforcement Learning 111
 - 6.3.3 Anwendung der Methode auf die Teilsysteme des IMS 114
 - 6.3.4 Zusammenführung der Ergebnisse 119
 - 6.3.5 Fazit 120
 - 6.4 Methode 2 - Test-Driven Reinforcement Learning 121
 - 6.4.1 Beschreibung Test-Driven Reinforcement Learning 122
 - 6.4.2 Anwendungsszenario - Roboter Handhabungs-/ Fräszelle 125
 - 6.4.3 Realisierung des Test-Driven Reinforcement Learning 127
 - 6.4.4 Ergebnisse 128
 - 6.4.5 Fazit 131

- 7 Lösungen zur Integration der Steuerungskonfigurationen . 133**
 - 7.1 Agent-in-the-Loop - Übersicht der zu möglichen Ansätzen 133
 - 7.1.1 Agent im Kontext der VIBN Testkonfigurationen . . 134
 - 7.1.2 Agent in Kontext einer lernfähigen Steuerung . . . 139
 - 7.2 Lösungen für verschiedene Konfigurationen 141
 - 7.2.1 Model-in-the-Loop Substitution 141
 - 7.2.2 Software-in-the-Loop Programmierung 145
 - 7.2.3 Hardware-in-the-Loop Substitution 148

- 8 Ergebnisbewertung 155**
 - 8.1 Bezug zu den Zieldefinitionen 155
 - 8.2 Bewertung der Anforderungen 156
 - 8.3 Fazit 158

9 Zusammenfassung und Ausblick 161

Literatur 165