

<b>1 Einleitung</b>	.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung	.....	2
1.2 Zielstellung der Arbeit und Forschungsfragen	.....	8
1.3 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit	.....	9
<b>2 Grundlagen der Produktionsablaufplanung</b>	.....	13
2.1 Begriffsbestimmung und thematische Abgrenzung	.....	13
2.2 Prozess der Produktionsablaufplanung	.....	16
2.3 Mathematische Optimierung der Produktionsablaufplanung	.....	19
2.3.1 Mathematische Formalisierung	.....	19
2.3.1.1 Probleme	.....	20
2.3.1.2 Nebenbedingungen	.....	22
2.3.1.3 Zielfunktionen	.....	24
2.3.2 Modellbildung	.....	26
2.3.2.1 Ganzzahlige und gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung	.....	27
2.3.2.2 Ereignisdiskrete Simulation	.....	29
2.3.3 Konventionelle Lösungsverfahren	.....	31
2.3.3.1 Ganzzahlige lineare Optimierung	.....	31
2.3.3.2 Heuristiken	.....	35
2.3.3.3 Metaheuristiken	.....	37
<b>3 Grundlagen des Bestärkenden Lernens</b>	.....	41
3.1 Einordnung in die künstliche Intelligenz und in das maschinelle Lernen	.....	42
3.1.1 Überwachtes Lernen als angrenzendes Paradigma	.....	43

3.1.2	Unüberwachten Lernens als angrenzendes Paradigma .....	44
3.2	Grundprinzip und Taxonomie des bestärkenden Lernens .....	46
3.3	Gradientenabhängiges bestärkendes Lernen .....	48
3.3.1	Markov-Entscheidungsproblem .....	49
3.3.2	Nutzenfunktion .....	50
3.3.3	Aktionsnutzen-bewertende Verfahren .....	53
3.3.4	Entscheidungspolitik-approximierende Verfahren .....	57
3.3.5	Actor-Critic-Verfahren .....	61
3.4	Gradientenfreies bestärkendes Lernen .....	64
3.4.1	Modellsuchende und parameteroptimierende Verfahren .....	66
3.4.2	Hybride Verfahren – NeuroEvolution of Augmenting Topologies .....	68
<b>4</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik: Bestärkendes Lernen in der Produktionsablaufplanung .....</b>	<b>77</b>
4.1	Gradientenabhängige Verfahren für die Produktionsablaufplanung .....	77
4.1.1	Agentenbasierte Auswahl von Prioritätsregeln .....	78
4.1.2	Agentenbasierte Ressourcenbelegungsplanung .....	81
4.1.3	Agentenbasierte Reihenfolgeplanung .....	83
4.1.4	Agentenbasierte Losbildung .....	87
4.1.5	Agentenbasiertes Reparieren von ungültigen Ablaufplänen .....	88
4.2	Gradientenfreie Verfahren für die Ablaufplanung im Allgemeinen .....	90
4.2.1	Einsatz der Kreuzentropie-Methode in der Ablaufplanung .....	91
4.2.2	Einsatz von Bayes'scher Optimierung in der Ablaufplanung .....	93
4.2.3	Einsatz von Neuro-Evolution in der Ablaufplanung .....	96
4.3	Zusammenfassung und Diskussion der Forschungslücke .....	100
<b>5</b>	<b>Eine Methode zum Einsatz von bestärkenden Lernverfahren für die Produktionsablaufplanung .....</b>	<b>105</b>
5.1	Ausgangssituation, Problemstellung und Anforderungsdefinition .....	106

5.2 Von der Produktionsablaufplanung zur agentenbasierten Produktionsablaufsteuerung – Prozessmodell und Funktionsprinzip .....	111
5.2.1 Agentenbasierte Ressourcenbelegungsplanung .....	115
5.2.2 Agentenbasierte Reihenfolgeplanung und Losbildung .....	118
5.3 Projektierung und Entwicklung von agentenbasierten Produktionsablaufsteuerungen .....	123
5.3.1 Entwurf von Agentenumgebungen .....	124
5.3.1.1 Modellierung der Erzeugung von Aufträgen .....	126
5.3.1.2 Modellierung von Aufträgen .....	127
5.3.1.3 Modellierung von Produktionsressourcen .....	132
5.3.2 Definition von maschinellen Lernaufgaben und Gestaltung von Agenten .....	138
5.3.2.1 Formulierung von Allokationsproblemen für die Ressourcenbelegungsplanung als maschinelle Lernaufgabe .....	139
5.3.2.2 Formulierung von Sequenzierungsproblemen für die Reihenfolgeplanung und Losbildung als maschinelle Lernaufgabe .....	142
5.3.3 Integration und Inbetriebnahme von Agenten und Agentenumgebungen .....	148
5.3.3.1 Integrationskonzept für gradientenabhängiges bestärkendes Lernen .....	149
5.3.3.2 Integrationskonzept für gradientenfreies bestärkendes Lernen .....	159
5.3.4 Auswahl und Implementierung von bestärkenden Lernverfahren .....	161
5.3.5 Gestaltung von Belohnungsfunktionen .....	171
5.3.5.1 Zeitbasierte Belohnungsfunktionen .....	172
5.3.5.2 Belastungsorientierte Belohnungsfunktionen .....	180
5.3.6 Training von Agenten .....	182
5.4 Zusammenfassung der Methode .....	193

<b>6 Evaluation der entwickelten Methode</b> .....	197
6.1 Flexible-Job-Shop-Problem mit flexibler Operationsplanung .....	198
6.1.1 Problembeschreibung .....	199
6.1.2 Anwendung des DQN-Algorithmus zur Lösung des Problems .....	200
6.1.3 Diskussion der Ergebnisse .....	206
6.1.4 Erweiterung des Problems um einen dynamischen Auftragshorizont .....	209
6.2 Dynamisches Parallel-Maschinen-Problem mit familienabhängigen Rüstzeiten und ressourcenabhängigen Bearbeitungsgeschwindigkeiten .....	212
6.2.1 Problembeschreibung .....	212
6.2.2 Anwendung des PPO-Algorithmus zur Lösung des Problems .....	214
6.2.3 Diskussion der Ergebnisse .....	220
6.3 Zweistufiges Hybrid-Flow-Shop-Problem mit familienabhängigen Rüstzeiten .....	223
6.3.1 Problembeschreibung .....	224
6.3.2 Anwendung des A2C-Algorithmus zur Lösung des Problems .....	226
6.3.3 Anwendung des NEAT-Algorithmus zur Lösung des Problems .....	238
6.3.4 Vergleich mit anderen Lösungsverfahren .....	251
<b>7 Schlussbetrachtung</b> .....	259
7.1 Zusammenfassung und Diskussion .....	259
7.2 Ausblick .....	264
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	267