

---

# INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung . . . . .	1
Summary . . . . .	3
<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1 Von evolutionärer und modularer Robotik zu symbiotischen Organismen	5
1.2 Selbstorganisation als Ergebnis evolutionärer Prozesse . . . . .	11
1.3 Zuverlässigkeit, Robustheit und Skalierbarkeit durch Adaption . . . . .	13
1.4 Verteilte Online und Onboard Evolution in symbiotischen Organismen . .	15
1.5 Beitrag der Arbeit . . . . .	17
1.6 Gliederung der Arbeit . . . . .	20
<b>I Grundlagen bioinspirierter Kontrollmechanismen für die Anwendung in modularer und evolutionärer Robotik</b>	<b>23</b>
<b>2 Neuronale Netze und Computermodelle für die Robotik</b>	<b>25</b>
2.1 Biologisches Vorbild . . . . .	25
2.2 McCulloch-Pitts Neuronen . . . . .	27
2.3 Klassische künstliche neuronale Netze . . . . .	27
2.4 Spiking Neuronen . . . . .	28
2.5 Netzstrukturen . . . . .	29
<b>3 Evolution künstlicher neuronaler Netze</b>	<b>31</b>
3.1 Genotype und Phenotype Repräsentation . . . . .	33
3.2 Parametrische Mutation . . . . .	35
3.3 Strukturelle Mutation . . . . .	35
3.4 Rekombination . . . . .	36
<b>4 Splinebasierter Ansatz zur Steuerung von Robotern</b>	<b>39</b>

<b>II</b>	<b>Ansatz zur verteilten online und onboard Evolution für modulare Roboter</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>Streambasierte Middleware als Basis für bloinspierte Anwendungen</b>	<b>47</b>
5.1	Anforderungen und Architektur des Middleware Systems . . . . .	48
5.2	Verfügbare Roboterhardware in Symbrion und Replicator . . . . .	50
5.3	Module und Software Architektur . . . . .	56
5.4	Streambasierte Kommunikation und Kommunikationsstack . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Integriertes Framework für verteilte online und onboard Evolution</b>	<b>69</b>
6.1	Anforderungen verteilter online und onboard Evolution . . . . .	69
6.2	Softwarearchitektur und Module . . . . .	71
6.3	Evolutionäre Engine . . . . .	72
6.4	Fitness und Selektion . . . . .	73
6.5	Evolvables, Gene und Factories . . . . .	74
6.6	EvoRoFConfig und Logger . . . . .	76
6.7	Schnittstellen zu Robotern und Simulationsumgebungen . . . . .	76
<b>7</b>	<b>Erweiterungen für modulare Roboter durch rhythmische Mustergeneratoren</b>	<b>81</b>
7.1	Anforderungen und Design rhythmischer Mustergeneratoren . . . . .	82
7.2	Anwendung auf modulare Roboter . . . . .	84
7.3	Modulation von Ausgabemustern . . . . .	92
<b>III</b>	<b>Anwendungen und Experimente</b>	<b>99</b>
<b>8</b>	<b>Inkrementelle Evolution und Adaption in dynamischen Umgebungen</b>	<b>101</b>
8.1	Arenaaufbau und Roboter . . . . .	102
8.2	Adaption und evolutionäre Operatoren . . . . .	105
8.3	Inkrementelle Evolution . . . . .	109
<b>9</b>	<b>Koordinierte Organismusbewegung als Ergebnis eines evolutionären Selbstorganisationsprozesses</b>	<b>121</b>
9.1	Simulative Experimente zur koordinierten Bewegung . . . . .	122
9.2	Experimente mit echter Roboterhardware . . . . .	128

<b>IV Zusammenfassung</b>	<b>131</b>
<b>10 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>133</b>
10.1 Zusammenfassung . . . . .	133
10.2 Ausblick . . . . .	136
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>139</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>141</b>
<b>Algorithmenverzeichnis</b>	<b>143</b>
<b>Literatur</b>	<b>145</b>