

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	1
1.1 Motivation	1
1.1.1 Wartungs- und Reparaturaufgaben bei Weltraummissionen	2
1.1.2 Problematik und Perspektive menschlicher Präsenz im Weltraum	4
1.1.3 Einsatzpotential weltraumtauglicher Robotersysteme	6
1.2 Technischer Stand derzeitiger raumtauglicher Roboter	7
1.3 Nutzen für terrestrische Anwendungen	8
1.4 Übersicht über die Arbeit	10
<b>2 Aufgabenstellung</b>	11
2.1 Eigenschaften autonomer Servicing-Systeme	11
2.2 Autonomie auf exekutiver und strategischer Ebene	14
<b>3 Laborsystem und Experimentaufbauten</b>	18
3.1 Ausstattungsanforderungen	18
3.2 Aktorik und Sensorik	20
3.3 Hardware-Vernetzung	21
3.4 Das Reparaturszenarium	22
3.5 Das Montageszenarium	24
3.6 Das Mikrogravitations-Experimentszenarium	24
3.7 Das Demontageszenarium	25
3.8 Experimentaufbau zum autonomen Schrauben	27
<b>4 Software-Rahmenarchitektur</b>	28
4.1 Sensomotorische Ebene	29
4.1.1 Kommandobearbeitung	30
4.1.2 Bereitstellung von Systemdiensten	31
4.1.3 Objektorientierte Ablaufsteuerung der Grundfähigkeiten	33
4.2 Taktische und strategische Ebene	34
4.2.1 Vorüberlegungen zur Strukturierung	34
4.2.2 Prozeßstruktur der taktischen und strategischen Ebene	36
4.2.3 Nachrichtenvermittlung in GHOLEM	38
4.2.4 Intraprozeßparallelität	39
4.2.5 Implementierungshintergrund	41
4.2.6 Syntaktische Prüfung der Interprozeßkommandos	42
4.2.7 Vergleichbare Ansätze	43
4.3 Zusammenfassung	44
<b>5 Sensomotorische Autonomie</b>	45
5.1 Modellierung von Roboter und Umwelt	45
5.1.1 Positions- und Kraft-/Momentendarstellung	46
5.1.2 Koordinatentransformationen	48
5.2 Interaktion von Roboter und Umwelt	48
5.2.1 Randbedingungen im Weltraumeinsatz	48
5.2.2 Handhabungsbedarf in den Experimentierszenarien	49
5.2.3 Eigenschaften des verwendeten Robotersystems	51
5.2.4 Folgerungen für die Modellierung	53

5.2.5	Der Umgang mit Fehlern und Unsicherheit	54
5.2.6	Kategorien von Grundfähigkeiten	56
5.3	Transferbewegungen	59
5.4	Greifbewegungen	59
5.5	Montage- und Demontagevorgänge	59
5.5.1	Bisherige Ansätze zur Lösung von Fügeproblemen	60
5.5.2	Modellbasiert geplante, sensorisch modifizierbare Bewegungen	64
5.5.3	Heuristisch strukturierte, sensorisch reaktiv gesteuerte Bewegungen	64
5.5.3.1	Vorüberlegungen zur Situationssteuerung	65
5.5.3.2	Bolzen-Bohrungs-Versuche	66
5.5.3.3	Roboterassistiertes Schrauben	68
5.5.3.4	Mechanische Hilfsmittel: Nachgiebigkeit und Vibration	69
5.5.3.5	Situationsbasierte Steuerung des Schraubvorgangs	70
5.5.3.6	Schraubexperimente	71
5.5.3.7	Lernender Wissenserwerb	74
5.5.3.7.1	Existierende Ansätze	74
5.5.3.7.2	Aufgabenteilung zwischen Entwickler und Robotersystem	75
5.5.3.7.3	Struktur des lernenden Systems	78
5.5.3.7.4	Stichprobenermittlung	80
5.5.3.7.5	Lernphase	81
5.5.3.7.6	Experimente und Ergebnisse	82
5.5.3.7.7	Wertung	83
5.6	Zusammenfassung	84
<b>6</b>	<b>Taktische Autonomie</b>	<b>85</b>
6.1	Zielsetzung und Hilfsmittel der Anwendungsprogrammierung	85
6.2	Geometrisch-kinematisches Umweltmodell	88
6.2.1	Objektorientierte Datenhaltung in Frames	88
6.2.2	Statische Apriori-Information	90
6.2.2.1	Volumenmodell	91
6.2.2.2	Flächenmodell	91
6.2.2.3	Konturmodell	92
6.2.2.4	Kinematikmodell	92
6.2.3	Dynamischer Umweltstatus	94
6.2.4	CAD-Daten-gestützter Wissenserwerb	95
6.3	Vorgangsmodell	96
6.3.1	Bekanntes Ansätze	96
6.3.2	Erfahrungshintergrund	98
6.3.3	Forderungen an die Ablaufsteuerung	102
6.3.4	Steuergraphen	103
6.3.5	Textuelle Repräsentation und Interpretation	106
6.3.6	Graphisch-interaktive Ablaufspezifikation	110
6.3.7	Experimente	112
6.4	Zusammenfassung	113
<b>7</b>	<b>Strategische Autonomie</b>	<b>114</b>
7.1	Ziele statt Vorgehensweisen?	114
7.2	Strategische Modellbildung	116
7.2.1	Erweiterungen des Kinematikmodells	118

7.2.1.1	Koppelpunkte .....	119
7.2.1.2	Koppelbereiche .....	119
7.2.1.3	Cluster .....	121
7.2.2	Formale Strukturierung des Aufgabenraums .....	123
7.2.2.1	Prototypen, Klassen und Instanzen .....	123
7.2.2.2	Nomenklatur .....	125
7.2.2.3	Repräsentation von Clusterklassen .....	127
7.2.2.3.1	Kanonische Clusterklassen .....	127
7.2.2.3.2	Symmetrisch äquivalente Clusterklassen .....	128
7.2.2.3.3	Allgemeine Anordnungspermutationen .....	132
7.2.2.3.4	Summarische und generische Clusterklassen .....	133
7.2.2.4	Ordnungsrelationen .....	134
7.2.3	Wissenserwerb .....	134
7.2.3.1	Entkopplung temporärer Clusterprototypen .....	136
7.2.3.2	Entkopplung von Nachbar-Clusterprototypen .....	136
7.2.3.3	Synthese neuer Cluster .....	137
7.2.3.4	Zusammenfassungen .....	138
7.2.3.5	Externe Bedingungen .....	139
7.2.3.6	Exemplarischer Generierungslauf .....	141
7.2.3.7	Vergleichbare Ansätze .....	144
7.3	Planung von Operationssequenzen .....	145
7.3.1	Strategischer Gesamtzustand .....	146
7.3.2	Grobplanung .....	148
7.3.3	Laufzeitrestriktionen .....	150
7.3.4	Feinplanung .....	151
7.4	Implizite und explizite strategische Ablaufprogrammierung .....	153
7.4.1	Explizite Programmierung .....	153
7.4.2	Planungsansatz .....	154
7.5	Zusammenfassung .....	155
<b>8</b>	<b>Schlußbemerkungen</b> .....	<b>156</b>
8.1	Zusammenfassung .....	156
8.1.1	Konzeptionelle Architektur .....	156
8.1.2	Repräsentation und Wissenserwerb .....	157
8.2	Zusammenhänge .....	158
8.3	Ausblick .....	158
<b>A</b>	<b>Robotik-Projekte in der Raumfahrt</b> .....	<b>160</b>
<b>B</b>	<b>Grundprobleme intelligenter autonomer Systeme</b> .....	<b>165</b>
<b>C</b>	<b>Ergänzungen zum Laboraufbau</b> .....	<b>181</b>
C.1	Aktorik und Sensorik .....	181
C.2	Hardware-Vernetzung .....	182
<b>D</b>	<b>Ordnungsrelationen im Topologischen Umweltmodell</b> .....	<b>185</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>188</b>

<b>Eigene Veröffentlichungen</b> .....	<b>198</b>
<b>Weitere relevante Arbeiten</b> .....	<b>198</b>
<b>Studien- und Diplomarbeiten</b> .....	<b>199</b>