

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Virtuelle Testbeds</b>	<b>7</b>
2.1 Systementwicklung auf Basis Virtueller Testbeds	9
2.2 Entwicklung und Validierung Virtueller Testbeds	13
2.3 Mentale Modelle für intelligente Systeme	15
2.4 Anforderungsanalyse	18
<b>3 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>21</b>
3.1 Differentialgleichungen und numerische Integration	22
3.2 Methoden zur domänenübergreifenden Systemmodellierung	25
3.2.1 Zustandsraumdarstellung	26
3.2.2 Signalflussdarstellung	28
3.2.3 Bondgraphen	28
3.2.3.1 Grundlagen und Notation	30
3.2.3.2 Kausalanalyse	32
3.2.3.3 Generierung der Differentialgleichungen	33
3.3 Spezialisierte Klassen von Simulationsverfahren	34
3.3.1 Starrkörperdynamik	35
3.3.1.1 Verfahren zur Simulation von Starrkörper-Systemen	35
3.3.1.2 Bewegungsgleichungen unter Zwangsbedingungen	37
3.3.2 Methoden der finiten und diskreten Elemente	40
3.3.3 Zelluläre Automaten	41
3.3.4 Ereignisorientierte Simulation	42
3.4 Kopplung von Simulationsverfahren	43
3.5 Überblick über Simulationssoftware	48
3.5.1 Mehrkörpersimulation	49
3.5.2 Multiphysiksimulation	49
3.5.3 Numerische und symbolische Mathematik	50
3.5.4 Schnittstellen und Standards	50
3.5.5 Dedizierte Software-Systeme	51
3.5.6 Bewertung	52
3.6 Das Simulationssystem VEROSIM	53
3.6.1 Mikrokern-Architektur	54
3.6.2 Objektorientierte Datenhaltung und Metadaten	55
3.6.3 Ablaufplanung der Simulation	58
3.7 Forschungshypothese	61

<b>4</b>	<b>Simulationsverfahren</b>	<b>63</b>
4.1	Deformierbare Körper mit Masse-/ Federsystemen . . . . .	63
4.2	Partikelsimulation mit Smoothed Particle Hydrodynamics . . . . .	66
4.3	Bodenmechaniksimulation auf Basis zellulärer Automaten . . . . .	69
4.4	Schüttgutsimulation auf Basis zellulärer Automaten . . . . .	71
4.5	Simulation von Sensor- und Aktorkomponenten . . . . .	75
4.5.1	Inertiale Messeinheit . . . . .	76
4.5.2	Kraft-Drehmoment-Sensor . . . . .	78
4.5.3	Antriebsmodelle . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Integration</b>	<b>81</b>
5.1	Integration von Algorithmen zur Simulation physikalischer Prozesse . . . . .	81
5.1.1	Kopplung von Differentialgleichungssystemen . . . . .	83
5.1.2	Kopplung von Differentialgleichungssystem und spezialisiertem Verfahren . . . . .	84
5.1.2.1	Mechatronische Aktuatorik und Starrkörperdynamik . . . . .	85
5.1.3	Kopplung spezialisierter Verfahren . . . . .	86
5.1.3.1	Starrkörperdynamik und Bodenmechanik . . . . .	87
5.1.3.2	Starrkörperdynamik und Partikelsysteme . . . . .	92
5.1.3.3	Starrkörperdynamik und deformierbare Körper . . . . .	92
5.1.3.4	Modulare Implementierung . . . . .	95
5.2	Integration simulierter Komponenten . . . . .	97
5.2.1	Generalisiertes Ein-/Ausgabe-Framework . . . . .	98
5.2.2	Hierarchische und modulare Modellverwaltung . . . . .	101
5.3	Integration externer Systeme . . . . .	103
5.3.1	Kapselung der Kommunikation mit externen Komponenten . . . . .	105
5.3.1.1	Externe Regelungskomponenten . . . . .	105
5.3.1.2	Co-Simulation mit Matlab/Simulink . . . . .	106
5.3.1.3	Austausch von Simulationsmodellen . . . . .	108
5.3.2	Parallelisierung und Synchronisation in der Co-Simulation . . . . .	109
5.3.3	Simulation auf verteilten Computersystemen . . . . .	110
<b>6</b>	<b>Modellierung</b>	<b>111</b>
6.1	Eine Entwicklungsumgebung für Zustandsraummodelle . . . . .	111
6.2	Modellierung von Bondgraphen . . . . .	113
6.3	Exemplarische Erweiterung der Starrkörperdynamik . . . . .	116
6.3.1	Modellierung allgemeiner Zwangsbedingungen . . . . .	116
6.3.2	Einführung neuer Kollisionsgeometrien . . . . .	118
6.3.3	Trennung von Null- und Initialstellung . . . . .	120
<b>7</b>	<b>Anwendungen und Bewertung</b>	<b>121</b>
7.1	VTB Planetare Exploration . . . . .	121
7.1.1	VTB Planetare Landung . . . . .	121
7.1.2	VTB Selbstlokalisierung . . . . .	125
7.1.3	VTB Kraterexploration mit Laufrobotern . . . . .	127
7.1.3.1	Kommunikationsinfrastruktur . . . . .	128
7.1.3.2	Referenzexperimente . . . . .	130
7.1.3.3	Virtuelle Kraterexplorationsmission . . . . .	137
7.1.4	Zusammenführung der Ergebnisse mehrerer VTBs . . . . .	139

7.1.5	Intuitiver Zugang zur Simulation in der 3D-Rundumprojektion . . . . .	142
7.2	VTB On-Orbit-Servicing modularer Satelliten . . . . .	143
7.2.1	Einheitliches Datenformat . . . . .	146
7.2.2	Austausch von Simulationsmodellen und Hardware . . . . .	150
7.2.3	Validierung mit Erhaltungsgrößen . . . . .	151
7.2.4	Strukturmechanische Analyse . . . . .	152
7.3	Weitere Anwendungen . . . . .	153
7.3.1	VTB Mensch-Roboter-Interaktion . . . . .	154
7.3.1.1	Benutzerinteraktion . . . . .	155
7.3.1.2	Modellierung der Interaktion zwischen Mensch- und Robotermodell	155
7.3.1.3	Impedanzregelung . . . . .	157
7.3.1.4	Hardware-Anbindung . . . . .	158
7.3.1.5	Bewertung . . . . .	158
7.3.2	VTB Projektive Virtuelle Realität . . . . .	159
7.3.3	VTB Landwirtschaft . . . . .	162
7.3.4	VTB Mobile Systeme in der Stadt . . . . .	163
7.3.5	Ein Baumaschinensimulator für Training und Einsatzplanung . . . . .	163
7.3.6	Modellierung und Simulation eines Mecanum-Antriebs . . . . .	164
7.3.7	Modellierung eines organischen Greifarms . . . . .	168
7.4	Gegenüberstellung der Anforderungen und Lösungen . . . . .	170
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>173</b>
<b>A</b>	<b>Laplace-Transformation</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Parallelisierung und ihre Grenzen</b>	<b>II</b>
<b>C</b>	<b>Echtzeitanforderungen</b>	<b>III</b>
<b>D</b>	<b>Normalverteilte Zufallszahlen</b>	<b>V</b>
<b>E</b>	<b>Orientierungsdarstellung mit Quaternionen</b>	<b>VI</b>
<b>F</b>	<b>Implementierungsbeispiel Schubdüse</b>	<b>VII</b>
<b>G</b>	<b>Tabellarische Übersicht über Simulationssoftware</b>	<b>IX</b>
<b>H</b>	<b>Gewonnene Erkenntnisse</b>	<b>XIV</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XVI</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XIX</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XXI</b>
	<b>Bildungsgang des Verfassers</b>	<b>XLVII</b>