

INHALTSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER WICHTIGSTEN FORMELZEICHEN	VIII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation der Arbeit	1
1.2 Stand der Technik	5
1.2.1 Simulation von Mehrkörpersystemen	5
1.2.2 Rechnerhardware für Echtzeitsimulationen	7
1.2.3 Simulation dynamischer Systeme mit Transputern	9
1.2.4 Realisierung und Anwendung von Hardware–in–the–Loop Versuchen	10
1.3 Ziel und Inhalt der Arbeit	11
2 GRUNDLAGEN DER REALISIERUNG VON ECHTZEITSYSTEMEN MIT TRANSPUTERN	13
2.1 Echtzeitsysteme	13
2.1.1 Echtzeitbetrieb und Prozesse	13
2.1.2 Ereignisbehandlung	15
2.2 Parallelrechner	17
2.2.1 Aufbau von Parallelrechnern	17
2.2.2 Beurteilungskriterien für parallele Implementierungen	19
2.3 Transputer und Transputersysteme	20
2.3.1 Eigenschaften von Transputern	20
2.3.2 Aufbau und Programmierung von Transputersystemen	22
3 MODELLIERUNG UND SIMULATION AKTIVER MEHRKÖRPERSYSTEME	25
3.1 Bewegungsgleichungen von Mehrkörpersystemen	25
3.1.1 Aufbau von Mehrkörpersystemen	25
3.1.2 Kinematik	26
3.1.3 Newton–Eulersche Gleichungen	28
3.1.4 Bewegungsgleichungen und Reaktionsgleichungen	29
3.1.5 Das Programmsystem NEWEUL	31

3.2	Simulation des Bewegungsverhaltens	32
3.3	Effizienz und Echtzeittauglichkeit	33
3.3.1	Echtzeitbedingungen und numerische Integration	34
3.3.2	Effizienz von Formalismen	35
3.3.3	Einordnung des Programmsystems NEWEUL	40
3.4	Modellierung aktiver Komponenten	41
3.4.1	Regler und Beobachter	41
3.4.2	Aktoren	42
3.4.3	Sensoren	44
3.5	Simulation und Experiment	45
4	PARALLELISIERUNG UND IMPLEMENTIERUNG DER BEWEGUNGS- GLEICHUNGEN	50
4.1	Rechentechnische Voraussetzungen	50
4.2	Parallele Auswertung der Bewegungsgleichungen	51
4.2.1	Parallele Auswertung einzelner Matrizen und Vektoren	51
4.2.2	Parallele Auswertung von Subsystemgleichungen	53
4.3	Automatisierte Parallelisierung und Implementierung	59
4.4	Effiziente Berechnung der Beschleunigungen	67
4.5	Anwendungsbeispiele	69
4.5.1	Stanford-Manipulator	69
4.5.2	Fahrzeugmodell	73
5	AUFBAU EINER ECHTZEITSIMULATIONSUMGEBUNG	78
5.1	Prozeßstruktur und Kopplung von Simulationsmoduln	78
5.1.1	Simulationsmodul	78
5.1.2	Kopplung von Simulationsmoduln	80
5.2	Numerische Integration unter Echtzeitbedingungen	83
5.3	Praktische Realisierung	86
5.3.1	Hardware-Aufbau	86
5.3.2	Transputergestützte Echtzeitsoftware	88
5.3.3	Benutzeroberfläche	91

6	HARDWARE–IN–THE–LOOP SIMULATION	94
6.1	Realisierung mit einem Experimentalroboter	94
6.2	Realisierung mit einem servohydraulischen Prüfstand	97
6.2.1	Aufbau des Prüfstands	97
6.2.2	Modellbildung für das Lagestellglied	102
6.2.3	Regelung des Lagestellglieds	109
6.2.4	Durchführung und Verifikation von Hardware–in–the–Loop Simulationen	116
7	ZUSAMMENFASSUNG	128
	ANHANG: GRUNDZÜGE DER AUSLEGUNG EINES HYDRAULIK– PRÜFSTANDS	131
	LITERATURVERZEICHNIS	140