

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1. Entwicklungsgeschichte der Robotertechnik	1
1.2. Stand der Technik in der rechnergestützten Simulation	4
1.2.1. Simulation in der Fertigungstechnik	4
1.2.2. Bewegungssimulation	7
1.2.3. Beschreibung des Robotersimulationssystems USIS	8
1.3. Ziel der Arbeit	9
2 Mathematische Grundlagen zur Beschreibung kinematischer Strukturen	12
2.1. Definitionen	12
2.2. Koordinatentransformation	14
2.2.1. Translation	14
2.2.2. Rotation	14
2.2.3. Homogene Transformation	17
2.3. Kinematikdefinition	21
2.3.1. Grundsätzliche Bemerkungen	21
2.3.2. Beschreibungsformen für kinematische Strukturen	22
2.3.2.1. Kinematische Gleichung	22
2.3.2.2. Denavit-Hartenberg-Transformation	23
2.3.2.3. Gelenkübergang durch Festlegung von zwei Transformationsmatrizen	26
2.3.3. Aufbau einer Kinematik für die Simulation	28
2.4. Kinematische Bahnplanung	29
2.4.1. PTP-Bewegung	30
2.4.2. Linearbewegung	32

3 Rücktransformationsverfahren	34
3.1. Betrachtungen zur Lösbarkeit	34
3.2. Prinzip der expliziten Lösung	35
3.3. Explizite Lösung am Beispiel eines Roboters mit Doppelwinkelhand	36
3.3.1. Festlegungen	36
3.3.2. Herleitung der Lösungsgleichungen	42
3.3.2.1. Berechnung der ersten drei Achswinkel	42
3.3.2.2. Berechnung der Handwinkel	44
3.3.2.3. Bemerkungen zum Lösungsverfahren	45
3.3.3. Einsatz eines Formelmanipulationssystems	46
3.4. Lösung der allgemeinen Rücktransformation	47
3.4.1. Leistungsumfang der implementierten allgemeinen Rücktransformation	47
3.4.2. Lösungsweg	49
3.4.2.1. Newton-Verfahren	49
3.4.2.2. Anwendung des Newton-Verfahrens	50
3.4.2.3. Berücksichtigung von Nebenbedingungen	52
3.4.2.4. Betrachtungen zur Lösbarkeit	54
3.4.3. Anwendungsbeispiele und Ergebnisse	55
3.4.4. Bemerkungen	60
4 Konzeption eines Robotermodells unter Berücksichtigung der Dynamik	62
4.1. Grundsätzliche Bemerkungen zur Dynamik von Mehrkörpersystemen	62
4.2. Mechanische Grundlagen	64
4.2.1. Klassifizierung von Mehrkörpersystemen	64
4.2.2. Aufstellen der Bewegungsgleichungen	65
4.2.3. Auswertung der Bewegungsgleichungen	69
4.3. Regelungstechnische Grundlagen	70
4.3.1. Aufbau von Reglern	72

4.3.2. Abtastregelung	74
4.3.3. Regelungskonzepte für Roboter	74
4.3.3.1. Zustandsregelung	75
4.3.3.2. Kaskadenregelung	76
4.3.3.3. Feedback-Regelung	76
4.3.3.4. Feedforward-Regelung	77
4.3.3.5. Folgerungen	77
4.4. Anforderungen an ein Programm zur MKS-Simulation	78
4.5. Eignung kommerzieller Dynamikprogramme	80
4.5.1. Übersicht	80
4.5.2. Vergleich einiger programmtechnischer Aspekte	81
4.5.3. Zusammenfassende Bewertung	84
4.6. Leistungsumfang des Dynamikprogramms ADAMS	86
4.6.1. ADAMS-Kurzbeschreibung	86
4.6.2. Modellierung des Mehrkörpersystems	86
4.6.3. Berechnungsmethoden	87
4.6.4. Ergebnisdarstellung	89
4.6.5. Benutzerschnittstellen	90
 5 Implementierung der Dynamik in ein Robotersimulationsmodell	 93
5.1. Eigenschaften realer Robotersysteme	93
5.1.1. Mechanischer Aufbau	93
5.1.2. Aufbau von Robotersteuerungen	94
5.2. Anforderungen an die Simulation der Kinetik	95
5.2.1. Mechanischer Aufbau	95
5.2.2. Steuerungstechnischer Aufbau	96
5.2.3. Ergebnisdarstellung	96
5.3. Modellierung physikalischer Effekte	97
5.3.1. Reibungseffekte	97
5.3.2. Elastizitätseffekte	100
5.3.3. Getriebesimulation	101

5.3.4. Mechanische Anschläge	103
5.3.5. Elektromotor-Verhalten	103
5.4. Nachbildung der Steuerung	106
5.4.1. Bahnplanung und Sollwertbereitstellung	106
5.4.2. Aufbau von Reglerstrukturen	107
5.5. Ausgabesteuerung	111
5.6. Realisierte Schnittstellen	111
 6 Simulationsergebnisse für einen sechsachsigen Knickarmroboter	 114
6.1. Beschreibung des Roboters	114
6.2. Aufruf der implementierten Funktionserweiterungen	116
6.3. Ergebnisse bei Variation von Simulationsparametern	118
6.3.1. Einfluß der Abtastzeit	119
6.3.2. Proportionale Eingrößen-Wegregelung	121
6.3.3. Variation der Proportionalitätsfaktoren	123
6.3.4. Einfluß der integrierend wirkenden Reglerkomponenten	123
6.3.5. Vergleich zwischen P-PI- und PI-P-Kaskadenregelung	124
6.3.6. Aufschalten der Sollbeschleunigungen	126
6.3.7. Wirkung unterschiedlicher Traglasten	126
6.3.8. Auswirkung von Massenträgheit der Antriebsstränge	127
6.3.9. Auswirkung von Reibungseinflüssen	127
6.3.10. Getriebespiel und Elastizitäten	129
6.3.11. Aufschalten von Störmomenten	131
6.3.12. Systemverhalten bei NOT-AUS	134
6.3.13. Einfluß von Motorinduktivitäten	135
 7 Validierung der simulierten Roboterbewegungen	 137
7.1. Erforderliche Parameterermittlungen	137
7.2. Parameter der Systemkomponenten	138
7.3. Regelungstechnische Eigenschaften	139
7.4. Parameterermittlung am Gesamtsystem	140

7.4.1. Vorstellung verschiedener Meßverfahren	140
7.4.2. Beispiel: Messen der Winkelencodersignale	141
7.4.2.1. Meßaufbau	142
7.4.2.2. Softwareanforderungen	145
7.4.2.3. Programmaufbau	147
7.4.2.4. Besonderheit des verwendeten Roboters	148
7.4.2.5. Meßergebnisse	149
7.4.2.6. Grenzen des Meßsystems	151
7.4.2.7. Erweiterungsmöglichkeiten	153
7.5. Vergleich von Simulation und Messung	154
7.6. Zusammenfassende Bemerkungen	155
 8 Zusammenfassung und Ausblick	 157
 Literaturverzeichnis	 159
 Anhang	 167