

**Mehrkörperdynamische Simulationen und
experimentelle Untersuchungen zur
Bahngenaugigkeit von Industrierobotern mit
SCARA-Struktur**

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau
der
Technischen Universität Ilmenau

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR
(Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. Erik Gerlach
geboren am 31.7.1969
in Berlin

Berichtersteller: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. K. Zimmermann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. M. Weiß
Prof. Dr. sc. techn. H. Loose

eingereicht am: 16.1.2003

Wiss. Aussprache am: 23.5.2003

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
2	EINFÜHRUNG IN DIE PROBLEMSTELLUNG - GRUNDLAGEN	3
2.1	PROBLEMSTELLUNG.....	3
2.2	MECHATRONISCHE SYSTEME.....	3
2.3	INDUSTRIEROBOTER.....	5
2.3.1	<i>Aufbau und Teilsysteme eines Industrieroboters.....</i>	<i>5</i>
2.3.2	<i>Konfiguration eines Industrieroboters</i>	<i>6</i>
2.4	BEWEGUNGSPLANUNG.....	7
2.5	MESSUNG DER BEWEGUNG.....	8
2.6	SIMULATION VON MEHRKÖRPERSYSTEMEN.....	8
2.7	ZIELSTELLUNG.....	9
3	MODELLBILDUNG VON MEHRKÖRPERSYSTEMEN	12
3.1	FUNKTIONSMODELL.....	12
3.2	MEHRKÖRPERDYNAMIK.....	13
3.3	KINEMATIK VON MEHRKÖRPERSYSTEMEN - KINEMATISCHES MODELL	14
3.3.1	<i>Denavit-Hartenberg-Notation</i>	<i>17</i>
3.3.2	<i>Roll-Nick-Gierwinkel-Transformation</i>	<i>18</i>
3.4	KINETIK VON MEHRKÖRPERSYSTEMEN –DYNAMISCHES MODELL	20
3.5	EIN BEISPIEL ZUR MODELLBILDUNG.....	22
3.5.1	<i>Mehrkörpermodell.....</i>	<i>22</i>
3.5.2	<i>Kinematisches Modell.....</i>	<i>23</i>
3.5.3	<i>Dynamisches Modell.....</i>	<i>24</i>
4	THEORETISCHE UND EXPERIMENTELLE MODELLBILDUNG DER ROBOTERANTRIEBE	28
4.1	ÜBERSICHT	28
4.2	ELEKTRISCHE ANTRIEBE.....	29
4.3	PERMANENTERREGTER SYNCHRONMOTOR	30
4.3.1	<i>Aufbau.....</i>	<i>30</i>
4.3.2	<i>Wirkungsweise und Drehmoment</i>	<i>31</i>
4.3.3	<i>Feldorientierte Regelung der Synchronmaschine</i>	<i>32</i>
4.3.4	<i>Motormodelle des Synchronmotors</i>	<i>36</i>
4.4	ÜBERTRAGUNGSGETRIEBE.....	37
4.4.1	<i>Präzisionsgetriebe</i>	<i>38</i>
4.4.2	<i>Statisches Verhalten.....</i>	<i>39</i>
4.4.3	<i>Kinematisches Verhalten</i>	<i>40</i>
4.4.4	<i>Dynamische Kenngrößen.....</i>	<i>41</i>
4.4.5	<i>Energetisches Verhalten</i>	<i>42</i>
4.4.6	<i>Getriebemodell</i>	<i>42</i>
4.5	EXPERIMENTELLE MODELLBILDUNG	44

4.5.1	<i>Aufbau des Prüfstandes</i>	44
4.5.2	<i>Messungen</i>	46
4.5.3	<i>Vergleich und Überprüfung der Motormodelle</i>	49
5	PLANUNG UND REGELUNG VON ROBOTERBEWEGUNGEN	51
5.1	ROBOTERBEWEGUNGEN	51
5.2	TRAJEKTORIENPLANUNG	51
5.2.1	<i>Kinematische Bahnplanung</i>	53
5.2.2	<i>Dynamische Bahnplanung</i>	54
5.3	POSITIONSREGELUNG VON INDUSTRIEROBOTERN	55
5.3.1	<i>Kaskadenregelung</i>	55
5.3.2	<i>Nichtlineare Entkopplung</i>	58
5.3.3	<i>Adaptive Regler</i>	60
6	SIMULATION EINES INDUSTRIEROBOTERS	61
6.1	PROGRAMME FÜR DIE RECHNERGESTÜTZTE SIMULATION VON MECHATRONISCHEN SYSTEMEN	61
6.2	ANTRIEBSMODELL	61
6.2.1	<i>Starre Antriebsachse</i>	62
6.2.2	<i>Elastische Antriebsachse</i>	62
6.2.3	<i>Einbindung des Motormodells</i>	63
6.3	REGELUNG.....	63
6.4	MECHANISCHES MODELL	63
6.5	GESAMTMODELL.....	64
6.6	BERECHNUNG DER SOLLWERTE FÜR DIE ACHSREGLER.....	66
6.7	ERSTE ÜBERPRÜFUNG DES SIMULATIONSMODELLS	66
6.8	DYNAMISCHE BAHNPLANUNG	67
6.9	SIMULATION EINER GERADLINIGEN BAHN	67
6.10	MÖGLICHKEITEN ZUR VERBESSERUNG DES BEWEGUNGSVERHALTENS	69
7	GENAUIGKEIT VON ROBOTERBEWEGUNGEN	71
7.1	GENAUIGKEIT VON MASCHINENBEWEGUNGEN.....	71
7.1.1	<i>Beschreibung der Genauigkeit von Bewegungen</i>	71
7.1.2	<i>Testbewegungen zur Bestimmung von Genauigkeitsparametern von Bahnbewegungen</i>	72
7.2	MESSTECHNISCHE ÜBERPRÜFUNG DER BAHNBEWEGUNGEN	73
8	MESSUNG DER BAHNBEWEGUNG UND VERGLEICH MIT DEN SIMULATIONSERGEBNISSEN	77
8.1	ERFASSUNG DES STATISCHEN ORIENTIERUNGSFEHLERS	77
8.2	MESSUNG EINER GERADLINIGEN BAHN.....	78
8.3	VERGLEICH ZWISCHEN MESS- UND SIMULATIONSERGEBNIS	80
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	82
10	LITERATURVERZEICHNIS	84