

**Synthese komplexer Bahnbewegungen  
mittels Spline-Funktionen für die  
automatisierte Montage**

DISSERTATION

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau  
der  
Technischen Universität Ilmenau

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR  
(Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. André Heiser  
geboren am 20.9.1963 in Leipzig

Gutachter: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. K. Zimmermann, TU Ilmenau  
2. Prof. Dr.-Ing. habil. W. Holle, MODEST Suhl  
3. Dr.-Ing. A. Karguth, TETRA GmbH Ilmenau

eingereicht am: 3.6.2003

Wiss. Aussprache am: 14.11.2003

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	PROBLEMSTELLUNG .....	6
1.2	ZIEL DER ARBEIT .....	9
<b>2</b>	<b>ANALYSE ZUM STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>13</b>
2.1	ALLGEMEINES .....	13
2.2	BEGRIFFE UND DEFINITIONEN .....	14
2.2.1	Optimale Steueralgorithmen .....	14
2.2.2	Fügen, Handhaben und Montieren .....	15
2.2.3	Montagezyklus .....	16
2.2.4	Bahnsteuerung .....	16
2.2.5	Spline-Interpolation .....	17
2.3	UNTERSUCHUNG BEKANNTER VERFAHREN ZUR STEUERUNG VON ANTRIEBEN MITTELS POLYNOMSPLINES .....	17
2.3.1	Verfahren nach Denk, Maisser, Rothe / 1981 .....	18
2.3.2	Verfahren nach Castain, Paul / 1984 .....	19
2.3.3	Verfahren nach Bechtloff / 1993 .....	20
2.3.4	Verfahren nach Froissart, Mechler / 1993 .....	21
2.3.5	Verfahren nach Van Aken, Van Brussel / 1988 .....	22
2.3.6	Verfahren nach Lin, Chang / 1985 .....	23
2.3.7	Verfahren nach Bobrow / 1988 .....	24
2.3.8	Verfahren nach Thompson, Patel / 1985 .....	25
2.3.9	Ergänzende Bemerkungen .....	26
2.4	UNTERSUCHUNGEN ZUR ABLAUFPLANUNG IN INDUSTRIELLER UMGEBUNG .....	27
2.5	FORDERUNGEN FÜR DEN INDUSTRIELLEN EINSATZ .....	30
2.6	WERTUNG ZUM STAND DER TECHNIK .....	31
<b>3</b>	<b>TECHNOLOGISCHE MERKMALE DER BEWEGUNGEN IN MONTAGESYSTEMEN .....</b>	<b>33</b>
3.1	KENNGRÖSSEN, MERKMALE UND EINTEILUNG VON BEWEGUNGEN .....	34
3.2	MONTAGEZYKLUS .....	45
<b>4</b>	<b>KOMPONENTEN DER BEWEGUNGSUMSETZUNG .....</b>	<b>49</b>
4.1	HANDHABUNGSSYSTEME .....	49
4.1.1	Kinematische Struktur .....	51
4.1.2	Koordinatensysteme und Transformationen .....	53
4.1.3	Struktur der Antriebssysteme .....	56
4.2	STEUERUNGSPRINZIPIEN .....	57

4.2.1	Steuerungsniveaus .....	58
4.2.2	Arten der Bewegungssteuerung .....	61
4.2.3	Optimale und kollisionsfreie Steuerung .....	63
<b>5</b>	<b>ERARBEITUNG DES VERFAHRENS ZUR BAHNSTEUERUNG FÜR DEN MONTAGEZYKLUS .....</b>	<b>66</b>
5.1	PRINZIPIELLER AUFBAU .....	66
5.2	STEUERFUNKTIONEN UND INTERPOLATIONEN .....	68
5.2.1	Wegrafter-Interpolationen zur Erzeugung einer Stützpunktfolge .....	70
5.2.1.1	Linear-Interpolation .....	71
5.2.1.2	Kreis-Interpolation .....	72
5.2.1.3	Spline-Interpolation .....	73
5.2.1.4	B-Spline-Interpolation .....	79
5.2.1.5	Bezier-Interpolation .....	82
5.2.2	Zeitrafter-Interpolation zur Bewegung entlang einer Stützpunktfolge mittels Spline-Funktionen .....	85
5.2.2.1	Realisierung einer konstanten Bahngeschwindigkeit im Anschauungsraum .....	88
5.2.2.2	Realisierung einer zeitoptimalen Steuerung .....	90
5.2.2.3	Kombination von zeitoptimaler Steuerung und Steuerung mit konstanter Geschwindigkeit .....	92
5.2.3	Proportional-Interpolation zur Realisierung der NOT-AUS-Funktion .....	93
<b>6</b>	<b>TEST DER STEUERALGORITHMEN .....</b>	<b>97</b>
6.1	TEST DER STEUERALGORITHMEN AN EINEM SCARA-ROBOTER .....	97
6.1.1	Ermittlung der Optimalfolge möglicher IR-Konfigurationen .....	100
6.1.2	Zeitoptimale Punktsteuerung mit Spline-Funktionen .....	101
6.1.3	Übergang von Punkt- zu Bahnsteuerung .....	103
6.1.4	Untersuchungen zur Bahngenauigkeit .....	104
6.1.4.1	Bewegungen mit kleiner bzw. sehr kleiner Bahn- und Lagetoleranz .....	104
6.1.4.2	Bewegungen mit grosser bzw. sehr grosser Bahn- und Lagetoleranz .....	109
6.1.5	Dichtraupenauftrag mit einer Dosiernadel .....	113
6.1.6	Zeitoptimale Durchlaufung einer Freiformkurve .....	115
6.1.7	Vergleich der Bewegungszeiten .....	117
6.2	BEWERTUNG DER TESTERGEBNISSE .....	118
<b>7</b>	<b>ZWEI VERFAHREN ZUR PLANUNG KOLLISIONSFREIER BEWEGUNGEN IN DER MONTAGE .....</b>	<b>122</b>
7.1	BAHNSYNTHESE MITTELS B-SPLINES .....	123
7.1.1	Theoretische Grundlagen .....	123
7.1.2	Ergebnisse .....	126
7.2	BAHNSYNTHESE MITTELS BEZIER-KURVEN .....	128
7.2.1	Theoretische Grundlagen .....	128
7.2.2	Ergebnisse .....	131

