

# Fortschritt-Berichte VDI

**Reihe 8**

Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik.

Dipl.-Ing. Ulrich Brahms,  
Bad Niedernau

**Nr. 735**

**Regelung von  
Lineardirektantrieben  
für Werkzeugmaschinen**

BERICHTE AUS DEM  
INSTITUT FÜR  
FERTIGUNGSTECHNIK  
UND SPANENDE  
WERKZEUGMASCHINEN  
UNIVERSITÄT HANNOVER

**IFW**

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| Formelzeichen und Abkürzungen .....                                      | IX        |
| <b>1 Einführung</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>2 Stand der Kenntnisse</b> .....                                      | <b>3</b>  |
| 2.1 Maßnahmen zur Verbesserung dynamischer Eigenschaften .....           | 3         |
| 2.2 Prinzipvergleich Kugelgewindetrieb - Lineardirektantrieb .....       | 5         |
| 2.3 Der Linearmotor als Vorschubantrieb .....                            | 9         |
| 2.3.1 Aufbau und Bauformen von Linearmotoren .....                       | 9         |
| 2.3.2 Linear-Synchron- und Linear-Asynchronmotor .....                   | 12        |
| 2.3.3 Anforderungen und Problemstellungen im industriellen Einsatz ..... | 12        |
| 2.3.4 Kraftwelligkeit .....  | 14        |
| 2.3.4.1 Ursachen der Kraftwelligkeit .....                               | 14        |
| 2.3.4.2 Maßnahmen zur Reduktion der Kraftwelligkeit .....                | 15        |
| <b>3 Aufgabenstellung</b> .....  | <b>20</b> |
| 3.1 Problemstellung .....  | 20        |
| 3.2 Zielsetzung .....  | 21        |
| 3.3 Vorgehensweise .....   | 21        |
| <b>4 Einflußfaktoren bei der Lageregelung</b> .....                      | <b>23</b> |
| 4.1 Kraftwelligkeit .....  | 23        |
| 4.1.1 Rastkraft durch Endeffekte .....                                   | 23        |
| 4.1.2 Nutrastkraft .....   | 25        |
| 4.2 Steuerungsspezifische Einflußfaktoren .....                          | 26        |
| 4.2.1 Quantisierungseffekte .....  | 26        |
| 4.2.2 Einfluß des inkrementellen Wegmeßsystems .....                     | 27        |
| 4.2.3 Einfluß der Abtastzeit .....                                       | 33        |
| 4.3 Geschwindigkeitsverstärkung .....                                    | 34        |
| 4.3.1 Übliche Abschätzung des $K_V$ -Faktors .....                       | 35        |
| 4.3.2 Verfahren zur Bestimmung des $K_V$ -Faktors .....                  | 35        |
| <b>5 Identifikation und Modellbildung</b> .....                          | <b>38</b> |
| 5.1 Analytische Beschreibung der Strecke .....                           | 38        |
| 5.1.1 Modellierung des Servoverstärkers .....                            | 38        |
| 5.1.2 Modellierung des Motors .....                                      | 40        |
| 5.1.3 Beschreibung des Gesamtsystems .....                               | 41        |
| 5.2 Verfahren zur aktiven Linearisierung der Regelstrecke .....          | 41        |
| 5.2.1 Messung der immanenten Störkräfte .....                            | 43        |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.2.2 Entwurf eines Störkraftmodells .....                       | 44        |
| 5.2.2.1 Meßwertaufbereitung .....                                | 45        |
| 5.2.2.2 Parameteridentifikation.....                             | 45        |
| 5.2.2.3 Geschwindigkeitsabhängigkeit der Parameter .....         | 46        |
| 5.2.2.4 Validierung des Störkraftmodells.....                    | 50        |
| 5.2.3 Realisierung der Störkraftkompensation.....                | 52        |
| 5.2.4 Bewertung des Kompensationsverfahrens .....                | 53        |
| 5.3 Experimentelle Modellbildung durch Identifikation .....      | 55        |
| 5.3.1 Verfahren zur Kenngrößenermittlung.....                    | 56        |
| 5.3.1.1 Kenngrößenermittlung durch Sprungantwort.....            | 57        |
| 5.3.1.2 Verfahren zur Bestimmung der Schlittenmasse .....        | 58        |
| 5.3.2 Identifikation nichtparametrischer Modelle.....            | 61        |
| 5.3.2.1 Fourieranalyse.....                                      | 61        |
| 5.3.2.2 Frequenzgangmessung mit dem Korrelationsverfahren.....   | 63        |
| 5.3.2.3 Korrelationsanalyse.....                                 | 66        |
| 5.3.3 Identifikation parametrischer Modelle .....                | 68        |
| 5.3.3.1 Methode der kleinsten Quadrate .....                     | 69        |
| 5.3.3.2 Bestimmung des zeitkontinuierlichen Modells.....         | 71        |
| 5.3.3.3 Ergebnisse der Parameterschätzung .....                  | 72        |
| 5.3.4 Einflußfaktoren bei der Identifikation .....               | 73        |
| 5.3.4.1 Anregungssignal.....                                     | 73        |
| 5.3.4.2 Abtastzeit.....  | 75        |
| 5.4 Bewertung der Identifikationsergebnisse.....                 | 75        |
| <b>6 Untersuchung geeigneter Verfahren zur Lageregelung.....</b> | <b>76</b> |
| 6.1 Zustandsdarstellung des Antriebs .....                       | 76        |
| 6.2 Ermittlung der Zustandsgrößen.....                           | 77        |
| 6.2.1 Verfahren zur Ermittlung der Geschwindigkeit.....          | 78        |
| 6.2.1.1 Tachogeneratoren.....                                    | 78        |
| 6.2.1.2 Bildung des Differenzenquotienten .....                  | 78        |
| 6.2.1.3 Differentiation eines Ausgleichspolynoms .....           | 78        |
| 6.2.1.4 Tiefpaßdifferenzierer .....                              | 79        |
| 6.2.1.5 Vergleich der Berechnungsmethoden .....                  | 80        |
| 6.2.2 Zustandsbeobachter .....                                   | 81        |
| 6.2.2.1 Vollständiger Zustandsbeobachter.....                    | 82        |
| 6.2.2.2 Reduzierter Zustandsbeobachter .....                     | 83        |
| 6.2.3 Kalman-Filter.....   | 84        |
| 6.2.4 Ergebnisse der Zustandsschätzung.....                      | 85        |
| 6.3 Störkraftschätzung .....                                     | 87        |
| 6.3.1 Störkraftbeobachter .....                                  | 88        |

|   |            |
|---|------------|
| 6.3.2 Kalman-Filter zur Störkraftschätzung.....                 | 88         |
| 6.3.3 Ergebnisse der Störkraftschätzung.....                    | 89         |
| 6.4 Lageregelstrukturen .....                                   | 90         |
| 6.4.1 Kaskadenregelung.....                                     | 91         |
| 6.4.2 Zustandsregelung .....                                    | 93         |
| 6.4.2.1 Entwurfsmethoden .....                                  | 93         |
| 6.4.2.2 Grundstruktur der Zustandsregelung.....                 | 94         |
| 6.4.3 Berücksichtigung von Störgrößen.....                      | 96         |
| 6.4.3.1 Erweiterung des Zustandsreglers um einen PI-Regler..... | 96         |
| 6.4.3.2 Einsatz von Verfahren zur Störgrößenschätzung.....      | 97         |
| 6.4.3.3 Regeleigenschaften mit Integralverhalten .....          | 98         |
| 6.4.3.4 Vergleich der Maßnahmen zur Störgrößenunterdrückung ..  | 99         |
| 6.4.4 Vorsteuerung .....  | 100        |
| 6.4.4.1 Vorsteuerung mit Transversalfilter .....                | 101        |
| 6.4.4.2 Vorsteuerung mit rekursivem Filter.....                 | 102        |
| 6.4.4.3-Regeleigenschaften mit Vorsteuerungsverfahren .....     | 104        |
| 6.4.4.4 Bewertung der Vorsteuerungsverfahren .....              | 106        |
| 6.5 Abschließende Beurteilung .....                             | 106        |
| <b>7 Selbsteinstellende Regelung.....</b>                       | <b>107</b> |
| 7.1 Konzept der selbsteinstellenden Regelung .....              | 107        |
| 7.2 Schritte der automatisierten Inbetriebnahme .....           | 109        |
| 7.2.1 Störkraftidentifikation und -kompensation.....            | 109        |
| 7.2.2 Systemidentifikation.....                                 | 111        |
| 7.2.3 Formulierung von Entwurfsanforderungen.....               | 112        |
| 7.2.4 Regleroptimierung.....                                    | 114        |
| 7.2.5 Ergebnisse .....  | 115        |
| 7.2.6 Abschließende Beurteilung.....                            | 118        |
| <b>8 Versuchsstand.....</b>                                     | <b>119</b> |
| 8.1 Beschreibung der Regelstrecke .....                         | 120        |
| 8.1.1 Linearmotor.....  | 120        |
| 8.1.2 Servoverstärker.....                                      | 121        |
| 8.2 Hardwarestruktur des Steuerungsrechners.....                | 122        |
| 8.3 Softwarestruktur .....                                      | 124        |
| <b>9 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>                      | <b>125</b> |
| <b>10 Literaturverzeichnis.....</b>                             | <b>128</b> |