

Bernd Singer :“Adaptive Regelung eines Vorschubsystems mit nicht meßbaren Störgrößen.“ Darmstädter Dissertation 1995 (Übersicht)

Herr Singer untersucht Regelungs- und Steuerungsverfahren (Aufschaltungen) für die Positionsregelung von Vorschubeinheiten, die z.B. bei Werkzeugmaschinen verwendet werden. Je nach Materialpaarung können dort Reibkräfte zwischen dem bewegten Schlitten und seiner Führung auftreten, die gegebenenfalls stark nicht linearen Charakter und teilweise auch Kennlinienabschnitte mit negativer Steigung haben. Bei hochwertigen Maschinenkonstruktionen spielen diese Einflüsse jedoch eine geringere Rolle, in jedem Fall treten Störgrößen in Form von Bearbeitungskräften auf.

Eines der Ziele ist es daher die Summe der Reib- und Bearbeitungskräfte mit Hilfe der ohnehin gemessenen Größen wie Schlittenposition und Drehwinkel der Motorwelle zu ermitteln und im Sinne einer Störgrößenaufschaltung dem Stellglied aufzuschalten.

Hierzu wird zunächst in Kapitel 2 die gegebene Hardware des Vorschubsystems beschrieben. Bei der fertig vorgegebenen Einheit dient als Antrieb ein Gleichstrommotor, der über einen netzgeführten, kreisstromfreien Umkehrstromrichter gespeist wird. Die elektrische Antriebstechnik dieser vorgegebenen Hardware entspricht aufgrund des netzgeführten Umkehrstromrichters nicht mehr den heute in der Werkzeugmaschinenpraxis üblichen dynamischen Eigenschaften. Hier liegt ein gewisses Handicap, es hätte jedoch den Umfang der mehr regelungstechnisch orientierten Aufgabenstellung gesprengt, wenn Herr Singer zusätzlich eine moderne elektrische Antriebstechnik realisiert hätte. Zur Umsetzung der rotatorischen Bewegung der Motorwelle in die translatorische Bewegung des Maschinenschlittens dient eine Kugelumlaufspindel. Zwei gegeneinander verspannte Spindelmuttern übertragen die Kraft spielfrei auf den Schlitten. Die Kugelumlaufspindel ist motorseitig gelagert. Die Federsteifigkeit des mechanischen Übertragungssystems ändert sich in Abhängigkeit des Ortes, an dem sich der Schlitten befindet. Bei einer realen Werkzeugmaschine ändert sich zusätzlich die Masse, die auf den Schlitten aufgespannt ist (Werkstücke, Werkzeuge).

Es stehen drei direkt gemessene Größen zur Verfügung:

- 1) Der Drehmoment proportionale Ankerstrom des Gleichstrommotors (I_A),
- 2) der mit einem hochauflösenden optisch abgetasteten Inkrementalgeber gemessenen Winkel der Motorwelle (φ) und
- 3) die Position (y) des Schlittens, die mit einem hochauflösenden, optisch abgetasteten Linearmesssystem erfaßt wird.

Zur Modellbildung kann der Antriebsstrang von Motorwelle bis zum Schlitten als System mit konzentrierten Parametern bestehend aus vier elastisch gekoppelten Massen betrachtet werden. Aufgrund teilweise sehr hoher Federsteifigkeiten können vereinfachend verschiedene Massen so zusammengefaßt werden, daß sich resultierend nur ein Zweimassenschwinger ergibt, wobei die einwirkende Reibkraft über eine nichtlineare Kennlinie in Abhängigkeit der Schlittengeschwindigkeit modelliert wird. Die von Herrn Singer bearbeitete Regelstrecke beginnt mit dem Sollwert des Ankerstromes (I_A^*) für den Gleichstromantrieb. Somit ist als innerste Regelschleife stets die in dem handelsüblichen Umkehrstromrichter implementierte Stromregelung wirksam. Dies gilt auch für die später behandelten Zustandsregelungen.

Bei der Aufstellung der Zustandsgleichungen der Regelstrecke wird die nichtlineare Reibkraftkennlinie weggelassen, die Summe aus Reib- und Bearbeitungskraft wird später identifiziert und aufgeschaltet. Es ergibt sich ein lineares Differentialgleichungssystem mit den fünf Zustandsvariablen

- 1) Ankerstrom (I_A)
- 2) Winkelgeschwindigkeit des Motorläufers (ω),
- 3) Winkel des Motorläufers (φ),
- 4) Schlittengeschwindigkeit (v) und
- 5) Schlittenposition (y) (Gleichung 2.13).

Die Parameter dieses linearen Gleichungssystems sind jedoch nicht alle konstant, sondern die Federsteifigkeit der wirksamen Spindellänge hängt vom Ort des Schlittens ab und in Realität kann sich die auf den Schlitten aufgespannte Masse ändern.

Die zentralen Gebiete des theoretischen Teils der Arbeit von Herrn Singer sind:

- A) Identifikation der Parameter der Regelstrecke und
- B) Entwurf von Reglern sowie
- C) Störgrößenaufschaltung unter Verwendung der identifizierten Streckenparameter.

A) Identifikation

Für die zu untersuchenden Regler werden grundsätzlich Abtastregler angesetzt. Dies bedeutet, daß für die verschiedenen Reglerentwürfe die Parameter von zeitdiskreten Streckenmodellen (z-Bereich) benötigt werden. Die Störgrößenaufschaltung hingegen benötigt physikalische Parameter des kontinuierlichen Systems (s-Bereich), wie Federsteifigkeit, Masse und gegebenenfalls Dämpfung. Daraus ergibt sich eine gewisse Zweigleisigkeit hinsichtlich der Identifikation der Regelstrecke. Die am Schluß der Arbeit gezeigten Versuchsergebnisse basieren darauf, daß für den Reglerentwurf ein Streckenmodell im z-Bereich identifiziert wird und gleichzeitig die für die Störgrößenaufschaltung benötigten physikalischen Parameter (Masse, Federsteifigkeit) aus Übertragungsfunktionen stammen, die im s-Bereich identifiziert werden. Eine Umrechnung der Parameter zwischen den beiden Bereichen wird zwar auch diskutiert, scheint aber vom Aufwand her ungünstiger als das doppelte Identifizieren zu sein.

In Kapitel 4 wird ein äußerst knapper Abriss über die verwendeten Identifikationsverfahren gegeben. Basis ist die klassische Methode der kleinsten Quadrate, die zur „quasi-online“-Identifikation in rekursive Form gebracht wird, damit keine Matrixinversionen anfallen. Die Identifikation des zeitdiskreten Streckenmodells, das für den Reglerentwurf benötigt wird, soll nicht nur einmalig bei der ersten Inbetriebnahme erfolgen. In diesem Fall könnte die Regelstrecke durch große Stromsollwert-Änderungen hinreichend angeregt werden um eine zuverlässige Parameteridentifikation zu gewährleisten. Die Identifikation soll vielmehr auch quasi-online, d. h. im geschlossenen Regelkreis ablaufen. Hierbei sind im Stationärzustand, z. B. bei konstanter Verfahrengeschwindigkeit des Schlittens, die Stromsollwertänderungen sehr klein, so daß die Strecke nur sehr schwach angeregt wird was zu entsprechend schlechten Schätzergebnissen der Streckenparameter führt. Um die numerischen Eigenschaften des Schätzverfahrens zu verbessern, wird die rekursive Methode der kleinsten Quadrate zum diskreten Wurzelfilterverfahren modifiziert, bei dem nicht direkt der Parametervektor Θ geschätzt wird, sondern die Koeffizienten eines in oberer Dreiecksform vorliegenden linearen Gleichungssystems. Aus diesem läßt sich leicht der Parametervektor ermitteln.

In der sehr knappen Darstellung von Herrn Singer sind allerdings die beiden prinzipiell unabhängigen Schritte, nämlich

I. Erzeugen eines rekursiven Algorithmusses für die Methode der kleinsten Quadrate und

II. Verbesserung ihrer numerischen Eigenschaften durch das Wurzelfilterverfahren

zusammengemischt und nur anhand der Realisierungsform als Householder-Transformation dargestellt. Damit steht zunächst ein Algorithmus zur Schätzung der Koeffizienten des Zähler- und des Nennerpolynoms der z-Übertragungsfunktion Regelstrecke zur Verfügung. Für eine Kaskadenregelung, die später entworfen wird, ist im ersten Schritt die Regelstrecke, die der Drehzahlregler „sieht“, zu identifizieren. Nachdem die optimalen Reglerparameter (siehe später) des Drehzahlreglers gefunden sind, kann dann die Regelstrecke des Lagereglers identifiziert werden.

Neben der Kaskadenregelung wird auch eine Zustandsregelung entworfen. Hierzu werden die Elemente a_{ik} der zeitdiskreten Zustandsmatrix sowie die Koeffizienten b_i des Steuervektors benötigt. Auf jede der fünf Zeilen der zeitdiskreten Zustandsraumgleichungen wird das zuvor für zeitdiskrete Übertragungsfunktionen beschriebene Identifikationsverfahren mit Wurzelfilterung angewendet. Damit lassen sich die Koeffizienten der Systemmatrix \underline{A} (5 x 5) und die des Eingangsvektors \underline{b} ermitteln. Diese werden für den noch zu besprechenden Entwurf des zeitdiskreten Zustandsreglers benötigt.

Für die Störgrößenaufschaltung (Reibkraft + Bearbeitungskraft) werden einige physikalische Prozeßparameter (Federsteifigkeit, Masse, Dämpfung) benötigt. Diese werden durch Identifikation von Übertragungsfunktionen im Laplace-Bereich gewonnen. Grundsätzlich wird dabei das gleiche Identifikationsverfahren wie bei zeitdiskreten Streckenmodellen verwendet. Allerdings werden im Laplace-Bereich nicht die Folge der um k-Abtastschritte zurückliegenden Ein- und Ausgangsgrößen benötigt sondern die ersten k-Ableitungen dieser Größen. Diese stehen zunächst nicht zur Verfügung und können auch nicht in allen Fällen durch numerische Differenzenbildung aus Abtastwerten mit hinreichender Genauigkeit gebildet werden. In diesem Fall wendet man die Methode der Zustandsvariablen Filterung an. Dazu wird das Eingangssignal und das Ausgangssignal der zu identifizierenden Strecke in je ein identisches Filter geleitet, das eine Kettenschaltung von Integratoren enthält, die auf den Filtereingang rückgeführt sind (Regelungsnormform). An den Eingängen dieser Integratoren stehen die Ableitungen des Filter-Ausgangssignales zur Verfügung.

Ein- und Ausgangssignale der zu identifizierenden Strecke sind die jeweils höchsten Ableitungen (=Eingänge) des eingangsseitigen und des ausgangsseitigen Zustandsvariablen - Filters. Da in der Realisierung (Signalprozessor) keine analogen Integratoren verwendet werden, wird die Filtergleichung über die Transitionsmatrix diskretisiert und die Zustandsvariablen - Filterung im Signalprozessor des Antriebes digital durchgeführt.

B) Reglerentwürfe

B1) Kaskadenregelung

Für den zeitdiskreten Drehzahlregler wird ein PI-Regler und für den zeitdiskreten Lageregler ein P-Regler angesetzt. Dies entspricht den auch im kontinuierlichen Fall verwendeten Reglerstrukturen. Zur Einstellung der Parameter der zeitdiskreten Regler beschreibt Herr Singer zwei Möglichkeiten:

- 1) Ein zeitdiskretes Ziegler-Nichols-Verfahren. Dabei wird allerdings mit der realen Regelstrecke kein Schwingversuch durchgeführt sondern die zum Entwurf benötigte kritische Verstärkung und Periodendauer der sich einstellenden Dauerschwingung werden analytisch aufgrund der zuvor identifizierten zeitdiskreten Streckenübertragungsfunktion ermittelt. Da die auf den zeitdiskreten Fall übertragenen Einstellregeln von Ziegler-Nichols ein sehr starkes Überschwingen hervorrufen, wird zusätzlich die Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises simulatorisch ermittelt und die Verstärkung dabei iterativ solange zurückgenommen, bis eine vorgegebene Überschwingsweite nicht mehr überschritten wird.
- 2) Als zweites Einstellverfahren für die Parameter des zeitdiskreten PI-Drehzahl- bzw. zeitdiskreten P-Lagereglers wird die numerische Parameteroptimierung angegeben. In die zu minimierende Verlustfunktion gehen die Quadrate der zurückliegenden Regelabweichungen sowie die Quadrate der Stellgrößenänderungen (Stromsollwert - Änderungen) ein. Zur Berechnung des Wertes der Verlustfunktion wird keine numerische Simulation benötigt, sondern es wird ein in der Literatur angegebener, rekursiver Algorithmus angewendet. Ausgehend von einem Anfangswert der Reglerparameter wird damit der Wert der Verlustfunktion ermittelt. Die Reglerparameter werden anschließend nach dem Suchverfahren von Hooke-Jeeves variiert und damit nach einigen Durchläufen das Optimum der Reglerparameter (Minimum der Verlustfunktion) gefunden.

Das Führungsverhalten des geschlossenen Lageregelkreises kann durch Hinzufügen einer Geschwindigkeitsvorsteuerung deutlich verbessert werden. Diese Maßnahme wird durch Differenzbildung zweier aufeinander folgender Lage-Sollwert-Abtastungen realisiert.

B2) Zustandsregelung

Zusätzlich zu den bisher besprochenen Kaskadenregelungen hat Herr Singer die zeitdiskrete Zustandsregelung untersucht und im Versuchsaufbau implementiert. Günstig beim vorliegenden Aufbau ist, daß alle Zustandsgrößen entweder direkt meßbar sind oder wie im Fall der Geschwindigkeiten (ω bzw. v) aus den Positionswerten (ϕ bzw. y) durch numerisches Differenzieren gewonnen werden können. Damit kann auf einen Zustandsbeobachter verzichtet werden. Das Problem ist die Ermittlung der „optimalen“ Werte der fünf Rückführkoeffizienten des Zustandsreglers. Dies führt auch hier auf die Minimierung einer quadratischen Verlustfunktion. In diese geht die gewichtete Summe der Quadrate der Zustandsgrößen selbst sowie das Quadrat der gewichteten Stellgröße (I_A^*) ein. Der Freiheitsgrad besteht in der Festlegung der Gewichtungsfaktoren. Herr Singer hat dann gute Ergebnisse erzielt, wenn die Zustandsgrößen Schlittenposition (y) und Winkel der Motorwelle (ϕ) um mehrere Größenordnungen höher gewichtet werden als die übrigen drei Zustandsgrößen. Zur Ermittlung der optimalen Rückführkoeffizienten existieren in der Literatur mehrere Verfahren, Herr Singer verwendet das bei Isermann angegebene Verfahren von Kalman und Koepke (1958), das -wie andere Wege auch (z.B. Föllinger, Ackermann) - die Lösung einer Matrix - Riccati- Gleichung beinhaltet. Der numerische Aufwand dabei ist erheblich, so daß trotz Verwendung eines schnellen Signalprozessors mit Gleitkommaarithmetik die Rechenzeit für den Entwurf des Riccati-Reglers über 3,5 Sekunden dauert, was die Möglichkeit der on-line Adaption einschränkt. Während bei der Kaskadenregelung die Lageregelabweichung bei konstantem Lagesollwert stationär verschwindet, ist dies bei der Zustandsregelung nur dann der Fall, wenn der Lagesollwert mit einem exakt bestimmten Vorfaktor gewichtet wird. In den Vorfaktor gehen alle Parameter des identifizierten, zeitdiskreten Zustandsmodells der Strecke sowie die Reglerparameter ein. Somit hängt auch die stationäre Lageabweichung, die ja bei Werkzeugmaschinen sehr klein sein muß, von der Qualität der Parameterschätzung ab. Da der Zustandsregler auf günstiges Einschwingen nach einer Anfangs-Auslenkung ausgelegt ist, kann das Führungsverhalten noch weiter verbessert werden. Eine Maßnahme dazu ist die von Herrn Singer ausgeführte Geschwindigkeitsvorsteuerung.

C) Störgrößenaufschaltung

Die Bilanz der am Schlitten angreifenden Kräfte ergibt, daß die Summe der unbekanntem Bearbeitungs- und Reibkräfte gleich der Summe aus der Trägheitskraft des Schlittens und der über die Spindel in den Schlitten eingeleiteten Kraft ist. Letztere ergibt sich aus der Torsion der Spindel mal der (identifizierten) Torsionssteifigkeit. Die Torsion folgt aus den Meßwerten des Rotorlagewinkels (ϕ) und der Schlittenposition (y). Zur Bestimmung der Trägheitskraft wird die (identifizierte) Schlittenmasse und die Beschleunigung benötigt. Letztere wird durch zweimaliges numerisches Differenzieren aus der gemessenen Schlittenposition gewonnen. Die auf diese Weise berechnete Kräftesumme wird über ein digitales Filter geglättet und in einen Aufschaltungs - Stromsollwert (I_{komp}) umgerechnet. Die praktische Erfahrung am Versuchsaufbau lehrte, daß die Aufschaltung nur aktiviert sein sollte, wenn sowohl der Sollwert der Schlittengeschwindigkeit als auch der Betrag der Lageregelabweichung noch größer als vorzugebende Mindestwerte (ϵ_3 bzw. ϵ_2) sind. Darüber hinaus zeigte sich, daß für die Aufschaltung die berechnete Kräftesumme bei stillstehendem Schlitten (Einmassenschwinger) anders als bei bewegtem Schlitten (Zweimassenschwinger) zu gewichten ist.

Zum Übergang des bisher behandelten theoretischen Teiles der Arbeit auf die abschließenden Untersuchungen am Versuchsaufbau wird das Gesamtsystem mit einem eigens entwickelten digitalen **Simulationsprogramm** (Kap. 7) nachgebildet. Dieses muß drei Aufgaben erfüllen:

- 1) Bei Integration des linearen Teils der zeitkontinuierlichen Zustands - Differentialgleichungen der Strecke wird durch das Fehlberg - Verfahren (Kombination aus Runge - Kutta 3.- und 4.-Ordnung) ein aussagekräftiges Fehlerkriterium zur Steuerung der Schrittweite eingesetzt.
- 2) Die Regler und die Störgrößen - Aufschaltung werden im Raster fester Abtastschritte berechnet (zeitdiskretes Teilsystem). Die Steuerung der Integrationsschrittweite des zeitkontinuierlichen Systemteils wird auf die festen Abtastzeitpunkte synchronisiert.
- 3) Zur Simulation der nichtlinearen Reibungscharakteristik sind besondere Maßnahmen erforderlich. Der Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung stellt eine Diskontinuität dar; der Zeitpunkt dieser Diskontinuität muß iterativ durch Intervallteilungen (wie bei der Simulation schaltender Ventile in Stromrichterschaltungen) bestimmt werden.

Für den Versuchsaufbau wird ein **Rechnersystem** benötigt, das die umfangreichen Regelungs- und Steuerungsaufgaben einschließlich der quasi - online Identifikation der Strecke und der Neuberechnung der Reglerparameter durchführt. Für den Rechnerkern konnte Herr Singer auf extern gefertigte Multilayer - Leiterplatten des 32-bit Gleitkomma - Signalprozessors TMS320C30 zurückgreifen, die in der Arbeit Probst am Institut für Stromrichtertechnik und Antriebsregelung entwickelt wurden. Herr Singer verwendet zwei Signalprozessoren die als Master und Slave über ein Dual - Port - RAM (DPRAM) gekoppelt sind. Der Master übernimmt alle Echtzeitaufgaben wie Regelung, Steuerung, Schutz, wobei er alle Ein- und Ausgaben zum Prozeß durchführt. Die Zykluszeit der Abtastregelung beträgt 500µs. Die Istwerterfassung der Schlittenposition und des Rotorwinkels sind komplexe Eingabefunktionen, die sich z.T. auf spezielle Hardware abstützen. Rotorlagegeber und Linearmaßstab sind optisch abgetastete Incrementalgeber, die beide durch Auswertung der analogen Ausgangssignale hoch aufgelöste Lageinformationen liefern.

Dem über das DPRAM angeschlossene Slave - Signalprozessor werden online jeweils 250 Sätze konsistenter Abtastwerte der Zustandsgrößen und des Stromsollwertes im DPRAM vom Master übergeben. Daraufhin führt der Slave die Identifikation der Streckenparameter und bei größeren Parameteränderungen auch die Neuberechnung der Reglerparameter durch. Im Falle der Zustandsregelung kann die Identifikation mit anschließender Neuberechnung des Riccati - Reglers bis zu 3,5 Sekunden dauern. Die entsprechenden Zeiten für die Kaskadenregelung sind wesentlich kürzer.

Im letzten Kapitel werden die am Versuchsaufbau gewonnenen **Meßergebnisse** diskutiert.

Zunächst zeigen die **Identifikationsergebnisse**, daß die Reibkraftkennlinie des Versuchstandes aufgrund hochwertiger Maschinenkonstruktion keine Abschnitte mit negativer Steigung besitzt. Dies ist insofern bedauerlich, als die zu erwartenden Stärken des Verfahrens nicht voll zur Geltung kommen.

Die identifizierten Streckenparameter zeigen in allen Fällen, d.h. beim Identifizieren

- a) der z-Übertragungsfunktion,
- b) der zeitdiskreten \underline{A} -Matrix und
- c) der s-Übertragungsfunktion (daraus Masse und Federsteifigkeit)

schnelle Konvergenz mit anschließendem glatten Verlauf.

Die weiteren Meßergebnisse betreffen das **Führungsverhalten** bei rampenförmiger Änderung des Lagesollwertes. Da am Versuchstand dem Schlitten keine Bearbeitungskraft aufgeprägt wird, kann das Störverhalten nicht gezeigt werden.

Kaskadenregelung: Die Geschwindigkeitsvorsteuerung alleine verkleinert zwar den Schleppabstand, führt aber zum Überschwingen beim Positionieren. Die Störgrößenaufschaltung (Reibkraftkompensation) alleine beläßt einen Schleppabstand, positioniert aber überschwingungsfrei. Gleichzeitiger Einsatz von Geschwindigkeitsvorsteuerung und Störgrößenaufschaltung gibt überschwingungsfreies Positionieren bei sehr geringem Schleppfehler.

Zustandsregelung: Um ein vergleichbar gutes Führungsverhalten zu erzeugen muß auch bei der Zustandsregelung die Geschwindigkeitsvorsteuerung und die Störgrößenaufschaltung eingesetzt werden. In diesem Fall bringen Kaskaden- und Zustandsregelung praktisch gleiches Führungsverhalten. Die Zustandsregelung mit einem auf 4.-te Ordnung reduzierten Modell (ohne die Zustandsgröße I_A) liefert erkennbar schlechteres Führungsverhalten als die Kaskadenregelung.

Da die zu erwartenden Stärken am Versuchsaufbau nicht voll zum tragen kommen, wird abschließend **simulatorisch** gezeigt, daß

- a) bei Reibkraftkennlinien mit Abschnitten negativer Steigung ohne Störgrößenaufschaltung ein ausgeprägtes Ruck - Gleiten (stick - slip) beim Bewegen des Schlittens auftritt, das mit der Störgrößenaufschaltung vollständig beseitigt wird und
- b) das Störverhalten (Sprung einer Bearbeitungskraft) der Zustandsregelung besser als das Störverhalten der Kaskadenregelung ist.

