

## 12. Zusammenfassung

Das günstige Leistungsgewicht hydraulischer Antriebe ermöglicht eine sehr hohe Eigendynamik. Sie haben andererseits aber eine niedrige Laststeifigkeit und ein schlechtes Dämpfungsverhalten. Um gegenüber den Entwicklungen auf dem Gebiet elektrischer Antriebe konkurrenzfähig zu bleiben, müssen diese Nachteile hydraulischer Systeme mit regelungstechnischen Maßnahmen auf der Signal-seite verringert werden.

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluß des Regelungskonzepts und der Kenngrößen des Systems Stellglied-Motor-Last auf das Verhalten eines lagegeregelten hydraulischen Antriebs untersucht. Im einzelnen zeigten sich folgende Ergebnisse.

Das Verhalten eines lagegeregelten Antriebs mit P-Regler ist in aller Regel nicht zufriedenstellend. Bei schlecht gedämpften Antrieben ermöglichen verzögernd eingreifende P-T<sub>1</sub>- bzw. PP-T<sub>1</sub>-Regler ein günstigeres Einschwingverhalten wie auch eine geringfügig höhere Laststeifigkeit. Erst bei besser gedämpften Antrieben mit einer Systemdämpfung  $D_H > 0,3$  ist der Einsatz eines PD-Reglers vorteilhaft.

Höhere Anforderungen an das Verhalten schlecht gedämpfter Antriebe lassen sich nur mit mehrschleifigen Regelungskonzepten erfüllen. Liegt die Systemdämpfung bei Werten  $D_H < 0,2$ , empfiehlt sich eine Beschleunigungsrückführung. Die Geschwindigkeitsrückführung ermöglicht zwar auch gegenüber dem einschleifigen Lageregelkreis mit P-Regler eine Verbesserung des Systemverhaltens. Es ist bei schlecht gedämpften Antrieben jedoch schlechter als das Systemverhalten, das sich mit einer unterlagerten Beschleunigungsrückführung ergibt. Erst ab Systemdämpfungen  $D_H > \text{circa } 0,35$  ist die Geschwindigkeitsrückführung einer Beschleunigungsrückführung vorzuziehen. Die kombinierte Geschwindigkeits- und Beschleunigungsrückführung bringt nochmals eine Verbesserung des Systemverhaltens, sowohl gegenüber den ein- wie auch zweischleifigen Regelungskonzepten. Dieses gilt insbesondere für die Laststeifigkeit hydraulischer Antriebe. Eine Erweiterung der Hilfsregelschleifen um z. B. die Stellwegrückführung ermöglicht insbesondere bei schlecht gedämpften Antrieben eine

geringfügig bessere Systemdämpfung. Dagegen war eine deutliche Erhöhung der Kreisverstärkung, wie sie die lineare Theorie der Zustandsregelung erwarten läßt, nicht zu erzielen. Die Ursache hierfür ist in den Nichtlinearitäten des Stellsystems, insbesondere der begrenzten Stellweggeschwindigkeit zu sehen. Diese Nichtlinearitäten wirken sich bei Kompensationsgliedern -wie z. B. dem PID-Geschwindigkeitsregler in einer Kaskadenregelung- noch nachteiliger aus, so daß die Regelqualität eines linearen Modells nicht erreicht wird. Aus dem gleichen Grunde ist für unendlich hohe Laststeifigkeit der Regelung mit unterlagertem PID-Geschwindigkeitsregler ein mehrschleifiger Lageregelkreis mit zusätzlichem Integralanteil im Lageregler vorzuziehen. Wirkt der Sollwert  $w$  nur abgeschwächt auf den Proportionalanteil des PI-Lagereglers, so verschlechtert der Integralanteil das Führungsverhalten des Antriebs nur wenig. Gegenüber einer zusätzlichen Störgrößenbeobachtung und Störgrößenaufschaltung erfordert dieses Konzept nur einen geringen zusätzlichen Aufwand.

Die Hilfsregelgrößen zum Aufbau mehrschleifiger Regelkreise lassen sich Beobachtermodellen entnehmen. Hier bewährt es sich, die Zustandsgrößen hinter dem Summenpunkt zu definieren, auf den der Beobachtungsfehler rückgekoppelt wird. Dieses ermöglicht unter Inkaufnahme eines höheren Rauschanteils eine relativ hohe Unempfindlichkeit des Beobachters gegenüber Struktur- und Parameterfehlern. Soweit der Beobachter nicht als Teilbeobachter aufgebaut ist, sollte das Stellglied zumindest durch ein Verzögerungsglied 1. Ordnung im Modell berücksichtigt werden. Gegenüber den entsprechenden vollständigen Beobachtern zeigen sich reduzierte Beobachter deutlich empfindlicher gegenüber Modellfehlern. Der in dieser Arbeit entwickelte reduzierte Beobachter, der gegenüber dem klassischen Ansatz keinerlei Transformationen erforderlich macht, ist daher nur bei hoher Modellgenauigkeit oder der Forderung nach geringstmöglichem Realisierungsaufwand -bei Analogschaltungen- bzw. kleinstmöglichen Rechenzeiten -bei digitaler Ausführung- zu empfehlen.

Die Qualität des Geschwindigkeits- und Beschleunigungssignals aus einem gut abgestimmten Beobachter ist deutlich besser als die entsprechender Signale, die durch ein- bzw. zweifache Differentiation

des Lagesignals gewonnen werden. Eine Verbesserung der Signalqualität differenzierter Signale ist aber bei Einsatz von Differenziergliedern denkbar, deren Filtercharakteristik dem jeweiligen Antrieb angepaßt ist. Denn auch bei Beobachtern mit größeren Modellabweichungen werden die Signale vornehmlich durch die Rückkopplung des Beobachtungsfehlers generiert und weniger durch die Vorwärtsstrecke des Modells. Unter diesen Bedingungen ist die Signalqualität des Beobachters abhängig von seinem Stör- bzw. Differenzierverhalten.

Abgesehen von einigen Ausnahmen setzt eine gute Regelqualität ein ideal schnelles Stellglied voraus. Diese Forderung läßt sich in aller Regel hinreichend mit Servoventilen, dagegen nur bedingt mit Servopumpen erfüllen. Für Antriebe großer Leistung wird daher die Parallelschaltung dieser beiden Stellglieder vorgeschlagen. Durch ein entsprechendes Steuerungskonzept auf der Signalseite lassen sich die Vorteile -hohe Eigendynamik des Servoventils und guter Wirkungsgrad der Pumpensteuerung- vereinen und gleichzeitig die Nachteile -schlechter Wirkungsgrad der Ventilsteuerung und schlechte Eigendynamik handelsüblicher Pumpen- gering halten.