

## 10. Zusammenfassung

Thema der Arbeit sind energiesparende, elektrohydraulische Antriebe im offenen Kreislauf, also ventilgesteuerte und sekundärgeregelte Antriebe, bei denen mehrere Motoren parallel aus einer Druckquelle gespeist werden.

Der Energiespareffekt beruht bei allen beschriebenen Antrieben darauf, daß der Versorgungsdruck nicht konstant ist, sondern mit einer Verstellpumpe auf einen Wert eingestellt wird, bei dem alle Motoren gerade ausreichend versorgt sind. Damit werden bei ventil gesteuerten Antrieben die Drosselverluste im Leistungsteil vermindert. Sekundärgeregelte Motoren arbeiten bei angepaßtem, also kleinerem Versorgungsdruck, ebenfalls in einem Betriebspunkt mit einem höheren Wirkungsgrad.

Eine bekannte hydraulische Verschaltung, welche eine Anpassung des Versorgungsdruckes bei ventilgesteuerten Verbrauchern vorsieht, ist das Load Sensing (Lastfühlen), bei dem der Versorgungsdruck auf einen Wert geregelt wird, der um einen bestimmten Betrag über dem höchsten gemessenen Lastdruck liegt. Das Load Sensing ist in der Mobilhydraulik weit verbreitet; dabei werden zur Versorgung üblicherweise LS-Pumpen mit hydraulisch-mechanischen Reglern und zur Ansteuerung der Motoren Stromregelventile eingesetzt (Kapitel 2).

Das hydraulisch-mechanische Load Sensing ist der Ausgangspunkt für die im Rahmen der Arbeit entwickelten elektrohydraulischen Antriebe.

Zunächst ist der hydraulisch-mechanische Signalfluß durch eine digitale Signalverarbeitung ersetzt worden. Zur Versorgung wird eine Verstellpumpe eingesetzt, die in einem Druckregelkreis betrieben wird, der Verbraucher ist ein Rotationsmotor im Geschwindigkeitsregelkreis, der von einem 4/3-Wege-Regelventil angesteuert wird. Durch den Einsatz der Elektronik sind Reglerstrukturen möglich, die ein deutlich verbessertes dynamisches Verhalten des gesamten Antriebs ermöglichen.

Da beim Load Sensing mindestens zwei Regelkreise -einer für den Versorgungsdruck und ein zweiter für die Geschwindigkeit des Motors- gleichzeitig betrieben werden, wobei die Regelkreise stark miteinander gekoppelt sind, wird das Load Sensing als Mehrgrößensystem aufgefaßt. Die Grundlagen der aus der Regelungstechnik bekannten Mehrgrößenregelung werden in Kapitel 4 am Beispiel des Load Sensing erläutert. In Kapitel 5 werden Reglerstrukturen für das Load Sensing hergeleitet, Meßergebnisse werden in Kapitel 6 vorgestellt.

Ein Nachteil des Load Sensing ist der hohe Aufwand zur Ermittlung des höchsten Lastdruckes, nach dem sich der Versorgungsdruck richten muß.

Wenn die Verbraucher in geschlossenen Regelkreisen betrieben werden, kann neben dem Lastdruck das Stellsignal des Regelkreises als Maß für eine ausreichende Versorgung genutzt werden. In Kapitel 7 wird ein entsprechendes Verfahren vorgestellt; dabei wird der Versorgungsdruck ventil gesteuerter Verbraucher im Geschwindigkeitsregelkreis auf einen Wert geregelt, bei dem die Regelventile an den

Motoren maximal zu 70% geöffnet sind. Damit ist eine gerade ausreichende Versorgung aller Motoren sichergestellt.

Ein weiterer Nachteil des Load Sensing und auch der beschriebenen Anpassung des Versorgungsdruckes ohne Lastdruckmessung ist die erforderliche, gleichzeitige Regelung des Versorgungsdruckes und der Motorgeschwindigkeit. Die gleichzeitige Regelung zweier gekoppelter Regelkreise führt zu einer starken Einschränkung der Stabilität des Regelkreises. Im Falle des Load Sensing können die physikalisch möglichen Verstellgeschwindigkeiten der LS-Pumpe häufig nicht genutzt werden, weil die dazu erforderlichen Übertragungsfaktoren der Regler durch die Instabilität des Gesamtsystems begrenzt werden. Ursache für die starke Einschränkung der möglichen Kreisverstärkungen ist die starke Kopplung mehrerer Regelkreise.

Dieser Nachteil tritt beim Verfahren der SullUnenstromregelung nicht auf. Hierbei wird erstmals das Verfallen des aufgeprägten Volumenstroms beim parallelen Betrieb mehrerer ventil gesteuerter Verbraucher genutzt, wobei die Geschwindigkeit aller einzelnen Motoren exakt geregelt werden kann. Der Versorgungsdruck stellt sich dabei automatisch, ohne daß eine Regelung erforderlich ist, auf den gerade erforderlichen Wert ein. Das Verfahren bietet nicht nur dynamische Vorteile, es stellt außerdem die energetisch bestmögliche Art der Versorgung parallelgeschalteter, ventil gesteuerter Antriebe dar.

Neben ventil gesteuerten werden sekundärgeregelte Motoren im Geschwindigkeitsregelkreis behandelt. Der Wirkungsgrad dieser Antriebe ist, da prinzipbedingt keine Drosselverluste im Leistungsteil auftreten, bereits sehr gut. Die Anpassung des Versorgungsdruckes führt zu leichten Verbesserungen, wenn der Versorgungsdruck so gewählt wird, daß mindestens ein Motor weit ausgeschwellt ist. Der Vorteil des veränderlichen Versorgungsdruckes besteht darüber hinaus in der Möglichkeit, kleinere Motoren einzusetzen. Das ist der Fall, wenn die Motoren ein sehr hohes Drehmoment nur kurzfristig aufbringen müssen.

Beschreibung	Schaltplan	Verhalten bei ansteigender Drehzahl	Verhalten bei ansteigendem Lastmoment
Load Sensing			
Load Sensing ohne Lastdruckaufnehmer Regelung des Ventilschiebers wegs			
Summenstromregelung			
Sekundärregelung an einem Netz mit geregelt veränderlichem Versorgungsdruck			
Summenstromregelung für geregelte Motoren			

10.1 Vereinfachte Darstellung der behandelten fünf Antriebe mit veränderlichem Versorgungsdruck

Bei der Anpassung des Versorgungsdruckes für sekundärgeregelte Motoren können dieselben Verfahren wie bei der Versorgung ventilgesteuerter Verbraucher angewendet werden. Lediglich die Regelung des Versorgungsdruckes in Abhängigkeit vom Lastdruck entfällt, da der Motor direkt an das Drucknetz angeschlossen ist.

Die Regelung des Versorgungsdruckes in Abhängigkeit vom Schwenkwinkel des Motors (Kapitel 8) entspricht der Anpassung des Versorgungsdruckes bei ventilgesteuerten Motoren in Abhängigkeit vom Stellsignal des Geschwindigkeitsregelkreises.

Die Summenstromregelung für ventilgesteuerte Motoren kann ebenfalls auf sekundärgeregelte Motoren übertragen werden (Kapitel 9).

**Bild 10.1** zeigt zusammenfassend die fünf beschriebenen Antriebe mit veränderlichem Versorgungsdruck.

- Beim Load Sensing wird der Versorgungsdruck auf einen Wert geregelt, der um einen bestimmten Betrag über dem Lastdruck liegt. Mit dem Ventil am Motor wird die Drehzahl geregelt. Bei veränderlichen Drehzahlen und veränderlichen Lastmomenten ist der Druckabfall am Ventil gleich.

-Bei dem zweiten Verfahren wird der Versorgungsdruck des drehzahlgeregelten Verbrauchers auf einen Wert geregelt, bei dem das Regelventil um einen bestimmten Betrag geöffnet ist. Damit ist der Ventilschieberweg  $Y_2$  bei unterschiedlichen Betriebspunkten gleich. Um den Stillstand des Motors bei geschlossenem Ventil zu ermöglichen, wird ein Mindestversorgungsdruck eingehalten. Der gestrichelt dargestellte Lastdruck muß bei diesem Verfahren nicht gemessen werden.

-Bei der Summenstromregelung übernimmt die Verstellpumpe die Regelung der Motordrehzahl, wenn das Regelventil am Motor ganz geöffnet ist. Bei mehreren Motoren wird die Summe der Geschwindigkeiten geregelt. Mindestens ein Regelventil an den Motoren bleibt solange ganz geöffnet, bis ein Mindestversorgungsdruck unterschritten wird. Auch bei der Sulrunenstromregelung ist die aufwendige Bestimmung des aktuellen höchsten Lastdruckes nicht erforderlich.

-Bei der Sekundärregelung mit geregelt veränderlichem Versorgungsdruck wird dieser auf einen Wert geregelt, bei dem mindestens ein Motor weit ausgeschwenkt ist (z.B.: 70%). Es wird ein Mindestversorgungsdruck sichergestellt, bei dem alle Motoren zurückschwenken können.

-Bei der Summenstromregelung für sekundärgeregelte Motoren übernimmt die Verstellpumpe die Regelung der Motordrehzahl, wenn ein Motor ganz ausgeschwenkt ist. Mindestens ein Motor bleibt solange ganz ausgeschwenkt, bis ein Mindestversorgungsdruck unterschritten wird.

