

Fortschritte bei der druckgeregelten Kettenwandlerhydraulik

Großes Potenzial für eine Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades stufenloser Umschlingungsgetriebe liegt in der Optimierung der Anpress- und Übersetzungshydraulik. Ein neues, druckgeregeltes System wurde entwickelt, bei dem die Hydraulikdrücke und -ölströme nach Bedarf geregelt werden. Damit konnte eine deutliche Reduzierung der benötigten hydraulischen Leistung erreicht werden, wodurch stufenlose Umschlingungsgetriebe im Wirkungsgrad mit hydrostatisch-leistungsverzweigten Traktorfahrtrieben konkurrieren können. Weitere Energieeinsparungen konnten durch eine Absenkung der Anpresskräfte in Richtung Anpressbedarf realisiert werden.

Stufenlose Traktorfahrtriebe konnten sich seit ihrer Einführung 1996 in hochentwickelten Märkten etablieren. Inzwischen bieten Fendt, Case/Steyr, John Deere und Deutz-Fahr Traktoren mit hydrostatisch-leistungsverzweigten Getrieben an [1]. Massey Ferguson stellte kürzlich eine neue Baureihe mit dem Fendt Vario-Getriebe vor [2]. Aufgrund höheren Komforts und verbesserter Effizienz wird der Einsatz stufenloser Getriebe in Traktoren kleiner und mittlerer Leistungen, in denen hydrostatisch-leistungsverzweigte stufenlose Getriebe derzeit nicht angeboten werden, rege diskutiert. Durch den großen Kostendruck und der vom Käufer nicht zwingend geforderten High Tech-Lösung bieten sich Kettenwandler in diesem Segment in einer einfachen Getriebestruktur an. Dies umso mehr, da sie einen herausragend guten mechanischen Wirkungsgrad besitzen [3] und ihre Grenzleistungen durch den Einsatz im Automobil stetig vergrößert wurden [4]. Hervorgegangen aus einem Projekt des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Sonderforschungsbereichs 365, werden am Lehrstuhl für Landmaschinen der Technischen Universität München neue Konzepte für die Hydraulik eines stufenlosen Umschlingungsgetriebes erforscht, um den Gesamtwirkungsgrad des Getriebes zu verbessern [5].

Stufenabhängige Drosselung eines konstanten Ölvolumenstroms in den sogenannten Drehmomentfühlern. Da aber dieser hohe Volumenstrom für die Funktion des Getriebes nur zu geringen Zeitanteilen benötigt wird, wurde ein neues druckgeregeltes, energieeffizientes System [5] entworfen. Die Vorteile des Konstantstromsystems (hohe Dynamik, schnelle Stillstandsverstellung) konnten beibehalten werden. Der Öldruck an den Anpresszylindern wird über die Verstellpumpe und je ein Druckregelventil entsprechend dem am neuen Drehmomentfühler elektronisch gemessenen Moment eingestellt. Als Besonderheit dieses druckgeregelten Anpresssystems muss erwähnt werden, dass die sogenannte „Pumpwirkung“ des bekannten PIV-Systems beibehalten wird. Sie stellt den momentenabhängigen Mindestanpressdruck bei Lastspitzen rein mechanisch und hochdynamisch ein, sollte der Druckaufbau auf Grund der Trägheiten von Ventil und Pumpe zu langsam geschehen. Dadurch kann auf eine Überanpressung weitestgehend verzichtet werden, die in vielen anderen druckgeregelten Systemen als Sicherheit gegen Durchrutschen notwendig ist. Probleme durch diese Überanpressung wie steigende Pumpenleistung (höherer Systemdruck und Leckage) und höhere mechanische Widerstände werden vermieden.

Druckgeregelte Anpresshydraulik

Die Hydraulik übernimmt beim Kettenwandler die Einstellung der gewünschten Übersetzung. Zusätzlich muss, da die Leistung reibschlüssig mit einer Kette zwischen zwei kegeligen Scheibenpaaren übertragen wird, die Kette angepresst werden, um ein Durchrutschen und damit eine Beschädigung des Wandlers zu verhindern [3]. Die Höhe dieses hydraulisch erzeugten Anpressdrucks hängt maßgeblich vom anliegenden Drehmoment ab, weitere Einflussgrößen stellen die aktuelle Übersetzung und die Drehzahl der jeweiligen Wellen dar.

Die heute in Serie gefertigten Kettenwandlergetriebe (Audi Multitronic [4]) erzeugen den Anpressdruck durch eine mo-

Bedarfsgeregelter Druck und Volumenstrom

Ein großes Energieeinsparpotenzial entsteht durch die bedarfsgerechte Erzeugung von Druck und Volumenstrom. Wie in [6] dargestellt, wird für eine reine Druckerhöhung im System ein geringer Volumenstrom benötigt, wenn bei der Konstruktion großer Wert auf geringe Leckage gelegt wurde. Bei einer Übersetzungsverstellung werden jedoch je nach Verstellgeschwindigkeit deutlich größere Volumenströme benötigt. Somit ist die Höhe der Energieeinsparung abhängig von der Häufigkeit der Übersetzungsänderung. Um diese klein zu halten, wird empfohlen, immer eine gewisse Motordrückung zuzulassen, bevor die Übersetzung des Getriebes verstellt wird.

Dipl.-Ing. Bernhard Stöckl ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Landmaschinen (Leitung: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Th. Renius) der Technischen Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching; e-mail: stoeckl@itm.mw.tum.de

Schlüsselwörter

Stufenlose Getriebe, Umschlingungsgetriebe, Traktoren, Hydraulik, Simulation, Wirkungsgradsteigerung

Keywords

Continuously variable transmissions, CV chain transmissions, tractors, hydraulics, simulation, increase of efficiency

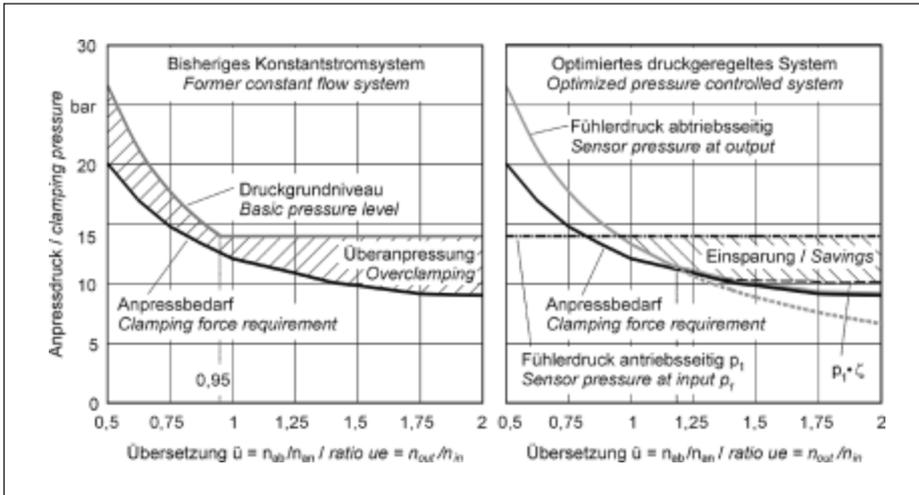


Bild 1: Grundanpressdrücke über der Übersetzung für Konstantstrom- und druckgeregeltes Anpresssystem, Eingangsmoment 140 Nm, Eingangsdrehzahl 1000 1/min, mechanischer Wirkungsgrad 95%

Fig. 1: Basic clamping pressures shown over ratio used for constant flow resp. pressure controlled clamping system, input torque 140 Nm, input shaft speed 1000 rpm, mechanical efficiency 95%

Optimierter Anpressdruck

Wie bereits erwähnt, setzt sich der Druck im Anpresszylinder aus zwei Anteilen zusammen: Zum einen zur Sicherung des Reibschlusses und zum anderen zur Übersetzungseinstellung. Für eine konstante Übersetzung muss ein bestimmtes ζ -Verhältnis erfüllt sein oder für eine Übersetzungsverstellung verändert werden. ζ ist der Quotient der Anpresskräfte an An- und Abtriebs Scheibensatz im stationären Zustand [3].

Diese Aufteilung findet sich auch im bekannten PIV Zweifühler-Konstantstromsystem wieder. Durch die momentenproportionale Drosselung des konstanten Volumenstroms in den Drehmomentfühlern (gleiche Fühlerkonstante $c_F = 10 \text{ Nm/bar}$) an An- und Abtrieb legt das höhere Moment das Druckgrundniveau fest, da die beiden Drehmomentfühler in Reihe geschaltet sind und dadurch der höhere Druck dominiert (Bild 1). Momentengleichheit an beiden Scheibensätzen herrscht bei einem Drehzahlverhältnis n_{ab}/n_{an} , das dem mechanischen Wirkungsgrad μ_{mech} des Kettenwandlers entspricht. Zusätzlich erhöht der Übersetzungsregler ausschließlich einen der beiden Drücke so, dass sich die gewünschte Übersetzung und damit das zu diesem Betriebspunkt passende ζ -Verhältnis einstellt. Da allerdings dieser ζ -Wert lediglich ein Verhältnis der Anpresskräfte und damit bei gleichen Flächen mehr oder weniger der Anpressdrücke ist, legt es nicht das absolute Niveau von Zähler und Nenner fest.

Ausschlaggebend für eine Auslegung eines Anpresssystems ist der Anpressbedarf an der Abtriebswelle. Bild 1 stellt den von [3] nach der ζ_{maz} -Methode (Sicherheit gegen Rutschen 1,1-1,2) gemessenen Anpressbedarf für die verwendete Getriebegröße dar. Zusätzlich sind die beiden drehmomentpro-

portionalen Mindestdrücke „Fühlerdruck antriebsseitig“ und „Fühlerdruck abtriebsseitig“ eingezeichnet (druckgeregeltes System, Fühlerkonstante $c_F = 10 \text{ Nm/bar}$). Bei Unterschreitung dieser Drücke versuchen die Drehmomentfühler durch die Pumpwirkung den Druck zu erhöhen. Dieses Verhalten resultiert aus der konstanten Steigung der Kugelrampen im Drehmomentfühler, die aus dem anliegenden Moment eine drehmomentproportionale Azialkraft erzeugt. Diese Azialkraft ergibt mit der Fühlerfläche die eingezeichneten Fühlerdrücke. Da das druckgeregelte Anpresssystem den Anpressdruck in beiden Scheibensätzen unabhängig voneinander einzustellen vermag, können „Fühlerdruck antriebsseitig“ und „Fühlerdruck abtriebsseitig“ bis zur Übersetzung, bei der der abtriebsseitige Fühlerwert den Anpressbedarf unterschreitet (in Bild 1 bei $\sim \ddot{u} = 1,2$), als Grundniveaus für die jeweiligen Wellen verwendet werden. In Analogie zum Konstantstromsystem wird durch den Übersetzungsregler einer der beiden Drücke für die Übersetzungseinstellung erhöht.

Energieeinsparpotenziale

Für Übersetzungen $\ddot{u} = 1/i > \mu_{mech}$ ergeben sich mit dem optimierten Anpressdruck Einsparungen, da in diesen Bereichen $\zeta > 1$ ist. Der Anpressdruck am Antriebs Scheibensatz muss also größer als an der Abtriebswelle sein, was er auf Grund der unterschiedlich festgelegten Druckgrundniveaus bereits ist. Für Übersetzungen $\ddot{u} < \mu_{mech}$ kann es für Zustände, in denen $\zeta < 1$ ist, ausreichen, „Fühlerdruck antriebsseitig“ durch den Übersetzungsregler zu erhöhen und „Fühlerdruck abtriebsseitig“ als höheren Druck zu belassen. Im Gegensatz dazu wird im Konstantstromsystem der höhere Fühlerdruck als Grunddruck für beide Scheibensätze ver-

wendet und durch den Übersetzungsregler an einer Welle weiter erhöht.

Für eine genaue Beurteilung der neuen druckgeregelten Anpresshydraulik wird die verbrauchte hydraulische Leistung (ohne Pumpenwirkungsgrad) mit der eines bereits optimierten Konstantstromsystems, das mit 6 l/min betrieben wird, verglichen. Mit diesem Wert ist eine noch ausreichende Verdrehdynamik für die verwendete Baugröße der Scheibensätze gewährleistet. Für den Vergleich wird neben dem optimierten Anpressdruck auch die Anpressstrategie des Konstantstroms, wie in [5] vorgeschlagen, in die Regelung des druckgeregelten Systems implementiert, um die weitere Einsparung zu dokumentieren. Die Ergebnisse stammen aus der Simulation, wurden aber durch Messungen am Prüfstand für die Konfiguration druckgeregeltes System mit Konstantstromanpressstrategie bestätigt. Über einen frei aufgestellten Zyklus (50% Zeitanteile mit Übersetzungsverstellung unterschiedlichster Verstellraten) ergibt sich eine Einsparung durch das neue druckgeregelte Anpresssystem mit der Konstantstromanpressstrategie von 80% der hydraulischen Leistung. Durch den Einsatz des optimierten Anpressdruckreglers wird die Einsparung über diesen Zyklus auf 83% erhöht. Bezieht man die hydraulische auf die mechanische Leistung, so ergeben sich für das Konstantstromsystem $P_{hyd}/P_{mech} = 1,47\%$, während das druckgeregelte Anpresssystem lediglich 0,31% (Konstantstromlogik) oder 0,25% (optimierter Anpressregler) der mechanischen Leistung benötigt. Zusätzlich ist durch die geringeren Anpresskräfte eine Verbesserung des mechanischen Wirkungsgrades zu erwarten.

Literatur

- Bücher sind mit • gekennzeichnet
- [1] • Renius, K. Th.: Motoren und Getriebe bei Traktoren. Jahrbuch Agrartechnik 2003, Bd. 15, Landwirtschaftsverlag, Münster, 2003, S. 50-55 und 271-272
 - [2] Neunaber, M.: Neu: MF 7400 mit stufenlosem Variogetriebe. profi 15 (2003), H. 6, S. 28-30
 - [3] • Sauer, G.: Grundlagen und Betriebsverhalten eines Zugketten-Umschlingungsgetriebes. Dissertation, TU München, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 293, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996
 - [4] • Indlekofer, N., U. Wagner, A. Fidlin und A. Teubert: Neueste Ergebnisse der CVT-Entwicklung. 7. LuK-Kolloquium, 11./12. April 2002. Deutscher Tagungsband; Herausgeber LuK GmbH & Co., Buhl/Baden, 2002, S. 63-72
 - [5] • Westenthanner, U.: Hydrostatische Anpress- und Übersetzungsregelung für stufenlose Kettenwandlergetriebe. Dissertation, TU München, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 442, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000
 - [6] Stöckl, B.: Energieoptimierte druckgeregelte Anpresshydraulik für stufenlose Umschlingungsgetriebe. LANDTECHNIK 58 (2003), H. 3, S. 177