

Untersuchung elektrischer Antriebssysteme am Beispiel von Hydraulikpumpen

THOMAS NEUBERT, JÜRGEN WOLFF, SIEGFRIED HELDUSER, HELMUT SPÄTH

Drehzahlveränderbare elektrische Antriebssysteme leisten im Industriebereich seit vielen Jahren einen Beitrag zur Senkung des Energieverbrauchs, so auch bei drehzahlveränderbaren hydrostatischen Pumpen. Daher wurden vier Systeme – Asynchronantrieb mit Normmotor, Asynchron-Hauptspindeltrieb, Synchron-Servoantrieb und geschalteter Reluktanzantrieb – auf einem Prüfstand hinsichtlich ihrer Eignung als drehzahlveränderbarer Antrieb für eine Hydraulikpumpe untersucht. Insbesondere der Wirkungsgrad, die Dynamik und das Regelverhalten standen dabei im Vordergrund. Aufgrund der weiten Verbreitung dieser Systeme lassen sich die hier vorgestellten Ergebnisse auf den gesamten Maschinen- und Anlagenbau übertragen.

1 Einleitung

In den vergangenen drei Jahrzehnten hat der Einsatz drehzahlveränderbarer elektrischer Antriebssysteme stark zugenommen. Gründe hierfür waren die zunehmend kostengünstigeren Frequenzumrichter und der Einsatz von Mikroprozessoren. Die in den Umrichtern als elektronische Schalter eingesetzten Thyristoren wurden dabei im letzten Jahrzehnt im unteren und im mittleren Leistungsbereich von Transistoren ab-

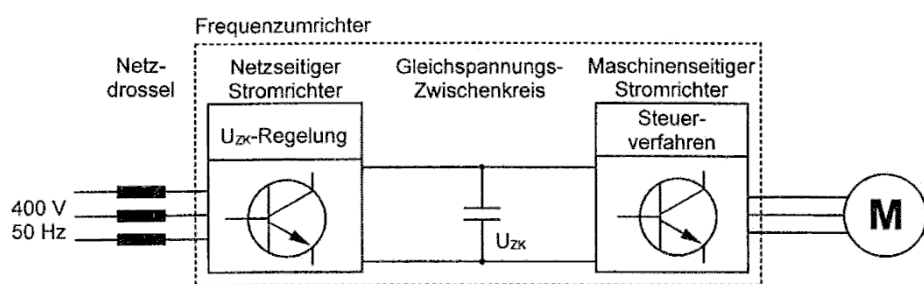
Dr.-Ing. Thomas Neubert war zum Zeitpunkt der Untersuchungen als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidtechnik der TU Dresden auf dem Gebiet der drehzahlgeregelten hydrostatischen Pumpen tätig und ist heute Oberingenieur am selben Institut. Dr.-Ing. Jürgen Wolff leitet die Abteilung Prozessautomatisierung bei der Jaakko Pöyry Deutschland GmbH. Zum Zeitpunkt der durchgeführten Untersuchungen war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe. Prof. Dr.-Ing. Siegfried Helduser ist Leiter des Instituts für Fluidtechnik der TU Dresden. Prof. em. Dr.-Ing. Helmut Späth war am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe tätig.

Untersuchter Antrieb				
	Asynchronantrieb mit Normmotor	Asynchron-Hauptspindeltrieb	Synchron-Servoantrieb	Geschalteter Reluktanzantrieb
Eingesetzter Motorentyp				
	Standard-Asynchronmotor	Hauptspindelmotor	AC-Servomotor	Geschalteter Reluktanzmotor
Nennleistung	22 kW	21 kW	15,5 kW	33 kW
Nenn Drehzahl	1475 min ⁻¹	2000 min ⁻¹	2000 min ⁻¹	1500 min ⁻¹
Nennmoment	140 Nm	100 Nm	74 Nm	210 Nm
Achshöhe	180 mm	132 mm	112 mm	132 mm
Umrichtergrenze	zirka 235 Nm	190 Nm	190 Nm	300 Nm
Trägheitsmoment	0,15 kgm ²	0,0827 kgm ²	0,0302 kgm ²	0,0883 kgm ²
Beschleunigung	zirka 1566 s ⁻²	2297 s ⁻²	6297 s ⁻²	3397 s ⁻²
Betriebsart	S1	S1	S1	S1
Wärmeklasse	F	F	F	F
Fremdbelüftung	Oberfläche	Oberfläche	Oberflächen	Durchzug
Schutzgrad	IP54	IP54	IP64	IP 23
Fabrikat	Bauknecht	Bosch	Vickers	Elbtalwerk
Typ	RFV 22/4-75	DU 132 S	FAS F3 V6 020	MFR 132.5/3
Stromrichter maschinenseitig				
	IGBT-Stromrichter	IGBT-Stromrichter	IGBT-Stromrichter	IGBT-Stromrichter
Steuerverfahren	U/f-Kennlinie	Vektorregelung	Vektorregelung	Kennfeldregelung
Dreh-/Lagegeber	nein	ja	ja	ja
Taktfrequenz	4 kHz	4 kHz	10 kHz	8 kHz
Fabrikat	Bosch Servodyn D	Bosch Servodyn D	Vickers	Uni Karlsruhe
Typ	DMA140D 8001D	DMA140D 4201	DBS 04 50/140	Funktionsmuster
Stromrichter netzseitig				
	IGBT-Stromrichter	IGBT-Stromrichter	Diodenbrücke	IGBT-Stromrichter
Netzanschluss	3 × 400 V; 50 Hz	3 × 400 V; 50 Hz	3 × 400 V; 50 Hz	3 × 400 V; 50 Hz
Betriebsart	rückspeisefähig	rückspeisefähig	nur Gleichrichter	rückspeisefähig
Brems-Chopper	nicht notwendig	nicht notwendig	ja	nicht notwendig
Leistungsfaktor	≈1	≈1	zirka 0,6–0,7	≈1
Zwischenkreis	670 V	670 V	zirka 540 V	750 V
Nennstrom	83 A	83 A	ohne Angabe	50 A
Netz drossel	0,4 mH	0,4 mH	ohne	4 mH
Fabrikat	Bosch Servodyn D	Bosch Servodyn D	Vickers	Uni Karlsruhe
Typ	VMA 90 D	VMA 90 D	Diodenbrücke	Funktionsmuster

Tabelle: Übersicht der untersuchten drehzahlveränderbaren elektrischen Antriebssysteme

gelöst. Transistoren können mit einer wesentlich höheren Frequenz geschaltet werden und besitzen dadurch bessere Eigenschaften bezüglich des Ansteuerverfahrens und der Dynamik. Ebenfalls wurden in diesem Leistungsbereich die Gleichstromantriebe durch die Drehstromantriebe verdrängt. Die Drehstrommotoren bedürfen im Vergleich zu den Gleichstrommotoren keiner intensiven Wartung. Außerdem lassen sie sich konstruktiv sehr gut vor innerer Verschmutzung schützen, das heißt mit einem höheren Schutzgrad ausführen.

Durch die verbesserte Technik konnten Arbeits- und Produktionsvorgänge mit einem vertretbaren Mehraufwand optimiert werden. So ließen sich z. B. mit nahezu wartungsfreien Antriebssystemen anspruchsvolle Drehzahlregelungen, Positionieraufgaben und eine ausreichende Drehzahl synchronisation von Mehrmotorenantrieben erreichen. Auch auf dem Gebiet der hydraulischen Antriebs-, Steuerungs- und Regelungstechnik führte der Einsatz drehzahlveränderbarer elektrischer Antriebssysteme zur Entwicklung von energiespa-



1: Prinzipieller Aufbau eines Frequenzumrichters

renden hydraulischen Antrieben [2, 3, 4]. Diese neuartigen elektrisch-hydrostatischen Antriebe werden heute beispielsweise in Kunststoff-Spritzgießmaschinen, Tafelscheren, Gabelstaplern und Flugzeugen erfolgreich eingesetzt [5, 6, 7]. Sie ermöglichen die Reduzierung systembedingter Verlustleistung und der Geräuschabstrahlung der Maschinen unter Beibehaltung der typischen Vorteile hydraulischer Antriebstechnik, wie die hohe Leistungsdichte, einfache Realisierung linearer Bewegungen und Robustheit bei niedrigen Kosten.

Die Vielfalt drehzahlveränderbarer elektrischer Antriebssysteme erschwert dem Anwender jedoch heute oft die Auswahl eines geeigneten Systems. Der Forschungsfonds des Fachverbandes Fluidtechnik im VDMA finanzierte daher das Forschungsvorhaben „Hydraulische Antriebssysteme mit drehzahlveränderbaren Pumpen“ [1], in dessen Rahmen unter anderem vergleichende Untersuchungen von drehzahlveränderbaren elektrischen Antriebssystemen durchgeführt wurden. Hinsichtlich ihrer Ei-

genschaften für elektrisch-hydrostatische Antriebe wurde eine Bewertung vorgenommen. Dieser Beitrag stellt eine Auswahl von Ergebnissen des Forschungsvorhabens vor.

Beispielhaft werden im Folgenden Industrieantriebe für den Anschluss an das Drehstromnetz 400 V, 50 Hz betrachtet. Die überwiegende Anzahl der Motoren ist für eine Bemessungsdrehzahl um 1500 min⁻¹ konstruiert. Diese Antriebe sind in der Industrie weit verbreitet, und die vorgestellten Ergebnisse lassen sich auf den gesamten Maschinen- und Anlagenbau übertragen. Elektromotoren und Frequenzumrichter für Asynchronantriebe mit Normmotoren, für Asynchron-Hauptspindelantriebe und Synchron-Servoantriebe sind auf dem Markt erhältlich und in vielen Bereichen der Praxis erprobt. Der geschaltete Reluktanzantrieb wird dagegen bisher erst in einigen speziellen Anwendungen eingesetzt. Er besitzt jedoch wesentliche technische Vorzüge und wurde deshalb wegweisend in die Untersuchungen einbezogen. In der **Tabelle** sind die Angaben über Fabrikate,

Typenbezeichnungen und Bemessungsdaten der untersuchten Antriebssysteme zusammengestellt.

Die Auswahl der Antriebssysteme orientierte sich an praktischen Anwendungen für drehzahlveränderbare Hydraulikpumpen und berücksichtigt Systeme, die in einem für die Stationärhydraulik typischen Leistungsbereich von etwa 10 bis 100 kW verbreitet sind. In diesen Anwendungen sind Antriebsdrehzahlen bis zu 2000 min⁻¹ erforderlich. An den elektrischen Antrieb werden dabei zwei Hauptforderungen gestellt: ein sehr hohes Beschleunigungsvermögen und ein sehr guter Wirkungsgrad im gesamten Betriebsbereich [4]. Im Vergleich zu elektromechanischen Antrieben kann die Dämpfung der Motorregelung dabei je nach Anwendung eine untergeordnete Rolle spielen, z. B. sind längere Einschwingvorgänge nach einem Drehzahlsprung zulässig. Entscheidend ist, dass die Hydraulikpumpe den angeforderten Volumenstrom in sehr kurzer Zeit bei konstantem Druck zur Verfügung stellt. Ein geringes Motorträgheitsmoment und ein maximales Motordrehmoment sind die Voraussetzungen für ein hohes Beschleunigungsvermögen. Das Trägheitsmoment der Last, hier die Hydraulikpumpe, ist bezüglich des Motorträgheitsmomentes in der Regel vernachlässigbar gering.

Im Folgenden werden die in der Tabelle aufgeführten Elektroantriebe allgemein hinsichtlich Wirkungsgrad und Dynamik untersucht. Danach werden Messergebnisse des Gesamtsystems Pumpe mit Elektroantrieb vorgestellt und analysiert.

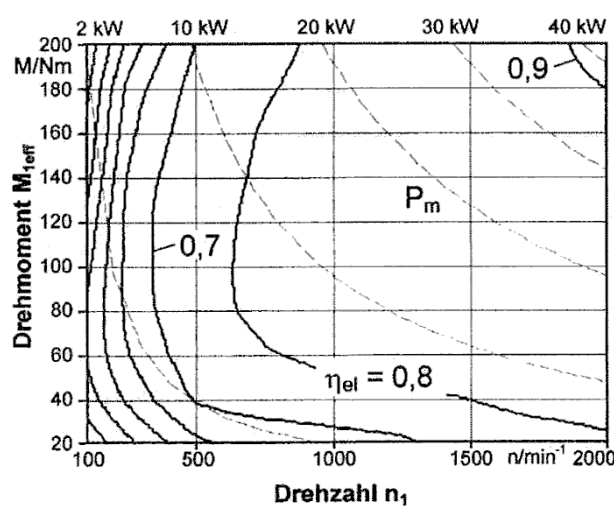
2 Untersuchte elektrische Antriebssysteme

Die hier untersuchten Antriebe besitzen wegen der genannten Anforderungen je nach Kühlart und Bemessungsdrehzahl eine mechanische Abgabeleistung zwischen 15 und 33 kW und Bemessungsdrehzahlen von zirka 1500 und 2000 min⁻¹. Aufgrund der technischen Vorteile sollte ein netzfreundlicher, rückspeisefähiger Frequenzumrichter eingesetzt werden [8].

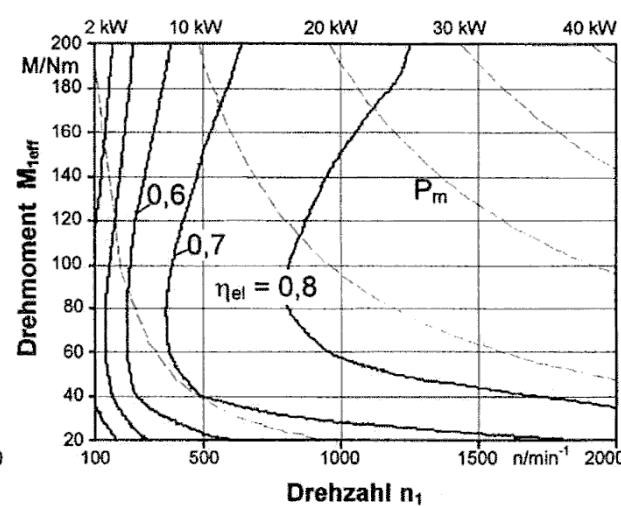
Die drehzahlveränderbaren Antriebssysteme bestehen aus den beiden Hauptkomponenten Frequenzumrichter und Elektromotor. Die Frequenzumrichter sind für den Anschluss an das Drehstromnetz 400 V, 50 Hz ausgeführt und wandeln Netzspannung und Netzfrequenz in eine der Motordrehzahl und dem Drehmoment entsprechende Motorklemmenspannung und Frequenz um. Die Umwandlung erfolgt über den Gleichspannungszwischenkreis. Deshalb lassen sich die Frequenzumrichter in einen netzseitigen und in einen maschinenseitigen Stromrichter unterteilen. Beide Stromrichter sind durch den Spannungszwischenkreis entkoppelt, wie in **Bild 1** dargestellt.

Die Topologie und das Steuerverfahren des maschinenseitigen Stromrichters hängen vom Motortyp ab. Je nach Erfordernis kann der Motor mit einem Rotorlagegeber oder einem Drehzahlgeber ausgerüstet sein. Wegen der Kostenreduzierung und ei-

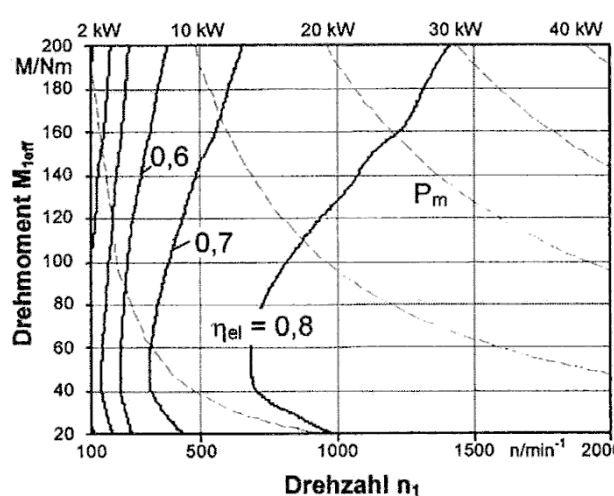
Asynchronantrieb mit Normmotor



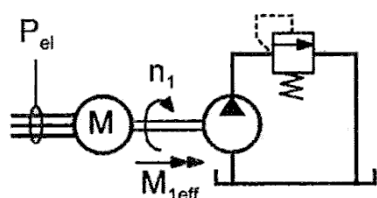
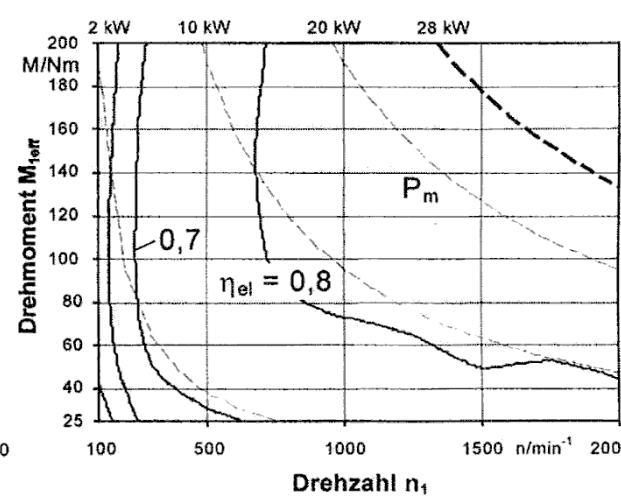
Asynchron-Hauptspindelantrieb



Synchron-Servoantrieb



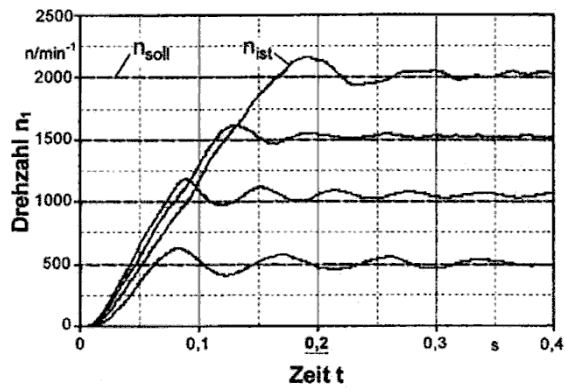
Geschalteter Reluktanzantrieb



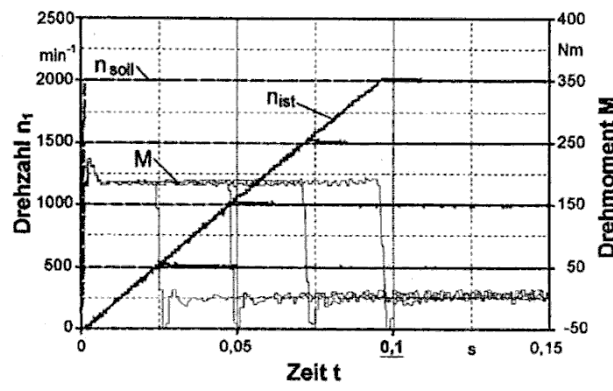
$$\eta_{el} = \frac{P_m}{P_{el}} = \frac{M_{1,eff} \cdot 2\pi \cdot n_1}{P_{el}}$$

2: Wirkungsgrad elektrischer Antriebssysteme η_{el}

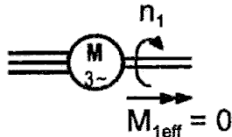
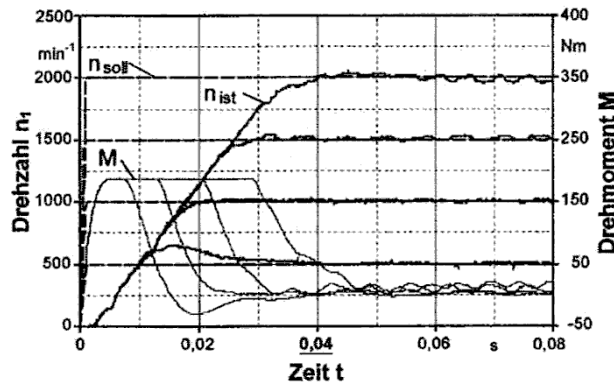
Asynchronantrieb mit Normmotor



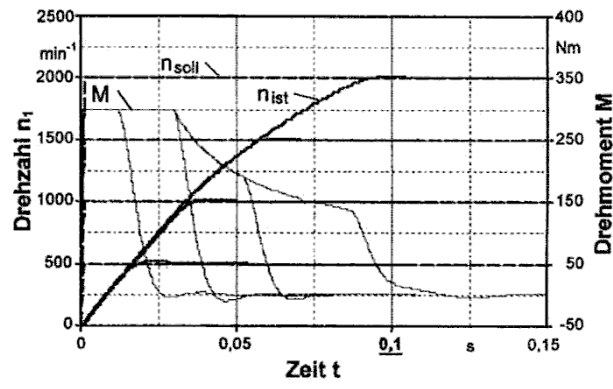
Asynchron-Hauptspindeltrieb



Synchron-Servoantrieb



Geschalter Reluktanzantrieb



3: Drehzahl-Sprungantwort elektrischer Antriebssysteme
 Zeitskalierung in den einzelnen Diagrammen ist unterschiedlich

ner geringen Systemstöranfälligkeit ist man bemüht, auf einen Geber zu verzichten. Mittlerweile gibt es gute Steuerverfahren für den geberlosen Betrieb. Jedoch ist für sehr hohe Anforderungen im Leerlauf, für den Betrieb um den Stillstand, für hochdynamische Anforderungen und für exakte

Positioniergenauigkeiten in der Regel ein Geber erforderlich.

Der netzseitige Stromrichter besteht entweder aus einem Transistorstromrichter (IGBT-Stromrichter) oder aus einer Diodenbrücke mit Brems-Chopper. Beim Einsatz einer Diodenbrücke kann der Energie-

fluss nur vom Energieversorgungsnetz zum Motor erfolgen. Die Bremsenergie des Motors muss mittels Chopper und Widerstand in Wärme umgewandelt werden. Der Netzstrom ist stark überschwingungsbehaftet.

Der in Bild 1 beispielhaft dargestellte Transistorstromrichter auf der Netzspannungsseite ist rückspeisefähig, die Motorbremsenergie kann energetisch sinnvoll in das Energieversorgungsnetz zurückgespeist werden. Weiterhin garantiert der Einsatz eines solchen Stromrichters einen Netzanschlussleistungsfaktor von ungefähr eins [8]. Der Netzstrom ist sinusförmig bzw. kaum überschwingungsbehaftet und in Phase zur Netzspannung. Weiterhin wird die Gleichspannung des Zwischenkreises auf einen konstanten, hohen Wert geregelt. Dies führt zu stabilen, vom Netzanschlusspunkt und vom Belastungszustand unabhängigen Voraussetzungen für die Motorregelung. Zwischen netzseitigem Stromrichter und Netzanschlusspunkt muss eine Drosselspule geschaltet werden.

Wegen des erhöhten Bauelementeaufwandes sind die rückspeisefähigen Transistorstromrichter im Vergleich zu den Diodenbrücken mit Brems-Chopper teurer, jedoch können technische Vorteile deren Einsatz rechtfertigen. Hydraulikpumpen werden in vielen Maschinen sehr dynamisch betrieben, also innerhalb von Arbeitszyklen beschleunigt und abgebremst. Hier führt der Einsatz eines rückspeisefähigen Frequenzumrichters z. B. auch zu einer Erhöhung des Energienutzungsgrades.

2.1 Asynchronantrieb mit Normmotor

Beim untersuchten Normmotor handelt es sich um einen vierpoligen Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer, die Achshöhe beträgt 180 mm. Die Flansch- und Anbaumaße des Normmotors sind international standardisiert. Damit ist die Austauschbarkeit auch zwischen Fabrikaten verschiedener Hersteller gewährleistet. Aufgrund der hohen Produktionsstückzahlen ist der Normmotor sehr kostengünstig. Weiterentwicklungen konzentrieren sich vor allem auf geringe Herstellungskosten. Hier liegen die größten Vorteile dieses Antriebssystems. Normmotoren sind oberflächenbelüftete, geschlossene Maschinen.

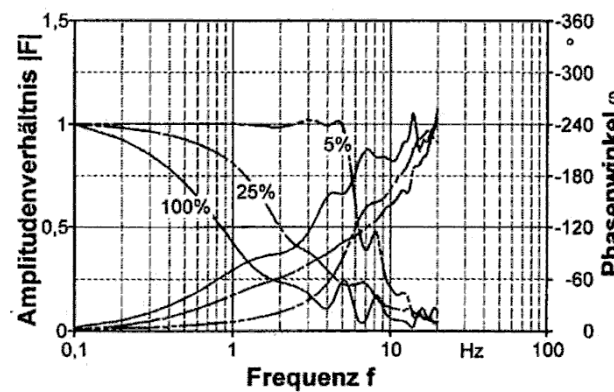
Um der Forderung nach geringen Kosten gerecht zu werden, wurde der Asynchronantrieb mit Normmotor ohne Drehzahlgeber betrieben. Zur Drehzeleinstellung wurde die Spannungs-Frequenz-Kennliniensteuerung (U/f -Kennliniensteuerung) gewählt, ein Steuerverfahren für geringe Anforderungen an die Drehzahlgenauigkeit. Es ist in den Prozessoren einfacher handelsüblicher Frequenzumrichter integriert.

Wegen der standardisierten Abmessungen besitzt der Normmotor eine relativ große Achshöhe und ein großes Bauvolumen. Das Trägheitsmoment des Läufers ist ebenfalls hoch. Im Vergleich zu den anderen Antrieben begrenzt somit die Motorkonstruktion das Beschleunigungsvermögen auf einen niedrigen Wert.

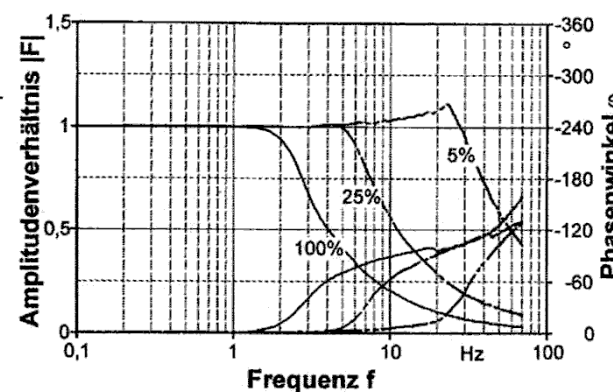
2.2 Asynchron-Hauptspindeltrieb

Der vierpolige Asynchronmotor mit der

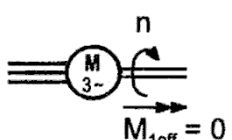
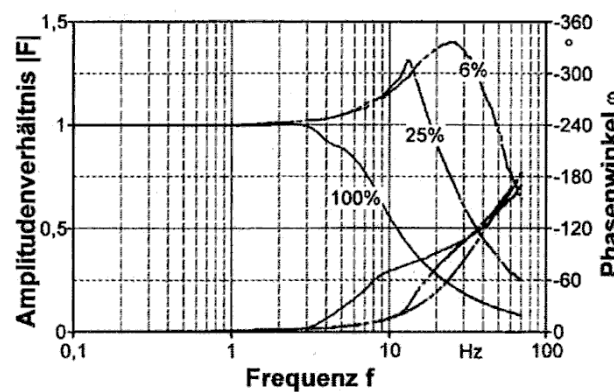
Asynchronantrieb mit Normmotor



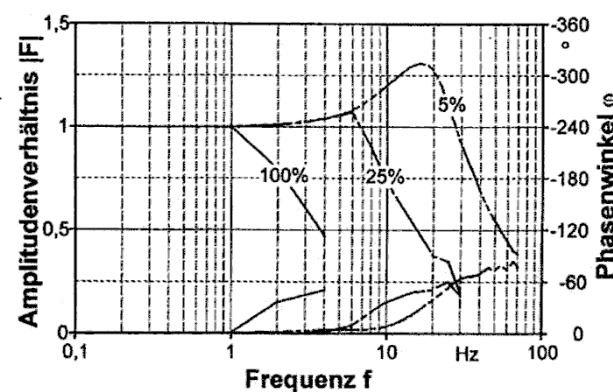
Asynchron-Hauptspindeltrieb



Synchron-Servoantrieb



Geschalter Reluktanzantrieb



$$|F| = \frac{n_{ist}(f)}{n_{soll}(f)} \cdot \frac{n_{soll}(f=0)}{n_{ist}(f=0)}$$

4: Drehzahl-Frequenzgänge elektrischer Antriebssysteme

Art der Speisung	Drehstromnetz 400 V 3~	Drehstromnetz + Frequenzumrichter 400 V 3~			
Motoren-Bauart	Standard-Asynchronmotor	Geschalteter Reluktanzmotor	Standard-Asynchronmotor	Hauptspindel-motor	AC-Servomotor
Pumpenbauart	Investitionskosten				
		maximale Energieverluste	kostengünstig, sehr dynamisch und verbesserter Wirkungsgrad im unteren Drehzahlbereich	Energieeinsparung bei Steuerungsaufgaben	Energieeinsparung bei Steuerungsaufgaben
		preiswert, sehr dynamisch, Leerlaufverluste #H3/	kostengünstig und sehr dynamisch	kostenintensiv und sehr dynamisch	maximale Kosten

5: Elektrohydraulische Antriebssysteme als Kombinationen von Motoren- und Pumpenbauarten

Verstellpumpe mit konstanter Drehzahl 	Drehzahlveränderbare Verstellpumpe 	Drehzahlgeregelte Konstantpumpe
Standard-Asynchronmotor (für Netzbetrieb), $P_N = 36 \text{ kW}$, $n_N = 1475 \text{ min}^{-1}$;	Standard-Asynchronmotor (für Umrichterbetrieb) mit Frequenzumrichter, $P_N = 22 \text{ kW}$, $n_N = 1475 \text{ min}^{-1}$;	AC-Servomotor mit Frequenzumrichter, $P_N = 15.5 \text{ kW}$, $n_N = 1500 \text{ min}^{-1}$;
Radialkolbenpumpe mit elektrohydraulischem Stellsystem (eigenversorgt), $V_{1 \text{ max}} = 45 \text{ cm}^3$;	Radialkolbenpumpe mit elektrohydraulischem Stellsystem (eigenversorgt), $V_{1 \text{ max}} = 45 \text{ cm}^3$;	Radialkolbenpumpe mit konstantem Verdrängungsvolumen, $V_1 = 45 \text{ cm}^3$;
$n_1 = \text{konstant}$	$n_1 = f(Q_1, p_1)$ (Methode der Offline-Kennfeldbestimmung) n_1 gesteuert (U/f-Kennliniensteuerung)	n_1 geregelt

6: Konfiguration der untersuchten Antriebssysteme bestehend aus elektrischem Antriebssystem und Hydraulikpumpe

Achshöhe 132 mm wurde für die Bemessungsdrehzahl 2000 min^{-1} entworfen. Es handelt sich ebenfalls um eine oberflächenbelüftete, geschlossene Maschine. Bei reduziertem Bemessungsmoment und reduziertem Trägheitsmoment besitzt sie im Vergleich zum Normmotor bereits ein besseres Beschleunigungsvermögen. Zur Drehzahlregelung wurde ein Drehzahlgeber und die Vektorregelung eingesetzt. Mit diesem feldorientierten Regelverfahren erfolgt eine sehr schnelle und präzise Einstellung der Motordrehzahl und des Motordrehmomentes.

2.3 Synchron-Servoantrieb

Der permanenterrregte Synchronmotor besitzt eine Achshöhe von 112 mm und eine sehr schlanke Bauform. Die Bemessungsdrehzahl beträgt 2000 min^{-1} , die Bemessungsleistung von 15,5 kW ist im Vergleich zu den anderen Antrieben relativ gering. Wegen der schlanken Bauform besitzt der Servoantrieb mit großem Abstand das höchste Beschleunigungsvermögen, dafür jedoch auch das niedrigste Bemessungsmoment für den Dauerbetrieb. Der Motor ist geschlossen und oberflächenbelüftet. Für diesen Antrieb stand lediglich ein Frequenzumrichter mit Brems-Chopper und einer Diodenbrücke für den Netzanschluss zur Verfügung. Am Motor war ein Rotorlagegeber angebracht, da zur Regelung der Synchronmaschine die Information über die Lage des Polrades bzw. der Rotorposition notwendig ist. Als Steuerverfahren wurde eine feldorientierte Regelung gewählt. Mit diesem Verfahren ist eine schnelle Drehzahlregelung möglich.

2.4 Geschalteter Reluktanzantrieb

Der geschaltete Reluktanzantrieb wurde zuerst in der englischsprachigen Literatur als Switched Reluctance Drive bekannt. Der hier untersuchte Antrieb konnte am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe im Rahmen des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsvorhabens „Switched Reluctance Drive“ nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen entwickelt werden [9]. Das Wirkungsprinzip des Motors ist

denkbar einfach: Die Form des Rotors ist mit einem lang gestreckten, geblechten Zahnrad vergleichbar. Die Rotorzähne richten sich in das durch einen elektrischen Strom in einem Ständerpol erzeugte Magnetfeld aus. Durch gezieltes Weiterschalten des Magnetfeldes von einem Ständerpol zum nächsten gerät der Rotor in eine kontinuierliche Drehbewegung. Das Weiterschalten des Stromes und damit des Magnetfeldes ist Aufgabe des Frequenzumrichters. Hierfür benötigt dieser die aktuelle Rotorposition aus einem Drehwinkelgeber. Die Drehmomentsteuerung erfolgt mittels eines Kennfeldes. Dieses Verfahren garantiert ebenfalls eine schnelle und präzise Drehzahlregelung. Der eingesetzte Motor in durchzugsbelüfteter offener Bauform mit der Achshöhe 132 mm besitzt eine Bemessungsleistung von 33 kW. Die Bemessungsdrehzahl beträgt 1500 min^{-1} . Die Durchzugsbelüftung bietet sich wegen der im Rotor vorhandenen Zahnücken und deren Nutzung als Kühlkanäle geradezu an. Das Beschleunigungsvermögen liegt aufgrund der höheren Leistung etwas über dem des Asynchron-Hauptspindeltriebs.

3 Wirkungsgrad

Die Wirkungsgradmessungen erfolgen mit angekoppelter Hydraulikpumpe, um ein Belastungsmoment erzeugen zu können. Gemessen wurden die vom Frequenzumrichter aus dem Drehstromnetz aufgenommene elektrische Leistung P_{el} , das effektive mechanische Drehmoment $M_{1 \text{ eff}}$ an der Motorwelle und die Motordrehzahl n_1 . In Bild 2 sind die Antriebswirkungsgrade η_{el} in Abhängigkeit vom Drehmoment und der Motordrehzahl gegenübergestellt. Wirkungsgradlinien mit konstantem Betrag wurden in das Drehmoment-Drehzahl-Diagramm eingezeichnet. Die Kurven konstanter Abgabeleistung des Motors sind ebenfalls dargestellt.

Für den Asynchronantrieb mit Normmotor ist erkennbar: Bei hohen Drehzahlen und hohen Drehmomenten ist der Wirkungsgrad gegenüber den anderen Systemen deutlich besser. In diesem Betriebsbereich erreicht er sogar teilweise über 90 %.

Im unteren Drehzahlbereich weisen die anderen Systeme jedoch bessere Werte auf. Der Asynchronantrieb mit Normmotor kann deshalb in einem relativ großen Bereich um den Bemessungspunkt mit einem optimalen Wirkungsgrad betrieben werden.

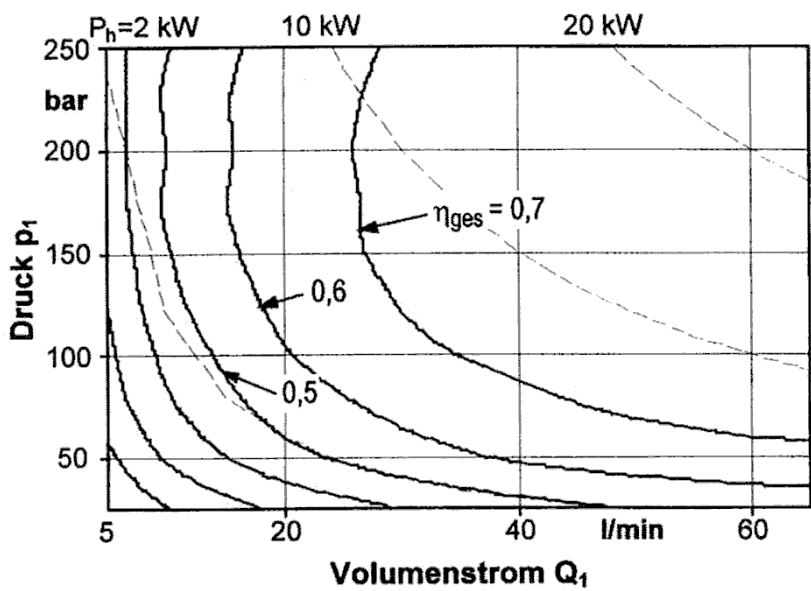
Der Asynchron-Hauptspindeltrieb liegt im oberen Drehzahl- und Drehmomentbereich unter den Werten des Asynchronantriebes mit Normmotor, im unteren Drehzahlbereich etwas darüber. Für beide Asynchronantriebe ist prinzipbedingt der Wirkungsgrad bei geringem Drehmoment relativ niedrig. Hierfür ist der notwendige Magnetisierungsstrom verantwortlich.

Eben diese magnetflussbildende Komponente des Motorstromes entfällt beim Synchron-Servoantrieb wegen des Einsatzes von Permanentmagneten. Deshalb hat dieser nahezu über den gesamten Drehzahlbereich bei kleinen Drehmomenten den besten Wirkungsgrad. Bei hohen Drehmomenten sind die Werte vergleichbar mit denen des Hauptspindeltriebs, die beiden anderen Antriebe sind besser.

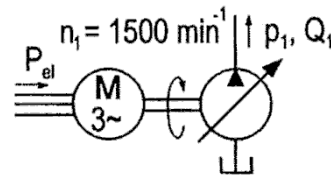
Für den drehmomentstarken Betrieb im unteren Drehzahlbereich zeigt der geschaltete Reluktanzantrieb die besten Werte. Ab 100 min^{-1} besitzt er bereits einen Wirkungsgrad von über 50 %, bei 300 min^{-1} sind es bereits mehr als 70 %. Wegen einer Umrichterbegrenzung wurden nur Werte bis 28 kW Abgabeleistung gemessen. Der Knick in der 80 %-Wirkungsgradlinie bei 1500 min^{-1} rührt von einer Umschaltung des Drehmomentsteuerverfahrens im Umrichter her.

4 Drehzahl-Sprungantwort

Bei Asynchronmotoren wäre theoretisch das Kippmoment das größte mögliche Beschleunigungsmoment. Das Kippmoment des untersuchten Normmotors beträgt z. B. 295 Nm, das Bemessungsmoment 140 Nm. Beim geschalteten Reluktanzmotor liegt die praktische Drehmomentgrenze bei zirka 450 Nm. Für noch höhere Drehmomente müsste wegen zunehmender Sättigungerscheinungen des Blechpaketes ein unverhältnismäßig höherer Strom in die Statorpole eingepreßt werden. Das Maximalmo-

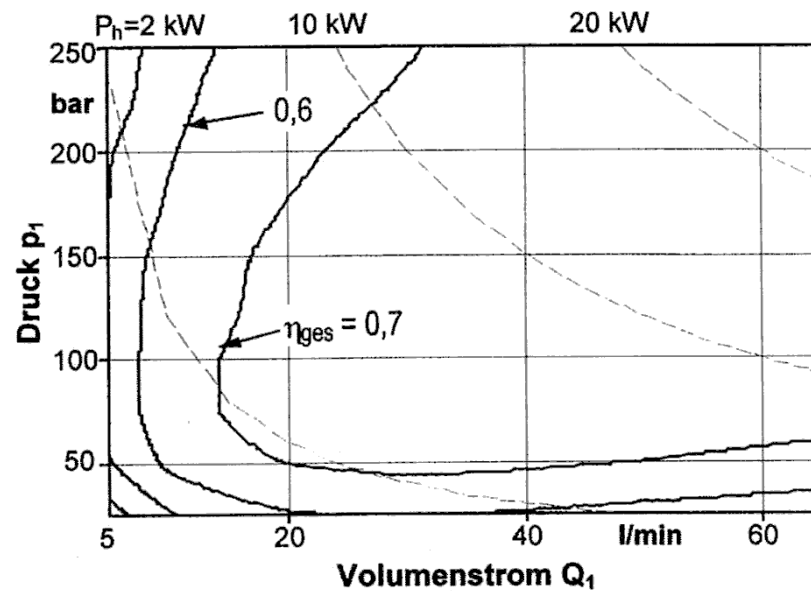


Verstellpumpe mit konstanter Drehzahl

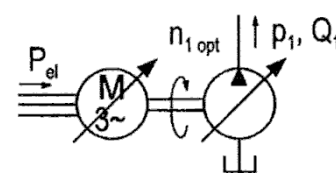


$$\eta_{ges} = \frac{p_1 \cdot Q_1}{P_{el}}$$

Ölorte: HLP 46
 Öltemperatur: $T_{Öl} = 40...45^\circ\text{C}$

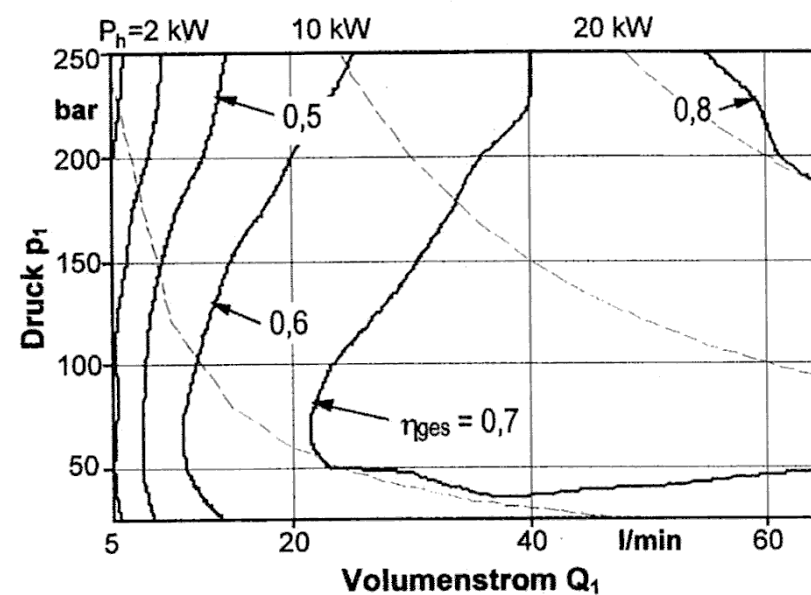


Drehzahlveränderbare Verstellpumpe

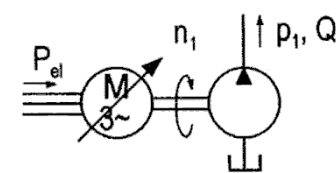


$$\eta_{ges} = \frac{p_1 \cdot Q_1}{P_{el}}$$

Ölorte: HLP 46
 Öltemperatur: $T_{Öl} = 40...45^\circ\text{C}$



Drehzahlgeregelte Konstantpumpe



$$\eta_{ges} = \frac{p_1 \cdot Q_1}{P_{el}}$$

Ölorte: HLP 46
 Öltemperatur: $T_{Öl} = 40...45^\circ\text{C}$

7: Wirkungsgrad η_{ges} elektrischer Antriebssysteme mit Hydraulikpumpen

ment der Synchronmaschine wird im Bremsbetrieb durch die Entmagnetisierungsfeldstärke der Permanentmagnete begrenzt. Für den untersuchten Synchronmotor lagen diesbezüglich keine Angaben vor. Das Datenblatt weist ein maximal zulässiges Motordrehmoment von 190 Nm aus.

Bei den hier vorgestellten Messreihen werden die Beschleunigungszeiten durch den Maximalstrom des Frequenzumrichters und das Motorträgheitsmoment begrenzt. Das Trägheitsmoment der Last, die Hydraulikpumpe, war vernachlässigbar. **Bild 3** zeigt den Vergleich der Drehzahl-Sprungantworten mit unterschiedlicher Zeitskalierung. Bei der Messung der Drehzahl-Sprungantworten und den im Folgenden diskutierten Drehzahl-Frequenzgängen war die Hydraulikpumpe nicht angekoppelt, das effektive Drehmoment an der Motorwelle $M_{1\text{eff}}$ war Null.

Der Asynchronmotor mit Normmotor zeigt aufgrund der einfachen Spannungs-

Frequenz-Kennliniensteuerung ein vergleichsweise schlechtes Einschwingverhalten mit geringer Dämpfung. Die Reglerparameter des Synchronantriebes sind zwar so eingestellt, dass die Beschleunigungszeit möglichst kurz ist. Eine Ursache für die erkennbaren Dauerschwingungen bei hohen Drehzahlen konnte auch nach Rücksprache mit dem Hersteller nicht gefunden werden. Sehr gutes Einschwingverhalten zeigen der Asynchron-Hauptspindelantrieb und der geschaltete Reluktanzantrieb. Sofort nach dem Sollwertsprung steigt das Drehmoment auf die eingestellte Drehmomentgrenze und beschleunigt den Rotor bis in die Nähe des Drehzahl-Sollwertes mit Maximalmoment. Nach einem kurzen und geringen Überschwinger erreicht er relativ schnell den eingestellten Drehzahl-Sollwert. Hier wird ein guter Kompromiss zwischen Schnelligkeit, Dämpfung und stationärer Genauigkeit des Regelkreises erzielt. Der geschaltete Reluktanzantrieb beschleunigt

bis zirka 850 min^{-1} mit 300 Nm, danach wird das Drehmoment bei konstanter Motorleistung reduziert. Die effektive mechanische Leistung an der Motorwelle musste wegen der maximal zulässigen Aufnahmeleistung des zur Verfügung stehenden Frequenzumrichters auf 28 kW begrenzt werden.

5 Drehzahl-Frequenzgang

Die Drehzahl-Frequenzgänge dienen zur weiteren Abschätzung des dynamischen Antriebsverhaltens, insbesondere des Kleinsignalverhaltens. Sie wurden jeweils für ± 5 , ± 25 und $\pm 100\%$ der maximalen Drehzahl $n_{1\text{max}} = 2000\text{ min}^{-1}$ gemessen (**Bild 4**). Bei höherer Aussteuerung und zunehmender Drehfeldfrequenz f geht das Motordrehmoment auf den zulässigen Maximalwert und damit in die Begrenzung; daraus resultiert ein nichtlineares Übertragungsverhalten. Wird die Drehmomentbegrenzung nicht erreicht, kann das Übertragungsverhalten der Antriebssysteme durch ein lineares Verzögerungsglied 2. Ordnung angenähert werden.

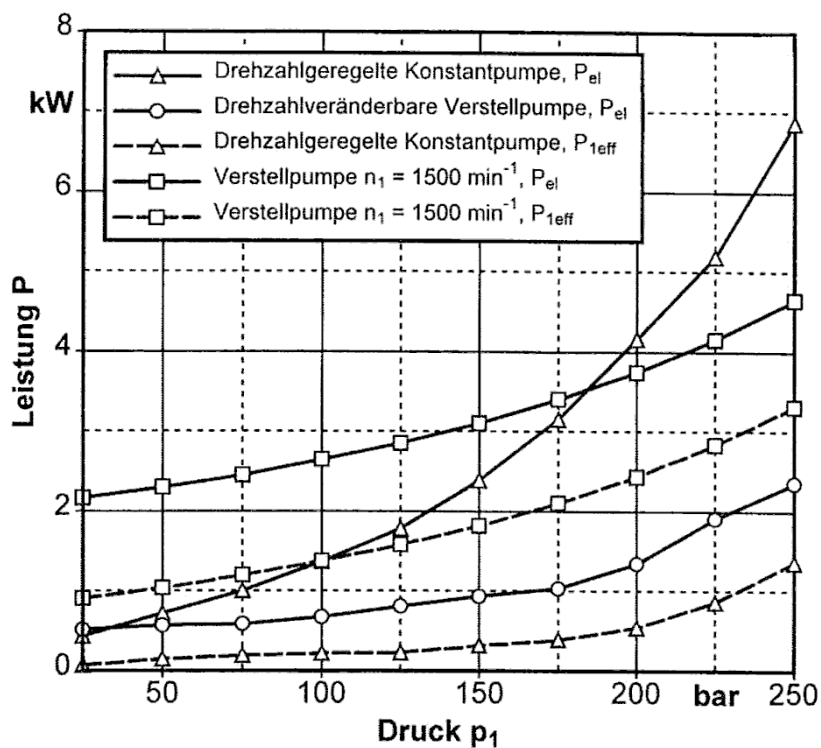
Der Asynchronantrieb mit Normmotor zeigt ein sehr schlechtes Führungsverhalten und ist somit für Antriebe mit hohen Anforderungen an das dynamische Verhalten ungeeignet. Die Begründung liegt im geringen Beschleunigungsvermögen und im Steuerverfahren. Die Systemeigenfrequenzen des Asynchronantriebes mit Normmotor liegt bei 5 Hz, die des Synchron-Servonantriebes bei 31 Hz. Beim Asynchron-Hauptspindelantrieb und beim geschalteten Reluktanzantrieb lassen sich die Eigenfrequenzen nur noch abschätzen. Sie beträgt bei beiden Systemen zirka 40 Hz.

6 Drehzahlveränderbare elektrisch-hydrostatische Pumpenantriebe

Hydrostatische Pumpen sind ein bedeutendes Anwendungsgebiet für drehzahlveränderbare elektrische Antriebssysteme. Seit Mitte der 1990er Jahre sind drehzahlveränderbare Pumpen Gegenstand von Untersuchungen, mit dem Ziel, Verluste und Geräuschemissionen bei hydraulischen Antrieben zu verringern. Die Veränderung der Drehzahl n_1 ist neben der Veränderung des Verdrängungsvolumens der Pumpe eine zusätzliche Möglichkeit, den hydraulischen Volumenstrom dem Bedarf der hydraulischen Verbraucher wie Zylinder oder Hydromotoren anzupassen.

6.1 Allgemeines

Die untersuchten elektrischen Antriebssysteme sowie verstellbare und nicht verstellbare Hydraulikpumpen erlauben eine Zusammenstellung von elektrisch-hydrostatischen Antriebssystemen, die den verschiedenen Anforderungen der Anwender hinsichtlich Kosten, Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz gerecht werden können. In **Bild 5** sind die möglichen Kombinationen der Einzelkomponenten gemäß der Tabelle um den Standardasynchronmotor für Netzbetrieb erweitert und kurz charakterisiert. Die Art der Speisung der Elektromotoren bestimmt darüber, ob die Motoren dreh-



8: Elektrische Leistungsaufnahme beim Lasthalten

zahlvariabel sind oder nicht. Motoren mit konstanter Drehzahl werden direkt mit dem Drehstromnetz verbunden und heute in vielen stationären und mobilen Arbeitsmaschinen in Verbindung mit einer verstellbaren Hydraulikpumpe betrieben. Dieses elektrohydraulische Antriebssystem dient für die folgenden Untersuchungen als Vergleichsbasis. Die aufgrund der hohen Drehzahl auftretenden Leerlaufverluste können durch ein Abschalten des Motors vermieden werden. Dies ist z. B. bei Gummispritzgießmaschinen sinnvoll, die technologisch bedingte lange Abkühlzeiten aufweisen. Um eine Überlastung des Motors zu verhindern, wird mit einem Sanftanlaufgerät (Softstarter) der maximale Motorstrom beim Hochlaufen begrenzt.

Die Speisung der Motoren mit einem Frequenzumrichter ist die effizienteste Möglichkeit, die Drehzahl stufenlos zu verstellen; andere Möglichkeiten sind verlustbehafteter [10]. Alle Kombinationen drehzahlveränderbarer Pumpen sind energieeffiziente Systeme, weil der Volumenstrom dem Bedarf angepasst werden kann und drehzahlabhängige Verluste minimiert werden. Die einzelnen Kombinationen unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer dynamischen Leistungsfähigkeit und ihrer Kosten. Systeme mit Standardasynchronmotoren und Konstantpumpen sind zwar kostengünstig, die dynamische Leistungsfähigkeit ist jedoch aufgrund des höheren Trägheitsmomentes geringer als bei Systemen mit AC-Servomotor. Die Drehzahlregelung einer Verstellpumpe – besonders durch kostengünstige elektrische Antriebssysteme, wie z. B. dem Standardasynchronmotor mit Frequenzumrichter – ist vorteilhaft, weil bei geringen Volumenströmen und hohen Drücken die Drehzahl in einem für den Wirkungsgrad des Elektromotors günstigen Bereich gehalten werden kann. In [1, 3, 4] werden Regelungskonzepte für den verlustminimalen Betrieb einer drehzahlveränderbaren Verstellpumpe vorgestellt. Die hohe Dynamik der Verstellpumpe sorgt dafür, dass die drehzahlveränderbare Verstellpumpe auch mit einem kostengünstigen und weniger dynamischen Standard-

asynchronmotor hohen regelungstechnischen Anforderungen gerecht werden kann.

Die Kombination des geschalteten Reluktanzmotors mit einer Konstant- oder Verstellpumpe erscheint aufgrund seines dynamischen Leistungsvermögens, seines besseren Wirkungsgrades im unteren Drehzahlbereich und seines kostengünstigen Aufbaus besonders vorteilhaft, wird im Folgenden jedoch nicht näher untersucht, da diese Antriebssysteme heute nicht standardmäßig am Markt verfügbar sind.

6.2 Auswahl der Kombinationen

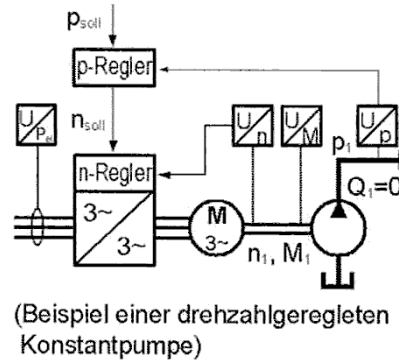
Aus den dargestellten Kombinationen von Motor- und Pumpenbauarten sollen im Weiteren die drei Systeme (Bild 6)

- Verstellpumpe mit konstanter Drehzahl,
- drehzahlveränderbare Verstellpumpe mit Standardasynchronmotor und
- drehzahlgeregelte Konstantpumpe mit AC-Servomotor

im Hinblick auf ihre Energieeffizienz und ihr dynamisches Verhalten untersucht und verglichen werden. Damit wird dem Anwender hydraulischer Antriebe die Möglichkeit gegeben, ein für seine Anforderungen günstiges Antriebssystem auszuwählen.

Die Verstellpumpe mit konstanter Drehzahl erfordert die geringsten Investitionskosten, weil der Standardasynchronmotor direkt an das Drehstromnetz angeschlossen ist. Ein kostenintensiver Frequenzumrichter ist nicht erforderlich. Dafür ist jedoch eine nahezu konstant hohe Drehzahl der Verstellpumpe in Kauf zu nehmen, die sich nachteilig auf die Energieeffizienz und das Geräuschverhalten des Antriebes auswirkt.

Die drehzahlveränderbare Verstellpumpe wird mit dem einfachsten drehzahlveränderbaren elektrischen Antrieb betrieben, dem Standardasynchronmotor mit Frequenzumrichter. Durch die implementierte U/f -Kennliniensteuerung kann man auf einen Drehgeber am Motor verzichten. Daraus ergibt sich ein nennenswerter Kosten- und Instandhaltungsvorteil gegenüber Steuerverfahren, die einen Drehgeber am Motor benötigen. Der Standardasynchron-



motor für den Frequenzumrichterbetrieb unterscheidet sich gegenüber den für den Netzbetrieb ausgelegten Motoren nur durch eine höhere Isolierstoffklasse der Wicklungen sowie gegebenenfalls durch einen Fremdlüfter. Ohne Fremdlüfter darf der Motor nur oberhalb von zirka 20 % der Bemessungsdrehzahl im Dauerbetrieb mit Nennmoment betrieben werden.

Bei der drehzahlgeregelten Konstantpumpe kann im Vergleich zur drehzahlveränderbaren Verstellpumpe auf das aufwändige Pumpenstellsystem verzichtet werden. Dafür kommt jedoch ein aufwendiges elektrisches Antriebssystem zum Einsatz. Beispielhaft wurde bei den nachfolgenden Testreihen der AC-Servoantrieb wegen der ausgezeichneten dynamischen Fähigkeiten und der Verfügbarkeit am Markt eingesetzt. Der AC-Servomotor enthält relativ teure Selten-Erden-Magnete und benötigt einen Geber für die Rotorposition.

6.3 Gesamtwirkungsgrad

Der Wirkungsgrad der verschiedenen elektrohydraulischen Antriebssysteme wurde an mehreren stationären Arbeitspunkten über den gesamten Druck- und Volumenstrombereich bestimmt. Er gibt Auskunft über die Energieeffizienz. Bei den Messungen wurden sowohl die Verluste des Pumpenstellsystems als auch die des Frequenzumrichters berücksichtigt. Bild 7 zeigt den Gesamtwirkungsgrad der Antriebssysteme im Vergleich. Die Verstellpumpe mit konstanter Drehzahl weist im Vergleich zu den anderen Antriebssystemen im Teillastbereich einen relativ geringen Wirkungsgrad auf, der vor allem in den hohen drehzahlabhängigen Reibverlusten begründet ist. Die drehzahlgeregelte Konstantpumpe besitzt dem gegenüber im Bereich geringer Drücke und Drehzahlen einen höheren Wirkungsgrad, da die drehzahlabhängigen Reibverluste mit der Drehzahl abnehmen. Bei höheren Drücken und geringen Volumenströmen beeinflusst der stark abfallende Wirkungsgrad elektrischer Antriebe bei niedrigen Drehzahlen den Gesamtwirkungsgrad erheblich.

Die drehzahlveränderbare Verstellpumpe besitzt von allen Antriebssystemen den höchsten Wirkungsgrad im untersuchten Druck- und Volumenstrombereich. Hier wirkt sich die höhere Pumpendrehzahl bei geringen Volumenströmen und hohen Drücken positiv auf den Motorwirkungsgrad und damit auch auf den Gesamtwirkungsgrad aus.

6.4 Auswahl der Kombinationen

Das Lasthalten ($Q_1 = 0$) ist ein weiterer stationärer Belastungszustand von hydraulischen Antriebssystemen, für den eine Aussage über die Energieeffizienz interessant ist. In Bild 8 ist die Leistungsaufnahme der Antriebssysteme in Abhängigkeit vom Druck während des Lasthaltebetriebes dargestellt. Dabei muss der Betriebsdruck p_1 in einem abgeschlossenen Ölvolumen mit Hilfe des von der Pumpe erzeugten Volumenstromes geregelt werden. Der Lasthaltebetrieb ist z. B. in Kunststoff-Spritzgießmaschinen bei der Herstellung großvolumi-

ger oder dickwandiger Kunststoffteile während der langen Abkühlphase notwendig, bevor das Teil entformt werden kann. Um ein Schwinden oder Verziehen des Teils zu vermeiden, muss während der Erstarrung der Schmelze ein konstanter Druck im Spritzzylinder eingehalten werden.

Die Realisierung des Lasthaltebetriebs erfolgte, indem jedes Antriebssystem in einen Druckregelkreis integriert wurde, mit dem der Druck in einem abgeschlossenen Ölvolumen geregelt werden konnte. Den Versuchsaufbau zeigt Bild 8 beispielhaft für die drehzahlgeregelte Konstantpumpe. Da keine hydraulische Nutzleistung erzeugt wird, lässt sich auch kein Wirkungsgrad bestimmen sondern lediglich die Verlustleistung. Die von der Pumpe aufgenommene mechanische Leistung $P_{1\text{eff}}$ stellt die Verlustleistung der Pumpe dar. Die vom Gesamtsystem aufgenommene elektrische Leistung P_{el} ist die Summe der Verlustleistungen von Pumpe und Motor.

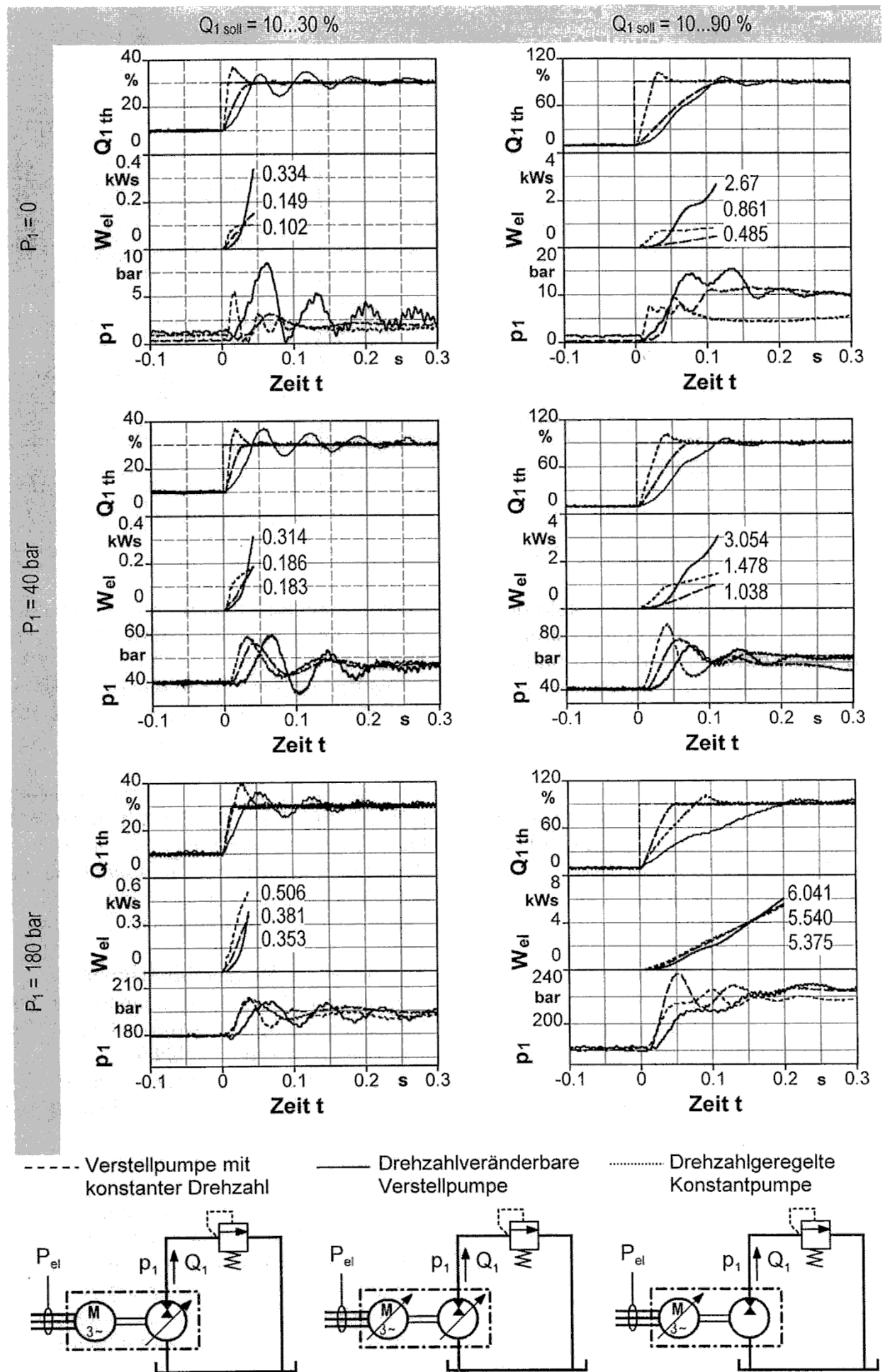
Bei der Verstellpumpe mit konstanter Drehzahl n_1 sind die Verluste von Pumpe und Motor bei geringen Drücken ungefähr gleich groß. Mit zunehmendem Druck steigen die Pumpenverluste an, während die Motorverluste nahezu konstant bleiben. Ursache dafür ist der mit steigender Last zunehmend bessere Wirkungsgrad des Standardasynchronmotors.

Im Vergleich dazu kann die Verlustleistung bei Verwendung der drehzahlgeregelten Konstantpumpe bei niedrigen Drücken um bis zu 80 % gesenkt werden. Das ist vor allem auf die stark reduzierten Pumpenverluste zurückzuführen. Mit steigendem Druck nehmen allerdings die Gesamtverluste überproportional zu und übersteigen ab einem Druck von zirka 180 bar die Gesamtverluste der Verstellpumpe mit konstanter Drehzahl, was im stark abfallenden Wirkungsgrad elektrischer Antriebe bei geringer Drehzahl und hohem Drehmoment begründet ist.

Nahezu ideal verhält sich dagegen die drehzahlveränderbare Verstellpumpe. Über den gesamten Druckbereich liegen die Gesamtverluste unter denen der beiden anderen Antriebssysteme, was auf die durch das Regelungskonzept bedingte Drehzahlerhöhung bei höheren Drücken zurückgeführt werden kann. Die Drehzahlerhöhung und die damit verbundene Verringerung des Verdrängungsvolumens der Pumpe tragen zu einer deutlichen Wirkungsgradverbesserung bei.

6.5 Dynamische Übergangsvorgänge

An einer Maschine mit hydraulischem Antrieb tragen nicht nur die Verluste in quasistationären Betriebszuständen, sondern auch bei dynamischen Vorgängen zu den Gesamtverlusten bei. Deshalb wurde auch das dynamische Verhalten unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs untersucht. Der Energieverbrauch bei Stellvorgängen ist abhängig vom Wirkungsgrad des jeweiligen Antriebssystems, von der notwendigen Verstellenergie und von der Stellzeit selbst. Die aufgenommene Verstellenergie ist der Quotient aus der notwendigen mechanischen Verstellenergie, z. B. bei



9: Volumenstrom-Sprungantworten und Energiebedarf der Antriebssysteme ($Q_{1\text{max}} = 67,5 \text{ l/min}$)

der Drehzahlerhöhung des Motors oder bei der Verdrängungsvolumenänderung der Pumpe, und dem Wirkungsgrad des Stellsystems, also dem Frequenzumrichter bzw. dem elektrohydraulischen Pumpenverstellsystem.

Für den Vergleich des dynamischen Verhaltens der Antriebssysteme wurden zwei Volumenstrom-Sprungantworten bei drei unterschiedlichen Lastdrücken p_1 gemessen. Als Volumenstrom-Istwert wird der theoretische Volumenstrom $Q_{1\text{th}}$ verwendet:

$$Q_{1\text{th}} = n_1 \cdot V_{1\text{th}} \quad (1)$$

Die Änderungen von 10 auf 30 % und von 10 auf 90 % des maximalen Volumenstroms berücksichtigen zwei unterschiedliche Stellbereiche. Der maximale Volumen-

strom beträgt $Q_{1\text{max}} = 67,5 \text{ l/min}$. Der Lastdruck wurde mit einem Proportional-Druckbegrenzungsventil eingestellt. Durch das Gleichdruckverhalten des Druckbegrenzungsventils $p = f(Q)$ ergibt sich ein leichter Anstieg des Druckes p_1 bei steigendem Volumenstrom Q_1 . In Bild 9 sind die Messergebnisse für die drei Antriebssysteme dargestellt.

Die Stellzeit der Verstellpumpe mit konstanter Drehzahl nimmt mit zunehmendem Lastdruck p_1 ab, weil das hydraulische Stellsystem mit dem Druck p_1 gespeist wird. Für die drehzahlgeregelte Konstantpumpe erhöht sich die Stellzeit mit zunehmendem Lastdruck, da das rückwirkende Lastmoment das Beschleunigungsvermögen des Motors reduziert. Bei der drehzahlveränderbaren Verstellpumpe sind beide

Einflüsse wirksam, wobei das Trägheitsmoment des Standardasynchronmotors deutlich größer ist als das des AC-Servomotors der drehzahlgeregelten Konstantpumpe.

Besonders auffällig ist der sehr schwach gedämpfte theoretische Volumenstrom $Q_{1\text{th}}$ der drehzahlveränderbaren Verstellpumpe in allen Messungen. Die Ursache dafür ist die aufgrund der verwendeten U/f -Kennliniensteuerung fehlende Rückführung der Drehzahl. Ein Einsatz in Druck- oder Lagerregelkreisen erfordert entweder eine Drehzahlvorsteuerung mit relativ geringen Drehbeschleunigungen oder einen Frequenzumrichter mit Vektorregelung bzw. Drehgeber.

Eine weitere Besonderheit der drehzahlveränderbaren Verstellpumpe im dynamischen Verhalten ist der deutlich erkennbare verzögerte Anstieg des Volumenstroms $Q_{1\text{th}}$ im Vergleich zu den beiden anderen Systemen. Die Ursache dafür liegt zum einen im gleichzeitigen Anstieg von Pumpendrehzahl n_1 und theoretischem Verdrängungsvolumen $V_{1\text{th}}$. Werden die beiden Größen gemäß Gleichung 1 multipliziert, erhält man einen parabelförmigen Anstieg des theoretischen Volumenstroms $Q_{1\text{th}}$, der in Bild 9 dargestellt ist. Zum anderen bedingen das große Motorträgheitsmoment und das einfache U/f -Steuerverfahren eine lange Anregelzeit. Damit wird deutlich, dass die dynamische Leistungsfähigkeit der drehzahlveränderbaren Verstellpumpe geringer sein muss als von der Verstellpumpe mit konstanter Drehzahl.

Möchte man mit der drehzahlveränderbaren Verstellpumpe ein besseres dynamisches Verhalten erzielen, bietet die Drehzahlvorsteuerung eine gute Möglichkeit. Eine Drehzahlvorsteuerung eignet sich allerdings nur für zyklische Belastungen, wenn also die Zeitpunkte bzw. -abschnitte mit hohen dynamischen Anforderungen an das hydraulische Antriebssystem bekannt sind. Für eine verbesserte Handhabbarkeit wurde eine selbstlernende Regelung entwickelt, welche die entsprechenden Zeitabschnitte automatisch erkennen und speichern kann. Damit ist eine größtmögliche Nutzerfreundlichkeit gegeben, die erheblich zur Akzeptanz der drehzahlveränderbaren Verstellpumpe beitragen kann.

Der Energieverbrauch W_{el} bei Stellvorgängen kann vor allem in Maschinen mit hohen dynamischen Anforderungen an den hydraulischen Antrieb nicht mehr vernachlässigt werden. Besonders auf Kunststoff-Spritzgießmaschinen trifft dies zu, da die bewegliche Formhälfte eine große Masse besitzt (zirka 600–1 000 kg bei 1 600 kN Schließkraft) und mit hohen Beschleunigungen bewegt werden muss, um möglichst kurze Schließ- und Öffnungszeiten zu erreichen. In Bild 9 ist der Verlauf der aufgenommenen elektrischen Energie W_{el} der untersuchten hydraulischen Antriebe als Integral der aufgenommenen elektrischen Leistung P_{el} während der Stellvorgänge dargestellt. Die untere Grenze des Integrals entspricht dem Zeitpunkt des Volumenstrom-Sollwertsprunges während die obere Grenze dem Zeitpunkt entspricht, an dem alle drei untersuchten Antriebe den Volumenstromsollwert erreicht haben. Möchte

man den Einfluss der Stellzeit auf den Energieverbrauch W_{el} berücksichtigen, kann man den entsprechenden Wert zum Zeitpunkt des Erreichens des Volumenstromsollwertes ablesen.

Bei Stellvorgängen mit geringem Lastdruck p_1 ist der Einfluss des Trägheitsmomentes der drehzahlveränderbaren Elektromotoren auf den Energieverbrauch am größten, während bei Stellvorgängen mit hohem Lastdruck der Einfluss der Stellzeit auf den Energieverbrauch am größten ist. Bei den drehzahlveränderbaren Pumpen kann die im Rotor gespeicherte Energie während der Bremsvorgänge wieder in den Zwischenkreis bzw. das Drehstromnetz zurückgespeist werden.

7 Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt den Vergleich von Wirkungsgrad, Dynamik und Regelgüte unterschiedlicher drehzahlveränderbarer elektrischer Antriebssysteme und ihren Einsatz als Antriebe für Hydraulikpumpen. Der Standardasynchronmotor für Frequenzumrichterbetrieb mit U/f -Kennliniensteuerung ist zwar das kostengünstigste System, jedoch sind seine technischen Eigenschaften für hohe dynamische Anforderungen nicht ausreichend, es sei denn, er wird in Kombination mit einer Verstellpumpe und einem Frequenzumrichter mit Vektorregelung eingesetzt. Der AC-Servomotor erreicht aufgrund seiner geringen Trägheit die höchste Dynamik, ist aber auch das teuerste System. Ein kostengünstiges und bisher kaum verwendetes elektrisches Antriebssystem stellt der geschaltete Reluktanzantrieb dar. Vor allem wegen seines höheren Wirkungsgrades gegenüber anderen Systemen im unteren Drehzahlbereich eignet sich dieses System besonders als Antrieb für Konstantpumpen. Allerdings steht für den geschalteten Reluktanzmotor bisher nur ein Laborumrichter zur Verfügung, was einen industriellen Einsatz derzeit verhindert.

Die durchgeführten vergleichenden Untersuchungen der unterschiedlichen hydraulischen Antriebssysteme lassen folgende Schwerpunkte erkennen: Die Verstellpumpe mit konstanter Drehzahl ist aufgrund ihrer energetischen und dynamischen Eigenschaften besonders für Anwendungen mit hohen Drücken und mittleren bis hohen Volumenströmen geeignet. In diesem Arbeitsbereich verfügt dieses Antriebssystem über ein hervorragendes dynamisches Verhalten. Die drehzahlgeregelte Konstantpumpe eignet sich vor allem für Antriebsaufgaben, deren Arbeitszyklus große Anteile von Teillast und kurzzeitige Maximalbelastungen aufweist. Aufgrund seiner sehr hohen Verstelldynamik eignet sich dieses Antriebssystem als direkter elektrisch-hydrostatischer Antrieb für geregelte hydraulische Achsen. Die Kombination drehzahlveränderbare Verstellpumpe mit Standardasynchronmotor eignet sich aufgrund ihres sehr hohen Wirkungsgrades für den gesamten Druck- und Volumenstrombereich, besonders für den Lasthaltebetrieb. Hohen dynamischen Anforderungen kann dieses

Antriebssystem allerdings nur mit einer Drehzahlvorsteuerung gerecht werden.

Literaturhinweise:

- [1] Helduser, S.; Neubert, Th.: *Hydraulische Antriebssysteme mit drehzahlveränderbaren Pumpen*. VDMA-Abschlussbericht, Dresden 2001
- [2] Rühlicke, I.: *Elektrohydraulische Antriebssysteme mit drehzahlveränderbarer Pumpe*. Dissertation, TU Dresden, 1997
- [3] Kazmeier, B.: *Energieverbrauchsoptimierte Regelung eines elektrohydraulischen Linearantriebes kleiner Leistung mit drehzahlgeregeltem Elektromotor und Verstellpumpe*. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 1998
- [4] Neubert, Th.: *Untersuchungen von drehzahlveränderbaren Pumpen*. Dissertation, TU Dresden, 2002
- [5] Neubert, Th.; Helbig, A., Helduser, S.: *Regelbare Pumpenantriebe verbessern Spritzgießmaschinen*. Maschinenmarkt, 2000, Nr. 43
- [6] Nagel, G.; Wouters, M.: *Drehzahlgeregelter hydrostatischer Antrieb für Tafelscheren*. O+P, 2000, Nr. 6
- [7] Bildstein, M.: *Application of electro-hydrostatic actuators (EHA) for future aircraft primary flight controls*. 1. Internationales Fluidtechnisches Kolloquium, Aachen, 1998
- [8] Wolff, J.; Bauer, G.; Simon, O.: *Netzfrequenzfreundlicher Anschluss elektrischer Antriebe an das Drehstromnetz durch verbesserte Regelung*. atp, 1997, Nr. 11
- [9] Wolff, J.: *Drehzahlveränderbarer Industrieantrieb mit geschaltetem Reluktanzmotor*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1999
- [10] Lämmerhardt, E.-H.: *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Carl Hanser Verlag, München, 1989