

# Drehzahlveränderbare elektrische Antriebssysteme im Vergleich

Jürgen Wolff, Jaakko Pöyry Deutschland GmbH und Thomas Neubert, Technische Universität Dresden

*Die vier Antriebssysteme Asynchronantrieb mit Normmotor, Asynchron-Hauptspindelantrieb, Synchron-Servoantrieb und Geschalteter Reluktanzantrieb wurden auf einem Prüfstand hinsichtlich ihrer Eignung als drehzahlveränderbarer Antrieb einer Hydraulikpumpe untersucht. Insbesondere der Wirkungsgrad, die Dynamik und das Regelverhalten standen dabei im Vordergrund. Sehr gute, vergleichbare Messreihen sind das Ergebnis. Beispielhaft wurden Antriebe für den Anschluss an das 400V/50Hz-Drehstromnetz ausgewählt. Diese Antriebe sind in der Industrie weit verbreitet. Deshalb lassen sich die hier vorgestellten Ergebnisse auf ein breites Anwendungsfeld, z. B. den gesamten Maschinenbau und den Anlagenbau, übertragen.*

### **Speed variable electric drive systems in comparison**

*The four electric drive systems comprising Induction Drive with Standard Motor, Main Spindle Drive including optimized induction motor, Synchronous Servo Drive including permanent magnets and Switched Reluctance Drive have been tested concerning their suitability to drive hydraulic pumps. Electromechanical efficiency, drive dynamic and control response were the main tasks of these investigations. The results constitute comprehensive and comparable measurements. The tested electric drives were chosen for connection to the 400V/50 Hz three-phase system and they are widely used in industrial applications. Therefore the results presented here can be applied to a lot of industrial sectors, e.g. mechanical engineering and plant engineering.*

## 1. Einleitung

In den vergangenen drei Jahrzehnten hat der Einsatz drehzahlveränderbarer elektrischer Antriebssysteme stark zugenommen. Grund hierfür waren die zunehmend kostengünstigeren Frequenzumrichter. Die in den Umrichtern als elektronische Schalter eingesetzten Thyristoren wurden im unteren und im mittleren Leistungsbereich von Transistoren abgelöst. Transistoren können mit einer wesentlich höheren Frequenz geschaltet werden und besitzen dadurch bessere Eigenschaften bezüglich des Ansteuerverfahrens und der Dynamik. Ebenfalls wurden die Gleichstromantriebe durch die Drehstromantriebe verdrängt. Die Drehstrommotoren bedürfen im Vergleich zu den Gleichstrommotoren keiner intensiven Wartung. Außerdem können sie konstruktiv sehr gut vor innerer Verschmutzung geschützt, das heißt mit einem höheren Schutzgrad ausgeführt werden.

Durch diese 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.

## 2. Problematik

Entwicklungsingenieure und Konstrukteure müssen für festgelegte Antriebsaufgaben geeignete Antriebssysteme auswählen. Da oft keine vergleichbaren technischen Daten und

Erfahrungen vorliegen, ist eine objektive Auswahl meistens nicht möglich.

Vom Forschungsfonds des Fachverbandes Fluidtechnik im Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbauer (VDMA) wurde deshalb das Institut für Fluidtechnik der Technischen Universität Dresden mit einem Forschungsvorhaben beauftragt. Ein Schwerpunkt des Vorhabens war es, die vier Antriebssysteme Asynchronantrieb mit Normmotor, Asynchron-Hauptspindelantrieb, Synchron-Servoantrieb und Geschalteter Reluktanzantrieb hinsichtlich ihrer Eignung als drehzahlveränderbarer Antrieb für Hydraulikpumpen zu untersuchen. Insbesondere der Wirkungsgrad, die Dynamik und das Regelverhalten standen dabei im Vordergrund.

Alle experimentellen Untersuchungen wurden unter identischen Voraussetzungen auf einem eigens dafür entwickelten Prüfstand durchgeführt. Die Ergebnisse geben aufgrund vergleichbarer Messreihen eine fundierte Aussage über die Eignung der Antriebssysteme für bestimmte Einsatz- und Betriebsbereiche und können somit als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl drehzahlveränderbarer elektrischer Antriebssysteme herangezogen werden.

## 3. Geltungsbereich des Vergleiches

Beispielhaft werden in diesem Beitrag Industrieantriebe für den Anschluss an das 400V/50Hz-Drehstromnetz betrachtet. Die überwiegende Anzahl der Motoren ist für eine Bemessungsdrehzahl um 1500 U/min konstruiert. Diese Antriebe sind in der Industrie weit verbreitet, und die vorgestellten

Ergebnisse lassen sich auf ein sehr breites Anwendungsfeld, z. B. den gesamten Maschinenbau und den Anlagenbau, übertragen. Elektromotoren und Frequenzumrichter für Asynchronantriebe mit Normmotoren, für Asynchron-Hauptspindelantriebe und Synchron-Servoantriebe sind auf dem Markt erhältlich und sind in vielen Bereichen der Praxis erprobt. Der Geschaltete Reluktanzantrieb wird bisher erst in einigen speziellen Anwendungen eingesetzt. Er besitzt jedoch wesentliche Vorzüge und wurde deshalb wegweisend in die Untersuchungen einbezogen.

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 kW bis 100 kW verbreitet sind. In diesen Anwendungen sind Antriebsdrehzahlen bis zu 2000 U/min erforderlich. An den elektrischen Antrieb werden zwei Hauptforderungen, ein extrem hohes Beschleunigungsvermögen und ein sehr guter Wirkungsgrad im gesamten Betriebsbereich, gestellt [1]. Im Vergleich zu elektromechanischen Antrieben kann die Dämpfung der Regelung dabei je nach Anwendung eine untergeordnete Rolle spielen, z. B. sind längere Einschwingvorgänge nach einem Drehzahlssprung zulässig. Entscheidend ist, dass der angeforderte Volumenstrom in sehr kurzer Zeit bei konstantem Druck von der Hydraulikpumpe zur Ver-

fügung gestellt werden kann. 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 vernachlässigbar.

Ein typisches Anwendungsbeispiel für derartige Antriebe sind drehzahlveränderbare Hydraulikpumpen in Kunststoff-Spritzgießmaschinen. Durch den Einsatz dieser Pumpen lassen sich sowohl die systembedingte Verlustleistung als auch die Geräuschabstrahlung wesentlich reduzieren.

Neben der Diskussion über Wirkungsgrad, Dynamik und Regelverhalten werden im nachfolgenden auch die Eignung als Direktantrieb und die Kosten der untersuchten Antriebssysteme erörtert.

## 4. Beschreibung der Antriebssysteme

Die hier behandelten Antriebe besitzen wegen der vorgeannten Anforderungen je nach Kühlart und Bemessungsdrehzahl eine mechanische Abgabeleistung zwischen 15 kW und 33 kW. Es standen Antriebe mit einer Bemessungsdrehzahl von ca. 1500 U/min bzw. 2000 U/min zur Verfügung. Aufgrund seiner technischen Vorteile sollte ein netzfrequenzunabhängiger Frequenzumrichter eingesetzt werden.

**Tabelle 1. Übersicht über die untersuchten drehzahlveränderbaren Antriebssysteme.**

	Asynchronantrieb mit Normmotor	Asynchron-Hauptspindelantrieb	Synchron-Servoantrieb	Geschalteter Reluktanzantrieb
<b>Motor</b>				
Nennleistung	22 kW	21 kW	15,5 kW	33 kW
Nenn Drehzahl	1475 min <sup>-1</sup>	2000 min <sup>-1</sup>	2000 min <sup>-1</sup>	1500 min <sup>-1</sup>
Nennmoment	140 Nm	100 Nm	74 Nm	210 Nm
Achshöhe	180 mm	132 mm	112 mm	132 mm
Umrichtergrenze	ca. 235 Nm	190 Nm	190 Nm	300 Nm
Trägheitsmoment	0,15 kgm <sup>2</sup>	0,0827 kgm <sup>2</sup>	0,0302 kgm <sup>2</sup>	0,0883 kgm <sup>2</sup>
Beschleunigung	ca. 1566 s <sup>-2</sup>	2297 s <sup>-2</sup>	6297 s <sup>-2</sup>	3397 s <sup>-2</sup>
Betriebsart	S1	S1	S1	S1
Wärmeklasse	F	F	F	F
Fremdbelüftung	oberflächen	oberflächen	oberflächen	durchzugs
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
<b>Stromrichter maschinenseitig</b>				
Art	IGBT/Transistor-Stromrichter	IGBT/Transistor-Stromrichter	IGBT/Transistor-Stromrichter	IGBT/Transistor-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	Univ. Karlsruhe
Typ	DMA140D 8001D	DMA140D 4201	DBS 04 50/140	Funktionsmuster
<b>Stromrichter netzseitig</b>				
Art	IGBT/Transistor-Stromrichter	IGBT/Transistor-Stromrichter	Diodenbrücke	IGBT/Transistor-Stromrichter
Netzanschluß	3×400V; 50 Hz	3×400V; 50 Hz	3×400V; 50 Hz	3×400V; 50 Hz
Betriebsart	rückspeisefähig	rückspeisefähig	nur Gleichrichter	rückspeisefähig
Brems-Chopper	nicht notwendig	nicht notwendig	ja	nicht notwendig
Leistungsfaktor	≅ 1	≅ 1	ca. 0,6...0,7	≅ 1
Zwischenkreis	670 V	670 V	ca. 540 V	750 V
Nennstrom	83 A	83 A	ohne Angabe	50 A
Netzdrossel	0,4 mH	0,4 mH	ohne	4 mH
Fabrikat	Bosch Servodyn D	Bosch Servodyn D	Vickers	Univ. Karlsruhe
Typ	VMA 90 D	VMA 90 D	Diodenbrücke	Funktionsmuster

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

Die Topologie und das Steuerverfahren des maschinenseitigen Stromrichters hängen vom Motor ab. Je nach Erfordernis kann der Motor mit einem Rotorlage- bzw. einem Drehzahlgeber ausgerüstet sein. Wegen der Kostenreduzierung und einer geringen System-Störanfälligkeit 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, dem Betrieb um den Stillstand, für hochdynamische Anforderungen und für exakte Positioniergenauigkeiten in der Regel ein Geber erforderlich.

Der netzseitige Stromrichter besteht entweder aus einem Transistor-Stromrichter oder aus einer Diodenbrücke mit Brems-Chopper. Bei Einsatz einer Diodenbrücke kann der Energiefluss nur vom Energieversorgungsnetz zum Motor erfolgen. Überschüssige Bremsenergie des Motors muss mittels Chopper und Widerstand in Wärme umgewandelt werden. Der Netzstrom ist stark überschwingungsbehaftet.

Ein Transistorstromrichter ist rückspeisefähig. Das heißt, die Motorbremsenergie kann energetisch sinnvoll in das Energieversorgungsnetz zurückgespeist werden. Weiterhin garantiert der Einsatz eines solchen Stromrichters einen Netzanschluss-Leistungsfaktor von ungefähr eins [2]. Der Netzstrom ist sinusförmig, damit 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, innerhalb von Arbeitszyklen beschleunigt und abgebremst. Hier führt der Einsatz eines rückspeisefähigen Frequenzumrichters z. B. auch zu einer Erhöhung der Energieeffizienz.

In Tabelle 1 sind die Angaben über Fabrikate, Typenbezeichnungen und Bemessungsdaten der untersuchten Antriebssysteme gegenübergestellt.

### Asynchronantrieb mit Normmotor

Bei dem Normmotor handelt es sich um einen vierpoligen Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer der Achshöhe

180 mm. Die Flansch- und Anbaumaße des Normmotors sind international standardisiert. Damit ist die Austauschbarkeit auch zwischen Fabrikaten verschiedener Hersteller gewährleistet. Aufgrund der hohen Produktions-Stückzahlen 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 Drehzahleinstellung wurde die Spannungs-Frequenzkennliniensteuerung, ein Verfahren für geringe Anforderungen an die Drehzahlgenauigkeit, gewählt. Dieses Steuerverfahren 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.

### Asynchron-Hauptspindelantrieb

Der vierpolige Asynchronmotor der Achshöhe 132 mm wurde für die Bemessungsdrehzahl 2000 U/min 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 wurden ein Drehzahlgeber und die Vektorregelung eingesetzt. Mit diesem feldorientierten Regelverfahren erfolgt eine sehr schnelle und präzise Einstellung der Motordrehzahl und des Motordrehmomentes.

### Synchron-Servoantrieb

Der permanenterrregte Synchronmotor besitzt eine Achshöhe von 112 mm und eine sehr schlanke Bauform. Die Bemessungsdrehzahl beträgt 2000 U/min. Und 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, jedoch dafür auch das kleinste 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 befand sich ein Rotorlagegeber. Zur Regelung der Synchronmaschine ist die Information über die Lage des Polrades bzw. der Rotorposition notwendig. Als Steuerverfahren wurde eine feldorientierte Regelung gewählt. Mit diesem Verfahren ist auch hier eine schnelle Drehzahlregelung möglich.

### 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 [3]. Das Wirkungsprinzip des Motors ist denkbar einfach: Die Form des Rotors ist mit einem langgestreckten, geblechten Zahnrad vergleichbar. Die Rotorzähne richten sich in dem durch einen elektrischen Strom in einem Ständerpol erzeugten Magnetfeld aus. Durch gezieltes Weitschalten des Magnetfeldes von einem Statorpol zum anderen gerät der Rotor in eine kontinuierliche Drehbewegung. Das Weitschalten des Stromes und damit des Magnetfeldes ist Aufgabe des Frequenzumrichters. Hierfür benötigt dieser die aktuelle Rotorposition aus einem Lagegeber. Die Drehmomentsteuerung erfolgt mittels eines Kennfeldes. Dieses Verfahren garantiert ebenfalls eine schnelle und präzise Drehzahlregelung. In der durchzugsbelüfteten offenen Bauform der Achshöhe 132 mm besitzt der Motor eine Bemessungsleistung von 33 kW. Die Bemessungsdrehzahl beträgt 1500 U/min. 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 besser als beim Asynchron-Hauptspindeltrieb.

### 5. Drehzahl-Sprungantworten

Bei Asynchronmotoren wäre theoretisch das Kippmoment das größte mögliche Beschleunigungsmoment. Das Kippmoment des Normmotors beträgt z. B. 295 Nm, das Bemessungs-

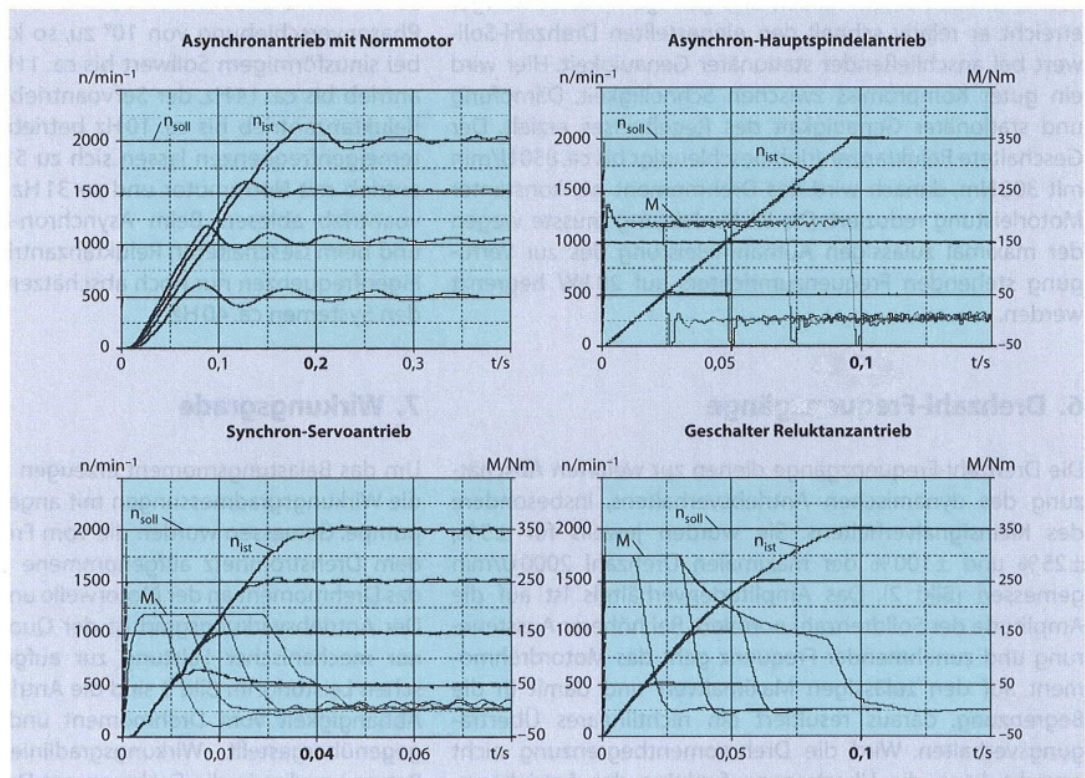
moment 140 Nm. Beim Geschalteten Reluktanzmotor liegt die praktische Drehmomentgrenze bei ca. 450 Nm. Für noch höhere Drehmomente müsste wegen zunehmender Sättigungserscheinungen des Blechpaketes ein unverhältnismäßig höherer Strom in die Statorpole eingepreßt werden. Das Maximalmoment der Synchronmaschine wird im Generatorbetrieb theoretisch und damit auch praktisch im Motorbetrieb durch die Entmagnetisierungsfeldstärke der Permanentmagnete begrenzt. Für den untersuchten Synchronmotor lagen diesbezüglich keine Angaben vor. Im Datenblatt ist ein maximal zulässiges Motordrehmoment von 190 Nm ausgewiesen.

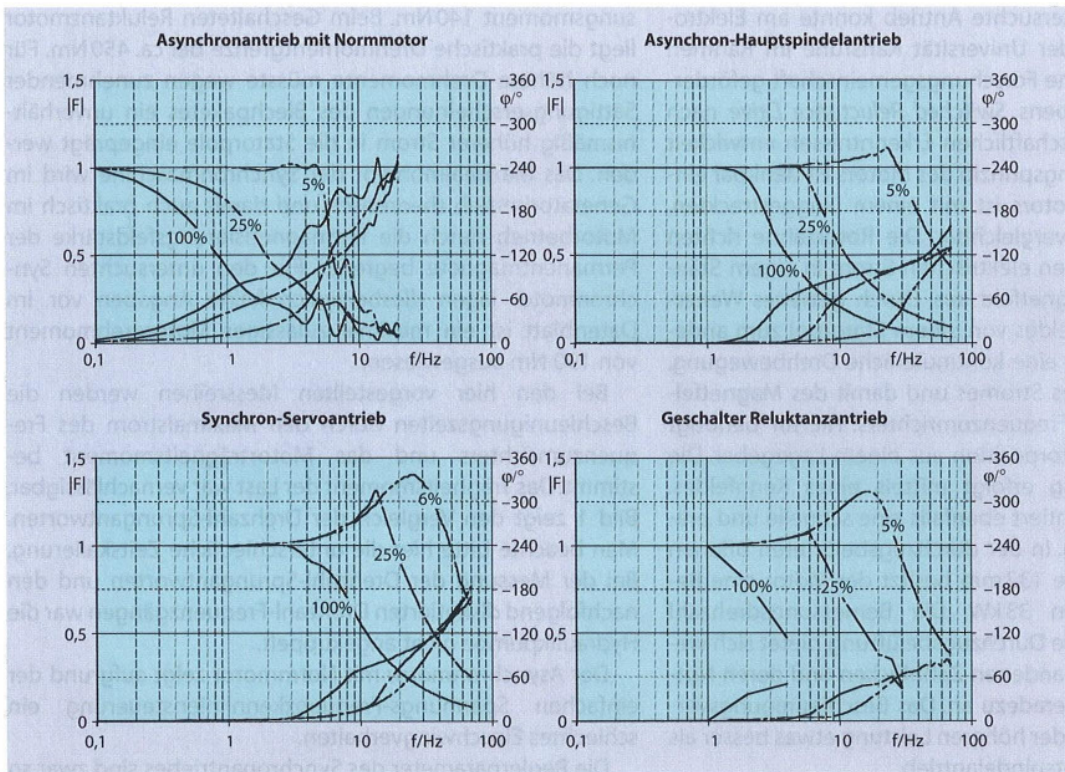
Bei den hier vorgestellten Messreihen werden die Beschleunigungszeiten durch den Maximalstrom des Frequenzumrichters und das Motorträgheitsmoment bestimmt. Das Trägheitsmoment der Last war vernachlässigbar. Bild 1 zeigt den Vergleich der Drehzahl-Sprungantworten. Man beachte bitte hier die unterschiedliche Zeitskalierung. Bei der Messung der Drehzahl-Sprungantworten und den nachfolgend diskutierten Drehzahl-Frequenzgängen war die Hydraulikpumpe nicht angekuppelt.

Der Asynchronmotor mit Normmotor zeigt aufgrund der einfachen Spannungs-Frequenzkennliniensteuerung ein schlechtes Einschwingverhalten.

Die Reglerparameter des Synchronantriebes sind zwar so eingestellt, dass die Beschleunigungszeit möglichst kurz ist. Eine Ursache für die erkennbare Dauerschwingung bei oberen Drehzahlen konnte auch nach Rücksprache mit dem Hersteller nicht gefunden werden. Solche Schwingungen sind für die relativ „weiche“ Hydraulik nicht unbedingt störend, da sie durch die Kompressibilität des Hydrauliköls gedämpft werden. Hydrauliköl besitzt gegenüber Stahl eine

**Bild 1: Drehzahl-Sprungantworten der Antriebe im Vergleich (Messreihen). Drehzahl n und Drehmoment M in Abhängigkeit von der Zeit t (Zeitskalierung unterschiedlich!).**





**Bild 2: Drehzahl-Frequenzgänge der Antriebe im Vergleich (Messreihen). Amplitudenverhältnis  $|F|$  und Phasenwinkel  $\varphi$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ .**

um das ca. 175-fache höhere Kompressibilität. Bei Werkzeugmaschinen z. B. wären solche Schwingungen unzulässig.

Sehr gute Einschwingverhalten zeigen der Asynchron-Hauptspindeltrieb und der Geschaltete Reluktanztrieb. 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 bei anschließender stationärer Genauigkeit. Hier wird ein guter Kompromiss zwischen Schnelligkeit, Dämpfung und stationärer Genauigkeit des Regelkreises erzielt. Der Geschaltete Reluktanztrieb beschleunigt bis ca. 850 U/min mit 300 Nm, danach wird das Drehmoment bei konstanter Motorleistung reduziert. Die Wellenleistung musste wegen der maximal zulässigen Aufnahmeleistung des zur Verfügung stehenden Frequenzumrichters auf 28 kW begrenzt werden.

## 6. Drehzahl-Frequenzgänge

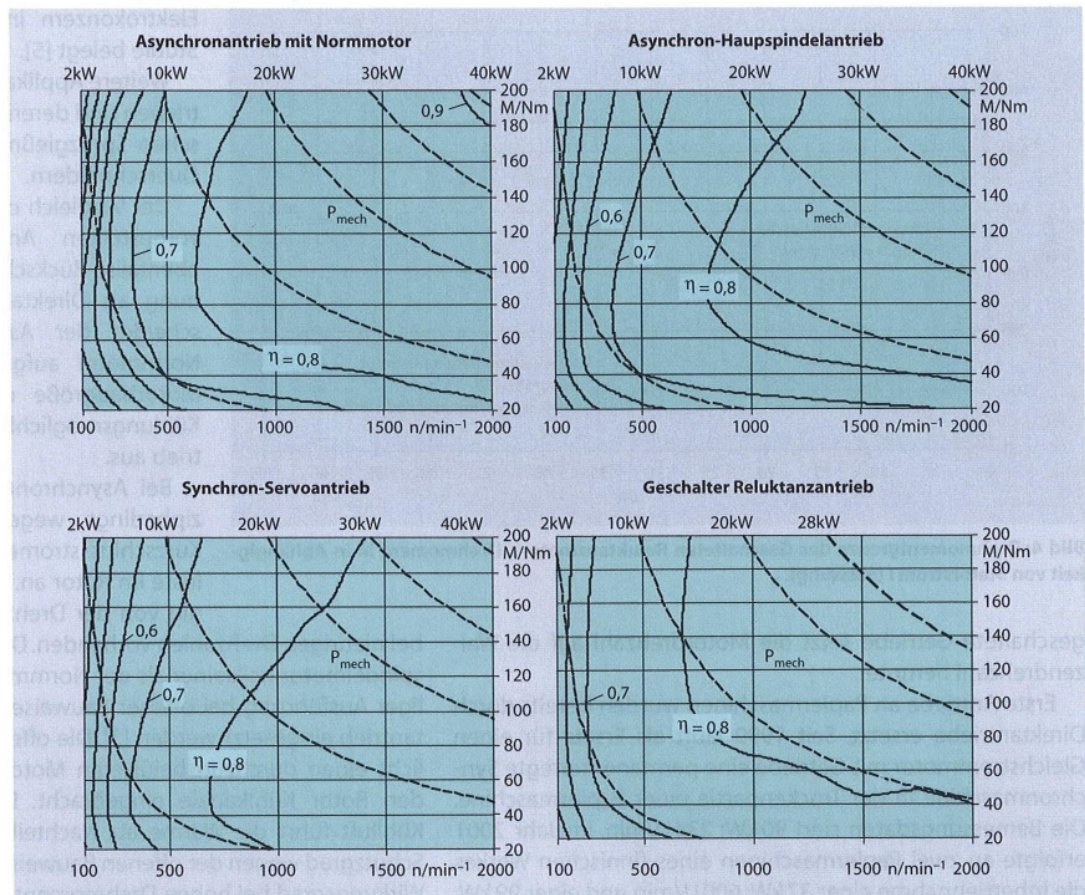
Die Drehzahl-Frequenzgänge dienen zur weiteren Abschätzung des dynamischen Antriebsverhaltens, insbesondere des Kleinsignalverhaltens. Sie wurden jeweils für  $\pm 5\%$ ,  $\pm 25\%$  und  $\pm 100\%$  der maximalen Drehzahl 2000 U/min gemessen (Bild 2). Das Amplitudenverhältnis ist auf die Amplitude der Söldrehzahl normiert. Bei höherer Aussteuerung und zunehmender Frequenz geht das Motordrehmoment auf den zulässigen Maximalwert und damit in die Begrenzung, daraus resultiert ein nichtlineares Übertragungsverhalten. Wird die Drehmomentbegrenzung nicht erreicht, kann die Übertragungsfunktion der Antriebssys-

teme durch ein lineares Verzögerungsglied 2. Ordnung angenähert werden.

Der Asynchronantrieb mit Normmotor zeigt ein sehr schlechtes Führungsverhalten und ist somit für dynamische Antriebe ungeeignet. Die Begründung liegt im geringen Beschleunigungsvermögen und im gewählten Steuerungsverfahren. Lässt man für das 5% Kleinsignalverhalten zwischen Soll- und Istwert der Drehzahl eine maximale Phasenverschiebung von  $10^\circ$  zu, so kann der Normmotor bei sinusförmigem Sollwert bis ca. 1 Hz, der Hauptspindeltrieb bis ca. 14 Hz, der Servoantrieb bis ca. 8 Hz und der Reluktanztrieb bis ca. 10 Hz betrieben werden. Die Systemeigenfrequenzen lassen sich zu 5 Hz beim Asynchronantrieb mit Normmotor und zu 31 Hz beim Synchron-Servoantrieb ablesen. Beim Asynchron-Hauptspindeltrieb und beim Geschalteten Reluktanztrieb lassen sich deren Eigenfrequenzen nur noch abschätzen. Sie beträgt bei beiden Systemen ca. 40 Hz.

## 7. Wirkungsgrade

Um das Belastungsmoment erzeugen zu können, erfolgten die Wirkungsgradmessungen mit angekoppelter Hydraulikpumpe. Gemessen wurden die vom Frequenzumrichter aus dem Drehstromnetz aufgenommene elektrische Leistung, das Drehmoment an der Motorwelle und die Motordrehzahl. Der Antriebswirkungsgrad ist der Quotient aus abgegebener mechanischer Leistung zur aufgenommenen elektrischen Leistung. Im Bild 3 sind die Antriebswirkungsgrade in Abhängigkeit vom Drehmoment und der Motordrehzahl gegenübergestellt. Wirkungsgradlinien mit konstantem Betrag wurden in die Drehmoment-Drehzahl-Ebene einge-



**Bild 3: Antriebswirkungsgrade im Vergleich (Messreihen). Antriebswirkungsgrad  $\eta$  in Abhängigkeit vom Drehmoment  $M$  und der Drehzahl  $n$ .**

zeichnet. Die Kurven konstanter Motorabgabeleistung 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 um den Bemessungspunkt mit einem optimalen Wirkungsgrad betrieben werden.

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

Eben diese flussbildende Komponente des Motorstromes entfällt beim Synchron-Servoantrieb wegen des Einsatzes der Permanentmagnete. Deshalb hat dieser nahezu über den gesamten Drehzahlbereich bei kleinen Drehmomenten den besten Wirkungsgrad. Bei hohen Drehmomenten liegen die Werte ähnlich dem Hauptspindelantrieb, die anderen beiden Antriebe sind besser. Würde der Synchronantrieb nicht mit einer Diodenbrücke, sondern wie die anderen Antriebe mit einem Transistorstromrichter am Drehstromnetz betrieben, läge dessen Wirkungsgrad im Bemessungspunkt um ca. 3% niedriger. Der Wirkungsgrad netzseitiger Transistorstromrichter einschließlich der Netzdrossel liegt zwischen ca. 94% und 96%.

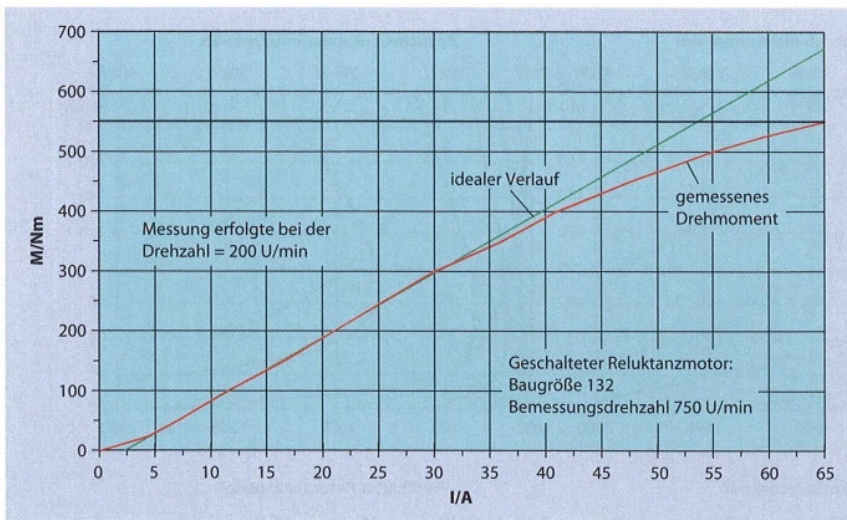
Für den drehmomentstarken Betrieb im unteren Drehzahlbereich zeigt der Geschaltete Reluktanzantrieb die besten Werte. Ab 100 U/min besitzt er bereits einen Wirkungsgrad von 50%, bei 300 U/min sind es bereits über 70%. Wegen einer Umrichterbegrenzung wurden nur Werte bis 28 kW Abgabeleistung gemessen. Der Knick in der 80% Wirkungsgradlinie bei 1500 U/min rührt von einer Umschaltung des Drehmomentsterverfahrens her.

## 8. Direktantriebe

In vielen industriellen Anwendungen ist man bemüht, durch den Einsatz von Direktantrieben auf Getriebe zu verzichten. Getriebe stellen einen wesentlichen Kostenfaktor dar, benötigen Platz, begrenzen durch das Getriebeispiel die dynamischen Systemeigenschaften und bedürfen einer relativ intensiven Wartung.

In erster Näherung bestimmt das geforderte Drehmoment die Baugröße eines Elektromotors und nicht dessen Leistung. Es gibt Elektromotoren, welche aufgrund ihrer Eigenschaften und des konstruktiven Aufbaus als Direktantrieb besser geeignet sind als andere. Realistisch sind deshalb Überlegungen, Getriebe bis zu einer Untersetzung von ca. 5:1 durch Direktantriebe zu ersetzen.

Zum Beispiel laufen die Antriebswalzen in Papiermaschinen mit Drehzahlen von ca. 300 U/min bis 600 U/min. Derzeit werden hierfür vierpolige Asynchronmotoren mit einer Bemessungsdrehzahl von 1500 U/min eingesetzt. Das nach-



**Bild 4: Drehmomentgrenze des Geschalteten Reluktanzmotors. Drehmoment M in Abhängigkeit von Statorstrom I (Messung).**

geschaltete Getriebe setzt die Motordrehzahl auf die Walzendrehzahl herunter.

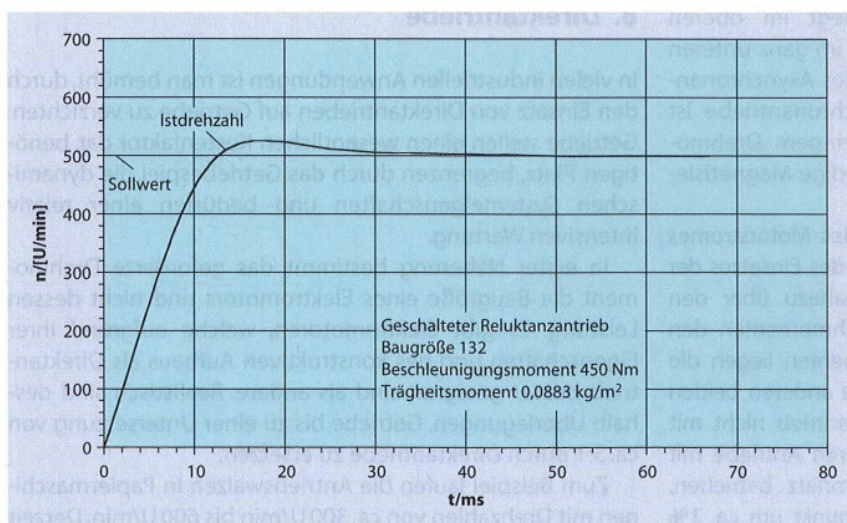
Erste Antriebe an Papiermaschinen wurden bereits durch Direktantriebe ersetzt. Seit 1999 läuft als Ersatz für einen Gleichstrommotor mit Getriebe eine permanenterrregte Synchronmaschine in der Trockenpartie einer Papiermaschine. Die Bemessungsdaten sind 90 kW; 234 U/min. Im Jahr 2001 erfolgte an zwei Papiermaschinen eines finnischen Werkes die Inbetriebnahme einer 37 kW; 600 U/min und einer 99 kW; 425 U/min Synchronmaschine [5]. Ein anderes Automatisierungsunternehmen installierte in der Papierfabrik Perlen einen Aufsteckmotor auf eine Papierleitwalze. Die technischen Daten sind 12 kW bei 750 U/min. Hier konnte sogar die Kupplung entfallen, indem man den Maschinenrotor in die Welle der Papierleitwalze integrierte. Der Stator wurde dann auf die Welle aufgesteckt.

Die Beispiele zeigen einen deutlichen Trend zum Einsatz von Direktantrieben bei Papiermaschinen. Deren Wirtschaftlichkeit wird durch die von einem weltweit operierenden

Elektrokonzern in Auftrag gegebene Studie belegt [5]. Weitere Applikationen von Direktantrieben sind deren Einsatz in vollelektrischen Spritzgießmaschinen [6] und in Querschneidern. Der Vergleich der in diesem Beitrag vorgestellten Antriebssysteme lässt ebenfalls Rückschlüsse für deren Eignung als Direktantrieb zu. Sicherlich scheidet der Asynchronantrieb mit Normmotor aufgrund seiner großen Motorbaugröße und der schlechten Kühlungsmöglichkeiten als Direktantrieb aus. Bei Asynchronmotoren fallen prinzipbedingt wegen des induzierten Kurzschlussstromes relativ hohe Verluste im Rotor an. Diese sind unabhängig von der Drehzahl und somit auch bei niedrigen Drehzahlen vorhanden. Der Asynchron-Hauptspindelmotor ist kleiner als der Normmotor, und in hochpoliger Ausführung bei offener Bauweise könnte er als Direktantrieb eingesetzt werden [3]. Die offene Bauweise ermöglicht einen durchzugsbelüfteten Motor. Hierfür werden in den Rotor Kühlkanäle eingebracht. Die durchströmende Kühlluft führt die Wärme ab. Nachteilig sind der niedrige Schutzgrad wegen der offenen Bauweise und der abfallende Wirkungsgrad bei hohen Drehmomenten.

Beim permanentmagneterregten Synchronmotor sind die Rotorverluste sehr niedrig. Die Statorverluste können mittels einer Wasserkühlung sehr gut abgeführt werden. Der Motor besitzt eine geschlossene Bauweise und damit einen hohen Schutzgrad gegenüber Verschmutzung und Wasser. Das zulässige Dauerdrehmoment des hier untersuchten Motors steigt mit sinkender Drehzahl auf 100 Nm bei 500 U/min an. Aus diesen Gründen ist der permanenterrregte Synchronmotor als Direktantrieb geeignet. Die vorgestellten Messergebnisse widerlegen jedoch die Auffassung, dass ein Synchronantrieb wegen der Permanentmagnete grundsätzlich einen besseren Wirkungsgrad als andere Antriebssysteme besitzt. Bei hohen Drehmomenten und niedrigen Drehzahlen besitzt der Asynchron-Hauptspindelantrieb gleichwertige Ergebnisse, der Geschaltete Reluktanzantrieb ist besser.

Im Rotor und auch im Stator des Geschalteten Reluktanzmotors werden Ummagnetisierungsverluste erzeugt. Diese fallen jedoch sehr stark mit der Drehzahl ab. Deshalb kann durch einen höheren Motorstrom das zulässige Dauerdrehmoment im unteren Drehzahlbereich angehoben werden. In langsam laufenden Motoren begrenzen deshalb die Wicklungsverluste des Stators und die Kühlung das zulässige



**Bild 5: Beschleunigungsvorgang nach einem Sollwertsprung (Messung). Drehzahl n in Abhängigkeit von der Zeit t.**

Dauerdrehmoment. Bei dem hier untersuchten Motor sind bei 500 U/min in der offenen durchzugsbelüfteten Ausführung ein Dauerdrehmoment von 250 Nm und in der geschlossenen oberflächenbelüfteten Ausführung 190 Nm zulässig. Mit einer Wasserkühlung würden sich die Wicklungsverluste noch besser abführen lassen. Im linken oberen Teil des Wirkungsgraddiagramms weist der Geschaltete Reluktanzantrieb die besten Werte auf.

Weil es für den industriellen Einsatz des Geschalteten Reluktanzantriebes im Gegensatz zu den anderen drei vorgestellten Antriebssystemen noch keine allgemein bekannten Erfahrungen gibt, soll die Leistungsfähigkeit als Direktantrieb im Folgenden näher dargestellt werden. Durch eine im Motorklemmkasten veränderte Verschaltung der Statorpolwicklungen wurde aus dem bisher behandelten Reluktanzmotor der Bemessungsdrehzahl 1500 U/min ein Motor der Bemessungsdrehzahl 750 U/min gemacht. Der vorhandene Frequenzumrichter konnte daraufhin für die folgenden Versuche genutzt werden.

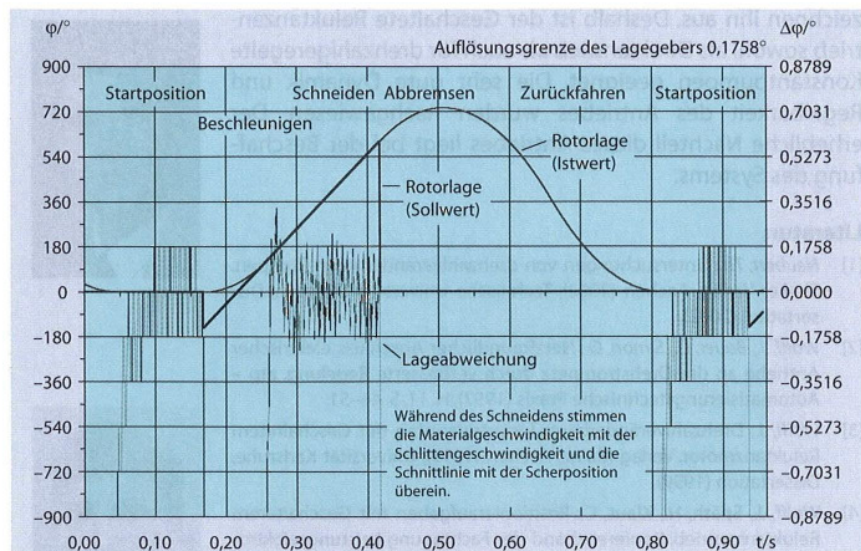
Bild 4 zeigt das gemessene Drehmoment in Abhängigkeit des Statorstromes bei 200 U/min. Im unteren Bereich steigt das Moment flach an, ein Teil des Stromes wird für die Magnetisierung der Maschine benötigt. Danach steigt das Drehmoment linear mit zunehmendem Strom an. Sättigungserscheinungen bedingen ab 350 Nm einen zunehmend flacheren Drehmomentanstieg. Der Motor der Achshöhe 132 wurde bis 550 Nm ausgemessen. Die für die Praxis relevante Drehmomentgrenze für den Kurzzeitbetrieb liegt auch mit Rücksicht auf die mechanische Festigkeit des Motors bei ca. 450 Nm. Für noch größere Drehmomente müsste ein unverhältnismäßig höherer Strom in die Statorpole eingepreßt werden.

In Bild 5 ist ein Beschleunigungsvorgang nach einem Drehzahlsollwertsprung vom Stillstand auf 500 U/min dargestellt. Die Drehmomentbegrenzung des Umrichters wurde auf 450 Nm eingestellt. Es war keine Last angekuppelt.

Bild 6 zeigt die Regelabweichung des Geschalteten Reluktanzantriebes über den Arbeitszyklus eines Querschneider-Schlittenantriebes [4]. Der verwendete Rotorlagegeber besaß eine Auflösung von 0,1758°. Die Regelabweichung liegt sowohl in der Ausgangsposition als auch während des Schneidvorganges innerhalb der Geber-Auflösungsgrenze.

## 9. Zusammenfassung

Der Asynchronantrieb mit Normmotor und einfachem Steuerungsverfahren stellt eine kostengünstige Lösung für einfache Antriebsaufgaben dar. Wegen der Standardisierung ist die Austauschbarkeit auch zwischen Fabrikaten verschiedener Hersteller gewährleistet. Eine unkomplizierte Beschaffung bzw. ein weltweiter Service im Störfall sind weitere Vor-



**Bild 6:** Regelabweichung der Rotorposition  $\Delta\varphi$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  (Messung) über den Arbeitszyklus eines Querschneider-Schlittenantriebes.

teile. Der Normmotor besitzt einen sehr guten Wirkungsgrad um den Bemessungspunkt. Wird der Normmotor mit einer feldorientierten Regelung betrieben, dies erfordert einen besseren Frequenzumrichter, lassen sich sehr gute Ergebnisse bezüglich stationärer Drehzahlgenauigkeit erreichen. Für den hochdynamischen Betrieb und für den Direktantrieb ist der Asynchronantrieb mit Normmotor ungeeignet. Aufgrund seiner geringen Kosten kommt er jedoch als Antrieb für drehzahlveränderbare Verstellpumpen in Frage, die geringere Dynamik kann dabei teilweise vom Verstellsystem der Pumpe ausgeglichen werden [1].

Der Asynchron-Hauptspindeltrieb ist ein auf dynamische Anwendungen optimierter Asynchronantrieb. Der kleinere Motor besitzt deshalb ein relativ geringes Trägheitsmoment. Anspruchsvolle schnelle Drehzahlregelungen und Positionieraufgaben lassen sich mit ihm realisieren. Das Motorprinzip verzichtet auf den Einsatz teurer Permanentmagnete. Als Direktantrieb ist er mit dem niedrigeren Schutzgrad einer durchzugsbelüfteten Maschine in trockener und staubfreier Umgebung geeignet. Der Wirkungsgrad ist im Vergleich zum Normmotor niedriger.

Der Synchron-Servoantrieb besitzt ein sehr geringes Trägheitsmoment und daher eine sehr hohe Dynamik für Drehzahlregelungen. Die prinzipbedingte Verwendung von Permanentmagneten verteuert die Maschine. Sie hat den besten Wirkungsgrad bei hohen Drehzahlen und kleinerem Lastmoment. Weil im Rotor nur geringe Verluste anfallen, der Stator gut gekühlt werden kann und der Motor einen hohen Schutzgrad besitzt, ist dieser Antrieb als Direktantrieb geeignet. Gegen den Einsatz als Direktantrieb spricht der geringe Wirkungsgrad bei hochausgenutzter Maschine.

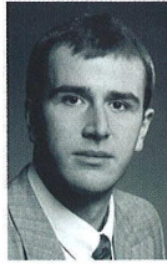
Der Geschaltete Reluktanzantrieb besitzt seine Vorzüge für Anwendungen im unteren Drehzahlbereich mit hohem Drehmoment. Er hat hier im Vergleich zu den anderen Systemen den besten Wirkungsgrad. Im Rotor fallen geringe Verluste an, und der Stator kann unter Beibehaltung eines hohen Schutzgrades gut gekühlt werden. Sehr hohe zulässige Drehmomente für den Dauer- und den Kurzzeitbetrieb



zeichnen ihn aus. Deshalb ist der Geschaltete Reluktanzantrieb sowohl als Direktantrieb als auch für drehzahlgeregelte Konstantpumpen geeignet. Die sehr gute Dynamik und Regelbarkeit des Antriebes wurden nachgewiesen. Der erhebliche Nachteil dieses Antriebes liegt bei der Beschaffung des Systems.

### Literatur:

- [1] *Neubert, Th.*: Untersuchungen von drehzahlveränderbaren Pumpen. Shaker-Verlag, Aachen (2002); Technische Universität Dresden, Dissertation (2002).
- [2] *Wolff, J., Bauer, G., Simon, O.*: Netzfrequenzfreundlicher Anschluss elektrischer Antriebe an das Drehstromnetz durch verbesserte Regelung. *atp – Automatisierungstechnische Praxis* (1997), H. 11, S. 44–51.
- [3] *Wolff, J.*: Drehzahlveränderbarer Industrieantrieb mit Geschaltetem Reluktanzmotor. Verlag Mainz, Aachen (1999); Universität Karlsruhe, Dissertation (1999).
- [4] *Wolff, J., Späth, H., Klaus, C.*: Positionieraufgaben mit Geschaltetem Reluktanzantrieb. Konferenzband der Fachtagung Leistungselektronik und intelligente Bewegungssteuerungen, Magdeburg (1999), S. 143–148. <http://www-eti.etec.uni-karlsruhe.de/wolffju/publications.htm>
- [5] *Welin, B., Friman, C.-J.*: New Direct Drive System opens a new era for Paper Machines. *Paper and Timber* Vol. 6, No. 5 (2001) pp. 385–387.
- [6] *Stillhard, B., Weber, O.*: Vollelektrische Spritzgießmaschinen – ein wegweisendes Konzept? *Kunststoffberater*, Nr1/2 (1993).



Dr.-Ing. *Jürgen Wolff* leitet die Abteilung Prozessautomatisierung bei der Jaakko Pöyry Deutschland GmbH. Eines seiner Aufgabenschwerpunkte ist die Erstellung von Automatisierungskonzepten für Anlagen der Papier- und Zellstoffindustrie. Ein Teil der hier vorgestellten Ergebnisse ist während seiner Tätigkeit am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe unter Betreuung von Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Späth entstanden.

Adresse: Jaakko Pöyry Deutschland GmbH, Schmiedestr. 15, D-01809 Heidenau, Tel. (0 35 29) 5 51-5 46, Fax -500, E-Mail: [juergen.wolff@de.poyry.com](mailto:juergen.wolff@de.poyry.com)



Dr.-Ing. *Thomas Neubert* war zum Zeitpunkt der Untersuchungen als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidtechnik der Technischen Universität Dresden auf dem Gebiet der drehzahlgeregelten hydrostatischen Pumpen tätig und ist heute Oberingenieur am selben Institut (Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. S. Helduser). Seine Tätigkeitsschwerpunkte sind die elektrohydraulische Antriebs- und Regelungstechnik sowie die Mechatronik.

Adresse: Technische Universität Dresden, Institut für Fluidtechnik, Mommsenstr. 13, D-01062 Dresden, Tel. (03 51) 4 63-3 76 01, Fax -3 21 36, E-Mail: [neubert@ifd.mw.tu-dresden.de](mailto:neubert@ifd.mw.tu-dresden.de) ○