



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

MASSNAHMEN ZU AUSSCHÖPFUNG DES ENERGIESPARPOTENTIALS BEI SCHRITTMOTORENANSTEUERUNGEN

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Dr. Stefan Berchten, BEngineering, www.bengineers.ch
Hardstrasse 20, 8303 Bassersdorf, berchten@bengineers.ch

Impressum

Datum: 30.12.2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleiter: felix.frey@bfe.admin.ch

Projekt- / Vertragsnummer: 101428/151686

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch und www.electricity-research.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage	5
1.1 Antriebssysteme mit Schrittmotoren	5
1.2 Aktueller Einsatz von Schrittmotoren	5
1.3 Ersatz der Schrittmotorsteuerung durch einen Schritt-Motor-Servo	5
2. Ziel der Arbeit	5
3. Vorgehen	6
4. Ergebnisse	6
4.1 Anforderungen an Schrittmotoransteuerung mit Servoregler	6
4.3 Implementation	12
4.4 Messungen am Gesamtsystem	12
4.5 Energiemessung	14
4.6 Diskussion der Ergebnisse	16
4.7 Weitere Ergebnisse	16
5. Marktsensibilisierung	18
5.1 Schritt-Motor-Servo (SMS) an der SPS/IPC-Drives	18
6. Schlussfolgerungen	19
Referenzen	19
Anhang	20
Presseinformation	20
Flyer	21

Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Konzept eines Schritt-Motor-Servo	6
Abbildung 2: Konzept des hybriden Schrittmotors	7
Abbildung 3: Aufbau des hybriden Schrittmotors	7
Abbildung 4: Kompakter Wickelkopf des Schrittmotors	8
Abbildung 5: Servomotor im Vergleich zum Schrittmotor	9
Abbildung 6: Hochpolige Transversalfuss-Servomaschine als Schrittmotor mit 15Nm Dauermoment	10
Abbildung 7: Optischer Low Cost Encoder mit bis zu 2000 Impulse pro Umdrehung	10
Abbildung 8: Schrittmotoren mit angebaute Encoder	11
Abbildung 9: Systemaufbau und Interface eines 3-fach Servoregler	12
Abbildung 10: Messaufbau: Ueberdimensionierter Transformator, Regler, Motor-Rack	13
Abbildung 11: Verfahrenzyklus der Messung	14
Abbildung 12: Resultierende Energieaufnahme	15
Abbildung 13: Resultierende Leistungsaufnahme	15
Abbildung 14: Arbeitbereich Erweiterung durch Feldschwächstrategie	17
Abbildung 15: Arbeitbereich Erweiterung durch Feldschwächstrategie	17

Zusammenfassung

Schrittmotoren sind beliebte Antriebselemente. Sie sind einfach anzusteuern, brauchen im Allgemeinen kein Motorfeedbacksystem und sind daher robust und zuverlässig.

Schrittmotorenanwendungen findet man im Leistungsbereich bis 300 W. Die Motoren zeichnen sich durch ihre Hochpoligkeit und minimale Stromwärmeverluste aus.

Stromgeregelter Ansteuerschaltungen ermöglichen einen einfachen Betrieb der Motoren. Es kann aber gezeigt werden, daß mit Servo-Ansteuerverfahren Energie in einem Maß eingespart werden kann, daß sich die Mehrinvestitionen für die Lagerückführung in 2 bis drei Jahren zurückzahlen. Weiter kann damit die Dynamik und die Zuverlässigkeit der Positionierung erhöht werden.

Ziel des Projekts war es, nach dem gebauten Funktionsmuster der Steuerung einen Schrittmotorwechselrichter zu entwickeln und bereitzustellen, der in der Lage ist, die im Markt angebotenen Schrittmotoren – 2- oder 3-phasig – mit einem einfachen Encoder elektronisch zu kommutieren, damit die Motoren energieoptimal geführt werden können.

Mit Messungen wurde das Energieeinsparpotential verifiziert. Dabei zeigte sich, daß das neuartige Antriebssystem weitere „Unique Selling Points“ wie höhere Ausbeutung der Motormomente zulässt.

Die relevanten Vorteile des doch unkonventionellen Antriebssystems wurden zusammengetragen und konnten mit einem Systemhaus für Antriebstechnik an der SPS/IPC/Drives 2006 im November dem Antriebsmarkt präsentiert werden. In einem Produktflyer und einem Zeitungsbericht wurden die gefundenen Vorteile dargestellt. Die so eingeleitete Sensibilisierung des Antriebsmarkts soll zu einer schnellen Verbreitung der nachweislich energieeffizienten Technologie führen.

Resumée

Des moteurs pas à pas sont des éléments d'entraînement populaires. Ils sont faciles à diriger, en général ne nécessitent pas de système de rétroaction de moteur et sont donc durables et fiables.

On trouve des applications de moteur pas à pas dans la gamme de capacité jusqu'à 300 W. Les moteurs se distinguent par leurs pôles élevés et leurs pertes de chaleur d'électricité minimales.

Des commandes d'amorçage réglées permettent un fonctionnement simple des moteurs. On peut toutefois montrer (projet [1]) qu'avec des procédures de contrôle, dans le sens de commutation d'électricité électroniques, de l'énergie est économisée, de mesure à ce que les multi investissements pour le rétroaction de position peuvent être amortis en 2 à 3 ans. En outre, avec le pilotage assisté, la dynamique et la fiabilité de la mise en position peuvent être augmentées.

Le but était de développer et de mettre à disposition un onduleur pour moteur pas à pas, après avoir construit un modèle de fonctionnement de la commande, qui est en mesure, de commuter électroniquement avec un encodeur les moteurs pas à pas de deux ou trois fibres offerts dans le marché, afin que les moteurs puissent être conduits de façon d'obtenir une efficacité d'énergie optimale. Parmi différents types de régulateurs examinés, le régulateur d'état montre la meilleure performance.

Le potentiel d'économie d'énergie a été vérifié avec des mesures. Il s'est avéré que le nouveau système d'entraînement permet d'autres "Unique Selling Points" comme une exploitation plus élevée des moments de moteur.

Les avantages pertinents du système d'entraînement quand même peu orthodoxe ont été réunis et ont pu être présentés au marché de commande avec une maison de système pour la technologie de propulsion au SPS/IPC/Drives en novembre 2006. Dans une brochure de produit et dans un reportage de journal ont été représentés, les avantages trouvés. La sensibilisation de cette façon introduite dans le marché de commande doit conduire à une diffusion rapide de la technologie d'efficacité d'énergie justifiée.

Abstract

Stepping motors are popular drive components. They are simple to control. In general they need no engine feedback system and are thus durable and reliable.

Stepping motors applications cover the range of capacity up to 300 W. They are characterised by their high pole and minimal current losses.

Current regulated supply circuits allows a simple operation of the motors. It can be shown (project [1]) that with servo-mechanism procedures in a sense of electronic current commutator, energy is saved in a measure that the multi-investments for position feedback can be amortized in 2 to 3 years. Besides this both the dynamic behaviour and the reliability of the positioning can be improved with the servo-mechanism.

A goal of the project was to develop and make available a stepping motor inverter, according to the built operating model of the control, which is able to commute electronically with a simple encoder, the stepping motors (2 or 3 fibres) offered in the market, so that the engines can be controlled energy-efficiently. Among different types of tested regulators, the state regulator shows the best performance.

The potential of energy saving was verified with measurements. It showed up that the new drive system permits further „Unique Selling Points“ like higher exploitation of the motor troques.

The relevant advantages of the unorthodox drive system were gathered and could be presented to the drive market with a system house for propulsion technology at the SPS/IPC/Drives in November 2006. The found advantages were represented in a product flyer and a newspaper report. The sensitization introduced into the drive market, is to lead to a fast spreading of a proved energy-efficient technology.

1. Ausgangslage

1.1 Antriebssysteme mit Schrittmotoren

Zur Bewältigung vieler Antriebsaufgaben ist es sinnvoll, Schrittmotoren einzusetzen. Sie sind preisgünstig, lassen sich einfach bewegen und benötigen in einer Minimalapplikation keine Gebersysteme.

Schrittmotoren sind hochpolige Motoren synchroner Bauart und besitzen zwei oder drei Statorphasen mit einfacher Wickeltechnik, die sich dadurch auszeichnet, dass der Phasenwiderstand im Gegensatz zu Servomotoren konventioneller Bauart und bezogen auf das zu erzeugende Moment kleiner ist.

Die hohe Polzahl macht den Schrittmotor zu einem Langsamläufer. Er wird vorteilhaft in Applikationen eingesetzt, wo Drehzahlen bis 1000 rpm und hohe Kraft benötigt wird. Er kann auch als Direktantrieb eingesetzt werden, wenn keine hohen Anforderungen an die Kraftkonstanz gestellt werden.

1.2 Aktueller Einsatz von Schrittmotoren

Obwohl der ganze Servomotorenmarkt hohe Zuwachsraten erfährt, ist der Schrittmotor noch immer ein gefragtes Antriebselement. Untersuchungen zeigen, dass Schrittmotorenantriebe trotz obiger Vorteile einen schlechten Gesamtwirkungsgrad aufweisen. Dies kann auf die einfache Ansteuermöglichkeit und die geforderten Dynamikreserven zurückgeführt werden.

1.3 Ersatz der Schrittmotorsteuerung durch einen Schritt-Motor-Servo

Im Rahmen einer ersten Studie (Projekt [1]) wurde untersucht, in welchem Mass sich die Effizienz des Schrittmotorenantriebs verbessern lässt, wenn anstelle der einfachen Steuerung ein Servoregler mit elektronischer Stromkommutation eingesetzt wird.

Weitere Untersuchungen, zeigen, dass – abhängig von der Einschaltdauer des Antriebs 50..80% der Antriebsenergie eingespart werden kann.

2. Ziel der Arbeit

Ziel des Projekts ist es, nach dem gebauten Funktionsmuster einen preisgünstigen Wechselrichter bereitzustellen, der die am Markt erhältlichen zwei und dreiphasigen Schrittmotoren mit Hilfe eines einfachen Encoders elektrisch kommutieren kann. Damit lassen sich mit entsprechenden Regelalgorithmen die Stromführung des Schrittmotors energetisch optimieren.

Um die Reaktionszeit der Industrie zu verkürzen, soll ein einfach implementierbarer Wechselrichter, dessen Potential im Einsparen von Energie und die weiteren Vorteilen dieser Technologie den Anlagen-Herstellern über die Fachpresse vorgestellt werden.

Zweckdienlich sollen die technischen und funktionalen Eigenschaften wie Positionsstabilität, Geschwindigkeit, Energieverbrauch und andere technische Features untersucht und mit denjenigen eines klassischen Schrittmotors verglichen werden.

3. Vorgehen

Das Vorgehen für die Durchführung des vorliegenden Projekts gliederte sich in folgende Phasen:

Implementation einer einfachen Schrittmotoransteuerung für 2- und 3-phasen Schrittmotoren auf einer Dreifachservoplattform.

Optimierung des Closed-Loop Reglers

Messtechnischer Vergleich der Steuerung mit der Regelung

Einarbeitung der gefundenen Resultate in Verkaufsunterlagen und Pressemappe für Marktsensibilisierung

4. Ergebnisse

4.1 Anforderungen an Schrittmotoransteuerung mit Servoregler

Konzept

Das Konzept Schrittmotorservo SMS unterscheidet sich von bekannten Schrittmotoransteuerungen mit Lagerückführungen darin, dass der Schrittmotor wie eine Synchronmaschine elektrisch komutiert wird. Es ist keine Schrittmotorsteuerung mit Lageabgleich (Nachkorrektur der Lage bei Schrittverlust). Der innerste Stromregelkreis agiert als Längs- und Querstromregler, womit sowohl das Feld wie auch das Moment beeinflusst werden kann. Damit wird es möglich die Maschine hochdynamisch zu beeinflussen und mit Feldschwächung hohe Drehzahlen zu erreichen.

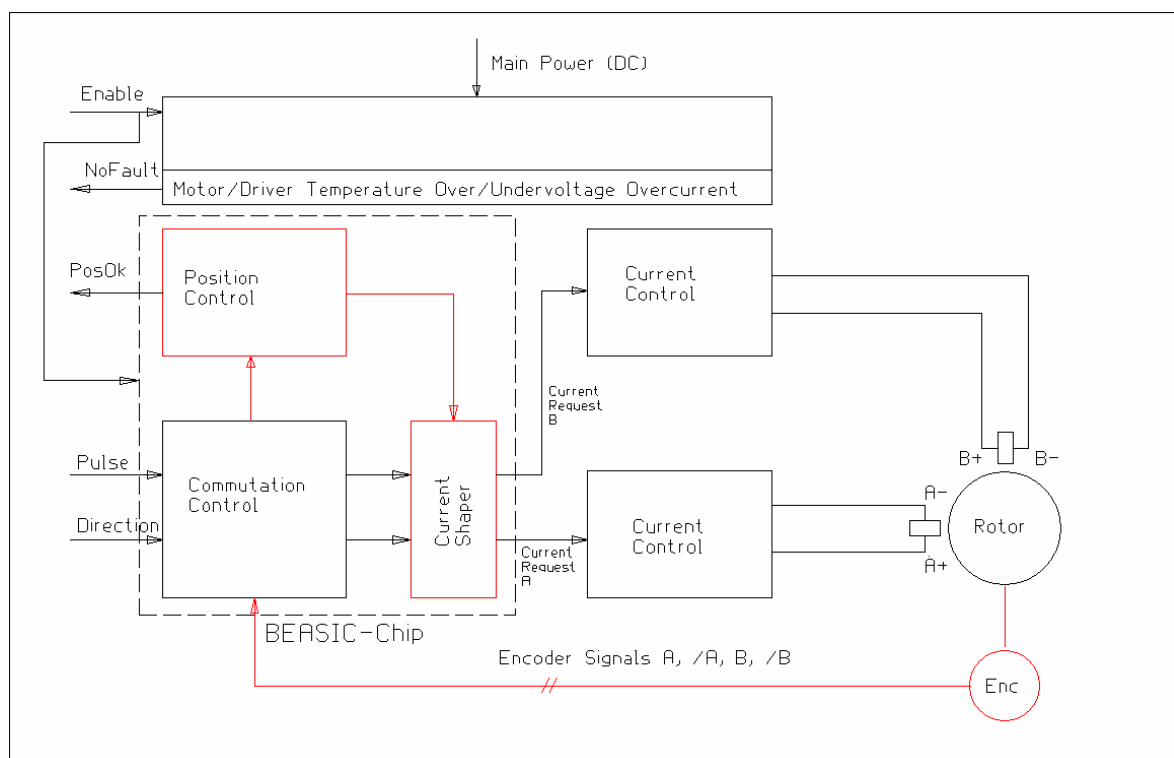


Abbildung 1: Konzept eines Schrittl-Motor-Servo

Der Schrittmotor

Schrittmotoren sind prinzipiell hochpolige Synchronmotoren. Sie werden als reluctante (ausgeprägte Pole) Motoren mit und ohne permanentmagnetischer Erregung gebaut. Schrittmotoren mit permanentmagnetischer Erregung sind als hybride Schrittmotoren bekannt. Niederpolige reluctante Synchronmotoren sind auch als „Switched Reluctance Motors“ bekannt, wenn sie Einzelzahnspulen aufweisen.

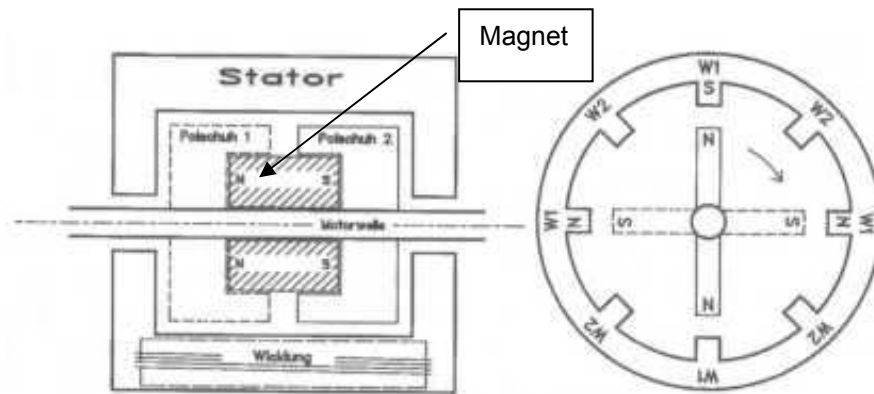


Abbildung 2: Konzept des hybriden Schrittmotors

Das Drehmoment, welches den Rotor antreibt, entsteht durch unterschiedlich ausgerichtete Magnetfelder in Stator und Rotor. Der Rotor dreht sich immer so, daß sich der größtmögliche magnetische Fluß ausbildet.

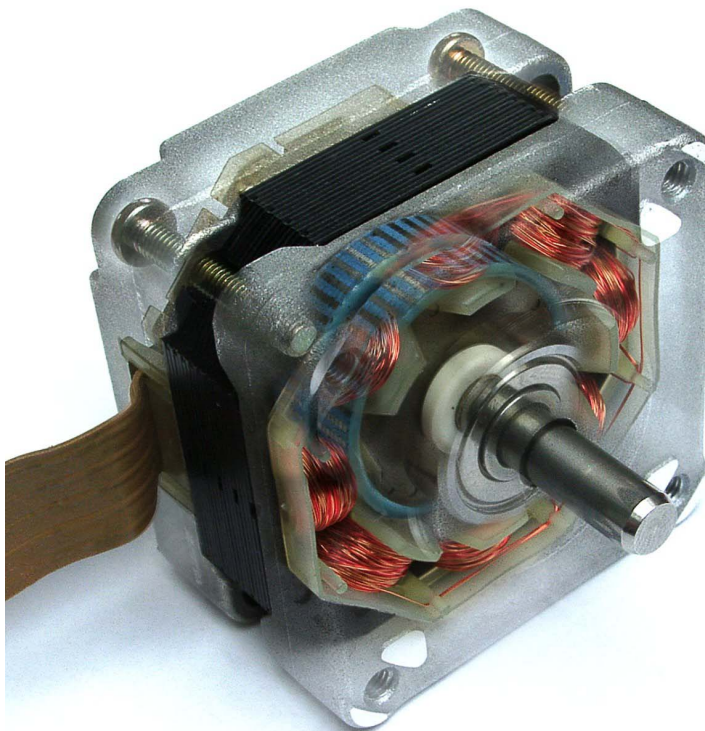


Abbildung 3: Aufbau des hybriden Schrittmotors

Anstelle der permanentmagnetischen Erregung ist auch die elektrische Erregung bekannt. Sie lassen sich bestens feldschwächen und erreichen damit hohe Drehzahlen.

Schrittmotoren werden mit unterschiedlichen Phasenzahlen gebaut. Bekannt sind zwei-, drei- und fünphasige Motoren. Die grösste Verbreitung besitzt der Zweiphasenschrittmotor. Er wird normal über 4 Halbbrücken gespeist. Entsprechend gross ist die Anzahl Halbbrücken bei fünf Phasen. Es ist aber möglich zwei- und dreiphasige Schrittmotoren mit nur drei Halbbrücken zu speisen – ein Ziel des Projekts. Damit können sicher mehr als 90% aller Schrittmotoren angesteuert werden.

Weiterhin kann man zwei Gruppen von Motoren bzw. Ansteuertechniken unterscheiden: Unipolare und bipolare Motoren.

Unipolare Motoren verfügen über zwei Spulen mit Mittelabgriff. Sie haben fünf oder sechs Anschlüsse. Mit einem Multimeter läßt sich schnell feststellen, welche Anschlüsse die Mittelabgriffe und welche die Spulenenden sind. Die Ansteuerung erfolgt durch wechselweises Einschalten von jeweils einem Spulenende, so daß immer nur die halbe Spule bestromt ist. Damit halbiert sich auch die Momentenkonstante $[Nm/A]$. Das Nennmoment reduziert sich um den Faktor $\sqrt{2}$.

Ein 2-phasiger, bipolarer Motor hat zwei Spulen, manchmal auch zwei Spulenpaare, die durch Umpolen angesteuert werden. Sind zwei Spulenpaare vorhanden (also acht Anschlüsse am Motor), können die Spulenpaare wahlweise parallel oder in Reihe geschaltet werden. Eine Parallelschaltung halbiert die induzierte Spannung. Damit kann die maximale Drehzahl im Idealfall verdoppelt werden. Allerdings wird der Strom notwendigerweise dabei verdoppelt, da sich die Abgabeleistung auch verdoppelt.

Der Schrittmotor bietet den Vorteil, dass er aufgrund der kompakten Flusswege genügend Platz für die auch sehr kompakten Ankerspulen mit kleinen Wickelköpfen besitzt. Dies ist aus dem folgenden Bild ersichtlich.

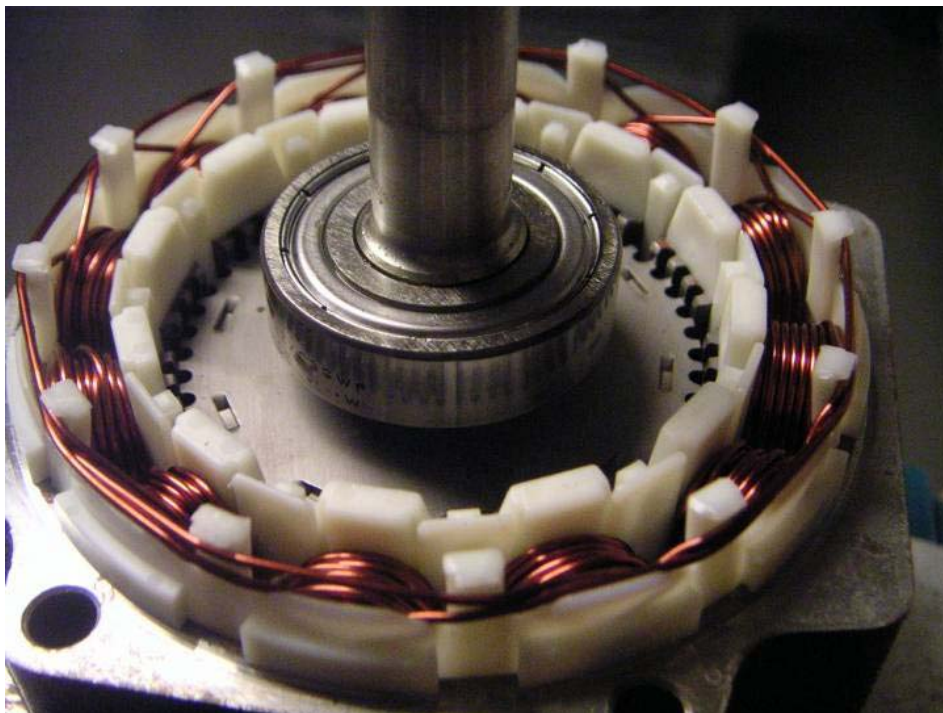


Abbildung 4: Kompakter Wickelkopf des Schrittmotors

Prinzipiell kann ein Schritt-Motor-Servoregler auch 2- und 3-phasige Servomotoren betreiben. Die folgende Vergleichstabelle zeigt den Unterschied zwischen den beiden Motortypen.

	Servomotor 1.8 Nm 10 polig	Schrittmotor 4 Nm 100 polig	220% Nennmoment
Aktivgewicht [kg]	3.3	3.2	gleiches Gewicht
Motorkonstante Nm/Sqrt(Pv)	0.2	0.47	230% Moment bei gleichen Verlusten
Ungeregelte Steifigkeit [Nm/grd]	0.5	10.9	21-fache Steifigkeit
Max Moment [Nm]	6.8	6.1 (SMS)	90% Spitzenmoment
Nm_{max}/(kg cm²)	4.25	2.8	66% max Beschleunigung

Abbildung 5: Servomotor im Vergleich zum Schrittmotor

Es ist ersichtlich, dass bei gleichem Motorgewicht der Schrittmotor

- mehr als das doppelte Moment erzeugt
- Bei gleichen Verlusten (gleiche Motortemperatur) das 2.3-fache Moment erzeugt
- Durch die hohe Polzahl die 20-fache natürliche Steifigkeit besitzt (Synchronmaschine kann nicht als Schrittmotor betrieben werden!)
- Ein unwesentlich kleineres Spitzenmoment besitzt

Damit sprechen viele Argumente für den Einsatz von Schrittmotoren. Nachteilig kann sich jedoch der hohe Anteil an Rastmoment im Betrieb auswirken. Es ist schwierig bei der Spezifikation einer Anlage abzuschätzen, „wieviel Rastmoment ein Prozess verträgt“. Es macht daher Sinn, im Vorfeld einer Entwicklung den Einsatz möglicher Antriebsvarianten genauer zu untersuchen.

Es gibt auch Antriebsaufgabenstellungen, bei denen der Einsatz von hochpoligen Synchronmotoren als Schrittmotor die Funktion erfüllen kann.



Abbildung 6: Hochpolige Transversalfluss-Servomaschine als Schrittmotor mit 15Nm Dauermoment

Aufgrund der Forderung nach höherer Betriebssicherheit werden heute vielleicht 60% der Schrittmotoren schon mit Encoder versehen. Standardmässig werden Encoder mit 250, 500 und 1000 Impulsen pro Umdrehung verbaut.



Abbildung 7: Optischer Low Cost Encoder mit bis zu 2000 Impulse pro Umdrehung

Um gute Regeleigenschaften zu erhalten, sollten 1000 und mehr Impulse pro Umdrehung angestrebt werden. Kleinere Auflösungen erfordern mehr Einstellarbeit und bewirken unruhigeren Lauf.



Abbildung 8: Schrittmotoren mit angebautem Encoder

Anforderungen an den Wechselrichter

Die hohen Statorfrequenzen ($= \frac{5}{6} \cdot \text{Motorumdrehung pro Minute}$) erfordern einen schnellen Stromregelkreis. Gut geeignet sind analoge Stromregler. Digitale erfordern Stromregelzyklen von $< 60 \mu\text{s}$. Damit lassen sich Stator-Ströme bis 1600 Hz gut führen und kommutieren.

Hohe Anforderungen werden auch an den Geschwindigkeits- und Lageregler gestellt. Es wurden verschiedene Versuche mit Kaskadenregler und Zustandsregler durchgeführt. Es zeigt sich, dass mit beiden Prinzipien geregelt werden kann. Bei gleicher Reglerperformance läuft jedoch der Zustandsregler subjektiv ruhiger. Da das Quantisierungsrauschen beim Einsatz eines Zustandsreglers kleiner ist. Noch bessere Resultate werden erreicht, wenn ein Geschwindigkeitsbeobachter die Zustandsgröße filtert. Im Gegensatz zu einer konventionellen Stromansteuerung sind beide Regelkonzepte im Vorteil. Die Motorgeräusche sind besonders bei hohen Drehzahlen subjektiv um Faktoren angenehmer.

Hohe Anforderungen werden auch an die Hardwarekosten gestellt. Hier bieten Multiachsregler gegenüber den Einzelmotorregler den Vorteil, dass die Reglerinfrastruktur (Zwischenkreis, Schutzfunktionen) mehrfach genutzt werden kann.

4.3 Implementation

Die Implementation des Schrittmotor-Servo Konzepts auf eine Servoplattform umfasst im wesentlichen folgende Schritte:

1. Implementation der Strom-Steuerung. Damit kann der Motor Open-Loop betrieben werden. Hier bieten sich eine Vielzahl von optimierenden Vorsteueralgorithmen an.
2. Implementation der Strom-Kommutierung für 2- und 3-phasige Motoren. Bei einem 2-phasigen Motor werden die beiden negativen Enden der zwei Phasenwicklungen gemeinsam auf die Halbbrücke W geschaltet. Hier gilt es zu berücksichtigen, dass diese Halbbrücke W im Betrieb thermisch höher belastet wird.
3. Implementation eines Reglers für Closed-Loop. Entsprechende Reglerstrukturen sind im Anhang gegeben. Im Betrieb hat sich ein Zustandsregler mit Beobachter als optimal erwiesen. Aufgrund der Komplexität der Struktur gehört jedoch die Regelstruktur nicht zu den „einfach bedienbaren“ Reglern. Er besitzt aber den Nachteil, dass der Verfahrensweg von vornherein bekannt ist. Daraus werden „Off-Line“ die Führungsgrößen der Zustände des Reglers (Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung) gerechnet. Dies schliesst momentan die Führung des Motors mit Takt-Richtungssignalen aus. Auch die Bedienbarkeit des Reglers muss noch verbessert und vereinfacht werden.

4.4 Messungen am Gesamtsystem

Systemaufbau

Beim SMS Regler wie er heute zur Verfügung steht, handelt es sich um einen Regler der Niederspannungsklasse. Er wird mit 40 VDC oder 28VAC (Trafo) gespeist. Er besitzt einen gemeinsamen Gleichrichter und Zwischenkreis für die drei Servoregler. Es können bis zu drei Schrittmotoren betrieben werden. Basierend auf der gleichen Prozessorfamilie sind auch einachsige Steuergeräte vorhanden.

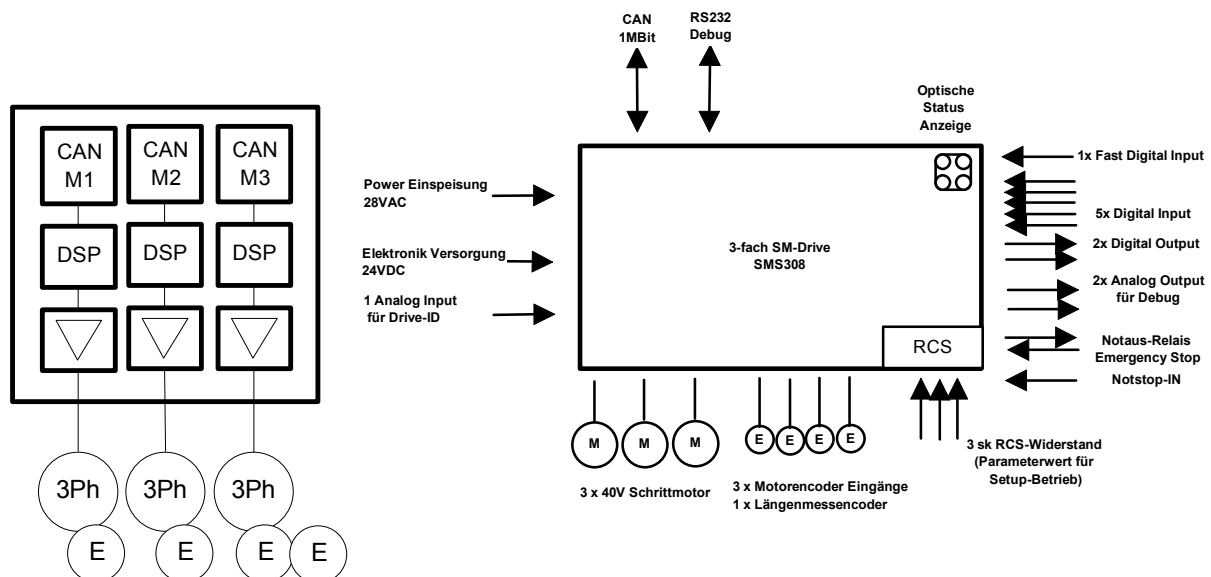


Abbildung 9: Systemaufbau und Interface eines 3-fach Servoregler

Messaufbau für Systemmessungen

Hauptziel der Systemmessungen war das Energieaufnahmeverhältnis bei Open- und Closed-Loop. Beide Betriebsarten können mit derselben Hardware getestet werden.

Der verwendete Servoregler ist ein Niederspannungsgerät. Es muss ein Transformator vorgeschaltet werden.

Da beide Betriebsmodi mit der gleichen HW gemessen werden können, kann der Aufbau des Messsystems drastisch vereinfacht werden. Er besteht im wesentlichen aus den folgenden Geräten:

1. Leistungsmessgerät für die aufgenommene Netzleistung vor dem Transformator
2. Netztransformator: Es wurde ein total überdimensionierter Transformator verwendet. Dieser hat die Eigenschaft, dass die Leerlaufverluste dominieren – die Lastverluste, hervorgerufen durch die Motorbelastungen können vernachlässigt werden. Sollen sie dennoch berücksichtigt werden, so verbessert sich das Energieaufnahmeverhältnis noch mehr zu Gunsten des Schrittmotorservos.
3. Regler: Auch hier können aus dem gleichen Grund nur die Leerlaufverluste berücksichtigt werden.
4. Motor: Es wird für den Open-Loop wie für den Closed-Loop Betrieb der gleiche Motor verwendet. Hier wird eine Maschine mit kleinem Nennstrom eingesetzt, damit die Leerlaufverluste des Reglers dominieren.

Der Versuchsaufbau ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Wahl der Anordnung garantiert eine konservative Messung des Energieaufnahmeverhältnisses und schaltet mögliche absolute Messfehler aus.

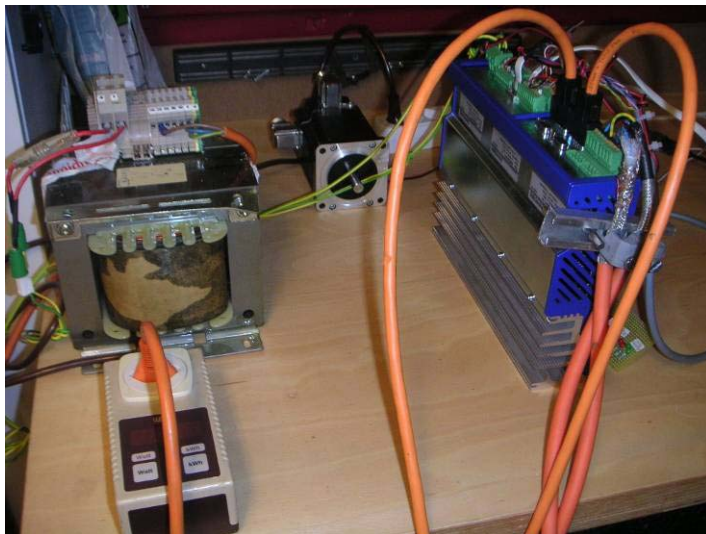


Abbildung 10: Messaufbau: Ueberdimensionierter Transformator, Regler, Motor-Rack

4.5 Energiemessung

Motorbelastung

Für die Motorbelastung ergeben sich zwei Möglichkeiten. Wir können den Motor aktiv oder passiv belasten. Aktiv bedeutet das aktive Abbremsen des Motors bei einer gewissen Drehzahl. Diese Methode wird vorteilhaft beim Ausmessen von stationären Betriebspunkten gewählt. Im allgemeinen wird jedoch ein Schrittmotor dynamisch betrieben. Er wird dauernd beschleunigt und abgebremst. Dies soll auch hier der Fall sein.

Um allfällige und systematische Fehler oder Prozess-Schwankungen zu eliminieren, wählen wir nur eine Trägheitsmasse als Belastung. So wird gewährleistet, dass

1. die Belastung nur durch den Verfahrenzyklus bestimmt ist
2. Allfällige mechanische Reib- und Belastungsfaktoren ausgeschlossen werden können, solange keine Lagerschäden im Prüfling vorhanden sind.

Die folgende Abbildung zeigt den Verfahrenzyklus der Prüfung. Er simuliert typische Schwenkbewegungen, wie er in Produktionsautomaten auftritt.

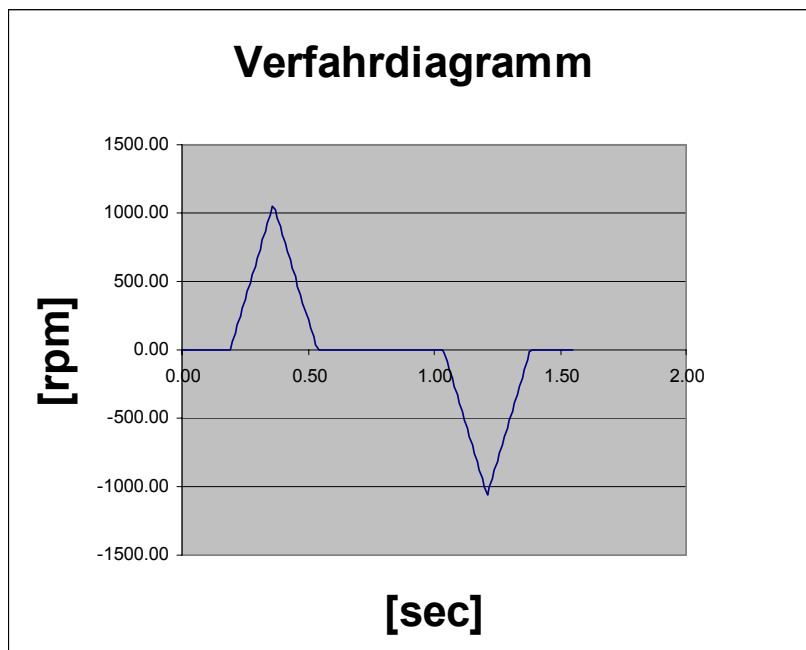


Abbildung 11: Verfahrenzyklus der Messung

Der Verfahrenzyklus wird im wesentlichen durch die Stabilität des gesteuerten Motors bestimmt. Er wurde so gewählt, dass genügend Stromreserven vorhanden sind, so dass der Antrieb auch nach längerer Zeit stabil läuft. (die Wicklungswiderstände nehmen zu, solange der Motor seine Endtemperatur nicht erreicht hat und reduzieren das Kippmoment).

Testprogramm

Damit sich das System stabilisieren kann und eine ansprechend hohe Genauigkeit erreicht werden konnte, wurde wie folgt gemessen:

1. 3Tage Verfahren „Open Loop“
2. 3 Tage Verfahren „Closed Loop“
3. 3 Tage Leerlauf Steuerung

Als Belastungsmotor wurde ein dreiphasiger 0.5 Nm Motor eingesetzt.

Resultate

Nach jeweils drei Tagen konnte die in Abb. 12 dargestellte Energiebilanz gezogen werden.

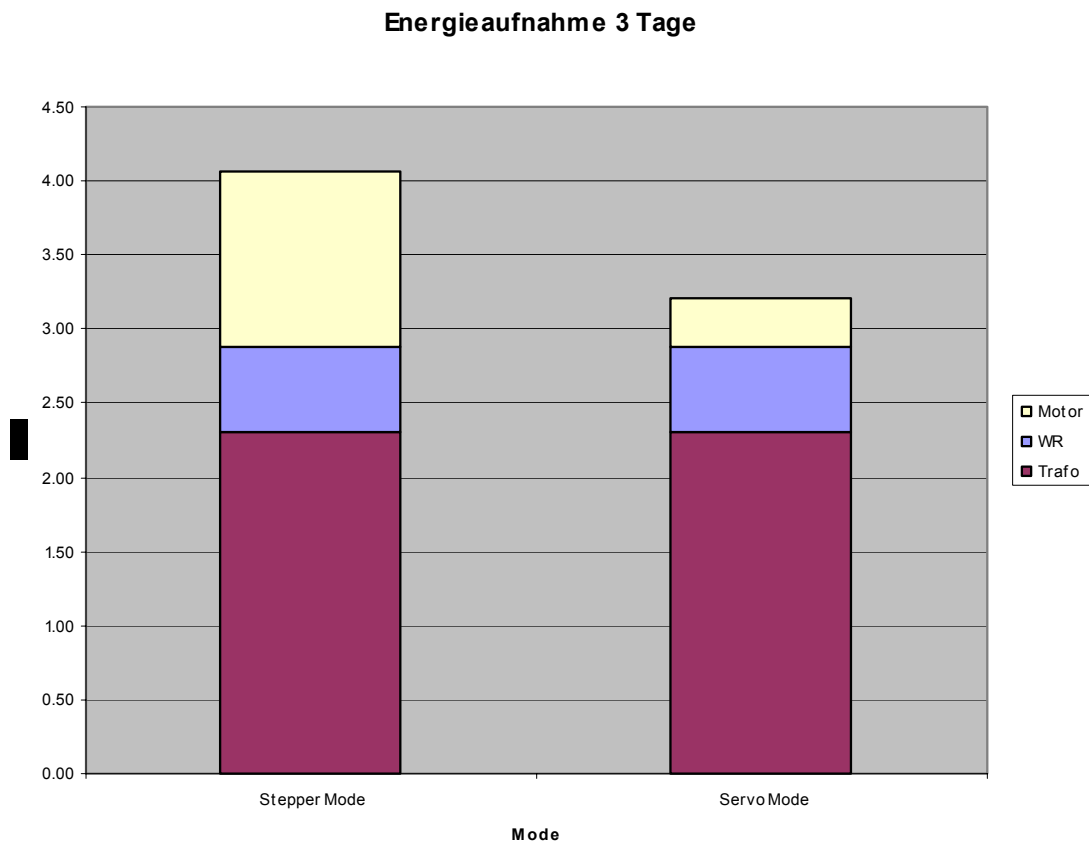


Abbildung 12: Resultierende Energieaufnahme

Es geht daraus hervor, dass

1. Der Motor im Closed-Loop (Servo-)Mode nur 28% der Energie aufnimmt als im Open-Loop (Stepper-) Mode
2. Die WR-Verluste auf die Einzelachse bezogen werden sollte, da die Infrastrukturverluste aller 3 Servos gemessen wurde.
3. Die Ueberdimensionierung des Speisetransformator zu hohen Verlusten im Teillastbereich führt (war so in Kap. 5.3.2 geplant)

Massgebend für den Vergleich sind der gelbe Anteil des Motors. Der Vergleich der Leistungsaufnahme ist in Abb. 13 dargestellt.

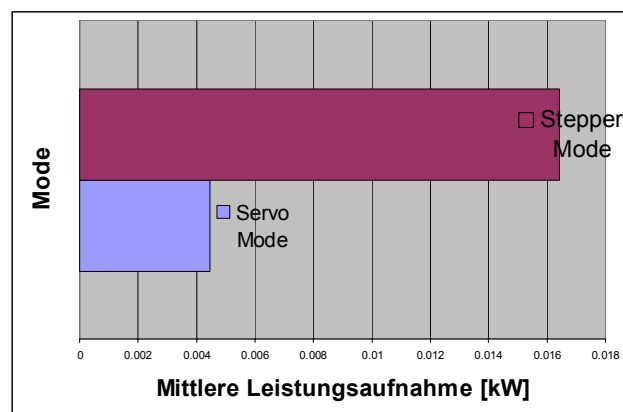


Abbildung 13: Resultierende Leistungsaufnahme

4.6 Diskussion der Ergebnisse

Der überraschend hohe Energieeinsparungsfaktor von 3.8 ist keine Betriebskonstante. Vielmehr hängt er natürlich von den Einsatzbedingungen und der Einschaltdauer ab. Im ausgesuchten Beispiel bewegt der Motor die entsprechende Last im 2-Sekunden Takt. Setzt man den – in der Automobilzulieferindustrie üblichen 1 Sekunden-Takt zugrunde, steigt die Einschaltdauer von 30 auf 60%. Dabei verdoppeln sich die Verluste des Closed-Loop Systems. Die Verluste des Open-Loop System nehmen aber nur um den Faktor

$$\frac{0.6 * 1^2 + 0.4 * 0.5^2}{0.3 * 1^2 + 0.7 * 0.5^2} = 1.47$$

zu. Dies unter der Voraussetzung, dass ein Open-Loop Haltestrom von 50% eingestellt ist.

Damit wird der Energieeinsparungsfaktor bei 60% Einschaltdauer:

$$3.8 * \frac{1.47}{2} = 2.8.$$

4.7 Weitere Ergebnisse

Die elektronische Kommutation des Schrittmotors erzeugt neben der Energieeinsparung weitere positive Eigenschaften.

Laufruhe

Durch die Tatsache, dass das Statorfeld kontinuierlich dem Rotor nachgeführt wird, reduziert sich der „ruckelnde“ Gang der Maschine auf ein Minimum. Das bekannte Einschwingen des Rotors auf seine Neulage wird drastisch reduziert.

Weiter lassen sich Reglereinstellungen finden, bei denen die Unterdrückung der für Schrittmotoren typischen Rastmomente (Wechselmomente des unbestromten Motors bei Drehung des Rotors) im Speziellen bei kleinen Drehzahlen effektiv ausgeglichen werden können.

Arbeitsbereich

Die elektronische Stromkommutierung ermöglicht die Einstellung der Stromkomponenten in Längs- und Querachse der Rotorfeldrichtung. Der sogenannte Querstrom der Maschine erzeugt ein Magnetfeld, das elektrisch 90°, also quer zum Rotorfeld liegt. Damit wird die maximal mögliche Kraftwirkung erzeugt. Der Querstrom ist demnach die momentenbildende Stromkomponente. Die sogenannte Längskomponente des Statorstroms erzeugt ein Statorfeld, das in der gleichen Richtung wie das Rotorfeld liegt. Damit kann das Rotorfeld geschwächt oder auch verstärkt werden. Je nach Auslegung der Maschine sind höhere oder kleinere Längsstromamplituden notwendig, um die, durch das Rotorfeld in die Statorwicklung induzierte Spannung zu beeinflussen. Diese induzierte Spannung ist prinzipiell proportional zur Drehzahl des Rotors und bestimmt, im Gleichgewicht mit der angelegten Klemmenspannung, die Leerlaufdrehzahl der Maschine. Mit der Längskomponente des Statorstroms kann damit die Leerlaufspannung der Maschine erhöht oder reduziert werden. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass auch diese Stromkomponente Verluste in der Statorwicklung erzeugt.

Prinzipiell lassen sich Schrittmotoren vernünftig feldschwächen. Eine Steuerstrategie bestimmt die Grösse der feldschwächenden Stromkomponente. Diese kann optimiert werden. Das folgende Drehzahl-Moment-Diagramm zeigt den Einfluss der optimierten Steuerstrategie.

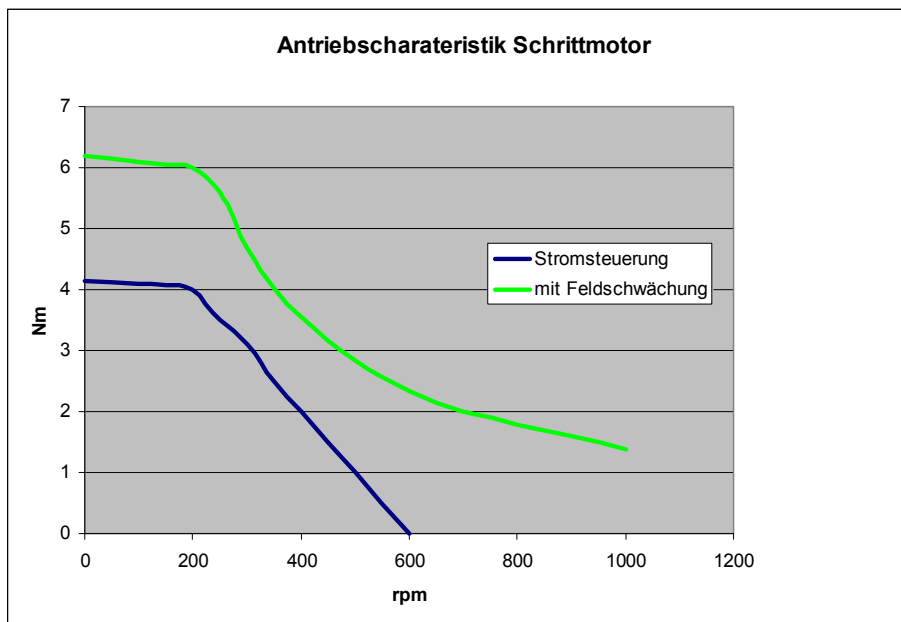


Abbildung 14: Arbeitbereich Erweiterung durch Feldschwächstrategie

Es ist ersichtlich, dass bei einem gegebenen Motor und gegebener Speisespannung die Leistung bis zu 30% gesteigert werden kann. Vor allem bei hohen Drehzahlen lässt sich die Ausgangsleistung nahezu konstant halten und erzeugt eine enorme Steigerung der maximalen Drehzahl.

Im unteren Drehzahlbereich lassen sich durch das Verhindern des Wegkippens des Stators, teilweise über 100% höhere Spitzenmomente erzeugen. Damit kann sowohl der Motor als auch die natürliche Leistungsreserve des Wechselrichters optimal genutzt werden. Dies ist aus der folgenden Grafik ersichtlich.

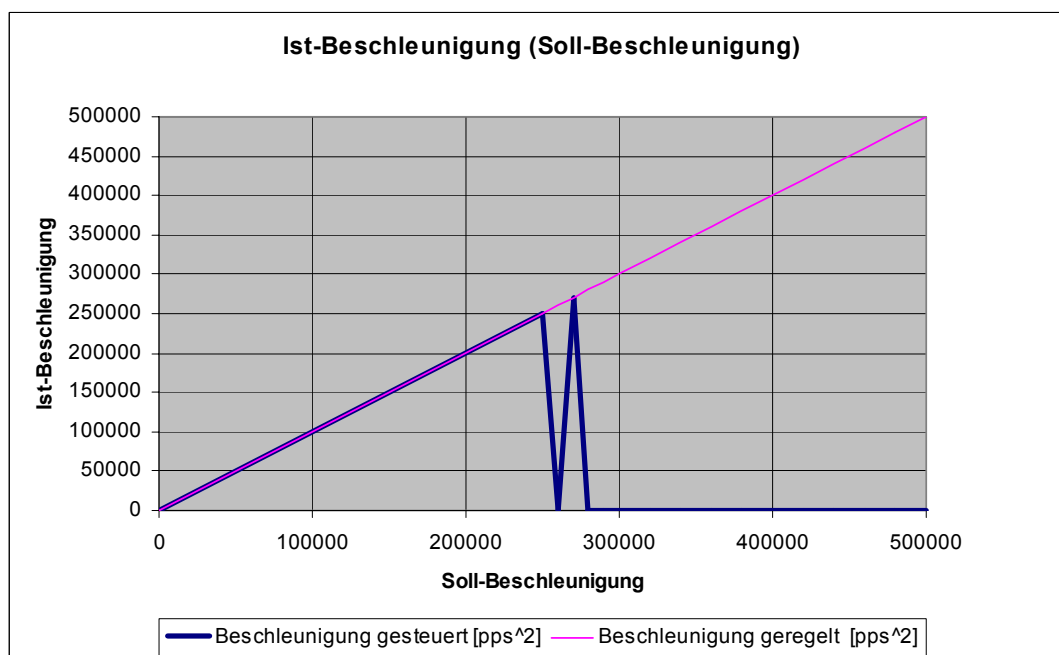


Abbildung 15: Arbeitbereich Erweiterung durch Feldschwächstrategie

Das Verhältnis Maximalstrom zu Dauerstrom eines Wechselrichters liegt in einem Bereich von 1.8 bis 2.5. Betrachtet man aber das Verhältnis Spitzenmoment zu Dauermoment des Servomotors der Tabelle 4-5, so liegt dieses bei $6.8\text{Nm}/1.8\text{Nm} = 3.7$. Anders beim Schrittmotor – da liegt es bei 1.6 bis 2 (Motor von Abbildung 4-15).

Unter diesem Blickwinkel stellt ein Schritt-Motor-Servo das optimalere Gespann dar. Die Spitzenmomente eines Servomotors können nur genutzt werden, wenn der WR thermisch überdimensioniert wird.

5. Marktsensibilisierung

5.1 Schritt-Motor-Servo (SMS) an der SPS/IPC-Drives

Obwohl das Regelsystem noch keine Serienfreigabe hat, wurden Anstrengungen unternommen, das neuartige Antriebssystem auf der SPS/IPC-Drives zu präsentieren. Das Systemhaus *Octacom GmbH* (www.octacom-Antriebstechnik.de) konnte gewonnen werden, das SMS-System auszustellen und der Presse zu präsentieren. Der erarbeitete Inhalt der Pressemappe findet man zusammen mit der Bedienungsanleitung im Anhang.

Das System wurde von potentiellen Kunden mit Interesse aufgenommen. Eine erste Analyse der Anfragen zeigt, dass auch eine Nachfrage nach einachsigen Geräten besteht.



Abbildung 16: Schritt-Motor-Servo an der SPS/IPC Drives 2006

6. Schlussfolgerungen

Schrittmotoren sind attraktive Antriebselemente. Sie zeichnen sich durch eine hohe Kraftwandlungs-Effizienz aus. Im Betrieb mit konventioneller Ansteuerungstechnik geht ein grosser Anteil dieser Effizienz verloren.

Auf Basis einer bestehenden Servoplattform wurde eine Regler-Software entwickelt, die es erlaubt, 2- und 3-phasige Schrittmotoren im Sinne einer Synchronmaschine elektronisch zu kommutieren und zu regeln. Verschiedene Regelalgorithmen wurden ausgetestet. Dabei zeigt der Einsatz eines Zustandsreglers mit Beobachter die besten Resultate bezüglich akustischen Emissionen.

Mit Hilfe von Energiemessungen wurde das grosse Energieeinsparpotential und der damit verbundene **Energieeinsparungsfaktor von 3.8** verifiziert.

Weitere Vorteile sind:

- Die Erhöhung der Abgabeleistung um 30% und mehr
- Erhöhung der Spitzenmomente um bis zu 100%
- Erhöhung der Leerlaufdrehzahl um bis zu 100%
- Optimale thermische Ausnutzung des Wechselrichters ohne Ueberdimensionierung

Aufgrund dieser Vorteile dürfte einer „Renaissance des Schrittmotors“ im Sinne einer low cost Torque-Maschine nichts im Wege stehen.

Der Schritt-Motor-Servo wurde an SPS/IPC Drives in Nürnberg im Herbst 2006 mit Pressemappe erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt.

Referenzen

- [1] [1] Dr. S. Berchten, Energiesparender Schrittmotorantrieb, Forschungsprogramm „Elektrizität“, 2002
<http://www.electricity-research.ch/scripts/index.php?lang=1031>



spruchsvollen Applikationen eingesetzt werden. Ein optionales Interface für das klassische Takt-/Richtungs-Eingangssignal ist in Vorbereitung.



XXX bitte das Bild aus dem Datenblatt mitschicken XXX
Bild: SMS: Drei Antriebsregler für Schrittmotor-Servoansteuerung



Bilder:	XXX	Zeichen:	1.717
Dateiname:	200611022_pm_SMS-antriebsregler	Datum:	08.11.2006

Unternehmenshintergrund

Die 1999 gegründete OCTACOM Antriebstechnik GmbH ist Systemlieferant für komplette Antriebssysteme bestehend aus Motoren, Getrieben, Reglern, Gebern, Bremsen, Kabeln sowie antriebs-spezifischer Software. Das ISO-9001-zertifizierte Unternehmen versteht sich als Problemlöser im Bereich Antriebstechnik, der insbesondere auch in der Lage ist, über das Markübliche hinausgehende Spezialanforderungen zu erfüllen.

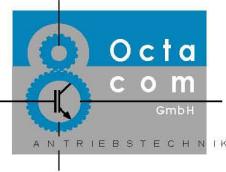
Kontakt: OCTACOM Antriebstechnik GmbH

Klaus Reiningner

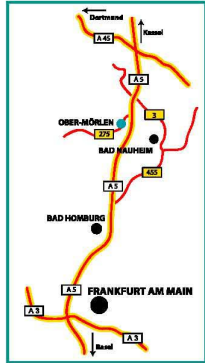
Dieselstr. 3
61239 Ober-Mörlen

Tel.: 06002 / 9398 - 10
Fax: 06002 / 9398 - 15
Email: mail@octacom-antriebstechnik.de
Internet: www.octacom-antriebstechnik.de

 gii die Presse-Agentur GmbH
Immanuelkirchstraße 12
10405 Berlin
Tel.: 0 30 / 53 89 65 -0
Fax: 0 30 / 53 89 65 -29
E-Mail: info@gii.de
Internet: www.gii.de



So finden Sie uns:



OCTACOM
Antriebstechnik GmbH
Dieselstraße 3
D-61239 Ober-Mörlen
Telefon: +49 (0) 60 02-93 98-0
Fax: +49 (0) 60 02-93 98-15
e-mail:
mail@octacom-antriebstechnik.de
www.octacom-antriebstechnik.de

OCTACOM Antriebstechnik GmbH wurde 1999 gegründet und ist Systemlieferant für komplette Antriebe bestehend aus: Motoren, Getrieben, Reglern, Gebern, Bremsen, Kabeln und v.u. antriebspezifischer Software.
Alle OCTACOM-Mitarbeiter verfügen über langjährige Erfahrung in der Antriebstechnik.
OCTACOM unterhält ein großes Lager an Motoren und Reglern, um jederzeit schnell liefern zu können. Reparaturen werden zum größten Teil bei OCTACOM abgewickelt.
OCTACOM liefert kundenspezifische Torque- und Linearmotoren. Weitere OCTACOM Produktlinien sind: Asynchron-Servomotoren, DC Nebenschlussmotoren, DC Niederspannungsregler, Frequenzumrichter, Sondermotoren mit erhöhter Schutzart etc.

Dreifach Servo-/ Schrittmotorsteuerung SMS



OCTACOM ist in Deutschland für den Schweizer Motorhersteller Servax als Vertretung tätig. Die Schwerpunkte liegen hier bei hochtourigen Einbaumotoren für die Werkzeugmaschinenindustrie, sowie Synchron- und Asynchronmotoren bis ca. 200 KW, auch mit integriertem Regler und geberloser Technik.

REEL ist Hersteller von Antriebsreglern aller Art: Frequenzumrichter, Servoregler, Stromrichter etc. REEL wird in Deutschland durch OCTACOM vertreten.

OCTACOM vertritt in Deutschland, Österreich und der Schweiz die Fa. Leeson Electric Corporation. Die Fa. Leeson gehört zum Regal-Belcol Konzern, der größte amerikanische Konzern für Antriebstechnik.
Weitere zugehörige Firmen sind: Marathon und Lincoln.

OCTACOM ist seit dem 16. Nov. 2004
ISO 9001/2000 zertifiziert

November 2004



Schrittmotorensteuerung

Schrittmotorensteuerung



Drei Schrittmotor-Kraftpakete unter effizienter Servo-Kontrolle

Das Novum dieser Antriebsregler ist eine innovative Funktion zur Ansteuerung von Schrittmotoren im energieoptimalen Servo-Mode.

Die Vorteile liegen auf der Hand: Schrittmotoren werden zu hochdynamischen, effizienten Torque-Motoren – sie können nun mit motor-eigenen Spitzenmomenten betrieben werden, wodurch sich die **Zykluszeiten** von Maschinen **um 25 bis 30% verringern** lassen. Gleichzeitig bieten die Antriebsregler aufgrund der Lagerückführung eine erhöhte Betriebssicherheit. Die preisgünstigen Multiregler senken auch die Betriebskosten, denn bei gleichen Einsatzbedingungen verbrauchen servokontrollierte Schrittmotoren bis zu vier mal weniger Energie als klassisch angesteuerte Schrittmotoren.

Die Geldbörse wird also gleich drei Mal entlastet:

- **Minimale Reglerkosten pro Achse durch Dreifachaufbau,**
- **Einsatz kostengünstige Schrittmotoren und**
- **reduzierter Energiebedarf.**

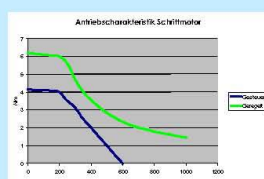
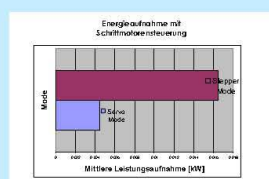
Ermöglicht wird dies durch schnelle DSP's im Multipack, die die Strom-, Drehzahl- und Positionierregelung übernehmen. Der Regelalgorithmus für Drehzahl und Position beruht auf einem energieoptimalen Zustandsregler mit Last- und Geschwindigkeitsbeobachter, der im 250 µs-Takt arbeitet. Mittels einer optionalen integrierten Bahnsteuerung können die Achsen vorgegebenen Bewegungsprofilen synchron folgen. Neben den drei Encodern für die Rotationsgeber kann an das Gerät außerdem ein vierter Leit-Encoder zur Synchronisierung der drei Achsen angeschlossen werden.

Die Antriebsregler führen neben der Achsregelung parallel auch SPS-Funktionen aus, wodurch sich selbst komplexe Motion-Control-Applikationen einfach realisieren lassen.

Die Kommunikation mit anderen Steuerungen erfolgt über das CANopen-Protokoll. Über die CAN- oder die integrierte RS232-Schnittstelle wird auch die gesamte Parametrierung, Programmierung und Inbetriebnahme vorgenommen – dazu dient das im Lieferumfang enthaltene System Designer Tool.

Die effektive, dreiphasige Ansteuerung der Leistungsstufe erfolgt mit 32 kHz (62,5 µs Stromregeltakt) und liegt damit außerhalb des menschlichen Hörbereichs.

Dank eines integrierten Schutzes gegen Überspannung, Übertemperatur, Überstrom und Erdschluss können die annehmbaren Geräte auch in sicherheitstechnisch anspruchsvollen Applikationen eingesetzt werden. Ein optionales Interface für das klassische Takt-/Richtungs-Eingangssignal ist in Vorbereitung.



2 Phasen Schrittmotore



3 Phasen Schrittmotore



- 3 komplette Antriebsregler für 2- und 3-phasige Schrittmotoren in einem Gerät
- Jeder Antrieb unabhängig ausrüstbar mit unterschiedlicher SW für folgende Betriebsmodi:
- AC Servoantrieb
- Schrittmotorantrieb im closed-loop Betrieb
- Schrittmotorantrieb im open-loop Betrieb
- 3 Encodereingänge + 1 zusätzlicher Geber-Eingang für Leit-Encoder (Führungsgeber)
- Leistungseinspeisung 1 x 28 VAC
- Zwischenkreisspannung 1 x 40 VDC
- Dreiphasige PWM Steuerung, 32 kHz Schaltfrequenz
- Doppelte Überlast für 1s, integrierter Schutz gegen Überspannung, Übertemperatur, Überstrom, Kurzschluss, Erdschluss
- externe Hilfsspannungs-Versorgung 24VDC
- Single-Chip DSP Steuerung (pro Achse) mit Flash Speicher, über CAN Bus zu laden
- Kompakte Bauform in Antriebsgehäuse
- CAN Schnittstelle mit CANopen Protokoll
- RS232C Schnittstelle für Servicezwecke

Vergleich Servomotor / Schrittmotor

	Servomotor 1,8 Nm 10 polig	Schrittmotor 4 Nm 100 polig	220% Nennmoment
Antriebsgewicht [kg]	3,3	3,2	gleiches Gewicht
Motorkonstante Nm / Serv(Pv)	0,2	0,47	230% Moment bei gleichen Verlusten
Unregelte Steifigkeit [Nm/gsd]	0,5	10,9	21-fache Steifigkeit
Max Moment [Nm]	6,8	6,1 (SMS)	90% Spitzenmoment
Nm _{max} / (kg cm ²)	4,25	2,8	66% max Beschleunigung

Stand: November 2004