

Anlage 2 zur Einführung in Motion Control:

Einführung in die Begriffe Servoantrieb und "geregelter Achse"

Quellen:

Portal Beratung und Schulung zu elektrischen Antrieben: <http://w-tech.de> ->
-> www.servotechnik.de -> www.servotechnik.de/fachwissen/fachw_main.htm
weitere im Text bezeichnete Bildquellen

Literatur:

- /1/ Prof. Dr. Manfred Schulze Elektrische Servoantriebe Fachbuchverlag Leipzig im
Carl Hanser Verlag 2008
/2/ Prof. Dr. Zirn und Dipl.-Ing. Sauer mann: Script WS 08/09 Steuerung- und
Informationssysteme (Einführung in die Automatisierungstechnik) TU Clausthal
(www.tu-clausthal.de)

Der Begriff Servomotor wurde durch sein ursprüngliches Einsatzgebiet als "Hilfsantrieb" geprägt (servus: lat. Sklave). Ursächliche Aufgabe eines Hilfsantriebes gegenüber dem (zumeist leistungsstärkeren) Hauptantrieb einer Maschine war es, Werkzeuge den von einer NC-Steuerung vorgegebenen Positionswerten nachzuführen.

Heute steht das Wort Servoantrieb allgemein für einen **drehzahlvariablen elektromotorischen Antrieb**. Derartige Antriebe sind grundsätzlich geregelte Antriebe. Umgangssprachlich wird auch der Begriff "geregelter Achsantrieb" oder einfacher "geregelter Achse" verwendet, weil bei einer Vielzahl von Bearbeitungsmaschinen Werkstück- und Werkzeugbewegungen auf zumeist mehreren geometrischen Achsen vollzogen werden. Qualitätsmaßstab eines Servoantriebes ist, inwieweit er die mechanischen Größen **Moment und Drehzahl in einem weiten Stellbereich kontinuierlich, genau und reproduzierbar bereitstellen** und damit einen **vorgegebenen Lagepunkt** (bzw. eine vorgegebene Position) **anfahren** können. Voraussetzung für den Bau leistungsfähiger Servoantriebe ist die innovative Entwicklung von Sensorik, Mikro- und Leistungselektronik.

Servoantriebe werden in zunehmend vielen technologischen Prozessen und Fertigungseinrichtungen eingesetzt wie

- Be- und Verarbeitungsmaschinen, insbesondere Werkzeugmaschinen für Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen, Umformen von Blechteilen, Sägen u. a.
- Maschinen für das Verseilen von Stahldrähten
- Roboter und Handhabetechnik
- Transport- und Lagertechnik
- Wickler und Technologie für das Weben von synthetischen Materialien

Sie sind insbesondere das entscheidende Herzstück der CNC-Maschinen und der Mehrheit der Roboter. Motion Control Systeme ermöglichen nun, Servoantriebe auch in den allgemeinen Maschinenbau zu integrieren.

Vom Grundsatz her sind elektromotorische Antriebe Energiewandler. Ihre Bedeutung ist groß: In hochentwickelten Ländern werden etwa 60% der elektrischen Energie mittels Antrieben in mechanische Energie gewandelt. /1/ Dabei wächst der Anteil von Servoantrieben beständig. Wenn man heute Automatisierungstechnik weiterentwickeln und deren Potenzial nutzen will, muss man sich der Technik der Servoantriebe zuwenden.

Zum Fortschritt des Einsatzes geregelter Achsantriebe gegenüber Maschinen mit klassischem "Ein-Motor-Antrieb" schreibt M. Schulze /1, S.11/:

"Wird der drehzahlgeregelte Antrieb (Servoantrieb) durch eine Lageregelung erweitert, so lassen sich anspruchsvolle mechanische Bewegungsabläufe entlang einer mechanischen Bewegungsschse (Rotation oder Translation) realisieren. Die Bewegungssteuerung im

mehrdimensionalen Raum entsteht durch Superposition der Bewegungen der einzelnen Achsen. Die Koordination der Einzelbewegungen der Servoantriebe erfolgt über elektrische Steuerungen. Durch die **auf die Einzelantriebe verteilte Intelligenz** können aufwendige mechanische Koppellemente vereinfacht werden oder ganz entfallen. Dadurch erhöht sich die Flexibilität des gesteuerten technologischen Prozesses bedeutend gegenüber dem klassischen Ein-Motoren-Antrieb mit kompliziertem mechanischen Verteilungssystem. Änderungen im Fertigungsablauf können ohne Umrüstzeiten einfach durch die elektrische Steuerung erfolgen, die gleichzeitig auch die Fertigungsqualität ständig überwacht und notwendige Korrekturen automatisch vornimmt."



"Intelligenter" dezentraler Positioniermotor POSMO aus der Produktfamilie SIMODRIVE der Siemens AG
Die Vernetzung dieser Servoantriebe erfolgt mit Profibus-DP
Bildquelle:
www.automation.siemens.com/

Der Begriff Servomotor allein beschreibt kein (!) physikalisches Wirkungsprinzip an sich wie etwa die Bezeichnungen Gleichstrommotor oder Asynchronmotor. Servomotoren sind heute grundsätzlich bürstenlose Maschinen. Es ist zwischen Gleichstrom- und Drehstrom-Antrieben zu unterscheiden. Beide Ausführungen benötigen leistungselektronische Stellglieder in Form von Pulsstellern für Gleichstrom bzw. für Drehstrom. Zumeist bestehen diese aus einem ein- oder dreiphasig gespeisten Eingangsgleichrichter, der eine Gleichstrom – Zwischenkreisspannung bereitstellt, und nachgeschaltet dem eigentlichen Pulssteller für Gleich- oder Drehstrom. (Für Pulssteller für Drehstrom bleibt auch der Fachbegriff Wechselrichter gültig. Die modernen Verfahren der Spannungsstellung sind durchweg Pulsverfahren, so dass der Begriff Pulswechselrichter oder einfach Pulssteller aussagekräftig ist.) Ausgangsgröße der Steller ist eine variable Gleichspannung bzw. Drehstrom variabler Frequenz und variabler Spannung. Zumeist sind in Stellern bereits Regelbausteine integriert. Stellglieder für Servomotoren werden umgangssprachlich auch **Servoverstärker oder Servoregler** genannt. Als **Servoantrieb** bezeichnet man die Kombinationen von Servomotor und Stellglied.

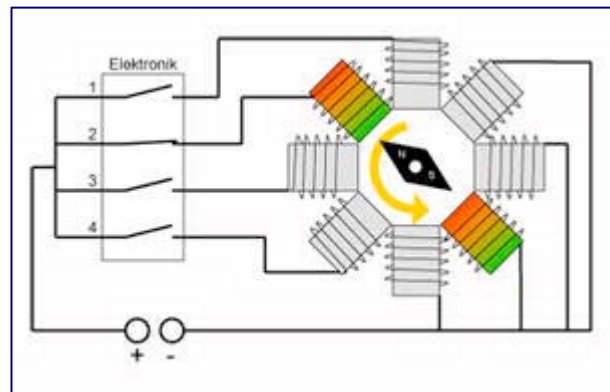
Die Entwicklung der Leistungselektronik und die Möglichkeiten der Modulbauweise erlauben es heute, jedem Servomotor eine eigene Leistungselektronik beizustellen. Anfangs wurden Leistungselektronik und regeltechnische Informationsbausteine räumlich getrennt vom Servomotor angeordnet. Führt man die Elektronik so aus, dass sie den Umweltbedingungen am Motor wie Temperatur, Stossbelastung u.a. gerecht wird, kann man diese auch in den Motor integrieren. Hierbei entstehen sehr innovative Lösungen, bei denen z. B. die Leistungselektronik als dünner Ring gemeinsam mit einem Kühlmantel um den eigentlichen Ständer des Motors gelegt wird /1, Seite 126/. Servoantriebe mit integrierter Leistungselektronik, Regeltechnik und einer Reihe digitaler Signalprozessoren werden damit **intelligente mechatronische Einheiten**. Der Einsatz mehrerer solcher Antriebe in Maschinen anstelle mechanischer Baueinheiten spiegelt die andauernde Tendenz von Mechatronik und Automatisierungstechnik wieder, mechanische Bauteile durch elektronische zu ersetzen und die "Intelligenz" zu dezentralisieren.

Der klassische Servoantrieb ist der drehzahlgeregelter **Gleichstrom-Servoantrieb**. Dieser besteht aus einem Gleichstrom-Nebenschlussmotor mit Permanenterregung und einem Leistungsstellglied in Form von Transistor- oder Thyristor-Pulssteller. Die Drehzahlstellung erfolgt über die Stellung der Ankerspannung, während der vom Anker aufgenommene Strom das Moment an der Welle prägt. Durch Permanenterregung des Rotors vermeidet man die klassischen Bürsten. Um günstige Massenträgheitsmomente zu erzielen, werden die Motoren in Sonderbauformen als Scheiben-, Schlank- oder Glockenläufer ausgeführt.

Eine leicht verständliche Form moderner Spezialmotoren kleiner Leistung auf Gleichstrombasis ist der "umgekehrte Gleichstrommotor". Dieser Nichtfachbegriff beschreibt einen bürstenlosen, **elektronisch kommutierten** Gleichstrommotor, bei dem der ursprüngliche Anker mit Kommutator als Stator ausgelegt wird. Der Rotor besteht aus einem Permanentmagneten. Ein solcher **bürstenloser EC-Motor** (EC: electronical commutation, im Engl. auch brushless direct current, BLDC) umgeht das Problem von Bürsten und Bürstenfeuer des Gleichstrommotors und hat auch Vorteile in Form von annähernd konstanten Strom- und Magnetflussverhältnissen.

Die Wicklungen des Stators werden durch das leistungselektronische Stellglied umgeschaltet ("kommutiert"). Dabei entsteht sehr schnell die Vorstellung eines Drehfeldes, und das Wirkungsprinzip wird dem einer Synchronmaschine sehr ähnlich. Durch den Einsatz leistungselektronischer Stellglieder verschwimmen hier die klassischen klaren Grenzen zwischen Gleichstrom- und Synchronmotoren. Gegenüber dem Servoantrieb mit Synchronmotor (siehe weiter unten) liegt beim EC-Motor vor allem ein vereinfachtes Steuerverfahren vor, da keine sinusförmigen, sondern trapezförmige Ströme in die Wicklungen eingepreßt werden. Auch die Erfassung der Lage des Ständers kann einfacher ausgeführt werden.

Einfaches Prinzipschaltbild eines EC Motors
Bild- und Textquelle: www.zeitlauf.de/



EC Motor mit integriertem Encoder und digitaler Positioniersteuerung von Maxon
Bildquelle: www.maxonmotor.ch/

Auch **Schrittmotoren** können die Aufgaben von Servomotoren übernehmen. Sie werden vorrangig dort eingesetzt, wo die Positionierung schrittweise im eigentlichen Sinne und bei kleinen Momenten sowie geringen Momentschwankungen erfolgt. Typisch hierfür sind Drucker und Faxgeräte. In ihrer Wirkungsweise und hinsichtlich der Flussverhältnisse im Luftspalt sind Schrittmotoren dem EC-Motor sehr ähnlich. Der Rotor besteht aus gezahnten Scheiben mit Permanentmagneten. Den einzelnen Winkelschritten müssen nicht jeweils Wicklungen im

Ständer zugeordnet sein. Vielmehr kann man Ströme mit sinusförmigen Treppenformen einprägen, und jede Stufe der Treppe entspricht dann einem Winkelschritt. Die leistungselektronischen Stellglieder werden auch **Stepper** genannt.

Servoantriebe mit Schrittmotor stellen insofern eine Sonderform dar, als bei ihnen überwiegend keine Rückmeldung der Stellung des Rotors und dadurch bedingt keine eigentliche Positionsregelung erfolgt. Schrittantriebe werden häufig in offener Steuerkette betrieben. Die Sollposition wird als bestimmte Anzahl von Drehwinkel-Schritten vorgegeben, und solange der Schrittmotor das erforderliche Moment aufbringen kann, führt der Rotor diese Schrittzahl aus und nimmt damit die gewünschte Position ein. Wird dennoch ein Rotorlagegeber eingesetzt, dient dieser häufig zuerst der Funktion und besseren Ausnutzung des Motorprinzips. In einzelnen Fällen werden Lagegeber aber auch für die Überwachung der Winkelschritte und Umdrehungen eingesetzt. In der Umgangssprache werden Schrittantriebe häufig nicht den Servoantrieben zugeordnet, d. h. man spricht von Schrittantrieben und alternativ von drehzahl-geregelten Servoantrieben.

Bei größeren Leistungen werden Servoantriebe zunehmend mit **Drehstrommaschinen** ausgestattet, insbesondere bei großen Momentschwankungen. Gegenüber der Gleichstromtechnik werden dabei vielfach neben höherer Lebensdauer auch bessere statische und dynamische Antriebsparameter erzielt. Dies erstaunt, weil Drehstrommaschinen lange Zeit "resistent" gegen Drehzahlstellung waren. Mit anspruchsvoller Sensortechnik, Leistungselektronik und Mikroprozessor-Rechentechnik ist es aber gelungen, sowohl Synchron- als auch Asynchronmaschinen Eigenschaften von Servomotoren zu geben. Grundsätzlich bestimmt hier die Frequenz des Drehfeldes die Drehzahl und durch die getrennte Regelung von Blind- und Wirkkomponente des Ständerstromes werden Erregung und Drehmoment eingepreßt.

Diese anspruchsvolle Aufgabe gelingt mit der **feldorientierten Regelung (FOR)**. Sie wird auch **Vektorregelung** (engl. space vector control) genannt. Unter Vektor sind hier rotierende Raumzeiger für Strom, Spannung und Magnetfluss zu verstehen. Sie werden aus den Größen der drei Wicklungsstränge der Maschine berechnet (**d/q-Transformation**). Insbesondere werden aus dem Drehfeld zwei senkrecht aufeinander stehende **Stromkomponenten** abgeleitet, von denen eine die Magnetisierung (den Magnetfluss im Luftspalt) aufbaut und die andere die Momentbildung bewirkt.

Praktisch bedeutet dies, dass aus den momentanen Werten von Motorspannung und Motorstrom mit einem **im Steller als Software hinterlegten Motormodell** fortlaufend die den Fluss und die das Moment erzeugende Stromkomponente zu berechnen ist. Beide sind einzeln und unabhängig voneinander zu regeln. Die dafür erforderlichen Reglerbausteine sind Softwareregler und in einem **Digitalen Signal Prozessor (DSP)** hoher Rechenleistung implementiert. Dieser leistet auch die d/q-Transformation für die Abbildung der Raumzeiger.

Wie bereits mehrfach durch Verwendung des Begriffes "geregelt" aufgezeigt, ist ein Servoantrieb grundsätzlich ein **geregelter** Antrieb. Bei Bewegungssteuerungen ist die Position (Lage) eines durch den Servoantrieb bewegten Objektes (Werkstück, Werkzeug) die Regelgröße. Der Antrieb soll dann den Positions-Sollwerten möglichst verzögerungsfrei folgen und eine hohe "Steifigkeit" gegenüber Lastmomenten an der Welle aufweisen. Die Bewegung kann translatorisch oder rotatorisch erfolgen. Im Vordergrund kann aber auch die gezielte Beeinflussung von Moment, Beschleunigung oder Geschwindigkeit an der Welle stehen, zum Beispiel die Ruckfreiheit eines Bewegungsverlaufes. Grundsätzlich muss das Führungs- und das Störverhalten der Regelung beherrscht werden, wobei das Moment an der Arbeitsmaschine als die entscheidende Störgröße fungiert.

Die Regelung selbst ist anspruchsvoll, denn als Regelstrecke tritt die Kombination von leistungselektronischem Stellglied, Elektromotor, Antriebsmechanik und Arbeitsmaschine auf. Einzelne Glieder dieser Kette sind zudem nichtlinear! Die Regelung erfolgt deshalb mit **kaskadierten Regelkreisen** für Position, Drehzahl und Strom bzw. Magnetfluss. Zur Rückmeldung der Position und der Motorbetriebsdaten werden Lagegeber, Drehzahlgeber und spezielle Elemente für die Erfassung von Motorstrom und/oder Magnetfluss benötigt. Weil zusätzliche Bauteile wie z. B. Hallensoren den Antrieb verteuern, bemüht man sich, bestimmte Istwerte aus Motorstrom und –spannung zu errechnen oder über die Größe der rückwirkenden Spannungsinduktion zu ermitteln.

Analoge Regler auf Basis von Operationsverstärkern wurden mit der Entwicklung der Rechentechnik zunehmend durch digitale ersetzt. Dies ist dann ohne Belang, wenn die Taktzeiten für die Berechnung des Regelalgorithmus klein gegenüber den jeweils zu kompensierenden Zeitkonstanten der Regelstrecke bleiben. Klein bedeutet hierbei etwa Faktor 10.

Das Prinzip kaskadierter Regelkreise wurde bereits bei klassischen Gleichstromantrieben angewendet und für vektorgeregelte Drehfeldmaschinen bedeutend ausgebaut. Seite 7 dieser Anlage zeigt das stark vereinfachte Grundprinzip der Kaskadierung für eine Lageregelung mit klassischem Gleichstrommotor mit Ankerspannungsstellung und konstantem Feld: Der jeweils überlagerter Regelkreis übergibt dem unterlagerten Kreis den Sollwert. Gegenüber einem einfachen Regelkreis kann eine solche Kaskade besser auf gewünschte Vorgaben wie Dynamik der Ausregelung von Positionsänderungen, Führungsgenauigkeit oder Unterdrückung unterschiedlichster Störgrößen optimiert werden.

Seite 8 zeigt, dass die Regelstruktur bei der feldorientierten Regelung einer Drehstrommaschine deutlich aufwändiger ist. Dargestellt sind Einzelheiten der Strom-Drehzahl-Kaskade ohne Positionsregelung.

Problematisch bleibt die Erfassung aller Kenngrößen des Übertragungsverhaltens von Motormodell und Stellglied, welche für die Einstellung der Regler erforderlich sind. Moderne Systeme arbeiten hier bereits **selbstanpassend**, d. h. die Regler stellen ihre Parameter während des ersten Betriebes selbst ein.

Drehstrom-Servoantriebe unterscheiden sich im Detail je nach Anwendung des synchronen und des asynchronen Motorprinzips. **Vektorgeregelte Synchronmotoren** werden mit permanent erregtem Polrad ausgestattet. Als Bauformen sind Schlankläufer, Torquemotoren mit großer Polpaarzahl z. B. für Rundtische und Linearmotoren für direkt translatorische Aufgaben im Einsatz. Zur Istwert-Erfassung für die Regelkreise werden die Strangströme gemessen, die Drehzahl mit zumeist büstenlosem Tachogenerator und die Lage des Polrades z. B. durch Resolver erfasst. Drehzahl und Lage können digital auch durch einen gemeinsamen Impulsgeber ermittelt werden.

Synchron-Servomotoren von Sigmatek
Baureihe AKM mit permanent erregtem Rotor
Bildquelle:
www.sigmatek-automation.com



Der Drehzahlregler gibt nicht wie beim Gleichstromantrieb unmittelbar den Sollwert des Stromes vor, sondern den Sollwert des Momentes. Aus diesem werden unter Einbeziehung der Lage des Polrades die Sollkomponenten für die feldorientierte Regelung berechnet. Salopp ausgedrückt: Es wird die Stellung der Raumzeiger relativ zum Polrad ausgeregelt. Die Leistungselektronik des Servoreglers prägt sinusförmigen Strom ein.

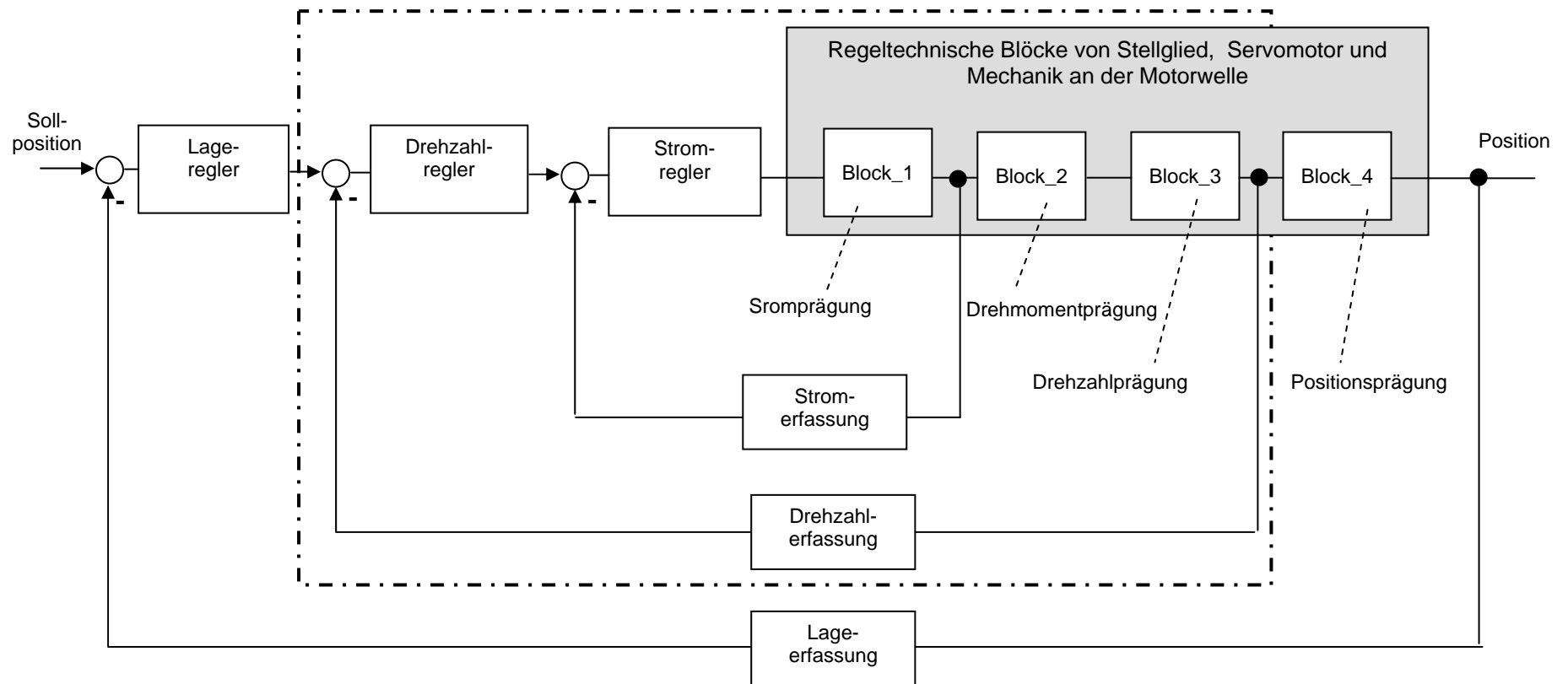
Vektorgeregelte Asynchron-Servomotoren mit Kurzschlussläufer unterscheiden sich von Asynchron-Normmotoren bereits äußerlich in der Bauform. Normmotoren sind nicht geeignet für Servoantriebe. Die dominierende Nichtlinearität des Übertragungsverhaltens zwischen Strom / Spannung und Moment ist bei vektorgeregelten Asynchronmotoren ein erhebliches, aber heute lösbares Problem. Es wurden verschiedene Steuerverfahren entwickelt. Bewährt hat sich das Verfahren der Orientierung auf **konstanten Rotorfluss**. Der Magnetisierungsstrom ist drehzahlunabhängig konstant zu halten. Ein Problem ist hierbei die drehzahlabhängige Veränderung des Verhältnisses von induktiven und ohmschen Widerständen im Stator. Mit einem sogenannten Entkopplungsnetzwerk /1/ zwischen Drehzahl- und Stromregler werden Rückwirkungen des Motors berücksichtigt, die regeltechnische Eingriffe in die d- und q-Stromkomponenten berechnet und die Ständerströme eingepreist. Einen Eindruck von den dabei zu bewältigenden Aufgaben kann die Abbildung auf Seite 8 vermitteln. Sie wurde dem Portal Beratung und Schulung zu elektrischen Antrieben (<http://w-tech.de>) entnommen, näheres dort. Wie auch bei Synchron-Servoantrieben wird mit einem Rotorlagegeber gearbeitet, der Istwerte für das Entkopplungsnetzwerk liefert.



Asynchron-Servomotoren von Wittur Electric Drives
Bildquelle: www.wittur-edrives.de/

Vereinfachte Darstellung kaskadierter Regelkreise zur Lageregelung eines konventionellen Gleichstrommotors

Der innen eingegrenzte Bereich ist auf der folgenden Seite für die feldorientierte Regelung einer Drehstrommaschine ohne Anspruch auf Vollständigkeit und allein zur Verdeutlichung der Vielfalt der Probleme detaillierter ausgeführt.



Beispiel für ein Entkopplungsnetzwerk eines Vektorgeregelten Asynchron-Servomotors

(Diese Darstellung dient allein zum Aufzeigen von Art und Umfang der Aufgaben eines Entkopplungsnetzwerkes)

Quelle: Portal Beratung und Schulung zu elektrischen Antrieben

www.servotechnik.de/fachwissen/fachw_main.htm

