

Realistische Fahrsimulatoren durch Sensorantriebe

Drehmomentgeregelte Sensorantriebe für die Krafterückführung in Kraft- und Luftfahrzeugen

ROLF SLATTER

Bis heute wird die große Mehrheit von Servoantrieben innerhalb eines Positions- bzw. Drehzahlregelkreises eingesetzt. Die Entwicklung von neuen Sensoren und neuen Regelungstechniken ermöglicht jedoch auch innovative Anwendungen, in denen beispielsweise eine Krafterückführung benötigt wird (Bild 1). Aktuelle Beispiele sind die Steuer- bzw. Fly-by-Wire-Systeme (also so genannte X-by-Wire-Systeme) für Kraftfahrzeuge und Luftfahrzeuge, wo rein mechanische oder hydraulische Antriebsstränge durch mechatronische Komponenten in einer Master-Slave-Anordnung ersetzt werden. Diese neuartigen Anwendungen stellen neue Anforderungen an Antriebe und Getriebe. Zusätzlich zu den bekannten Forderungen wie hohe Drehmomentkapazität oder Spielfreiheit kommen dabei neue Kriterien wie hohe Bandbreite, hohe Leistungsdichte, und – besonders wichtig bei Krafterückführung – eine rippelfreie Kraft- bzw. Drehmomentabgabe hinzu. Grundlage für diese neuen Anwendungen bilden innovative mechatronische Lösungen, wie der in dem Beitrag vorgestellte Sensorantrieb.

Wozu Krafterückführung?

Was bietet die neue X-by-Wire-Technologie? Steer-by-Wire-Lenksysteme werden in Zukunft an die Stelle herkömmlicher Lenkungen in Kraftfahrzeugen treten. Mechatronische Komponenten ersetzen dabei den rein mechanischen Lenkstrang. Es gibt somit keine mechanische Verbindung mehr zwischen Lenkrad und Vorderrädern. Ähnliches gilt für Flugzeuge, denn hier werden

Dr.-Ing. Rolf Slatter ist Vorstand für Marketing und Vertrieb der Harmonic Drive AG in 65555 Limburg an der Lahn



1: Drive-by-Wire-Demonstrator auf der Hannover Messe 2002

Quelle: Institut für Robotik und Mechatronik, DLR

„aktive Steuerknüppel“ schon jetzt in der Flugpraxis erprobt.

In beiden Fällen handelt es sich um klassische Master-Slave-Anordnungen. Ein elektromechanischer Antrieb wird als Master benutzt, um die Fahrersignale zu erfassen und die Krafterückführung zu leisten sowie dem Fahrer Informationen über das Fahrverhalten zu vermitteln (Lenkradantrieb oder Steuerknüppel), ein weiterer elektromechanischer Antrieb wird als Slave (Radlenkantrieb oder Kontrollflächenantrieb) eingesetzt, um die Räder zu lenken oder die Kontrollflächen zu bewegen.

Solche neue Lösungen bieten verschiedene Vorzüge – sowohl technischer Natur als auch hinsichtlich Sicherheit und Komfort, wie z. B.:

- variable Lenkuntersetzung und Lenkkräftunterstützung,
- dynamische Beeinflussung des Lenkverhaltens,
- Fahrdynamikregelung mit aktiver Lenkung oder
- haptische (= den Tastsinn betreffende) Informationsübermittlung an den Fahrer.

Master-Slave-Systeme sind an und für sich nichts Neues. Früher wurden hierfür hydraulische oder elektrohydraulische Systeme eingesetzt, aber die Anwendungen haben sich hauptsächlich auf Telemanipulation, z. B. für die Handhabung von gefährlichen Stoffen, begrenzt. Zwei aktuelle Trends bilden jedoch die Grundlage für eine starke Ausweitung der Anwendungen, z. B. im Bereich X-by-Wire. Zunächst ermöglicht die steigende Rechenkapazität komplexere regelungstechnische Lösungen, wie sie bei Master-Slave-Anordnungen notwendig sind. Eine merkliche Steigerung der Leistungsdichte bei elektromechanischen Servoantrieben ermöglicht zudem den Ersatz von hydraulischen Antrieben, gerade in Fahrzeuganwendungen, wo das Gewicht ein Hauptmerkmal bei der Auswahl von Antrieben ist.

Kompakte drehmomentgeregelte Servoantriebe

Als erster Hersteller auf dem Markt stellt die Harmonic Drive AG seit 1992 Kompaktantriebe her. Inzwischen befinden sich die Hohlwellenantriebe FHA in der dritten Generation (Bild 2). Die FHA-Baureihe ist beispielhaft für eine hochintegrierte mechatronische Lösung. Diese Antriebe bestehen aus einem Harmonic Drive-Getriebe, einem ringförmigen AC-Servomotor und einem optischen Sinus-Cosinus-Geber für die Drehzahl- und Lageregelung (Bild 3). Die Antriebe verfügen zudem über eine kompakte, steife Abtriebslagerung, um das Lastsystem zu stützen, ohne dass dabei eine zusätzliche Stützlagerung benötigt wird. Die zentrale Hohlwelle ermöglicht die Durchführung von Versorgungsleitungen, Wellen oder sogar Laserstrahlen durch die Mitte des Antriebes. Diese Eigenschaft kann die Konstruktion nicht nur von Lenkantrieben, sondern auch von Industrierobotern, Werkzeugmaschinen, Wafer-Handling-Geräten oder Laserbearbeitungsmaschinen erheblich vereinfachen.

Die wesentlichen Vorteile des eingesetzten Hohlwellengetriebes sind:

- Aufgrund des großen Zahneingriffbereiches bieten die Getriebe eine Drehmoment-



2: Die Hohlwellenantriebe des Typs FHA werden nun schon in der dritten Generation hergestellt

kapazität, die mit konventionellen Antriebslösungen nur bei doppeltem Bauraum, doppelter Anzahl von Bauteilen und dreifachem Gewicht erreichbar ist.

- Die absolute Positioniergenauigkeit liegt weit unter einer Winkelminute und die Wiederholgenauigkeit beträgt nur wenige Winkelsekunden.

- Aufgrund der natürlichen Vorspannung und der radialen Zahnbewegung dieses Getriebetyps weisen die Getriebe kein Spiel in der Verzahnung auf.

- Mit nur drei Bauteilen werden je nach Baugröße Übersetzungsverhältnisse von 30:1 bis 320:1 bei Getriebeaußendurchmessern von 20 bis 330 mm erzielt. Die Spitzen Drehmomente reichen von 0,5 bis über 9000 Nm.

- Bei Nennbetriebsbedingungen werden Wirkungsgrade von über 90 % erreicht.

- Die Relativbewegungen der Zähne beschränken sich fast ausschließlich auf radiale Bewegungen, und die Gleitgeschwindigkeiten zwischen den Zähnen ist auch bei hohen Drehzahlen sehr gering. Der Zahnverschleiß ist daher vernachlässigbar, mit der Folge, dass es keine Spielzunahme während der Lebensdauer des Getriebes gibt.

Aufgrund dieser Eigenschaften sind die FHA-Antriebe prädestiniert für Anwendungen mit Krafrückführung, insbesondere, da sie eindeutige Vorteile gegenüber anderen Antriebskonzepten zu bieten haben, wie:

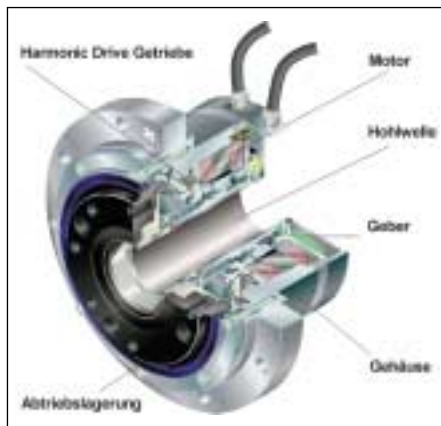
- Spielfreiheit: Dieses Merkmal ist Voraussetzung für eine hohe Bandbreite, das heißt eine hohe dynamische Responsefähigkeit des Antriebes. Des Weiteren hilft diese Eigenschaft bei einer rippelfreien Kraft- bzw. Drehmomentübertragung.

- Hohe Leistungsdichte: Diese ist erforderlich, um hydraulische Antriebe zu ersetzen.

- Geringe Reibung: Der Antrieb weist kein Stick-Slip-Verhalten auf, was ansonsten gleichmäßige Laufeigenschaften negativ beeinflussen würde und auch die Bandbreite begrenzen kann.

- Hohlwelle: Dieses Merkmal verringert den Konstruktionsaufwand erheblich.

Ein weiterer Vorteil gegenüber Direktantrieben ist die sehr hohe Leistung bezogen auf die Masse, welches insbesondere bei Luftfahrzeugen ausschlaggebend ist. Typischerweise wiegt ein Direktantrieb fünf oder sechs mal so viel wie ein FHA-Antrieb mit derselben Drehmomentkapazität. Auch Lösungen mit Planetengetrieben wurden in der Fachpresse vorgestellt, sie weisen jedoch einige wesentliche Nachteile auf. Zu-



3: Schnittbild eines FHA-Hohlwellenantriebs

nächst sind diese Lösungen meist spielbehaftet, wodurch wiederum die Bandbreite begrenzt wird. Sie verfügen außerdem über viele Einzelteile und weisen eine Vorspannung auf, um das Spiel zu minimieren. Beide Aspekte führen dazu, dass diese Antriebe eine große Sensibilität hinsichtlich Teilungsfehlern in der Verzahnung haben, mit der Folge, dass die Laufeigenschaften keineswegs mit einem Harmonic Drive-Getriebe vergleichbar sind.

Kompaktantriebe mit integriertem Momentensensor

Als neueste Entwicklung werden bei der 3. Generation zusätzliche Sensoren eingesetzt. Daraus ergibt sich der neue Begriff Sensorantrieb, also ein Hohlwellenantrieb mit integriertem Momentensensor (**Bild 4**). In Zusammenarbeit mit dem Institut für Robotik und Mechatronik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen, wurde diese Lösung in dreijähriger Zusammenarbeit geschaffen. Die Technologie stammt von dem bekannten DLR-Leichtbauroboter, der mit seiner integrierten Elektronik und Drehmomentsensorik neue Maßstäbe in punkto Gewicht und Feinfühligkeit setzt. Die industrielle Umsetzung dieser Technik findet sich im neuen Sensorantrieb wieder.

In den meisten praktischen Kraft-Rückführungs-Anwendungen wird ein separater Drehmomentsensor eingesetzt. Dieser wird üblicherweise außerhalb des Antriebes untergebracht. Die Idee des Sensorantriebes besteht darin, den Sensor im Antrieb zu integrieren, was in einem reduzierten Konstruktions- und Montageaufwand sowie kompakteren Abmessungen resultiert (**Tabelle**).



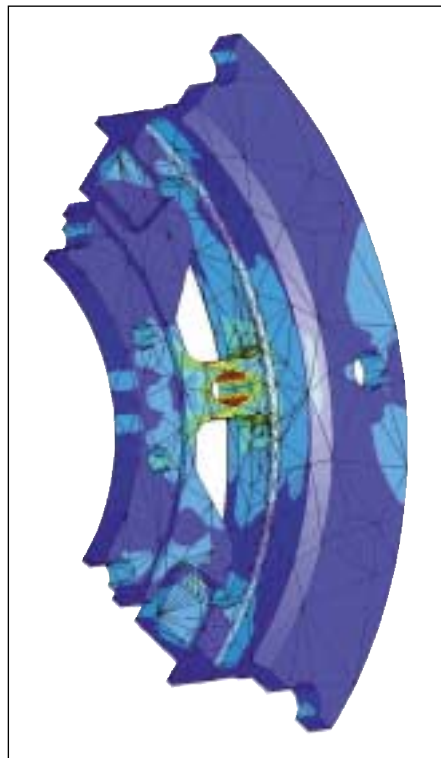
4: Explosionsdiagramm des drehmomentgeregelten Sensorantriebes

Quelle: Institut für Robotik und Mechatronik, DLR

Messprinzip:	Dehnmessstreifen (DMS)
Messbereich:	± 150 Nm
Mechanischer Endanschlag:	± 200 Nm
Auflösung:	10 bit
Genauigkeit:	1 % bei 25 °C
Versorgung:	5 V
Schnittstelle:	analog oder seriell
Bandbreite der Elektronik:	adaptierbar, derzeit 600 Hz
Kompensation:	axiale Störkräfte, Kippmomente
Abmessungen:	Durchmesser 155 mm, Tiefe 26,5 mm

Tabelle: Eigenschaften des Drehmomentsensors

Der Momentensensor besteht aus einem Speicherrad mit mechanischem Überlastschutz (**Bild 5**). Wird der Antrieb mit einem Drehmoment beaufschlagt, verformt sich das Speicherrad. Diese Verformung wird mittels Dehnmessstreifen erfasst. Der Sensor mit integrierter Elektronik befindet sich



5: FEM-Darstellung des Drehmomentsensors

Quelle: Institut für Robotik und Mechatronik, DLR

dabei zwischen Getriebe und Motor und misst das Reaktionsdrehmoment auf dem Getriebegehäuse. Der Endanwender wird auf den Sensor somit lediglich durch einen zusätzlichen Stecker im Antriebsgehäuse aufmerksam gemacht. Diese Lösung bietet eine optimale Kombination von Feinfühligkeit bei gleichzeitig hoher Verdrehsteifigkeit.

Mit dem Sensorantrieb wurde somit die Umsetzung von drei innovativen Konzepten in einer Antriebseinheit realisiert:

1. Kontrollierter lastgeregelter Betrieb: Die Einstellung einer aktiven Antriebsnachgiebigkeit ist möglich, womit das momenteneregelte Anfahren und der Betrieb unter vordefinierten Belastungen ermöglicht wird.

2. Erhöhung der dynamischen Genauigkeit: Dadurch werden Schwingungen bei schnellen Positionierungsaufgaben durch eine gezielte Antriebsdämpfung vermieden.

3. Überwachung der Antriebsbeanspruchung: Der Anwender erhält eine Aufzeichnung von Abtriebsmomenten als Protokoll der Lashistorie (eine Art Black-Box).

Praktische Anwendungen

Die Eigenschaften des neuen momenteneregelten Antriebs konnten auf der Hannover Messe 2002 „live“ erlebt werden. Großes Aufsehen erregte der Formel-1-Simulator von BMW des DLRs (Bild 1). Er wurde am Institut mit Unterstützung von Harmonic Drive und der Motorsportabteilung von BMW entwickelt. Besucher konnten sich in das Fahrzeug setzen und eine virtuelle Monte Carlo-Rennstrecke abfahren. Zum Beschleunigen und Bremsen wurden die Gaspedalstellung und die Bremskraft gemessen und der Echtzeitsimulation zugeführt. Das mechatronische Herzstück des Simulators ist der neue Sensorantrieb. Das Zusammenspiel aus Regelung und abtriebsseitigem Drehmomentsensor ermöglicht es, gezielt Kräfte und Momente auf die Umgebung auszuüben.

Die Montage im Fahringsimulator gestaltete sich aufgrund der Hohlwelle als besonders einfach. Die Einheit konnte über die vorhandene Lenksäule geschoben werden. Der Lenkeinschlag wurde aus den Encodersignalen ermittelt und ebenfalls der Fahrdynamiksimulation zugeführt. Aus aktueller Geschwindigkeit, Fahrbahnverhältnissen, Lenkstellung und den Fahrzeugeigenschaften wurden Kräfte auf die Spurstange bzw. das Lenkrad berechnet. Die Lenkkräfte wurden an den Sensorantrieb kommandiert, der diese an den Fahrer zurück kopelte. Eine Echtzeitvisualisierung sowohl für den Fahrer als auch für die Zuschauer komplettierte das System. Mit dem Simulator lässt sich das Verhalten einer klassischen Lenkung nachbilden. Viel interessanter ist für die Forscher des DLRs allerdings die Untersuchung von Steer-by-Wire-Konzepten.

Beide Partner sehen ein enormes Anwendungspotential für „intelligente“ Sensorantriebe, sowohl im Bereich Kraftfahrzeuge, wo Serieneinsätze für diese Technologie schon für 2007/2008 vorausgesagt werden, als auch bei Luftfahrzeugen, wo „aktive Steuerknüppel“ mit Harmonic Drive-Technologie bereits jetzt für den Flugbetrieb eingesetzt werden.

Anmerkung der Redaktion

Weitere Informationen über die Hohlwellenantriebe fordern unsere Leser mittels der folgenden Kennzahl an.