

# Verbesserung der Regelgüte durch Ferraris-Sensoren

BERNHARD HILLER, WOLF-DIETER LEHNER

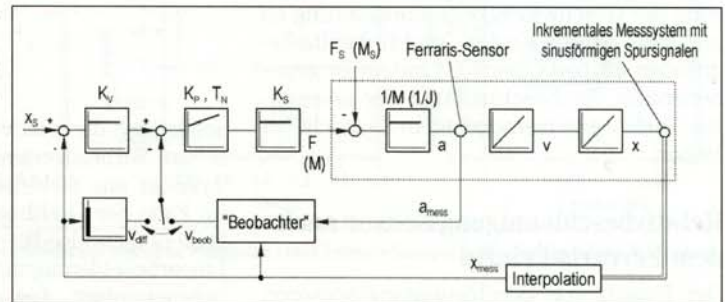
Die ständig steigende Produktivität von numerisch gesteuerten Maschinen, wie z. B. Werkzeugmaschinen, Bestückungsautomaten und Druckmaschinen, stellt an die darin eingesetzten Servoantriebe höchste Anforderungen bezüglich Dynamik, Gleichlauf und Störsteifigkeit. Um diese Anforderungen realisieren zu können, benötigen die Servoregler hochaufgelöste und dynamische Signale bezüglich Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Antriebe. Der Beitrag zeigt, wie mit neuen Relativbeschleunigungssensoren nach dem Ferraris-Prinzip die Regelgüte von Servoantrieben entscheidend verbessert werden kann.

## Einleitung

Die Regelung elektromechanischer Servoantriebe erfordert die Kenntnis der aktuellen Zustandsgrößen der Regelstrecke. Während man sich bei einfachen Servoreglern mit der Lage als einziger Zustandsgröße begnügt, ist bei anspruchsvollen Regelungen auch die Kenntnis der Geschwindigkeit beziehungsweise der Beschleunigung erforderlich. Dies gilt insbesondere für die zunehmend in Werkzeugmaschinen, Bestückungsautomaten, Druck- und Textilmaschinen eingesetzten Direktantriebe. Mit ihnen lässt sich ein sehr steifer, nahezu spielfreier Antriebsstrang mit hohen mechanischen Eigenfrequenzen aufbauen. Damit kann man gegenüber herkömmlichen Antriebssystemen, die beispielsweise auf Kugelrollspindeln, Synchronriemen (Zahnriemen) oder Getriebestufen basieren, deutlich höhere Regelungsgüten erreichen.

*Dipl.-Ing. Bernhard Hiller ist Leiter der Zukunftsentwicklung der Hübner Elektromaschinen AG in 10967 Berlin und war bis zum 31. Dezember 2000 Leiter der Gruppe Regelungs- und Antriebstechnik am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart in 70174 Stuttgart. Dipl.-Ing. Wolf-Dieter Lehner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am ISW, das unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. G. Pritschow steht.*

**1: Kaskadenregler mit optionaler Einbindung eines Ferraris-Beschleunigungssensors zur Geschwindigkeitsermittlung**  
Stark vereinfachte Darstellung [3]



Dies wirkt sich positiv auf die erzielbare Genauigkeit und Störsteifigkeit bei gleichzeitig hohen Arbeitsgeschwindigkeiten und Beschleunigungen aus. Allerdings sind hierzu besondere Maßnahmen bei der Regelung nötig – nicht zuletzt deshalb, weil bei einem Direktantrieb alle angreifenden Störkräfte von der Regelung kompensiert werden müssen. Neben einer kurzen Abtastzeit ( $< 500 \mu\text{s}$ ), die mit heutigen, auf dem Markt verfügbaren Mikrocontrollern oder Signalprozessoren problemlos und kostengünstig erzielbar ist, bedürfen die zur digitalen Regelung benötigten Zustandsgrößen besonderer Beachtung. Hier sind hohe Genauigkeit und Dynamik der Messsysteme und deren Auswertung zu fordern, um die Vorteile der Direktantriebstechnik beziehungsweise anderer dynamischer Servoantriebe nutzen zu können.

## Defizite der Zustandsgrößen-ermittlung

Die Lagemessung erfolgt heute überwiegend mit Hilfe von inkrementalen Drehgebern beziehungsweise Längenmesssystemen auf optischer, teilweise auch magnetischer, induktiver oder kapazitiver Grundlage. Bestehen höhere Anforderungen an die Regelgüte, werden fast ausschließlich solche Messsysteme eingesetzt, die zwei um  $90^\circ$  gegeneinander phasenverschobene, sinusförmige Spursignale liefern (Bild 1). Die Schwingungsperioden pro Umdrehung (beziehungsweise pro Meter) entsprechen der Teilungszahl des Messsystems. Durch die in den sinusförmigen Ausgangssignalen enthaltene Amplitudeninformation gelingt mit entsprechenden Interpolationsschaltungen eine Hochauflösung der Lage. Es sind leicht Interpolationsfaktoren von  $> 1000$  erzielbar, das heißt bei einer Teilungsperiode von z. B.  $20 \mu\text{m}$  ist eine Quantisierung der Lage  $x_{\text{mess}}$  von  $20 \text{ nm}$  und weniger möglich. Für die Genauigkeit innerhalb einer Teilungsperiode muss allerdings ein Wert angenom-

men werden, der deutlich schlechter ist (zirka  $200 \text{ nm}$  nach dem erläuterten Zahlenbeispiel), da die Güte der analogen Signale des Messsystems und die Genauigkeit der Interpolationsschaltung endlich sind (Fehler durch Offsets, Amplitudenunterschiede, Phasenabweichungen, Oberwellen, Rauschen, Temperaturdrift, Störungen durch Frequenzumrichter usw.). Ohne besondere Maßnahmen bei der Auswertung der Signale des Lagemesssystems ist es also nicht sinnvoll, die Quantisierung der Lage durch noch höhere Interpolationsfaktoren zu reduzieren, da dann nur die Fehler besonders hoch aufgelöst werden [1]. Dennoch stellt die Quantisierung der Lage alleine für den Lageregelkreis eines Servoreglers üblicherweise kein Problem dar.

Die für eine Servoregelung ebenfalls benötigte Zustandsgröße Geschwindigkeit wird bei digitalen Servoreglern heute überwiegend durch zeitdiskrete Differentiation der Lage  $x_{\text{mess}}$  gemäß gewonnen. Die Geschwindigkeitsquantisierung  $Q_v$  ist folglich zur Lagequantisierung  $Q_x$  proportional und zur Abtastzeit  $T_A$  umgekehrt proportional (Bild 2 links). Wie bei jeder Differentiation werden Fehler, hervorgerufen durch Quantisierungsfehler und sonstige Fehler der gemessenen Lage, in der so gewonnenen Geschwindigkeit verstärkt abgebildet.

Die Problematik der Geschwindigkeitsquantisierung als Folge der endlichen Lageauflösung und der aus dynamischen Gründen gewünschten kurzen Abtastzeit ist eine wesentliche Einschränkung bei der Regelung von hochdynamischen Servoantrieben und insbesondere Direktantrieben: Es muss stets ein Kompromiss zwischen Quantisierungsrauschen (und damit verbundener Schwingungsanregung, Geräuschentwicklung und Erwärmung des Motors) und erzielbarer Steifigkeit beziehungsweise Dynamik des Antriebs gefunden werden. Der Einsatz von Digitalfiltern oder Beobachtern zur Geschwindigkeitsglättung verschlechtert das Störverhalten des Antriebs, da

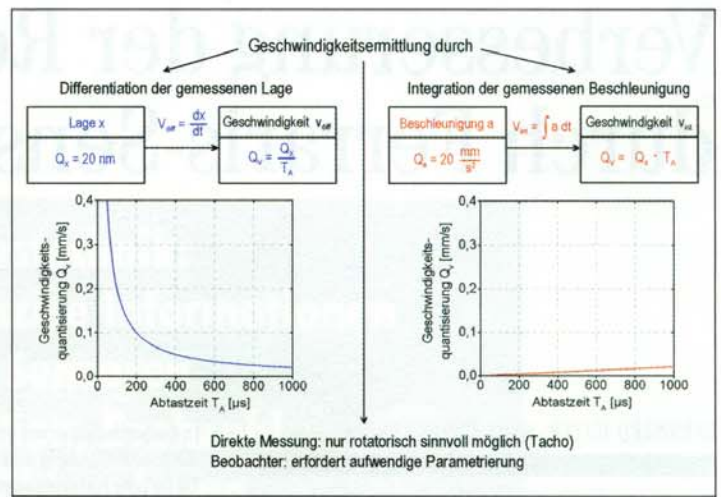
Störkräfte nur verzögert erkannt werden können. Außerdem ist hier, wie auch bei der Verwendung von Bandsperfiltern zur Unterdrückung von schwach gedämpften, höherfrequenten Schwingungen, ein nicht unerheblicher Parametrierungsaufwand erforderlich. Zusätzliche Probleme resultieren aus sich über dem Verfahrensweg oder auch der Zeit ändernden Resonanzfrequenzen und Streckenparametern (z.B. Änderung der zu bewegenden Masse infolge einer Bearbeitung). Der Ansatz, mit Hilfe von noch genaueren Messsystemen mit kleineren Teilungsperioden zu einer höheren Lageauflösung und damit zu einer Verringerung der Geschwindigkeitsquantisierung zu kommen, ist aus Kosten- und Robustheitsgründen oft nicht sinnvoll; zudem ist gegebenenfalls die Beschränkung der maximalen Verfahrensgeschwindigkeit in Betracht zu ziehen.

### Relativbeschleunigungssensor nach dem Ferraris-Prinzip

Der Einsatz von Beschleunigungssensoren ermöglicht wesentliche Verbesserungen des Regelungsverhaltens von Direktantrieben, aber auch von konventionellen Servoantrieben: Mit der Messung der Beschleunigung steht jene Zustandsgröße zur Verfügung, die die unmittelbare und unverzögerte Reaktion der zu bewegenden Masse auf einwirkende Kräfte repräsentiert. Die gemessene Beschleunigung liefert also die direkte Information über das Bewegungsverhalten und eignet sich somit sehr gut als Rückkopplungssignal beispielsweise zur Systemdämpfung oder zum Aufbau einer unterlagerten Beschleunigungsregelung, die eine deutliche Erhöhung der Störsteifigkeit und Dynamik zulässt. Darüber hinaus kann mit Hilfe der Beschleunigung ein dynamisches und hochaufgelöstes Geschwindigkeitssignal gewonnen werden. Dazu wird die Beschleunigung integriert, was den Vorteil hat, dass – im Gegensatz zur Differentiation – Störungen und Fehler reduziert und nicht verstärkt werden. Bild 2 verdeutlicht, dass hier bei jeder Verkürzung der Abtastzeit die Geschwindigkeitsquantisierung  $Q_v$  weiter verringert wird, was dem Wunsch nach hoher Dynamik und Störsteifigkeit des Servoantriebs sehr entgegen kommt. Von großem Vorteil ist, dass für die Beschleunigung eine weit geringere Amplitudenauflösung ausreichend ist, als für die Geschwindigkeit beziehungsweise die Lage (eine Digitalisierung des Beschleunigungssignals mit 12 Bit Auflösung genügt, während für die Geschwindigkeit mindestens 16 Bit und für die Lage üblicherweise mehr als 20 Bit veranschlagt werden). Zur Vermeidung eines niederfrequenten Driftens der so gewonnenen Geschwindigkeit (infolge eines nie vollständig vermeidbaren Offsets) erfolgt eine Stützung durch die ohnehin vorhandene Lage mittels einer sehr einfachen, von den Streckenparametern unabhängigen Beobachterstruktur (Bild 1).

Ferraris-Beschleunigungssensoren, deren Funktionsprinzip auf der Induktion von Wirbelströmen basiert [2, 3], messen aus-

### 2: Möglichkeiten der Geschwindigkeitsermittlung bei Servoantrieben



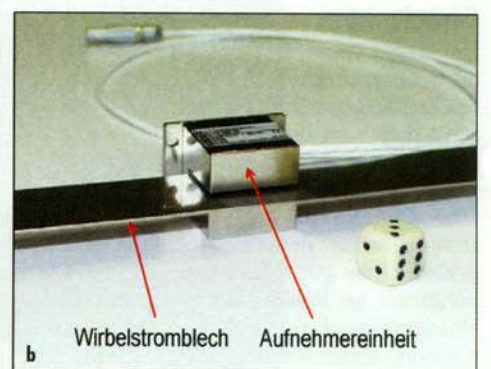
schließlich die relative Beschleunigung zwischen Wirbelstrommaterial (Scheibe oder Zylinder aus elektrisch leitendem Material im Falle der Drehbeschleunigungsmessung beziehungsweise Blechstreifen im Falle der Linearbeschleunigungsmessung) und Aufnehmereinheit. Aus diesem Grund ist dieser Sensortyp sehr gut für die Servoantriebstechnik geeignet, bei der nicht die absoluten, sondern die relativen Bewegungen relevant sind. Beschleunigungssensoren nach dem Feder-Masse-Prinzip (dazu zählen praktisch alle sonstigen am Markt erhältlichen Beschleunigungssensoren) erfassen die absolute Beschleunigung und sind daher im Einsatz oft problematisch. Als weitere Vorteile des Ferraris-Prinzips sind anzuführen:

- hohe Bandbreite, Linearität und Empfindlichkeit, keine untere Grenzfrequenz,
- sehr geringes Rauschen, prinzipbedingt keine Offsetspannung,

- berührungsloses, aktives Messprinzip,
- große Einbautoleranzen zulässig,
- sehr robust und verschmutzungsunempfindlich.

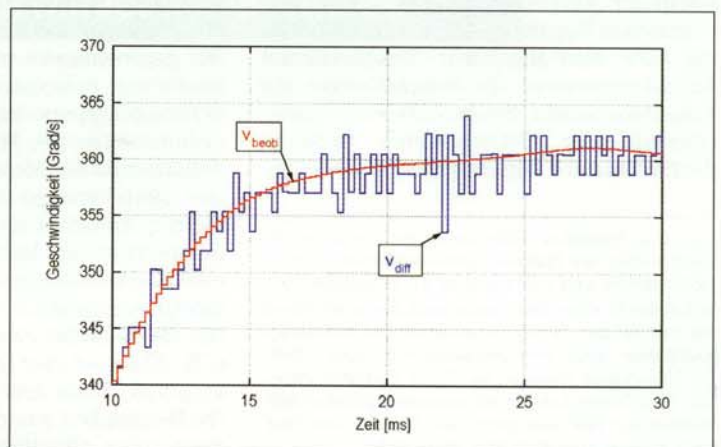
### Ferraris-Sensoren mit Extended-Speed®-Technologie

Der in Bild 3a gezeigte Ferraris-Sensor des Typs ACC 70 zur Messung der relativen Drehbeschleunigung verfügt – wie alle Ferraris-Sensoren der Hübner AG – über die patentierte Extended-Speed®-Technologie [2], das heißt, dass auch große Geschwindigkeiten zu keiner unzulässigen Erwärmung durch die prinzipbedingten Wirbelströme führen. Die Ausgestaltung des Wirbelstrommaterials als Aluminiumglocke mit Hohlwelle, die einfach auf die Motorwelle aufgespannt wird, gestattet einerseits einen Axial Schub von mehreren Millimetern und andererseits eine steife, kupplungslose Be-

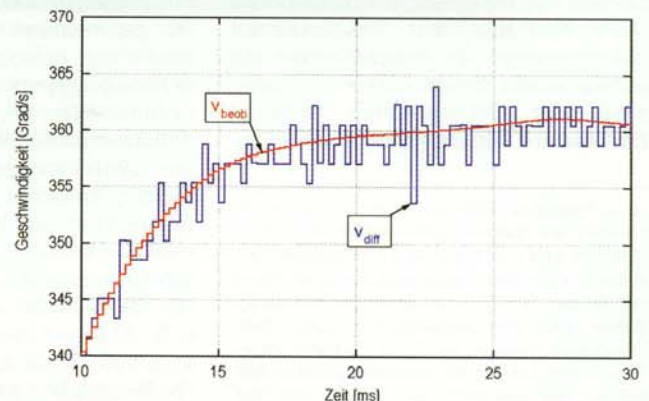


### 3: Neue Ferraris-Sensoren der Hübner AG

a: Ferraris-Sensor des Typs ACC 70 für rotatorische Antriebe;  
b: Ferraris-Sensor des Typs ACC 93 für lineare und große rotatorische Antriebe



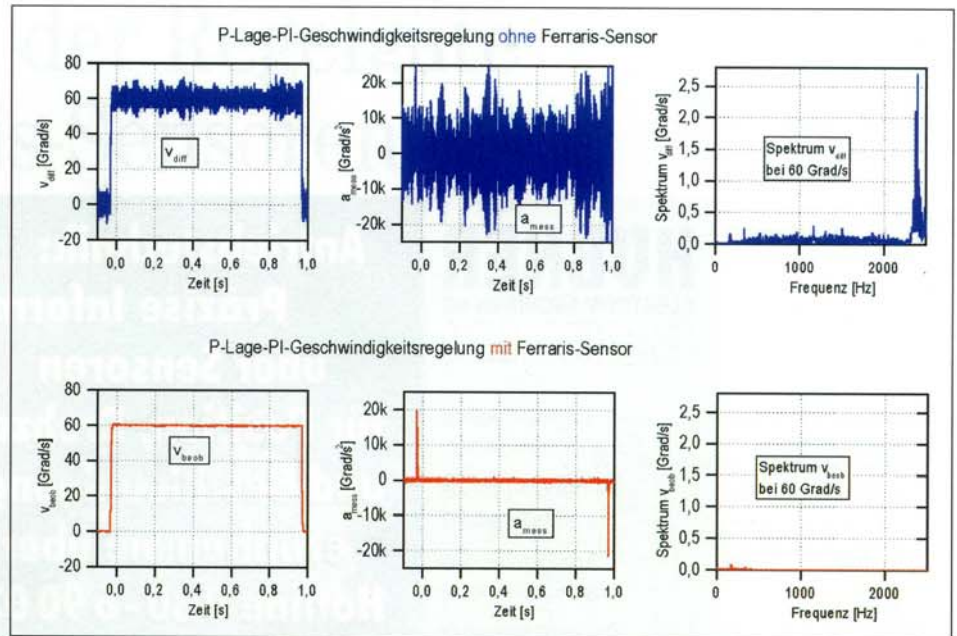
4: Aus der gemessenen Beschleunigung integrierte ( $v_{beob}$ ) und aus der Lage differenzierte Geschwindigkeit ( $v_{diff}$ ) im Vergleich



festigung der Aufnehmereinheit direkt am Motorflansch. Dies hat entscheidende dynamische Vorteile und ermöglicht zudem den Anbau des Sensors an der Loslagerseite des Motors – eine Forderung, die beispielsweise bei Direktantrieben für Druckwalzen oder Hauptspindelantrieben von Werkzeugmaschinen besteht. Auf der durch den Beschleunigungssensor hindurchgehenden Motorwelle kann beispielsweise ein Hohlwellen-Drehgeber oder -Resolver zur Lagemessung montiert werden, dessen Gehäuse sich am Gehäuse des Drehbeschleunigungssensors abstützt. Da intern insgesamt sechs Sensorspulen gleichmäßig über den Umfang verteilt sind, deren Signale aufsummiert werden, ist diese Bauart besonders unempfindlich gegenüber Taumeln und Mittenversatz der Wirbelstromglocke sowie elektromagnetischen Störfeldern, wie sie von großen Servomotoren ausgehen.

Ein sehr kompakter Linearbeschleunigungssensor, der jedoch auch an Rundtischen, Robotern und Torquemotoren eingesetzt werden kann, ist der Typ ACC 93 (Bild 3b). Eine zum Patent angemeldete Gestaltung der Aufnehmereinheit ermöglicht trotz der kompakten Bauform eine hohe Empfindlichkeit bei gleichzeitig guter Störunterdrückung.

**Bild 4** veranschaulicht das Verbesserungspotential, das lediglich aus der neuen Art der Geschwindigkeitsermittlung gemäß Bild 1 an einem rotatorischen Direktantrieb resultiert (Lageauflösung hierbei: 343  $\mu$ Grad; Abtastzeit: 200  $\mu$ s): Die mit Hilfe des Drehbeschleunigungssensors ACC 70 gewonnene Geschwindigkeit  $v_{beob}$  weist gegenüber der sonst aus Lagesignalen abgeleiteten Geschwindigkeit  $v_{diff}$  trotz höchster Dynamik keine erkennbare Quantisierung und sonstigen Fehler auf. Dies wirkt sich sehr günstig auf die erzielbare Regelungsgüte aus. Wird die Geschwindigkeit  $v_{beob}$  anstelle von  $v_{diff}$  zur Regelung verwendet, so kann der Regler deutlich dynamischer eingestellt werden, ohne dass es zu unerwünschten Schwingungsanregungen und Grenzyklen kommt. Im Fall der in **Bild 5** gewählten hohen Verstärkungsfaktoren zeigt sich das überlegene Regelungsverhalten hinsichtlich Dynamik und Gleichlauf auch bei kleinsten Geschwindigkeiten (hier  $10 \text{ min}^{-1}$ ). Die klassische Verwendung der Geschwindigkeit  $v_{diff}$  hingegen bewirkt bei diesen Verstärkungsfaktoren eine massive, nicht tolerierbare Anregung der auch bei Direktantrieben vorhandenen mechanischen Resonanzstellen (hier vor allem bei zirka 2,4 kHz), was in der mit dem Ferraris-Sensor gemessenen Beschleunigung  $a_{mess}$  und im Spektrum der Geschwindigkeit gut zu erkennen ist. Die üblicherweise zur Unterdrückung solcher höherfrequenten Schwingungen eingesetzten und aufwendig zu parametrierenden Tiefpass- und Bandsperfilter werden im Falle der Regelung mit  $v_{beob}$  überhaupt nicht benötigt, da höherfrequente, mechanische Resonanzen bei vielen Antriebssystemen lediglich dann Probleme bereiten, wenn sie permanent durch Quantisierungsrauschen mit Energie versorgt und in der Regelung durch Rückkopplung angeregt werden.



**5: Regelungsgüte eines Servoantriebs mit und ohne Einbinden eines Ferraris-Sensors in die herkömmliche Kaskadenregelung**  
 $K_v = 400 \text{ 1/s}$ ,  $K_p = 800 \text{ 1/s}$  und  $T_N = 20 \text{ ms}$



**6: Linearbeschleunigungssensor des Typs ACC 92 an einem Präzisions-Linear-Direktantrieb der Firma Prätec**

Auch an einem Lineardirektantrieb der Firma Prätec (**Bild 6**), der für Handlungsaufgaben in der Halbleiterfertigung Verwendung findet – standardmäßig ausgestattet mit einem hochpräzisen Längenmesssystem mit einer Auflösung  $< 20 \text{ nm}$  und hier ergänzt mit einem Linearbeschleunigungssensor des Typs ACC 92 –, ermöglicht die Einbindung des Ferraris-Sensors ohne maßgebliche Änderungen der bewährten P-Lage-PI-Geschwindigkeitsregelung eine Verdopplung der Verstärkungsfaktoren ( $K_v = 500 \text{ 1/s}$ ,  $K_p = 1000 \text{ 1/s}$  und  $T_N = 2 \text{ ms}$ ): Hohe Dynamik, Genauigkeit und Störsteifigkeit sind die Folge. Der Wegfall der Geschwindigkeitsquantisierung sorgt zudem für eine deutlich höhere Systemruhe und geringere Verlustleistung im Motor.

Eine weitere Steigerung erlaubt die Implementierung eines unterlagerten Beschleunigungsregelkreises beziehungsweise die Rückführung der Beschleunigung. An einem mit einem Resolver ausgestatteten rotatorischen Direktantrieb konnte durch den Einsatz eines Ferraris-Sensors und die Einführung eines unterlagerten Beschleunigungsregelkreises am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen die Drehzahlregelbandbreite bei gleichzeitiger Geräuschreduktion von zirka 70 auf zirka 400 Hz gesteigert werden.

Dies ermöglicht neue Perspektiven in Anwendungsbereichen, in denen hochauflösende, inkrementale Messsystemen aus Temperatur- oder Vibrationsgründen nicht einsetzbar sind und deshalb bisher auf eine mit dem Resolver (beziehungsweise anderen magnetischen oder induktiven Messsysteme mit vergleichsweise niedriger Auflösung) alleine nicht erzielbare hohe Dynamik und Störsteifigkeit verzichten musste. Der Ferraris-Sensor widersteht ebenso wie der Resolver hohen Temperaturen und Schockbeschleunigungen, da er vollständig ohne Elektronik aufgebaut werden kann und keine sensiblen Elemente, wie z. B. eine Glasscheibe, enthält.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass mit der Verfügbarkeit von Ferraris-Sensoren zur direkten Messung der rotatorischen und linearen Relativbeschleunigung erhebliches Potential zur Verbesserung der Regelungsgüte von Servoantriebssystemen besteht.

*Literaturhinweise:*

[1] Pritschow, G.; Hiller, B.: Verfahren zur hochgenauen Messung von Zustandsgrößen an Maschinenachsen. *Technologien für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, Fortschritt-Berichte, VDI Reihe 2 (1998), Nr. 493, S. 48-59*  
 [2] Wilhelmy, L.; Domke, R.: Drehbeschleunigungssensor ermöglicht hochgenaue Drehzahlregelung. *antriebstechnik 38 (1999), Nr. 4, S. 122-127*  
 [3] Hiller, B.: Relativbeschleunigungssensor-Potenzial und Einsatzmöglichkeiten in der Servo-Antriebstechnik. *Tagungsband zum Seminar „Fort-schritte in der Regelungs- und Antriebstechnik in Theorie und Praxis“, Stuttgart, 14.-15. November 1998*