

# **NEUE ENTWICKLUNGEN UND ANWENDUNGEN DES FERRARIS-SENSORS**

Bernhard Hiller

Veröffentlicht im Umdruck des Seminars:

**Fortschritte in der Regelungs- und Antriebstechnik**

**16. Lageregelseminar**

**18./19. Juni 2004 bzw. Wiederholung am 28./29. Januar 2005**

**am**

**ISW**

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen

Universität Stuttgart

## NEUE ENTWICKLUNGEN UND ANWENDUNGEN DES FERRARIS-SENSORS

Bernhard Hiller

Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Motivation</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Ferraris-Sensor zur Relativbeschleunigungsmessung</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Kenndaten von Ferraris-Sensoren</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Bauformen von Ferraris-Sensoren</b>	<b>10</b>
5.1	Drehbeschleunigungssensor ACC 70	10
5.2	Linearbeschleunigungssensor ACC 93	15
5.3	Sensorverstärker	16
<b>6</b>	<b>Neuentwicklungen</b>	<b>17</b>
6.1	Drehbeschleunigungssensoren ACC 74 und ACC 75	20
6.2	Drehbeschleunigungssensor ACC 75	21
6.3	Linearbeschleunigungssensor ACC 94	22
6.4	Einseitig abtastender Ferraris-Sensor ACC 22	24
<b>7</b>	<b>Anwendungen des Ferraris-Sensors</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>Zukünftige Entwicklungen</b>	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>33</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>34</b>

## **1 Einleitung**

Das Ferraris-Prinzip zur Messung der Relativbeschleunigung ist schon seit über 100 Jahren bekannt. In akademischen Arbeiten wurde das Potential dieses Sensorprinzips immer wieder aufgezeigt /1,2,5,6/. Jedoch erst die kommerzielle Fertigung seit wenigen Jahren eröffnete dem Sensor-Prinzip den Weg in industrielle Applikationen. Der einfache und robuste Aufbau in Kombination mit der berührungslosen Messung, prädestiniert den Sensor für den Einsatz an rotatorischen und linearen Bewegungsachsen. Ferraris-Sensoren lassen sich sowohl zur Analyse des Bewegungsverhaltens, als auch zur verbesserten Regelung von Servo-Antrieben jeglicher Art einsetzen. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojekts EffeNDi („Effektive Nutzung von Direktantrieben“) wurden von der Firma Hübner Elektromaschinen AG in Berlin die Sensoren weiterentwickelt. Den aus der Direktantriebstechnik kommenden Forderungen nach hoher Dynamik, kompakten Abmessungen und leichter Montage wurde Rechnung getragen. Der Vortrag beschreibt einleitend das Prinzip und den Aufbau von Ferraris-Sensoren. Im Anschluss wird auf die Kenngrößen und Möglichkeiten zur gewinnbringenden Verwendung des Ferraris-Sensors bei der Systemanalyse und an Servo-Antrieben eingegangen. Abschließend werden die aktuellen Entwicklungstendenzen vorgestellt.

## **2 Motivation**

Die stete Forderung nach steigender Produktivität bei gleichzeitiger Erhöhung der Genauigkeit von numerisch gesteuerten Maschinen, wie z.B. Werkzeugmaschinen, Druckmaschinen, aber auch Robotern und einer Vielzahl von Maschinen im Bereich der Handhabungstechnik, ist verknüpft mit immer höheren Anforderungen an die darin eingesetzten Servo- bzw. Hauptantriebe. Hohe Dynamik, guter Gleichlauf und bestmögliche Störsteifigkeit der geregelten Antriebe sind eine Grundvoraussetzung für die Steigerung der Produktivität und Qualität der Gesamtanlage.

Dies wiederum bedingt, dass die Zustandsgrößen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung schnell und präzise erfasst werden müssen, damit trotz der auf den Antrieb wirkenden Stör- und Bearbeitungskräfte die gewünschte Bewegung exakt, dynamisch und mit anderen Antrieben synchronisiert ausgeführt werden kann.

Die Ansprüche an die Qualität der Zustandsgrößenerfassung sind bei Direktantrieben, die sich aufgrund ihrer bekannten Vorteile immer größerer Beliebtheit erfreuen, besonders hoch, da hier die Steifigkeit ausschließlich vom Regler aufgebracht werden muss. Um das Potential der Direktantriebe, das ja gerade aus dem Wegfall der durch Getriebe und Spindeln verursachten Unzulänglichkeiten wie Nachgiebigkeit und Spiel herrührt, voll auszuschöpfen, ist eine sehr hohe Auflösung und Dynamik, insbesondere der Geschwindigkeit, zu fordern.

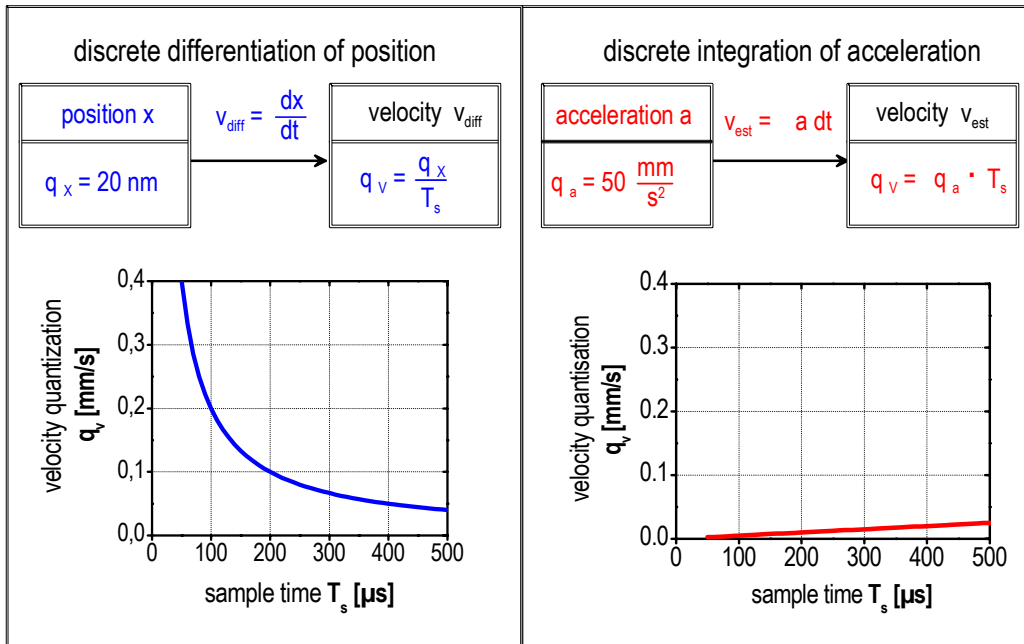
Sollen darüber hinaus an Servo-Antrieben und speziell an Direktantrieben, die zwar schon seit langen bekannten, in der Praxis jedoch nur äußerst selten verwendeten Konzepte der Beschleunigungsrückführung, Zustandsregelung oder unterlagerten Beschleunigungsregelung zur weiteren Steigerung der Regelgüte zum Einsatz kommen, so ist zusätzlich zur Lageerfassung die direkte Erfassung der Relativbeschleunigung erforderlich.

#### *Derzeitige Zustandsgrößenerfassung*

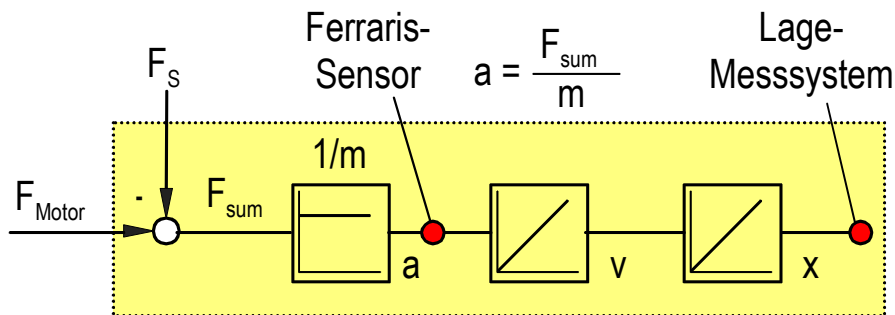
In digitalen Servo-Antrieben kommt heutzutage überwiegend der Kaskadenregler zum Einsatz. Gemessen wird dabei lediglich der Strom (bzw. die Ströme) und die Lage. Die Lageerfassung beruht überwiegend auf inkrementellen oder absoluten Drehgebern bzw. Längenmesssystemen. Hohe Auflösungen lassen sich mit sogenannten Sinusgebern erzielen, da deren analoge Abtastsignale mit Interpolationsschaltungen vielfach gegenüber der Teilungsperiode unterteilt werden können. Optische Systeme haben Teilungsperioden von typisch 20 oder 40  $\mu\text{m}$  und ermöglichen Auflösungen von 20 nm und darunter. Bei Anwendungen mit geringeren Anforderungen an die Positioniergenauigkeit, aber auch bei hohen Robustheitsanforderungen, finden magnetische, induktive und teilweise auch kapazitive Systeme Verwendung, deren Teilungsperioden im Millimeterbereich liegen und die Auflösungen bis 1  $\mu\text{m}$  und darunter ermöglichen. Die höhere Robustheit gegenüber optischen Systemen, größere Montagetoleranzen und geringere Kosten, insbesondere bei großen Verfahrlängen, sind Argumente für diese Positionsmessgeräte. Allerdings sind deutliche Abstriche bei der erreichbaren Regelgüte aufgrund der üblicherweise deutlich niedrigeren Auflösung und Genauigkeit zu machen. Bei allen Systemen ist zu beachten, dass die Genauigkeit innerhalb einer Teilungsperiode erheblich schlechter ist als die Auflösung, da die Abtastsignale und deren Verarbeitung nie ideal sind.

Die Geschwindigkeit wird meist durch zeitdiskrete Differentiation der Lage bestimmt. Dadurch werden Quantisierungs- und vor allem sonstige Fehler der Lage verstärkt abgebildet. Die Geschwindigkeitsquantisierung  $q_v$  ist zur Lagequantisierung  $q_x$  proportional und zur Abtastzeit  $T_s$  umgekehrt (**Bild 1** links). Moderne Servo-Regler arbeiten heute mit Abtastzeiten von  $62,5 \mu\text{s}$  und darunter. Die dadurch, selbst bei hoher Lageauflösung, verursachte Geschwindigkeitsquantisierung führt zu erheblichen Problemen: Es ist stets ein Kompromiss zwischen Quantisierungsrauschen (und damit verbundener Schwingungsanregung, Geräuschentwicklung und Erwärmung des Motors) und erzielbarer Steifigkeit bzw. Dynamik des Antriebs zu finden. 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 Verwendung von Bandsperrfiltern zur Unterdrückung von schwach gedämpften, höherfrequenten Schwingungen, ein nicht unerheblicher Parametrierungsaufwand erforderlich. Zusätzliche Probleme resultieren beim Beobachtereinsatz aus der Reibung und sich über dem Verfahrensweg oder auch der Zeit ändernden Resonanzfrequenzen und Streckenparametern. 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 ggf. die Beschränkung der maximalen Verfahrensgeschwindigkeit in Betracht zu ziehen.

Wesentliche Verbesserungen des Regelverhaltens von Servo-Antrieben ermöglicht der Einsatz von Beschleunigungssensoren. Mit der Messung der Beschleunigung steht jene Zustandsgröße zur Verfügung, die die unmittelbare und unverzögerte Reaktion der zu bewegenden Masse auf einwirkende Kräfte repräsentiert (**Bild 2**). Die Beschleunigung eignet sich somit sehr gut als Rückkopplungssignal (z.B. zur Systemdämpfung) oder zum Aufbau einer unterlagerten Beschleunigungsregelung, die eine deutliche Erhöhung der Störsteifigkeit und Dynamik ermöglicht. Darüber hinaus ist durch Integration ein hervorragende, gering quantisierte Geschwindigkeit zu gewinnen (**Bild 1** rechts). Die Lage braucht dann keine Hochauflösung zu besitzen, was die Verwendung robuster, kostengünstiger Positionsmesssysteme erlaubt.



**Bild 1:** Geschwindigkeitsquantisierung beim Differenzieren der Lage und beim Integrieren der Beschleunigung



**Bild 2:** Vereinfachtes Streckenmodell

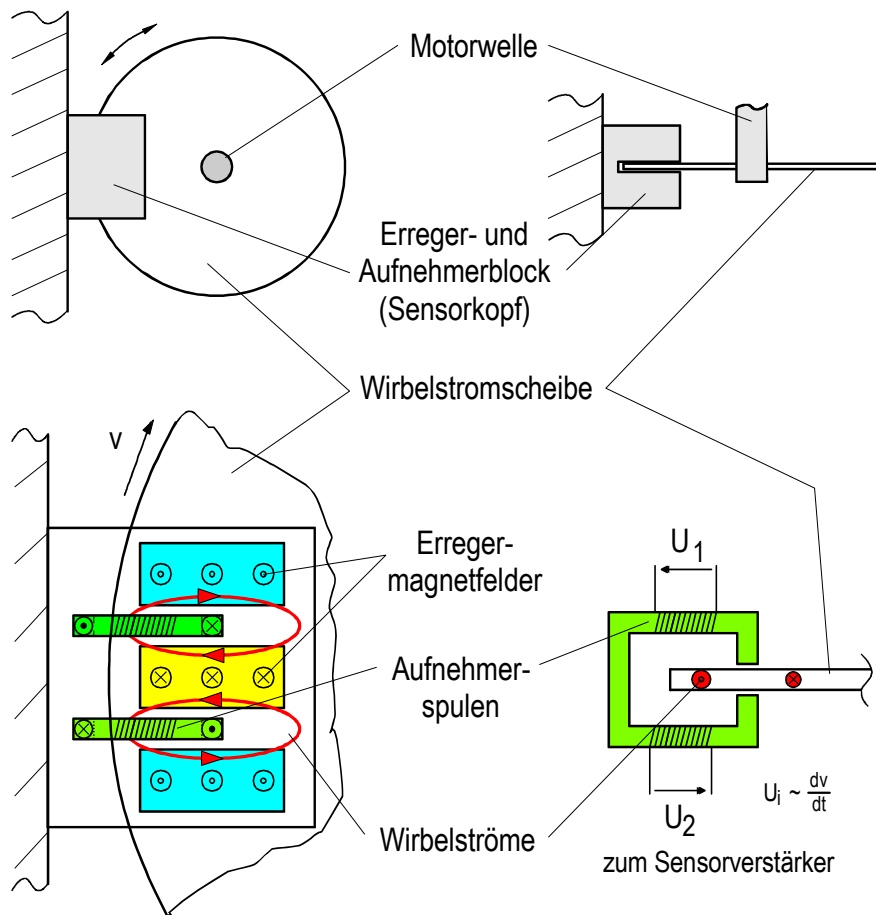
### 3 Ferraris-Sensor zur Relativbeschleunigungsmessung

Das Prinzip des Ferraris-Sensors geht auf den Italiener Galileo Ferraris zurück und soll anhand des in **Bild 3** gezeigten Ferraris-Sensors erläutert werden: Bei Drehung der elektrisch gut leitenden Wirbelstromscheibe (Läufer) aus nichtmagnetischem Material entstehen im Bereich der ortsfesten Erregermagnetfelder Wirbelströme im Läufer, die sekundäre, geschwindigkeitsproportionale Magnetfelder zur Folge haben. Diese werden

von den Aufnehmerspulen erfasst. Die in den Aufnehmerspulen induzierte Spannung ist der Änderung dieser Magnetfelder und damit der Drehbeschleunigung proportional.

Das Ferraris-Prinzip weist folgende Merkmale auf (1,2,3):

- Es liegt kein schwingungsfähiges System zugrunde. Der Ferraris-Sensor ist sehr robust und widersteht höchsten Schockbeschleunigungen.
- Große Einbautoleranzen gestatten einen kupplungslosen Anbau.
- Der Ferraris-Sensor ist ein aktiver, berührungsloser Sensor. Beim Auftreten einer Beschleunigung wird eine kleine, rauscharme und offsetfreie Spannung direkt in den Messspulen induziert.
- Die rauscharmen Signale lassen eine Skalierung des Messbereichs in weiten Grenzen nur über die Wahl des Verstärkungsfaktors eines nachgeschalteten Sensorverstärkers zu.
- Es existiert keine untere Grenzfrequenz. Die Bandbreite lässt sich durch die Wahl des Wirbelstrommaterials und die Gestaltung der Erreger- und Aufnehmerkreise variieren.
- Im Falle der Drehbeschleunigungsmessung wird das Messsignal vom Ständer abgenommen, Messwertübertrager entfallen. Dies reduziert die Kosten und erhöht die Zuverlässigkeit gegenüber anderen Prinzipien.
- Da der Sensor mit Wirbelströmen arbeitet, die in metallischen Leitern induziert werden, sind Aspekte der Erwärmung und Rückwirkung auf das Erregermagnetfeld zu berücksichtigen.
- Der Ferraris-Sensor misst nur die relative Beschleunigung zwischen Wirbelstrommaterial und Sensorkopf. Dies macht den Sensor bevorzugt geeignet in der Antriebstechnik und in Maschinen und Anlagen, bei denen nicht die absoluten, sondern nur die relativen Bewegungen relevant sind. Beschleunigungssensoren nach dem Feder-Masse-Prinzip erfassen die absolute Beschleunigung und sind deshalb im Einsatz teilweise problematisch.



**Bild 3:** Prinzip des Ferraris-Sensors /4/



#### 4 Kenndaten von Ferraris-Sensoren

Auf die Kenndaten von Ferraris-Sensoren wurde ausführlich in /2,3/ eingegangen. Daher sollen an dieser Stelle nur die wesentlichen Kenndaten kurz erläutert werden.

##### *Übertragungsfaktor, Bremswirkung, Störimpfindlichkeit, Frequenzgang, Rauschabstand*

Der Übertragungsfaktor gibt die von Ferraris-Sensoren ohne Verstärkung gelieferte Spannung pro Beschleunigung ( $\text{V}/\text{rad s}^{-2}$  bzw.  $\text{V}/\text{g}$ ) an. Er hängt vom Erregermagnetfeld, der elektrischen Leitfähigkeit des Läufers (Glocke, Scheibe oder Streifen), dem Aufbau der Aufnehmerspulen und der Geometrie ab. Infolge der Rückwirkung des Magnetfelds der Wirbelströme auf das Erregermagnetfeld, reduziert sich in Abhängigkeit der Drehzahl der Übertragungsfaktor (siehe auch **Bild 5**). Dieser Effekt wird auch dazu genutzt, um bei sehr hohen Drehzahlen bzw. Verfahrgeschwindigkeiten eine übermäßige Erwärmung und Bremswirkung des Läufers infolge der Wirbelströme zu vermeiden.

Die Störimpfindlichkeit gegenüber externen magnetischen Wechselfeldern wird durch geschickte Platzierung und Verschaltung mehrerer Aufnehmerspulen stark verringert. Ebenso werden magnetisch abschirmende Gehäuse eingesetzt. Statische Magnetfelder haben keinen Einfluss auf das Messsignal.

Der Übertragungsfaktor ist frequenzabhängig und weist mit guter Näherung Tiefpassverhalten erster Ordnung auf. Die Zeitkonstante ist proportional zur Leitfähigkeit des Wirbelstromkörpers und von aufgespannter Fläche der Wirbelströme abhängig. Ein möglichst kleiner Sensor ist dabei von Vorteil. Hieraus wird ersichtlich, dass anwendungsspezifisch ein Kompromiss zwischen maximaler Messfrequenz und Übertragungsfaktor zu suchen ist. Durch Kaskadierung mehrerer „kleiner“ Aufnehmerkreise kann jedoch neben einer hohen Bandbreite auch ein großer Übertragungsfaktor sowie eine gute Störunterdrückung erzielt werden. Die Bandbreite aktueller Sensoren liegt zwischen 300 Hz und 5 kHz. Signal-Rauschabstände von  $> 70$  dB sind erreichbar.

##### *Temperaturabhängigkeit des Übertragungsfaktors*

Der Übertragungsfaktor von Ferraris-Sensoren besitzt ohne besondere Maßnahmen einen negativen Temperaturkoeffizienten, der dem des Wirbelstrommaterials (Aluminium, Kupfer, Bronze, Messing) entspricht. Aus diesem Grund ist bei sehr hohen

Ansprüchen an die Temperaturstabilität des Übertragungsfaktors eine elektronische Temperaturkompensation vorzusehen. Durch die Verwendung von Konstantan oder Manganin als Wirbelstrommaterial kann zwar ein Temperaturkoeffizient von nahe Null erreicht werden, doch aufgrund der niedrigeren Leitfähigkeit (ca. 25-fach niedriger gegenüber Kupfer), ist dann der Übertragungsfaktor deutlich geringer. Nicht zuletzt aus Kostengründen wird daher praktisch nicht mit solchen Wirbelstrommaterialien gearbeitet.

## 5 Bauformen von Ferraris-Sensoren

Bei der Weiterentwicklung der Ferraris-Sensoren wurde vor allem auf die Anforderungen im praktischen Einsatz Wert gelegt. Die Sensoren sollen leicht montierbar, mechanisch robust und möglichst unempfindlich gegenüber externen magnetischen Störfeldern sein. Da sich die relevanten Kenndaten

- Übertragungsfaktor (Empfindlichkeit)
- Bremswirkung
- Linearität in Abhängigkeit der Verfahrgeschwindigkeit
- Bandbreite (Frequenzgang)

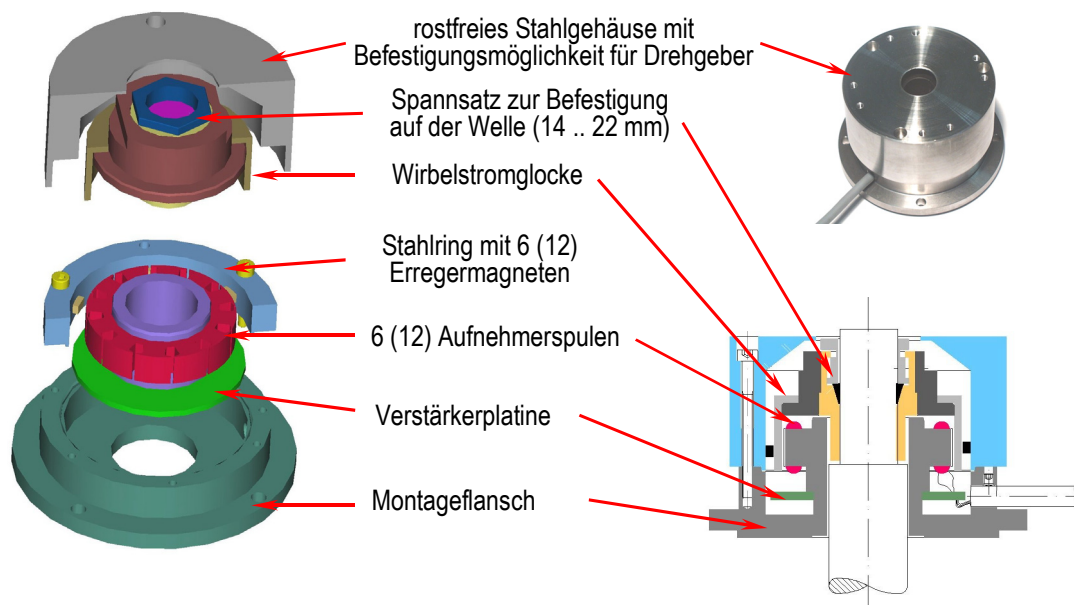
nicht alle gleichzeitig optimieren lassen, wurde deren gegenseitige Beeinflussung im Rahmen des Verbundprojekts EffeNDi ausgiebig untersucht. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen erfolgte sowohl die Weiterentwicklung bestehender Produktreihen als auch die Neuentwicklung von Ferraris-Sensoren. Zunächst soll im Folgenden der Aufbau der schon länger verfügbaren Bauformen dargestellt werden.

### 5.1 Drehbeschleunigungssensor ACC 70

**Bild 4** zeigt den Aufbau des Ferraris-Drehbeschleunigungssensors ACC 70. Die Ausgestaltung des Wirbelstrommaterials als Aluminium-, Messing- oder Kupferglocke mit Hohlwelle, die mit einem Spannsatz auf der Motorwelle befestigt wird, gestattet einen

Axial Schub von bis zu 2 mm (wichtig bei Montage am Loslager) und dennoch eine steife, kupplungslose Befestigung der Aufnehmereinheit direkt am Motorflansch. Auf der den Beschleunigungssensor durchsetzenden Motorwelle wird häufig ein Hohlwellen-Drehgeber oder -Resolver zur Lagemessung montiert, dessen Gehäuse am Drehbeschleunigungssensor ggf. mit einer Statorkupplung befestigt werden kann. Da intern insgesamt 6 Senserspulen gleichmäßig über den Umfang verteilt sind, ist diese Bauart besonders unempfindlich gegenüber Taumeln und Mittenversatz der Wirbelstromglocke und elektromagnetischen Störfeldern, wie sie von Servo-Motoren ausgehen können.

Die Güte der Wirbelstromglocke hat entscheidenden Einfluss auf das Messsignal. Ist die Leitfähigkeit der Glocke nicht über dem gesamten Umfang konstant (z.B. infolge von nichthomogenem Materialgefüge oder Dickenschwankungen), so ergeben sich in Amplitude und Frequenz zur Drehzahl proportionale Störungen im Beschleunigungssignal. Daher werden mittlerweile neben Standardglocken aus Aluminiumlegierungen für besondere Anforderungen auch präzisionsgedrehte Reinaluminium- und Elektrolytkupfer-Varianten angeboten. Die Hohlwellendurchmesser betragen zwischen 10 mm und 22 mm.



**Bild 4:** Aufbau der Drehbeschleunigungssensoren ACC 70

Die Kenndaten der Baureihe ACC 70 werden applikationsspezifisch durch die Auslegung einzelner Komponenten beeinflusst:

- Größe der Erregermagneten (beeinflusst die Höhe des Erregermagnetfeldes) und Anzahl der Erregermagneten
- Wirbelstromglocke (unterschiedliche Materialien und Materialstärke)
- Kernmaterial der Aufnehmerspulen (unterschiedliche Flussführung)
- Anzahl der Aufnehmerspulen und Anzahl der Windungen je Spule

Die Tabelle 1 zeigt beispielhaft die mögliche Beeinflussung der Kenngrößen Übertragungsfaktor, Grenzfrequenz und Bremswirkung. Es ist ersichtlich, dass sich bestimmte Anwenderwünsche, wie z.B. hoher Übertragungsfaktor bei gleichzeitig geringer Bremswirkung (da z.B. hohe Drehzahlen gefordert sind) und hohe Bandbreite, zunächst nur als Kompromisslösung erfüllen lassen. Da jedoch der Rauschpegel eines Ferraris-Sensors prinzipbedingt sehr niedrig ist, kann – hochwertige Verstärkertechnik vorausgesetzt – durch hohe Signalverstärkung der Wunsch nach hoher Empfindlichkeit bei gleichzeitig geringer Bremswirkung und hoher Bandbreite dennoch erfüllt werden.

Ausführung / Variation	$B \uparrow$ Erhöhung des Erregermagnetfeldes (stärkere Magneten)	$\kappa \uparrow$ Erhöhung der Leitfähigkeit des Wirbelstrommaterials	$A_{\text{Wirbelstrom}} \uparrow$ Vergrößerung der von den Wirbelströmen umschlossenen Fläche	$\mu_r \text{ Aufnehmerkern} \uparrow$ Erhöhung der Permeabilität des Kernmaterials der Aufnehmerspulen
<b>Kenndaten</b>				
Übertragungsfaktor	+	+	+	+
Messbandbreite	ohne Einfluss	-	-	-
Bremswirkung	-	-	-	ohne Einfluss / -
Abfall des Übertragungsfaktors über der Drehzahl	ohne Einfluss	-	ohne Einfluss / -	ohne Einfluss / -

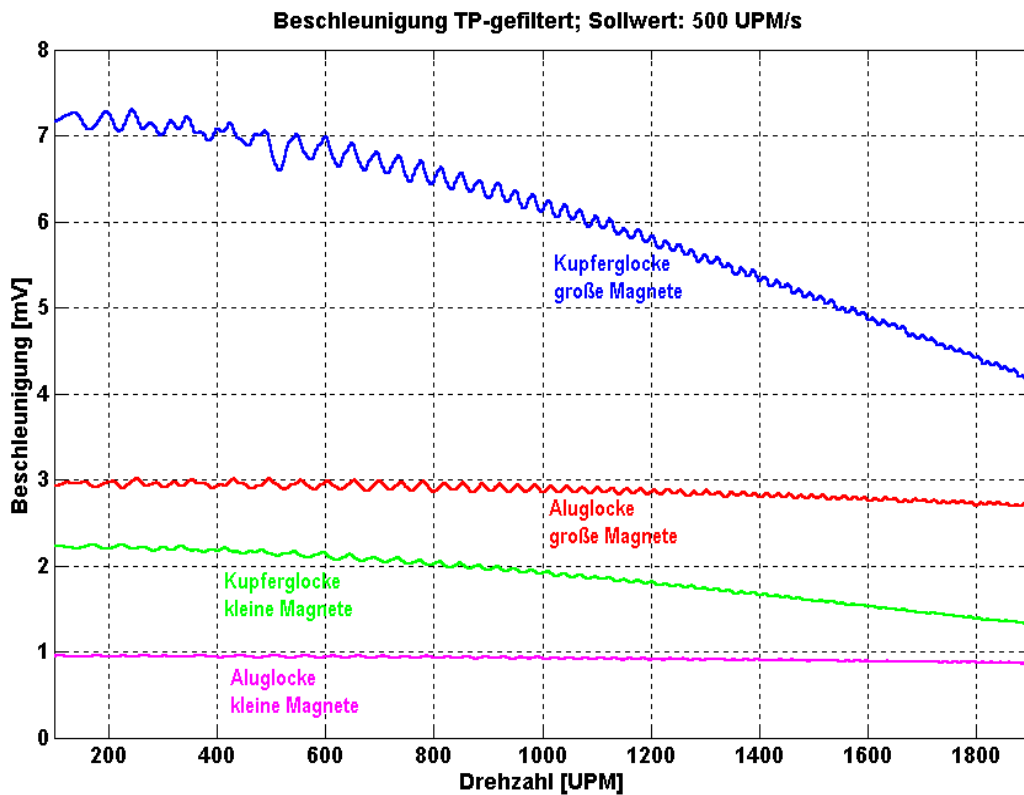
**Tabelle 1:** Kenndaten und deren Abhängigkeit vom Aufbau des Ferraris-Sensors

**Bild 5** zeigt den Zusammenhang zwischen Übertragungsfaktor und verwendetem Wirbelstrommaterial bzw. Größe des Erregermagnetfeldes anhand von Messungen bei konstanter Beschleunigung von  $500 \text{ Umin}^{-1}\text{s}^{-1}$  am ACC 70. Zu beachten ist, dass die Verringerung des Übertragungsfaktors in Abhängigkeit der Drehzahl nicht von der Größe des Erreger-Magnetfeldes, sondern nur von der Leitfähigkeit der Wirbelstromglocke abhängt (die anderen Parameter wurden nicht variiert). Die Übertragungsfaktoren des ACC 70 bei unterschiedlichen Magnetgrößen und Wirbelstromglocken aus Aluminium bzw. Kupfer sowie den Drehzahlen 100 UPM und 2000 UPM sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die Bandbreite eines Ferraris-Sensors lässt sich unabhängig von der Geometrie und des Aufbaus des Erreger- und des Aufnehmerkreises stets über die Wahl der Leitfähigkeit des verwendeten Wirbelstrommaterials beeinflussen. Eine höhere Leitfähigkeit verringert stets die Bandbreite, erhöht aber den Übertragungsfaktor.

Material Glocke Wandstärke: 2 mm	Magnetgröße Sm-Co	Übertragungsfaktor bei 100 UPM [ $\mu\text{V} / \text{rad/s}^2$ ]	Übertragungsfaktor bei 2000 UPM [ $\mu\text{V} / \text{rad/s}^2$ ]
Elektrolytkupfer	9x6x2 mm	135	76,4
Aluminiumlegierung	9x6x2 mm	56,2	51,6
Elektrolytkupfer	5x3x2 mm	42,4	24,1
Aluminiumlegierung	5x3x2 mm	18,1	16,5

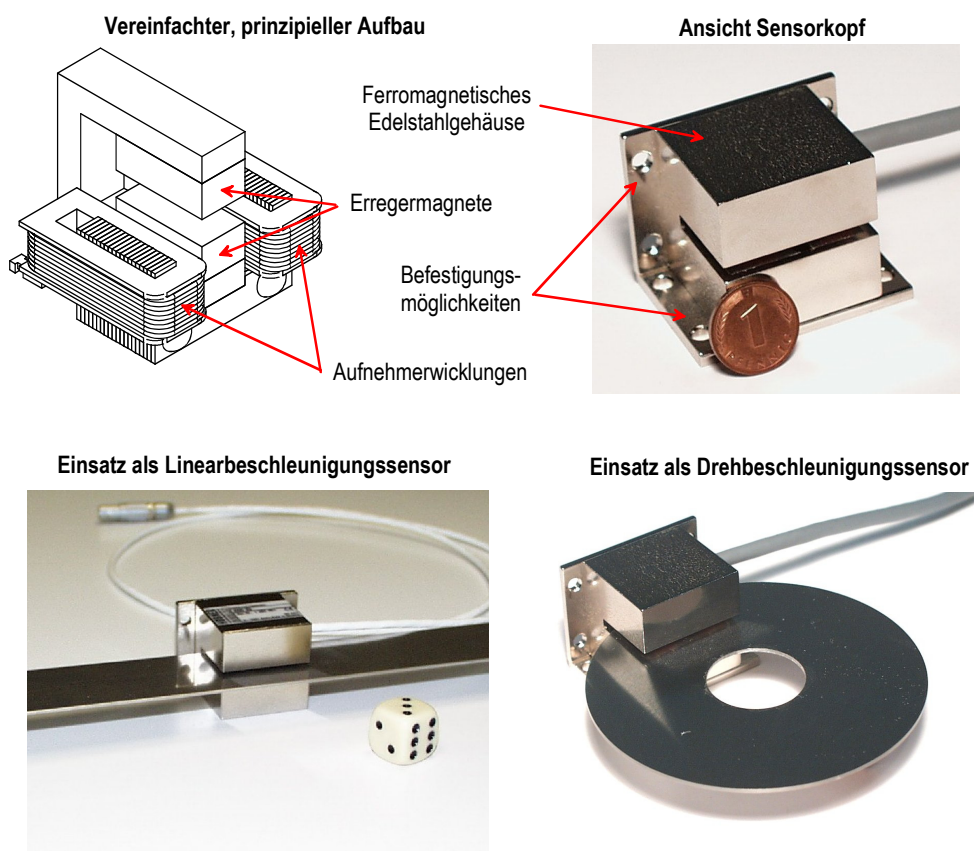
**Tabelle 2:** Abhängigkeit des Übertragungsfaktors von Magnetgröße, Leitfähigkeit der Wirbelstromglocke und der Betriebsdrehzahl beim Drehbeschleunigungssensor ACC 70



**Bild 5:** Abhängigkeit des Übertragungsfaktors von Erregermagnetfeld, Leitfähigkeit der Wirbelstromglocke und von der Betriebsdrehzahl beim ACC 70

## 5.2 Linearbeschleunigungssensor ACC 93

Ein sehr kompakter Linearbeschleunigungssensor, der jedoch auch an Rundtischen, Robotern und Torquemotoren eingesetzt wird, ist der Typ ACC 93 (**Bild 6**). Die Gestaltung der Aufnehmereinheit ermöglicht trotz der kompakten Bauform einen hohen Übertragungsfaktor (10 mV/g bei Verwendung eines Wirbelstromblechs aus 1 mm Rein-aluminium) bei gleichzeitig guter Störunterdrückung. Das Wirbelstromblech bzw. die Wirbelstromscheibe wird vom geschlitzten Sensorkopf (Luftspaltbreite: 3 oder 5 mm) umgriffen, was große Einbautoleranzen zulässt.



**Bild 6:** Kompakter, das Wirbelstromblech „umgreifender“ Ferraris-Sensor ACC 93

### 5.3 Sensorverstärker

Der Sensorverstärker kann ggf. im Sensorgehäuse integriert oder extern platziert sein. Da er Spannungen von teilweise nur wenigen  $\mu\text{V}$  auf einen entsprechenden Ausgangspegel umsetzen muss, werden hier hochwertige rausch- und offsetarme Differenzverstärker eingesetzt. Dadurch kann die Empfindlichkeit eines Ferraris-Sensors lediglich über die Verstärkung des Sensorverstärkers eingestellt werden, die zwischen 1 und 20000 liegen kann.

Zur Zeit werden im Wesentlichen drei Verstärkervarianten angeboten, deren Charakteristika in Tabelle 1 wiedergegeben sind. Den besten Signal-Rauschabstand besitzt wegen des hohen Ausgangssignalpegels der HEAG 164-15. Der HEAG 165 eignet sich aufgrund seiner digitalen Programmierbarkeit vor allem für Applikationen, bei denen der Beschleunigungsmessbereich im Voraus noch nicht feststeht, oder - je nach Messaufgabe - neu eingestellt werden muss (z.B. Prüfstände). Als Besonderheit lässt sich daran auch ein Temperatursensor anschließen, wodurch sich die Temperaturabhängigkeit des Übertragungsfaktors eines Ferraris-Sensors bei Bedarf kompensieren lässt. Ein elektronisches Typenschild rundet die Ausstattungsmerkmale ab. Der am einfachsten aufgebaute Sensorverstärker HEAG 163 bietet mit seinem massebezogenen Ausgang den unkomplizierten Anschluss z.B. an ein Oszilloskop oder eine Messkarte ohne differenzielle Eingänge.

	<b>HEAG 163</b>	<b>HEAG 164-15</b>	<b>HEAG 165</b>
<b>Versorgungsspannung</b>	$\pm 5$ bis $\pm 18$ V	$\pm 5$ bis $\pm 18$ V	4,5 bis 30 V
<b>Ausgangspegel</b>	bis $\pm 12$ V massebezogen	bis $\pm 20$ V differenziell	1 bis 3 $V_{SS}$ differenziell
<b>Verstärkungsbereich</b>	1 bis 500	2 bis 10000	10 bis 20000
<b>Verstärkerstufen</b>	1	2	3
<b>Tiefpässe</b>	1	3	3
<b>Verstärkungs-Einstellung</b>	manuell über steckbare Widerstände	manuell mit 2 Potis und 2 Jumpfern	digital über RS 485
<b>Offset-Einstellung</b>	manuell mittels Poti	keine	digital über RS 485
<b>Kurzschlussfest, Eignung für große Kabellängen</b>	nein	ja	ja

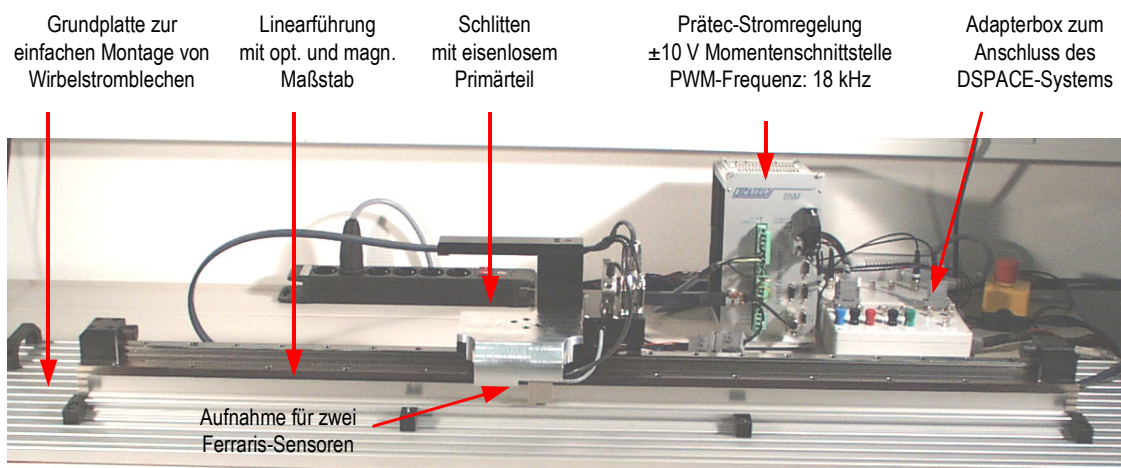
**Tabelle 3:** Charakteristika der derzeitigen Verstärker für Ferraris-Sensoren



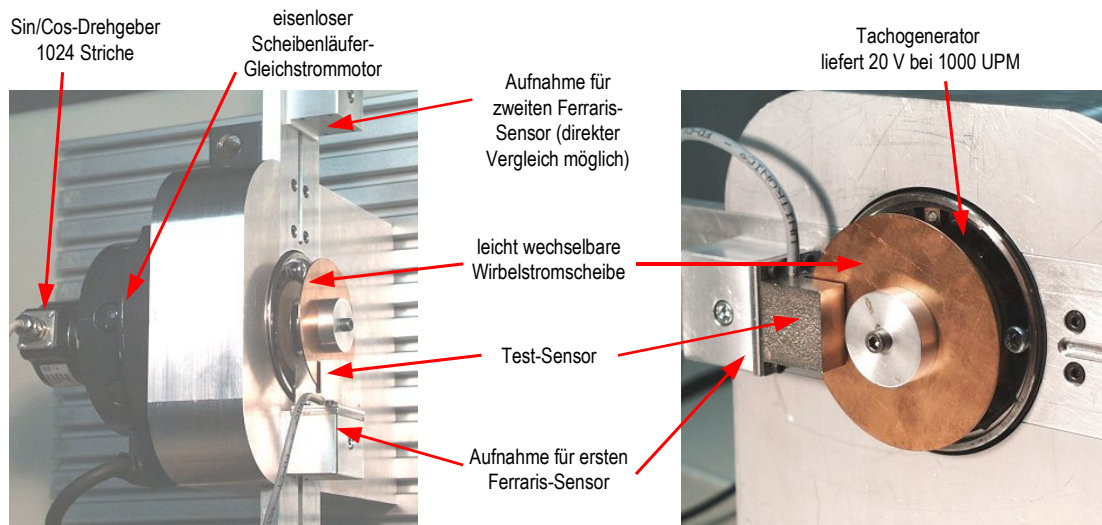
## 6 Neuentwicklungen

Obwohl sich die Ferraris-Sensoren ACC 70 und ACC 93 bereits in vielen Applikationen bewähren konnten, gibt es Anwendungen, bei denen beispielsweise eine höhere Bandbreite oder eine höhere Betriebsdrehzahl ohne merklichen Empfindlichkeitsabfall gefordert ist. Im Projekt EffeNDi wurde darüber hinaus als Ziel gesetzt, einen kompakten „einseitig“ arbeitenden Beschleunigungssensor zu entwickeln, um die Montage gegenüber dem „umgreifenden“ Linearbeschleunigungssensor ACC 93 zu vereinfachen.

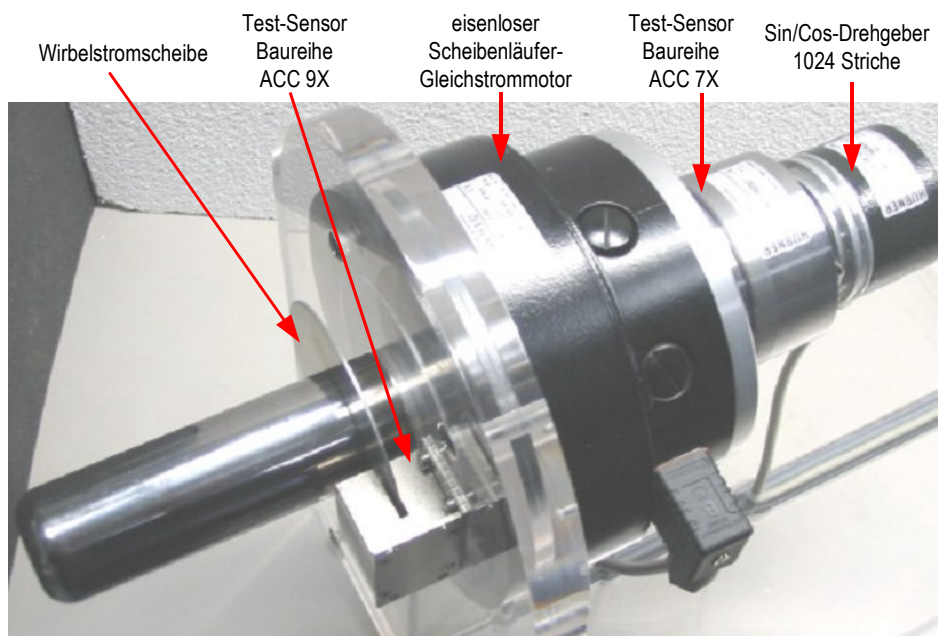
Für die Untersuchungen an den bestehenden und den neuen Ferraris-Sensoren wurden eigens Prüfstände und Auswertalgorithmen entwickelt. Dies war erforderlich, da bestimmte Kenndaten von Ferraris-Sensoren, wie z.B. die Bandbreite, der sogenannte Hystereseeffekt und Nichtlinearitäten, nicht durch simple Betrachtung der Beschleunigungssignale selbst, sondern vielmehr nur durch aufwendige Verrechnung mit den Signalen hochauflösender Lagemesssysteme ermittelt und interpretiert werden können. **Bild 7**, **Bild 8** und **Bild 9** zeigen die Prüfstände zum Testen der Linearbeschleunigungssensoren und der Drehbeschleunigungssensoren. In beiden Fällen werden die Servo-Antriebe mittels eines Signalprozessor-Systems der Firma dSpace, das um spezielle IO-Karten zum zeitsynchronen Auswerten von Sin/Cos-Lagemesssystemen mit Oversampling /5,8/ und Ferraris-Sensoren erweitert wurde, geregelt oder gesteuert betrieben. Aufgrund der hohen verfügbaren Rechenleistung sind dabei Abtastfrequenzen bis zu 40 kHz möglich.



**Bild 7:** Prüfstand für Ferraris-Sensoren mit hochdynamischem eisenlosen Linear-Direktantrieb (Beschleunigungsvermögen: 7 g)



**Bild 8:** Prüfstand für Ferraris-Sensoren mit eisenlosem Gleichstrom-Scheibenläufermotor „Scheibenprüfstand“



**Bild 9:** Prüfstand für Ferraris-Sensoren zum gleichzeitigen Testen der Baureihen ACC 7X und ACC 9X

*Bestimmung von Bandbreite und Übertragungsfaktor*

Zur Ermittlung der Bandbreite und des Übertragungsfaktors der Drehbeschleunigungssensoren hat sich folgendes Verfahren bewährt:

Der Scheibenläufer-Gleichstrommotor aus z.B. **Bild 9** wird mit einem frequenzvariablen sinusförmigen Sollstrom beaufschlagt. Die dadurch hervorgerufene sinusförmige Vibration der Motorwelle wird sowohl vom Ferraris-Sensor als auch vom Sin/Cos-Drehgeber detektiert. Die durch Interpolation der Sin/Cos-Signale gewonnene, hochaufgelöste Winkellage gehorcht dabei in guter Näherung der Bewegungsgleichung

$$x = \hat{x} \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \quad (1)$$

Für die synchron mittels Signalprozessor-System erfasste Beschleunigung, die zunächst nur in Form gesampelter Spannungswerte vorliegt, gilt allgemein:

$$a = \hat{a} \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \quad (2)$$

wobei ebenso gelten muss:

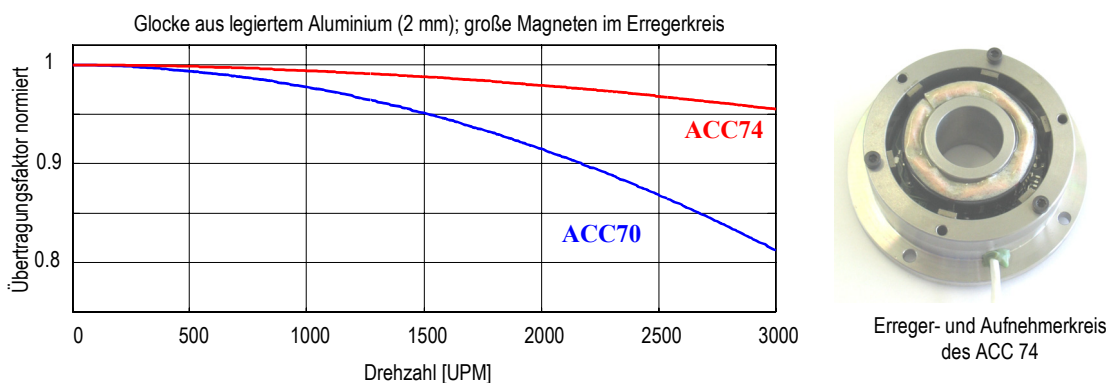
$$\hat{a} = -\hat{x} \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \quad (3)$$

Aus Gleichung (3) kann bei niedrigen Frequenzen (z.B. 40 Hz) der Übertragungsfaktor direkt berechnet werden, da die Amplitude der Winkellage genau gemessen werden kann und die Frequenz bekannt ist. Der Frequenzgang des Ferraris-Sensors kann mittels Sweep-Signal-Erregung des Motors und anschließender Kreuzkorrelation von synchron aufgezeichneter Lage und Beschleunigung unter Berücksichtigung von Gleichung (3) bestimmt werden. Zu beachten ist dabei, dass sich durch Nachgiebigkeiten der Lager, Wellentorsion und Elastizitäten der Statorkupplung des Drehgebers und anderer Unzulänglichkeiten, insbesondere bei hohen Frequenzen, Unstimmigkeiten ergeben, die nichts mit dem Frequenzgang des Ferraris-Sensors zu tun haben. Bei der Interpretation solcher Messungen ist also stets Vorsicht geboten und Erfahrung erforderlich.

## 6.1 Drehbeschleunigungssensoren ACC 74

Der Drehbeschleunigungssensor ACC 74 unterscheidet sich vom ACC 70 lediglich durch eine andere Gestaltung des Aufnehmerkerns, auf den die 6 Aufnehmerspulen gewickelt sind. Statt eines Blechpakets kommt hier ein Hartkunststoff zum Einsatz. Durch diese geringfügige Modifikation ändern sich die meisten Kenndaten des Sensors gegenüber dem ACC 70 erheblich:

- Der Übertragungsfaktor reduziert sich um ca. den Faktor 9  $\rightarrow$  zur Erlangung der gleichen Empfindlichkeit muss nun deutlich höher verstärkt werden.
- Der Abfall des Übertragungsfaktors über der Drehzahl ist deutlich schwächer, siehe **Bild 10**.
- Die Erwärmung der Wirbelstromglocke bei hohen Drehzahlen fällt erheblich geringer aus.
- Die Bandbreite verdoppelt sich (gleiche Leitfähigkeit der Wirbelstromglocken vorausgesetzt).

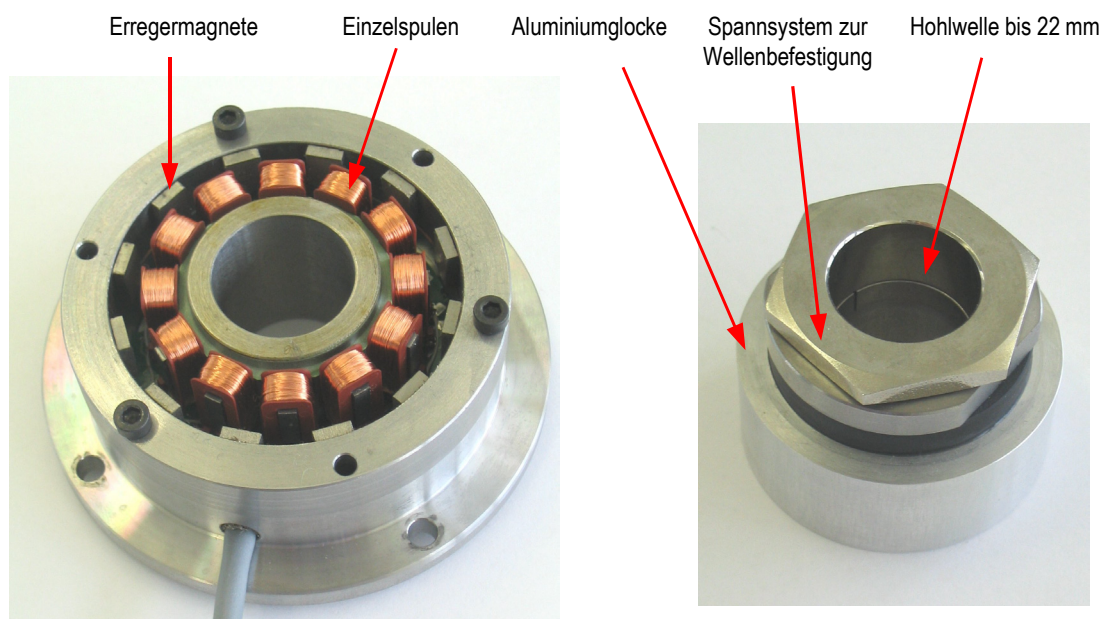


**Bild 10:** Reduktion des Übertragungsfaktors über der Drehzahl beim ACC 74 im Vergleich zum ACC 70

Der ACC 74 empfiehlt sich daher für jene Anwendungsfälle, bei denen eine gegenüber dem ACC 70 höhere Bandbreite gefordert wird und das geringfügig höhere Rauschen toleriert werden kann.

## 6.2 Drehbeschleunigungssensor ACC 75

Beim neu entwickelten Drehbeschleunigungssensor ACC 75 (**Bild 11**) wurde ein anderer Weg zur Erhöhung der Bandbreite beschritten: Die Anzahl der Wirbelströme wird durch Verwendung von nunmehr 12 statt bislang 6 Magneten unter Beibehaltung der Wirbelstromglocke erhöht, woraus sich räumlich kleinere Wirbelstromfelder ergeben, die folglich als Spule betrachtet eine geringere Induktivität aufweisen. Dadurch können sich die Wirbelströme schneller aufbauen, die Bandbreite des Sensors erhöht sich. Im Gegensatz zum ACC 74 wird wieder ein Blechpaket als Kernmaterial für die 12 Aufnehmerkreise verwendet, da Tests ergaben, dass die Verwendung eines Kunststoffkerns hier keine nennenswerte zusätzliche Erhöhung der Bandbreite bewirkt, jedoch der Übertragungsfaktor massiv reduziert würde.



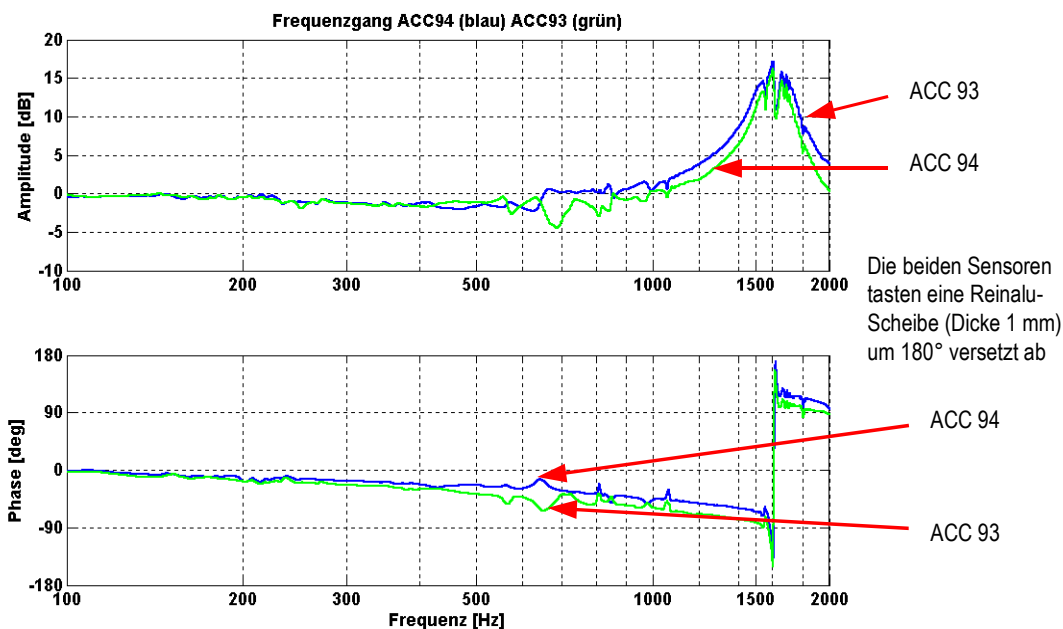
**Bild 11:** Aufbau des Drehbeschleunigungssensors ACC 75

Im Vergleich zum ACC 70 offeriert der ACC 75 eine mehr als doppelt so hohe Bandbreite ( $> 1,5$  kHz) bei nahezu gleichem Übertragungsfaktor. Wie beim ACC 74 ist die Reduktion des Übertragungsfaktors über der Drehzahl minimal.

Als Nachteil des ACC 75 ist lediglich der etwas höhere Fertigungsaufwand aufgrund der größeren Magnet- und Spulenzahl zu nennen.

### 6.3 Linearbeschleunigungssensor ACC 94

Beim ACC 94 ist in ähnlicher Weise wie beim ACC 74 der Aufnehmerkern eisenlos gestaltet. Auch hier ergibt sich eine gegenüber dem ACC 93 höhere Bandbreite, aber ein ca. 6-fach niedrigerer Übertragungsfaktor. **Bild 12** zeigt das Ergebnis einer Frequenzgangmessung, wobei als Eingangsgröße neben den beiden Beschleunigungssignalen zur Frequenzgangberechnung der Sollstrom des Motors herangezogen wurde. Zu beachten ist, dass im Bereich der Torsionsresonanzfrequenz des Gebildes Motor-Welle-Sensorscheibe bei ca. 1600 Hz aufgrund der massiven Resonanzüberhöhung eine Übersteuerung der Sensor-Verstärker auftrat, weshalb in diesem Bereich keine sinnvollen Werte resultieren.

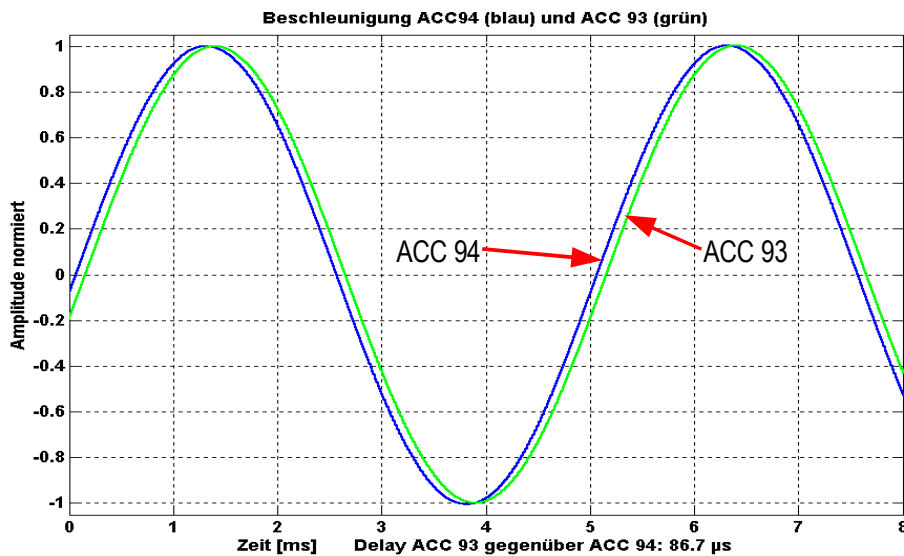


**Bild 12:** Frequenzgänge der Ferraris-Sensoren ACC 93 und ACC 94 im Vergleich

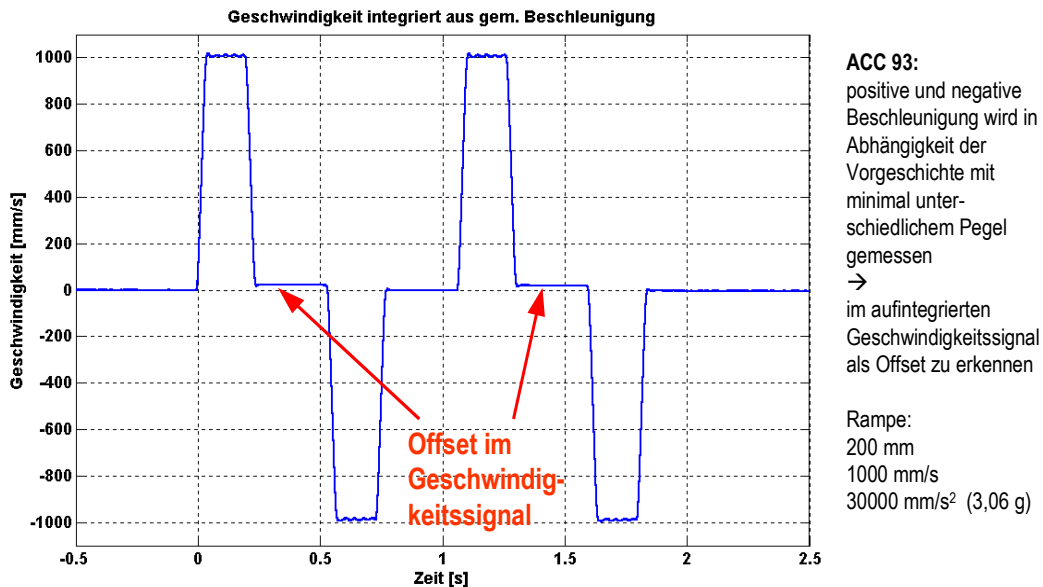
Eine vergleichende Darstellung der beiden, auf die gleiche Amplitude normierten Beschleunigungssignale bei sinusförmiger Erregung (200 Hz) des Scheibenläufer-Gleichstrommotors nach **Bild 8**, offenbart ebenso die deutlich höhere Bandbreite des ACC 94 (siehe **Bild 13**).

Einen weiteren Nachteil des im Aufnehmerkreis eisenbehafteten ACC 93, der sich erst bei genauester Untersuchung offenbart, kennt der ACC 94 nicht: Aus **Bild 14** geht hervor, dass der ACC 93 eine Art Hystereseeffekt aufweist, der in der durch Integration der

Beschleunigung gewonnenen Geschwindigkeit sichtbar wird: In Abhängigkeit der „Vorgeschichte“ wird die positive bzw. negative Beschleunigung mit leicht unterschiedlichen Pegeln gemessen, was mit der Ummagnetisierungskennlinie der Aufnehmerkerne zu tun hat.



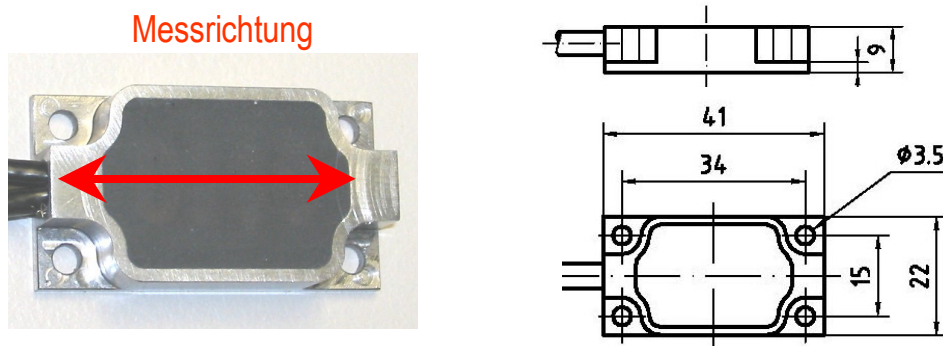
**Bild 13:** Bewertung der Bandbreite des ACC 94 im Vergleich zum ACC 93 durch sinusförmige Testbeschleunigung



**Bild 14:** „Hystereseeffekt“ beim ACC 93, sichtbar gemacht durch Betrachtung der aus der Beschleunigung integrierten Geschwindigkeit. Beim ACC 94 ist dieser Effekt nicht vorhanden!

#### 6.4 Einseitig abtastender Ferraris-Sensor ACC 22

Die neueste Entwicklung ist der in **Bild 15** dargestellte ACC 22, der das Wirbelstromblech, bzw. die Wirbelstromscheibe oder einfach einen beliebig geformten Wirbelstromkörper einseitig abtastet, wodurch ein sehr kleiner Anbauraum erzielbar ist. Der ACC 22 verfügt über eine sehr hohe Bandbreite (bis 5 kHz), sein Übertragungsfaktor ist jedoch noch etwas geringer als beim ACC 94. Zudem ist zu berücksichtigen, dass Abstandsvariationen zwischen Sensorkopf und Wirbelstrommaterial den Übertragungsfaktor beeinflussen.



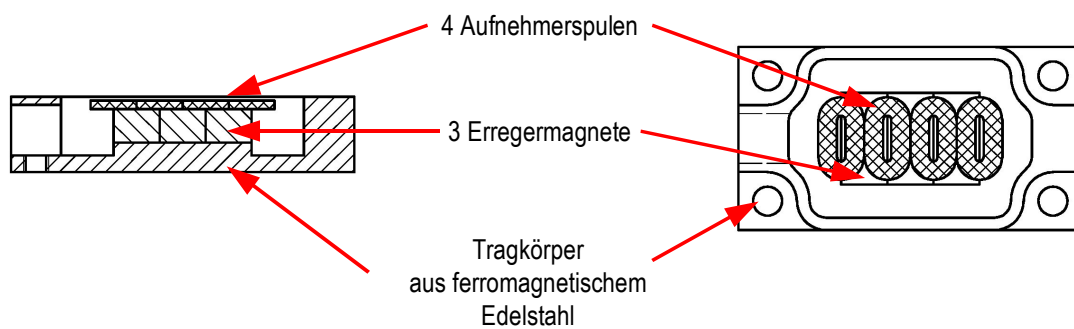
**Bild 15:** Einseitig abtastender Ferraris-Sensor ACC 22

Beim Aufbau des ACC 22 wurden gänzlich neue Wege beschritten. In der zum Patent angemeldeten Anordnung nach **Bild 16** sind unmittelbar nebeneinander angeordnete kernlose Miniaturspulen, die aus Backlackdraht hergestellt werden, direkt über den Erregermagneten aufgebracht. Die Anordnung besitzt neben (und wegen) der Kompaktheit noch weitere Vorteile:

- Durch den kompakten Aufbau ergeben sich Wirbelstrombahnen, die nur eine geringe Fläche umschließen → kleine Induktivität → hohe Bandbreite.
- Die Erregermagnetfelder dringen nur begrenzt tief in das Wirbelstrommaterial ein → auch bei „dicken“ Wirbelstromkörpern ist eine hohe Bandbreite möglich. Aus dem gleichen Grund ist die Erwärmung auch bei hohen Verfahrensgeschwindigkeiten gering.



- Die unmittelbar über den Magneten befindlichen Aufnehmerspulen werden optimal von den Magnetfeldern der Wirbelströme durchsetzt.
- Bei Bedarf können weitere Magnet- / Spulen-Anordnungen angehängt werden; dadurch erhöht sich der Übertragungsfaktor, die hohe Bandbreite bleibt bestehen.
- Durch Erweiterung der Magnet- / Spulen-Anordnungen quer zur Messrichtung kann leicht ein 2D-Sensor aufgebaut werden, der sich beispielsweise zur Relativbeschleunigungsmessung an Dreh-Schub-Modulen, wie sie im Werkzeugmaschinenbau oder bei Spezialanwendungen Verwendung finden, eignet.



**Bild 16:** Prinzipieller Aufbau des einseitig abtastenden Ferraris-Sensors ACC 22

## 7 Anwendungen des Ferraris-Sensors

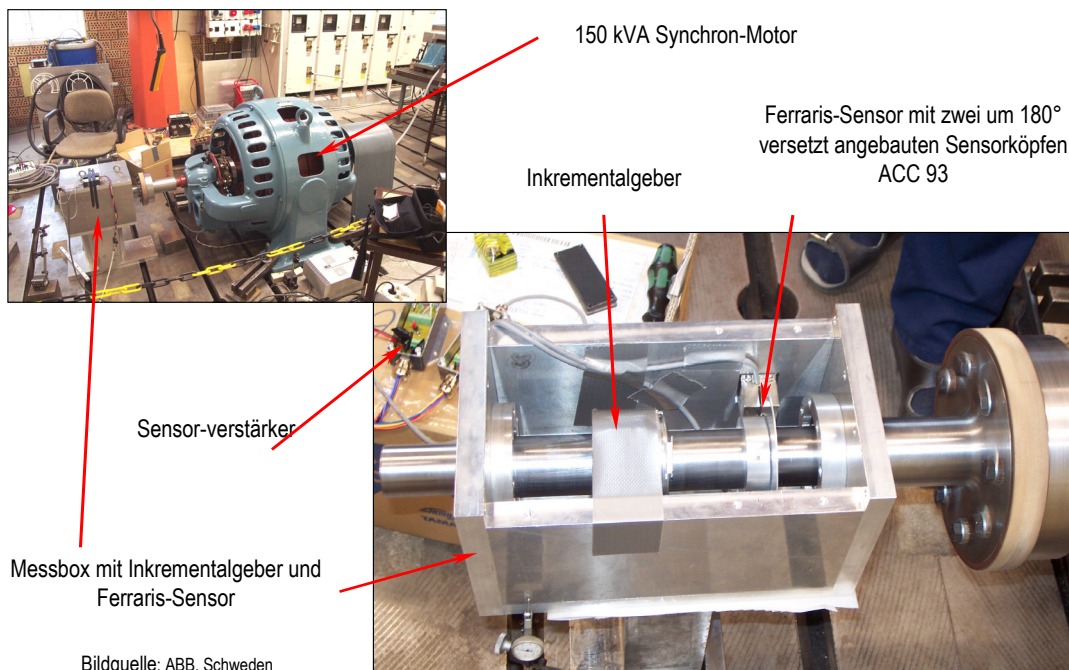
### Systemanalyse Prozessüberwachung

- Prüfstände
- Frequenzgangmessung, Schwingungsanalyse
- Gleichlauftest
- Überwachung von Motoren, Lagern usw.
- Kraft- / Momenten- und Reibungs-Rekonstruktion

### Einbindung in die Regelung

- Verbesserte Zustandsgrößenerfassung
- Beschleunigungsrückführung (aktive Dämpfung)
- Beschleunigungsregelung
- Zustandsregelung

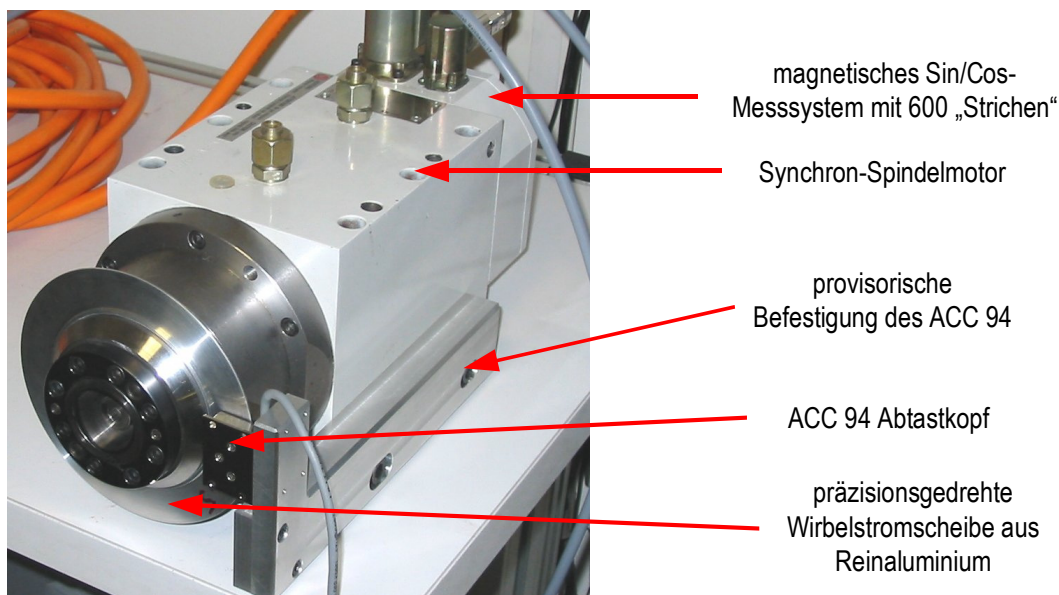
Grundsätzlich können die Einsatzmöglichkeiten des Ferraris-Sensors in die beiden obenstehenden Bereiche untergliedert werden. Vor allem bei der Systemanalyse und an Prüfständen aller Art konnte sich der Ferraris-Sensor bereits einen festen Platz erobern. Häufig sind hier Montage- aber auch Kostengründe Ursache dafür, dass man den Ferraris-Sensor den bestehenden Lösungen, insbesondere zur Drehbeschleunigungsmessung, vorzieht.



**Bild 17:** Analyse des Hochlaufverhaltens eines Synchronmotors

In **Bild 17** werden zwei Ferraris-Sensoren des Typs ACC 93 zur Analyse des Hochlaufverhaltens einer fremderregten Synchronmaschine eingesetzt. Die Verwendung von zwei Sensorköpfen erlaubt eine gute Kompensation der nie ideal runden bzw. rund laufenden Wirbelstromscheibe. Aufgrund des großen Wellendurchmessers kam bei dieser Applikation die Verwendung eines Ferraris-Sensors der Baureihe ACC 7X nicht in Frage.

Sehr hohe Ansprüche an die Güte der Wirbelstromscheibe werden bei schnell laufenden Antrieben gestellt. Die in **Bild 18** dargestellte Werkzeugmaschinen spindle arbeitet mit Drehzahlen bis 6000 UPM. Im ersten Schritt soll hier das Gleichlaufverhalten zunächst im kritischen unteren Drehzahlbereich mit dem Ferraris-Sensor analysiert und später durch Einbindung in die Regelung verbessert werden. Der zur Winkellageerfassung eingesetzte, robuste magnetische Sin/Cos-Geber hat mit 600 Signalperioden je Umdrehung eine vergleichsweise schlechte Auflösung, weswegen bei niedrigen Drehzahlen oder beim Positionieren die durch Quantisierungsfehler auftretende Unruhe die Regelgüte reduziert.



**Bild 18:** Werkzeugmaschinen spindle mit provisorisch angebautem ACC 94 und Präzisionswirbelstromscheibe aus Reinaluminium

**Bild 19** zeigt 6 in einem Montagering angebrachte Sensorköpfe ACC 22, die einen Titankolben eines hochdynamischen hydraulischen Antriebs abtasten. Bekanntlich lässt die Beschleunigungsrückführung bei geregelten hydraulischen Achsen eine deutliche Performance-Steigerung zu. Gegenüber den bisher, an dieser Sonderanwendung eingesetzten piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern, weist dieser sehr spezielle Ferraris-Sensor ein um den Faktor 4 geringeres Rauschen auf, was sich positiv auf die Regelgüte auswirkt.

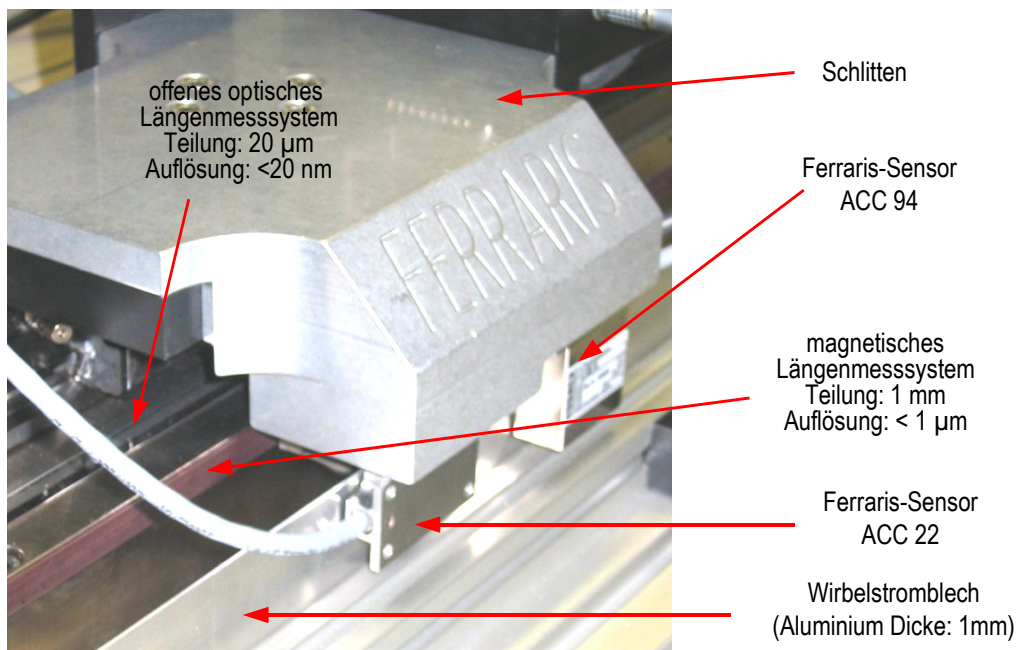


Montagering bestückt mit 6 Sensorköpfen ACC 22 zur Messung der Beschleunigung eines hochdynamischen Hydraulikzylinders aus Titan

**Bild 19:** Sonderausführung zur Messung der Relativbeschleunigung eines Titankolbens (Hexapod-Prüfstand)

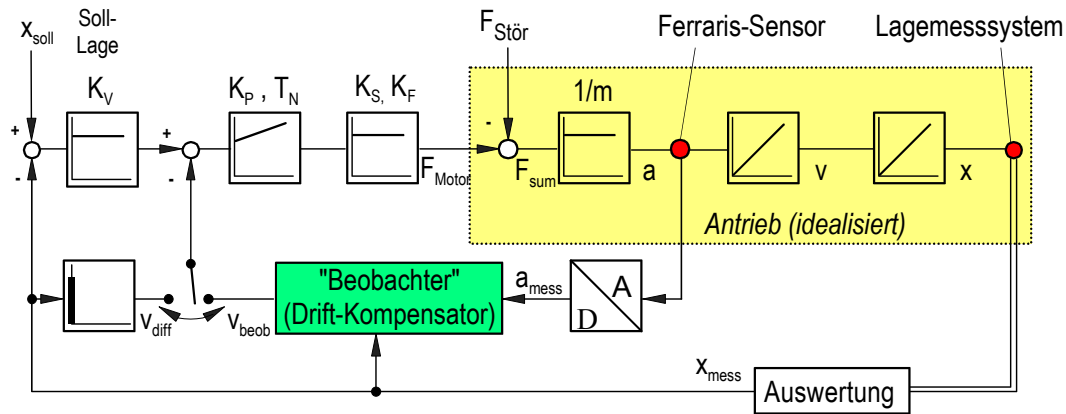
Bei der Einbindung in die Regelung soll hier nur auf die Möglichkeit der verbesserten Zustandsgrößenerfassung eingegangen werden. Die Beschleunigungsrückführung wird in einem späteren Aufsatz ausführlich beschrieben (siehe auch /9/).

Zur Lagemessung des bereits in **Bild 7** gezeigten hochdynamischen Linear-Direktantriebs kommen gleichzeitig ein optisches offenes Messsystem mit 20 µm Teilungsperiode sowie ein robustes magnetisches System mit einem Polabstand von 1 mm zum Einsatz (**Bild 20**). Nach 1024-facher Interpolation steht die Lage mit einer Auflösung von ca. 20 nm bzw. ca. 1 µm zur Verfügung. Eine noch höhere Auflösung wäre zwar leicht möglich, ist aber nur bedingt sinnvoll, da dann nur die Fehler der jeweiligen Positionsmessgeräte höher aufgelöst werden.

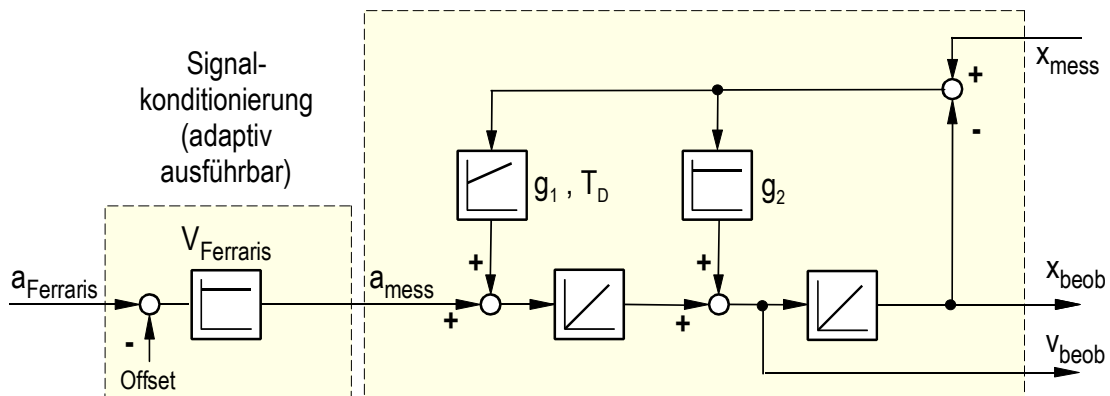


**Bild 20:** Lineardirektantrieb mit magnetischen und optischen Längenmesssystemen und Ferraris-Sensoren ACC 94 und ACC 22

Zur Messung der Beschleunigung  $a_{\text{mess}}$  wird der ACC 94 bzw. der einseitig abtastende ACC 22 verwendet. Beide sind am Schlitten befestigt und tasten berührungslos ein 1 mm dickes, mit dem Maschinenbett verbundenes Aluminiumblech ab. Zur Regelung wird die in **Bild 21** gezeigte Regelstruktur eingesetzt, die sich vom klassischen Kaskadenregler lediglich dadurch unterscheidet, dass für die rückgeführte Geschwindigkeit zwischen dem aus der Lage differenzierten Signal  $v_{\text{beob}}$  und dem Signal  $v_{\text{diff}}$  ausgewählt werden kann. Das durch eine Beobachterstruktur /4/ bestimmte Signal  $v_{\text{beob}}$  entspricht dabei im Wesentlichen der zeitdiskret integrierten Beschleunigung. Der Beobachter verhindert ein niederfrequentes Wegdriften, das zwangsläufig dadurch entsteht, dass nach Verstärkung und Digitalisierung die Beschleunigung nie vollkommen offsetfrei verfügbar ist. Dazu wird ein niederfrequenter Abgleich mit der zwar quantisierten und fehlerbehafteten, aber driftfreien Lage  $x_{\text{mess}}$  des Positionsmesssystems durchgeführt und eine offsetfreie Beschleunigung berechnet. Die hohe Auflösung und die Dynamik der Geschwindigkeit  $v_{\text{beob}}$  wird jedoch ausschließlich durch die vom Ferraris-Sensor gemessene Beschleunigung  $a_{\text{mess}}$  sichergestellt.



**Bild 21:** Reglerstruktur mit Geschwindigkeitsermittlung durch Differenzierung der Lage (herkömmlich) bzw. durch Integration der Beschleunigung, die mit einem Ferraris-Sensor gemessen wird

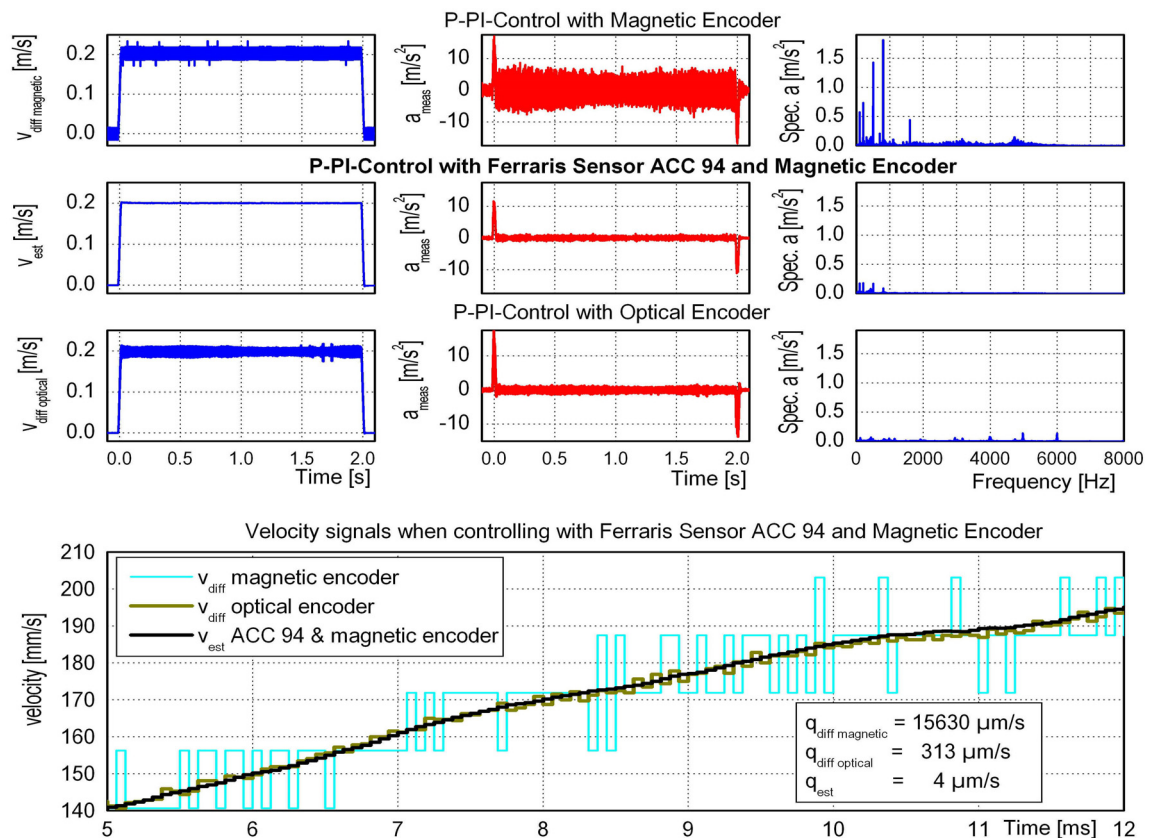


**Bild 22:** Verbesserter „Driftkompensator“, ausgeführt als vollständiger Beobachter mit adaptiver Ermittlung von Offset und Verstärkung des Ferraris-Sensors

Der Beobachter kann auch zur Bestimmung einer gering quantisierten Lage bei zusätzlicher Reduktion eventuell verbleibender Fehler in der Geschwindigkeit  $v_{beob}$  (beispielsweise durch nicht korrekt eingestellten Verstärkungsfaktor des Ferraris-Sensors) erweitert werden. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn aufgrund der Verwendung eines Lagemesssystems mit sehr geringer Auflösung die Lagequantisierung auch im Lageregelkreis zu Problemen führt. Da durch den Ferraris-Sensor üblicherweise die gleiche Bewegung wie mit dem Lagemesssystem detektiert wird, sind die Parameter in den gezeigten Beobachterstrukturen stets von den Streckenparametern (Lastmasse, Reibung, Zeitkonstanten) unabhängig. Außerdem ist zu beachten, dass die Parameter entgegen der üblichen Beobachterausslegung stets sehr niedrig gewählt werden können, da bei

annähernd guter Bestimmung des Verstärkungsfaktors und des Offsets des Ferraris-Signals praktisch keine Korrektur erforderlich ist. Mittels adaptiver Strukturen /7/ können der Verstärkungsfaktor und der Offset des Ferraris-Sensors auch selbstständig ermittelt bzw. korrigiert werden, da durch das Vorhandensein des Lagemesssystems stets eine redundante Bewegungsinformation zur Verfügung steht, die den Abgleich dieser Parameter automatisch ermöglicht (**Bild 22**).

Die Verbesserung der Regelgüte durch den Einsatz des Ferraris-Sensors wird aus den in **Bild 23** dargestellten Messungen deutlich. Die Anregung von Strukturschwingungen ist deutlich niedriger, der Gleichlauf mindestens ebenso gut wie bei Regelung des Antriebs mit dem hochauflösenden optischen Messsystem. Zirpgeräusche, verursacht durch Fehler im Geschwindigkeitssignal, treten nicht mehr auf.

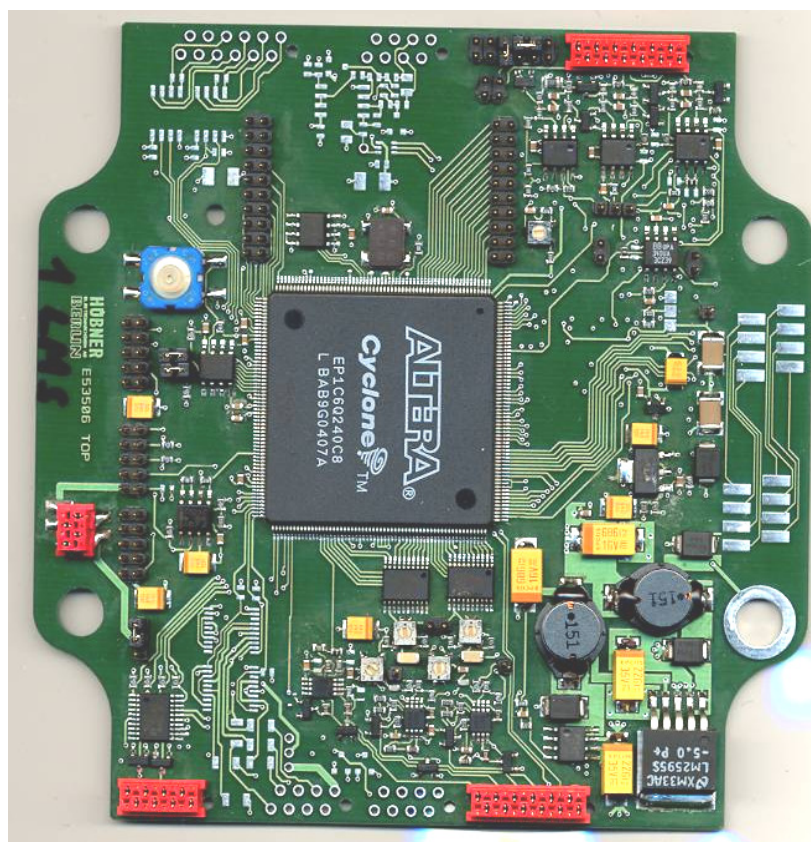


**Bild 23:** Vergleich der Geschwindigkeits- und Beschleunigungssignale eines hochdynamischen Linear-Direktantriebs bei Verwendung unterschiedlich gewonnener Geschwindigkeitssignale bei hohen Reglerparametern

## 8 Zukünftige Entwicklungen

Während die Einbindung eines Beschleunigungssignals in die Regelung derzeit noch über einen einfachen AD-Eingang an der Regelbaugruppe realisiert wird, sind für zukünftige Entwicklungen digitale Schnittstellen vorgesehen. Beispielsweise bieten sich die digitalen Echtzeit-Sensorschnittstellen BISS, EnDat 2.2 oder DriveCliqu an, mit denen voll-digital Positions- und Beschleunigungswerte (z.B. aus einem kombinierten Positions-Beschleunigungs-Messsystem) zur Regelbaugruppe übertragen werden können.

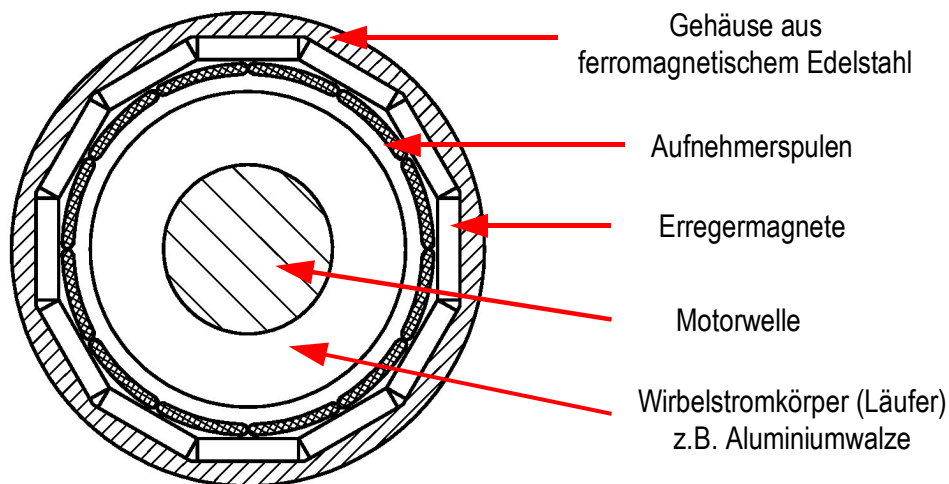
Für Systeme, an die sich nicht ohne weiteres ein Ferraris-Sensor anschließen lässt, sind Signalverarbeitungsbaugruppen in Entwicklung, die durch Verrechnung der Signale eines Ferraris-Sensors und eines beliebigen Lagemesssystems beispielsweise Sin/Cos-Signale synthetisieren, die durch die dann höhere „Strichzahl“ in der Regelung Verbesserungen ermöglichen. Der Prototyp dieses „Universalinterpolators“ ist in Bild 24 gezeigt.



**Bild 24:** „Universalinterpolator“ mit integriertem adaptiven Beobachter



Auf Basis des einseitig abtastenden Ferraris-Sensors ACC 22 existieren bereits Labor-muster, die ähnlich einem Resolver direkt an bzw. in einen Antrieb integriert werden können. Die Gestaltung des Wirbelstromkörpers ist dabei besonders einfach. **Bild 25** zeigt eine mögliche Ausführungsform.



**Bild 25:** Prinzipieller Aufbau des in Entwicklung befindlichen Ferraris-Sensors ACC 50, der auf dem Prinzip des ACC 22 basiert

## 9 Zusammenfassung

Der Ferraris-Sensor bietet durch die Möglichkeit der berührungslosen, rauscharmen und dynamischen Messung der Relativbeschleunigung zweier Körper vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der Systemanalyse und Verbesserung der Regelung von Servoantrieben. Die neuentwickelten Ferraris-Sensoren sind auf die Belange des Anwenders abgestimmt und gestatten an rotatorischen oder linearen Achsen die Beschleunigungsmessung mit bisher unerreicht hohen Auflösungen und Bandbreiten bei gleichzeitig kompakter Baugröße und einfacher Montage.

## 10 Literaturverzeichnis

- /1/ v. Basel, C.: Elektrische Drehbeschleunigungsmesser. Archiv für Technisches Messen ATM 340, August 1964.
- /2/ Sobota, J.: Drehbeschleunigungsmessung an Antrieben. Dissertation TH Aachen, 1985.
- /3/ Hiller, B.: Ferraris-Sensor - Was steckt dahinter? Im Seminar: Fortschritte in der Regelungs- und Antriebstechnik. Stuttgart: FISW GmbH, 2001.
- /4/ Jirowskaja, E.: Entwicklung und Aufbau eines Relativbeschleunigungssensors für Direktantriebe, ISW, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 1996
- /5/ Pritschow, G.; Hiller, B.: Verfahren zur hochgenauen Messung von Zustandsgrößen an Maschinenachsen. In: Spur, G., Weck, M., Pritschow, G., Technologien für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, Fortschritt-Berichte, VDI Reihe 2 Nr. 493. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998, S. 48 – 59.
- /6/ Hiller, B. Pritschow, G.: Relativbeschleunigungssensor zur verbesserten Regelung von elektromechanischen Antriebssystemen. In: Tagungsband zur 9. Int. Fachmesse und Kongress für Speicherprogrammierbare Steuerungen, Industrie-PC's und elektrische Antriebstechnik, Nürnberg, 24–26.11.1998, S. 644 – 653.
- /7/ Kramer, C., Willuweit, G.: Adaptive Beobachterstruktur für Ferraris-Sensoren, Antriebstechnik 41; Nr. 9, 2002

- /8/ Kirchberger, R.;  
Hiller, B.:  
Oversamplingverfahren zur Verbesserung der Erfassung von Lage und Drehzahl an elektrischen Antrieben mit inkrementellen Gebersystemen.  
In: Tagungsband zur 10. Int. Fachmesse und Kongress für Speicherprogrammierbare Steuerungen, Industrie-PC's und elektrische Antriebstechnik, Nürnberg, 23–25.11.1999, S. 598 – 606.
- /9/ Lehner, W-D.:  
Verbesserung des Führungs- und Störverhaltens von Servoantrieben durch den Ferraris-Sensor bei der Fräsbearbeitung, Im Seminar: Fortschritte in der Regelungs- und Antriebstechnik. Stuttgart: FISW GmbH 2001.