



Optimierte Antriebe durch Einsatz von Ferraris-Sensoren

Ralf Schenk, Bernhard Hiller

Geregelte Antriebe sind immer größeren Forderungen hinsichtlich Dynamik, Gleichlauf und Störsteifigkeit ausgesetzt. Dazu müssen Schwingungen möglichst reduziert werden, auch um Verschleiß vorzubeugen oder unerwünschte Effekte wie Wärme- und Geräuschentwicklung zu unterbinden. Relativbeschleunigungssensoren nach dem Ferraris-Prinzip leisten wertvolle Dienste, wenn es darum geht, Antriebssysteme zu analysieren, um die Qualität der Gesamtanlage zu verbessern. Integriert man die Sensoren in den Regelkreis, lässt sich darüber hinaus die Regelgüte deutlich erhöhen.

Für eine genaue Analyse des dynamischen Verhaltens eines Antriebssystems ist die Beschleunigung als Zustandsgröße unerlässlich. Denn mit ihr steht jene Größe zur Verfügung, die die unmittelbare und unverzögerte Reaktion einer zu bewegendem Masse auf alle einwirkenden Kräfte repräsentiert. Geht man davon aus, dass beim typischen Antriebsregelkreis üblicherweise ein Lagesensor zur Istwert-Erfassung eingesetzt wird, könnte man die Beschleunigung - theoretisch - durch zweifache Differentiation aus dem Lage-signal gewinnen. Praktisch wäre ein so generiertes Signal unbrauchbar, da jede Differentiation vorhandene Fehler noch verstärkt, eine zweifache Differentiation gar zwangsläufig zu einem stark verrauschten Signal führen würde. Noch kritischer wird die Situation bei hochdynamischen Systemen. Hier wäre selbst ein direkt zur Verfügung stehendes *Geschwindigkeitssignal*, beispielsweise das Ausgangssignal eines Tachogenerators, nicht geeignet, ein gutes

Beschleunigungssignal zu generieren. Denn allein die für Regelung hier erforderliche *kurze* Abtastzeit führt schon bei einfacher Differentiation zu großen Quantisierungsfehlern - von der Verstärkung sonstiger Fehler ganz zu schweigen. Zur Analyse hochdynamischer Systeme muss die Beschleunigung also *direkt* gemessen werden.

Klassische Beschleunigungssensoren nach dem Feder-Masse-Prinzip bergen potentielle Nachteile: Sie messen die *absolute*, nicht die unter Umständen interessierende *relative* Beschleunigung. Man denke hier beispielsweise an die Handachse eines Roboters, die ihrerseits auf einer Rundachse montiert ist und bei der man die Dynamik der Handbewegung *relativ* zu Bewegung

Die Autoren:

Ralf Schenk ist Leiter Marketing,
Bernhard Hiller Entwicklungsleiter bei der
Baumer Hübner GmbH, Berlin

der übergeordneten Rundachse erfassen möchte. Weiterhin hat ein Feder-Masse-System häufig eine Empfindlichkeit quer zur eigentlichen Messrichtung, die den interessierenden Messwert gegebenenfalls verfälscht. Ein solcher Effekt kann zum Beispiel auftreten beim Schlitten einer Werkzeugmaschine, der sich in x-Richtung bewegt und montiert ist auf einem unterlagerten Schlitten, der gleichzeitig in y-Richtung verfährt. Darüber hinaus ist der Einsatz von absoluten Beschleunigungssensoren gerade bei Drehbewegungen sehr aufwendig: zur Energieversorgung und Signalübertragung müssen dann Schleifringe oder berührungslose Übertragungsformen wie Drehtransformatoren oder Telemetrie-Übertragungssysteme eingesetzt werden.

Funktionsprinzip des Ferraris-Sensors

Deutliche Verbesserungen bei der Analyse von Antriebssystemen ermöglicht der Einsatz von Relativbeschleunigungssensoren nach dem Ferraris-Prinzip, das auf den Italiener Galileo Ferraris zurückgeht [1]. Hier induzieren in einer feststehenden Aufnehmereinheit montierte Permanentmagnete Wirbelströme in einem sich bewegenden, elektrisch leitenden und nichtmagnetischen Material. Bei letzterem kann es sich im Falle der Drehbeschleunigungsmessung um eine Scheibe, im Falle einer Linearbeschleunigungsmessung um einen Blechstreifen handeln (Titelbild). Die Wirbelströme und die durch sie hervorgerufenen Magnetfelder sind proportional zur Winkelgeschwindigkeit der Scheibe beziehungsweise zur Lineargeschwindigkeit des Blechstreifens. Änderungen der Wirbelströme induzieren eine Spannung in ebenfalls in der Aufnehmereinheit montierten Spulen, die proportional ist zur Änderung der Geschwindigkeit und damit proportional zur Beschleunigung. - Das Umkehrprinzip des hier beschriebenen Verfahrens wird übrigens seit langem in Stromzählern verwendet.

Entscheidend: Die Differentiation basiert nicht auf zeitdiskreter Abtastung, sondern ist physikalisches Prinzip, so dass der Anwender ein dynamisches und rauscharmes Beschleunigungssignal erhält.

Patentierete Anordnung von Permanentmagneten und Aufnehmerspulen

Auch wenn das Verfahren zunächst recht schlicht erscheinen mag, war für die Optimierung des Sensors in Richtung eines praxistauglichen Einsatzes nicht unerhebliche Entwicklungsarbeit erforderlich. Beispielsweise wird erst durch eine spezielle, patentierte Anordnung *mehrerer* Permanentmagnete und Aufnehmerspulen sichergestellt, dass elektromagnetische Fremdfelder, wie sie insbesondere bei elektrischen Antrieben auftreten können, das Messsignal nicht beeinflussen. Letztlich geht es - in den oft kundenspezifisch erarbeitenden Anpassungen - immer darum, die Vorzüge des Ferraris-Sensors für den konkreten Einsatzfall optimal zum Tragen zu bringen und gleichzeitig den Einfluss begrenzender Effekte, zum Beispiel die Wirkung des Sensors als „Wirbelstrombremse“, so weit möglich zu reduzieren.

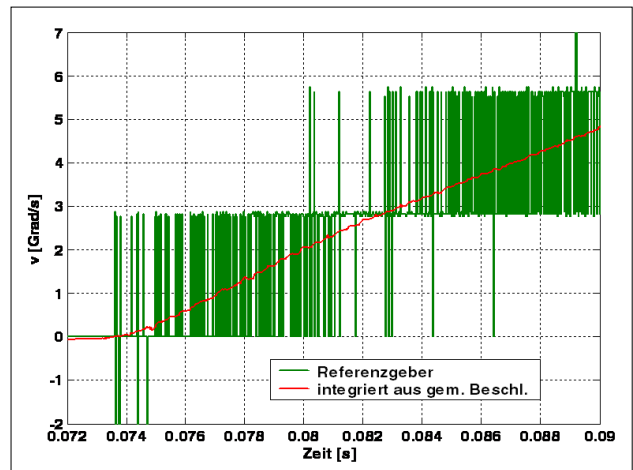
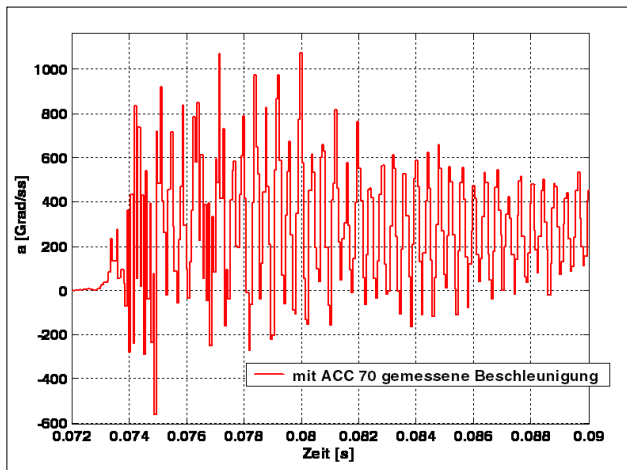
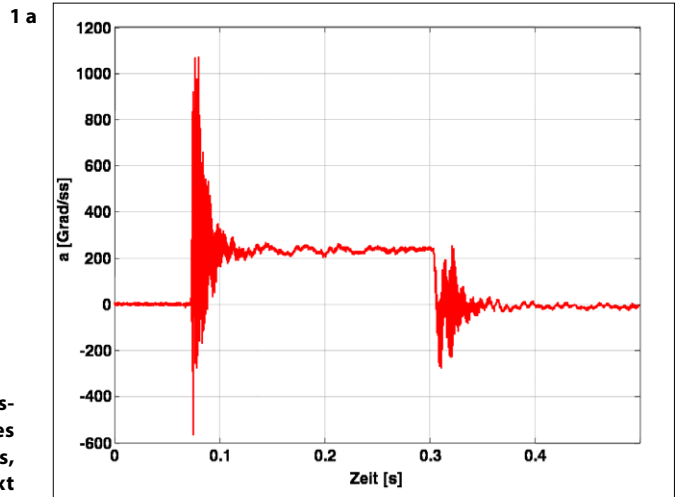
Ferraris-Sensor zur Systemanalyse

Insbesondere bei Prüfständen aller Art hat sich der Ferraris-Sensor bereits einen festen Platz erobert. Hier wird er für folgende Aufgaben eingesetzt:

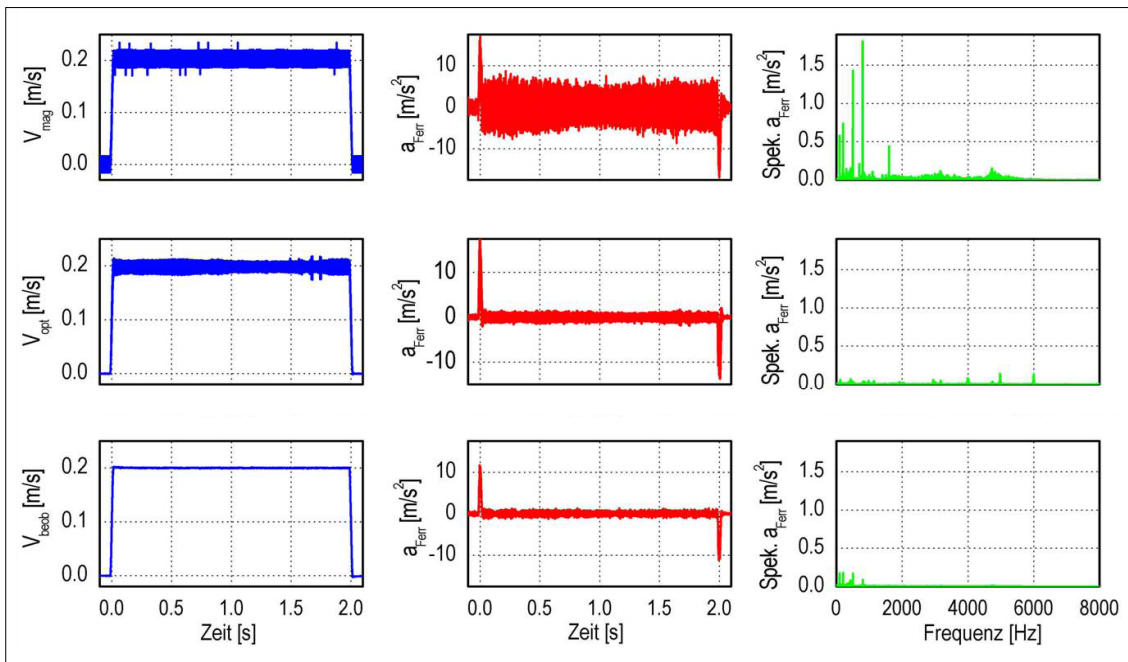
- Schwingungsanalyse,
- Gleichlauftest,
- Identifikation mechanischer Parameter (Masse, Trägheitsmoment, Dämpfung),
- Kraft-, Momenten- und Reibungsrekonstruktion,
- Detektion der Ursachen von unerwünschten Geräuschen,
- Motor- und Lagerüberwachung,
- Frequenzgangmessung.

Bild 1 a zeigt exemplarisch die mit einem Ferraris-Sensor nachgewiesene Torsionsschwingung eines Triebstrangs, wie sie durch den Drehmomentaufbau angeregt wird, **Bild 1 b** gibt davon den ersten Einschwingvorgang ausschnittsweise in höherer Auflösung wieder. **Bild 1 c** zeigt - im selben Ausschnitt - zum Vergleich, wie begrenzt die Analysemöglichkeiten sind, selbst wenn als Sensor ein

Messung der Torsionsschwingung eines Triebstrangs, Erläuterungen im Text



1 b 1 c



2: Regelkreisdynamik bei Verwendung verschiedener Sensoren, Erläuterungen im Text

hoch auflösender Sinus-Inkrementalgeber („Referenzgeber“) zur Verfügung steht, der „lediglich“ die Position - immerhin mit einer Auflösung von 70 Mikrograd - erfasst. Bereits das durch Differentiation gewonnene *Geschwindigkeitssignal* (grüne Linie) ist aufgrund der erforderlichen kurzen Abtastzeit (25 μ s) so stark quantisiert, dass es nicht mehr ausgewertet werden kann. Eine Messung der Torsionsschwingung (ca. 2500 Hz) ist hier also nur mittels des Ferraris-Sensors möglich. Geht man den umgekehrten Weg, das heißt, integriert man das Beschleunigungssignal aus Bild 1 b, so erhält man ein hervorragendes, gering quantisiertes Geschwindigkeitssignal (rote Linie in Bild 1 c). Dies ist dann von Bedeutung, wenn man - wie später noch näher erläutert - den Ferraris-Sensor

nicht nur zu Analysezwecken einsetzen, sondern zur Verbesserung der Regelgüte in den Regelkreis integrieren will. Bei dem hier eingesetzten Typ ACC 70 ist das Wirbelstrommaterial übrigens nicht als Scheibe, sondern als Zylinder („Wirbelstromglocke“) ausgebildet und mit Hilfe eines Spannsatzes auf der Welle montiert.

Häufig erlaubt erst die Ferraris-Technologie weiterführende Analysen. So haben beispielsweise Untersuchungen des Geräuschverhaltens von Fahrzeuggetrieben ergeben, dass konventionelle Methoden wie Körper- und Luftschallmessung zwar nach wie vor unabdingbar für die Beurteilung der Akustik sind. *Genauere* Aussagen über die *Ursachen* von Körper- und Luftschall waren jedoch erst mittels

eines Ferraris-Sensors möglich. Bereits mit wenigen Messungen ließ sich die Entstehung von Geräuschen eingrenzen [2]. Manchmal sind auch Montage- oder schlicht Kostengründe die Ursache dafür, dass man die Ferraris-Sensorik bestehenden Lösungen vorzieht.

Höhere Regelgüte durch Kombination von Lagegeber und Ferraris-Sensor

Wie bereits angedeutet, gehen die Einsatzmöglichkeiten des Ferraris-Sensors weit über die reine Systemanalyse hinaus. Man vergegenwärtige sich, dass einem klassischen P-PI-Antriebsregler immer auch die Ist-Geschwindigkeit als Zustandsgröße zur Verfügung gestellt werden muss, unabhängig davon, ob auf Geschwindigkeit oder Lage als Sollgröße zu regeln ist. Verwendet man hier - aus bereits erläuterten Gründen - das integrierte Signal eines Ferraris-Sensors, der *zusätzlich* zum Lagegeber in den Regelkreis eingebracht wird, statt die Geschwindigkeit aus dem Lagesignal abzuleiten, so lassen sich Dynamik, Störsteifigkeit und Gleichlauf eines Antriebs deutlich verbessern. Der Ferraris-Sensor ist somit Teil des Regelkreises geworden, die resultierende höhere Systemruhe reduziert zudem den Verschleiß mechanischer Antriebskomponenten, unterbindet die Entstehung unerwünschter Geräusche und verringert die Verlustleistung im Motor.

Bild 2 zeigt exemplarisch das dynamische Verhalten eines Antriebs mit P-PI-Regelung bei Verwendung verschiedener Sensoren.

Vorteile der Ferraris-Beschleunigungssensoren auf einen Blick:

1. relatives, berührungsloses und aktives Messprinzip
2. hohe Linearität und Empfindlichkeit
3. keine untere Grenzfrequenz, hohe Bandbreite möglich
4. sehr geringes Rauschen, prinzipbedingt keine Offsetspannung
5. keine Empfindlichkeit quer zur Messrichtung
6. kompakte Abmessung
7. einfache Montage und leichte Adaption an bestehende Aufbauten
8. große Einbautoleranzen zulässig
9. steifer, mechanischer Aufbau, keine Kupplung erforderlich
10. keine beweglichen Teile im Sensorkopf
11. verschmutzungsunempfindlich
12. sehr robust und resistent gegenüber höchsten Schockbeschleunigungen

Zunächst (obere Zeile) erfolgt die Istgrößen-Erfassung über ein magnetisches, inkrementales Messsystem mit niedriger Auflösung. Im mittels des Ferraris-Sensors gemessenen Spektrum sind deutliche Schwingungsanregungen zu erkennen, ausgelöst durch Fehler im Geschwindigkeitssignal. Eine erwartungsgemäß bessere Regelgüte ergibt sich, wenn man ein höher auflösendes, optisches Messsystem verwendet (mittlere Zeile). Trotzdem sind nach wie vor Schwingungsanregungen nachzuweisen, die letztlich aus Interpolationsfehlern resultieren und sich durch störende Geräusche (hochfrequentes „Zirpen“) bemerkbar machen. Benutzt man den Ferraris-Sensor jetzt nicht nur zu reinen Messzwecken, sondern integriert ihn - kombiniert mit dem magnetischen Messsystem - in die Regelkreisstruktur, werden Schwingungsanregungen weitgehend eliminiert (untere Zeile in Bild 2).

Auch unter rauen Umgebungsbedingungen einsetzbar

Die *Kombination* aus *niedrig* auflösendem, magnetischen Messsystem und Ferraris-Sensor liefert hinsichtlich der Regelgüte sogar ein wesentlich besseres Ergebnis als der Einsatz eines *hoch* auflösenden, optischen Istwert-Aufnehmers allein. Anders formuliert: Mit der *Kombination* aus magnetischen Messsystem und Ferraris-Sensor steht dem Regler in Summe eine Istwert-Information zur Verfügung, die de facto der eines sehr hoch auflösenden optischen Systems entspricht. Dies ist insbesondere interessant für Anwendungen, bei denen der Einsatz eines optischen Gebers aus Kosten- oder Robustheitsgründen von vornherein ausscheidet. Ein weiterer Vorteil der Kombination: sie ist hinsichtlich zulässiger Drehzahl

beziehungsweise Verfahrensgeschwindigkeit weit weniger begrenzt als ein vergleichbar auflösendes *optisches* Messsystem, das, um hinsichtlich Robustheit konkurrieren zu können, mit einem gedichteten Schutzgehäuse ausgestattet werden müsste.

Wiederstein et al. [3] beschreiben die Integration eines Ferraris-Sensors in den Regelkreis eines Druckmaschinen-Direktantriebs. Ausgangsbasis waren vorausgegangene, umfangreiche Untersuchungen, bei denen sich herausgestellt hatte, dass bessere Regeleigenschaften an dem bereits zuvor sehr hochwertig ausgelegten Antrieb nicht ohne weiteres realisiert werden konnten. Mittels des Ferraris-Sensors ließ sich Regelung dann sowohl hinsichtlich Führungsverhalten als auch Störgrößenausregelung noch einmal deutlich verbessern. Es gelang eine aktive Stabilisierung der Resonanz des Antriebs, und auch nichtlineare Effekte ließen sich leichter beherrschen. Insbesondere Momentenstöße auf der Lastseite waren mittels Ferraris-Sensor besser als mit herkömmlichen Lösungen in den Griff zu bekommen. Da das Störverhalten nicht nur bei Druckmaschinen, sondern auch bei vielen anderen Anwendungen, wie beispielsweise Werkzeugmaschinen, eine wesentliche, wenn nicht entscheidende Rolle spielt, haben die Ergebnisse, so schließen die Autoren, eine allgemeine, über den konkreten Anwendungsfall weit hinausgehende Bedeutung.

Aktuelle Entwicklungen bei Baumer Hübner beschäftigen sich mit der Optimierung sowohl der konstruktiven als auch der signalelektronischen Kombination aus Ferraris-Sensor und Lagemesssystem, die es dem Anwender ermöglichen wird, die Vorzüge der Ferraris-Technik zur Verbesserung der Regelkreisgüte voll auszuschöpfen, ohne in die klassische Regelkreisstruktur eingreifen zu müssen.

Literatur

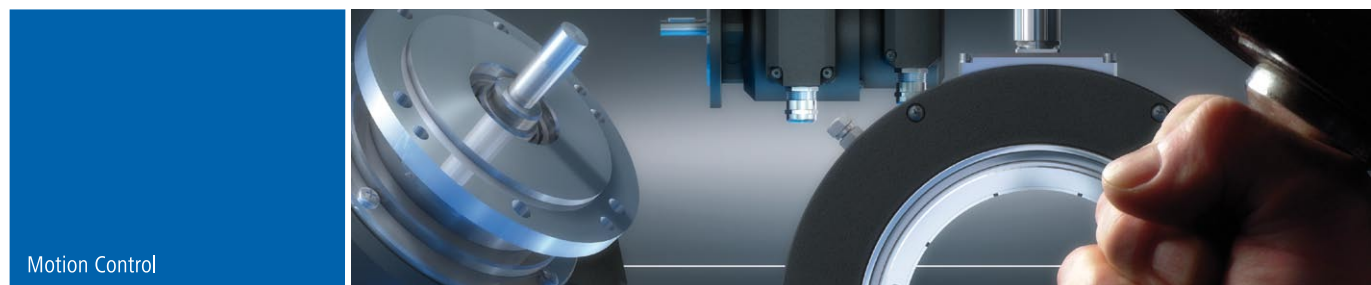
- [1] Dipl.-Ing. B. Hiller, Hübner Elektromaschinen GmbH „Neue Entwicklungen und Anwendungen des Ferraris-Sensors“ im Seminar: Fortschritte in Regelungs- und Antriebstechnik, Stuttgart, ISW, 2005
- [2] Dipl.-Ing. U. Zander, Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Hirschmann Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik Forschungskoooperation Antriebstechnik und Mechatronik „Messung von Drehschwingungen in Fahrzeuggetrieben mittels Ferraris-Sensoren“ Vortrag im Rahmen der ATZ/MTZ Akustikkonferenz 2006, Stuttgart
- [3] Gerd-Walter Wiederstein, Matthias Hüschemenger, Frithjof Zöllner „Ferraris-Sensor im Druckmaschinen-Direktantrieb“ antriebstechnik, Mai 2005

Erweiterter Sonderdruck aus antriebstechnik 1-2/2007

A4

Baumer Hübner GmbH
Postfach 61 02 71 · D-10924 Berlin
Planufer 92 b · D-10967 Berlin

Wir meinen, **Messwertaufnehmer** sollten mit Ihren Antrieben »durch dick und dünn gehen«. Genauso bauen wir sie!



BaumerHübner