

## Drehmomentmessungen an Wellensträngen mit Kreuzgelenkwellen

Ring, C.; Schäfer, G.

*Kreuz-Gelenkwellen (auch Kardan-Gelenkwellen) sind häufig verwendete Kupplungen zum Ausgleich eines axialen und winkligen Wellenversatzes. Soll das Drehmoment an einem Wellenstrang gemessen werden, in den eine Kreuzgelenkwelle integriert ist, bedarf die Vorgehensweise bei Messung in mitten der Gelenkwelle aufgrund des nichtlinearen Übertragungsverhaltens eines Kreuzgelenkes einiger Überlegung.*

*Cardan Shafts are commonly applied as couplings to adjust axial and angular offsets. Torque measurements demand in some cases more consideration because of the non-linear transmission behaviour of cardan couplings.*

### 1 Gelenkwellen

Gelenkwellen werden zur Übertragung von Drehmomenten verwendet, wenn gleichzeitig eine Winkel- und/oder Abstandsänderung zwischen der An- und Abtriebsseite gewährleistet sein muss. Gelenkwellen lassen sich nach /1/ in Kreuz-, Kugel- und Podegelenkwellen einteilen. Trotz der kinematischen Nachteile einer ungleichförmigen Übertragung des Drehmomentes bei Verwendung eines Kreuzgelenkes gegenüber der gleichförmigen Übertragung bei Kugel- oder Gleichlaufgelenkwellen, werden Kreuzgelenkwellen als höchst zuverlässige Maschinenelemente eingesetzt. Aufgrund einfacher Bauweise und somit kostengünstiger Fertigung sind sie weit verbreitet und werden bis zu höchsten Drehzahlen und Drehmomenten verwendet. Eine hohe Auswuchtgüte erlaubt dabei eine größere An-

näherung der zulässigen Drehzahl an die biegekritische Drehzahl.

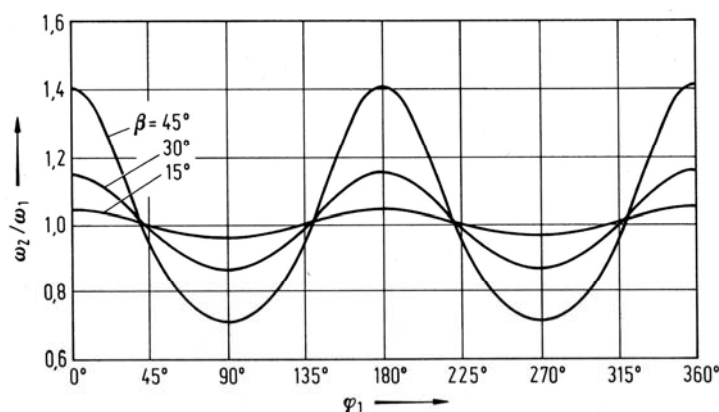
Als Besonderheit der Kreuzgelenkwelle ist die im Mittelteil überlagerte Drehschwingung aus den abgebeugten Kreuzgelenken zu nennen. Diese Drehschwingung ist exakt beschreibbar. Untersuchungen hierzu lassen sich beispielsweise in /2/ finden. Ein Maß für die eingprägten Drehschwingungen ist das Übersetzungsverhältnis der Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_1$  und  $\omega_2$  mit

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \varphi_1}$$

wobei  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit der Motorseite bzw. die Winkelgeschwindigkeit des Mittelteils,  $\varphi$  den Drehwinkel der Antriebsseite und  $\beta$  den Beugewinkel beschreibt. Grafisch ist dieser Zusammenhang in **Bild 1** dargestellt.

### 2 Auswahl des rotierenden Aufnehmers

Die Messung des Drehmoments an Wellensträngen, in die eine Kreuzgelenkwelle integriert ist geschieht meistens unter beengten Platzverhältnissen. Zu berücksichtigen ist bei der Anbringung eines zusätzlichen Bauteiles in Form eines Messaufnehmers der benötigte Bauraum sowie eine eventuelle Längenänderung bei Gelenkwellen mit Längenausgleich während des Betriebes, da die zusammen geschobene Länge nicht unterschritten und die maximal zulässige Betriebslänge nicht überschritten werden darf. Da in der Mehrzahl der Untersuchungen eine Messung an umlaufenden



**Bild 1:** Verlauf der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_2$  für Beugungswinkel  $\beta = 15^\circ, 30^\circ$  und  $45^\circ$  /1/

Maschinenteilen mit höheren Drehzahlen erfolgt, konzentriert man sich auf elektrische Messeinrichtungen für die Übertragung der Messsignale von der drehenden Welle auf einen stationären Teil. Dies sollte einerseits mit hoher Zuverlässigkeit, andererseits mit möglichst geringem Aufwand erfolgen. Bei der Auswahl geeigneter Aufnehmer sind Fragen hinsichtlich der Montage des Aufnehmers, Einsatzbedingungen, Überlastbarkeit, Messprinzip und Messgenauigkeit zu beachten. Soll das durch eine Kreuzgelenkwelle übertragene Drehmoment gemessen werden, bietet sich grundsätzlich eine einfach realisierba-

re Möglichkeit der elektrischen Sensorapplikation durch die Verwendung eines DMS-Aufnehmers mit zylindrischem Messkörper, Verdrillung der Oberfläche und Erfassung durch Dehnungsmessstreifen (DMS) an, wobei die DMS in einem Winkel von  $45^\circ$  zur Längsachse appliziert sind.

Fußausführung Wellenausführung Messflansch



**Bild 1:** Bauformen rotierender DMS-Drehmomentsensoren /4/

Die Übertragung von Brückenspannung und Ausgangssignal wird durch Schleifringe oder kontaktlose (meist induktive) Übertragung realisiert (**Bild 2**). Für die Messaufgabe im vorliegenden Fall standen mehrere Möglichkeiten der Realisierung zur Auswahl:

a) Drehmomentmessung mit Hilfe von DMS und der Verwendung einer Telemetrie

Ohne großen Eingriff in das Gesamtsystem der Gelenkwelle und der anschließenden Komponenten wäre die Applikation eines Torsions-DMS mit zwei unter  $\pm 45^\circ$  gegen die Hauptachse angeordneten Messgittern zur Bestimmung der Torsionsspannungen, kleinem Messverstärker als Blackbox, eventuell direkt kombiniert mit einer Telemetrie als kostengünstige Lösung zu nennen. Vorteilhaft ist diese Vorgehensweise, wenn ein Zwischenkuppeln eines Drehmomentenaufnehmers beispielsweise aufgrund sehr beengten Platzverhältnissen nicht möglich ist. Als Nachteil ist bei dieser Methode der notwendige Abgleich mit einem Referenzempfänger, und die auf der Oberfläche der Gelenkwelle angebrachte Elektronik (Messaufbau und Telemetrie)

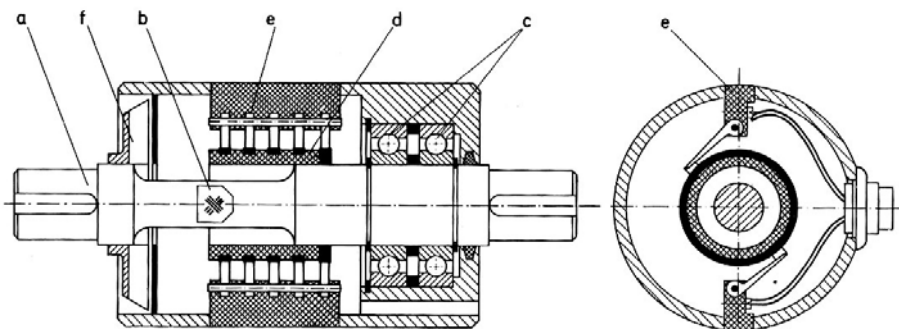
wirkenden Fliehkräfte und Stöße zu berücksichtigen. Ein solcher Aufnehmer in Eigenbauweise kann bezüglich geforderter Genauigkeiten und Unempfindlichkeiten gegen sonstige Störgrößen dem Vergleich mit industriellen Drehmomentenaufnehmern nicht immer standhalten.

b) DMS-Drehmomentaufnehmer in Flanschbauweise

Ist die Montage eines zusätzlichen Bauteiles zwischen der Gelenkwelle und dem Anschlussbauteil möglich, eignet sich ein DMS-Drehmomentaufnehmer in Flanschbauweise. Bevorzugt verwendet man hier Messwellen mit schleifringloser Übertragung, wobei die von einem stationären Generator (Stator) induzierte Wechselspannung induktiv auf den Messkörper übertragen wird. Durch die Umformung in eine Gleichspannung erfolgt die Speisung der DMS. Das Messsignal wird in eine modulierte Pulsfrequenz umgewandelt und kapazitiv auf den Stator übertragen. Vorteil dieser Vorgehensweise ist der verschleiß- und wartungsfreie Betrieb dieser Übertragungsart. Probleme können der zusätzlich benötigte Bauraum des Aufnehmers und die Anbringung des Stators bereiten. Gerade bei Getriebegehäusen mit Rundungen und Freiformflächen und unter Zeitdruck durchzuführenden Versuchen im Feld ist die sichere Befestigung des Stators nur mit großem Aufwand zu bewerkstelligen.

c) Messwelle im Mittelteil der Gelenkwelle in Fuß- oder Wellenausführung

Drehmomentaufnehmer mit Schleifringübertrager, wie er von der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH im Modell T1 angeboten wurde (**Bild 3**), sind über Passfederverbindungen für eine Integration in Wellenstränge geeignet. Die Speisespannungs- und Messsignalübertragung erfolgt mittels fünf



Prinzipbild eines Drehmomentenaufnehmers mit Schleifringen  
(Bauart Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH)

a Meßwelle

b Dehnungsmessstreifen (je 2 Stück in plus/minus  $45^\circ$ -Richtung)

c Gehäuse mit einseitiger Kugellagerung

d Schleifringsatz

e Schleifbürstensätze

f Ventilator

**Bild 3:** Drehmomentaufnehmer mit Schleifringübertragung /3/

Hartsilberschleifringen mit Silbergraphitkohlebürsten.

In einem konkreten Messeinsatz waren dem IMW Randbedingungen mit Stößen bis zu 50 g, Drehzahlen bis zu  $2000 \text{ min}^{-1}$  und zu messende Drehmomente bis zu 7000 Nm vorgegeben. Für einen

solch anspruchsvollen Feldeinsatz fiel die Wahl auf die unkonventionelle Lösung, einen solchen Aufnehmer in eine entsprechend gekürzte Gelenkwelle zu adaptieren. Da das Messsignal des Drehmomentes im Mittelteil der Gelenkwelle aufgezeichnet wird, sind in diesem Signal somit die kreuzgelenkwellentypischen asynchronen bzw. nicht homokinetischen Schwingungen enthalten. Was in der Praxis störend erscheint, bzw. mit Rechenaufwand erst wieder linearisiert werden muss, ist für grundsätzliche Untersuchungen am Maschinenelement „Kreuzgelenkwelle“ wissenschaftlich interessant. Die mit diesem Schleifringübertrager durchgeführten Messungen wurden mit einer Frequenz von 100 Hz aufgezeichnet. **Bild 4** zeigt ausschnittsweise mit dieser Methode aufgezeichnetes Signal.

Gemeinsam ist allen vorgestellten Messmethoden die Gefahr der Überlastung des Aufnehmers. Das mittlere Drehmoment, das sich aus Torsionsimpulsen zusammensetzt, ist je nach dem verwendeten Drehmomenterzeuger pulsierend, da beispielsweise oft unter Verwendung von Gelenkwellen eine Koppelung mit Verbrennungsmotoren realisiert wird. Zudem bildet die zu untersuchende Anlage ein schwingungsfähiges System, bei dem Torsionsschwingungen auftreten können. Beim Durchlaufen von Resonanzen können die auftretenden Spitzenwerte ein Mehrfaches des mittleren Momentes erreichen. Die Auslegung eines Messaufnehmers sollte daher nach den auftretenden Drehmomentspitzen erfolgen, zumal mit dem Einbau eines zu-

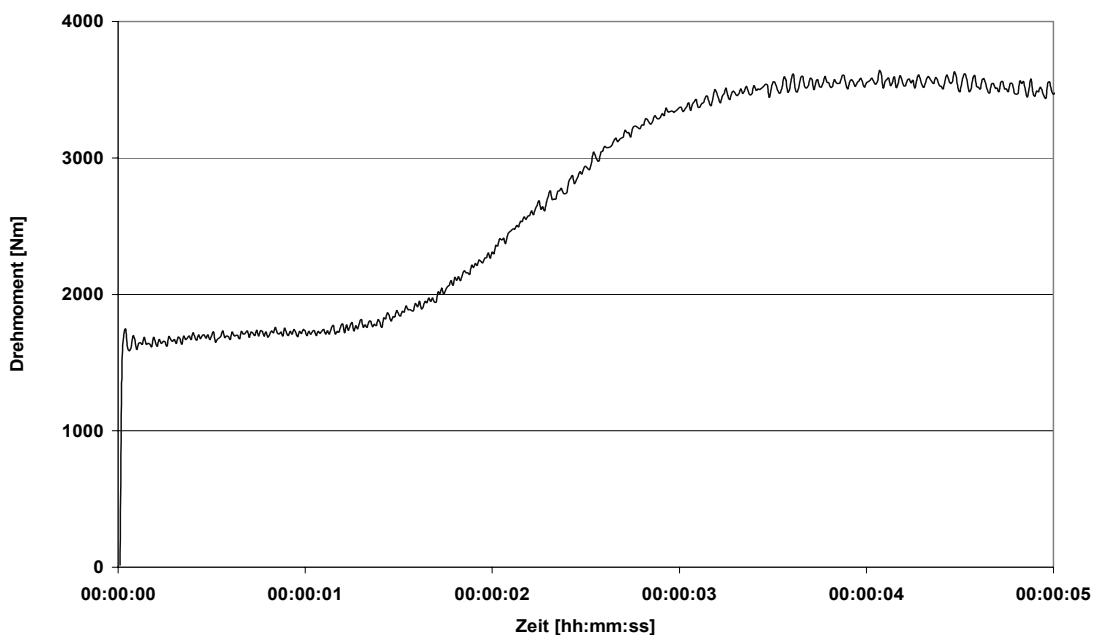
sätzlichen Bauteiles in eine Gelenkwelle eine Veränderung des Schwingungsverhaltens der Gesamtanlage einhergeht.

### 3 Messwerterfassung

Eine praktikable und zuverlässige Datenerfassung spielt gerade bei nicht wiederholbaren Messungen eine gewichtige Rolle. Die Aufzeichnung der Messwerte kann durch einen Messverstärker und dessen Bedien- und Erfassungssoftware oder durch eine separate Messwerterfassung erfolgen. Im konkreten Einsatzfall der vom IMW gebauten Messgelenkwelle kam ein Messverstärker Picas der Firma Peekel zum Einsatz, der über die Software SignalSoft bedient wurde und die gleichzeitig eine Speicherung der Messwerte sicherstellte. Für eine redundante Datenspeicherung wurde das analoge Ausgangssignal des Messverstärkers jedoch direkt an eine Messwerterfassungskarte weitergegeben, die über PCMCIA an einen Laptop angeschlossen war. Mit Hilfe von LabView von National Instruments wurden die Daten sequentiell gespeichert. Zur nachträglichen Synchronisation der aufgezeichneten Messwerte mit weiteren von diesem Messaufbau unabhängigen Messsystemen wurden weitere Signale z.B. in Form von Drehzahlsignalen an die Messwerterfassungskarte geliefert und aufgezeichnet.

### 4 Auswertung der Messergebnisse

Bei der Aufzeichnung von Messwerten mit 100 Hz über mehrere Stunden kontinuierlich hinweg, fällt ei-



**Bild 4:** Drehzahlsignal an der Zwischenwelle (Aufzeichnung mit 100 Hz)



**Bild 5:** IMC Cronos PL2 /5/

ne große Datenmenge an, die es im Anschluss an die Messungen auszuwerten gilt. Häufig eingesetzte Software zur Tabellenkalkulation, mit der scheinbar problemlos eine Auswertung beispielsweise in Form der Erstellung von Diagrammen vorgenommen werden kann, ist nicht nur fehleranfällig hinsichtlich der Genauigkeit, sondern auch aufgrund der Fülle an Daten nicht zweckmäßig einsetzbar, da je nach verwendeter Software eine Begrenzung zur Erstellung von Diagrammen auf eine maximale Anzahl von Zeilen vorliegen kann. Dies entspricht zeitlich gerade einmal der grafischen Darstellung von wenigen Minuten bei 100 Hz Aufzeichnungsfrequenz. Mit professionelleren Hilfsmitteln wie dem am IMW eingesetzten MathLab ist eine bequeme und genaue Auswertung durchführbar. Alternativ verwendbar ist ebenso moderne integrierte Software, die entweder von Messwerterfassungsspezialisten oder Messverstärkerhersteller angeboten wird. Zur Aufzeichnung von Messsignalen mit Hilfe der am IMW vorhandenen Messtechnik sowie externer Signale und deren anschließender Auswertung steht Hardware von National Instruments in Verbindung mit den Softwarepaketen LabVIEW 8 und DIAdem zur Verfügung. Diese Kombination erlaubt auch den gleichzeitigen Einsatz unterschiedlicher Messverstärkerarten und -generationen.

Die neueste Anschaffung des IMW auf dem Gebiet der integrierten Messwerterfassung bilden zwei Cronos PL2 der Firma IMC aus Berlin (**Bild 5**). Diese Universalverstärker mit je 8 Kanälen sind in der Lage DMS-Signale, Spannung, Strom und ICP-Sensoren zu erfassen. Gerade für den Einsatz der Messgelenkwelle bieten diese Verstärker die Möglichkeit alle anfallenden Signalarten wie Beschleunigungen, externe Spannungen, Temperaturen und das Drehmoment durch den Einsatz nur einer Hardware zu erfassen. Die integrierte Lösung von der Messwerterfassung bis hin zur Auswertung

stellt IMC durch die Software FAMOS 5.0 mit umfangreichen Funktionen der Signalanalyse sicher.

## 5 Zusammenfassung

Moderne Messtechnik erlaubt dem experimentell tätigen Ingenieur eine komfortable Datenerfassung und bequeme Auswertung der aufgezeichneten und oft immensen Datenmengen. Am IMW existieren verschiedene Messverstärkersysteme parallel, die beständig durch Anschaffung modernster Software und Messtechnik auf dem Laufenden gehalten werden. Dennoch wird auch auf altbewährte Technik zurückgegriffen, wie im vorliegenden Fall mit der T1 von HBM geschehen, da diese Bauteile aufgrund ihrer robusten Bauweise an Zuverlässigkeit kaum zu übertreffen sind.

„Upgrade“-Maßnahmen der vorhandenen Messgelenkwelle sind auch schon angedacht: Bei gleichzeitiger Montage eines zusätzlichen einfach zu montierenden Drehzahlfühlers erlaubt die Drehmomentmessung gleichzeitig die Bestimmung der übertragenen Leistung.

## 6 Literatur

- /1/ Graf v. Seherr-Thoss, H.-C.; Schmelz, F.; Aucktor, E.: Gelenke und Gelenkwellen. Berechnung, Gestaltung, Anwendungen. 2. Auflage. Berlin: Springer, 2002
- /2/ Reuthe, W.; Untersuchungen von Kreuzgelenken auf ihre Bewegungsverhältnisse, Belastungsgrenzen und Reibungsverluste. Diss. TH Berlin, 1944
- /3/ Profos, P.; Pfeifer, T.: Handbuch der industriellen Messtechnik. 6. Auflage. München : R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1994
- /4/ Hoffmann, J.: Handbuch der Messtechnik 2. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2004
- /5/ imc Meßsysteme GmbH, [www.imc-berlin.de](http://www.imc-berlin.de)