

Leistungsmessungen an großen Antrieben mit Verbrennungsmotor

1. Bereitstellung eines Leistungssignals

Moderne Antriebskonzepte mit großen Verbrennungsmotoren erfordern die genaue und schnelle Reaktion der Regelungssysteme (z.B. für die Kraftstoffzufuhr) des Motors, um auf plötzlich veränderte Belastungen zu reagieren. Hierbei muss sichergestellt werden, dass zu jedem Zeitpunkt ausreichende Leistung zur Verfügung steht bei gleichzeitig niedrigem Verbrauch und sicheren Betriebsparametern für den Motor. Dies erfordert die Bereitstellung eines Leistungssignals, welches bei Fahrzeugen, Kompressoren- und Pumpensystemen mit Hilfe spezieller Messeinrichtungen erzeugt werden muss. Grundsätzlich gibt es hierfür drei verschiedene Ansätze:

- Die Bereitstellung des Leistungssignals erfolgt indirekt durch Messung bestimmter Hilfsgrößen wie z.B. Durchfluss, Temperatur und Druck sowie anschließender Berechnung der Leistung. Die bei dieser Vorgehensweise entstehende Messunsicherheit des Leistungssignals ist sehr groß. Darüber hinaus besteht der Nachteil, dass die Werte der Hilfsgrößen nicht synchron verlaufen mit den leistungsbestimmenden Prozessen im Motor.
- Die Bereitstellung des Leistungssignals erfolgt indirekt durch Messung bestimmter Hilfsgrößen an der Antriebswelle. Hierzu gehören alle Verfahren, die entweder die durch die Torsion der Welle entstehende Dehnung an deren Oberfläche oder deren Verdrehwinkel messen. In beiden Fällen wird die Leistung im Anschluss an die Messung der Hilfsgrößen berechnet.
- Die Bereitstellung des Leistungssignals erfolgt direkt durch Messung des Drehmoments in der Antriebswelle.

Die folgende Betrachtung vergleicht die indirekte mit der direkten Leistungsmessung am bzw. im Antriebsstrang (Ansätze b. und c.) hinsichtlich der dabei zu erzielenden Messunsicherheiten.

2. Grundlagen für die Berechnung der Antriebsleistung

Für die von einer rotierenden Welle übertragene Leistung gilt

$$P = \varpi \cdot M = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot M \quad (1)$$

wobei M das Drehmoment und n die Drehzahl ist. Das Drehmoment ergibt sich aus

$$M = \tau \cdot W_{\text{shaft}} \quad (2)$$

mit τ als Schubspannung und W_{shaft} als Widerstandsmoment der Welle. Die Besonderheit einer nur auf Torsion beanspruchten Welle besteht darin, dass beide Hauptnormalspannungen den gleichen Betrag aufweisen, d.h.:

$$\sigma_1 = -\sigma_2 \quad (3)$$

Da in diesem Fall der Mittelpunkt des Mohrschen Spannungskreises im Ursprung seines Koordinatensystems liegt, entsprechen die Schubspannungen dem Betrag der Hauptnormalspannungen, somit gilt

$$\tau = |\sigma| \quad (4)$$

mit $|\sigma|$ als Betrag der Normalspannung. Des Weiteren gilt

$$W_{\text{shaft}} = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad (5)$$

wenn bei der Antriebswelle von einer zylindrischen Vollwelle ausgegangen wird. Aus (1) ... (5) ergibt sich die Leistung zu

$$P = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot |\sigma| \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi^2 \cdot n \cdot d^3}{480} \cdot |\sigma| \quad (6)$$

Für die Normalspannung einer Torsionswelle gilt

$$|\sigma| = \frac{E}{1 - \mu^2} (1 - \mu) \cdot |\varepsilon_{45^\circ}| \quad (7)$$

wobei E das Elastizitätsmodul, μ die Querkontraktionszahl und $|\varepsilon_{45^\circ}|$ der Betrag der Dehnung auf der Oberfläche der Torsionswelle in Hauptdehnungsrichtung ist. Aus (6) und (7) ergibt sich dann die Leistung zu

$$P = \frac{\pi^2 \cdot n \cdot d^3}{480} \cdot \frac{E}{1 - \mu^2} (1 - \mu) \cdot |\varepsilon_{45^\circ}| \quad (8)$$

Betrachtungsfall A: Ermittlung der Dehnung $|\varepsilon_{45^\circ}|$ mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen

Der hierbei zu berücksichtigende Einzelfehler ergibt sich aus der Toleranz des k-Faktors, siehe Tabelle 1

Betrachtungsfall B: Ermittlung der Dehnung $|\varepsilon_{45^\circ}|$ durch Messung des Verdrehwinkels φ

Hierfür gilt

$$|\varepsilon_{45^\circ}| = \frac{\varphi}{4} \cdot \frac{d}{l} \quad (9)$$

Die hierbei zu berücksichtigenden Einzelfehler ergeben sich aus den Toleranzen des Durchmessers d und der Länge l der Antriebswelle sowie des Messfehlers von φ , siehe Tabelle 1

Mit (8) und (9) ergibt sich dann für die Leistung durch Messung des Verdrehwinkels

$$P = \frac{\pi^2 \cdot n \cdot d^3}{480} \cdot \frac{E}{1 - \mu^2} (1 - \mu) \cdot \frac{\varphi}{4} \cdot \frac{d}{l} \quad (10)$$

3. Wie groß sind die zu berücksichtigenden Toleranzen?

Sämtliche der für (8) sowie die Betrachtungsfälle A und B zu berücksichtigenden Parameter sind mit Toleranzen behaftet. Ihre Abschätzung sieht wie folgt aus:

Parameter	Formelzeichen	ca. Toleranz
Drehzahl	n	0,1%
Wellendurchmesser	d	0,01%
E-Modul	E	3 ... 5%
Querkontraktionszahl	μ	3 ... 5%
k-Faktor	k	1%
Verdrehwinkel	φ	0,1%
Länge der Torsionswelle	l	0,01%

Tabelle 1: Abschätzung der Toleranzen

Beim Fall A kommen die Toleranzen der Positionierung der Dehnungsmessstreifen sowie der durch fehlende oder eingeschränkte Temperaturkompensation entstehende Temperaturfehler hinzu. Die Größe dieser Toleranzen wird durch die Qualität der DMS-Installation bestimmt und soll deshalb hier nicht weiter betrachtet werden.

Aus Tabelle 1 ist ohne weitere Fehlerrechnung ersichtlich, dass der Gesamtfehler der oben beschriebenen Messeinrichtungen (Ansatz b) hauptsächlich durch die Toleranz von E und μ bestimmt wird. Er kann damit nicht unter 3 % liegen, ist jedoch in der Praxis meist noch deutlich größer.

4. Wie lässt sich die Messunsicherheit des Leistungssignals verringern?

Die große Messunsicherheit der im Ansatz b genannten Verfahren lässt sich nur dann signifikant verringern, wenn der mit der Messeinrichtung ausgerüstete Wellenabschnitt auf das zu erwartende maximale Drehmoment kalibriert wird. Hierzu muss mit Hilfe einer Belastungseinrichtung das Drehmoment schrittweise bis zum Maximum in den Wellenabschnitt eingeleitet und die bei jedem Kalibrierschritt entstehenden Ausgangssignale der Messeinrichtung gemessen werden. Bei annähernd linearer Kennlinie sowie ausreichender Anzahl von Messpunkten erreicht man damit eine Messunsicherheit, die in etwa der der Kalibriereinrichtung entspricht.

In der Praxis wird sich dieses Verfahren allerdings nur schwer realisieren lassen. Der Transport des Wellenabschnitts eines Großantriebs mit installierter Messeinrichtung zur Kalibrieranlage oder umgekehrt dürfte schwierig sein. Hinzu kommt die komplizierte – für die Lasteinleitung jedoch unabdingbare – mechanische Adaptierung des Wellenabschnitts auf die Kalibrieranlage.

Der Ausweg aus diesem Dilemma besteht darin, das Drehmoment statt am Antriebsstrang im Antriebsstrang zu messen (Ansatz c). Hierzu wird zwischen Antrieb und Abtrieb ein Drehmoment-Messflansch montiert, der bereits in der Designphase berücksichtigt werden sollte.

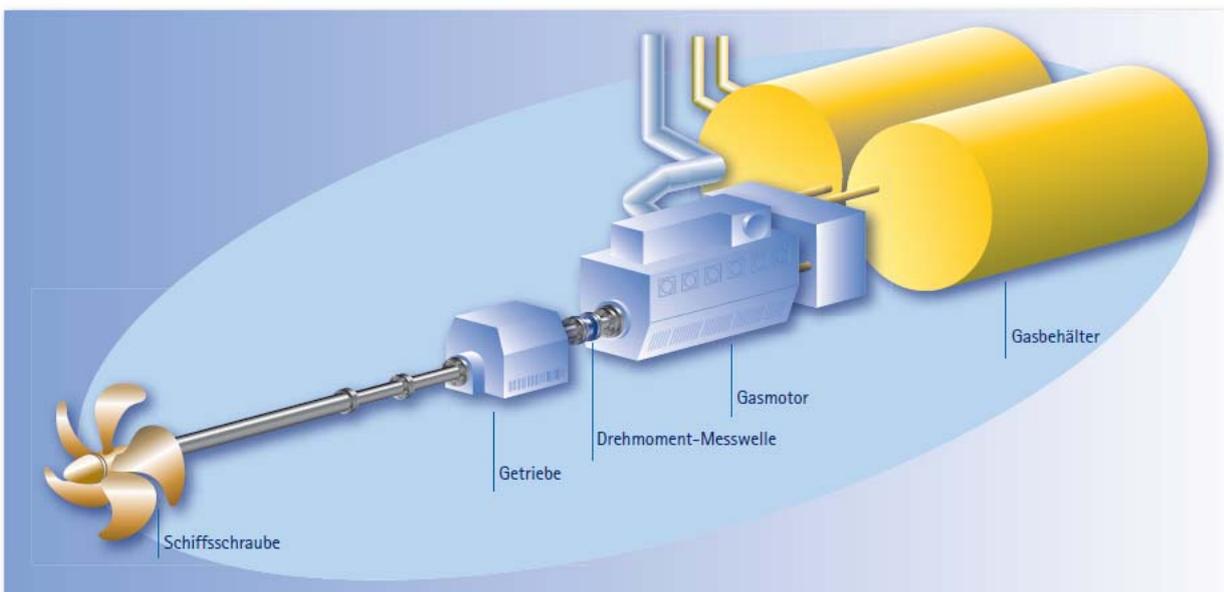


Bild 1: Einbau eines Drehmoment-Messflansches in einen Antriebsstrang



*Bild 2: Drehmoment-Messflansch mit einem Nennmessbereich von 2 MNm
Foto: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*

Die Leistung ergibt sich dann gemäß (1) aus den direkt gemessenen Größen Drehmoment und Drehzahl.

Der Drehmoment-Messflansch wird vorab vom Lieferanten bis zu seinem Nennmessbereich oder einem Teil davon kalibriert und entsprechend zertifiziert. Je nach Typ und Größe des Messflansches ergeben sich dadurch Messunsicherheiten zwischen 0,03 % und 0,1 % des Nenn- bzw. Teilmessbereichs. Diese Messunsicherheit ist bereits auf das Drehmoment bezogen und nicht auf eine Hilfsgröße wie z.B. Dehnung oder Verdrehwinkel. Auf Grund der eingebauten Temperaturkompensation sind die für den Messflansch angegebenen Parameter über einen weiten Temperaturbereich gültig.

Der Einbau, der Austausch und die Rekalibrierung eines Drehmoment-Messflansches sind relativ einfach. Darüber hinaus besitzt er einige weitere Eigenschaften, die – je nach Anwendung – einen hohen zusätzlichen Nutzen darstellen:

- Große Auflösung (16 ... 19 bit) des Drehmomentsignals, ermöglicht die Erfassung kleinster Amplitudenänderungen
- Große Bandbreite (bis 6 kHz) des dynamischen Drehmomentsignals, ermöglicht die Erfassung hochdynamischer Vorgänge im Antriebsstrang (z.B. Torsionsschwingungen).
- Kurze Signallaufzeit, ermöglicht die sehr schnelle Regelung bei veränderten Lastbedingungen
- Robustes Design und große Signalstabilität, ermöglicht den Einsatz auch bei schwierigen Umgebungsbedingungen
- Sehr gute Werte für die Wiederholbarkeit und die Langzeitstabilität, ermöglicht den Einsatz über einen langen Zeitraum ohne Korrekturen
- Darstellung charakteristischer Drehmomentverläufe für bestimmte Zyklen, ermöglicht die Bereitstellung von Daten für Condition Based Maintenance (CBM)

Literatur:

Karl Hoffmann
Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen
Herausgeber: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (1987)

Horst Kuchling
Taschenbuch der Physik
17. Auflage (2007)
Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag

Autoren:

Eberlein, Dirk
Product and Application Manager, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

Kleckers, Thomas
Product and Application Manager, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

Weissbrodt, Klaus
Product and Application Manager, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH